

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ, МОЛОДЕЖИ И  
СПОРТА УКРАИНЫ  
ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

## **КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**

по курсу

### **"ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ"**

Для студентов, обучающихся по направлению  
6.050201 "Системная инженерия"  
(для дневной и заочной форм обучения)

Рассмотрено  
на заседании кафедры  
автоматики и телекоммуникаций  
Протокол № 4 от 12.04.2012г.

Утверждено на заседании учебно-  
издательского совета ДонНТУ  
Протокол № 2 от 19.04.2012г.

Донецк, ДонНТУ 2012 р.

УДК 62-52 (071)

Конспект лекций по курсу "Основы автоматизации производственных процессов", (для студентов, обучающихся по направлению подготовки 6.050201 "Системная инженерия" (СУА) дневной и заочной форм обучения)/  
Составители: Р.В. Федюн, В.А.Попов. - Донецк: ДонНТУ, 2012.- 188 с.

Составители:

Р.В. Федюн, доц.

В.А.Попов, доц.

Рецензенты

В.М. Шумяцкий, доц.

Н.В. Жукова, доц.

Ответственный за выпуск

В.Я.Воропаева, зав. каф.

## 1. ИСТОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Использование обратной связи для целей управления имеет увлекательную историю. Впервые принцип обратной связи был применен при создании поплавковых регуляторов в Греции за 300 лет до н. э. Такой регулятор был использован Ктесибием в водяных часах.

Время измерялось с помощью капель воды, падающих с постоянной скоростью через сопло из резервуара. Чтобы обеспечить постоянную скорость истечения воды, необходимо было поддерживать постоянный уровень воды в резервуаре, а для этого требовалось автоматическое регулирование. Интересно, что задача поддержания постоянного уровня жидкости в сосуде до сих пор сохраняет актуальность, и мы занимаемся проектированием соответствующих систем регулирования.

Одна из возможных конструкций водяных часов показана на рис. 1.1.

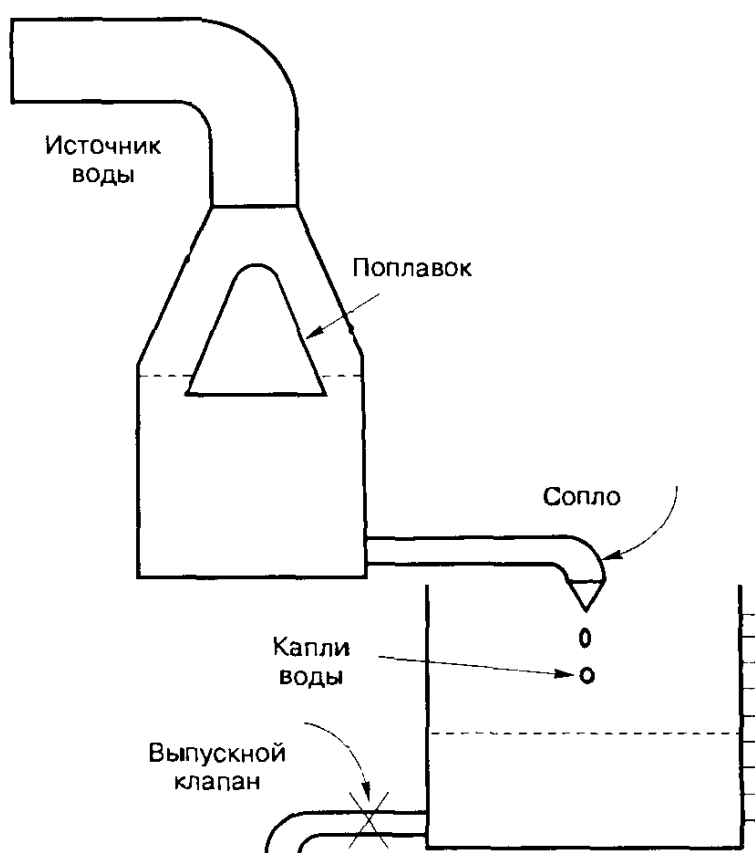


Рисунок 1.1. Простейшие водяные часы

Плавающий клапан в верхнем сосуде, одновременно выполняющий роль датчика и исполнительного устройства системы регулирования, служит для поддержания постоянного уровня воды в этом сосуде. Когда уровень воды соответствует заданному значению, клапан закрывает питающую магистраль. Если же уровень меньше заданного, то клапан открывает магистраль, что приводит к повышению уровня. Обратите внимание, что действие этого механизма аналогично работе сливного бачка в туалете. Вода через сопло капает в нижний сосуд, снабжённый проградуированной шкалой. Уровень воды в нём точно указывает промежуток времени с того времени, когда сосуд был пуст. Фактически накопление воды в нижнем резервуаре является операцией интегрирования (суммирования). Аналогичная процедура (суммирование) используется при численном интегрировании в цифровых компьютерах. Эта процедура использовалась 22 столетия назад, и в наши дни данный принцип лежит в основе работы современных компьютеров. Действительно, здесь трудно изобрести что-то новое.

В масляном фонаре, изобретенном Филоном приблизительно в 250 году н.э., поплавковый регулятор позволял поддерживать постоянный уровень масла, игравшего роль горючего. Херон из Александрии, живший в первом столетии н. э., написал книгу под названием *Пневматика*, в которой привел несколько чертежей поплавковых регуляторов уровня воды.

Первой системой с обратной связью, изобретенной в современной Европе, был регулятор температуры Корнелиуса Дреббеля (1572-1633) из Голландии. Регулятор температуры, который он использовал в своих химических опытах и в инкубаторах для выведения цыплят. Этот регулятор содержал устройство, позволявшее выпускать нагретый воздух из камеры, когда температура в ней достигала желаемого значения. Его можно сравнить с уже известной нам системой автоматического регулирования температуры в жилом помещении; разница лишь в том, что в этой системе нагретый воздух начинал циркулировать, когда температура опускалась ниже заданного значения.

Дени Папен (1647-1712) в 1681 г. изобрел первый регулятор давления для паровых котлов, работавший по принципу предохранительного клапана.

Американец Уильям Генри (1729-1786) изобрёл регулятор температуры, в котором использовалась заслонка, автоматически управлявшая сгоранием топлива и, следовательно, температурой. Принцип действия датчика температуры и исполнительного устройства был основан на давлении нагретого воздуха при его расширении. Расширение воздуха приводило к закрытию заслонки и уменьшению сгорания топлива, а сжатие воздуха стремилось открыть заслонку.

Многими изобретателями были внесены усовершенствования в конструкцию поплавковых регуляторов уровня жидкости. Это сделали Джеймс Бриндли в 1758 г., Сат Томас Вуд в 1784 г. (оба — в США) и И.И.Ползунов в 1763 г. в России. Усовершенствования регуляторов давления для паровых котлов сделали Дени Папен (1647-1712), Рой Делап в 1799 г. и Мэтью Мюррей в 1799 г.

В России первой в истории системой с обратной связью был поплавковый регулятор уровня воды в паровом котле, изобретенный И. Ползуновым в 1765 г. (рис. 1.2). С помощью поплавка измерялся уровень воды, а рычажный механизм воздействовал на клапан, регулировавший подачу воды в котел.

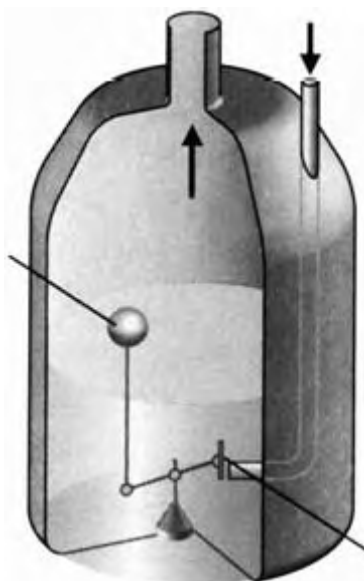


Рисунок 1.2. Поплавковый регулятор уровня воды в паровом котле

Главным изобретением в области управления скоростью ветряных мельниц и паровых машин был центробежный регулятор Томаса Мида (1787 г.). В 1788 г. Мэтью Бот и Джеймс Уатт предложили конструкцию центробежного регулятора скорости, изображённую на рис. 1.3.

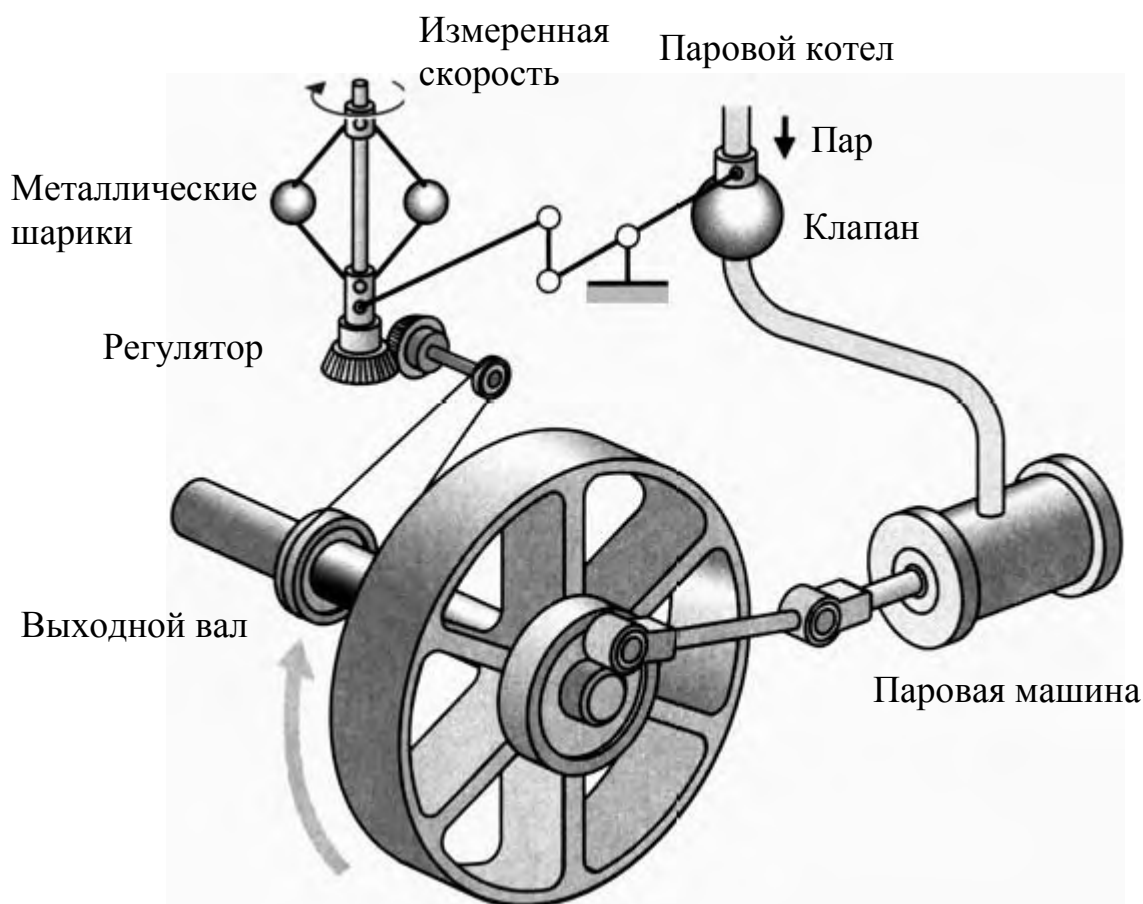


Рисунок 1.3. Центробежный регулятор скорости

При увеличении скорости вращения машины шарики за счёт центробежной силы расходились, что, в свою очередь, приводило к перемещению втулок вверх по оси машины. При этом с помощью клапана, управляемого рычажным механизмом, уменьшалась подача пара и, следовательно, скорость вращения. Уменьшение скорости вращения приводило к обратному эффекту.

Период до 1868 г. характеризовался появлением систем автоматического управления, главным образом, благодаря интуиции и изобретательству. Попытки увеличить точность управления приводили к

медленному затуханию колебаний во время переходных процессов и даже к потере системой устойчивости. Именно тогда и возникла необходимость разработки теории автоматического управления. Дж. Максвелл, используя дифференциальное уравнение как модель регулятора, заложил математические основы теории управления. Его работа была посвящена исследованию влияния изменения параметров системы на ее поведение. В те же годы И. А. Вышнеградский сформулировал математическую теорию регуляторов.

Чтобы устранить неустойчивость, потребовалось создание математических моделей физических устройств, т.е. уравнений, решение которых описывало бы поведение этих устройств. В результате появились современные математические методы моделирования, анализа и синтеза систем управления. В разработку этих методов внесли свой вклад очень многие ученые. Пьер Симон Лаплас (1749-1827) изобрёл преобразование (названное впоследствии его именем), являющееся основой большинства методов анализа и синтеза систем управления. Из других учёных отметим Исаака Ньютона (1642-1727) — математическое моделирование и анализ; Брука Тейлора — математический анализ (ряды Тейлора); Джеймса Клерка Максвелла (1831-1879) — математическое моделирование и анализ; Эдварда Джона Рауса (1831-1907) — критерий Рауса; Оливера Хевисайда (1850—1925) — математический анализ; Чарльза П. Стейнметца (1865-1923) — анализ частотных характеристик с помощью комплексных переменных; Гарри Найквиста (1889-1976) — критерий Найквиста; Хендрика У. Боде (1905-1982) — диаграмма Боде; Гарольда С. Блэка (1898-1981) — усилители с отрицательной обратной связью; У. Р. Эванса — корневого годографа; и Джона фон Неймана (1903-1957) — принцип действия цифрового компьютера. Этот список ни в коей мере не является исчерпывающим как в персональном плане, так и в плане достижений в отдельных областях. Он лишь призван дать читателю сведения о том, какие идеи и в какое время разрабатывали перечисленные выше учёные. Список современных учёных,

внёсших весомый вклад в развитие теории автоматического управления, был бы слишком длинным и, конечно, далеко не бесспорным.

Перед Второй мировой войной развитие теории и практики управления в США и Западной Европе шло по несколько иному пути, нежели в России и Восточной Европе. В США в это время основные усилия были направлены на применение обратной связи в системах телефонии и электронных усилителях. Главные достижения здесь принадлежат Боде, Найквисту и Блэку, которые предложили описывать работу усилителей с обратной связью с помощью частотных характеристик. Напротив, в бывшем Советском Союзе известные математики и механики опережали западных ученых в области собственно теории управления, причем акцент делался на анализ систем во временной области с использованием дифференциальных уравнений.

Приводимые ниже два примера показывают, как с помощью обратной связи можно улучшить свойства системы.

Гарольд С. Блэк в 1921 г. окончил Вустерский политехнический институт и поступил на работу в фирму «Белл лабораториз» корпорации AT&T. В то время главной задачей, над которой работала фирма, было улучшение качества телефонной связи и используемых при этом усилителей сигналов. Блэку было поручено заняться линеаризацией и стабилизацией усилителей, устанавливаемых в тракте передачи голосовых сообщений на расстояния в тысячи миль.

Блэк вспоминает:

Было утро вторника 2 августа 1927 г., когда во время переправы на пароме через Гудзон по дороге на работу мне внезапно в голову пришла мысль об использовании в усилителе отрицательной обратной связи. Более 50 лет я размышлял, как и почему возникла эта идея, но даже и теперь я не могу сказать, как всё произошло. Я знаю только то, что после нескольких лет работы над проблемой я неожиданно понял, что если подать сигнал с выхода усилителя на его вход, причем в обратной фазе, и воспрепятствовать самовозбуждению усилителя (свисту, как мы позже назвали этот эффект), то



я получу именно то, что хотел — способ устранения искажений выходного сигнала. Я раскрыл утреннюю газету *Нью-Йорк Таймс* и на полях набросал соответствующую схему, дополнив ее формулой для коэффициента усиления с учетом обратной связи. Я подписался под этой схемой, а 20 минут спустя, когда я прибыл в лабораторию на Уэст-стрит, 463, ее также заверил своей подписью ныне покойный Эрл К. Блессинг.

Я представил себе, что это решение может привести к разработке усилителей с высокой степенью линейности (при отрицательной обратной связи от 40 до 50 дБ), но оставался один важный вопрос: как я узнал, что смогу избежать самовозбуждения подобной схемы в широком частотном диапазоне, хотя многие вообще сомневались в ее устойчивости? Моя уверенность основывалась на работах, которые я проделал два года назад, занимаясь исследованием оригинальных осцилляторов, и три года назад, когда проектировал оконечные каскады и разрабатывал математические основы телефонной системы для междугородных переговоров.

Другим примером инженерного решения проблемы управления является создание системы наведения орудия, выполненное Дэвидом Б. Паркинсоном из «Белл Телефон Лабораториз». Весной 1940 г. 29-летний инженер Паркинсон занимался модернизацией автоматического самопишущего прибора, предназначенного для регистрации на диаграммной бумажной ленте изменяющегося напряжения. Самым капризным элементом в приборе был маленький потенциометр, с помощью которого через исполнительный механизм производилось управление перемещением пера самописца.

В мыслях у Паркинсона было орудие, которое чувствовало бы приближение самолета и уничтожало его. Вот что описывает Паркинсон:

После трех или четырех выстрелов один из членов орудийного расчета улыбнулся и попросил меня подойти поближе. Когда я это сделал, он указал мне на левую цапфу орудийной турели, и я увидел, что там установлен такой же потенциометр, что и в моём самописце!

На следующее утро Паркинсон воплотил свои мечты в реальность:

«Если мой потенциометр был способен управлять перемещением пера самописца, то нечто похожее могло бы, с соответствующими техническими изменениями, управлять наводкой зенитного орудия».

После напряженной работы в этом направлении вооруженным силам США 1 декабря 1941 г. была предложена инженерная модель соответствующего устройства. В начале 1943 г. было налажено промышленное производство подобных систем, и на вооружение было принято около 3000 систем орудийной наводки. На вход регулятора поступал сигнал от радиолокатора о текущем положении самолета, а в системе управления вычислялось его будущее положение.

Большой толчок развитию теории и практики автоматического управления дала Вторая мировая война, когда возникла потребность в создании автопилотов, систем орудийной наводки, станций радарного слежения и других устройств военного назначения, работающих на основе принципа обратной связи. Сложность систем военного назначения и ожидаемые выгоды от их применения побудили расширить круг технических средств и обострили интерес к системам управления и разработке новых методов их синтеза и анализа. До 1940 г. в большинстве случаев синтез систем управления проводился методом проб и ошибок и являлся своего рода искусством. В 40-е годы значительно выросло число аналитических методов синтеза, и теория управления по праву стала настоящей инженерной дисциплиной.

После Второй мировой войны в теории управления по-прежнему преобладали частотные методы, но наряду с этим возросла роль преобразования Лапласа и комплексной  $p$ -плоскости. В 50-е годы акцент в теории управления был сделан на разработку методов, связанных с использованием  $\wedge$ -плоскости, в частности, метода корневого годографа. В 80-е годы обычным делом стало применение цифровых компьютеров в системах управления. В настоящее время в США в системах прямого цифрового

управления задействовано более 400000 компьютеров, благодаря чему появилась возможность одновременного измерения и управления многими переменными.

Запуск первого искусственного спутника Земли и начало космической эры дали новый толчок развитию техники управления. Возникла необходимость создания сложных, высокоточных систем управления для ракет и космических зондов, а возросшие требования к точности этих систем и желание минимизировать массу спутников обусловили повышенный интерес к теории оптимального управления. Именно поэтому в последние два десятилетия стали популярными методы анализа и синтеза во временной области, разработанные Ляпуновым, Минорским и другими учеными, в особенности Л. С. Понтрягиным в СССР и Р. Беллманом в США. Теперь не вызывает сомнения, что при решении задач анализа и синтеза систем одновременно должны использоваться как частотные, так и временные методы.

*Избранные этапы развития теории и систем автоматического управления:*

**1769** Дж. Уатт разработал паровую машину с регулятором. Это считается началом Промышленной Революции в Великобритании. За время Промышленной Революции достигнуты большие успехи в механизации процессов, считающейся предшественницей автоматизации.

**1800** Эли Уитни предложил концепцию взаимозаменяемости деталей при производстве мушкетов. Это считается началом эпохи массового производства.

**1868** Дж. Максвелл создал математическую модель регулятора для паровой машины.

**1913** Генри Форд на своем предприятии внедрил механизированную сборку автомобилей.

**1927** Г. Боде занимается анализом усилителей с обратной связью

**1932** Г. Найквист разработал метод анализа устойчивости систем

**1952** В Массачусетском технологическом институте разработаны станки с числовым программным управлением.

**1954** Джорж Девол создал «устройство для переноса предметов», считающееся прообразом промышленных роботов.

**1960** На основе идей Девола создан первый робот «Юнимейт».

В **1961** г. такие роботы начали применяться для обслуживания штамповочных станков.

**1970** Предложены модели систем в переменных состояниях; разработана теория оптимального управления

**1980** Подробно исследуются робастные системы управления

**1990** Предприятия, работающие на экспорт, широко внедряют автоматизацию

**1994** Системы управления с обратной связью устанавливаются в автомобилях.

В производстве появляется спрос на надежные робастные системы управления

### **История развития компьютерного управления**

Первый пример практического применения управляющей ЭВМ относится к 1959 году; он связан с работой нефтехимического завода компании "Техасо" в городе Порт-Артур, штат Техас. Компания "Техасо" выполнила эту пионерскую работу совместно с производителем ЭВМ — компанией Thomson RamoWoolridge. Компьютер RW300, построенный на электронных лампах, следил за расходом, температурой, давлением и концентрацией на нефтеперегонном производстве, а также рассчитывал необходимые управляющие воздействия на основе обработки входной информации и затем либо самостоятельно изменял опорные значения для аналоговых регуляторов, либо указывал оператору, какие управляющие воздействия нужно выполнить вручную. Эта ЭВМ по сравнению с современными компьютерами имела очень скромные возможности: время

сложения составляло 1 мс, а умножения — около 20 мс. Кроме того, она имела очень невысокую надежность — среднее время между отказами в лучшем случае составляло от нескольких часов до нескольких дней.

Вначале все факторы были против применения управляющих компьютеров. Чтобы оправдать стоимость системы управления в несколько миллионов долларов, капиталовложения в производство должны были быть по крайней мере на порядок больше. Это означало, что сам процесс должен был быть очень сложным, как, например, в случае химического завода. Другим ключевым фактором было — и остается — структурирование проблемы управления как необходимое предварительное условие внедрения компьютерного управления.

Экономическая эффективность была не единственной проблемой. Надежность аппаратной части ЭВМ была низкой из-за использования электронных ламп. Программы создавались в машинном коде и использовали скромный объем памяти до последнего бита. И все же эти новаторские усилия были поддержаны многими производителями компьютеров, которые увидели огромный потенциальный рынок для новых приложений.

Компьютерное управление — это область, в которой с самого начала существовало необычайно конструктивное взаимодействие между теорией и практикой. Как описано далее, компьютерное управление имеет свои специфические черты. Известные математические методы, базирующиеся на анализе непрерывных функций, напрямую не применимы для проектирования систем управления на базе цифровых компьютеров. Поэтому потребовалось создать специальную теорию дискретного управления. Счастливым совпадением стало развитие в 1960-е годы американской космической программы и особенно проекта "Аполлон", который послужил катализатором для теоретических и практических разработок в области компьютерного управления.

Важный шаг был сделан в 1962 году, когда английская компания ICI (Imperial Chemical Industries) представила концепцию прямого цифрового

управления. Первоначально идея заключалась в замене нескольких аналоговых контуров управления центральным компьютером. Огромная и дорогостоящая панель управления с сотнями аналоговых регуляторов и самописцев заменялась несколькими терминалами. Компьютер численно моделировал аналоговые регуляторы способом, который мало отличался от сегодняшних решений.

Принцип прямого цифрового управления применяется во многих современных промышленных компьютерных системах. Причина его успеха в том, что задачи управления уже были описаны и структурированы для аналоговой техники. Поэтому для таких приложений риск был меньше, чем для инновационных разработок, где цели компьютерного управления не полностью осмыслены и не определены должным образом. Очевидный недостаток прямого цифрового управления — существенная зависимость надежности системы от центрального компьютера. Однако за дополнительную плату можно было установить второй компьютер, который бы обеспечивал работоспособность системы в случае отказа первого. Выпущенный в 1962 году управляющий компьютер Ferranti-Argus был гораздо совершеннее модели 1959 года — время сложения и умножения уменьшилось в десятки раз, а показатель надежности возрос не менее чем на порядок.

Изобретение в 1960-х годах транзистора дало заметный толчок развитию компьютерных приложений. Стоимость единицы вычислительной мощности мини-компьютера на транзисторной элементной базе была на порядок меньше, чем у больших ЭВМ (*mainframe*), хотя стоимость самого мини-компьютера все еще превышала 100 000 долларов. Так или иначе, компьютерное управление стало экономически целесообразным для небольших и не очень сложных производств. Появилась возможность разместить мини-компьютер поблизости от производственных помещений, и поэтому такие ЭВМ стали популярными для автоматизации технологических процессов и испытательных установок. Согласованное влияние трех главных

факторов — совершенствование технической базы компьютеров, экономическая целесообразность их применения в управлении относительно простыми процессами и развитие теории управления — привело к широкому распространению компьютерного управления.

Практически каждое десятилетие появлялись новые технологии, которые приводили к значительному увеличению производительности и снижению цены компьютеров по сравнению с предшествующим поколением. Мощные одноплатные микрокомпьютеры появились на рынке в середине 1970-х годов, и сегодня даже простейший регулятор экономически выгодно создавать на основе цифровых устройств. Современные персональные компьютеры намного превосходят мини-компьютеры 1960-х и 1970-х годов — типичная конфигурация, как правило, включает 16-или 32-разрядный центральный процессор (ЦП), мегабайты оперативной памяти (оперативное запоминающее устройство — ОЗУ), гигабайты дисковой памяти, — а стоят несравнимо дешевле первых моделей ЭВМ.

В настоящее время в промышленном управлении популярны компьютерные системы, использующие так называемую открытую шинную архитектуру, где акцент сделан не на конкретные аппаратные компоненты, а на организацию интерфейса, который в этом случае позволяет подбирать их исходя из требований приложения и максимальной эффективности использования ресурсов компьютера.

С другой стороны, производительность компьютера — это еще не все. Эффективность системы зависит не только от управляющего компьютера. Бортовая ЭВМ корабля первой лунной экспедиции "Аполло-11" (1969 год) имела только 64 Кбайт оперативной памяти, а о жестких дисках не могло быть и речи. Сегодня никто не воспримет такую машину всерьез, но если вспомнить результат, достигнутый с помощью этой ЭВМ, то напрашивается очевидный вывод — основное внимание нужно уделять главной цели технического процесса, а не мощности компьютера. Высокая производительность не может быть аргументом сама по себе, напротив, она

должна рассматриваться в свете динамики и сложности контролируемого процесса. Медленный компьютер прекрасно справится с управлением медленным процессом, например химическим или биологическим.

В системах цифрового управления сравнительно легко вводятся новые стратегии, поскольку можно полностью изменить образ действий компьютера, заменив программу, без перепроектирования и переоснащения всей системы. Поэтому системы цифрового управления представляют собой не просто новый способ применения отработанных принципов, но и совершенно новую технологию, обладающую большой гибкостью и новыми возможностями. Понимание природы процесса, динамических свойств системы и теории управления - это необходимые слагаемые успеха компьютерного управления, но они представляют едва ли половину картины.

Главная трудность — структурировать все решения в терминах аппаратного и программного обеспечения и обмена информацией.

Необходимо иметь в виду, что чрезмерное и одностороннее увлечение компьютерными технологиями может заслонить собой фундаментальные проблемы. Сегодня, после сорока лет применения компьютеров, существует достаточный опыт, чтобы задаться вопросом о реальных преимуществах, которые они принесли в промышленность и административное управление. В западных странах в 1950-60-х годах, еще до широкого распространения ЭВМ, один работающий мог содержать целую семью, включая выплату кредита за дом. В типичной современной семье по крайней мере уже двое должны работать, чтобы поддержать стиль жизни, удовлетворяющий средним запросам, уровень которых продолжает повышаться. То, что два десятилетия назад представлялось золотым веком, обусловленным повсеместным внедрением компьютеров и автоматизации, сильно потускнело сегодня благодаря новым проблемам — от безработицы до загрязнения окружающей среды. То же самое может произойти с сегодняшней чрезмерно высокой оценкой Интернета и компаний, основной бизнес которых построен на Интернет-технологиях (виртуальные магазины и



т. д.). Нисколько не принижая их достоинства и преимущества, следует отметить, что они не дают надежных и эффективных способов решения реальных проблем. Чрезмерный упор на использование компьютеров, особенно с причудливыми картинками и звуком, может отвлечь внимание от действительно серьезных задач.

## 2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

*Управление* каким-либо объектом (объект управления будем обозначать ОУ) есть воздействие на него в целях достижения требуемых состояний или процессов. В качестве ОУ может служить самолет, станок, электродвигатель и т.п. Управление объектом с помощью технических средств без участия человека называется *автоматическим управлением*. Совокупность ОУ и средств автоматического управления называется *системой автоматического управления (САУ)*.

*Основной задачей автоматического управления* является поддержание определенного закона изменения одной или нескольких физических величин, характеризующих процессы, протекающие в ОУ, без непосредственного участия человека. Эти величины называются *управляемыми величинами*. Если в качестве ОУ рассматривается хлебопекарная печь, то управляемой величиной будет температура, которая должна изменяться по заданной программе в соответствии с требованиями технологического процесса.

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.

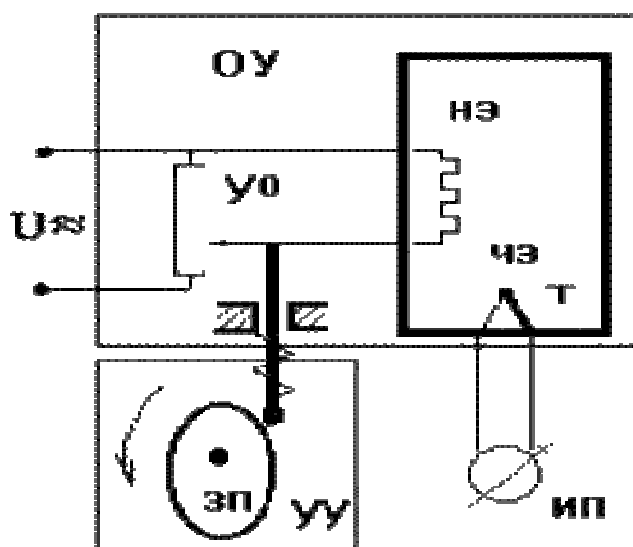


Рисунок 2.1. Принципиальная схема САУ хлебопекарной печи

Технология выпечки требует изменения температуры в печи по заданной программе, в частном случае требуется поддержание постоянной температуры. 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 термодпары, тахометры, рычаги, электрические мосты, датчики давления, деформации, положения и т.п. В нашем случае это термодпара, 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 может использоваться электрические или поршневые 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  $u_0(t)=const$ . 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.

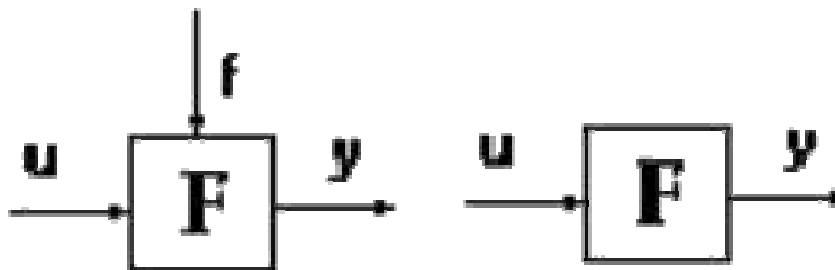


Рисунок 2.2. Функциональные звенья САУ

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.

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

Система автоматического управления – это совокупность объекта управления и автоматического управляющего устройства, взаимодействующих между собой.

Рассмотрим схему взаимодействия объекта управления (ОУ), управляющего устройства (УУ) и внешней среды.

Физическая величина  $y(t)$ , которая характеризует состояние объекта и которую преднамеренно изменяет или поддерживает постоянной в процессе управления, называется управляемой величиной. Для обозначения этого понятия используют также термины «управляемая координата» и «управляемая переменная». Управляемой величиной может служить

физическая величина, которая либо изменяется (непосредственно на выходе объекта), либо вычисляется по нескольким измеряемым величинам.

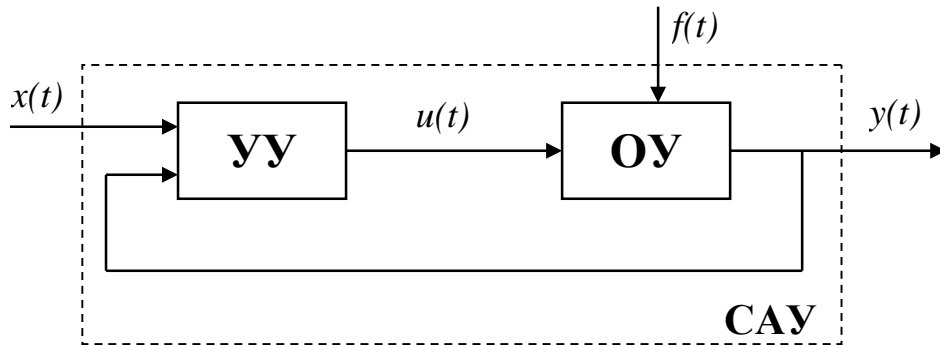


Рисунок 2.3. Функциональная схема САУ

Управляемая величина является выходной величиной объекта и зависит от двух входных воздействий: возмущающего  $f(t)$  и управляющего  $u(t)$ .

Алгоритм управления в общем случае выражает зависимость управляющего воздействия  $u(t)$  от задающего воздействия  $x(t)$ , управляемой величины  $y(t)$  и возмущающих воздействий  $f(t)$  и может быть представлен в виде:

$$u(t) = A_y[x(t), y(t), f(t)].$$

Воздействия  $f(t)$  и  $x(t)$  являются внешним для рассматриваемой системы, а воздействие  $u(t)$  – внутренним.

### 3. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

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

#### 3.1. Принцип разомкнутого управления

Рассмотренную САУ хлебопекарной печи (рис.2.1) можно изобразить функциональной схемой (рис.3.1). В данной схеме заложен принцип разомкнутого управления, сущность которого состоит в том, что программа управления жестко задана задающим устройством; управление не учитывает влияние возмущений на параметры процесса.

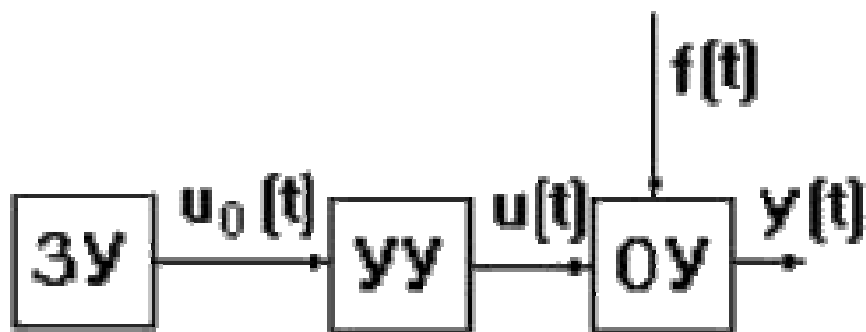


Рисунок 3.1. Функциональная схема принципа разомкнутого управления

В системах такого типа отсутствует контроль управляемой величины и возмущающего воздействия. Управляемая величина является функцией только от задающего воздействия.

Системы такого типа достаточно эффективны лишь при условии, что влияние возмущений на управляемую величину невелико и все элементы разомкнутой цепи обладают стабильными характеристиками.

Рассмотрим еще один пример системы, работающей на этом принципе.

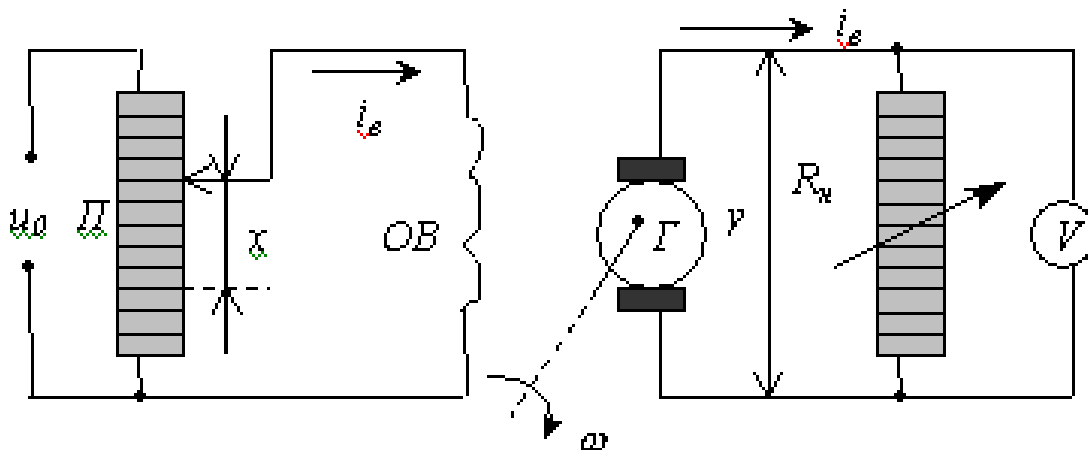


Рисунок 3.2. Схема генератора напряжения без обратной связи

На рис.3.2 изображена схема управляемого генератора постоянного напряжения, работающего следующим образом. С помощью потенциометра П снимается напряжение  $x$ , питающее обмотку возбуждения ОВ генератора постоянного напряжения Г, ротор которого вращается с постоянной скоростью  $\omega$ . Взаимодействие магнитного потока, создаваемого обмоткой возбуждения и обмоткой ротора, приводит к появлению ЭДС  $e$  на щетках генератора. Полагая нагрузку выходной цепи генератора активным сопротивлением  $R_n$ , получим на нем напряжение  $u$ , контролируемое вольтметром V. При всех постоянных факторах, таких, как сопротивление нагрузки  $R_n$ , скорость вращения ротора  $\omega$  и др., напряжение  $u$  будет зависеть от величины  $x$ . Управление выходной величиной  $u$  будет осуществляться с помощью задающего воздействия  $x$ .

Предположим, что мы установили требуемое значение напряжения  $u$ , однако после этого величина нагрузки  $R_n$ , скачкообразно изменилась (рис.3.3).

Это приведет к тому, что при прежней величине  $x$  выходное напряжение  $u$  изменится, так как оно зависит от сопротивления нагрузки.

Падение этого напряжения никак не отразится на характере управления. Таким образом, при прежнем значении задающего воздействия  $x$

выходная координата  $y$  изменится за счет изменения внешнего воздействия (нагрузки).

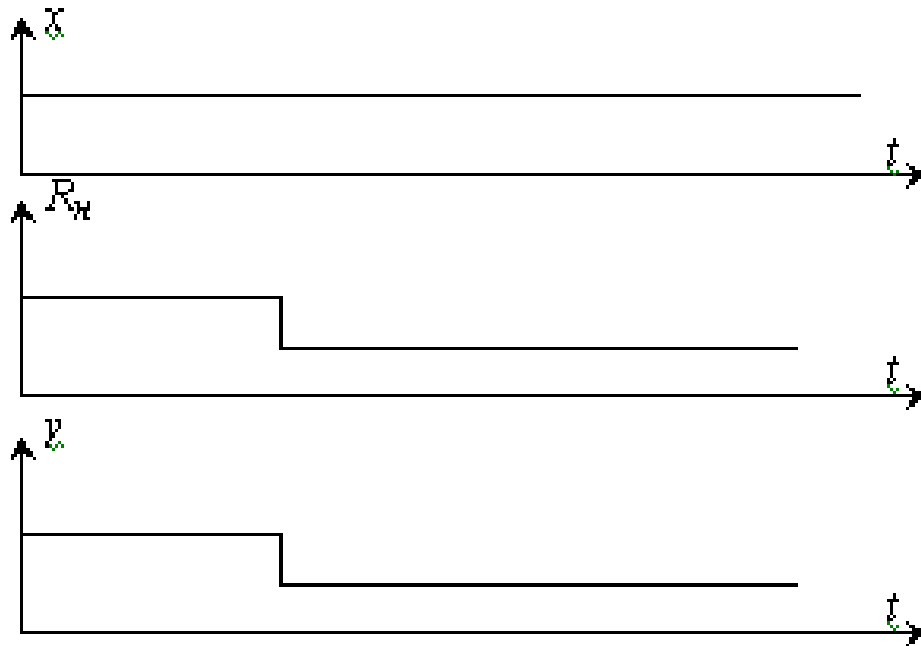


Рисунок 3.3. Характер изменения переменных у генератора без обратной связи

Этот пример показывает, что в системах, работающих по разомкнутому циклу, нежелательные отклонения выходного процесса управляющим устройством не учитываются и не компенсируются. Для улучшения качества системы можно было бы измерять величину сопротивления нагрузки и в соответствии с этим изменять величину  $x$ . Очевидно, что техническая реализация подобного способа сложна, тем более, что ряд возмущающих воздействий измерить невозможно или измерения могут проводиться с большими погрешностями. Рассмотренный пример позволяет утверждать, что качество систем, работающих по разомкнутому циклу, как правило, невысокое, а возможности измерения возмущающих воздействий для компенсации их вредного влияния ограничены. По этим причинам принцип управления по разомкнутому циклу нашел ограниченное применение на практике.



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

### 3.2. Принцип компенсации возмущающего воздействия

Если возмущающий фактор искажает выходную величину до недопустимых пределов, то применяют принцип компенсации (рис.3.4, КУ-корректирующее устройство).

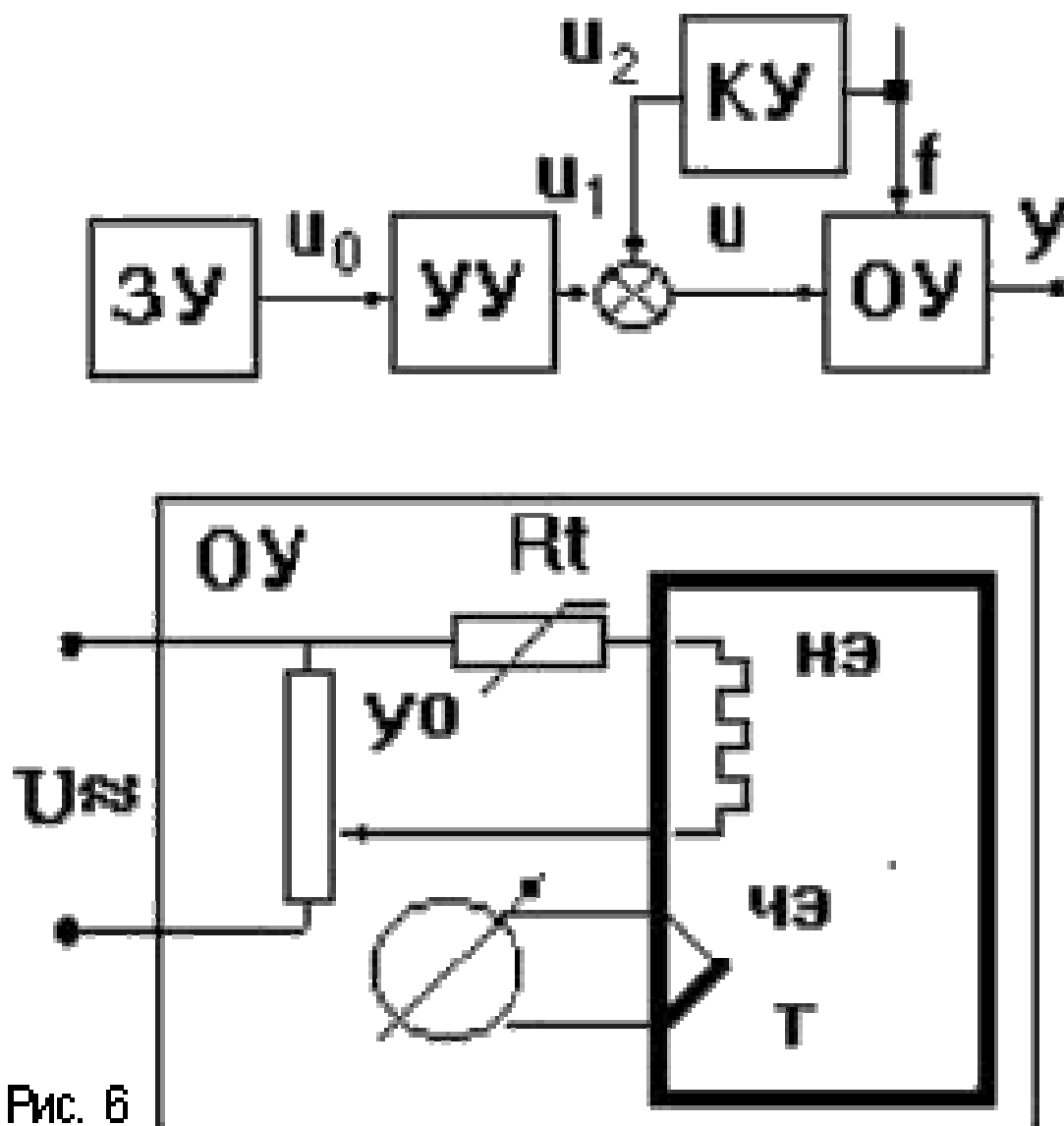


Рисунок 3.4. Реализация принципа компенсации

Пусть  $y_0$  - значение выходной величины, которое требуется обеспечить согласно программе. На самом деле из-за возмущения  $f$  на выходе регистрируется значение  $y$ . Величина  $e = y_0 - y$  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.

*Достоинства принципа компенсации:*

- быстрота реакции на возмущения – влияние возмущения компенсируется еще до того, как оно проявится на выходе объекта;
- он более точен, чем принцип разомкнутого управления;
- не возникает проблема устойчивости (разомкнутые системы).

*Недостатки:*

- невозможность учета подобным образом всех возможных возмущений;
- в этих системах, как и в разомкнутых, появляются отклонения выходной величины при изменении характеристик ОУ;
- такие системы можно создавать только тогда, когда возмущающие воздействия можно измерить.

Примеры систем компенсации: биметаллический маятник в часах, компенсационная обмотка машины постоянного тока и т.п. На рис.3.4 в цепи НЭ стоит термосопротивление  $R_t$ , величина которого меняется в зависимости от колебаний температуры окружающей среды, корректируя напряжение на НЭ.

### **3.3. Принцип обратной связи (принцип управления по отклонению управляемой величины от задающего воздействия)**

Наибольшее распространение в технике получил *принцип обратной связи* (рис.3.5).

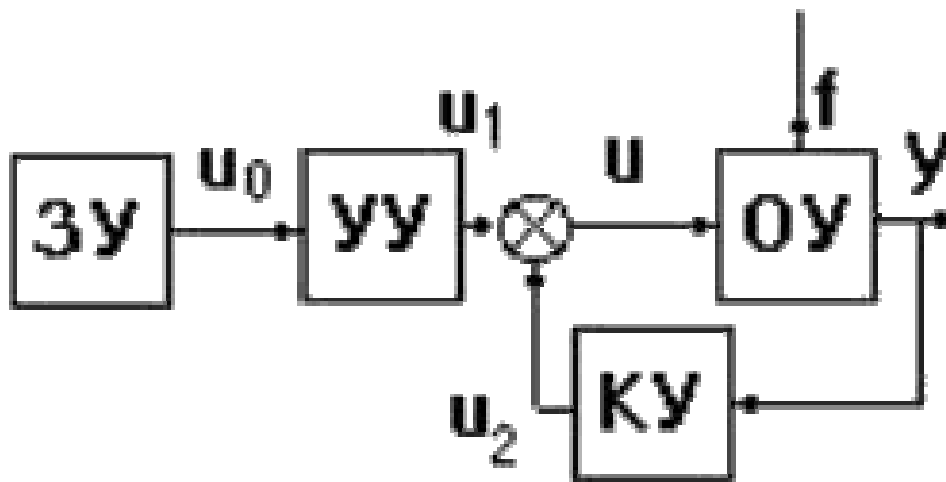


Рисунок 3.5. Функциональная схема принципа обратной связи

Здесь управляющее воздействие корректируется в зависимости от выходной величины  $y(t)$ . И уже не важно, какие возмущения действуют на ОУ. Если значение  $y(t)$  отклоняется от требуемого, то происходит корректировка сигнала  $u(t)$  с целью уменьшения данного отклонения. Связь выхода ОУ с его входом называется *главной обратной связью (ОС)*.

В частном случае (рис.3.6) ЗУ формирует требуемое значение выходной величины  $y_0(t)$ , которое сравнивается с действительным значением на выходе САУ  $y(t)$ . Отклонение  $e = y_0 - y$  с выхода сравнивающего устройства подается на вход *регулятора* Р, объединяющего в себе УУ, УО, ЧЭ.

Если  $e \neq 0$ , то регулятор формирует управляющее воздействие  $u(t)$ , действующее до тех пор, пока не обеспечится равенство  $e = 0$ , 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.

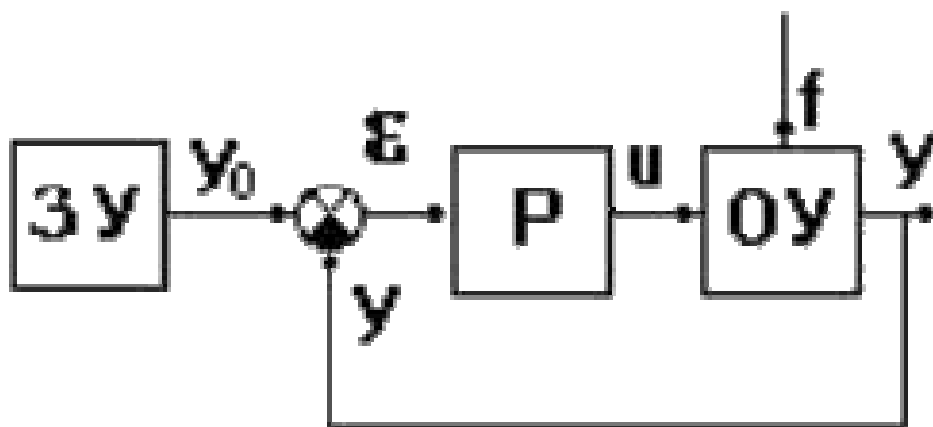


Рисунок 3.6. Система автоматического регулирования

Такое управление в функции отклонения называется *регулированием*, а подобную САУ называют *системой автоматического регулирования (САР)*. Так на рис.3.7 изображена упрощенная схема САР хлебопекарной печи.

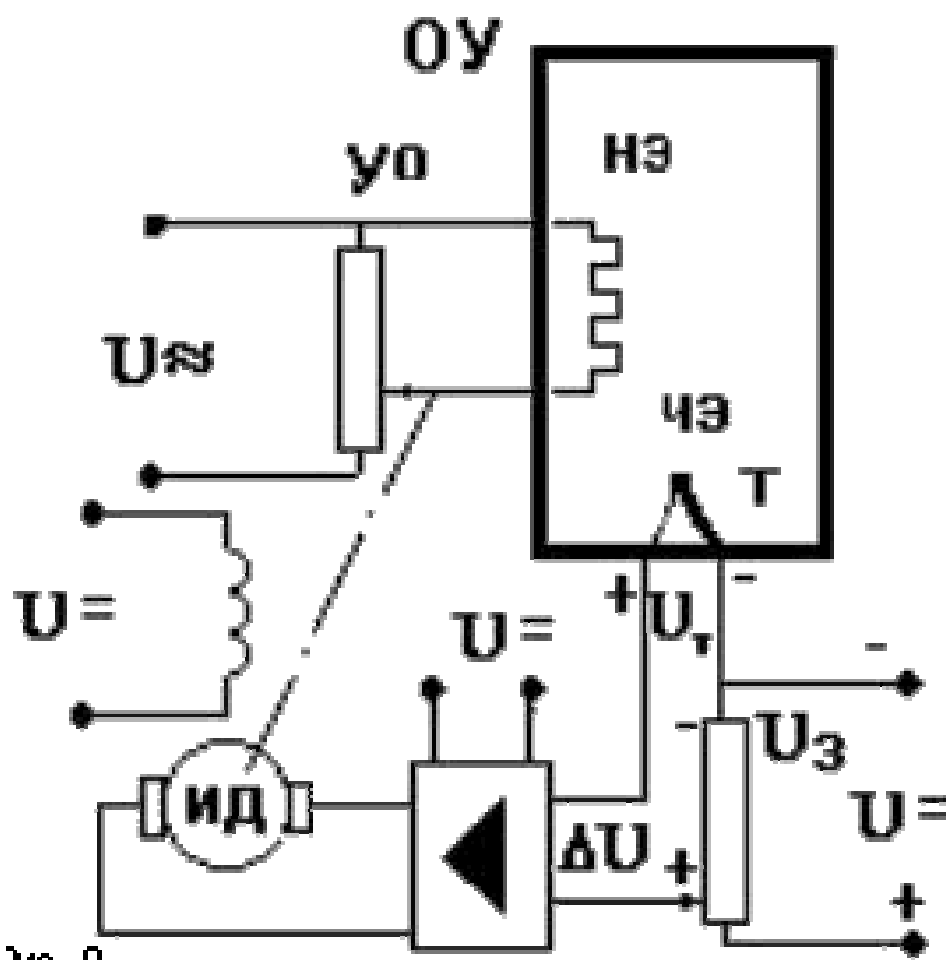


Рисунок 3.7. Схема САР хлебопекарной печи

Роль ЗУ здесь выполняет потенциометр, напряжение на котором  $U_3$  сравнивается с напряжением на термопаре  $U_T$ . Их разность  $\Delta U$  через усилитель 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.

Рассмотрим простейший пример системы такого рода. На рис.3.8 изображена схема генератора постоянного напряжения с обратной связью.

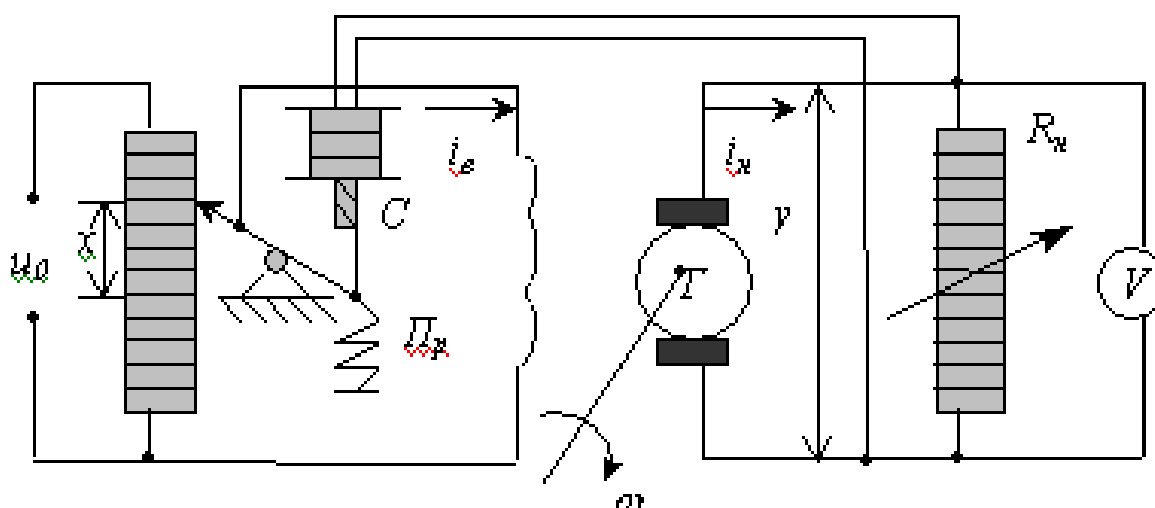


Рисунок 3.8. Схема генератора напряжения с обратной связью

В ее основе лежит схема, ранее изображенная на рис.3.2. Особенности работы состоят в следующем. Выходное напряжение  $U$  подается на обмотку соленоида  $C$ , и в зависимости от значения этого напряжения сердечник соленоида, прикрепленный с одной стороны к пружине  $Pr$ , будет либо больше, либо меньше втягиваться внутрь соленоида. К тяге, стоящей между сердечником и пружиной, может крепиться движок задающего потенциометра. После установки желаемого напряжения  $U$  движок потенциометра закрепляется на тяге сердечника. Если по каким-либо причинам произошло уменьшение напряжения  $U$  (например, при уменьшении

$R_n$ ), то сердечник соленоида выдвинется из соленоида и сместит движок потенциометра вверх. Напряжение возбуждения увеличится и тем самым возрастет напряжение  $u$  (рис.3.9). Параметры соленоида можно подобрать так, чтобы уменьшение напряжения  $u$  за счет изменения сопротивления нагрузки  $R_n$  скомпенсировалось увеличением напряжения возбуждения. Таким же образом будет работать система и при непреднамеренном увеличении  $u$ , только при этом напряжение возбуждения  $x$  уменьшится. Важно подчеркнуть, что причины, которые нарушили нормальную работу этой системы, не играют роли, так как управление происходит путем измерения конечного эффекта управления – выходного напряжения  $u$ . Как и в предыдущем примере, рассматриваемая система работает без участия человека, то есть автоматически. Однако за счет включения устройства обратной связи через соленоид качество работы можно значительно повысить, что видно из сравнения рис.3.3 и рис.3.9.

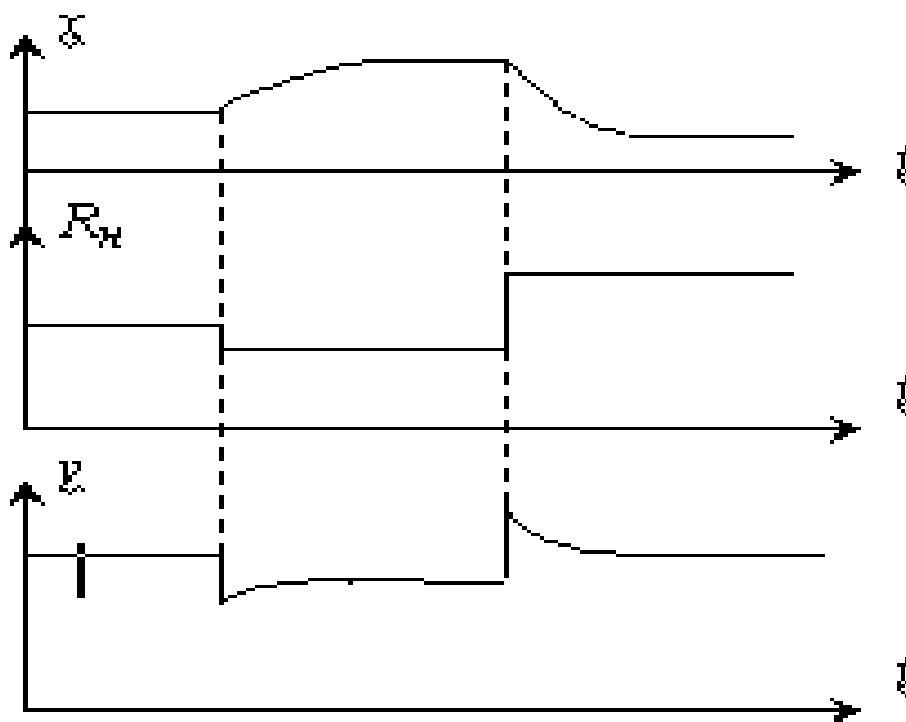


Рисунок 3.9. Характер изменения переменных  $u$  генератора с обратной связью

Обобщая выводы из последнего примера, можно сказать, что в системах, работающих по замкнутому циклу, происходит автоматическая компенсация влияния возмущающих воздействий без их непосредственного измерения. Она осуществляется за счет измерения выходных координат объекта управления и сравнения их с желаемыми значениями. Управляющие воздействия вырабатываются на основе этого сравнения. Системы с замкнутым циклом управления обладают более высоким качеством и поэтому нашли широкое практическое применение. Благодаря наличию устройства обратной связи они называются системами с обратной связью, или замкнутыми системами.

*Достоинства принципа обратной связи:*

- уменьшает отклонение управляемой независимо от того, какими факторами оно было обусловлено (учитывают все возмущения, действующие на управляемую величину);

- менее чувствителен к изменению параметров элементов системы, в сравнении с разомкнутыми системами.

*Недостатки принципа обратной связи:*

- наличие обратной связи приводит к возникновению колебаний в системе, что иногда делает систему неработоспособной;

- возникает проблема устойчивости;

- инерционность системы – работа управляющего устройства начинается только после того, как возмущающее воздействие вызовет отклонение управляемой величины.

В случае использования **комбинированного принципа**, управляющее устройство содержит два канала: один из них работает на принципе разомкнутого цикла, а другой – на принципе замкнутого. Блок-схема подобной системы показана на рис.3.10. Системы такого рода соединяют в себе свойства предыдущих систем: быстроту реакции на возмущение

принципа компенсации и точность регулирования независимо от природы возмущений принципа обратной связи.

Классификация по принципам управления отражает фундаментальные идеи, положенные в основу построения САУ, и определяет общую структуру системы.

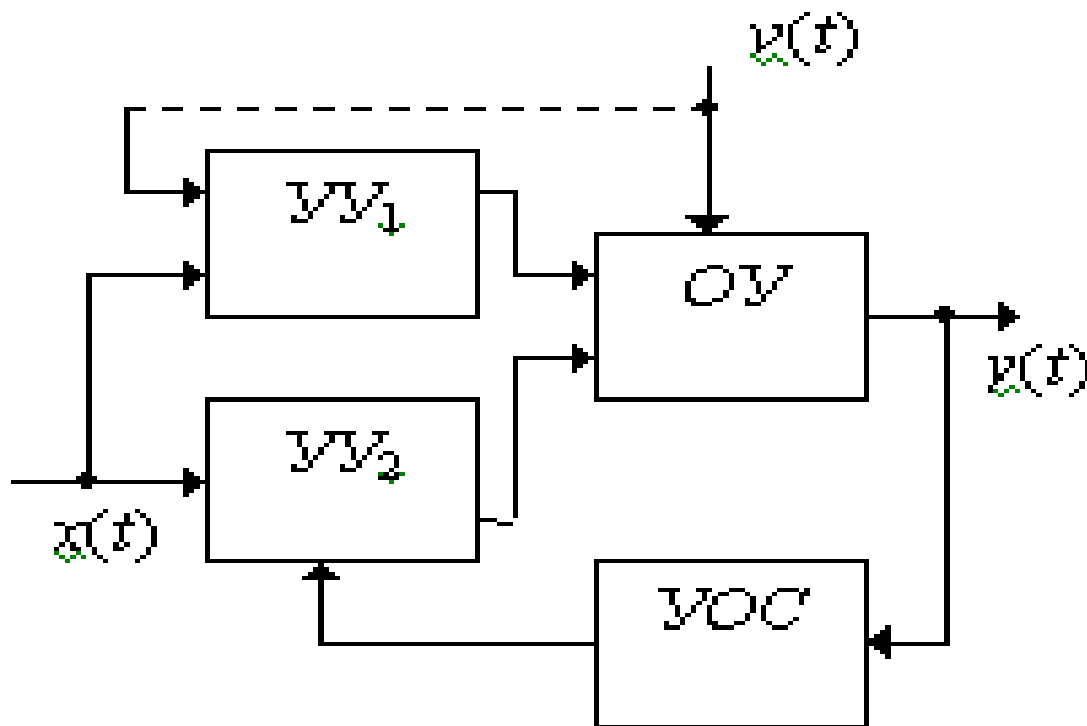


Рисунок 3.10 Принцип комбинированного управления



## 4. ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Успех при разработке системы управления зависит от целостного взгляда на нее. Проблемы, присущие типичной системе управления, включают в себя:

- объект, т.е. процесс, которым нужно управлять;
- цели управления;
- датчики;
- исполнительные механизмы;
- линии связи;
- вычисления;
- структуры и интерфейс;
- алгоритмы;
- анализ возмущений и неточностей.

### 4.1. Объект

Физическая природа объекта - существенный момент задач управления. Таким образом, разработчик систем управления должен быть знаком с *физикой* изучаемых процессов. Это включает знания об основном энергетическом балансе, балансе масс и материальных потоках в системе. Физические размеры оборудования и то, как они связаны с эксплуатационными характеристиками, также должны быть понятны. В частности, рекомендуется создать структуру физических моделей, как первый шаг в проектировании систем управления.

### 4.2. Цели управления

Прежде чем разрабатывать датчики, исполнительные механизмы или структуру системы управления, важно знать ее назначение, т.е. сформировать цели управления, что включает следующее:

- чего нужно достичь (уменьшение энергетических затрат, увеличение производительности и т.д.);

- какими переменными следует управлять, чтобы достичь этих целей управления;
- какой необходим уровень действий (точность, скорость и т. д.).

### **4.3. Датчики**

Датчики являются *глазами* системы управления, позволяющими ей *видеть*, что происходит в ней. Существует утверждение, которое иногда говорится относительно управления: *если вы можете измерить что-то, то вы можете им управлять*. Это, очевидно, упрощенное утверждение и его не следует понимать буквально. Тем не менее, эта броская фраза говорит о том, что организация соответствующих измерений является необходимой важной частью всей задачи управления. Кроме того, новые технологии датчиков часто открывают возможности создания систем управления с улучшенными характеристиками.

С другой стороны, в тех случаях, когда особенно важные измерения недоступны, то часто можно получить эти жизненно важные части информации из других данных. Это ведет к идее *гибкого* или *виртуального* датчика.

### **4.4. Исполнительные механизмы**

Если датчики используются только для определения *состояния* процесса, то возникает задача таким образом воздействовать на систему, чтобы перевести процесс из текущего состояния в желаемое. Таким образом, мы видим, что исполнение действий в системе - другой характерный элемент в ряду задач управления. Возможность использования новых усовершенствованных исполнительных механизмов также часто позволяет существенно улучшить работу. Наоборот, не удовлетворяющие заданным требованиям и неудовлетворительные исполнительные механизмы часто являются причиной трудностей управления. Как правило, промышленные

системы автоматического управления содержат несколько исполнительных механизмов.

#### **4.5. Линии связи**

Необходимость соединения датчиков и исполнительных механизмов требует использования систем связи. Типичный объект управления может иметь большое количество разных сигналов, которые необходимо передавать на большое расстояние. Таким образом, разработка систем связи и соответствующих протоколов – очень важный аспект в проектировании современных систем управления.

Имеются конкретные проблемы и требования к элементам связи систем автоматического управления, которые работают в реальном масштабе времени. Например, в линиях связи для передачи данных небольшие задержки и искажения во время передачи часто не важны. Однако в быстродействующих системах управления, работающих в реальном масштабе времени, эти проблемы могут выйти на первый план. Например, наблюдается тенденция использования сетей Ethernet для передачи данных в системах управления. Однако, работа данной сетевой технологии основана на случайном методе доступа., что вносит случайную задержку в передачу данных. Работа всех систем управления зависит от точного знания не только того, *что* происходит в ней, но и *когда* это случилось, так что внимание к задержкам понятно для успешной работы всей системы.

#### **4.6. Вычисления**

В системах управления связь датчиков с исполнительными механизмами осуществляется через управляющее устройство (регулятор), функции которого в современных системах выполняет тот или иной компьютер (контроллер). Таким образом, проблемы вычислений – обязательная часть всего проекта системы управления. Современные системы управления используют разнообразные вычислительные средства,

включая распределенные системы управления (Distributed Control System - DCS), программируемые логические контроллеры (Programmable Logic Controller - PLC) и персональные компьютеры (PC). В некоторых случаях использование этих вычислительных средств довольно ограничено по сравнению с их возможностями. Так же как и с задержками в линиях связи, задержки при вычислениях могут быть критическими для функционирования системы управления. Важно правильно выбрать частоту, так как может потребоваться многозадачная операционная система реального времени.

Другой аспект вычислений – точность представления чисел. В практике построения систем управления были случаи невозможности обеспечения необходимых характеристик из-за пренебрежения проблемами представления чисел.

Наконец, последний вопрос использования вычислительной техники – это удобство ее проектирования и использования. Современные средства быстрого моделирования систем управления, использующие вычислительную технику, обладают интегрированными возможностями для моделирования систем управления, их проектирования, испытания и функционирования. Эти средства, содержащие *шаблоны кода в реальном времени*, позволили уменьшить время разработки сложных алгоритмов управления с нескольких месяцев до нескольких дней, а иногда и часов.

#### **4.7. Структура и интерфейс.**

Проблема, что с чем и каким образом соединять, при разработке систем управления нетривиальна. Может показаться, что лучшее решение будет всегда состоять в передаче всех сигналов к центральному пункту, чтобы каждая операция управления была бы основана на полной информации (так называемый централизованный контроль и управление). Однако на практике это редкое решение. Очевидные возражения этому включают сложность, стоимость, ограничения по времени вычислений, ремонтпригодности и надежности.

Таким образом, проблема управления обычно распределяется по управляемым подсистемам. Такие структурные проблемы могут быть критическими для выбора окончательного варианта системы управления.

Один из основных инструментов, который может использовать разработчик систем управления для улучшения работы системы – всесторонне продумать структуру системы. В качестве простой иллюстрации предлагается сравнить попытку балансировать на пальце метлой с открытыми и закрытыми глазами. Здесь мы видим структурные различия, связанные с использованием различного набора датчиков.

Таким образом, мы видим, что структурные проблемы имеют первостепенную важность среди всех проблем проектирования систем управления.

Решив, какие связи должны быть организованы, следует перейти к проблеме взаимодействия различных компонентов. Часто при проектировании систем управления с необходимой структурой часто требуются специальные интерфейсы между различными элементами оборудования.

#### **4.8. Алгоритмы.**

Сердцем (основой) проектирования система автоматического управления является разработка необходимого алгоритма (алгоритмов), которые превращают набор датчиков, исполнительных механизмов и.д. в работоспособную систему. Очень легко недооценить этот заключительный аспект проблемы управления.

В качестве простого примера из повседневной жизни рассмотрим проблему игры в теннис. Понятно, что для игры нужно хорошее зрение (глаза - датчики) и сильные мускулы (исполнительные механизмы), но этого недостаточно. Действительно, координация рук, ног и глаз (т.е. управление) также очень важно для достижения успеха.

Таким образом, вне датчиков и исполнительных механизмов инженер по системам управления должен заниматься динамикой и управлением с использованием обратной связи.

#### **4.9. Возмущения и неточности**

Один из моментов, который делает теорию управления интересной и необходимой, то, что на все реальные системы действуют шумы, помехи и внешние возмущения. Эти факторы оказывают существенное влияние на работу и характеристики системы. Простым примером здесь может быть самолет, поверженный возмущениям в виде порывов ветра.

Другая проблема – неточность модели. Все реальные системы имеют очень сложные модели, однако важным свойством систем управления с обратной связью является то, что часто можно получить желаемый результат, используя относительно простые модели. Конечно, именно проектировщик должен оценить влияние неточности модели на работу системы управления и решить, приведет ли лучшее моделирование к достижению лучшего результата.

## 5. КЛАССИФИКАЦИЯ САУ

### 1. По назначению (по характеру изменения задания):

- стабилизирующая САУ - система, алгоритм функционирования которой содержит предписание поддерживать регулируемую величину на постоянном значении ( $y = \text{const}$ );

- программная САУ - система, алгоритм функционирования которой содержит предписание изменять регулируемую величину в соответствии с заранее заданной функцией ( $y$  изменяется программно, например, как функция времени);

- следящая САУ - система, алгоритм функционирования которой содержит предписание изменять регулируемую величину в зависимости от заранее неизвестной величины на входе АСР ( $y$  изменяется произвольно).

### 2. По количеству контуров:

- одноконтурные - содержащие один контур регулирования (одну обратную связь по регулируемому параметру);

- многоконтурные - содержащие несколько контуров регулирования (несколько обратных связей, например, по нескольким параметрам, по скорости/ускорению изменения параметра и т.д.).

### 3. По числу регулируемых величин:

- одномерные - системы с 1 регулируемой величиной,

- многомерные - системы с несколькими регулируемыми величинами.

*Многомерные САУ* в свою очередь подразделяются на системы:

а) несвязанного регулирования, в которых регуляторы непосредственно не связаны и могут взаимодействовать только через общий для них объект управления;

б) связанного регулирования, в которых регуляторы различных параметров одного и того же технологического процесса связаны между собой вне объекта регулирования.

#### **4. По функциональному назначению:**

САУ температуры, давления, расхода, уровня, напряжения и т.д.

#### **5. По характеру используемых для управления сигналов:**

- непрерывные,
- дискретные (релейные, импульсные, цифровые).

#### **6. По характеру математических соотношений:**

- линейные, для которых справедлив принцип суперпозиции;
- нелинейные.

#### **7. По виду используемой для регулирования энергии:**

- пневматические,
- гидравлические,
- электрические,
- механические и др.

#### **8. По наличию внутреннего источника энергии**

- системы прямого действия,
- системы с вспомогательным источником энергии.

#### **9. По принципу регулирования:**

- разомкнутого управления;
- по отклонению;
- по возмущению;
- комбинированные - сочетают в себе особенности двух предыдущих

САУ.

### ***Классификация элементов систем управления***

Системы управления строятся из элементов (устройств, к числу которых можно отнести регуляторы, датчики, исполнительные устройства, а также элементы объекта управления). Элементы СУ также можно классифицировать по нескольким признакам.

#### **1 По функциональному назначению:**

- измерительные,



- усилительно-преобразовательные,
- исполнительные,
- корректирующие.

## **2 По виду энергии, используемой для работы:**

- электрические,
- пневматические,
- механические,
- комбинированные.

## **3 По наличию или отсутствию вспомогательного источника энергии:**

- активные (с источником энергии),
- пассивные (без источника).

## **4 По характеру математических соотношений:**

- линейные – для которых справедлив принцип суперпозиции,
- нелинейные.

## **5 По поведению в статическом режиме:**

- статические, у которых имеется однозначная зависимость между входным и выходным воздействиями (состояние статики). Примером является любой тепловой объект. Например, если на вход электрического нагревателя подать некоторое напряжение, то с течением времени его температура установится на соответствующем значении. При этом установившаяся температура будет зависеть от величины поданного напряжения.

- астатические - у которых эта зависимость отсутствует. То есть, при постоянном входном воздействии амплитуда сигнала на выходе непрерывно растет с постоянной скоростью, ускорением и т.д. Пример: Зависимость угла поворота ротора электродвигателя от приложенного напряжения. При подаче напряжения угол поворота будет постоянно возрастать, поэтому однозначной зависимости у него нет.

## 6. ОПИСАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ

Описание системы — ее модель — содержит концентрированные знания о физическом/техническом процессе. Модель процесса необходима для того, чтобы управляющая система могла выдавать соответствующие команды на базе собранных измерений. Модель позволяет оценить, как техническая система будет реагировать на конкретное управляющее воздействие или внешнее возмущение, и какое управляющее воздействие необходимо, чтобы достичь определенного состояния системы. Модели необходимы не всегда — для простых задач типа управления заслонкой для наполнения бака жидкостью или включения лампочки при наступлении темноты они просто излишни. Другие задачи управления являются более сложными, и для их решения необходима тщательно разработанная количественная модель. Например, точная модель динамики и траекторий движения обязательна в робототехнике.

### 6.1. Модели, применяемые в управлении

Модель процесса — основа управления. Любая стратегия управления базируется на некотором понимании того, как физический процесс реагирует на входной сигнал. Поэтому умение анализировать и моделировать динамику системы является основной предпосылкой для успешного управления.

**Типы моделей.** Существует много способов описания систем с помощью моделей. Конкретный выбор зависит от предварительно имеющейся информации, возможностей собирать данные о процессе по мере его развития и, что важнее всего, от цели моделирования. В отличие от науки, где целью моделирования является глубокое проникновение в суть системы, модель в инженерном смысле считается адекватной, если соответствующие процессы управления работают предсказуемым образом, т. е. имеется устойчивый выход с малыми отклонениями от заданного значения, воспроизводимость отклика на входной сигнал и т. д.

### Пример 1. Модель двигателя внутреннего сгорания

Двигатель внутреннего сгорания — чрезвычайно сложная динамическая система. Общей модели двигателя не существует, и модель фактически зависит от поставленной цели, т. е. для разных целей модели могут существенно отличаться.

Научная модель, цель которой — описать все детали процесса внутреннего сгорания, должна учитывать геометрию цилиндра, смешивание воздуха и топлива в цилиндре, химический состав топлива, распространение процесса горения в пространстве и времени и результирующие силы, которые приводят поршень в движение. Масштаб времени при этом измеряется миллисекундами.

Модель для конструирования системы управления составом горючей смеси будет использовать другой подход. Цель здесь — сохранить отношение воздух/топливо в смеси близким к расчетному оптимуму. При этом нет необходимости учитывать распространение процесса горения в пространстве — для управления вполне достаточно знать расход воздуха и топлива по отдельности. Кроме того, масштаб времени отличается от миллисекундного диапазона научной модели и может быть в 10-100 раз больше.

Совершенно другая модель нужна водителю. Важнее всего в этом случае — связь между давлением на педаль газа и ускорением автомобиля, а деталями горения или процессом смешивания воздуха и топлива можно пренебречь.

Прикладное управление ориентировано на динамические системы, т. е. системы, состояние которых можно смоделировать заранее и которыми можно управлять с помощью соответствующих сигналов. В динамических системах эффект от входного воздействия проявляется не сразу, а лишь спустя некоторое время. Существует много способов моделирования динамических систем, наиболее важные из которых следующие.

• **Непрерывное во времени (аналоговое) описание** (*continuous time description*). Система описывается линейными или нелинейными дифференциальными уравнениями баланса массы, энергии, сил или моментов. Во многих случаях нелинейные уравнения можно линеаризовать и тем самым упростить работу с ними.

• **Дискретное во времени описание** (*sampled time description*). Физические свойства описываются линейными или нелинейными разностными уравнениями. Такой подход означает, что информация о системе доступна только в определенные, дискретные, моменты времени. Этот тип описания в действительности почти неизбежен при цифровом управлении потому, что компьютеры, базирующиеся на наиболее распространенной архитектуре фон Неймана (von Neumann), выполняют инструкции последовательно. Определение интервала дискретизации, т. е. периодичности обновления или пересчета данных, является наиболее важным элементом такого моделирования.

• **Модели систем, основанных на дискретных событиях** (*discrete events model*) или на **последовательности событий** (*sequencing system*). При таком описании входные и выходные величины системы дискретны во времени и обычно являются бинарными сигналами типа "включено/выключено". Многие системы управления последовательностью можно описать как системы очередей и моделировать так называемыми Марковскими цепями или Марковскими процессами.

• **Модели систем с неопределенностями** (*system with uncertainties*). Как на сами управляемые системы, так и на измерения часто влияют нежелательные шумы и возмущения. В одних случаях возмущения и неполные знания о техническом процессе можно интерпретировать статистически. В других — факторы неопределенности вместо количественных характеристик можно описывать лингвистическими и логическими выражениями. Пример такого описания — правила экспертных

систем "если – то - иначе". Еще одно средство описания неопределенностей — так называемая нечеткая (*fuzzy*) алгебра.

Обычное заблуждение заключается в предположении, что процесс можно исчерпывающе описать только одной моделью. В действительности верно обратное. Структура и сложность модели должны соответствовать цели, моделирования, поэтому выбор модели процесса зависит от того, как она будет использоваться. Для каждого типа регуляторов также требуется своя модель. Наиболее приемлемой является простейшая из возможных моделей, которая обеспечивает управление, удовлетворяющее заданному критерию качества.

Системы и процессы можно рассматривать в терминах входных и выходных сигналов, связь между которыми описывается как во временной, так и в частотной областях.

## **6.2. Масштаб времени динамических моделей**

Масштаб времени — одна из наиболее важных характеристик динамического процесса. Большинство технических систем и производств включают в себя несколько процессов, существенно отличающихся временем реакции. Поэтому при описании процесса важно выбрать масштаб времени, который соответствует поставленной цели.

Проиллюстрируем это на примере промышленного производства. Задачи управления можно разбить на несколько уровней. События на уровне станков происходят за доли секунды, как, например, при управлении манипулятором робота или инструментом станка. На следующем, более высоком уровне управления, на уровне участка, цель — синхронизация различных механизмов, например решение, когда робот должен переместить деталь между двумя станками. Масштаб времени здесь уже имеет порядок от секунд до минут. На уровне участка предполагается, что задача управления конкретным станком уже решена на более низком уровне. Масштаб времени на уровне участка определяется задачами снабжения станка заготовками,

определения, свободен ли робот, чтобы захватить новую деталь, и т. д. На еще более высоком уровне планируется производство в целом, т. е, что производить и с какими конкретными характеристиками. Решение таких проблем может занимать дни или недели, и по сравнению с этим динамика одного станка рассматривается как одномоментная.

Другой пример различных масштабов времени в рамках одного и того же технического процесса — из области биологической очистки сточных вод. Сжатый воздух подается в аэрационный бак для поддержания жизнедеятельности аэробных микроорганизмов, которым нужен кислород; эта операция занимает несколько минут. Из-за неоднородности входного потока воды изменение концентрации растворенного кислорода проявляется только через несколько часов, а для изменения метаболизма микроорганизмов нужны дни или даже недели. При изучении недельных изменений метаболизма процессы длительностью в несколько часов можно рассматривать как мгновенные. С другой стороны, для управления подачей воздуха необходимо измерять концентрацию растворенного кислорода ежеминутно, и в этом случае состав микроорганизмов и их концентрация считаются постоянными.

Выбор масштаба времени модели зависит от того, для кого она предназначена, т. е. от пользователя, в качестве которого может выступать, в частности, и автоматический регулятор. Оператор может проверить состояние технического процесса и принять управляющие решения за минуты и часы. Инженерная служба или отдел логистики могут быть заинтересованы только в дневной производительности или суточных изменениях процесса, и поэтому им нужна другая временная шкала. Наконец, директора завода интересуют, в первую очередь, объем производства и сезонные колебания спроса. Каждый подход и каждая реакция имеют свой собственный масштаб времени.

### **6.3. Моделирование динамических систем**

Существуют как хорошо известные и давно изученные процессы, так и процессы, которых известно очень мало и которые трудно поддаются количественному описанию. Например, динамика самолетов и ядерных реакторов изучалась очень тщательно, и существуют достаточно точные, хотя и очень сложные модели этих процессов. Есть процессы, которые трудно описать количественно. Например, лабораторный процесс ферментации микроорганизмов одного типа в четко определенной питательной среде можно описать весьма точно. В отличие от этого, процесс биологической очистки сточных вод содержит сложную смесь организмов в среде, трудно поддающейся описанию. Такой процесс только частично можно описать обычными количественными моделями. Когда количественных моделей недостаточно или они слишком сложны, для описания процессов применяют семантические (лингвистические) модели. Другие примеры частично изученных процессов — производство металла, разделение жидких и твердых субстанций, многие биохимические процессы и работа печей кругового обжига.

Для процессов, параметры которых изменяются во времени, характерны свои специфические проблемы. Например, в биологической системе добавление нового субстрата в процесс может вызвать мутацию микроорганизмов, которая приведет к значительному изменению динамики всего процесса.

Как правило, моделирование сложной системы представляет собой трудный, дорогой и требующий много времени процесс, особенно если необходима экспериментальная проверка. В принципе, существуют два способа разработки модели. При физическом подходе модель формируется исходя из физических соотношений и уравнений баланса. Другой способ построения динамической модели основан на экспериментальных данных. В технический процесс вносятся возмущения в виде различных типов входных сигналов, а затем выполняется анализ серий входных и выходных данных с

помощью процедуры, которая называется **идентификацией параметров**. Если анализ выполняется в реальном времени, т. е. со скоростью, сопоставимой со скоростью протекания процесса, то такая процедура называется **рекурсивной оценкой** (*recursive estimation*).

На практике обычно применяется комбинирование физического моделирования и идентификации параметров. При более глубоком изучении основных свойств процесса становится проще получить точное динамическое описание. Однако даже тщательно разработанные модели, основанные на физическом подходе, требуют экспериментальной проверки.

Параметры многих процессов и систем изменяются не только во времени, но и в пространстве, например концентрация жидкости в баке. Физический баланс таких систем описывается уравнениями в частных производных. В системах управления процессами эти уравнения обычно аппроксимируются конечными разностями по пространственным переменным для того, чтобы система описывалась обыкновенными дифференциальными уравнениями.

#### **6.4. Моделирование дискретных событий**

Моделирование систем, основанных на последовательности дискретных событий, принципиально отличается от моделирования динамических систем с помощью математических соотношений. Для управления на основе обратной связи температурой, уровнем жидкости или давлением модель процесса фактически не нужна. В этом случае значение контролируемого параметра поддерживается на заданном уровне с определенной точностью с помощью включения и выключения исполнительного механизма.

Связной теории для моделирования управления последовательностью пока нет. При бинарном управлении уже на стадии анализа системы должны быть рассмотрены все возможные нештатные и аварийные ситуации. Что будет, если сломается насос либо датчики или отключится питание и т. д.?



Подготовка исчерпывающего списка всех возможных событий в системе — сложная задача, которую нельзя решить на основе систематической теории.

## **6.5. Методы математического описания элементов и систем управления.**

### *Дифференциальные уравнения*

Наиболее распространенной формой описания передаточных свойств автоматических систем и их элементов являются обыкновенные дифференциальные уравнения. Для элемента, имеющего один входной сигнал  $x(t)$  и один выходной сигнал  $y(t)$ , обыкновенное дифференциальное уравнение записывается в общем случае следующим образом:

$$\Phi \left[ y(t), y'(t), \dots, y^{(n)}(t); x(t), \dots, x^{(m)}(t), t \right] = 0 \quad (6.1)$$

Это уравнение связывает независимую функцию  $y(t)$  и её производную  $y'(t) \dots y^{(n)}(t)$  с независимой переменной  $t$  известной (заданной) функцией времени  $x(t)$ . Такое уравнение называют уравнением динамики или уравнением движения элемента.

Дифференциальное уравнение может быть линейным и нелинейным. Линейным оно является в том случае, если функция  $\Phi$  линейна по отношению ко всем ее аргументам. Если же переменные  $y(t)$ ,  $x(t)$  и их производные входят в выражение функции  $\Phi$  в виде произведений, частных или степеней, то уравнение является нелинейным.

В выражение функции  $\Phi$ , кроме основных переменных, входят постоянные величины, названные параметрами. Числовые значения параметров зависят от конструктивных данных описываемого элемента — масс, индуктивностей, емкостей и т.д.

Для большинства реальных элементов исходное уравнение (1), составленное строго в соответствие с законом физики, оказывается нелинейным, что значительно усложняет все последующие процедуры

анализа. Поэтому всегда стремятся перейти к линейному дифференциальному уравнению вида:

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + a_2 \frac{d^{n-2} y(t)}{dt^{n-2}} + \dots + a_n y(t) = \\ = b_0 \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + b_2 \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_m x(t) \end{aligned} \quad (6.2)$$

где  $x(t)$  и  $y(t)$  входная и выходная величины элемента или системы;

$a_i, b_i$  – коэффициенты уравнения.

Данное уравнение устанавливает связь между входной и выходной величинами как в переходных, так и в установившихся режимах.

Коэффициенты дифференциального уравнения  $a_i, b_i$  называются параметрами. Иногда параметры некоторых элементов систем изменяются во времени, причем скорость их изменения соизмерима со скоростью процессов управления в системе. Такую систему называют нестационарной или системой с переменными параметрами.

Если при составлении линейного дифференциального уравнения использованы статические характеристики или приняты допущения о линейности тех или иных взаимосвязей, то уравнение справедливо лишь для малых отклонений входной и выходной величин от их значений в статическом режиме:

$$\Delta x = x(t) - x_0, \quad \Delta y = y(t) - y_0$$

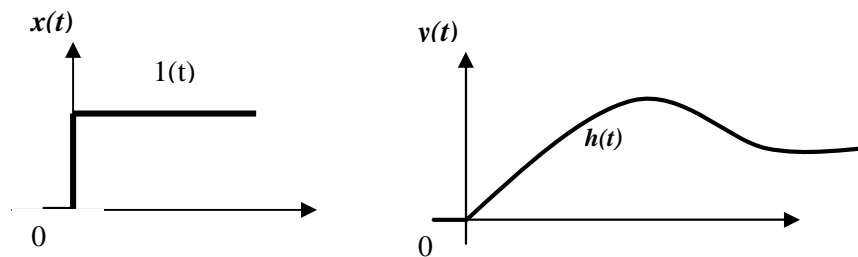
Для САУ, описываемых линейным уравнением (6.2) справедлив принцип наложения или принцип суперпозиции, согласно которому изменение выходной величины  $y(t)$ , возникающее при действии на систему нескольких входных сигналов  $x_i(t)$ , равно сумме изменений  $y_i(t)$  величины  $y(t)$ , вызываемых каждым сигналом в отдельности.

## Временные характеристики

Дифференциальное уравнение является самой общей формой описания элемента и не дает наглядного представления о передаточных свойствах элемента. Наглядное представление об этих свойствах дает функция  $y(t)$ , являющаяся решением дифференциального уравнения. Но одно и то же дифференциальное уравнение может иметь множество решений, конкретный вид которых зависит от начальных условий и от характера функции  $x(t)$ , т.е. от начального состояния элемента и вида внешнего воздействия. Поэтому принято динамические свойства элементов и систем характеризовать решением дифференциального уравнения, которое соответствует нулевым начальным условиям и одному из типовых воздействий.

Наиболее наглядное представление о динамических свойствах элемента дает его переходная функция (характеристика).

**Переходной функцией**  $h(t)$  называют изменение выходной величины  $y(t)$  во времени, возникающее после подачи на вход единичного ступенчатого воздействия при нулевых начальных условиях.



Переходная функция может быть задана графически или аналитически. Формульное выражение функции  $h(t)$  для конкретного элемента можно найти, решая его дифференциальное уравнение при  $x(t) = 1(t)$  и  $y(-0) = y'(-0) = y''(-0) \dots = y^{(n-1)}(-0) = 0$

Это условие означает, что выходная величина  $y(t)$  и ее производные до  $(n-1)$ -го порядка непосредственно перед подачей ступенчатого воздействия равен нулю.

Переходная функция  $h(t)$  имеет две составляющие: вынужденную  $h_d(t)$  и свободную составляющую  $h_c(t)$ .

Вынужденная составляющая  $h_g(t)$  переходного процесса представляет собой частное решение исходного уравнения. При ступенчатом воздействии вынужденная составляющая равна установившемуся значению выходной величины, которое может быть определено из дифференциального уравнения:

$$h_g(t) = y(\infty) = \frac{b_m}{a_n}$$

Свободная составляющая  $h_c(t)$  может быть найдена как решение соответствующего однородного дифференциального уравнения в виде:

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

где  $p_k$  - корни характеристического уравнения

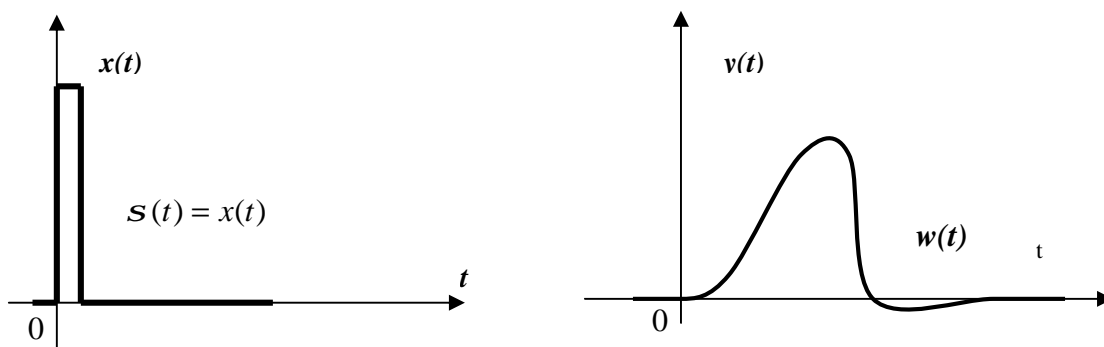
$C_k$  – постоянные интегрирования, зависящие от начальных условий

Характеристическое уравнение данного дифференциального уравнения представляет собой алгебраическое уравнение, степень и коэффициенты которого совпадают с порядком и коэффициентами левой части этого дифференциального уравнения. Для дифференциального уравнения (6.2) характеристическое уравнение имеет вид:

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n = 0$$

Для линейных систем справедливо следующее общее правило: реакция  $y(t)$  на неединичное ступенчатое воздействие  $a * I(t)$  равна произведению переходной функции  $h(t)$  на величину множителя  $a$ , т.е.  $y(t) = ah(t)$ .

**Импульсной переходной функцией**  $w(t)$  называют изменение выходной величины  $y(t)$ , возникающее после передачи на вход дельта-функции, при нулевых начальных условиях.



Если входное воздействие представляет собой неединичный импульс  $aS(t)$ , то ординаты функции выходной величины  $y(t)$ , будут в  $a$  раз больше ординат функции  $w(t)$ , т.е.  $y(t) = aw(t)$ .

Связь между переходной и импульсной переходной функциями  $h(t)$  и  $w(t)$  существует следующая взаимосвязь:

$$w(t) = \frac{dh(t)}{dt}, \quad h(t) = \int_0^t w(t) dt.$$

При помощи импульсной переходной функции элемента можно определить ее реакцию на входное воздействие произвольного вида. Связь между изменениями входной и выходной величин во времени устанавливается интегралом свертки:

$$y(t) = \int_0^{\infty} x(t) w(t-t) dt = \int_0^{\infty} x(t-t) w(t) dt.$$

Второе распространенное название функции  $w(t)$  – весовая. Действительно, эта функция определяет вес (долю), с которым каждый входной импульс, полученный при разложении сигнала  $x(t)$ , участвует в формировании результирующего выходного сигнала  $y(t)$ .

### **Операционный метод. Передаточная функция.**

Наиболее распространенным методом описания автоматических систем является операционный метод (метод операционного исчисления). В основе метода лежит преобразование Лапласа:

$$x(p) = L[x(t)] = \int_0^{\infty} x(t)e^{-pt} dt,$$

которое устанавливает соответствие между функциями действительной переменной  $t$  и функциями комплексной переменной  $p$ . Функцию времени  $x(t)$ , входящую в интеграл Лапласа называют оригиналом, а результат интегрирования – функцию  $x(p)$  – изображением функции  $x(t)$  по Лапласу.

Преобразование Лапласа выполнимо лишь для таких функций времени, которые равны нулю при  $t < 0$ . Это условие обеспечивается обычно

умножением функции  $x(t)$  на единичную ступенчатую функцию  $I(t)$ . С математической и физической точек зрения такой искусственный прием корректен, так как функции  $x(t)$  описывают процессы в автоматических системах, начинающиеся с некоторого момента времени, а этот момент времени всегда может быть принят за начало отсчета.

Для нахождения изображений по Лапласу различных функций существуют справочные таблицы.

Наиболее важными свойствами преобразования Лапласа являются следующие правила:

при нулевых начальных условиях дифференцированию оригинала  $x(t)$  по переменной  $t$  соответствует умножение изображения  $X(p)$  на комплексную переменную  $p$ , а интегрированию оригинала соответствует деление  $X(p)$  на  $p$ .

Широкое распространение операционного метода в ТАУ обусловлено тем, что с его помощью определяют передаточную функцию, которая является самой компактной формой описания динамических свойств элементов и систем.

Применим преобразование Лапласа к линейному дифференциальному уравнению (6.2), полагая, что до приложения внешнего воздействия система находилась в покое и все начальные условия равны нулю. Используя свойство линейности и правило дифференцирования, можно получить алгебраическое уравнение в изображениях:

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

$$D(p)Y(p) = K(p)X(p) \tag{6.3}$$

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

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

Уравнение (6.3) получено из уравнения (6.1) с использованием следующей замены оригиналов изображениями:

$$\frac{d^k}{dt^k} \rightarrow p^k, \quad y(t) = Y(p), \quad x(t) = X(p)$$

**Передаточной функцией**  $W(p)$  называют отношение изображения по Лапласу выходной величины к изображению входной величины при нулевых начальных условиях:

$$W(p) = \frac{L[y(t)]}{L[x(t)]} = \frac{Y(p)}{X(p)}.$$

Для системы, описываемой уравнением (6.2), передаточная функция представляет собой некоторый динамический оператор, характеризующий прохождение сигналов через линейный элемент и не зависящий от вида входного воздействия  $x(t)$ , а характеризующий лишь собственные динамические свойства описываемого элемента или системы.

Передаточную функцию формально можно получить из дифференциального уравнения путем замены в нем символа кратного дифференцирования на соответствующую степень  $p$  и деления образованного таким образом многочлена правой части уравнения на многочлен левой части.

#### Основные свойства и особенности передаточной функции САУ.

1. Передаточная функция устанавливает связь между входной и выходной величиной, как в динамическом, так и в статическом режимах.
2. Передаточная функция реальных элементов – правильная рациональная дробь, у которой степень многочлена числителя меньше или равна степени многочлена знаменателя  $m \leq n$ .
3. Все коэффициенты передаточной функции – действительные числа, характеризующие параметры элемента или системы.
4. Передаточная функция является функцией комплексной переменной  $p = a \pm jb$ , которая при некоторых значениях переменной  $p$  может обращаться в нуль или бесконечность. Значение переменной  $p$ , при котором функция  $W(p)$  обращается в нуль, называют нулем, а при котором обращается в бесконечность – полюсом передаточной функции. Нули передаточной функции – корни полинома  $K(p)$ , полюса – корни полинома

$D(p)$ . Корни полиномов числителя и знаменателя могут быть комплексными, мнимыми и вещественными. Если эти корни известны, то передаточная функция может быть представлена в виде:

$$W(p) = \frac{b_0(p-g_1)(p-g_2)\dots(p-g_m)}{a_0(p-I_1)(p-I_2)\dots(p-I_n)},$$

где  $g_i$  - корни многочлена  $K(p)$  (нули  $W(p)$ );

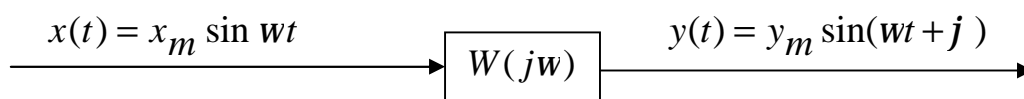
$I_i$  - корни многочлена  $D(p)$  (полюса  $W(p)$ ).

5. Передаточная функция элемента связана с его импульсной переходной функцией преобразованием Лапласа:

$$W(p) = \int_0^{\infty} w(t)e^{-pt} dt.$$

### Частотные характеристики

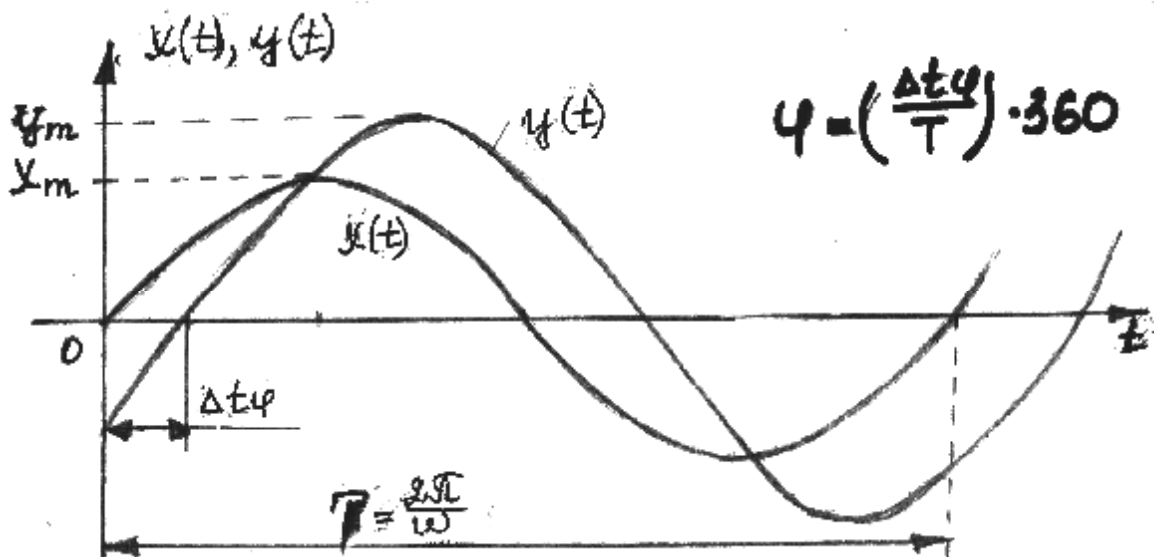
Частотные характеристики описывают передаточные свойства элементов и системы в режиме установившихся гармонических колебаний, вызванных внешним гармоническим воздействием. Частотные характеристики широко используются в теории и практике автоматического управления, так как реальные возмущения, действующие на САУ, могут быть представлены как сумма гармонических сигналов.



Для исследования частотных свойств системы и получения ее частотных характеристик на вход системы подают гармоническое воздействие определенной частоты  $\omega$  и амплитуды  $X_m$ :

$$x(t) = x_m \sin \omega t$$





После окончания переходного процесса элемент войдет в режим установившихся вынужденных колебаний, а выходная величина  $y(t)$  будет изменяться по гармоническому закону с той же частотой  $\omega$ , но с отличающейся амплитудой  $y_m$  и со сдвигом  $\Delta t_j$  по оси времени:

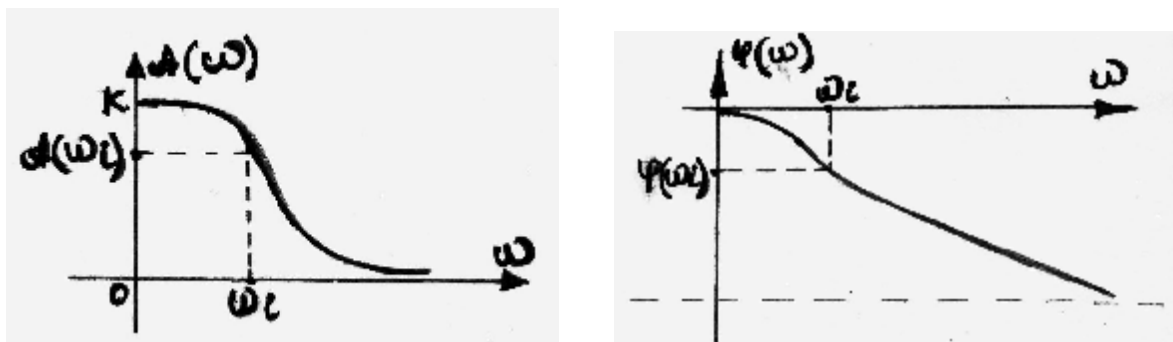
$$y(t) = y_m \sin(\omega t + j)$$

где  $j = (\Delta t_j / T) \cdot 360$  - фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами.

Повторяя такой эксперимент при фиксированном  $X_m$  для различных значений частоты (от 0 до  $\infty$ ), можно установить, что амплитуда  $y_m$  и фазовый сдвиг  $j$  выходного сигнала элемента зависят от частоты воздействия. Подавая гармоническое воздействие на вход различных элементов, можно убедиться, что величины  $y_m$  и  $j$  зависят также от типа и параметров элемента. Следовательно, зависимости амплитуды  $y_m$  и сдвига  $j$  от значений частоты  $\omega$  могут служить характеристиками динамических свойств элементов.

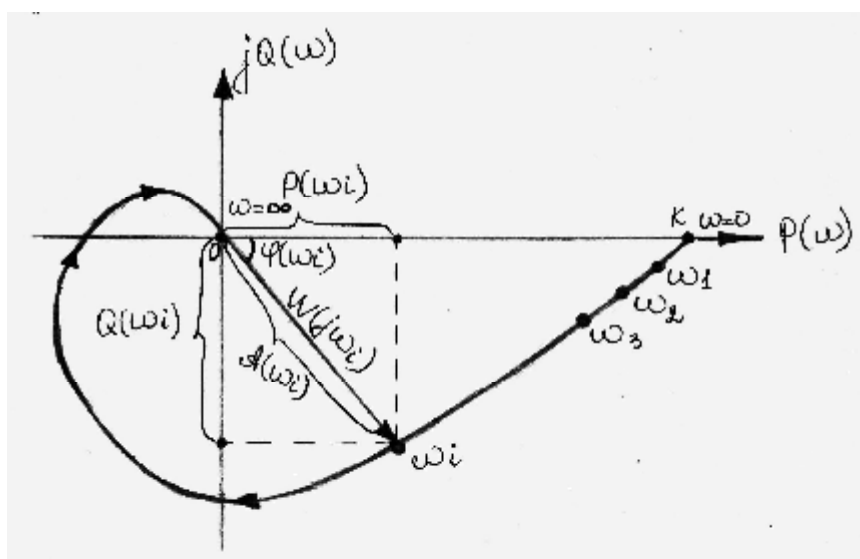
Зависимость отношения амплитуд выходного и входного сигналов от частоты называют амплитудной частотной характеристикой (сокращенно - АЧХ) и обозначают  $A(\omega)$ .

Зависимость фазового сдвига между входным и выходным сигналами от частоты называют фазовой частотной характеристикой (сокращенно - ФЧХ) и обозначают  $j(\omega)$ .



АЧХ показывает, как элемент пропускает сигналы различной частоты. Оценка пропускания производится по отношению амплитуд  $y_m/x_m$ . ФЧХ показывает, какое отставание или опережение выходного сигнала по фазе создает элемент на различных частотах.

Амплитудную и фазовую частотную характеристику можно объединить в одну общую – амплитудно-фазовую частотную характеристику (АФЧХ или АФХ). АФЧХ  $W(j\omega)$  представляет собой функцию комплексной переменной  $j\omega$ , модуль которой равен  $A(\omega)$ , а аргумент равен  $j(\omega)$ . Каждому фиксированному значению частоты  $\omega_i$  соответствует комплексное число  $W(j\omega_i)$ , которое на комплексной плоскости можно изобразить вектором, имеющим длину  $A(\omega_i)$  и угол поворота  $j(\omega_i)$ .



При изменении частоты от нуля до бесконечности вектор  $W(j\omega)$  поворачивается вокруг начала координат, при этом одновременно увеличивается или уменьшается длина вектора. Каждой точке характеристики соответствует определенное значение частоты.

Проекции вектора  $W(j\omega)$  на действительную и мнимую оси называют соответственно действительной  $P(\omega)$  и мнимой  $Q(\omega)$  частотными характеристиками.

$$P(\omega) = \operatorname{Re} W(j\omega) \quad Q(\omega) = \operatorname{Im} W(j\omega)$$

Действительная или вещественная частотная характеристика  $P(\omega)$  – всегда четная функция частоты, мнимая  $Q(\omega)$  – всегда нечетная функция.

Аналитическое выражения для АФЧХ можно получить из передаточной функции путем подстановки  $p = j\omega$ :

$$W(j\omega) = W(p)|_{p=j\omega}$$

АФЧХ  $W(j\omega)$  может быть представлена:

- в показательной форме  $W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$
- в алгебраической  $W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega)$
- в тригонометрической  $W(j\omega) = A(\omega)\cos\varphi(\omega) + jA(\omega)\sin\varphi(\omega)$

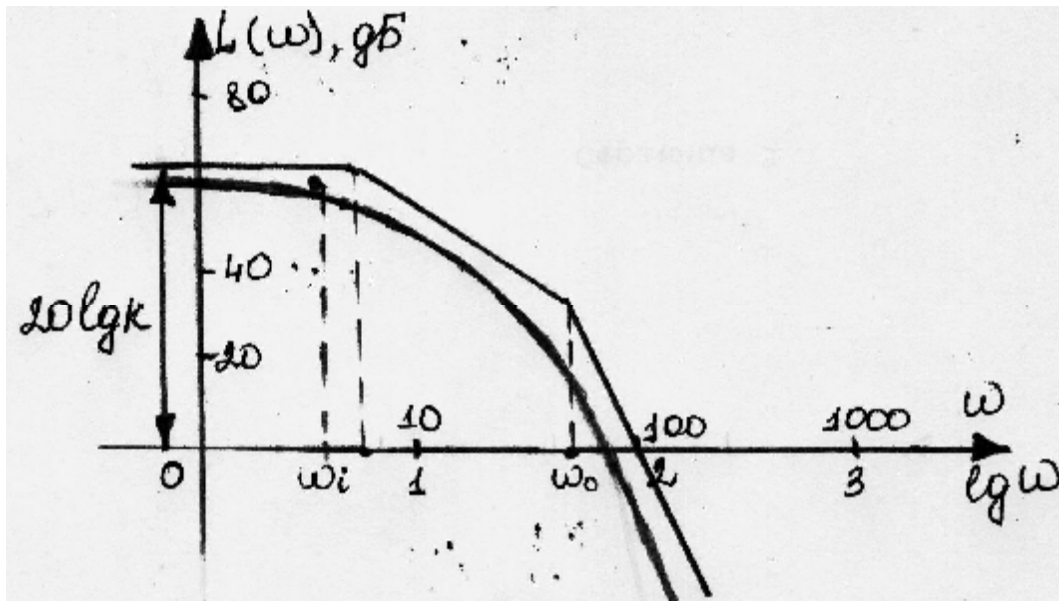
Связь между различными частотными характеристиками:

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

$$\varphi(\omega) = \arg W(j\omega) = \arctg\left(\frac{Q(\omega)}{P(\omega)}\right).$$

При практических расчетах САУ удобно использовать частотные характеристики, построенные в логарифмической системе координат. Такие характеристики называют логарифмическими. Они имеют меньшую кривизну и поэтому могут быть приближено, заменены ломаными линиями, составленными из нескольких прямолинейных отрезков. Причем, эти отрезки в большинстве случаев удается построить без громоздких вычислений при помощи некоторых простых правил. Кроме того, в логарифмической системе координат легко находить характеристики различных соединений элементов,

так как умножению и делению обычных характеристик соответствует сложение и вычитание ординат логарифмических характеристик.



За единицу длины по оси частоты логарифмических характеристик декаду. Декада – интервал частот, заключенный между произвольным значением  $\omega_i$  и его десятикратным значением  $10 \cdot \omega_i$ . Отрезок логарифмической оси частот, соответствующий одной декаде, равен 1.

Логарифмическая амплитудная частотная характеристика ЛАЧХ:

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

Ординаты ЛАЧХ измеряются в белах (Б) или децибелах (дБ).

Бел – единица измерения отношения мощностей двух сигналов.

Если мощность одного сигнала больше (меньше) мощности другого сигнала в 10 раз, то эти мощности отличаются на 1Б. Так как мощность гармонического сигнала пропорциональна квадрату его амплитуды, то при применении этой единицы для измерения отношения амплитуд перед логарифмом появляется множитель 2.

## 7. ВВЕДЕНИЕ В ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ

### 7.1. Роль вычислительной техники в управлении процессами

Применение вычислительной техники (ВТ) в автоматическом управлении — важнейшая черта технической инфраструктуры современного общества. Промышленность, транспорт, системы связи и защита окружающей среды существенно зависят от компьютерных систем управления. Практически ни одна техническая система - от железной дороги до ядерного реактора — не работает без той или иной формы управления. Цифровые электронные вычислительные машины (ЭВМ) - компьютеры - играют здесь ключевую роль; во многих случаях не существует реальной альтернативы компьютерному управлению процессами.

Для описания особой роли компьютеров в управлении процессами необходимо определить, что, собственно, подразумевается под термином "процесс". Физический процесс - это последовательная смена состояний объектов физического мира. Процессами в этом смысле, следовательно, являются движение, химические реакции или теплообмен. Примеры процессов - промышленное или химическое производство, кондиционирование воздуха в помещении (изменение физических параметров — температуры и влажности), движение транспортного средства, которое есть суть управляемое изменение его скорости и положения. Обработка информации сама по себе не приносит видимых изменений в физический мир и, таким образом, не может быть отнесена к физическим процессам.

Немецкий технический стандарт DIN 66201 дает точное определение физического процесса как "комбинации связанных событий в системе, в результате которых изменяются, перемещаются или запасаются материя, энергия и информация". Технический процесс определен как "процесс, физические переменные которого можно измерить и изменить техническими средствами". Разница между физическим и техническим процессами

заклучена, следовательно, в том, что физический процесс не обязательно должен управляться извне, а технический процесс включает обработку информации для достижения заданной целевой функции.

Любой физический процесс характеризуется входом и выходом в виде:

- **материальных компонентов,**
- **энергии;**
- **информации.**

Таблица 7.1. Примеры входных и выходных потоков процесса

Вход/Выход	Химический реактор	Кондиционирование воздуха	Управление самолетом
<i>Ввод материальных компонентов (сырья)</i>	Потоки исходных реагентов		
<i>Выход материальных компонентов (продукции)</i>	Один или несколько новых продуктов		
<i>Ввод энергии</i>	Нагревание или охлаждение	Нагревание или охлаждение	Топливо к двигателям
<i>Выход энергии</i>	Получение тепла от реакции	Излучение тепла	Движение самолета
<i>Ввод информации</i>	Управление входными потоками реагентов и дополнительным нагревом	Управление температурой и интенсивностью поступления нагревающей/охлаждающей жидкости	Управление двигателем и аэродинамическими поверхностями
<i>Вывод информации</i>	Измерение температуры, давления, интенсивности потоков, концентрации	Измерение температуры	Измерение скорости, высоты, углов атаки, крена, курса

В общем случае материальные компоненты (энергию и информацию) можно рассматривать как входные и выходные потоки, которые изменяются в ходе физических/технических процессов.

Материалы и энергия, очевидно, являются основными составляющими физического процесса. Информация - тоже неотъемлемая часть всякого процесса, однако осознание этого факта произошло не так давно.

Всегда существуют посторонние по отношению к цели процесса факторы, которыми нельзя управлять, но которые оказывают влияние на процесс. Эти факторы рассматриваются как возмущения, отклоняющие процесс от штатного рабочего режима (рис. 7.1). Возмущения сами по себе не являются физическими величинами, а проявляются в виде случайных флуктуации в потоках материалов, энергии и информации.

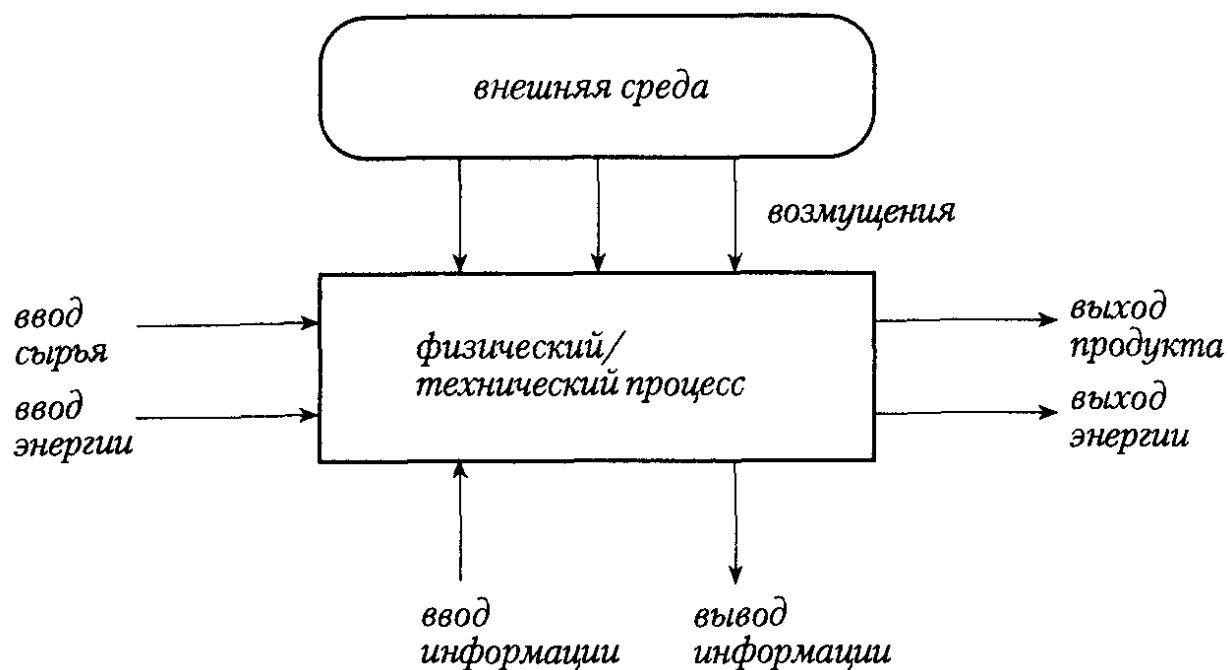


Рисунок 7.1. Обобщенная модель физического/технического процесса

Процесс производства заключается в выпуске продукции из сырья с соответствующими затратами (вводом) энергии. Входной информацией являются технологические инструкции, выраженные в виде набора параметров, которые можно явно контролировать. Выходная информация есть набор измеряемых переменных и параметров, которые описывают текущее состояние процесса и его изменение. Большое количество информации заключено в самом конечном продукте. Информация, следовательно, есть не только данные для наблюдения и управления, но и технологические и организационные процедуры вплоть до циркулирующих по кабинетам служебных документов и заявок на поставку. Этот вид

информации так же важен, как и любой другой элемент, обеспечивающий нормальный ход и оптимизацию производственного процесса.

Вход и выход процесса в последующем изложении понимаются в очень широком смысле. Например, в случае транспортной системы не сразу может быть очевидно, что же является результатом (выходом). Действительно, транспортировка включает изменение географического положения (физического состояния), т. е. производится работа, а работа есть форма энергии. Следовательно, результатом процесса "перемещения" является изменение физической переменной "энергия".

Информация - важнейший компонент управления физическими процессами, поскольку она позволяет лучше использовать два других слагаемых процесса - материю и энергию. Учитывая глобальные проблемы, связанные с производственной деятельностью (истощение природных ресурсов, отходы и загрязнение окружающей среды), большой интерес представляет любое повышение эффективности процесса и снижение побочных эффектов. Обработка информации, улучшающая характеристики технического процесса, выгодна в любом случае.

Компьютеры, собственно, и предназначены для обработки информации (рис. 7.2), в том числе и относящейся к техническим/физическим процессам (рис. 7.3).



Рисунок 7.2. Обработка информации компьютером

В большинстве случаев компьютеры выполняют две основные функции: во-первых, контролируют, находятся ли параметры технического процесса в заданных пределах, и, во-вторых, инициируют соответствующие управляющие воздействия, чтобы параметры оставались в этих пределах даже при наличии внешних возмущений.



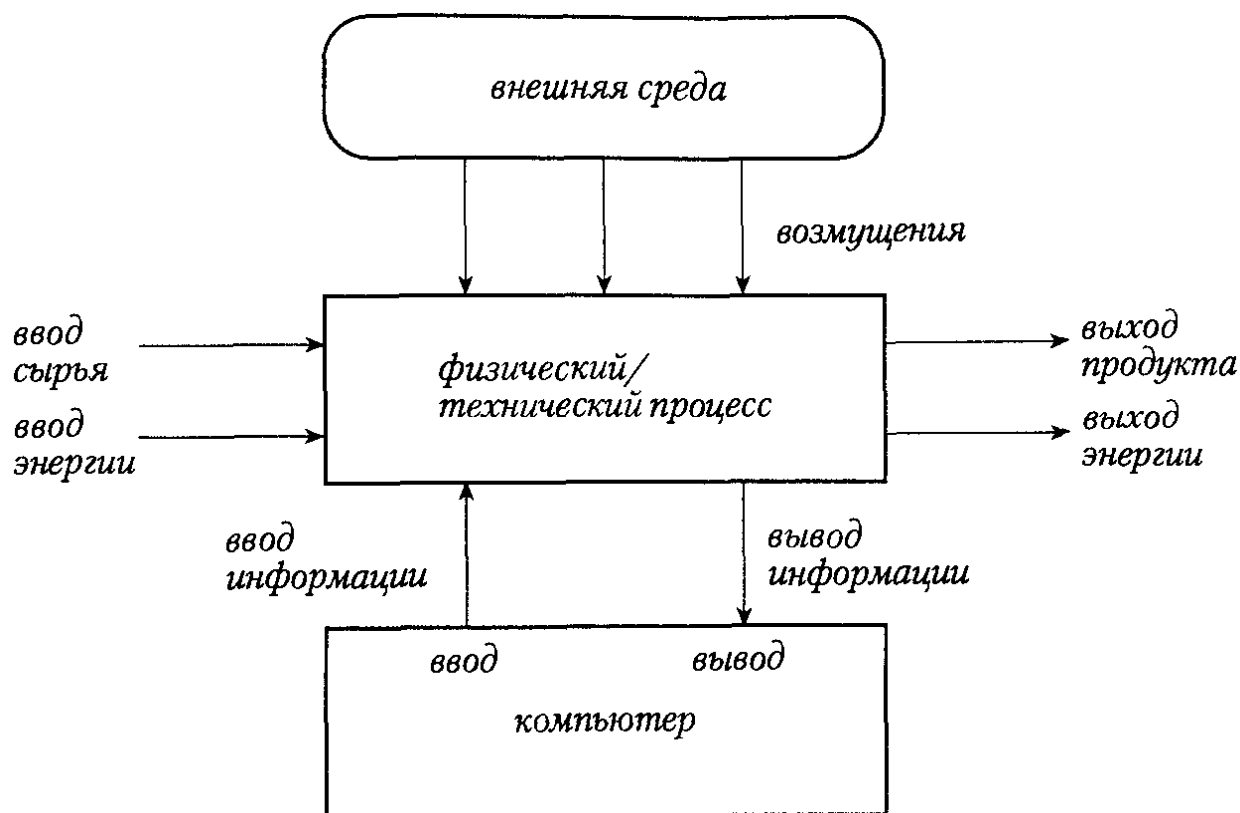


Рисунок 7.3. Применение компьютера в управлении процессом

Управление техническим процессом существенно отличается от обычной обработки данных. В таких приложениях, как бухгалтерский учет или редактирование текста, и вход, и выход представляют собой данные в чистом виде, т. е. их можно хранить или передавать с помощью любого носителя информации. В этом случае время обработки зависит только от производительности компьютера, а результат будет всегда один и тот же.

Ситуация меняется в случае управляющих компьютеров. Здесь обработка данных зависит не от компьютера и его производительности, а, напротив, следует за событиями во внешнем мире, т. е. процессом. Компьютерная система управления должна достаточно быстро реагировать на внешние события и постоянно обрабатывать поток входных данных, чаще всего не имея возможности изменить их количество или скорость поступления. Одновременно может потребоваться и выполнение других операций, например обмен информацией с оператором, вывод данных на экран и реакция на определенные сигналы. Этот режим обработки данных

оказался настолько важным, что получил специальное название - **режим реального времени** (*real-time mode*).

## 7.2. Понятие системы

Производственные процессы и управляющие ими системы состоят из многочисленных и разнообразных элементов, сложным образом взаимодействующих друг с другом. Эти элементы связаны между собой так, чтобы обеспечить обмен материей, энергией и информацией для получения определенного конечного результата.

Термин "система" имеет много значений, однако в интересующем нас контексте под системой понимается любой объект, который рассматривается, с одной стороны, как единое целое, а с другой - как совокупность связанных между собой определенным образом составляющих. Это понятие можно охарактеризовать следующим образом.

- Понятие системы позволяет проще интерпретировать назначение любой сложной структуры, состоящей из взаимодействующих друг с другом частей.

- Описывая систему, ее можно по-разному разбить на составные части. Каждая из частей в свою очередь может быть разбита на более мелкие составляющие. Важно выбрать правильный уровень детализации.

- Обычно нет необходимости знать внутренние механизмы элемента для того, чтобы предвидеть поведение системы в целом. Достаточно знать соотношение вход/выход - принцип "черного ящика".

- Цель системы — получить результат, качественно или количественно превосходящий механическую (простую) сумму результатов работы отдельных ее компонентов. Объединение в систему добавляет "нечто большее", что и объясняет ее назначение, — принцип "синергизма". Это "нечто большее" определяется не наличием тех или иных компонентов системы, а скорее есть результат их взаимодействия.

На практике встречаются системы самых различных типов, например электрические, химические, механические или биологические. Компьютер - это система, основными функциональными элементами которой являются процессор, память и периферийные устройства. Взятые порознь, эти части не допускают никакого осмысленного применения. Если их объединить и добавить программное обеспечение, то получится система, которую можно использовать для решения многих задач. Человеческий организм представляет собой пример чрезвычайно сложной системы, состоящей из органов, каждый из которых имеет свое назначение. Он способен выполнять основную задачу - поддерживать собственную жизнь - именно потому, что все органы работают вместе.

Для описания систем и их элементов можно применять разнообразные математические методы. Как подчеркнуто в большинстве учебников, эти методы можно использовать, только когда все элементы системы и окружающая ее среда описываются количественными соотношениями. Дальше будет показано, что математический подход - это не единственный способ описания систем. Очевидное преимущество математических методов в том, что они основаны на формальных доказательствах, и поэтому, как правило, им следует отдавать предпочтение перед другими методами.

Важнейшей характеристикой системы является ее динамика, знание которой позволяет предсказать поведение системы и выбрать правильное управляющее воздействие в соответствии с поставленной целью. Динамика системы представляет собой сложный вопрос из-за того, что приходится учитывать многочисленные взаимодействия между различными частями. Часто кажется, что эволюция системы идет "не в том" направлении или, по крайней мере, не соответствует "интуитивным" ожиданиям. Любой водитель инстинктивно представляет себе динамику автомобиля. При движении вверх или вниз по склону он увеличивает или уменьшает давление на педаль газа для того, чтобы сохранить скорость. Нормальное поведение автомобиля хорошо известно и прогнозируемо, однако на мокрой или обледенелой

дороге он может стать неуправляемым. Аналогичные проблемы возникают ежедневно и в управлении техническими процессами.

В крупных технических задачах одной из важнейших проблем является структурирование системы. В процессе эксплуатации взаимодействуют множество людей, происходит постепенная замена оборудования и добавление новых функций. Сложную систему необходимо рассматривать как с общих позиций, так и с позиций всех ее компонентов.

Возникающие проблемы обычно нельзя разрешить только на одном уровне - их надо рассматривать под соответствующим углом зрения и на соответствующем уровне. Это не означает, что требуется знать все детали каждой конкретной ситуации, а скорее предполагает возможность при необходимости получить любые подробности. Решение, выработанное на несоответствующем уровне, чаще всего вообще не является решением и может даже ухудшить ситуацию. Нет смысла искать ошибки в программе, которая не выполняет предусмотренную печать, если выключен принтер. Каждый инженер имеет собственный набор анекдотов по этому поводу.

Границы между компетенцией инженеров-электронщиков, программистов, прикладных специалистов и пользователей в настоящее время постоянно размываются. Нельзя рассматривать сложную систему только с одной точки зрения, а решения принимать, опираясь на знания специалистов лишь из одной области. Чтобы понять или создать сложную систему, состоящую из множества взаимодействующих частей необходим специальный подход. Далее будут даны некоторые рекомендации для успешного анализа и проектирования автоматизированных систем.

### **7.3. Примеры типичных приложений цифрового управления**

Примеры цифрового управления встречаются везде, начиная от товаров массового спроса и до высокотехнологичной продукции. Сегодня в самом обычном автомобиле компьютеры применяются для управления как зажиганием и составом бензиновоздушной смеси, так и температурой в

пассажирам в салоне. Даже настройка приемника, доверяется водителю, а управляется микропроцессором, который иногда не упрощает, а наоборот, усложняет жизнь.

На первый взгляд может показаться, что системы управления химическим производством или движением на крупной железнодорожной станции имеют мало общего с роботами для окраски автомобилей или с бортовым компьютером космического корабля. Однако во всех этих системах имеются одинаковые функциональные блоки – сбора данных, управляемые таймером или прерываниями функции, контур обратной связи, обмен данными с другими компьютерами и взаимодействие с человеком-оператором.

В общем случае система цифрового управления физическим/техническим процессом состоит из следующих компонентов (рис. 7.4):

- управляющей ЭВМ;
- каналов обмена информацией;
- аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей (АЦП и ЦАП);
- датчиков и исполнительных механизмов;
- собственно физического/технического процесса.

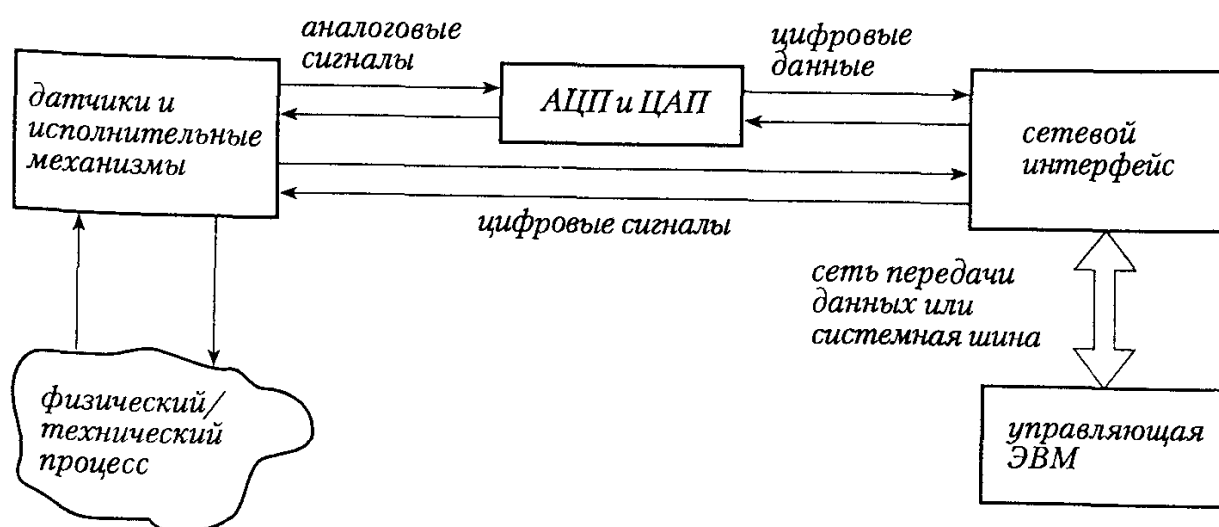


Рисунок 7.4. Основная структура системы цифрового управления процессом

Физический процесс контролируется с помощью датчиков, т. е. устройств, преобразующих физические параметры процесса (температуру, давление или координаты) в электрические величины, которые можно непосредственно измерить (сопротивление, ток или разность потенциалов). Примерами датчиков являются термисторы (датчики температуры), концевые выключатели и ультразвуковые микрофонные зонды. Непосредственное влияние на процесс осуществляется с помощью исполнительных механизмов. Последние преобразуют электрические сигналы в физические воздействия, главным образом движение - перемещение и вращение, которые можно использовать для других целей, например для открытия клапана. Примерами исполнительных механизмов могут служить сервомоторы, гидроклапаны и пневматические позиционирующие устройства.

Цифровые системы управления работают только с информацией, представленной в цифровой форме, поэтому полученные в результате измерений электрические аналоговые величины необходимо обработать с помощью АЦП. Обратная операция - управление исполнительными механизмами (электромоторами и клапанами) - несколько проще, поскольку компьютер может непосредственно вырабатывать электрические сигналы.

Информация от удаленных объектов через каналы связи поступает к центральному управляющему компьютеру, который:

- интерпретирует все поступающие от физического процесса данные;
- принимает решения в соответствии с алгоритмами программ обработки;
- посылает управляющие сигналы;
- обменивается информацией с человеком-оператором и реагирует на его команды.

Нет ничего неожиданного в том, что поточное производство и машиностроение обеспечивают благоприятную почву для применения ВТ. Станки с числовым программным управлением (ЧПУ, *Numerical Control* — NC), производя высокоточные механические детали, выполняют строго

определенную последовательность операций. Такие станки применяются во многих отраслях; их работа зависит от программного обеспечения, которое можно сравнительно быстро и дешево заменить. Гибкость промышленных роботов и многообразие выполняемых ими операций обеспечиваются, главным образом, компьютерным управлением. Если один станок не может обработать деталь, то гибкая производственная система (*Flexible Manufacturing System* - FMS) обеспечит выполнение необходимых операций другим станком участка или подразделения завода. В такой системе работа каждого станка, их взаимодействие и перемещение деталей управляются компьютерами.

Вычислительная техника применяется и в отраслях, имеющих другой характер производства, в частности в химической, металлургической, целлюлозно-бумажной и т. п. Разные технологические процессы обычно взаимосвязаны, и между ними постоянно перемещаются значительные материальные потоки. Такие производства, как правило, носят непрерывный характер, поэтому важнейшим фактором является надежность. Кроме того, обычно число измеряемых переменных очень велико, масштаб времени процессов в рамках одного предприятия составляет от нескольких секунд до нескольких дней, а территория может иметь значительные размеры. При высоких капитальных вложениях и стоимости материалов даже небольшие изменения параметров производства и показателей качества существенно влияют на экономику.

## 8. ОСОБЕННОСТИ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ

### 8.1. Управление процессом в реальном времени

Компьютеры, управляющие процессами, имеют другие задачи, нежели компьютеры, используемые для "классической" обработки информации. Основная разница состоит в том, что управляющий компьютер должен работать со скоростью, соответствующей скорости процесса (рис. 2.1). Само понятие "реальное время" указывает на то, что в реакции компьютерной системы на внешние события не должно быть заметного запаздывания.

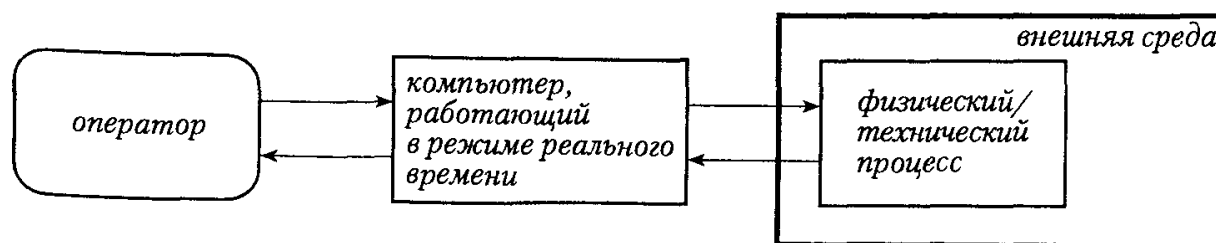


Рисунок 8.1. Применение компьютера в управлении процессом

Другая главная особенность компьютерного управления процессом заключается в том, что ход исполнения программы нельзя определить заранее. Внешние сигналы могут прерывать или изменять последовательность исполнения операторов программы, причем для каждого нового прогона по-разному. Кроме того, существует проблема эффективного использования ресурсов компьютерной системы с учетом временных ограничений. Все это требует специальных методов программирования. Дополнительную проблему представляет собой тестирование систем реального времени из-за отсутствия предсказуемого порядка выполнения операторов программы по сравнению с обычными компьютерными системами.

Параллельность - одно из важных свойств реального мира. Все события вокруг нас, мы сами и фактически любые физические процессы можно представить в виде множества "подпроцессов", которые протекают



параллельно. Из этого свойства следует важный вывод: компьютер, взаимодействующий с таким процессом или управляющий им, должен учитывать эту параллельную природу, а в некоторых ситуациях и работать в соответствии с ней. Естественным следствием параллельной природы реального мира является то, что компьютер должен уметь управлять параллельными задачами. В этом и заключается отличие управляющего компьютера от обычного, для которого естественным является последовательный режим.

### Пример - пресс для пластика

Управление прессом для пластика - это пример типичной задачи компьютерного управления процессом.

Компьютер должен одновременно регулировать температуру (поддерживать ее постоянной) и координировать последовательность технологических операций. Если применять обычные методы программирования, то задача структурирования программы становится неразрешимой. Поэтому требуется другой подход.

Пресс для пластика представлен на рис. 8.2.

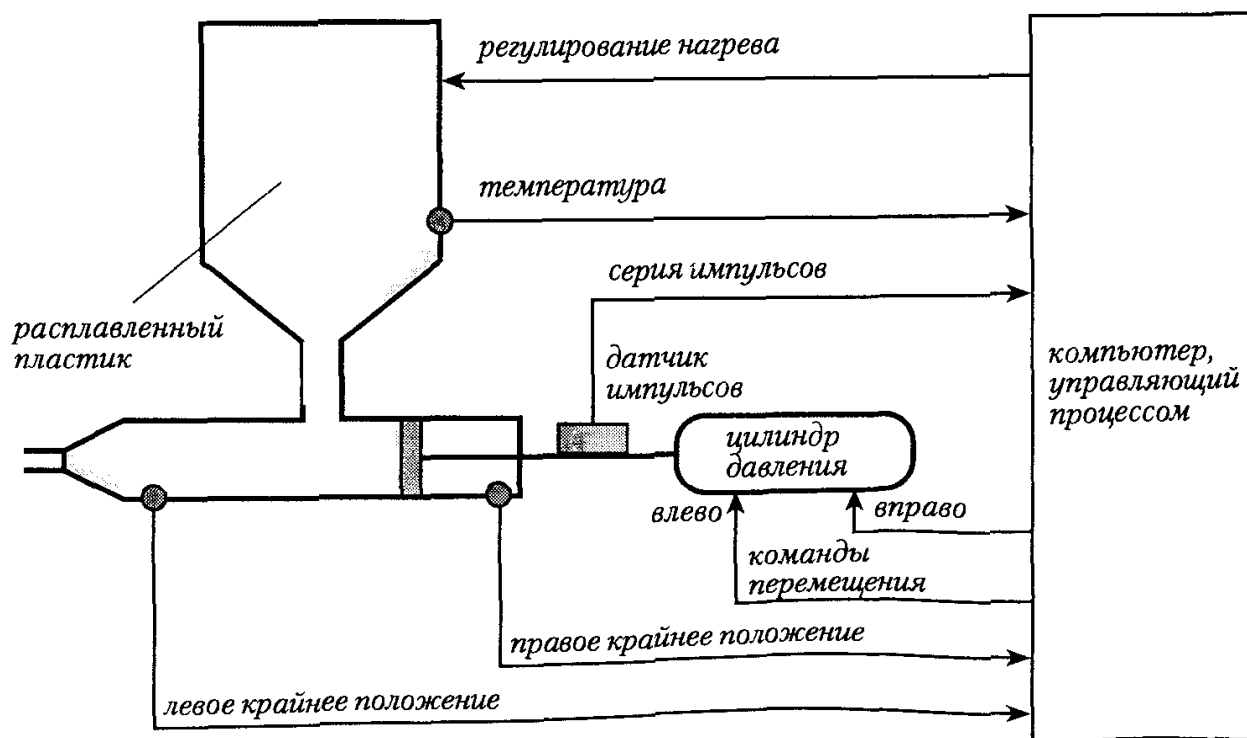


Рисунок 8.2 Пресс для пластика

Контейнер содержит расплавленный пластический материал; температура пластика должна поддерживаться в пределах узкого диапазона. Управляющий компьютер периодически считывает текущую температуру и рассчитывает тепло, необходимое для ее поддержания на требуемом уровне. Тепло поступает от нагревательного элемента, управляемого компьютером. Время его работы согласовано с количеством тепла, которое необходимо подвести.

Нижняя часть пресса состоит из поршня, выталкивающего определенное количество расплавленного пластика через насадку. Когда поршень находится в крайнем правом положении, цилиндр заполняется пластиком. Затем поршень быстро перемещается влево, выдавливая требуемое количество пластика. Положение поршня контролирует импульсный датчик, генерирующий определенное число импульсов на каждый миллиметр перемещения, а объем выдавливаемого пластического материала определяется числом импульсов за время перемещения. Движение поршня прекращается при достижении заданного числа импульсов.

Чтобы обеспечить приемлемую производительность, температура пластика должна иметь заданное значение к тому моменту, когда поршень при движении вправо минует выходное отверстие контейнера.

Компьютерная система должна регулировать температуру и движение поршня одновременно. Значение температуры поступает в виде непрерывного сигнала от датчика. Положение поршня рассчитывается исходя из числа импульсов. Кроме того, еще два датчика генерируют двоичные сигналы при достижении поршнем крайнего положения. Компьютер не содержит отдельного внутреннего интервального таймера и поэтому должен отсчитывать время с помощью счетчика сигналов от внешнего источника времени.

## 8.2. Управление на основе последовательного программирования

Попытаемся проанализировать следующую проблему: могут ли задачи управления в реальном времени решаться с помощью последовательного программирования. Блок-схема регулирования температуры представлена на рис. 8.3.

Программа считывает температуру пластика каждые 10 секунд, определяет необходимое время нагрева (переменная *heat\_time*), включает нагреватель и затем переходит в **цикл занятого ожидания** (*busy loop*) обновления счетчика времени (переменная *C*), во время которого компьютер не может выполнять никакие другие операции. Очевидно, что это не самое эффективное использование компьютера.

Компьютер выдает команду начать движение вправо, затем непрерывно контролирует информацию от датчика конечного положения до тех пор, пока не получит сигнал о том, что оно достигнуто. Затем начинается обратное движение поршня влево, при этом компьютер должен в цикле занятого ожидания ждать очередного импульса и суммировать их (счетчик импульсов обозначен *n*). Цикл считается завершенным при достижении заданного числа импульсов (переменная *pulse-ref*). Затем весь цикл повторяется сначала. Так же как и при регулировании температуры, компьютер не может выполнять других операций, пока он находится в цикле ожидания очередного импульса.

Каждую из двух задач можно решить непосредственно с помощью последовательного кода. Но объединить их в одной программе непросто. Циклы взаимного ожидания использовать нельзя, так как управляемый процесс не позволяет длительных задержек, а исполнение одной задачи не должно быть связано с другой. В принципе, можно обойтись и без циклов ожидания. Однако программа при этом будет все время переключаться между двумя задачами и проверять, какая задача должна исполняться следующей, станет громоздкой и сложной для анализа. Попытка последовательного расположения блоков инструкций, исполнение которых

фактически должно быть параллельным, порождает взаимосвязи между практически независимыми функциями.

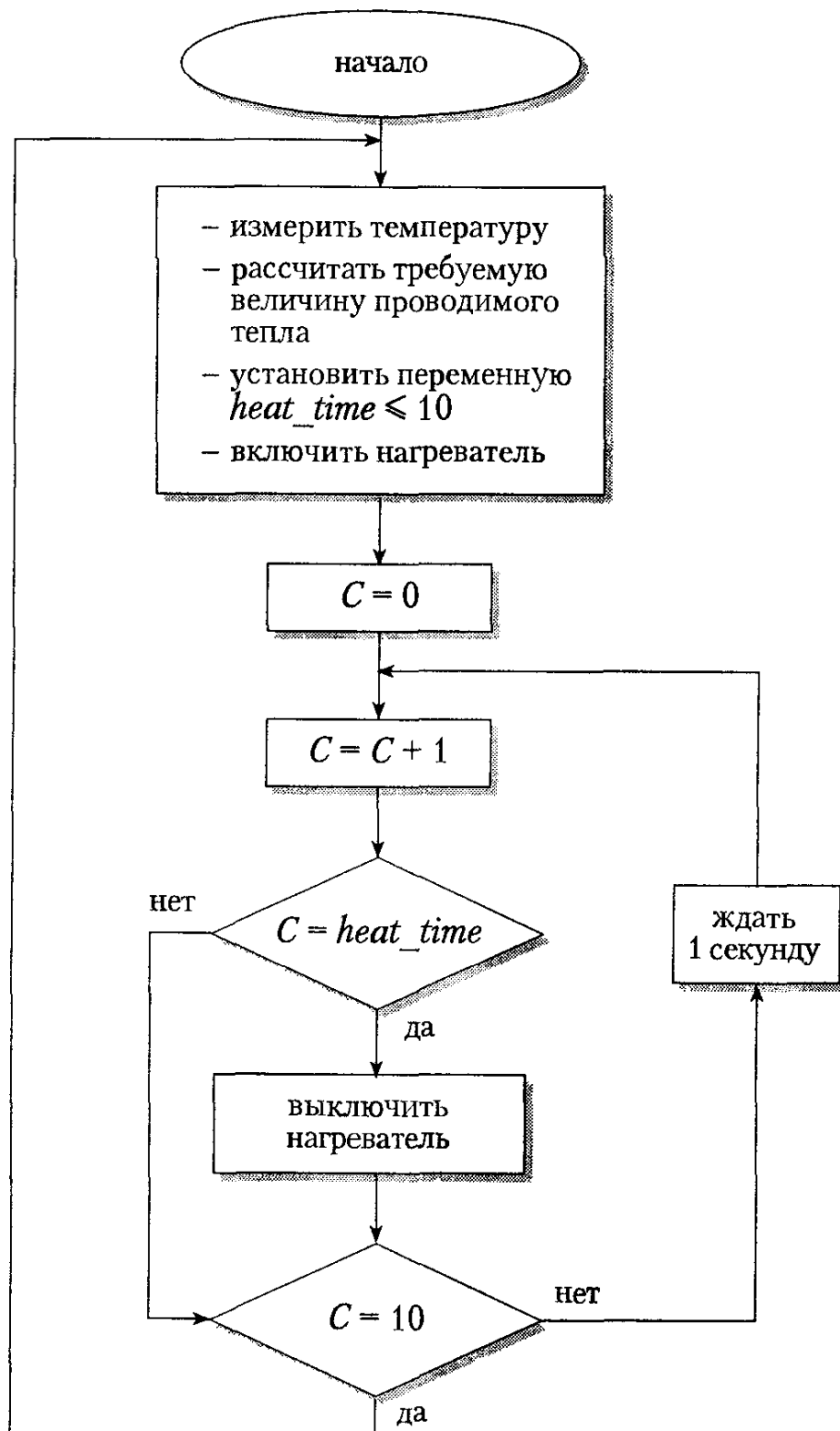


Рисунок 8.3. Блок схема регулирования температуры пластика

Алгоритм управления перемещением поршня показан на рис. 2.4.

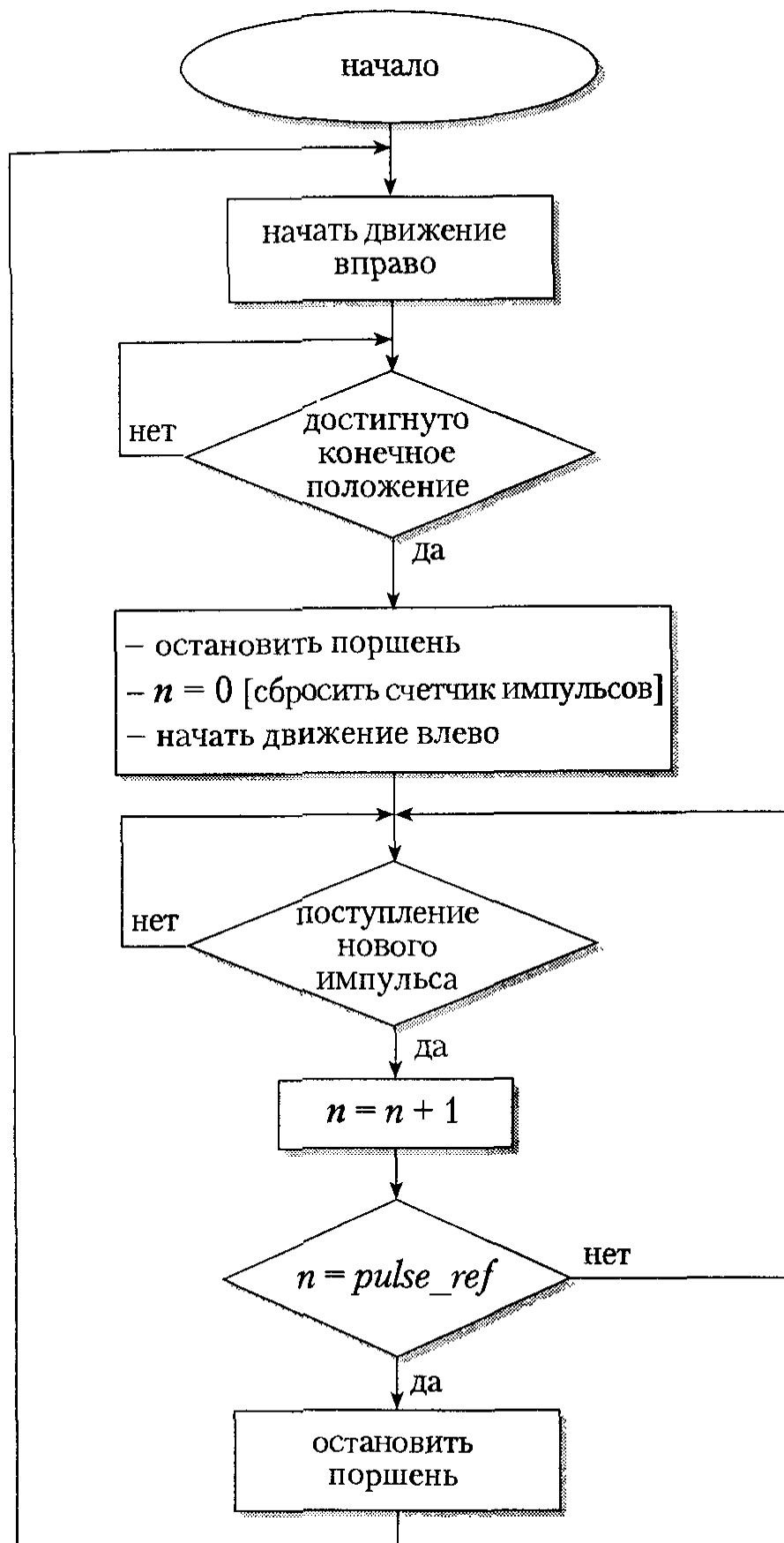


Рисунок 8.4. Блок схема управления движением поршня прессы для пластика

### 8.3. Управление на основе прерываний

Главная сложность программы управления прессом - необходимость организации переключения между задачами. На практике проблема решается с помощью двух независимых программ, выполняемых на одной машине: одна - регулирует температуру, а другая - управляет перемещением поршня.

Метод сигнализации, называемый прерыванием, используется для переключения ЦП с исполнения одной задачи на другую. С помощью прерываний циклы ожидания можно заменить на ожидание прерывания.

Фактически прерывание представляет собой внешний сигнал, извещающий ЦП о наступлении некоторого события. События отслеживаются датчиками и заставляют ЦП прервать исполнение текущей программы и перейти к другой. Таким образом, внешние сигналы могут влиять на исполнение того или иного программного модуля. Особый вид прерывания связан со временем. Электронный таймер выдает сигнал прерывания при наступлении определенного момента времени или по истечении некоторого интервала. Этот таймер не является частью ЦП, однако конструктивно располагается на той же плате. Он освобождает ЦП от необходимости контролировать время. Более подробно о прерываниях будет рассказано дальше.

С использованием прерываний задача регулирования температуры решается проще. Прерывание по времени связано с переменной *heat\_time*. После включения нагревателя программа устанавливает таймер на величину времени нагрева (значение переменной *heat\_time*) и ждет сигнала прерывания для продолжения работы (инструкция **wait\_time** (*heat\_time*) на рис. 8.5).

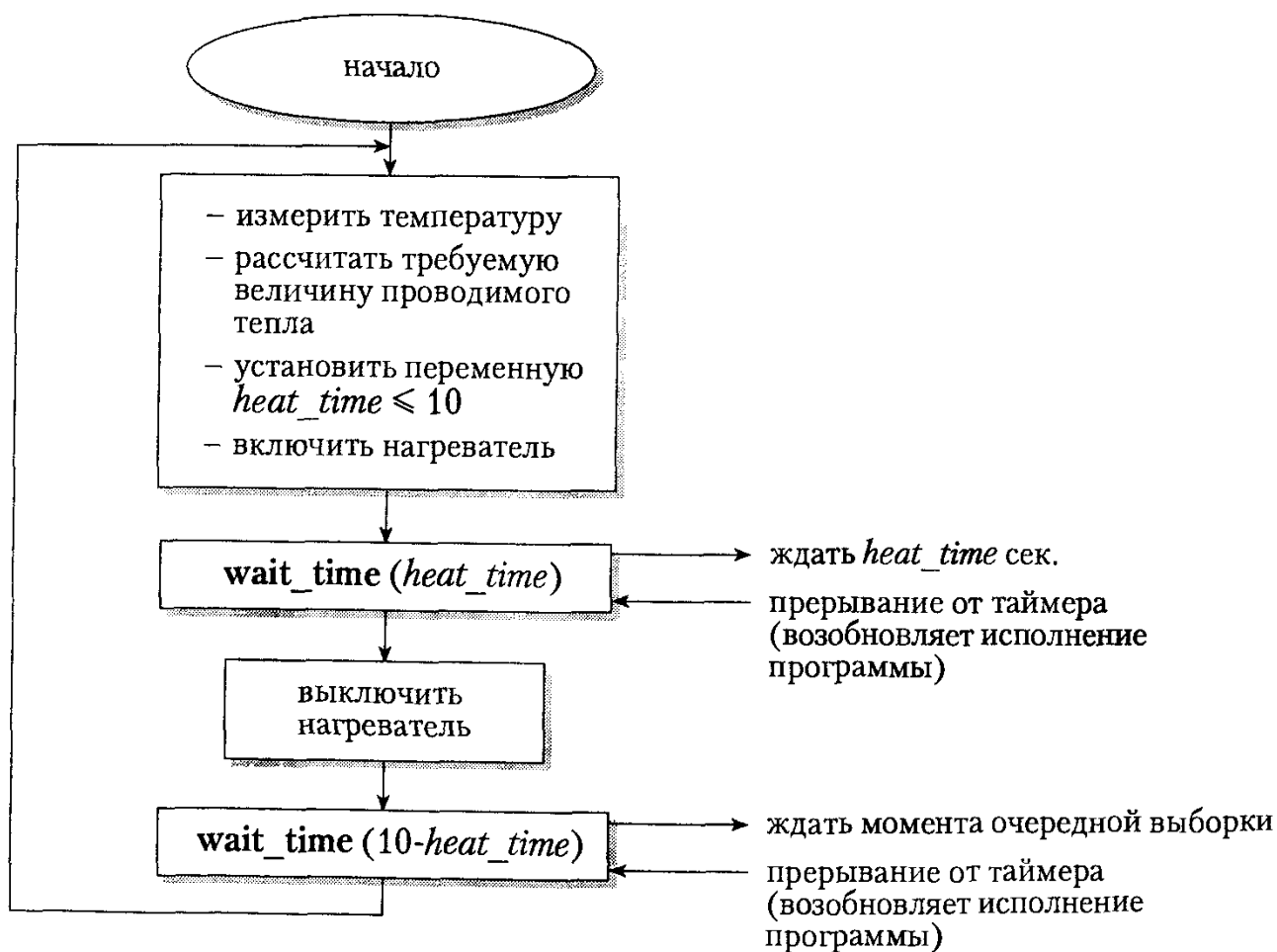


Рисунок 8.5. Использование прерываний от таймера для регулирования температуры пластика

Аналогично, программа управления поршнем ожидает два прерывания: одно от датчика крайнего правого положения, другое - от импульсного датчика, контролирующего перемещение поршня (рис. 8.6). Прерываниям соответствуют инструкции вида `wait_interrupt(x)`, где  $x$  обозначает канал поступления сигнала прерывания. Оператор `wait_interrupt` приостанавливает исполнение программы, которое возобновляется только при поступлении соответствующего сигнала внешнего прерывания.

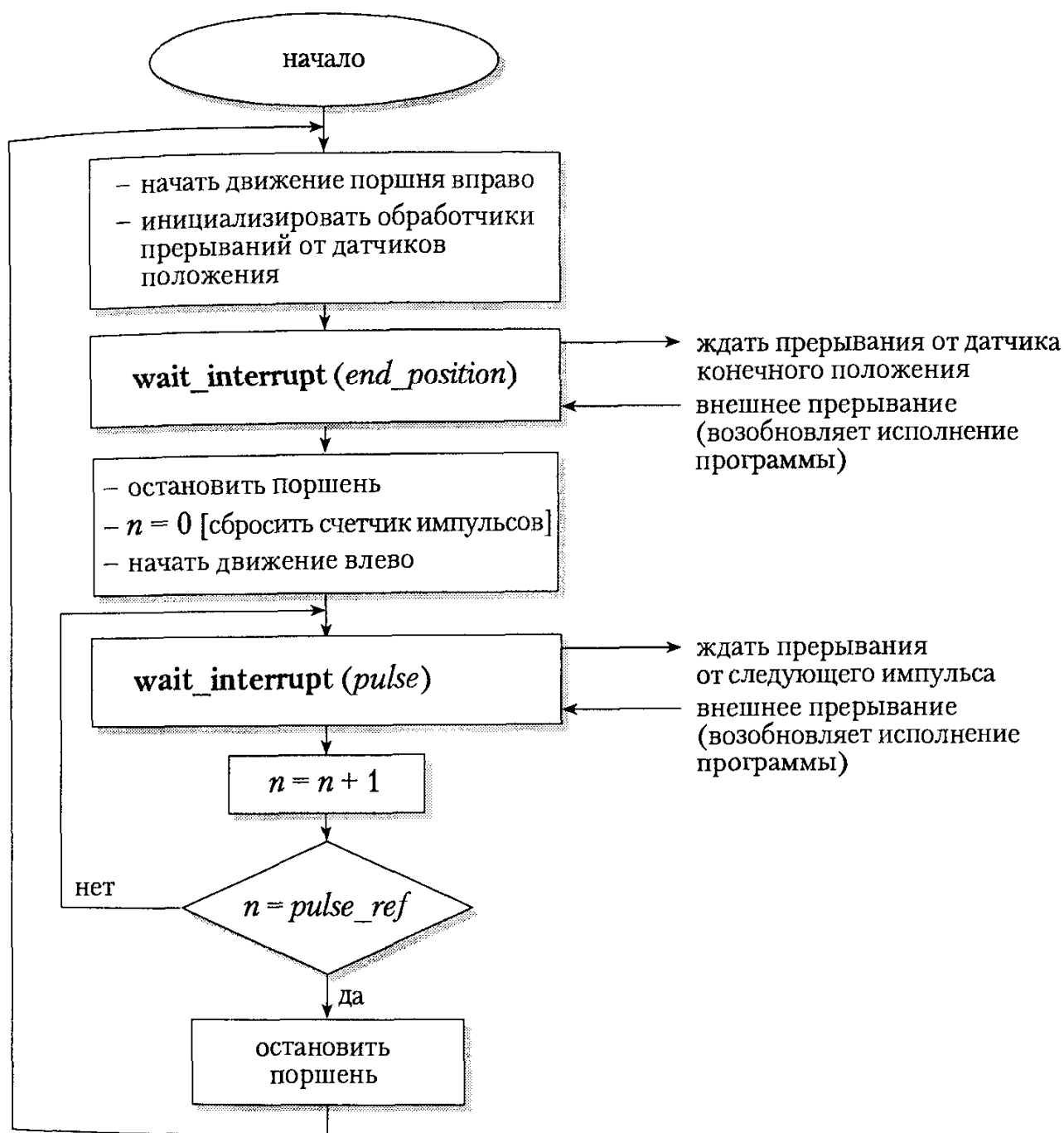


Рисунок 8.6. Использование прерываний для управления движением поршня

Система прерываний обеспечивает переключение ЦП с исполнения одной программы на другую как следствие внешних событий. В результате решение задачи управления получается прозрачным и элегантным. Если каждый программный модуль является независимым, то добавить новые блоки к системе можно без нарушения существующей структуры.



## **8.4. Примеры задач управления процессами**

В этом разделе на примерах проиллюстрированы основные типы задач, встречающиеся при управлении процессами. Вначале обсуждается, что в общем случае требуется для управления, а затем рассматриваются проблемы, присущие техническим процессам.

### **8.4.1. Управление последовательностью событий и бинарное управление**

Простой химический реактор, представленный на рис. 8.7, - пример системы управления последовательностью событий. В химическом реакторе реагенты перемешиваются с помощью смесителя. Входные потоки реагентов и выход продукта регулируются входными клапанами А и Б и выходным клапаном В, соответственно. Уровень давления в баке контролируется датчиком Д, а температура - датчиком Т. Температура регулируется горячей или холодной водой, подаваемой в окружающий бак кожух; потоки воды регулируются клапанами Г (горячо) и Х (холодно).

В этом примере в реакторе выполняются следующие операции:

1. Открыть клапан А и залить в бак реагент 1.
2. Если датчик давления Д показывает, что достигнут требуемый уровень, то закрыть клапан А.
3. Запустить смеситель.
4. Открыть клапан Б и залить в бак реагент 2.
5. Если датчик давления Д показывает, что достигнут новый требуемый уровень, то закрыть клапан Б.
6. Открыть клапан Г для нагрева бака.
7. Если датчик Т показывает, что достигнута требуемая температура, то закрыть клапан Г.
8. Установить таймер на время протекания химической реакции.
9. При срабатывании таймера - время реакции истекло - остановить смеситель.
10. Открыть клапан Х для охлаждения бака.

11. Проверить температуру в баке. Если температура упала ниже заданного предела, то закрыть Клапан X и открыть клапан В для опорожнения бака.

12. Закрыть клапан В. Повторить все этапы с самого начала.

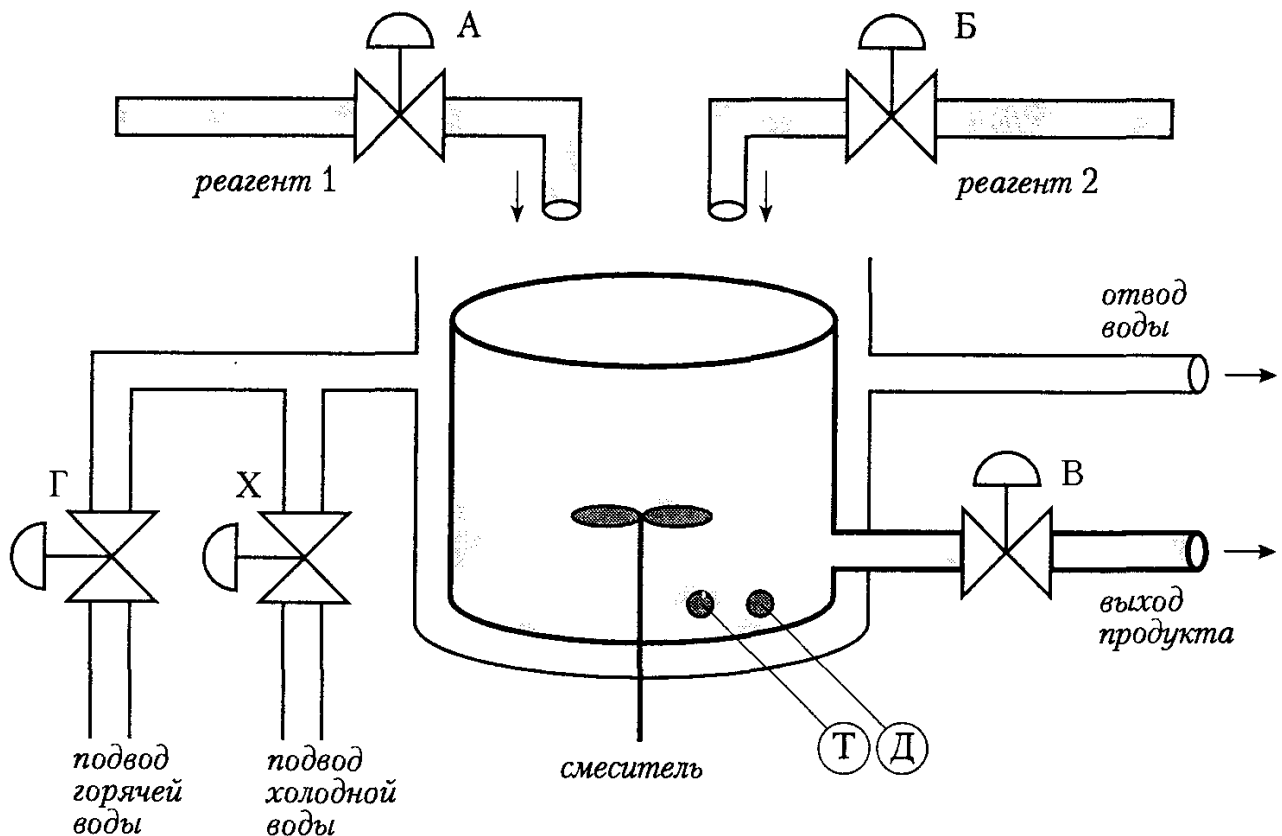


Рисунок 8.7. Простой химический реактор с регулированием температуры

Многие системы предназначены для управления очередностью выполнения операций которая зависит от некоторых логических условий, как в приведенном примере. Входные и выходные данные системы являются бинарными в том смысле, что датчики контролируют два состояния или граничное значение, например клапан открыт или закрыт, индикатор сработал или нет, кнопочный выключатель нажат или отжат и т. д.; и команды управления имеют аналогичный формат - запустить/остановить двигатель, включить/отключить нагреватель и т. п.

Если задача управления основана только на бинарной логике, то очевидно, что решать ее удобнее и проще цифровыми средствами.

Существуют так называемые программируемые логические контроллеры, специально созданные для решения таких задач.

#### 8.4.2. Простой контур управления - регулятор температуры

Рассмотрим бак, заполненный жидкостью, температура которой должна поддерживаться постоянной (рис. 8.8). Все сигналы в этом примере - аналоговые, т. е. изменение температуры отслеживается непрерывно, в отличие от предыдущего примера, где проверялось лишь превышение порогового значения, а подача тепла может регулироваться плавно.

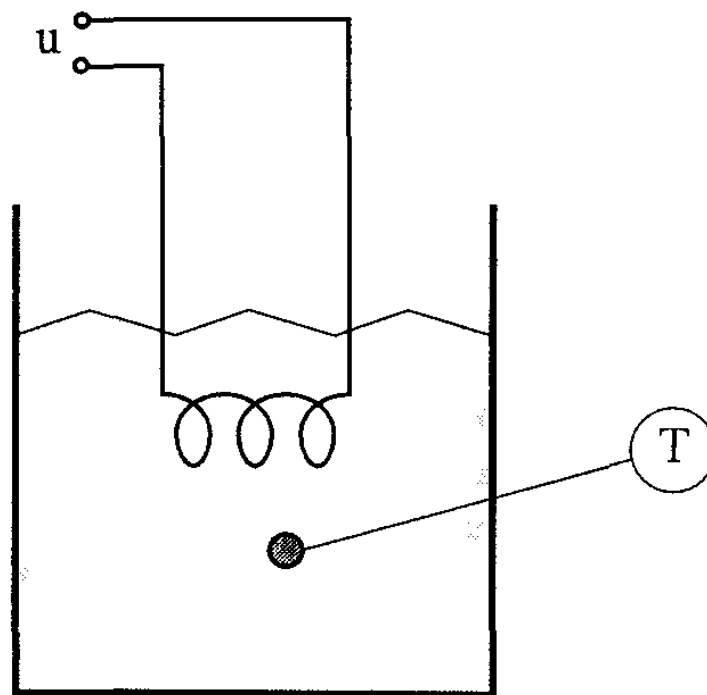


Рисунок 8.8. Простая система регулирования температуры

Температура измеряется датчиком, выходное напряжение которого пропорционально текущей температуре (пропорциональная зависимость существует как минимум в интересующем диапазоне температур). Измерения периодически, например, каждую секунду, поступают в компьютер, и текущее значение температуры сравнивается с требуемым (опорным), которое хранится в памяти компьютера. Величина нагрева или охлаждения рассчитывается по разности между опорным и измеренным значениями (рис. 8.9).

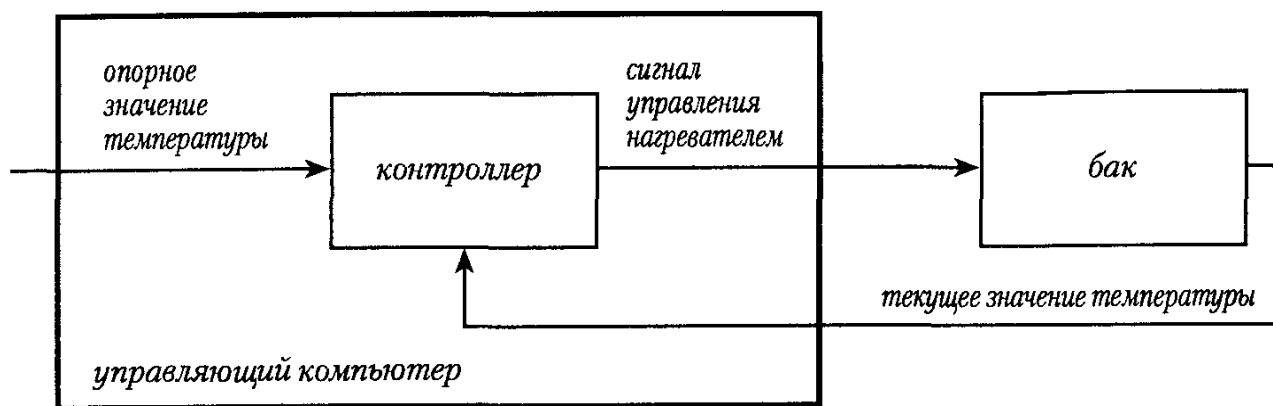


Рисунок 8.9. Простой контур управления - система регулирования температуры

В зависимости от исполнительного механизма - устройства, непосредственно влияющего на процесс, - меняется вид управляющего сигнала, подающегося на его вход. Температуру можно регулировать с помощью нагревателя, периодически включаемого на заданный интервал времени, или использовать теплообменник, соединенный с трубопроводами пара и холодной воды. В первом случае управляющим действием является момент включения нагревателя; во втором - регулирование осуществляется за счет открытия или закрытия клапанов трубопроводов пара и охлаждающей жидкости.

Регулятор температуры демонстрирует некоторые основные свойства контура управления. Температура должна измеряться с частотой, определяемой постоянной времени процесса. Если теплоемкость бака велика, то постоянная времени имеет относительно большое значение. Наоборот, если объем бака небольшой, а нагреватель мощный, то постоянная времени процесса мала и система управления должна достаточно часто измерять температуру и включать или отключать нагреватель. Таким образом, при проектировании цифровой системы управления должны быть учтены основные динамические характеристики процесса.

### 8.4.3. Генерация опорного значения

Иногда в химической реакции необходимо поддерживать величину температуры в соответствии с **опорным значением** (*reference value*) - уставкой (*set point value*), - которое постоянно пересчитывается во время протекания процесса. Вычисление опорной температуры не должно иметь заметного запаздывания - каждое ее новое значение должно быть рассчитано до момента очередного сравнения с текущей температурой. Этот процесс схематично представлен на рис. 2.10.

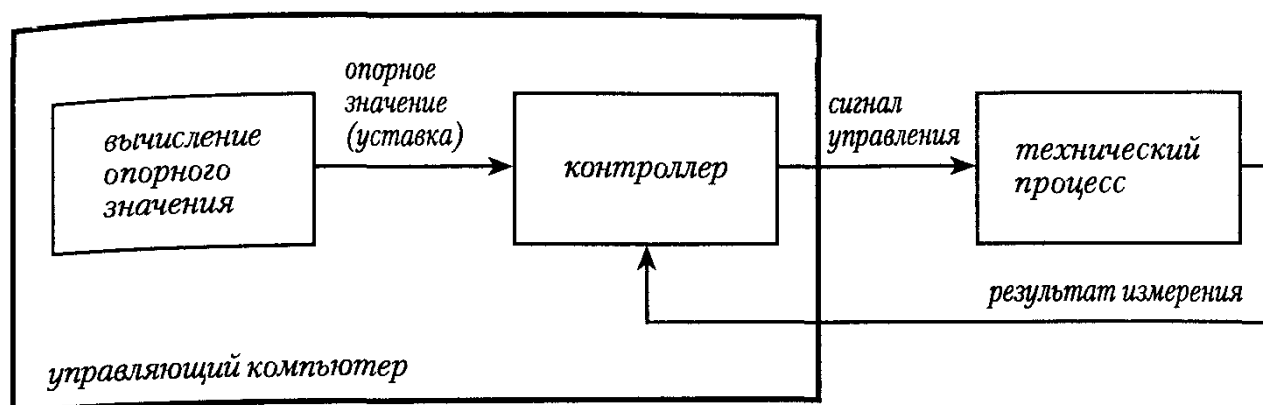


Рисунок 8.10. Генерация опорного значения

Система, отслеживающая значение опорного сигнала с достаточной точностью и быстротой, называется сервомеханизмом или, кратко, серво. В сервосистемах опорные значения либо рассчитываются, либо задаются в виде таблиц. Например, в системе управления роботом перемещения манипулятора как функция времени описываются траекторией. Траектория рассчитывается заранее как кривая в пространстве, которая называется путь (*path*) или контур (*contour*) и хранится в табличном виде в памяти компьютера вместе с заданными интервалами времени. Таким образом, набор опорных значений для контроллеров положения шарниров манипулятора известен в любой момент времени. Однако во многих случаях траектория должна рассчитываться одновременно с перемещением манипулятора робота, что существенно загружает ЦП из-за сложной геометрии манипулятора.

Каждое вновь вычисленное опорное значение сравнивается с текущим положением. Затем компьютер посылает сигналы коррекции двигателям, управляющим механическими шарнирами. Должна быть также предусмотрена и обратная операция - определение положения манипулятора по углам поворотов шарниров. Оба вида расчетов требуют значительных вычислительных ресурсов и критичны по времени.

#### **8.4.4. Системы, содержащие несколько контуров управления**

Во многих приложениях необходимо регулировать сразу несколько параметров - температуру, уровень, давление, положение и т. д., - для каждого из которых используется свой контур управления. В большинстве случаев эти отдельные задачи можно решить независимо друг от друга с помощью локальных специализированных регуляторов на основе алгоритма, аналогичного показанному на рис. 8.9. Альтернативным решением является использование центрального управляющего компьютера, который выполняет одну и ту же программу для различных параметров и входных данных каждого контура. Эта управляющая подпрограмма для каждого контура может исполняться со своей периодичностью, при этом компьютер должен обладать достаточными ресурсами для обработки всех данных за требуемое время.

Рассмотрим офисное здание или многоквартирный дом, в котором необходимо регулировать температуру каждой отдельной комнаты. Фактическое значение температуры в каждой комнате зависит от влияния внешних факторов - открытых или закрытых окон и дверей, количества людей в комнате, включено ли освещение и т. д. Для регулирования температуры в этом случае можно использовать один компьютер, который поочередно обслуживает каждую комнату. Компьютер многократно исполняет одну и ту же программу управления каждый раз с новыми значениями выходных и входных переменных.

#### **8.4.5. Взаимосвязанные системы**

На сложных производствах одновременно используются разные типы управления и, соответственно, существует взаимосвязь между частными процессами. Например, запуск промышленного процесса может заключаться в выполнении ряда последовательных шагов аналогично химическому реактору рассмотренному выше. После достижения процессом заданного рабочего состояния управление переводится на систему регулирования с обратной связью для более точного поддержания требуемого режима. Примерами в этом смысле могут служить система электропривода и химический реактор. Двигатель или реактор выводится на рабочий режим при управления последовательностью событий, а затем вступает в действие регулятор с обратной связью для поддержания требуемого значения скорости вращения или температуры соответственно.

Пример из поточного производства служит иллюстрацией другого вида взаимодействия структур управления. В технологической линии робот перемещает детали между несколькими станками с ЧПУ. Положение и скорость каждого механизма, включая робота, управляются несколькими контурами регулирования с обратной связью типа показанных на рис. 8.9 и 8.10. Очевидно, что механизмы не могут работать независимо, их действия должны координироваться. Для синхронизации работы станков и роботов необходимо наличие управляющей системы - диспетчера. Механизмы посылают диспетчеру сигналы о своем рабочем состоянии, как-то: "операция выполнена", "робот заблокирован", "станок готов к получению новой детали" и т. д. Диспетчер определяет соответствующие управляющие воздействия для наиболее эффективного использования станков и робота, одновременно пытаясь избежать конфликтных ситуаций типа длительного простоя станков или взаимных блокировок.

#### **8.4.6. Критичные по времени процессы**

Многие процессы требуют высокого быстродействия системы управления. Рассмотрим, например, регулирование скорости прокатного стана. Работу различных двигателей и механизмов прокатного стана необходимо синхронизировать с высокой точностью, в противном случае стальная полоса может либо порваться, либо значительно погнуться. Идея управления заключается в некотором ослаблении натяжения стальной полосы в течение всего процесса. Высокая скорость движения полосы (10-100 м/с) обуславливает необходимость распознать изменение скорости любого двигателя в пределах нескольких миллисекунд с последующей коррекцией скорости других двигателей. Разумеется, это предъявляет весьма высокие требования к быстродействию управляющего компьютера.

#### **8.4.7. Свойства процессов, усложняющие управление**

Уровень сложности системы управления определяется, в первую очередь, свойствами управляемого процесса. Среди прочих проблем, усложняющих управление - наибольшее влияние оказывают:

- нелинейность процесса;
- изменяющаяся внешняя среда;
- изменение условий самого процесса;
- значительные временные задержки;
- внутренние связи процесса.

Практически все физические процессы по своей природе нелинейные. Фактически линейные соотношения в большинстве случаев представляют собой искусственное упрощение реального положения вещей. Например, зависимость между силой реакции и удлинением пружины в механических системах очень часто нелинейная, т. е. если удлинение пружины увеличивается в два раза - сила реакции не удваивается, а растет быстрее. Скорость протекания реакции в большинстве химических процессов растет нелинейно и зависит от температуры. При некоторой рабочей температуре



изменение последней на несколько градусов вызывает изменение скорости реакции. Это, однако, не означает, что такое же изменение при другой рабочей температуре приведет точно к такому же изменению скорости реакции.

Тем не менее, благодаря своей простоте - по крайней мере, по сравнению с нелинейным представлением - линейные модели позволяют создавать удобные аппроксимации физических систем.

Важный вид нелинейности - насыщение магнитных материалов электрических машин. Намагничивание якоря является функцией не одной переменной, а зависит от "истории" двигателя, т. е. состояний, предшествовавших текущему режиму, - эффект гистерезиса. Разгон электрического двигателя от нулевой скорости до половины номинальной не то же самое, что снижение скорости от номинальной до ее половины. При проектировании системы управления такие факторы необходимо учитывать.

Нелинейность встречается не только в физических процессах, но и в их интерфейсе с компьютером, т. е. в датчиках и исполнительных механизмах. Типичный пример - переключающий клапан: он может быть либо полностью открыт, либо полностью закрыт. Компьютер способен на основе сложных вычислений определить, что оптимальный входной поток для процесса составляет 46 или 107 % от значения, соответствующего полному открытию, но реально для клапана возможны лишь два значения 0 или 100 %. Кроме того, быстро изменяющиеся сигналы управления могут вызвать износ клапана, поэтому их необходимо избегать.

Меняющиеся условия внешней среды проявляются, например, в динамике самолета. Самолет ведет себя по-разному на малых и больших высотах из-за разницы в плотности воздуха. Реакция на движение закрылков проявляется сильнее на низких высотах, где воздух более плотный. Поэтому автопилот должен учитывать высоту наряду с десятками других факторов, чтобы управлять самолетом при изменяющихся условиях.

Поведение парового котла представляет собой пример процесса с изменяющейся динамикой. Из-за внутренних нелинейностей динамика котла существенно различна при малых и больших уровнях мощности. Это означает, что настройки параметров регулятора должны зависеть от уровня мощности, на котором в данный момент работает котел. Рабочие параметры как функцию мощности можно сохранить в виде таблицы; такой метод называется табличным управлением коэффициентом усиления.

Запаздывание сигналов или наличие зон нечувствительности (мертвых зон) представляет собой серьезную проблему для управления. Из-за этого регулятор функционирует на основе устаревших данных, вплоть до того, что он может выдавать ложные команды. Запаздывания всегда присутствуют в тех процессах, где некоторые параметры нельзя измерить непосредственно. Например, при регулировании концентрации жидкости ее величина измеряется в нижнем сечении трубы и затем передается регулируемому клапану, расположенному выше по течению. Время, требуемое для того, чтобы поток с новыми характеристиками достиг точки измерения приводит к запаздыванию информации, которое может вызвать неустойчивую работу, т. е. осложнить достижение и поддержку требуемой концентрации. Временные запаздывания создаются не только длинными трубами. Многие типы датчиков характеризуются некоторым временем, необходимым для получения нового значения измеряемой величины, что ведет к задержке системы управления и, как следствие к неустойчивости.

Хорошей иллюстрацией последствий запаздывания в распространении сигнал; служит эксперимент, демонстрируемый в некоторых музеях науки и техники. Вы говорите в микрофон и слышите собственный голос в наушниках. Если сигнал от микрофона поступает с задержкой более чем на несколько долей секунды, то вы быстро, сбиваетесь и прекращаете говорить. Этот пример наглядно демонстрирует неустойчивость, вызванную задержками во времени. Подобный эффект иногда встречается при разговоре по телефону через спутник. Запаздывания такого рода осложняют разговоры.

Регулятор в системе с временными задержками должен "помнить" старые управляющие воздействия, т. е. он должен хранить значения выходных управляющих сигналов и использовать их для последующих расчетов. Существуют регуляторы, способные компенсировать временные задержки. Они содержат модель управляемого процесса в той или иной форме и оценивают по специальным алгоритмам текущие значения тех переменных, которые нельзя измерить прямо без запаздывания.

Учет внутренних взаимосвязей добавляет массу сложностей в модель процесса, даже если он в основе своей прост. Примером в этом смысле может служить задача регулирования температуры в комнатах здания. Если открывается окно в одной из комнат, то температура меняется не только локально, но и до некоторой степени в соседних комнатах. Систему с внутренними связями, где изменение на одном из входов влияет сразу на несколько выходов, можно представить в виде блок-схемы, приведенной на рис. 8.11.

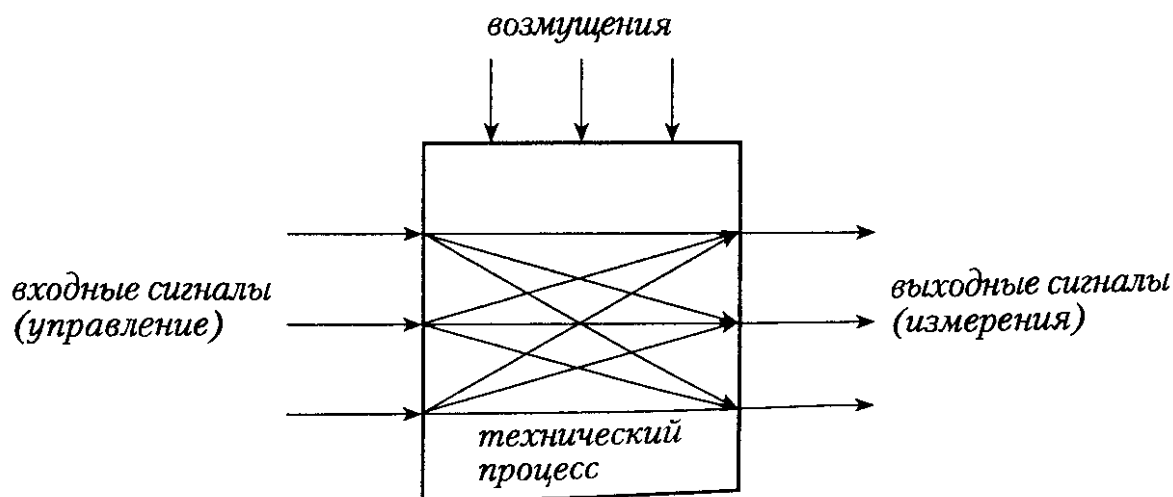


Рисунок 8.11. Внутренние взаимосвязи технического процесса

Для систем производства и передачи электрической энергии характерны большинство из отмеченных ранее проблем. Система чрезвычайно сложна во всех смыслах - имеет большое число составляющих, обладает нелинейной динамикой, должна работать в рамках жестких временных ограничений, подвержена постоянному изменению нагрузки и

внешних условий, требует очень высокой управляемости и надежности. Обеспечить круглый год без перебоев наличие в любой розетке электрической энергии постоянными значениями напряжения и частоты далеко не просто. Эффективно управлять такими большими системами можно только с помощью компьютеров.

### **8.5. Особенности систем цифрового управления**

Примеры, приведенные выше, отражают ряд свойств, которые необходимо учитывать в системах управления. Управляемый технический процесс представляет лишь только часть проблемы; другая ее часть - это управляющий компьютер. Система управления используется не только для регулирования и определения последовательности технологических операций типа описанных выше, но должна выполнять и ряд дополнительных функций, например, распознавать нештатные ситуации и адекватно на них реагировать. Кроме того, она собирает текущие рабочие данные, рассчитывает статистические параметры, отображает информацию для операторов и исполняет их команды. Наиболее важные задачи, решаемые системой управления техническим процессом, представлены на рис. 8.12.

При разработке проекта, включая определение необходимых вычислительных ресурсов, необходимо исходить из требований, предъявляемых ко всей технической системе, т.е. совокупности технического процесса и системы управления (табл. 8.1). Основное требование к системе управления заключается в том, что ее ресурсы должны соответствовать целям управления и параметрам управляемой системы.

#### **8.5.1 Отображение развития процесса во времени**

Данные, полученные в результате измерений, должны с требуемой точностью отображать динамику процесса. Особую важность при этом имеет частота выборки, т. е. периодичность измерения новых данных. Ее определение обычно является нетривиальной задачей.

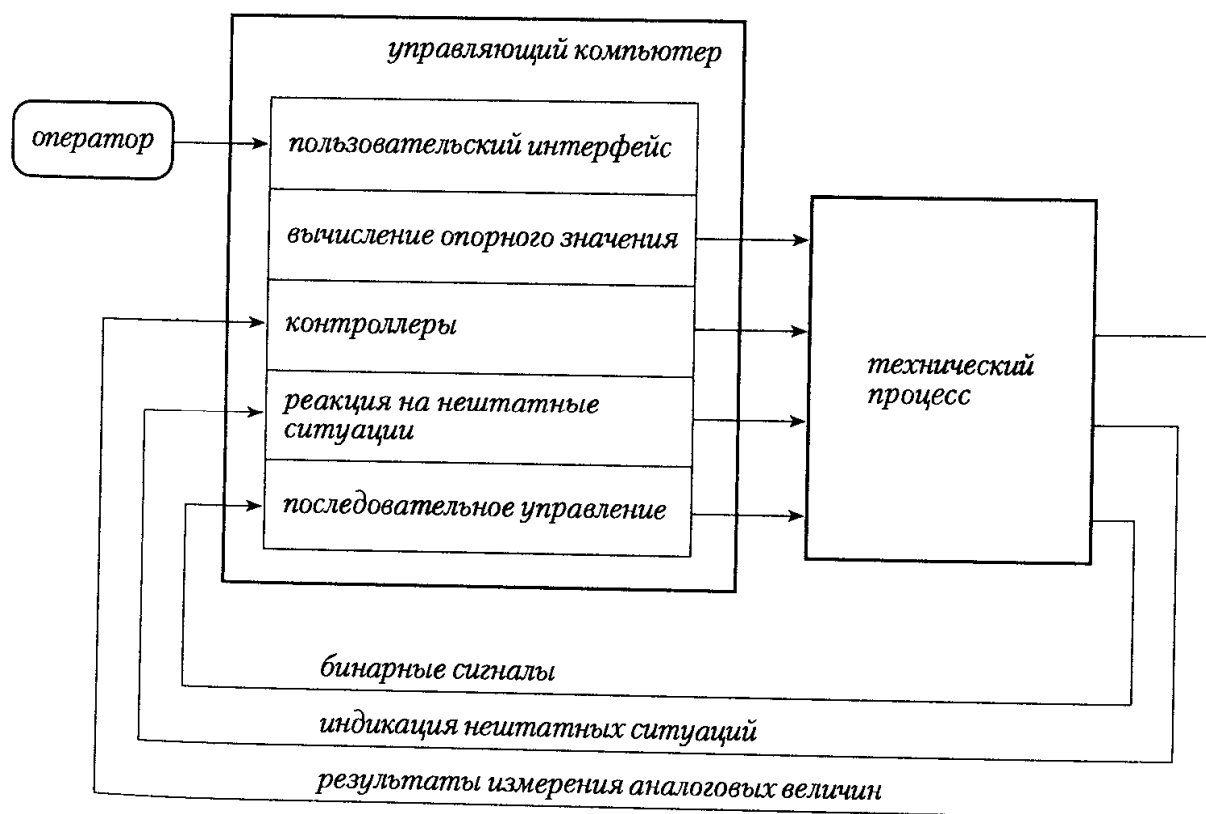


Рисунок 8.12. Задачи, решаемые компьютером при управлении процессом

Высокая частота выборки влечет за собой большую загрузку компьютера, так как он должен обрабатывать больше данных. В ряде случаев речь может идти даже о финансовых затратах, связанных со сбором данных процесса, например, при измерении концентрации, где необходимы химические реагенты. Это означает, что число измерений необходимо минимизировать, однако их частота должна быть достаточно высокой для обнаружения важных изменений в контролируемых параметрах процесса другими словами, должен быть найден компромисс между затратами на измерение и ценой последствий, к которым может привести потеря части информации об изменениях в процессе.

На загрузку компьютера влияет не только частота измерений, но и сложность счетов в промежутках между измерениями.

Таблица 8.1 Характеристики управляемого технического процесса влияющие на решения по системе управления

Характеристика технического процесса	Соответствующие компоненты проекта системы управления
<i>Масштаб времени</i>	Динамика системы, модель системы Частота измерений Частота управляющих воздействий Требования к аппаратным средствам Требования к программному обеспечению
<i>Тип переменных процесса</i>	Измерительная аппаратура, датчики Частота измерений
<i>Возмущения в измерениях</i>	Фильтрация Вид обработки
<i>Управляемость системы</i>	Аппаратные средства управления, исполнительные механизмы
<i>Уровень сложности системы</i>	Стратегия управления, взаимосвязь входных и выходных сигналов Алгоритмы регулирования Требования к аппаратным средствам Требования к программному обеспечению Операционная система, языки программирования Требования к коммуникациям
<i>Назначение (цель) системы</i>	Стратегия управления
<i>Топология информационных потоков</i>	Сбор данных, коммуникации, сети, протоколы Межпрограммный объем Распределенное управление
<i>Интерфейс оператора</i>	Психологические факторы Интерфейс пользователя
<i>Централизованное/ распределенное управление</i>	Архитектура системы Распределение ресурсов Надежность

## **8.5.2 Сбор данных измерений и обработка сигналов**

Все сигналы измерений содержат как полезную информацию, так и помехи. Измерения всегда приближительны из-за ошибок калибровки, неточности датчиков или наличия шума. Сигнал, передающийся от датчика к компьютеру через электрический провод, может быть искажен электромагнитным шумом.

Из повседневного опыта известно, что фильтрация сигналов и извлечение информации являются важными задачами. Если несколько человек за столом начнут говорить, то микрофон будет фиксировать лишь набор звуков, из которого невозможно получить полезную информацию. В то же время человеческое ухо способно "отфильтровать" определенные голоса среди прочих и извлечь требуемую информацию. То же самое нужно делать с измерительной информацией с помощью фильтра.

Фильтр в своей основе представляет устройство, обрабатывающее поступающий сигнал и извлекающее из него информацию в соответствии с заданным критерием. Очевидно, что фильтр должен быть спроектирован таким образом, чтобы он пропускал полезную информацию и блокировал ненужную. Фильтры могут быть выполнены как по аналоговой, так и по цифровой технологии.

Даже если мы используем точный датчик и передаем сигнал без помех, тем не менее, получаемые данные могут не всегда адекватно представлять интересующие параметры процесса. Например, измерение уровня жидкости может быть некорректным из-за зыби, а концентрации — из-за наличия неоднородностей.

## **8.5.3. Уровень сложности системы**

Уровень сложности технического процесса отражается на конфигурации управляющего компьютера. Количество датчиков и исполнительных механизмов определяет необходимое число портов

ввода/вывода и в целом требует более мощного процессора, большего объема оперативной и внешней памяти и т. д.

Связь между внутренними переменными процесса и его входными или выходными данными определяет сложность программного обеспечения регулятора. Программы реального времени гораздо труднее тестировать по сравнению с обычными, поэтому их код должен быть настолько хорошо структурирован, чтобы ошибки можно было выявить как можно раньше. В главе 10 описывается структура программы, языки программирования и операционные системы для решения задач реального времени.

#### **8.5.4 Топология информационных потоков**

Сложные системы управления и мониторинга обычно представляют собой иерархическую структуру на базе соединенных между собой цифровых устройств разного класса. Такой подход называется распределенным прямым цифровым управлением.

Организация взаимодействия между этими устройствами является центральной задачей проектирования современных систем управления процессом. Для рационального использования имеющихся ресурсов необходимо определить вид и количество информации, которой обмениваются компьютеры, - информационные потоки. Не все компьютеры должны получать подробную информацию об управляемом техническом процессе. Особую роль играет надежность передачи информации - необходимо принимать такие решения, чтобы данные всегда достигали своего назначения без искажения и потерь.

Передача информации тесно связана со стандартизацией. Очевидно, что кабели и разъемы должны соответствовать друг другу, уровни сигналов должны быть соизмеримы, а программное обеспечение должно одинаково интерпретировать передаваемые сообщения и сигналы.



### **8.5.5. Интерфейс оператора**

Хотя теоретически управляющая система или компьютер могут функционировать без вмешательства человека, на сегодняшний день всегда необходимо взаимодействие с оператором, который должен получать информацию и иметь возможность вводить команды.

Графические интерфейсы компьютерных терминалов становятся все более и более изощренными. Современные дисплеи обладают фантастическими возможностями отображения сложно организованных данных, включая цветовые палитры с миллионами оттенков, разнообразную графику, даже мультипликацию и видео. Однако все это требует больших вычислительных ресурсов, за которые программы интерфейса будут конкурировать с модулем обработки данных, и поэтому оператор может получать информацию с задержкой. С другой стороны, не вся информация может ждать, например, сигналы тревоги и другие важные сообщения должны отображаться немедленно. Поэтому при проектировании интерфейса необходимо тщательно отбирать информацию и сопоставлять способ отображения со степенью ее важности в текущий момент, человеческими возможностями воспринимать и адекватно реагировать на нее и имеющимися ресурсами.

### **8.5.6. Системная интеграция и надежность управления**

Ключевым вопросом любой системы управления является надежность. Цифровые системы - не исключение, и, как отмечалось выше, эта проблема возникла уже в первые годы их применения. Один из основных недостатков принципа прямого цифрового управления - это низкая надежность. Хотя общее качество вычислительной техники существенно возросло с 1960-х годов, проблема надежности таких систем остается, тем не менее, одной из главных, так как центральный компьютер по-прежнему представляет собой критическую точку (*single-point failure*) - узел, выход которого из строя приводит к остановке всей системы. Очевидное решение этой проблемы -

децентрализация вычислительных ресурсов, при которой небольшие локальные вычислительные устройства управляют отдельными частями сложного процесса.

Надежность программного обеспечения крупных систем не менее важна, чем надежность аппаратных средств. В январе 1990 года в течение почти 9 часов телефонная сеть США обеспечивала прохождение лишь около 50 % трафика. Причина заключалась в не выявленной ошибке в очень сложной программе.

Практический подход к повышению надежности систем предполагает, с одной стороны, применение отказоустойчивых конфигураций аппаратных средств, а с другой - специальные методы проектирования структуры программного обеспечения, программирования и отладки, позволяющие исключить с самого начала наиболее вероятные ошибки.

## **8.6. Модельные примеры**

Системы, описанные в этом разделе, - электропривод и станция биологической очистки сточных вод, - будут использоваться в дальнейшем изложении в качестве примеров двух различных типов процесса. Эти системы существенно отличаются как масштабом времени, так и технической конструкцией и поэтому служат хорошей иллюстрацией многих проблем, характерных для приложений цифрового управления.

### **8.6.1. Модельный пример 1 — управление системой электропривода**

Такая популярность объясняется их функцией - преобразование электрической энергии, которая легко передается на расстояния, в механическую работу, без которой не обходится практически ни один процесс. Электрические двигатели играют важнейшую роль в современной жизни - без них не может обойтись ни промышленность, ни домашнее хозяйство.

Двигатели бывают постоянного тока и однофазные или многофазные переменного тока. Рабочий режим двигателя зависит не только от тока, но и от "истории" намагничивания, нагрузки, потерь на трение и т. д. Не вдаваясь в подробности теории двигателей достаточно отметить, что оптимальный режим переноса энергии, т. е. преобразования электрической энергии в механическую с минимальными потерями, можно получить подбирая величину амплитуды, частоты и фазы входного напряжения.

Генерация сигнала с требуемыми характеристиками осуществляется с помощью цепей силовой электроники. Поскольку питание можно подавать от различных типов источников переменного или постоянного тока, то обеспечивается большая гибкость в выборе типа двигателя. Комбинация двигателя, силовой электроники и блока управления называется **системой электропривода** (*electrical drive system*); схематически она представлена на рис.8.13. Выпускаемые системы электропривода охватывают очень широкий диапазон значений мощности, скорости и момента.

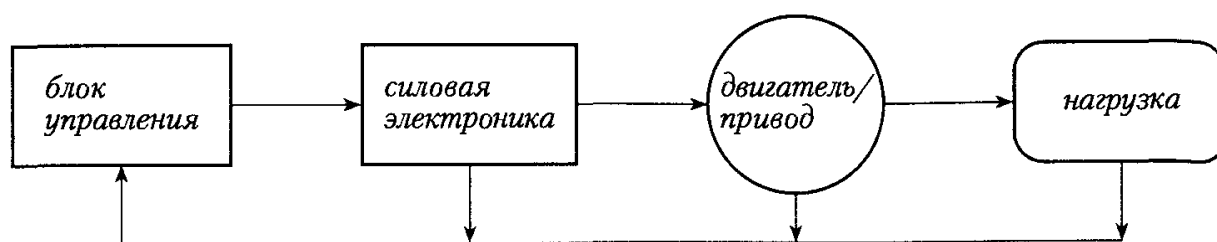


Рисунок 8.13. Главные элементы системы электропривода

Конструирование электропривода - задача как инженеров-электриков, так и инженеров-механиков. Фактически для получения хороших результатов необходимо тесное взаимодействие специалистов в области электротехники, электроники, вычислительной техники, управления и, конечно, в области конкретных приложений (например, транспорта или робототехники).

## 6.2. Модельный пример 2 — биологическая очистка сточных вод (процесс активированного отстоя)

В современном обществе потребляется большое количество воды, поэтому переработка сточных вод становится одной из главных природоохранных задач. Для уничтожения или снижения количества содержащихся в них загрязнений сточные воды можно перерабатывать механическими, химическими и биологическими методами - на большинстве современных предприятий по переработке сточных вод все они используются одновременно. Ниже мы кратко рассмотрим управление биологическим процессом, получившим широкое распространение для переработки как промышленных, так и бытовых сточных вод.

Процесс активированного отстоя (*activated sludge process*) заключается в том, что взвешенные в аэраторе микроорганизмы взаимодействуют с органическими веществами, содержащимися в сточных водах, и растворенным кислородом (*Dissolved Oxygen* — DO). В результате этого процесса увеличивается масса микроорганизмов и вырабатывается двуокись углерода и вода. Другими словами, микроорганизмы размножаются, питаются органическими компонентами сточных вод, и высвобождают двуокись углерода и воду.

Установка для переработки сточных вод содержит две основные части - аэратор и устройство осаждения (рис. 8.14). Аэратор представляет собой биологический реактор, содержащий микроорганизмы, - в нем происходит реакция со сточными водами и кислородом воздуха. В устройстве осаждения активированный отстой, состоящий из живых или погибших организмов и другой инертной массы, отделяется от остальной жидкости. Часть концентрированного отстоя регенерируется и снова поступает в аэратор для того, чтобы поддерживать массу живых микроорганизмов в процессе постоянной; соотношение между объемом сточных вод и массой микроорганизмов должно сохраняться в определенной пропорции. Остальной отстой удаляется из устройства осаждения для последующего

захоронения. Выход процесса – поток очищенной воды и концентрированный отстой - менее опасны для окружающей среды и легче перерабатываются, чем неочищенные сточные воды.

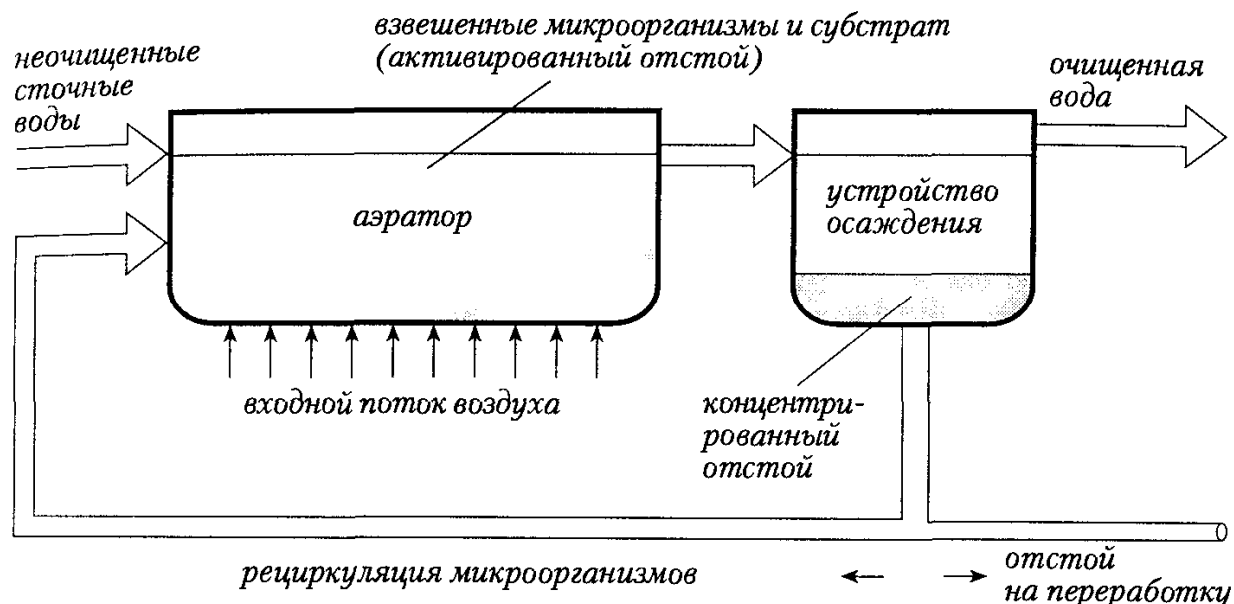


Рисунок 8.14. Процесс активированного отстоя при переработке сточных вод

Временной масштаб биологического процесса обычно составляет величину порядка часов или дней и поэтому не является ограничением для управляющего компьютера. Это совсем не означает, что биологическими процессами управлять проще, поскольку в этой области существуют свои проблемы. Состав и концентрация неочищенных сточных вод обычно неизвестны. Концентрация отходов иногда бывает настолько мала, что ее очень трудно измерить - даже самая загрязненная вода на 99,95 % состоит из воды! Однако даже малые концентрации отходов опасны для окружающей среды, так как могут накапливаться в живых организмах.

В биологическом реакторе существует очень много видов микроорганизмов, но лишь немногие из них действительно известны и исследованы. Между популяциями микроорганизмов существует борьба, и если одна разновидность обгоняет в развитии другую, то это оказывает влияние на баланс процесса, меняя его динамику и производительность. Концентрация растворенного кислорода, вид субстрата и загрязнений,

величина рН, температура - вот лишь некоторые из факторов, влияющих на скорость роста микроорганизмов.

Для обогащения среды аэратора кислородом необходимо закачивать в него воздух. Расход воздуха, влияющий на эффективность всего процесса, имеет первостепенное значение. Если концентрация растворенного кислорода опускается ниже определенного минимального значения (в диапазоне 1-2 мг/л), микроорганизмы будут не в состоянии перерабатывать ("поедать") загрязнения с нормальной скоростью и процесс замедлится. С другой стороны, нагнетание воздуха требует много энергии. Концентрация растворенного кислорода определяет вид доминирующих организмов и, следовательно, влияет на процесс очистки сточных вод от загрязнений.

Кроме того, сточные воды могут содержать токсичные вещества, способные затормозить рост некоторых микроорганизмов или даже убить их. С точки зрения управления процессом это означает, что в зависимости от изменения условий работы необходимо выбирать новые виды управляющих воздействий. Поэтому для определения текущего состояния процесса должны применяться специальные методы оценки.

## 9. ВХОД И ВЫХОД ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

### 9.1. Компоненты интерфейса между процессом и управляющим компьютером

Общая структура ввода/вывода между процессом и управляющим компьютером показана на рис. 9.1. Хотя на практике используются разнообразные датчики, исполнительные механизмы и согласующие устройства, основная структура интерфейса всегда одна и та же.

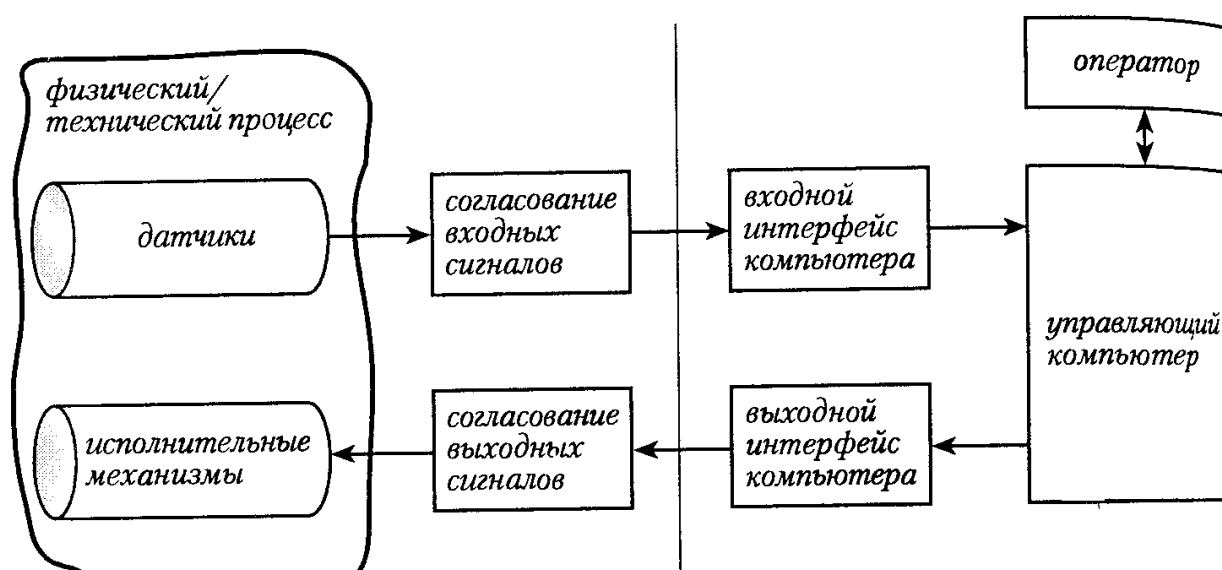


Рисунок 9.1 Обобщенная структура ввода/вывода между процессом и управляющим компьютером

То, что эта структура выглядит очень просто, вовсе не означает, что ее можно легко реализовать. Один из законов Мерфи гласит: "Если вам кажется, что все идет хорошо, скорее всего, вы чего-то не заметили".

#### 9.1. Датчики

Для большинства физических величин существует множество различных измерительных технологий, характеризующихся зависимостью между вырабатываемой сигналом и измеряемой величиной. Измерительное устройство или **датчик** (*sensor*) состоит из двух частей — **измерительной**

**головки** (*sensor head*) и **преобразователя** (*transducer*), как показано на рис. 9.2. Термин "датчик" иногда ошибочно употребляют вместо "измерительной головки"; в этой книге под датчиком всегда понимается полное устройство, включающее измерительную головку и преобразователь.

В соответствии с ГОСТ 16263-70 это устройство называется **первичным измерительным преобразователем** (*primary measuring transducer*), его часть, на которую непосредственной действует измеряемая величина, — **чувствительным элементом** (*detector*), а все последующие составляющие **измерительной цепи** — **измерительным преобразователем** (*measuring transducer*).



Рисунок 9.2. Составные элементы датчика

Результат измерения — это "реакция измерительной головки датчика", которая, на выходе преобразователя представляет собой электрическую величину, распространяющуюся дальше по проводнику. Следовательно, выходной сигнал измерительного устройства (датчика) есть выходной сигнал преобразователя. В большинстве управляющих систем этот выходной сигнал обычно - и предпочтительно – электрический, однако довольно часто встречаются и пневматические датчики. Главное достоинство электрических датчиков - это гибкость и разнообразие способов обработки сигнала. Следует отметить, что электрический сигнал можно передавать на большие расстояния с очень малыми затратами энергии. Пневматические датчики, по сравнению с электрическими, обычно дешевле, меньше по размерам, проще и нечувствительны к возмущениям.



Различают три класса датчиков:

- аналоговые датчики, т. е. датчики, вырабатывающие аналоговый сигнал;
- цифровые датчики, генерирующие последовательность импульсов или двоичное слово;
- бинарные (двоичные) датчики, которые вырабатывают сигнал только двух уровней: "включено/выключено" (иначе говоря, 0 или 1).

## 9.2. Исполнительные устройства (механизмы)

**Исполнительное устройство** или **механизм** (*actuator*) преобразует электрическую энергию в механическую или в физическую величину для воздействия на управляемый процесс. Электродвигатели, управляющие "суставами" промышленного робота, и есть исполнительные механизмы. В химических процессах окончательными управляющими элементами могут быть клапаны, задающие расход реагентов. Следует подчеркнуть, что исполнительные устройства обычно лишь опосредованно влияют на переменные физических процессов, измеряемые датчиками. Например, датчики измеряют температуру, координаты или химическую концентрацию, а исполнительные устройства управляют подводом тепла, движением или потоками исходных реагентов. И уже от динамики физической системы зависит, как измеряемые величины изменятся из-за управляющих воздействий исполнительных устройств.

В составе исполнительного устройства можно выделить две части (рис. 9.3): во-первых, преобразователь (*transducer*) и/или усилитель (*amplifier*), во-вторых, силовой преобразователь (*converter*) и/или исполнительный механизм (*actuator*).

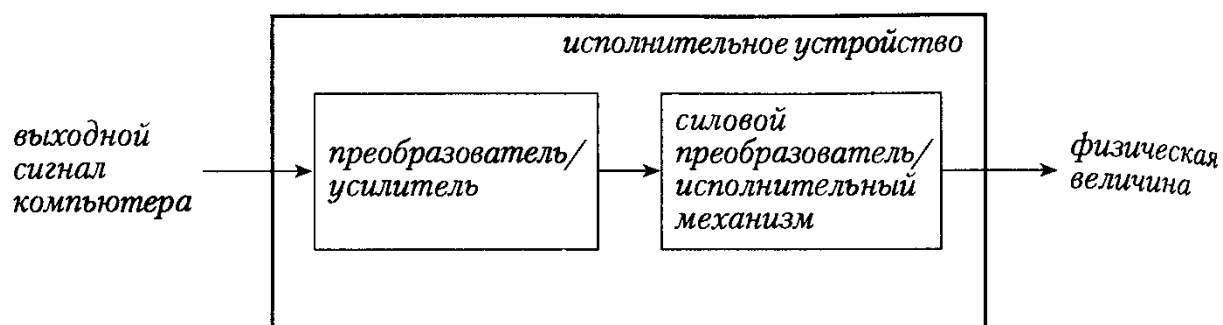


Рисунок 9.3. Составные элементы исполнительного устройства

Преобразователь превращает входной сигнал в механическую или физическую величину, например, электромотор преобразует электрическую энергию во вращательное движение. Усилитель изменяет маломощный управляющий сигнал, получаемый от выходного интерфейса компьютера, до значения, способного привести в действие преобразователь. В некоторых случаях усилитель и преобразователь конструктивно составляют одно целое. Таким образом, некоторые оконечные управляющие элементы могут представлять собой самостоятельную систему управления — выходной сигнал компьютера является опорным значением для оконечного управляющего элемента.

Требования к исполнительным устройствам - потребляемая мощность, разрешающая способность, повторяемость результата, рабочий диапазон и т. д. - могут существенно различаться в зависимости от конкретного приложения. Для успешного управления процессом правильно выбрать исполнительные устройства так же важно, как и датчики.

Для перемещения клапанов часто применяется сжатый воздух. Если необходимо развивать значительные усилия, обычно используют гидропривод. Электрический сигнал компьютера должен быть преобразован в давление или расход воздуха или масла. Бинарное управление обеспечивается электромеханическими реле или электронными переключателями.

### 9.3. Полоса пропускания и шум

Два важных фактора — ширина полосы пропускания и уровень шума — определяют способ передачи сигналов между компьютером и физическим процессом.

**Полоса пропускания** (*bandwidth*) является важным параметром для многих технических приложений - передача данных, системные шины, управление с обратной связью, - однако в разных случаях термин имеет различные значения. В передаче информации и управлении с обратной связью полоса пропускания обозначает диапазон частот, в пределах которого амплитудно-частотная характеристика остается не меньше заданного значения (обычно 0.707 от максимального). Для системных шин полоса пропускания является синонимом термина «пропускная способность». При обработке сигналов управления и мониторинга полоса пропускания определяется как диапазон рабочих частот датчика или исполнительного механизма - только те физические величины, рабочие частоты которых лежат в полосе пропускания, можно надлежащим образом измерить или изменить. Это означает, что скорость реакции датчика достаточна для правильного отображения изменений выходной физической величины, при этом сигнал не искажается из-за несоответствия динамики датчика и процесса. Аналогично, исполнительный механизм должен иметь соответствующую полосу пропускания, чтобы реализовать нужное управляющее воздействие. Чем шире полоса пропускания, тем быстрее будет реакция датчика, исполнительного механизма. Последнее не всегда является положительным фактором, поскольку в этом случае устройство более восприимчиво к нежелательным высокочастотным возмущениям.

Любой измерительный сигнал искажается **возмущениями** (*disturbances*) и **шумом** (*noise*), как в процессе формирования, так и передачи. Одна из основных проблем передачи сигнала - уменьшение влияния шума. Источники шума должны быть изолированы, или, крайнем случае, их влияние должно быть снижено до минимально возможного уровня.

Искажение сигналов или сообщений шумом является не только проблемой организации интерфейса "процесс-компьютер", но проявляется при любых типах передачи информации. Регуляторы обычно проектируются в расчете на наличие возмущений и шумов; в главе 6 будет показано, как регулирующий контур может уменьшить их влияние.

#### **9.4. Передача измерительных сигналов**

Аналоговые сигналы, вырабатываемые измерительными устройствами, обычно необходимо так или иначе преобразовать прежде, чем ввести их в компьютер. Сигнал в виде напряжения должен быть усилен так, чтобы соответствовать диапазону напряжений интерфейса компьютера. Более того, иногда уровень напряжения датчика должен быть смещен, чтобы привести в соответствие минимальный уровень выхода датчика с минимальным напряжением интерфейса компьютера. Эта процедура называется согласованием сигнала. Она рассматривается в этой и следующей главах.

При передаче аналоговых сигналов существуют специфические проблемы, обусловленные электрическими возмущениями. Сигнал, передаваемый от датчика по электрическому проводнику, может подвергнуться зашумлению под влиянием среды из-за нежелательных связей резистивного, индуктивного или емкостного характера. Этот шум может исказить исходный сигнал. Одно из возможных решений - преобразовать аналоговый измерительный сигнал в последовательность импульсов, - частота или продолжительность (ширина) которых известным образом связана с уровнем исходного сигнала, а затем передавать этот преобразованный измерительный сигнал. Такой переход особенно полезен, когда внешний шум имеет ту же частоту, что и исходный сигнал. Последовательность импульсов может передаваться либо по электрическому, либо по волоконно-оптическому кабелю.

## 10. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ

Датчик должен воспроизводить физическую величину максимально быстро и точно. Хотя чаще всего датчик выбирают исходя из надежности и удобства обслуживания, его точность, стабильность и повторяемость результатов остаются важнейшими факторами. Основой работы управляющего компьютера является входная информация, поэтому точные и надежные измерения - это необходимое условие качества управления.

Большая часть характеристик датчика, которые приводятся в техническом описании - статические параметры. Эти параметры не показывают, насколько быстро и точно датчик может измерить сигнал, изменяющийся с большой скоростью. Свойства, отражающие работу датчика в условиях изменяющихся входных воздействий, называются **динамическими характеристиками** (*dynamic characteristic*). Они существенно влияют на работу системы управления. Идеальный датчик мгновенно реагирует на изменение измеряемой физической величины. На практике любому датчику необходимо некоторое время на отработку нового входного сигнала. Очевидно, для адекватного отображения реальных изменений наблюдаемой величины время реакции датчика должно быть как можно меньше. Это тот же самый принцип, который применяется ко всей системе управления (компьютеру) процессом реального времени в целом: временные характеристики физического процесса определяют быстрородействие системы (производительность компьютера). Однако чаще требуется компромисс между скоростью реакции датчика и его чувствительностью к шуму.

### 10.1. Погрешность и точность

**Точность** (*accuracy*) определяет разницу между измеренной и действительной величиной; она может быть отнесена к датчику в целом или к конкретному его показанию. **Разрешение** (*resolution*) — это наименьшее

отклонение измеряемой величин которое может быть зафиксировано и отражено датчиком. Разрешение нами намного чаще, чем точность, указывается в технических описаниях. Точность датчика зависит не только от его аппаратной части, но и от остальных элементов измерительного комплекса. **Погрешность (ошибка) измерения** (*measurement error*) определяется как разница между измеренной и действительной величинами. Поскольку действительная величина неизвестна, в произвольном случае оценку точности можно сделать на основе эталонных измерений или углубленного анализа данных.

Ошибки измерения можно классифицировать и, соответственно, моделировать как детерминированные (или систематические) и случайные (или стохастические). Детерминированные ошибки связаны с неисправностью датчика, нарушением условий его применения или процедуры измерений. Эти ошибки повторяются при каждом измерении. Типичная систематическая ошибка - это смещение показаний (*reading offset*) или **сдвиг** (*bias*). В принципе, систематические ошибки устраняют при **поверках** (*calibration*). Случайные ошибки, напротив, могут иметь самое разное происхождение. В большинстве случаев - это влияние окружающей среды (температуры, влажности, электрических наводок и т. п.). Если причины случайных ошибок известны, то эти ошибки можно компенсировать. Часто влияние возмущений характеризуют количественно такими параметрами, как **средняя ошибка** (*mean error*) **среднеквадратичная ошибка** (*mean quadratic error*) или **стандартное отклонение** (*standard deviation*) и **разброс** (*variance*) либо **погрешность** (*[un]precision*).

Разница между систематической и случайной ошибками иллюстрируется рис.10.1. Центр каждой мишени представляет собой истинное значение измеряемой величины, а каждая точка — это измерение. Сумма измерений характеризуется смещением и разбросом. Для хорошей точности обе характеристики должны быть малы.

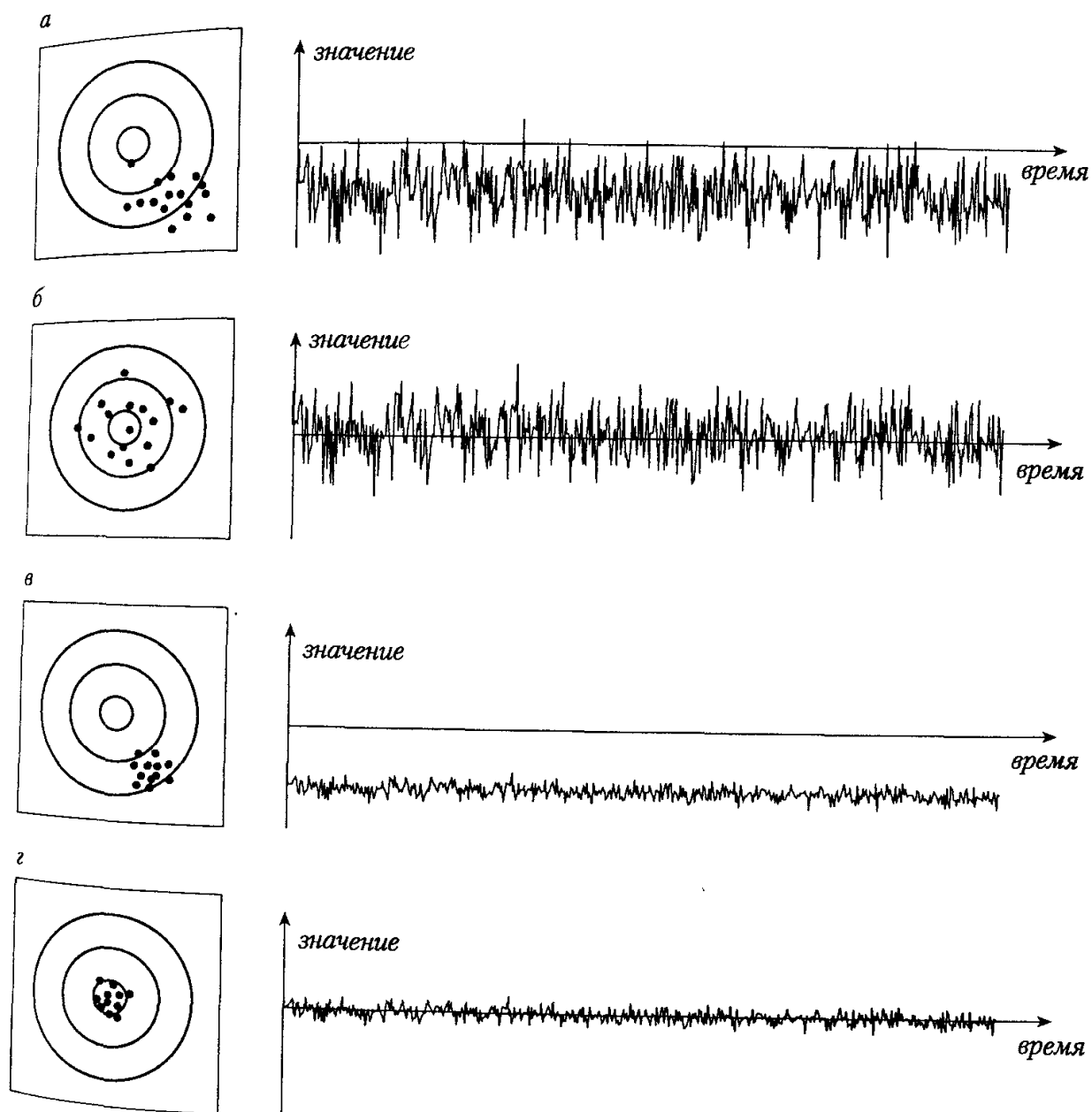


Рисунок 10.1 Иллюстрация смещения, погрешности и точности

На рис. 10.1,а и рис. 10.1,в представлены смещенные результаты. Стандартное отклонен или разброс результатов отдельных измерений является мерой **погрешности**. Датчик с хорошей повторяемостью результата (или малой случайной ошибкой) имеет, очевидно, хорошую случайную погрешность, но не обязательно дает правильную выходную величину, поскольку сдвиг может существенно исказить результат, т. е. точность датчика невелика.

Результаты измерений на рис.10.1,б и рис. 10.1,г имеют малую погрешность, но только результат на рис. 10.1,г является точным.

## 10.2. Динамические характеристики датчиков

Динамические свойства датчика характеризуются целым рядом параметров, которые, однако, довольно редко приводятся в технических описаниях производителей. Динамическую характеристику датчика можно экспериментально получить как реакцию на скачок измеряемой входной величины (рис. 10.2). Параметры, описывающие реакцию датчика, дают представление о его скорости (например, время нарастания, запаздывание, время достижения первого максимума), инерционных свойствах (относительное перерегулирование, время установления) и точности (смещение).

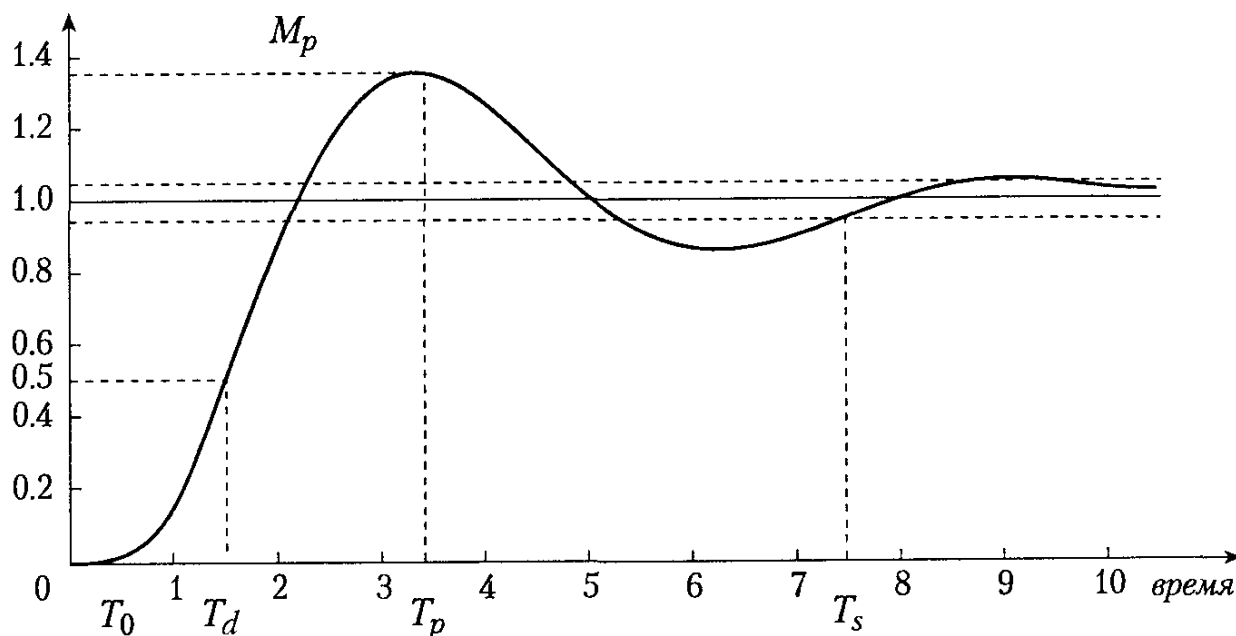


Рисунок 10.2. Динамическая реакция датчика

В принципе следует стремиться к минимизации следующих параметров.



- **Время прохождения зоны нечувствительности** (*dead time*) — время между началом изменения физической величины и моментом реакции датчика, т.е. моментом начала изменения выходного сигнала.

- **Запаздывание** (*delay time*) — время, через которое показания датчика первый раз достигают 50 % установившегося значения. В литературе встречаются и другие определения запаздывания.

- **Время нарастания** (*rise time*) — время, за которое выходной сигнал увеличивается от 10 до 90% установившегося значения. Другое определение времени нарастания — величина, обратная наклону кривой реакции датчика на скачок измеряемой величины в момент достижения 50% от установившегося значения, умноженная на установившееся значение. Иногда используются другие определения. Малое время нарастания всегда указывает на быструю реакцию.

- **Время достижения первого максимума** (*peak time*) - время достижения первого максимума выходного сигнала (перерегулирования).

- **Время переходного процесса, время установления** (*settling time*) - время, начиная с которого отклонение выхода датчика от установившегося значения становится меньше заданной величины (например,  $\pm 5\%$ ).

- **Относительное перерегулирование** (*percentage overshoot*) — разность между максимальным и установившимся значениями, отнесенная к установившемуся значению (в процентах).

- **Статическая ошибка** (*steady-state error*) — отклонение выходной величины датчика от истинного значения или смещение. Может быть устранена калибровкой датчика.

В реальных условиях некоторые требования к датчикам всегда противоречат друг другу, поэтому все параметры нельзя минимизировать одновременно.

### 10.3. Статические характеристики датчиков

Статические характеристики датчика показывают, насколько корректно выход датчика отражает измеряемую величину спустя некоторое время после ее изменения, когда выходной сигнал установился на новое значение. Важными статическими параметрами являются: чувствительность, разрешающая способность или разрешение, линейность, дрейф нуля и полный дрейф, рабочий диапазон, повторяемость и воспроизводимость результата.

- **Чувствительность** (*sensitivity*) датчика определяется как отношение величины выходного сигнала к единичной входной величине (для тонких измерительных технологий определение чувствительности может быть более сложным).

- **Разрешение** (*resolution*) — это наименьшее изменение измеряемой величины, которое может быть зафиксировано и точно показано датчиком.

- **Линейность** (*linearity*) не описывается аналитически, а определяется исходя из градуировочной кривой датчика. Статическая градуировочная кривая показывает зависимость выходного сигнала от входного при стационарных условиях. Близость этой кривой к прямой линии и определяет степень линейности. Максимальное отклонение от линейной зависимости выражается в процентах.

- **Статическое усиление** (*static gain*) или **усиление по постоянному току** (*d.c. gain*) — это коэффициент усиления датчика на очень низких частотах. Большой коэффициент усиления соответствует высокой чувствительности измерительного устройства.

- **Дрейф** (*drift*) определяется как отклонение показаний датчика, когда измеряемая величина остается постоянной в течение длительного времени. Величина дрейфа может определяться при нулевом, максимальном или некотором промежуточном значении входного сигнала. Дрейф датчика вызывается нестабильностью усилителя, изменением окружающих условий (например, температуры, давления, влажности или уровня вибраций),

параметров электроснабжения или самого датчика (старение, выработка ресурса, нелинейность и т. д.).

- **Рабочий диапазон** (*operating range*) датчика определяется допустимыми верхним и нижним пределами значения входной величины или уровня выходного сигнала.

- **Повторяемость** (*repeatability*) характеризуется как отклонение между несколькими последовательными измерениями при заданном значении измеряемой величины одинаковых условиях, в частности приближение к заданному значению должно происходить всегда и либо как нарастание, либо как убывание. Измерения должны быть выполнены за такой промежуток времени, чтобы не проявлялось влияние дрейфа. Повторяемость обычно выражается в процентах от рабочего диапазона

- **Воспроизводимость** (*reproducibility*) аналогична повторяемости, но требует большего интервала между измерениями. Между проверками на воспроизводимость датчик должен использоваться по назначению и, более того, может быть подвергнут калибровке. Воспроизводимость задается в виде процентов от рабочего диапазона, отнесенных к единице времени (например, месяцу).

#### 10.4. Влияние нелинейности

Многие датчики обладают свойством нелинейности. Например, если датчик достигает верхнего предела рабочего диапазона, проявляется эффект насыщения, т.е. выходной сигнал ограничен, даже если входная величина возрастает. Примеры нелинейностей:

- нелинейная деформация пружин;
- кулоновское трение;
- магнитное насыщение в сердечниках трансформаторов;
- характеристики расходомеров (например, измерения в открытом канале характеризуются нелинейным соотношением между измеренным уровнем  $h$  и расходом  $F$ , так как  $F = K \cdot h^a$  где  $K$  — постоянная);

- зависимость сопротивления термистора от температуры ( $R = R_0 \cdot e^{b(1/T - 1/T_0)}$ , где  $T$  - это температура в градусах Кельвина,  $R_0$ ,  $T_0$ ,  $b_0$  это постоянные).

Особые проблемы связаны с люфтом в зубчатых передачах и других механизмах имеющих свободный ход, а также с магнитным насыщением. Выходной сигнал датчиков, для которых характерны такие явления, — это многозначная функция входной величины, зависящая от направления ее изменения.

### 10.5. Характеристики сопротивлений

Объединение одного или нескольких элементов может существенно повлиять на поведение каждого из них по сравнению с автономным использованием. Например, тяжелый акселерометр может увеличить нагрузку настолько, что это изменит измеряемое ускорение и даст неверный результат. Аналогично, подключение вольтметра меняет токи и напряжения в цепи, а термопара может исказить измеряемую температуру. Все это называется **эффектом нагрузки** (*loading effect*). Такие ошибки могут превосходить все другие типы ошибок измерения; их следует предусматривать при соединении различных датчиков и устройств передачи/преобразования информации.

Понятие «полное сопротивление» имеет фундаментальное значение в электрических системах. Устройство с высоким **входным сопротивлением** (*input impedance*) потребляет меньший ток при заданном напряжении и, соответственно меньшую мощность. Устройство с низким входным сопротивлением потребляет больший ток при данном напряжении. Поскольку оно отбирает большую мощность у предшествующего в цепи устройства, это может вызвать ошибки нагрузки. Напряжение, генерируемое устройством с высоким **выходным сопротивлением** чрезвычайно чувствительно к эффекту нагрузки. Напротив, низкое выходное сопротивление позволяет уменьшить зависимость выходного напряжения от

тока нагрузки. Для выходных сигналов в виде силы тока картина прямо противоположная: высокое выходное сопротивление делает выходной сигнал менее подверженным влиянию токов нагрузки. Поэтому во многих случаях требуется применение специальных согласующих электронных устройств для усиления сигналов и приведения в соответствие их полных сопротивлений. В случае сигналов в виде напряжений применяются усилители с высоким входным сопротивлением и низким выходным сопротивлением. Процедура называется **согласованием сопротивлением** (*impedance matching*) и должна тщательно выполняться на каждом этапе.

Рассмотрим стандартный электрический четырехполюсник. Выходное полное сопротивление  $Z_0$  определяется как отношение напряжения холостого хода к току короткого замыкания на выходных зажимах. Входное сопротивление  $Z_i$  определяется как отношение номинального входного напряжения к току, протекающему через входные зажимы при разомкнутых выходных (рис. 10.3).

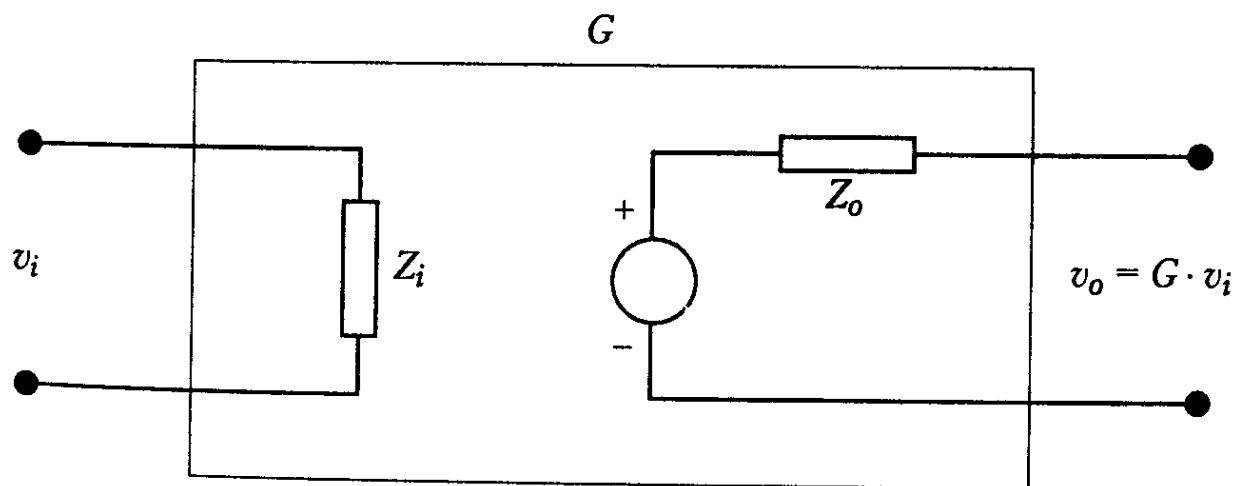


Рисунок 10.3. Схематическое представление входного и выходного сопротивлений четырехполюсника

Если к выходным зажимам присоединена нагрузка, то напряжение на ней будет отличаться из-за тока протекающего по выходному сопротивлению. Если четырехполюсник является изолированным, то можно

связать входное и выходное напряжения холостого хода через коэффициент усиления  $G$

$$u_0 = G \cdot u_i$$

$u_i$  - входное напряжение;

$u_0$  - напряжение холостого хода.

### 10.6. Подбор входных и выходных сопротивлений

Рассмотрим два четырехполюсника, соединенных последовательно (рис.10.4).

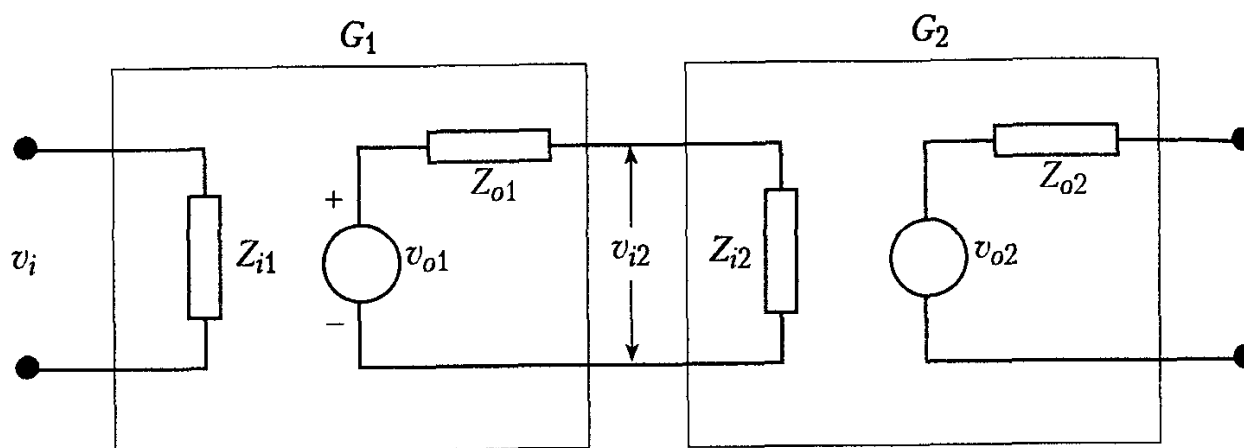


Рисунок 10.4. Согласование сопротивлений последовательно соединенных четырехполюсников

Задав коэффициенты усиления  $G_1$  и  $G_2$  связывающие входные и выходные напряжения можно легко получить следующие выражения:

$$u_{o1} = G_1 \cdot u_i,$$

$$u_{i2} = \frac{Z_{i2}}{Z_{o1} + Z_{i2}} \cdot u_{o1},$$

$$u_{o2} = G_2 \cdot u_{i2}.$$

Отсюда можно получить общий коэффициент усиления

$$u_{o2} = G_1 \cdot G_2 \cdot \frac{Z_{i2}}{Z_{o1} + Z_{i2}} \cdot u_i$$

Результат стремится к произведению  $G_1 \cdot G_2$  если выходное сопротивление первого четырехполюсника будет намного меньше, чем входное сопротивление второго. Другими словами, частотная характеристика устройства с двумя последовательно соединенными усилителями не будет иметь значительных искажений, если сопротивления согласованы, т. е. выходное сопротивление первого устройства гораздо меньше, чем входное сопротивление второго.

Для согласования сопротивлений в системе "датчик - измерительный преобразователь" и с последующими цепями может потребоваться включение одного или нескольких усилителей между датчиком и входом системы сбора данных. Такое согласование сопротивлений обычно основано на использовании операционных усилителей.

## 11. ДАТЧИКИ

### 11.1. Бинарные и цифровые датчики

В системах управления последовательностью событий в основном применяются сигналы типа "включено/выключено", вырабатываемые бинарными датчиками. В любом производственном процессе приходится контролировать тысячи условий типа "включено/выключено".

Бинарные датчики используются для определения положения при механических перемещениях для подсчета элементов в дискретных потоках (например, числа бутылок на выходе линии розлива), для контроля достижения предельных значений уровня, давления или крайних положений подвижных частей.

Бинарные и цифровые датчики бывают как простыми, состоящими только из выключателя, так и очень сложными. Некоторые цифровые датчики в действительности представляют собой полнофункциональный микрокомпьютер, встроенный в автономное устройство и вырабатывающий либо сигналы типа "включено/выключено, либо кодированные цифровые данные. Ниже описаны некоторые типы датчиков с бинарным выходом — положения, пороговые и датчики уровня.

#### 11.1.1. Датчики положения

В качестве **датчиков положения** (*position sensor*) в течение многих десятилетий пользуются выключатели. Они состоят из электрических контактов, которые механически размыкаются или замыкаются, когда какая-либо переменная (положение, уровень) достигает определенного значения. **Концевые выключатели** (*limit switch*) различных типов являются важной частью многих систем управления, надежность которых существенно зависит именно от них. Они располагаются там, где "происходит действие", и часто подвергаются большим механическим нагрузкам и токам.



На рис. 11.1 показаны **нормально разомкнутый замыкающий выключатель** (*normally open, make-contact switch*), **нормально замкнутый размыкающий выключатель** (*normally closed, break-contact switch*) и **переключатель** (*change-over switch*) в нормальном положении и при срабатывании. На схемах контакты выключателя обычно изображают в нормальном положении.

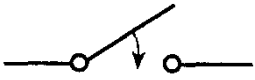

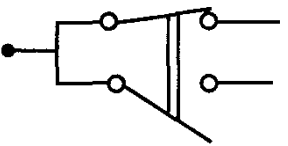
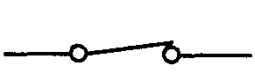
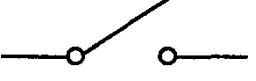
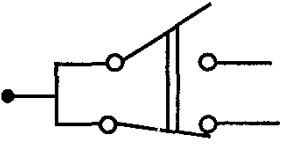
	Нормально разомкнутый замыкающий выключатель	Нормально замкнутый размыкающий выключатель	Переключатель
Нормальное положение			
Положение при срабатывании			

Рисунок 11.1. Концевые выключатели

Простейшим выключателем является механический нормально разомкнутый **однополюсный выключатель** (*Single-Pole Single-Throw - SPST*), показанный на рис.11.2,а. Простое согласование сигналов можно обеспечить с помощью нагрузочного резистора. Когда выключатель разомкнут, с резистора снимается напряжение +5В воспринимаемое ТТЛ-вентилем на входе компьютера как одно из логических состояний. Если контакт замкнут, выходной сигнал равен потенциалу «земли», что воспринимается как другое логическое состояние.

Замыкание механического выключателя обычно вызывает проблемы, поскольку контакты вибрируют ("дребезжат") несколько миллисекунд, прежде чем замкнуться (рис.11.2,б).

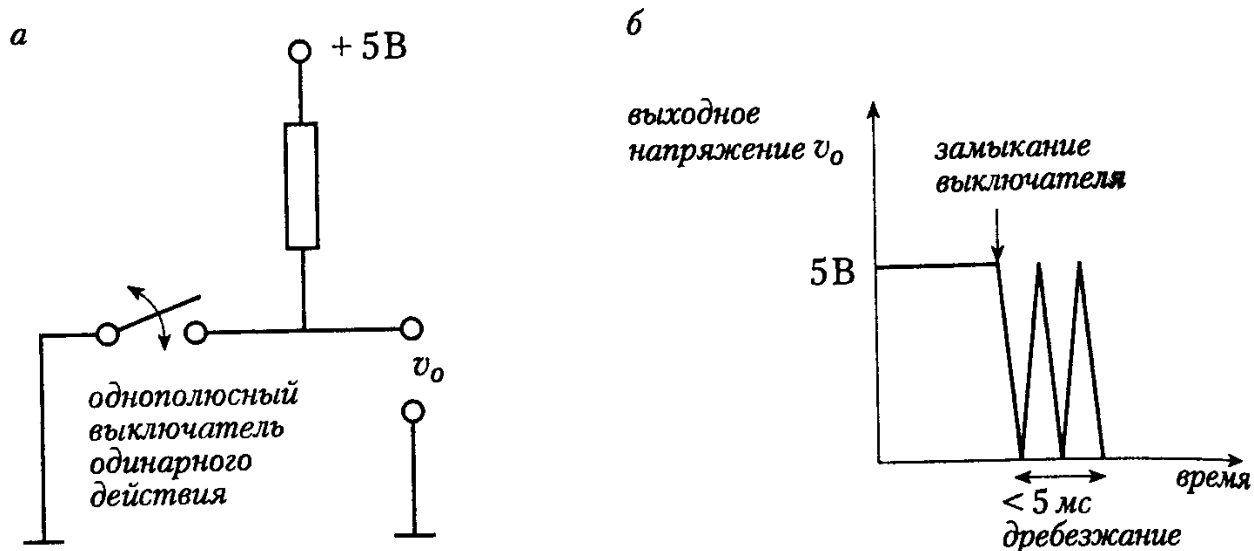


Рисунок 11.2. Дребезг контактов при размыкании выключателя

Когда важно зафиксировать только первое касание, как в случае концевого выключателя, принимать во внимание последующие замыкания и размыкания контактов из-за дребезжания нет необходимости. Применение цепи, обеспечивающей небольшое запаздывание выходного сигнала, является одним из способов преодоления эффекта дребезга контактов.

**Однополюсный двухпозиционный выключатель** (*Single-Pole Double-Throw -SPDT*) может быть типа "разрыв перед замыканием" (*Break-Before-Make — BBM*) или "замыкание перед разрывом" (*Make-Before-Break — МВБ*) (рис. 11.3). При переключении в первом случае оба контакта разомкнуты на короткое время, во втором - через оба контакта ток кратковременно протекает.

Бороться с дребезжанием контактов в переключателях SPDT можно с помощью специальных схем. Подвижный контакт должен быть заземлен; когда он касается контакта, присоединенного к источнику, напряжение последнего снижается. Подключенная электронная схема должна "уловить" логическое состояние, соответствующее первому касанию контактов, и игнорировать последующее дребезжание.

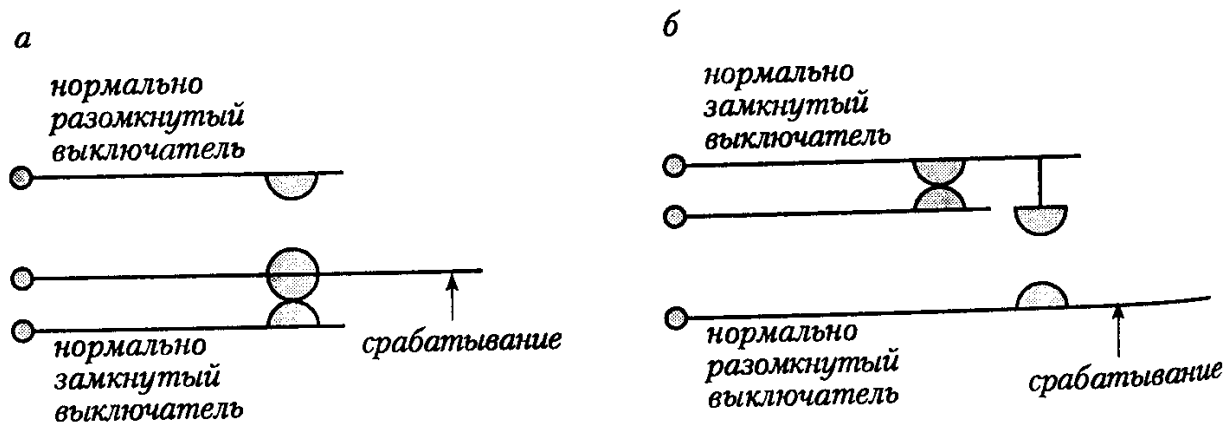


Рисунок 11.3. Переключатели с различными контактными системами

а – разрыв перед замыканием

б – замыкание перед разрывом

Существуют другие методы определения положения с помощью бинарных датчиков некоторые, из которых приведены ниже.

- Ртутные выключатели состоят из небольших герметически запаянных стеклянных трубок с контактными выводами. Трубка содержит достаточное количество ртути, чтобы замкнуть контакты. Выключатель размыкает и замыкает контакты при **изменении** положения (наклона) трубки.

- Магнитоуправляемое герметичное язычковое реле – геркон – состоит из двух плоских пружин, запаянных в небольшую стеклянную трубку. Свободные концы пружин находятся друг над другом с очень небольшим зазором между ними. Когда к трубке приближается магнит, пружины намагничиваются в разных направлениях, притягиваются друг к другу и замыкаются.

- Фотоэлектрические датчики выполнены из материалов, которые изменяют сопротивление или генерируют разность потенциалов под влиянием света. Во многих устройствах достаточно бинарной индикации — есть свет или нет. Фотоэлектрический лучевой детектор состоит из источника светового луча и светочувствительного элемента. Существует много конструкций светодетекторов, которые отличаются в основном тем, отражается или прерывается световой луч фиксируемым объектом.

Преимущества светодетекторов — простота, гибкость, низкая стоимость и главное, фиксация может выполняться без непосредственного физического контакта. На базе фотоэлектрических лучевых детекторов легко строятся измерители частоты вращения, счетчики, датчики положения и т. д.

- Ультразвуковые и микроволновые датчики используются для обнаружения объектов на расстояниях от нескольких сантиметров до нескольких метров. Эти датчики работают в режиме отражения (излучатель и приемник заключены в одном приборе) или на принципе прерывания луча (излучатель и приемник расположены в разных устройствах).

### **11.1.2. Пороговые датчики**

Разные типы датчиков используются для определения момента, когда аналоговая величина (например, уровень, давление, температура или расход) достигает некоторого порогового значения. Поэтому их часто называют **пороговыми датчиками** (*point sensors, limit sensors*). Они обычно используются для подачи аварийного сигнала, а иногда и остановки процесса в случае достижения какой-либо величиной значения, указывающего на опасную ситуацию. Такие датчики должны быть устойчивыми и надежными.

### **11.1.3. Индикаторы уровня**

**Индикатор уровня** (*level switch*) срабатывает, если резервуар заполнен до заданной высоты. Принцип работы зависит от свойств контролируемого вещества — жидкость, цементный раствор, гранулы или пыль. Индикатор может либо показывать текущий уровень, либо выдавать сигнал, когда уровень достигает заданного.

Поплавок, находящийся на поверхности жидкости, при достижении определенного уровня действует как концевой выключатель. Герконы являются идеальными выключателями жидкой среды, поскольку они водонепроницаемы. На поплавке должен быть установлен магнит, чтобы вызвать срабатывание контактов геркона. Для той же цели часто

используются фотоэлектрические датчики. Для твердых материалов применяются емкостные датчики приближения (*proximity sensors*). По мере повышения уровня заполнителя из пространства между стенкой сосуда и емкостным зондом вытесняется воздух, и поэтому изменяется емкость образованного ими конденсатора, которую можно измерить стандартными методами. Уровень можно измерить и датчиком давления, помещенным на дно сосуда, поскольку величина давления у дна прямо пропорциональна высоте столба вещества. В этом случае может вырабатываться как аналоговый (индикация текущего уровня), так и бинарный (достигнут пороговый уровень) сигнал.

#### **11.1.4. Цифровые и информационно-цифровые датчики**

Цифровые датчики генерируют дискретные выходные сигналы, например импульсные последовательности или представленные в определенном коде цифровые данные, которые непосредственно могут быть считаны процессором. В зависимости от типа датчика выходной сигнал либо сразу формируется в цифровом виде, (например от датчика положения вала), либо должен обрабатываться цепями электронной логики, которые обычно составляют с ним одно целое. Измерительная головка цифрового датчика такая же, как и у аналогового. Существуют интегрированные цифровые датчики, которые включают микропроцессоры для выполнения числовых преобразований и согласования сигнала и вырабатывают цифровой или аналоговый выходной сигнал.

Если выходной сигнал датчика представляет собой последовательность импульсов, то они обычно суммируются счетчиком. В другом варианте — можно измерять интервал между импульсами. Затем результат в виде цифрового слова передается на дальнейшую обработку. При измерении энергии информация обычно кодируется импульсами — каждый импульс соответствует определенному количеству энергии.

Информационно-цифровые датчики (*Fieldbus sensor*) дополнительно обеспечивают передачу информации через шины локального управления, которые представляют собой специальный тип двухсторонних цифровых коммуникаций. Датчики данного типа — это обычные датчики температуры, давления, расхода и т. д., которые дополнительно имеют микропроцессор для обработки данных, преобразования их в цифровой вид (например, в 12-разрядный код) и поддержки внешних коммуникаций. По шине можно передавать не только результаты измерений, но и идентификационную информацию датчика. Иногда такие датчики поддерживают режим удаленного тестирования и калибровки.

**Пример. Датчики положения вала (енкодеры)**

Датчики положения вала или кодеры поворота (*shaft encoders*) — это цифровые датчики для измерения угла поворота и угловой скорости. Они применяются во всех системах, где нужна точная информация о параметрах вращательного движения, — например, станки, роботы, сервосистемы и электропривод. Существуют датчики относительного (*incremental*) и абсолютного типов.

Датчик относительного типа состоит из светодетектора или магнитного датчика, например геркона, который генерирует последовательность импульсов при вращении объекта; поворот на  $360^\circ$  соответствует одному или нескольким импульсам. Затем последовательность импульсов обрабатывается и преобразуется в угол поворота и угловую скорость объекта.

Датчик абсолютного типа выдает угол поворота объекта в двоичном коде. Оптический датчик состоит из диска с прорезями и светонепроницаемыми участками, причем каждая прорезь уникальна и соответствует определенному углу поворота. Источник света освещает одну сторону диска, а на другой стороне блок датчиков фиксирует световой шаблон (т. е. через какие прорези свет проходит, а через какие — нет), которому соответствует цифровое значение угла поворота. Кодирование

обычно осуществляется на основе модифицированного двоичного алгоритма, чтобы минимизировать ошибки смещения фотоэлектрических датчиков относительно прорезей в диске. Эта простая технология обеспечивает высокие разрешение (которое определяется числом прорезей на градус углового смещения или на оборот диска) и точность, а также хорошую помехоустойчивость при передаче сигналов, поскольку не требует аналогово-цифрового преобразования.

## **11.2. Аналоговые датчики**

Выходной сигнал датчика подается на вход обрабатывающего устройства, например, на входной порт компьютера. Поскольку характеристики выходного сигнала датчика и последующего каскада довольно часто отличаются друг от друга, то для передачи сигнала между ними должна использоваться некоторая согласующая цепь. Термин "согласующая цепь" (*conditioning circuitry*) является довольно общим и может обозначать любой набор электронных компонентов между измерительной головкой датчика и обрабатывающим устройством. Нельзя точно определить границу между электроникой измерительного преобразователя и последующими согласующими цепями — каждый раз она может трактоваться по-своему.

Большинство датчиков с преобразователем, применяемых в системах управления, генерируют аналоговый сигнал. Как правило, при управлении измеряются следующие физические величины:

- электрические и магнитные характеристики;
- параметры движения;
- сила, момент и давление;
- температура;
- уровень заполнения емкости;
- расход;
- плотность, вязкость и консистенция;

- концентрация (газа, жидкости, растворенных и взвешенных веществ);

### **11.2.1. Датчики движения**

Датчики движения измеряют четыре кинематические величины:

- перемещение (изменение положения, расстояния, степени приближения, размера);
- скорость (включая угловую);
- ускорение;
- удар.

Каждая из этих величин является производной по времени от предшествующей. Теоретически можно измерить только одну из них и затем получить остальные дифференцированием или интегрированием. На практике, однако, такой подход неприемлем из-за природы сигнала (постоянный, переходный и т. д.), частотного спектра, шумов и возможностей средств обработки данных.

Контроль параметров движения обязателен для приложений, в которых используется механическое оборудование — сервосистемы, роботы, электроприводы или другие манипуляторы. Измерение перемещений применяется при управлении положением клапанов. Толщина пластин в прокатном стане постоянно контролируется системой управления калибровкой. Датчики деформаций — это устройства, которые измеряют механическое напряжение, давление и силу, но могут применяться и для измерения перемещений. В системах мониторинга состояния и предупреждения отказов механического оборудования широко используются акселерометры.

Для измерения параметров движения применяются следующие типы устройств:

- потенциометры для измерения перемещений; они работают как переменные резисторы;



- датчики на основе принципа электромагнитной индукции, например дифференциальные трансформаторы, резольверы, синхротрансформаторы (сельсины);

- емкостные датчики для измерения малых перемещений, вращений и уровней жидкости;

- пьезоэлектрические датчики для измерения давления, напряжения, ускорения, скорости, силы и момента (пьезоэлектрический материал деформируется под действием приложенной разности потенциалов или вырабатывает разность потенциалов при механическом воздействии);

- лазерные датчики для точного измерения малых перемещений;

- ультразвуковые датчики для измерения расстояний в медицинских приборах и системах автофокусировки фото- и телекамер, измерения уровня и скорости.

### Пример. Резольвер

**Резольверы** (*resolver*) применяются в приложениях, где требуется очень точное измерение угловых перемещений и скорости, например в сервосистемах и роботах. Выходной сигнал резольвера — это мера углового перемещения, дифференцирование этого сигнала дает угловую скорость. Резольвер работает на принципе измерения взаимоиндукции между двумя обмотками (рис. 11.4). Ротор резольвера соединен с вращающимся объектом. На первичную обмотку ротора подается переменное напряжение  $u_{ref}$ . Статор состоит из двух обмоток, развернутых на  $90^\circ$  друг относительно друга. Напряжение на этих обмотках

$$v_{o1} = K \cdot v_{ref} \cdot \sin\theta$$

$$v_{o2} = K \cdot v_{ref} \cdot \cos\theta$$

соответственно, где  $\theta$  — угловое положение ротора.

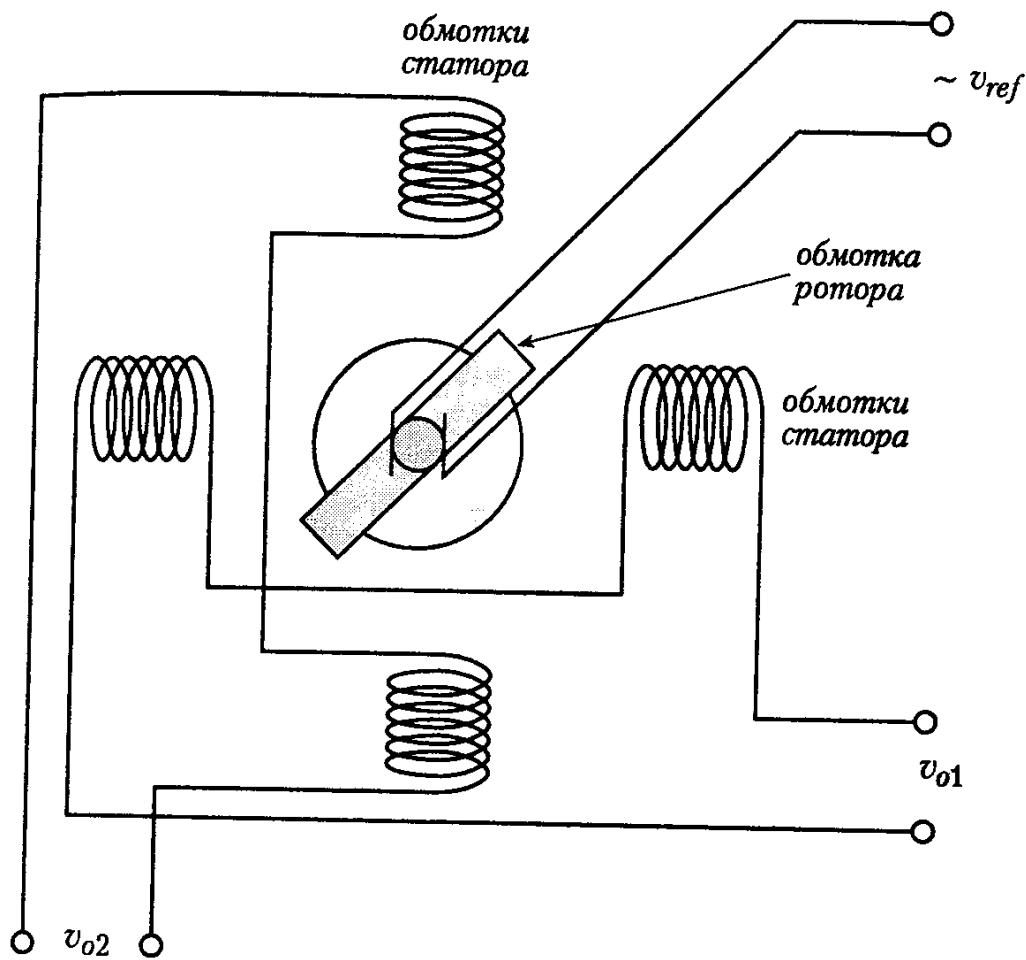


Рисунок 11.4. Принцип работы резольвера

Можно сказать, что выходные напряжения  $v_{o1}$  и  $v_{o2}$  представляют собой напряжение  $v_{ref}$ , промодулированное величиной угла  $\theta$ . Используя одно из выходных напряжений, можно однозначно измерить углы лишь в диапазоне  $0-90^\circ$ , оба сигнала позволяют однозначно измерять углы от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ .

Выход резольвера есть тригонометрическая функция угла. Эта нелинейность, однако, не всегда является недостатком. Например, при управлении вращающимися моментами в работах требуются именно тригонометрические функции углов поворота. Поэтому выходной сигнал резольвера можно непосредственно использовать для управления без дополнительного преобразования в реальном времени, которое увеличило бы нагрузку управляющего компьютера.

Обычно резольвер дает хорошее разрешение и высокую точность. Он имеет высокий уровень выходного сигнала и низкий выходной импеданс. Полоса пропускания резольвера зависит от частоты источника напряжения. Проблемы при работе резольвера могут возникать только из-за щеток ротора (износ, дополнительные шумы и механические нагрузки). Резольверы поставляются в виде полнофункциональных автономных устройств.

Измерение линейных и угловых скоростей имеет фундаментальное значение для приводов и робототехники. Интересным приложением систем измерения ускорения и сил является управление активной подвеской транспортных средств.

### Тахометр

Тахометр представляет собой генератор постоянного тока с постоянными магнитами, применяемый для измерения угловой скорости. Принцип его действия иллюстрируется рис. 4.12.

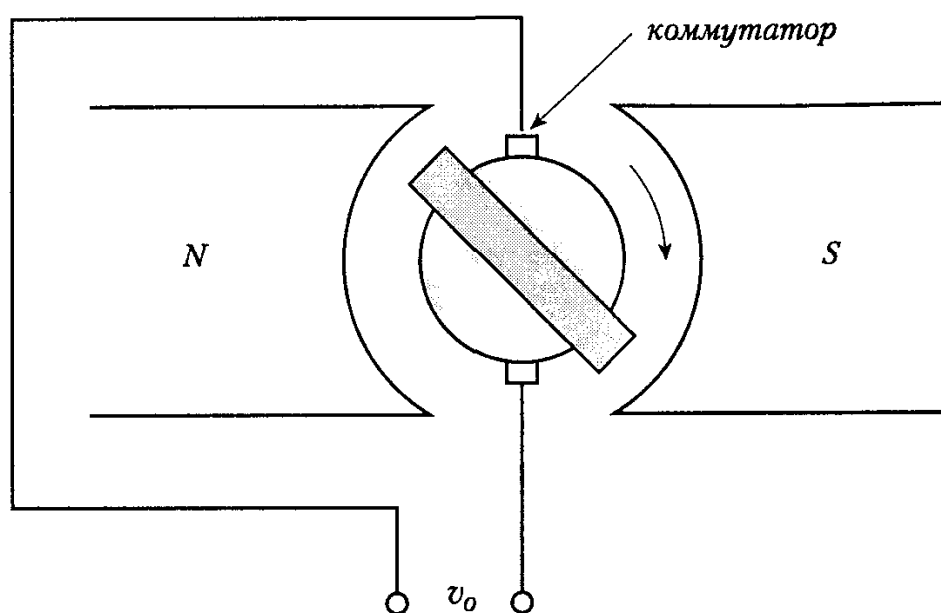


Рис. 4.12. Принцип работы тахометра постоянного тока

Магниты создают постоянное однородное магнитное поле. Движение проводника в поле индуцирует напряжение, пропорциональное скорости его вращения. Ротор непосредственно соединен с объектом, скорость вращения которого измеряется. Выходное напряжение, генерируемое в процессе вращения, снимается коллектором, который состоит из пары угольных щеток с низким сопротивлением. Тахометр обычно создает очень маленькую дополнительную механическую нагрузку для больших валов, на которые он устанавливается. Анализируя динамику тахометра, можно утверждать, что его частотный диапазон обычно значительно шире, чем у механического двигателя при его нормальной нагрузке. Поэтому индуктивность и другие электромагнитные параметры тахометра обычно не влияют на результаты измерения.

### 11.2.2. Датчики силы, момента и давления

Многие типы датчиков силы/момента (*force/torque*) основаны на измерении деформаций. Датчики для измерения деформаций называются **тензодатчиками**. Принцип действия таких датчиков - изменение электрического сопротивления в образце, который подвергается воздействию внешних сил (пьезорезистивный эффект). Относительное изменение сопротивления как функция действующей на датчик силы зависит от используемого материала: у полупроводникового датчика оно на 1-2 порядка больше, чем у металлического. Чувствительный элемент у полупроводникового датчика выполнен из монокристалла пьезорезистивного материала. Дополнительное преимущество полупроводниковых тензодатчиков – более высокое удельное сопротивление по сравнению с металлическими и, соответственно, меньшее потребление мощности и выделение тепла.

Измерение моментов и сил необходимо во многих задачах, включая управление точным движением (например, перемещения и захваты в робототехнике) и передаваемой механической мощностью в двигателях и системах привода. Момент можно измерить либо на основе напряжений, возникающих в материале, либо на основе деформации (прогиба). Измеряя угол скручивания оси датчиком углового перемещения, можно определить приложенный момент. Выше было показано, что момент двигателя постоянного тока пропорционален току ротора, т. е. не прямое (косвенное) измерение момента можно выполнить по величине тока.

Давление можно измерить по соответствующей механической деформации, например по изгибу трубки или отклонению мембраны. Мембрана присоединяется к кристаллу кварца, электроду конденсатора или дифференциальному трансформатору (рис. 11.5). Благодаря пьезоэлектрическому эффекту деформированный кварцевый кристалл генерирует разность потенциалов. Изменение емкости конденсатора, присоединенного к мембране, можно измерить каким-либо электрическим

методом. Выходной электрический сигнал в обоих случаях связан с приложенным усилием и деформацией измерительной головки.

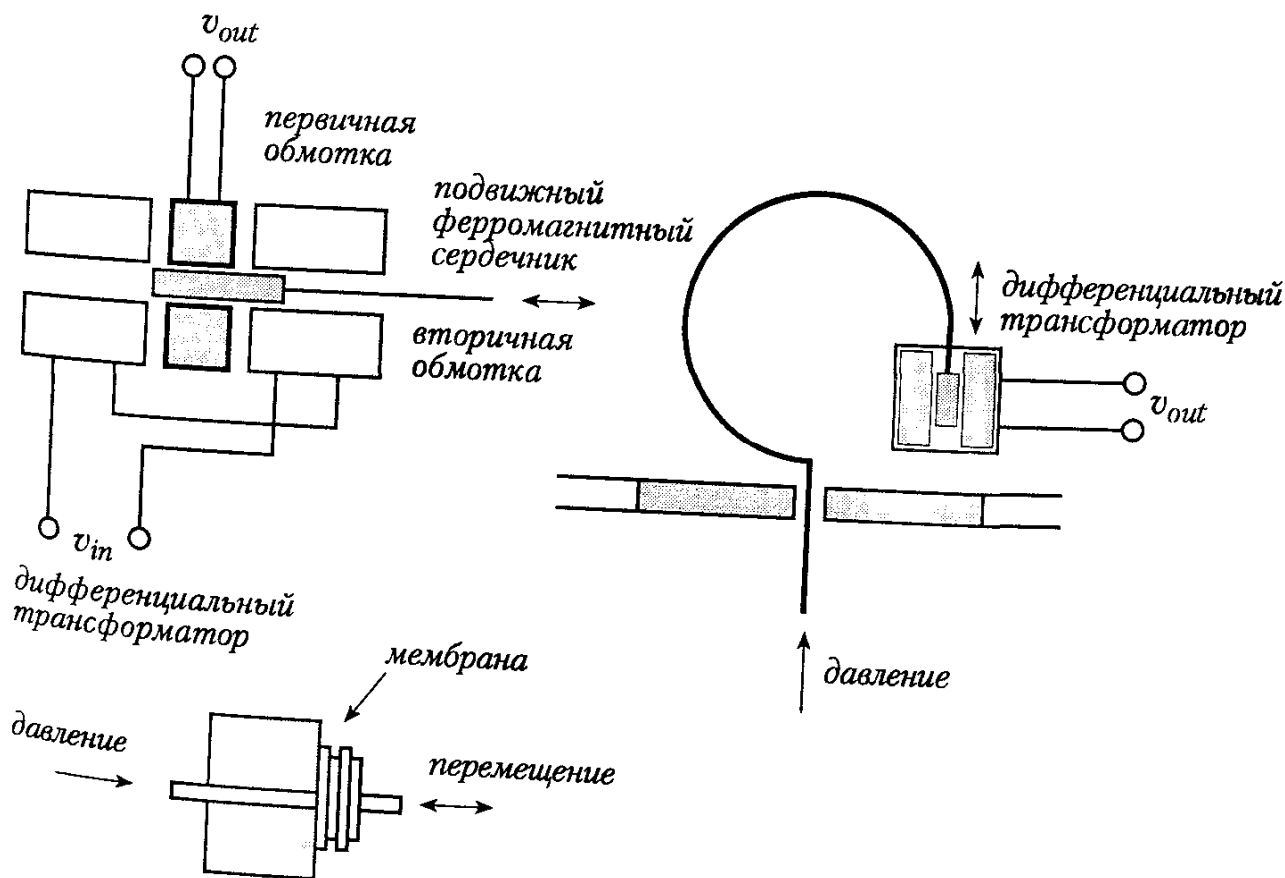


Рисунок 11.5. Принципы измерения давления

**Дифференциальный трансформатор** - это датчик, используемый для измерения перемещений. Обычно он состоит из ферромагнитного сердечника, движущегося внутри двух обмоток трансформатора. Одна обмотка питается переменным током, а со второй снимается выходной сигнал. Обмотки соединены таким образом, чтобы в нейтральном положении сердечника выходное напряжение было равно нулю. Любое перемещение сердечника пропорционально изменяет выходное напряжение.

Измерение давления используется для определения других величин. Например, по давлению на дне заполненного жидкостью сосуда можно определить ее уровень.

### 11.2.3. Датчики приближения

Изменение электрических свойств элементов колебательных контуров при приближении к внешним объектам можно использовать для создания **датчиков приближения** (*proximity sensors*). Эти датчики могут выдавать аналоговый сигнал, пропорциональный — по крайней мере, в определенном диапазоне — расстоянию до заданного объекта, или цифровой сигнал при достижении заданного порогового значения расстояния. Электрические датчики приближения используют следующие принципы.

- Индуктивные датчики приближения работают на основе излучения высокочастотного электромагнитного поля обмоткой, которая входит в колебательный контур. Электромагнитное поле индуцирует в проводящем материале объекта вихревые токи. Когда объект, расстояние до которого контролируется, приближается к датчику (обычно на 2-30 мм), колебания начинают затухать. Изменение тока в колебательном контуре можно использовать для срабатывания полупроводникового ключа.

- Емкостные датчики приближения содержат затухающий колебательный  $RC$ -контур. Емкость зависит от расстояния между обкладками конденсатора, их площади и свойств диэлектрика между ними. Датчик присоединен к одной из обкладок или к диэлектрику. Когда объект приближается к датчику, результирующее изменение емкости, а, следовательно, и частоты колебаний, можно зафиксировать электрически и использовать для управления выключателем. Емкостный датчик может обнаружить объекты, которые не являются проводящими. Диапазон срабатывания для таких датчиков обычно лежит между 5 и 40 мм. Емкостные датчики можно использовать также для измерения силы и давления.

- Магнитные датчики приближения опознают приближение объекта по изменению характеристик магнитного поля и не имеют подвижных частей. Принцип работы может базироваться на индуктивности, магнитном сопротивлении, магниторезистивном эффекте или эффекте Холла. Магниторезистивный эффект и эффект Холла обусловлены одним и тем же

физическим явлением — сопротивление проводящего материала изменяется под воздействием внешнего магнитного поля. Если проводник с электрическим током подвергся воздействию магнитного поля, его сопротивление увеличивается (магниторезистивный эффект). Кроме того, на противоположных сторонах этого проводника возникает разность потенциалов, которую можно измерить (Эффект Холла). Проводник должен быть расположен так, чтобы магнитное поле было перпендикулярно направлению тока; разность потенциалов возникает вдоль оси, перпендикулярной и магнитному полю, и направлению тока. Геометрическая форма проводника выбирается так, чтобы максимальным был либо магниторезистивный эффект, либо эффект Холла. Датчики Холла часто выполняют из полупроводниковых материалов.

#### **11.2.4. Датчики температуры**

Зависимость свойств многих материалов от температуры не всегда является недостатком - из таких материалов изготавливаются датчики температуры. Конструкция выбирается таким образом, чтобы усилить температурную зависимость какой-либо электрической характеристики. Эта зависимость, как правило, является нелинейной, что создает дополнительные трудности при ее воспроизведении. Обычно применяются три типа датчиков температуры:

- термоэлементы;
- резистивные детекторы температуры;
- термисторы.

##### **Пример Термоэлементы**

Первый термоэлемент был создан в 1887 году французским ученым Ле Шателье (le Chatelier). В термоэлементе две точки контакта А и В соединены двумя параллельными проводами, выполненными из разных металлов (например, алюминий и медь). Таким образом, создается замкнутая цепь (рис. 11.6).

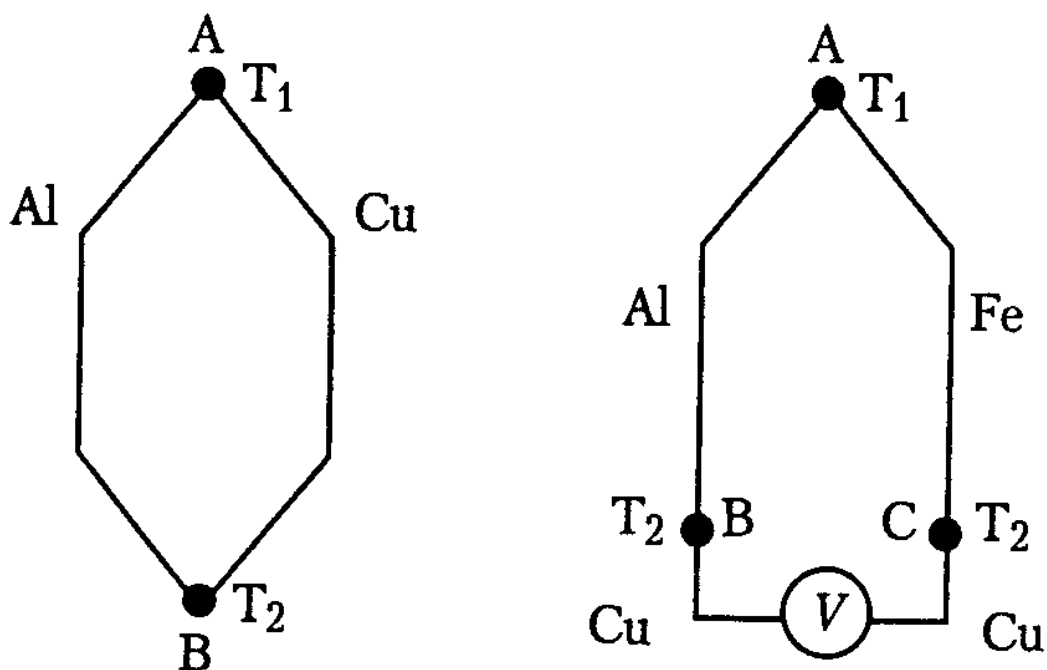


Рисунок 11.6. Принцип работы термоэлемента

До тех пор пока температуры в точках А и В одинаковы, ток в цепи не протекает. Если температуры в точках А и В отличаются, то по цепи начинает протекать электрический ток. Это явление называется термоэлектрическим эффектом или эффектом Сибека (Seebeck), по имени открывшего его в 1821 году исследователя. Эта так называемая термоэлектродвижущая сила увеличивается как функция разности температур. Возникающее напряжение лежит в пределах нескольких милливольт, что требует применения дополнительной очень чувствительной — и поэтому сравнительно дорогостоящей — электронной измерительной аппаратуры. Из-за низкого уровня сигнала следует тщательно выбирать процедуру передачи и соединительные провода. Необходимо иметь в виду, что термоэлемент измеряет разность температур, а не ее абсолютное значение, поэтому температура одного из контактов должна быть известна с высокой точностью. Для различных температурных диапазонов используются разные сочетания металлов. Термоэлементы весьма надежны и недороги, имеют малую теплоемкость и способны работать в широком диапазоне температур.



Международная электротехническая комиссия (МЭК, *International Electrotechnical Commission* — IEC) определила некоторые стандартные типы термоэлементов (стандарт IEC 584-1). Элементы имеют индексы R, S, B, K, J, E, T в соответствии с диапазоном измеряемых температур.

Металлы имеют положительный температурный коэффициент сопротивления, т.е. с увеличением температуры сопротивление проводника растет. Это свойство используется в резистивных детекторах температуры.

### Пример Резистивный детектор температуры

Резистивные детекторы температуры (*resistance temperature detector* - RTD) обычно выполняются из платиновой проволоки. Сопротивление  $R$  является практически линейной функцией температуры  $T(^{\circ}\text{C})$  при опорном значении  $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$ . Отношение сопротивления  $R$  при температуре  $T$  к сопротивлению  $R_0$  при опорной температуре  $T_0$  можно выразить как

$$\frac{R}{R_0} = 1 + a \cdot T + b \cdot T^2 + \dots$$

где  $a$  — это температурный коэффициент сопротивления и  $b$  — положительная или отрицательная постоянная (рис. 4.15). Для платины типичными значениями параметров являются  $a = 0.004 [^{\circ}\text{C}^{-1}]$  и  $b = 0.59 \cdot 10^{-6} [^{\circ}\text{C}^{-2}]$ .

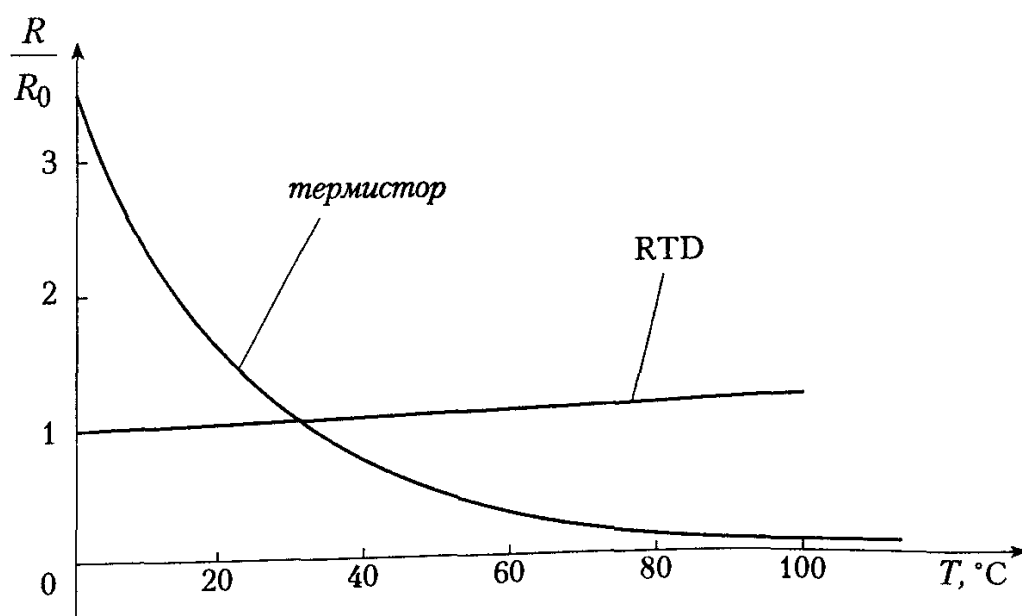


Рис. 4.15. Температурная характеристика сопротивления резистивного детектора<sup>a</sup> температуры и термистора

Существуют RTD для набора стандартных сопротивлений. Наиболее часто используемый тип имеет сопротивление 100 Ом при опорной температуре 0 °С или 273 К; у него есть собственное имя — Pt-100.

Датчики типа RTD имеют весьма низкую чувствительность, и любой ток  $i$ , используемый для определения изменения сопротивления, будет нагревать датчик, изменяя его показания на величину, пропорциональную  $i^2$ . Выходное сопротивление чаще всего измеряется мостовыми схемами.

### Пример Термистор

Термистор (*thermistor*), т. е. температурно-зависимый резистор, изготавливается из полупроводникового материала, имеющего отрицательный температурный коэффициент и высокую чувствительность. Его сопротивление нелинейно зависит от температуры

$$R = R_0 \cdot e^{\beta(1/T - 1/T_0)}$$

где  $T$  — температура в градусах Кельвина,  $R_0$  — сопротивление при опорной температуре  $T_0$  (обычно 298 К, т. е. 25 °С), а  $\beta$  — постоянная (обычно 3000–5000 К). Наклон кривой  $R-T$  (рис. 4.15) соответствует температурному коэффициенту  $a$ , который, в свою очередь, является функцией температуры

$$a = \frac{1}{(R/R_0)} \cdot \frac{d(R/R_0)}{dT} = \frac{-b}{T^2}$$

Значение коэффициента  $a$  обычно лежит в диапазоне от  $-0.03$  до  $-0.06 \text{ K}^{-1}$  при 25°С (298 К).

Из-за конечного сопротивления термистора при протекании по нему тока выделяется тепло. Энергия, выделяемая в термисторе при 25°С, имеет обычно порядок 0.002 мВт. При постоянной рассеяния около 1 мВт/°С температура датчика будет повышаться на 1°С (на воздухе) на каждый милливатт рассеиваемой мощности.

Термистор не является точным датчиком температуры. Однако, благодаря своей чувствительности, он используется для измерений малых отклонений температуры. Это устройство довольно надежно как механически, так и электрически. Нелинейное выходное напряжение

термистора должно быть преобразовано в линейную зависимость от температуры. Это можно сделать с помощью аналогового устройства или программным способом. Программными средствами можно непосредственно задать градуировочную таблицу или функцию, обратную характеристике термистора. Линейность характеристики можно получить, присоединив к термистору несложные электронные устройства. Термисторы применяются для измерения температур вплоть до 500-600°C.

### 11.2.5. Измерение расхода

Измерение **расхода** (*flow rate*) играет жизненно важную роль в промышленности. Несмотря на большую потребность в качественных датчиках расхода, точность этих устройств до сих пор оставляет желать лучшего. Однако постоянно повышающиеся требования к качеству продукции во многих областях производства обуславливают необходимость прямых и точных методов измерения расхода. Иногда оправдано применение даже очень дорогих датчиков.

Измерение расхода базируется на физических свойствах движущейся жидкости, связанных либо с массой, либо с объемом. В случае однородной несжимаемой жидкости эти два показателя связаны через плотность:

$$m = \rho \cdot V$$

Однако многие жидкости, применяемые в промышленности, не имеют постоянной плотности, или ее трудно определить. Примером является сырая нефть, представляющая собой на выходе из скважины смесь собственно нефти (которая сама по себе - сложная смесь жидких и твердых углеводородов), воды, песка, других сопутствующих веществ, растворенного воздуха и пузырьков попутного газа. Большинство методов измерения расхода основано на объемных показателях. Ниже кратко рассмотрены некоторые из них, а также методы, связанные с измерением массового расхода. Во многих случаях интерес представляет не только мгновенное значение расхода, но и общее количество жидкости, прошедшее через точку

измерения (например, для расчета платежей). Измерительный прибор в этом случае называется **расходомером** (*Flowmeter*).

### Измерение объемного расхода

Объемный расход можно определить на основе скорости истечения потока. Связь между этими величинами однозначно определяется геометрией сечения трубы, где производится измерение, поэтому их взаимный пересчет легко выполняется с помощью калибровочной таблицы, поставляемой производителем датчика. Для измерения объемного расхода можно использовать следующие физические принципы:

- разность давлений;
- скорость вращения турбины;
- распространение ультразвука в жидкости;
- магнитную индукцию;
- интенсивность образования вихрей.

Датчики расхода, основанные на измерении разности давлений, работают в соответствии с законом Бернулли. Движущаяся в трубопроводе жидкость имеет постоянный объемный расход во всех сечениях. Даже если трубопровод имеет сужение, то массовый и объемный расход должны оставаться одинаковыми. Чтобы удовлетворить законы сохранения энергии и количества движения, в месте сужения скорость и статическое давление жидкости должны отличаться от остальных сечений трубопровода. В соответствии с законом Бернулли в месте сужения скорость движения жидкости увеличивается, а давление падает. По величине перепада давления  $\Delta p = p_1 - p_2$  можно рассчитать скорость жидкости. Расход пропорционален  $\sqrt{\Delta p}$ ; коэффициент пропорциональности зависит от геометрии сужения. Для измерения можно использовать смещение мембраны, возникающее из-за увеличения давления. Если мембрана соединена с магнитным сердечником дифференциального трансформатора, его выходное напряжение также будет пропорционально разности давлений и, следовательно, расходу жидкости (рис. 11.7,а).

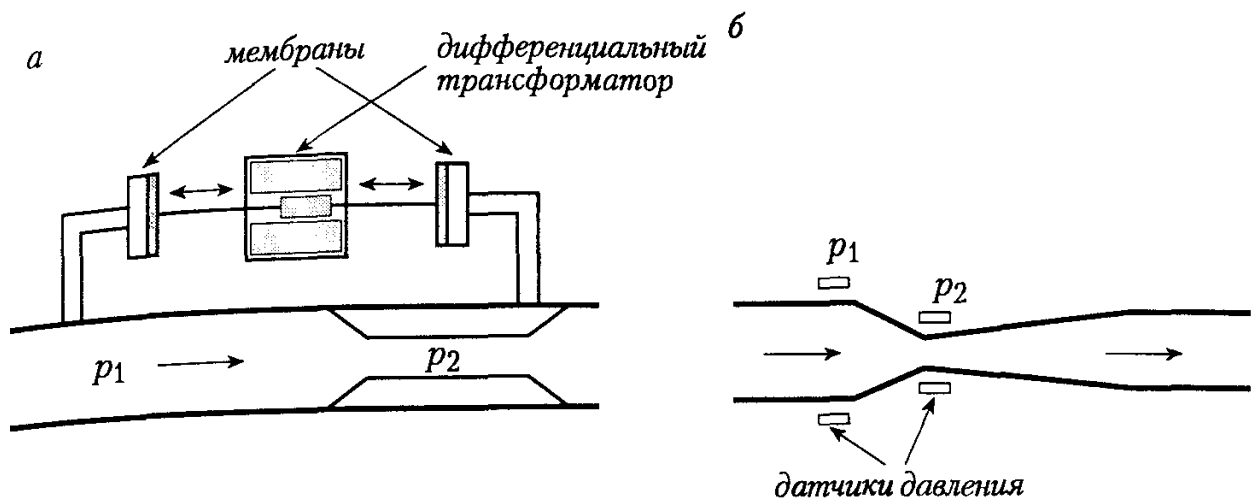


Рисунок 11.7. Измерение расхода по разности температур

В месте сужения всегда присутствуют потери на трение, которые можно уменьшить за счет выбора гидродинамически обтекаемой формы. Примером такого устройства является трубка Вентури (рис. 11.7,б), которая состоит из сужающегося и расширяющегося сопел. Такая конструкция приводит к уменьшению вихреобразования при прохождении потока через наименьшее сечение и позволяет пренебречь потерями на трение. Трубки Вентури обычно используются для измерений больших расходов в открытых каналах; однако их стоимость, как правило, выше, чем стоимость обычных дифференциальных расходомеров.

Расход можно измерить турбиной со счетчиком частоты вращения, поскольку он пропорционален скорости вращения. Обычно этот принцип применяется в расходомерах, которые выдают импульс при прохождении через турбину определенного количества жидкости. Такой измеритель можно использовать только для чистых жидкостей, так как любые твердые частицы будут мешать вращению турбины.

Простой способ измерения объемного расхода основан на свойствах распространения ультразвука в жидкости. В результате ультразвукового измерения можно получить среднюю скорость жидкости, которая определяется по скорости распространения ультразвуковых волн. В предположении, что эта скорость равна средней скорости движения

жидкости (скорость считается средней потому, что в действительности она неравномерно распределена по сечению и меняется от точки к точке), объемный расход получается простым умножением полученной скорости на площадь сечения трубопровода.

Ультразвуковое измерение выполняется с помощью двух пьезоэлектрических преобразователей, помещенных по разные стороны трубы на расстоянии (вдоль оси трубы) по крайней мере 100 мм друг от друга; они могут работать как в режиме излучения (прямом), так и в режиме отражения (рис. 11.8).

Существуют два основных способа ультразвуковых измерений: один основан на определении времени прохождения волны через жидкость, другой - на изменении частоты.

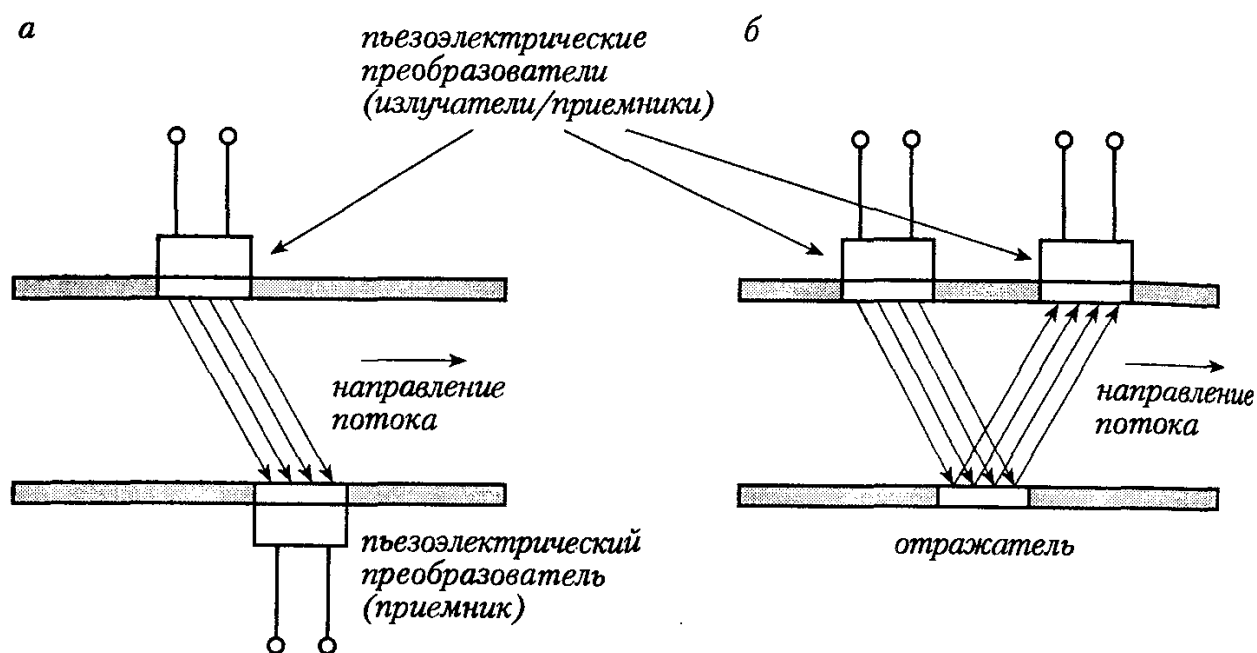


Рисунок 11.8. Принцип ультразвукового измерения расхода

а – прямой метод;

б – метод отражения.

Первый способ связан с измерением разницы во времени распространения последовательности импульсов в жидкости (скорость звука

зависит от вида жидкости; она составляет 344 м/с в воздухе при комнатной температуре и 1483 м/с в воде). Сначала первый пьезопреобразователь генерирует группу импульсов, а второй принимает их, затем они меняются ролями: второй преобразователь становится излучателем а первый — приемником. В одном случае составляющая скорости жидкости  $v \cdot \cos \alpha$  увеличивает время пробега волны, в другом — уменьшается. Исходя их двух измерений можно определить среднюю скорость жидкости  $v$ .

Второй способ основан на разности частот излученных и принятых импульсов. Составляющая  $v \cdot \cos \alpha$  скорости жидкости влияет на длину волны ультразвуковых импульсов (эффект Доплера), что означает, что их частота увеличивается в одном направлении и уменьшается в другом. Из разности частот можно найти среднюю скорость жидкости. Достоинство этих способов состоит в том, что результат не зависит от скорости распространения звука в конкретной жидкости и поэтому не требуется специальной градуировки устройства, поскольку измерения в разных направлениях компенсируют друг друга. В обоих случаях, однако, на результат измерения влияют неоднородность жидкости, пузырьки или твердые частицы.

Другое преимущество ультразвуковых измерений состоит в том, что датчики легко монтируются на трубе (существуют даже переносные приборы), не требуют изменения ее конструкции, не влияют на характеристики потока (нет потерь давления в месте установки датчика). Точность измерений такая же, как и для датчиков других типов, — в пределах 0.5-1 % от измеряемой величины.

Магнитные датчики расхода работают на основе закона Фарадея, который утверждает, что в проводнике, движущемся в магнитном поле, возникает э.д.с, величина которой прямо пропорциональна индукции магнитного поля и скорости движения проводника; э.д.с. ориентирована в пространстве перпендикулярно направлению поля и движению проводника. При магнитном измерении расхода проводник образует движущимися

ионами электропроводящей жидкости; проводимость жидкости должна составлять, по крайней мере,  $0.1 \text{ мкСм/см}$ . Магнитное поле создается двумя обмотками, расположенными по разные стороны трубы, питающимися переменным или пульсирующим постоянным током. Э.д.с, индуцируемая в жидкости, измеряется двумя изолированными электродами; она пропорциональна расходу. Можно показать, что э.д.с. между противоположными точками трубы мало зависит от распределения скоростей по сечению трубы (профиля скорости). Поскольку принято, что сечение трубы постоянно, то выходное напряжение пропорционально расходу.

Следующий способ измерения расхода жидкости в трубе основан на эффекте фон Кармана. Если тело определенной формы помещено в поток жидкости, то в кильватерной струе возникает турбулентность, порождающая области с переменным давлением, которые можно обнаружить датчиками. Частота порождения вихрей прямо пропорциональна скорости жидкости. Из-за весьма сложной зависимости между расходом и скачками давления и влияния других факторов (например, температуры) вихревые расходомеры требуют специальных электронных устройств обработки, которые обычно монтируются вместе с датчиком.

За исключением магнитных методов измерения расхода все другие способы основаны на наблюдении каких-либо гидродинамических характеристик потока. Точность измерений для ламинарных потоков выше, чем для турбулентных. Для исключения влияния различных элементов гидравлического тракта (насосов, изгибов и соединений труб и т. д.) во всех случаях требуется, чтобы до и после датчика были сглаживающие прямолинейные участки трубопровода длиной, равной по крайней мере 10-кратному диаметру, — они не должны содержать каких-либо вносящих возмущения элементов (клапанов, сужений и т. п.). Такие участки трубопровода необходимы для придания потоку ламинарного характера и для гашения турбулентности.



### Измерение массового расхода

Во многих случаях вместо объемного расхода или скорости жидкости необходимо знать массовый расход. Если известна плотность несжимаемой жидкости, то массовый расход рассчитывается непосредственно по объемному с учетом, если необходимо, температуры, давления и вязкости. На практике, однако, плотность часто неизвестна.

Многие попытки определить массовый расход на основе измерения сил и ускорении потерпели неудачу. Один принцип, однако, получил промышленное применение - это измерение массового расхода на основе гиростатического метода и влияния ускорения силы Кориолиса.

Во вращающейся системе на массу, движущуюся вдоль радиуса, действует сила, называемая силой Кориолиса. Направление этой силы перпендикулярно оси вращения и направлению движения массы, а ее величина пропорциональна скорости вращения и радиальной скорости массы. Массовые расходомеры, основанные на измерении силы Кориолиса, дают хорошие результаты, не требуя компенсации давления и температуры.

В прямолинейном участке трубопровода с помощью электромагнита возбуждаются колебания, резонансные собственной частоте трубы или частоте какой-либо ее гармоники. На входе и выходе трубопровода симметрично по отношению к электромагниту размещены приемники для определения фазы колебаний трубы. Когда трубопровод пуст, фазы колебаний совпадают. На любой элемент жидкости, текущей по трубе, будет действовать боковое ускорение. Из-за инерции этого элемента колебания на входе будут затухать. По мере прохождения элемента жидкости по трубе, он передает ей накопленную энергию, и ее колебания на выходном конце усиливаются. Фазы сигналов, измеренных на входе и выходе участка трубопровода, будут различаться; разность фаз прямо пропорциональна массовому расходу. Датчики расхода, построенные в соответствии с принципом Кориолиса, очень мало влияют на потери давления в трубопроводах.

Расходомер Кориолиса можно также использовать для измерения плотности жидкости. Для этого определяется собственная частота колебаний заполненного участка трубопровода, которая обратно пропорциональна плотности жидкости.

Расходомеры Кориолиса — непростые устройства и требуют сложных согласующих и обрабатывающих схем. Одно и то же устройство может применяться для измерения и расхода, и плотности. Кроме того, массовые расходомеры Кориолиса не требуют сглаживающих участков труб и обладают высокой точностью (0.5 % от измеряемой величины). Однако эти расходомеры чувствительны к вибрациям и имеют ограничения по способам их установки. Кроме того, они довольно дороги.

#### **11.2.6. Химические и биохимические измерения**

В химических и биохимических процессах очень важно измерять ряд физических характеристик. Некоторые из них можно постоянно измерять в оперативном режиме, в частности:

- концентрацию;
- проводимость;
- содержание солей;
- окислительно-восстановительный;
- величину pH;
- уровень растворенного кислорода;
- плотность взвешенных частиц.

Для всех указанных типов измерений в большинстве случаев существуют серийные промышленные датчики с приемлемыми характеристиками. Как уже указывалось, точность и погрешность измерений зависят не только от самих датчиков, но и от того, как они используются, т. е. от обслуживания, своевременных поверок и градуировок. Это особенно существенно в отношении химических и биохимических измерений.

Существует много типов датчиков для измерения концентрации органического углерода, соединений азота, фосфора и т. д. Многие из них основаны на своего рода лабораторном химическом анализе, который выполняется автоматически с помощью специального оборудования. Устройства этого типа обычно довольно сложны и, соответственно, довольно дороги. Они работают в автономном режиме, поскольку анализ может потребовать некоторого времени и специально отобранных образцов веществ результаты могут передаваться компьютеру по специальному информационному каналу. Регулярное обслуживание — важнейшая часть эксплуатации такого оборудования, и, тем не менее, его надежность нельзя считать полностью удовлетворительной.

## 12. СОГЛАСОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА СИГНАЛОВ

Передача информации между различными частями системы управления является одним из неотъемлемых и критически важных элементов. Сигналы, вырабатываемые датчиками, обычно имеют весьма низкий уровень, поэтому для дальнейшей передачи необходимо обработать и усилить. Уровни сигнала и сопротивлений выхода датчика, кабеля и входа компьютера должны соответствовать друг другу. Обработка сигнала для достижения указанного соответствия называется согласованием сигнала.

Другой очень важной практической проблемой являются наводки. Любое электронное устройство способствует возникновению электрических возмущений. Если две электрические цепи по тем или иным причинам расположены рядом друг с другом, то изменение тока или напряжения в одной цепи вызывает также изменения тока и напряжения в другой. В частности, соединительные провода и кабели выступают в качестве антенны для шумов и возмущений. Многие проблемы, связанные с электрическими наводками, можно решить с помощью экранирования цепей и заземления; некоторые принципы экранирования рассмотрены в этом разделе. Выбор способа передачи сигнала (напряжение, ток или свет) зависит от нескольких факторов, главным из которых является устойчивость к наводкам и шумам. В этом разделе будут приведены различные методы решения этих проблем.

### 12.1. Согласование сигналов в цепях с операционными усилителями

В разделе 10.6 было показано, что для удовлетворительной передачи сигнала необходимо минимизировать влияние нагрузочных эффектов между компонентами системы. С одной стороны, уровень выходного сигнала датчика должен быть достаточно высок, с другой — входное сопротивление компьютера должен быть значительно больше по сравнению с выходным сопротивлением системы "датчик - измерительный преобразователь". Для

согласования уровней сигналов и величин сопротивлений между выходом датчика и входом компьютера устанавливаются усилители.

Фильтр согласования сопротивлений имеет высокое входное сопротивление и низкое выходное при коэффициенте усиления, равном единице. Последний каскад в схеме обычно стабилизирующий усилитель с большим коэффициентом усиления. Для согласования сопротивлений применяются операционные усилители в цепи с обратной связью.

**Операционный усилитель (ОУ)** представляет собой устройство, выполненное на интегральных схемах, с очень большим коэффициентом усиления по напряжению (порядка  $10^6$ - $10^{12}$ ), высоким входным сопротивлением (несколько МОм) и низким выходным сопротивлением (как правило, менее 100 Ом). Выходной ток обычно ограничен величиной 10мА при напряжении  $\pm 10$  В. Операционный усилитель является распространенным составным элементом в аналоговых цепях, поскольку его рабочие характеристики могут изменяться в широких пределах с помощью небольшого набора дешевых электронных компонентов. Существуют сотни различных типов операционных усилителей. Схематическое изображение операционного усилителя показано на рис. 12.1.

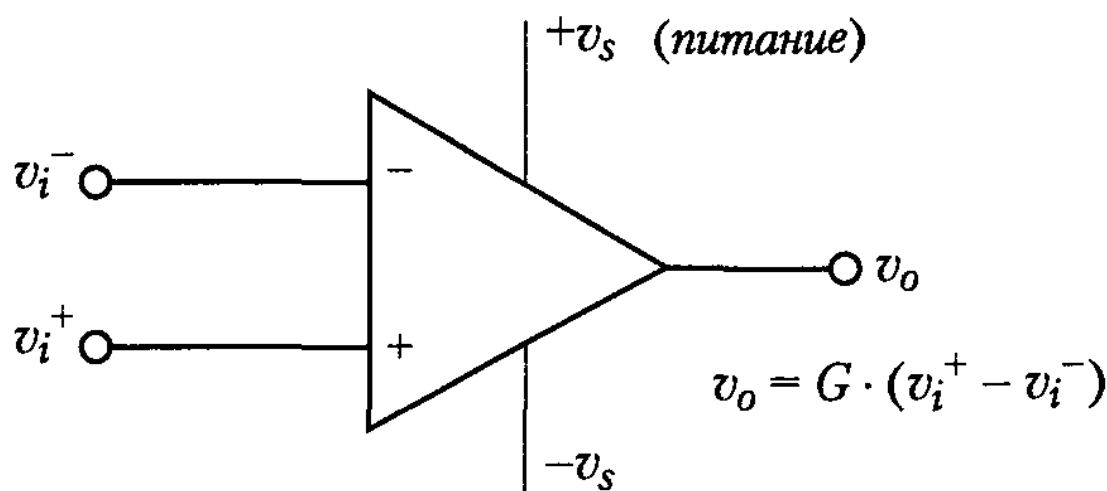


Рисунок 12.1. Схематическое изображение операционного усилителя

Выходное напряжение  $v_o$  пропорционально разности двух входных напряжений

$$v_o = G \cdot (v_i^+ - v_i^-)$$

где  $G$  — коэффициент усиления. Даже небольшая разность входных напряжений вызывает существенное изменение выходного напряжения. В таком виде операционный усилитель является простейшей формой компаратора, поскольку даже очень малая разность входных напряжений выводит усилитель в режим положительного или отрицательного насыщения.

Так как коэффициент усиления очень большой, но непредсказуемый, операционный усилитель никогда не используется без какой-либо отрицательной обратной связи. На низких частотах (ниже 20 кГц) большинство схем обратной связи можно выполнить из различных пассивных элементов — резисторов и конденсаторов. Инвертирующий усилитель, или инвертор (рис. 12.2,а), имеет простейшую структуру цепи обратной связи. Коэффициент усиления по напряжению - отношение выходного напряжения к входному

$$\frac{v_o}{v_i} = - \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{\beta \cdot G}}$$

где

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Величина  $G$  падает с возрастанием частоты сигнала, но, поскольку  $\beta \cdot G \gg 1$ , коэффициент усиления по напряжению зависит только от величины сопротивлений в цепи обратной связи. Для идеального операционного усилителя коэффициент усиления выражается как отношение сопротивления обратной связи к входному сопротивлению.

Цепь обратной связи, изображенная на рис. 12.2,б, называется **повторителем напряжения** или **преобразователем сопротивления**. Коэффициент усиления повторителя напряжения приблизительно равен 1. Если повторитель напряжения присоединен последовательно к измерительному преобразователю, имеющему высокий выходной импеданс, то новая система будет иметь те же характеристики, что и исходная, но выходной импеданс будет низким. В некоторых случаях сигнал необходимо усилить до того, как он будет подвергнут дальнейшей обработке.

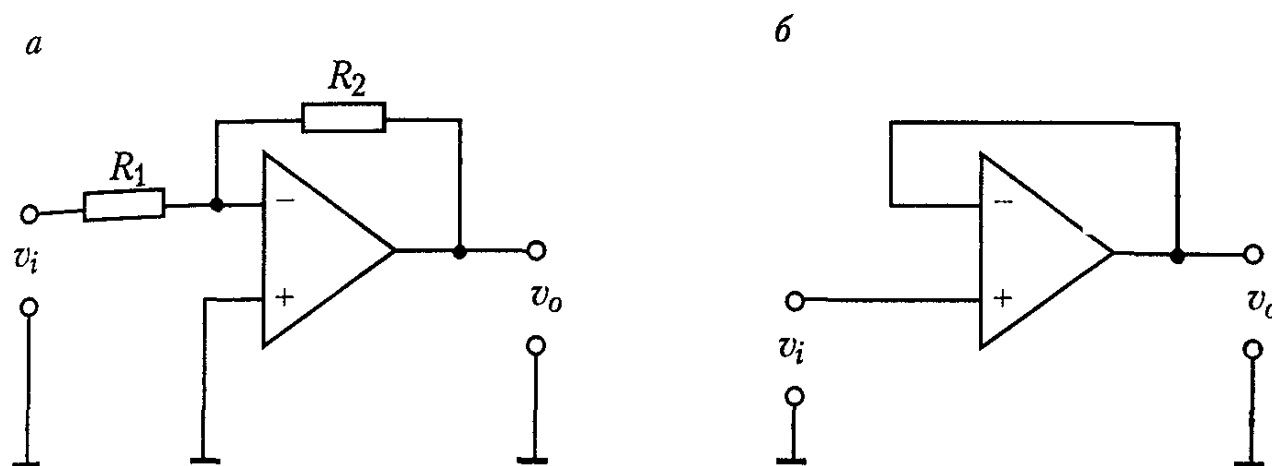


Рисунок 12.2 Схемы усилителя в режиме инвертора (а) и повторителя (б)

Другая важная схема с операционным усилителем — **дифференциальный** усилитель (рис. 12.3). Как видно из названия, усилитель оперирует разностью между входными сигналами. Выражение для выходного напряжения имеет вид

$$v_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot (v_{i2} - v_{i1})$$

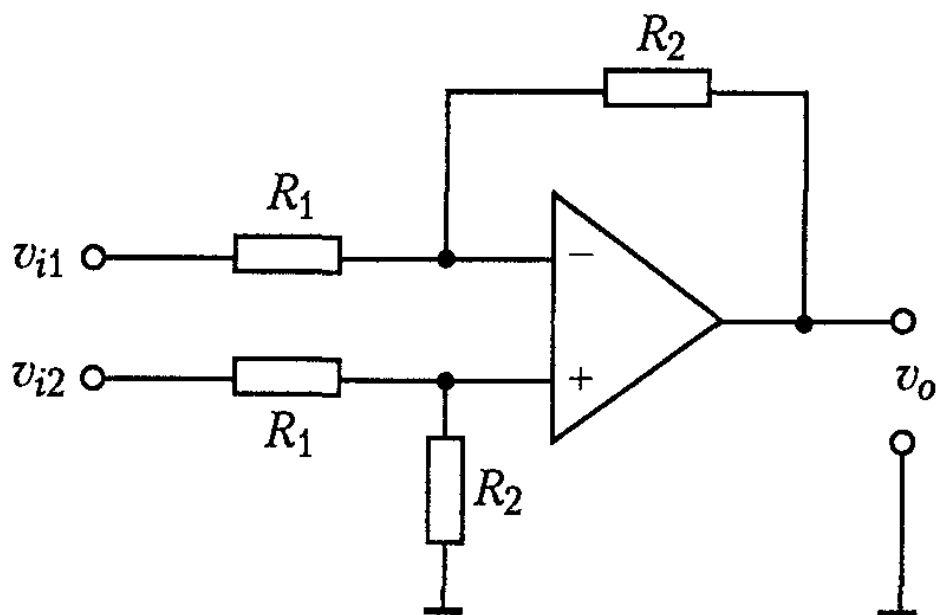


Рисунок 12.3. Дифференциальный усилитель

Рассмотренные выше схемы с операционным усилителем представляют собой основные элементы, на базе которых создаются схемы согласования сигналов. Дополнительные функциональные возможности, например выделение или подавление специфических частот, легко достигаются изменением структуры соединения пассивных элементов между выходом и входом усилителя.

## 12.2. Электрические проводники

Электрические проводники являются средой, по которой электрические сигналы распространяются в пространстве. Передаваемый по проводнику сигнал по мере удаления от источника подвергается изменениям, определяемым физическими характеристиками линии передачи. Поэтому проводники должны рассматриваться и анализироваться как отдельный элемент системы "датчик - согласующие цепи - управляющий компьютер". Передача постоянного тока — простая задача в тех случаях, когда сопротивление проводника мало по сравнению с сопротивлением приемника на конце линии. Передача импульсов или других быстро меняющихся сигналов порождает, как правило, некоторые проблемы. Если длина линии



такова, что время распространения сигнала между концами линии соизмеримо с величиной периода сигнала или временем нарастания, возникают побочные эффекты (скорость распространения электрического сигнала по линии примерно равна скорости света  $300 \cdot 10^6 \text{ км/с} = 300 \text{ м/мкс}$ ). Одним из таких эффектов является отражение сигналов (рис. 12.4).

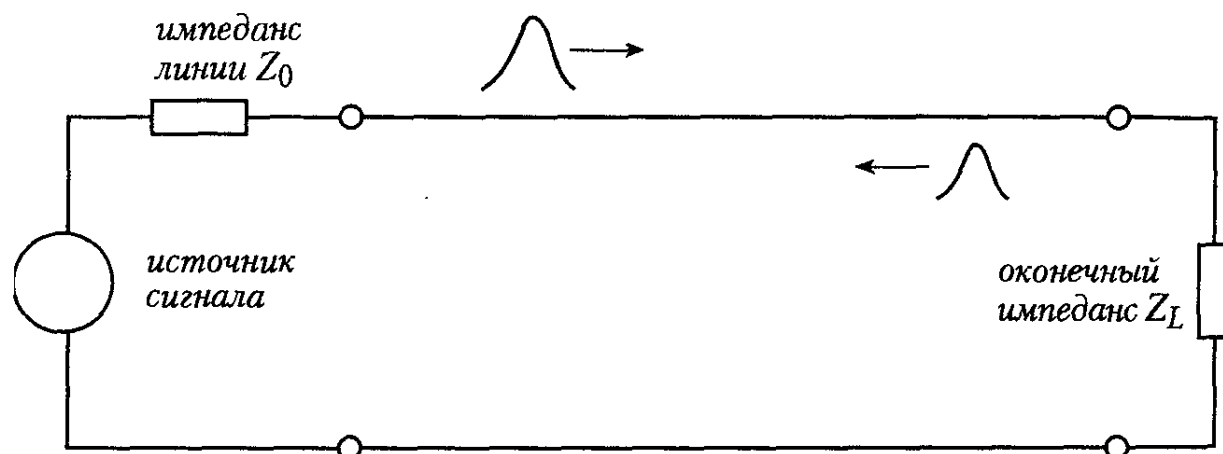


Рисунок 12.4. Отражение сигнала при неправильном согласовании сопротивлений между линией передачи и окончательным элементом

Линию передачи можно представить в виде двух параллельных проводов, имеющих распределенные по длине индуктивность  $L$  и емкость  $C$  ( $L$  и  $C$  — удельные значения на единицу длины). На высоких частотах общая нагрузка, создаваемая распределенными емкостями, становится больше резистивной. Входной сигнал в произвольной точке линии будет распространяться в обоих направлениях со скоростью

$$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

Сигнал, распространяющийся вдоль линии, имеющей на конце сопротивление  $Z_L$ , частично отражен с коэффициентом отражения  $\rho$ , определяемым формулой

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

где

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

называется характеристическим сопротивлением линии. Следовательно, в идеальном случае, чтобы избежать отражения, сопротивление нагрузки должно равняться характеристическому сопротивлению  $Z_L = Z_0$ .

### **Пример. Передача импульсного сигнала**

Для импульсного сигнала, передаваемого по линии, связь между напряжением и током в момент импульса есть  $U = Z_0 \cdot I$ . Если линия разомкнута на приемном конце ( $Z_L = \infty$ ), то ток не может свободно циркулировать, т. е. он полностью отражается линией. Напряжение так же, как и ток, полностью отражается, поскольку оно равно  $U = Z_0 \cdot I$ . Другой крайний случай — это короткое замыкание на приемном конце ( $Z_L = 0$ ). Напряжение на конце линии все время равно нулю. Приходящий импульс напряжения должен быть компенсирован точно таким же импульсом противоположного знака. Другими словами, импульс напряжения полностью отражается, но с обратным знаком.

Аналогичные условия также соблюдаются и для источника сигнала. Если сопротивление источника не равно  $Z_0$ , то пришедший импульс отражается вновь. Импульсы, посылаемые по линии с несогласованными конечными сопротивлениями, будут перемещаться туда и обратно с затухающей амплитудой. В цифровых сетях, в которых обычно передаются длинные последовательности импульсов, в случае несогласованности сопротивлений сигналы будут отражаться, и налагаться друг на друга, и приемник не сможет их правильно интерпретировать. Согласование сопротивлений на концах линии выполняется с помощью специальных оконечных резисторов, которые называются концевыми или терминирующими схемами («терминаторами»).

### Пример. Соединение двух кабелей

При соединении двух кабелей с разными характеристическими сопротивлениями требуется их тщательное согласование. Например, если пятидесятиомный кабель присоединяется к кабелю с сопротивлением 300 Ом, между ними должна быть включена специальная резистивная схема, выполненная таким образом, чтобы трехсотомная линия вместе с резисторами "наблюдалась" со стороны пятидесятиомной линии как нагрузка с сопротивлением в 50 Ом. То же самое условие должно соблюдаться и в обратном направлении, т. е. пятидесятиомная линия должна "ощущаться" другой линией как нагрузка в 300 Ом (рис. 12.5).

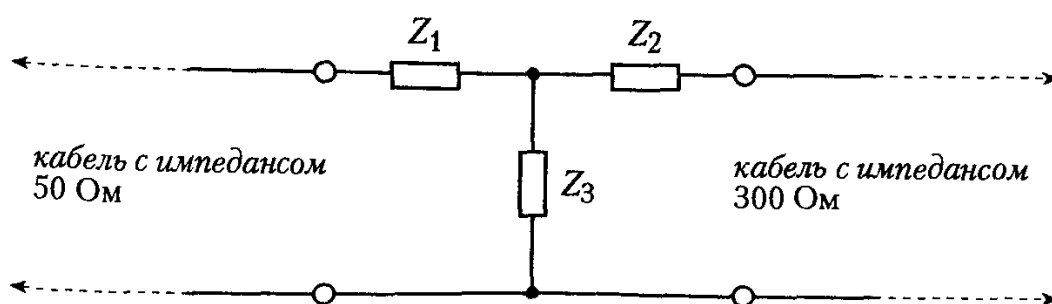


Рисунок 12.5 Согласование сопротивлений при соединении двух кабелей

В приведенном примере должны быть выбраны величины  $Z_1 = 0$  Ом,  $Z_2 = 274$  Ом и  $Z_3 = 55$  Ом. Сопротивления  $Z_1$ ,  $Z_2$  и  $Z_3$  образуют схему, которая не только согласует сопротивления кабелей, но и уменьшает затухание сигнала.

Если по обоим проводам двухпроводной линии текут токи, имеющие одинаковы амплитуды, но развернутые на  $180^\circ$  по фазе, говорят, что линия сбалансирована (*balanced*). В несбалансированной (*unbalanced*) цепи ток течет только по одному проводу, а другой является "относительной землей" — проводом с относительным нулевым потенциалом (последнее не исключает того, что по этой линии также протекает ток).

В качестве соединительных кабелей используются в основном два типа электрических проводников — витая пара и коаксиальный кабель. Как показывает название, **витая пара** (*twisted pair*) состоит из двух изолированных медных проводов, свитых вместе. Витая пара является дешевой и простой средой передачи. Широкое распространение витой пары и коаксиального кабеля в телефонных и телевизионных сетях привело к тому, что эти кабели и их вспомогательные элементы — разъемы и штекеры — имеют достаточно низкую цену.

Электрическая цепь на основе витой пары может быть сбалансированной и несбалансированной. Преимущество сбалансированной цепи в том, что она менее чувствительна к внешним возмущениям; наоборот, эта цепь излучает меньшую энергию, поскольку электромагнитные поля отдельных проводников компенсируют друг друга, так как имеют одинаковую интенсивность, но противоположную полярность. С другой стороны, сбалансированная линия является таковой только тогда, когда она правильно смонтирована и обслуживается. Несбалансированная витая пара значительно более чувствительна к возмущениям, чем сбалансированная, но не требует почти никаких усилий для установки и эксплуатации. Четыре парный кабель еще менее чувствителен к помехам индуктивного характера.

**Коаксиальные кабели** (*coax cable*) содержат электрический проводник, изолированный пластиковой оболочкой, которая окружена проводящим плетеным экраном. Благодаря такой геометрии коаксиальный кабель существенно несбалансирован. Экран заземлен и предотвращает рассеивание энергии с центрального проводника, которое на высоких частотах является весьма заметным возмущающим фактором. И наоборот, экран предохраняет центральный проводник от влияния внешних возмущений. Коаксиальные кабели различаются по величине их распределенного сопротивления; обычные значения - 50 Ом (кабель RG-58) и 75 Ом (кабель RG-59). Значение коаксиального кабеля обусловлено его широким применением в высокочастотной технике и технике связи.

### 12.3. Электрические помехи

Помехи, возникающие в электрическом проводнике, могут иметь различную природу. Обычно помехи вызваны одним из следующих типов связи между их источником и проводником:

- резистивной;
- емкостной;
- индуктивной.

Резистивная (или гальваническая) связь между проводником и источником помех не зависит от частоты возмущающего сигнала. Напротив, при емкостной или индуктивной связи степень влияния зависит от частоты помех — чем выше частота, тем больше энергии получается от источника возмущений. На практике это означает, что электрические цепи, в которых происходят быстрые изменения тока и/или напряжения могут быть более серьезными источниками помех, чем низкочастотные. Вообще говоря, взаимодействие с источником возмущений редко относится к одному типу, обычно — это комбинация всех трех вышеперечисленных типов. Серьезные проблемы с помехами возникают, когда проводники с маломощными сигналами расположены вблизи силовых кабелей. Каждый провод в соединительных цепях датчика с обрабатывающим электронным устройством является потенциальным приемником электрических помех.

Чтобы создать для электронного оборудования среду, максимально свободную от наводок, постоянно проводится множество исследований и разработок. Целью является достижение **электромагнитной совместимости** (*electromagnetic compatibility* — EMC) в рамках электрических цепей, а также между различными цепями и системами. Электрический прибор должен, с одной стороны, быть нечувствительным к внешним помехам и, с другой стороны, не должен генерировать помех, которые могут оказать влияние на другую аппаратуру.

### Резистивная связь

Когда несколько электронных устройств одновременно имеют общий источник питания и общее заземление, могут возникать взаимодействия резистивного характера. Довольно часто встречающиеся источники помех — плохо заземленные электродвигатели и преобразователи частоты с полупроводниковыми вентилями. Один из способов избежать такого типа взаимодействия — обеспечить для чувствительного электронного оборудования выделенный источник питания. Другая возможность — гальваническая развязка источников питания и аппаратуры. В этом случае прямая электрическая связь между различными источниками питания и электрооборудованием отсутствует.

### Пример. Переключаемый конденсатор

**Переключаемый конденсатор** (*flying capacitor*) — это пример гальванической развязки (рис. 12.6). Конденсатор присоединен к источнику напряжения через два переключателя, т. е. он имеет тот же потенциал, что и источник напряжения. Подача напряжения на выход обеспечивается с помощью переключателей. Таким образом, источник напряжения никогда не соединяется непосредственно с последующей цепью, например входом компьютера. Конденсатор переключает входное напряжение на выходную цепь.

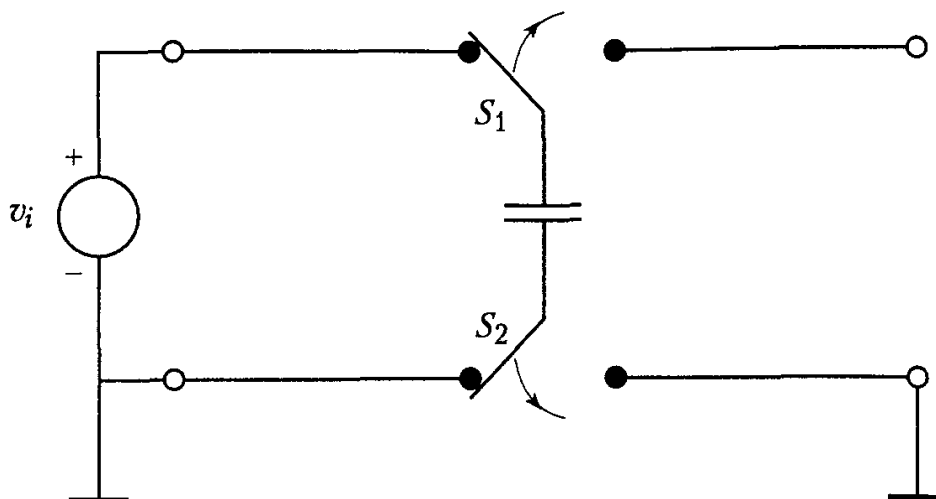


Рисунок 12.6 Развязка цепей с помощью переключаемого конденсатора

### Емкостная связь

Между двумя проводниками или между проводником и источником помех почти всегда существует емкостная связь, которая возникает из-за того, что переменное напряжение наводит в проводнике ток  $i$ , пропорциональный производной напряжения по времени

$$i = C \cdot \frac{dv}{dt}$$

где  $C$  — величина емкости.

Емкостные связи должны быть сведены до минимума. Они уменьшаются с увеличением расстояния между проводниками.

Распространенный способ борьбы с этим явлением — защитный электростатический экран. Экран должен быть заземлен, чтобы его потенциал равнялся нулю. Такая мера обеспечивает хорошую защиту, хотя на концах кабеля, где проводник присоединен к датчику или к электронным схемам, например к входному порту компьютера могут возникнуть некоторые проблемы. Причина в том, что в этих местах экран полностью закрывает и защищает проводник. На небольших, незащищенных оконечных участках могут возникнуть слабые емкостные связи, поэтому важно делать такие участки как можно короче.

### Индуктивная (магнитная) связь

Проводник с током индуцирует вокруг себя магнитное поле с напряженностью, пропорциональной величине тока. Соответственно, магнитное взаимодействие создает серьезные проблемы вблизи силовых кабелей, по которым текут значительные токи. Переменный ток возбуждает переменное магнитное поле, которое в свою очередь наводит э.д.с. индукции в другом проводнике, пересекающем поле. По закону индукции при заданной величине взаимной индукции  $M$  между проводниками напряжение  $U$ , индуцируемое в проводнике, есть

$$U = \frac{d(M \cdot i)}{dt}$$

где  $i$  – ток другого проводника.

Если проводник, в котором наводится э.д.с, представляет собой часть замкнутого контура, то в нем будет циркулировать ток. Этот индуктивный ток пропорционален площади, охватываемой проводниками, через которую проходит магнитный поток.

Существует несколько способов уменьшить влияние индуктивных связей. Площадь контура, сцепленного с магнитным потоком, можно уменьшить, используя витые провода; уменьшение этой площади означает снижение индуцируемого напряжения. Более того, при скрутке "изменяется знак" потокосцепления на каждой витке, так что результирующее потокосцепление становится незначительным. Собственно поэтому применяется кабель на основе витой пары, а не просто состоящий из параллельных проводников.

Проводник, по которому передается измерительная информация, должен быть расположен как можно дальше от источников помех. В частности, чувствительные электронные приборы не должны размещаться вблизи трансформаторов и индукторов. Кабели должны располагаться таким образом, чтобы возможные поля помех распространялись вдоль них. Необходимо следовать двум простым правилам: во-первых, низковольтные сигнальные кабели и высоковольтные силовые кабели не должны прокладываться вблизи друг друга в одних и тех же каналах и, во-вторых, сигнальные и силовые кабели должны пересекаться, если это неизбежно, только под прямым углом.

Магнитное поле можно ослабить экранированием. Медный или алюминиевый экран имеет очень высокую проводимость, и, благодаря возбуждению магнитным полем вихревых токов в экране, магнитный поток ослабляется. Экран можно выполнить из материала с высокой магнитной проницаемостью, например из железа. Магнитный экран часто бывает довольно объемным, поскольку для демпфирования потока требуется



достаточная толщина стенок. Поэтому экранирование используется в основном для аппаратуры, генерирующей сильные магнитные поля.

#### 12.4. Сигнальное заземление

**Заземление** (*earthing, grounding*) представляет собой физическое присоединение нескольких цепей к общему потенциалу. Сигнальное заземление соответствует созданию точки общего нулевого потенциала для измерительных сигналов. Теоретически все точки, которые должны быть заземлены, присоединяются к этому нулевому потенциалу без каких-либо сопротивлений или индуктивностей. К сожалению, на практике это невыполнимо. Проблемы, связанные с низким качеством заземления являются наиболее распространенными, и именно их труднее всего обнаружить. Это справедливо и для небольшой электронной схемы, и для большого предприятия.

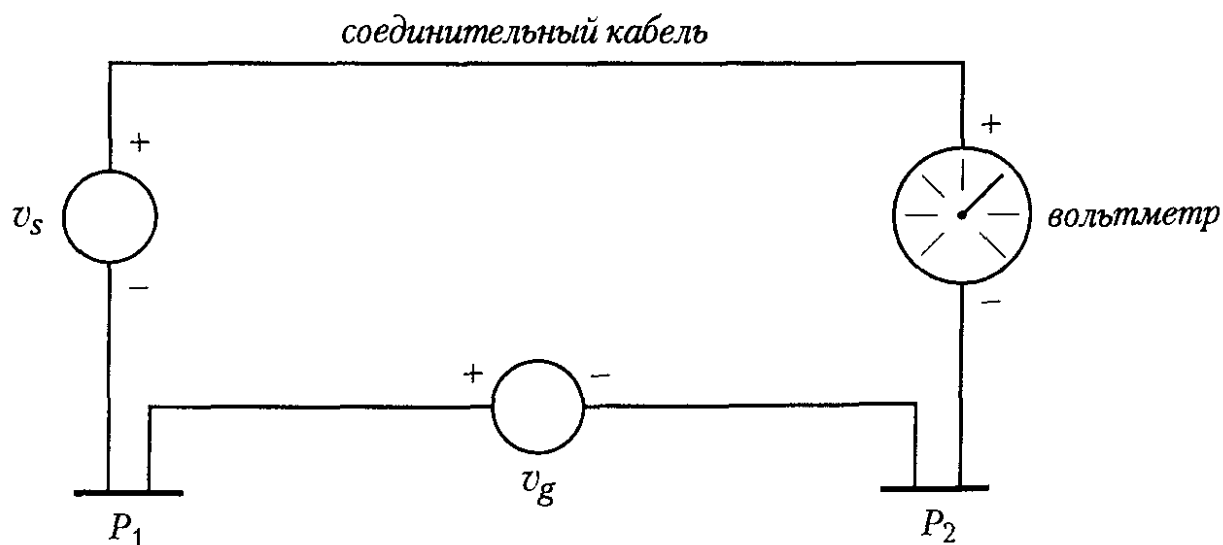


Рисунок 12.7 Простая измерительная система с двумя заземлениями

На рис. 12.7 представлена простая измерительная система с источником напряжения  $u_s$ , присоединенным к заземлению  $P_1$  и собственно измерительные устройства, присоединенные к заземлению  $P_2$ . Два отдельных заземления редко имеют одинаковый потенциал, поэтому между ними существует ток утечки. Вольтметр покажет не правильное значение

напряжения  $u_s$ , а искаженную величину  $u_s + u_g$ . В больших и сложных системах часто имеются отдельные заземления для датчиков, кабелей, компьютерного оборудования, силовых элементов и шасси аппаратуры. Все эти отдельные системы заземления должны быть присоединены к общей точке заземления, как это показано на рис. 12.8.

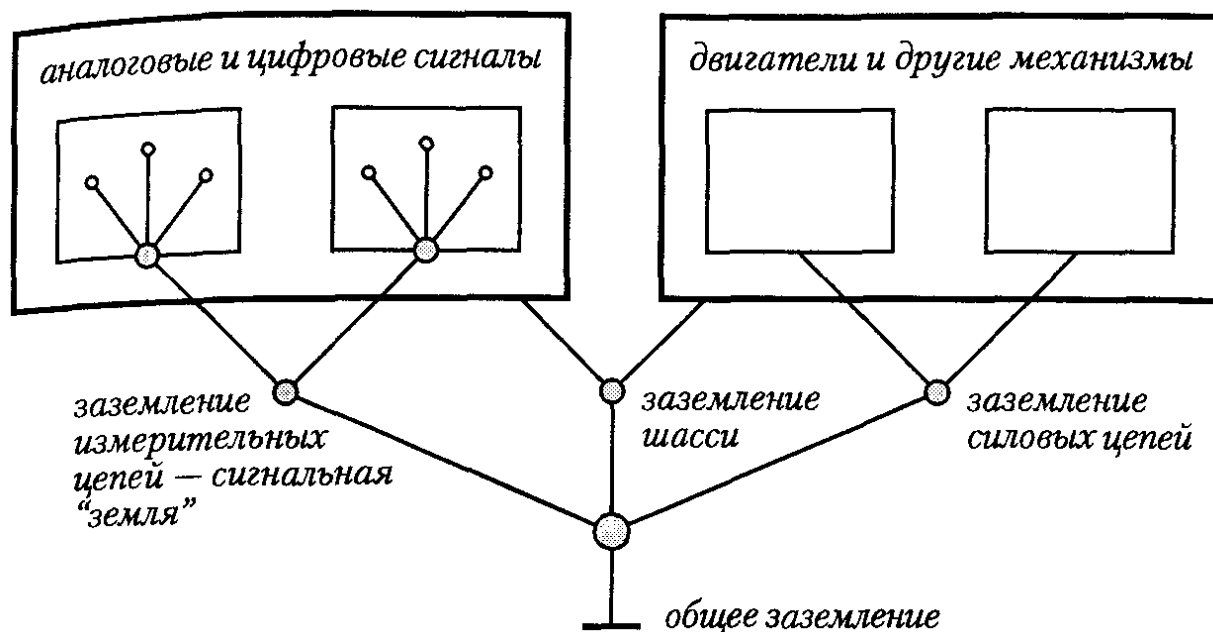


Рисунок 12.8. Общее заземление для различных компонентов системы

Практическое правило для кабелей, по которым передаются аналоговые сигналы, - заземление должно быть как можно ближе к источнику сигнала, т. е. датчику. Конечно, это может создать трудности в крупных технических системах с большим количеством длинных кабелей. Желательно изолированное заземление компьютерного оборудования, поскольку цифровые системы как излучают, так и легко воспринимают высокочастотные сигналы. Более старые аналоговые системы сбора данных по большей части подвержены влиянию низкочастотных наводок.

Раздельное заземление рекомендуется производить для релейных схем, двигателей и других устройств, которые потребляют большие токи. Наконец,

шасси аппаратуры должны быть присоединены к отдельному заземлению, а это последнее — к общему заземлителю.

Экраны сигнальных кабелей обычно также заземляют. Чтобы избежать замкнутых контуров в схемах заземления, экраны соединяют с "землей" только в одной точке - или вблизи от источника сигнала (датчика), или вблизи последующих электронных устройств. Первый вариант дает лучшее ослабление помех (рис. 12.9).

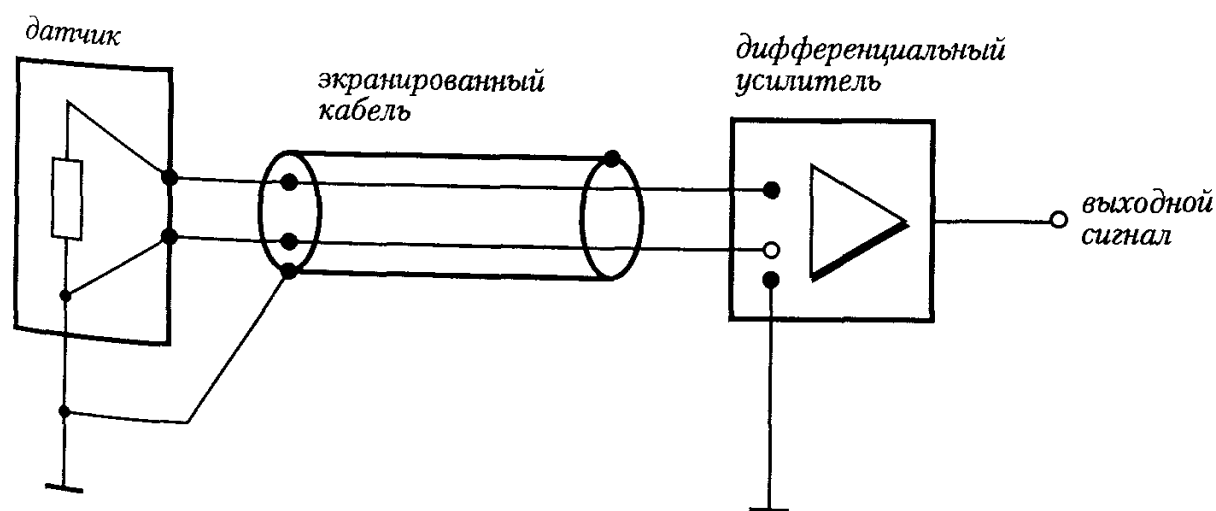


Рисунок 12.9.Заземление экранирующей оболочки выполнено вблизи датчика

Проблемы, связанные с заземлением в контрольно-измерительных системах можно обобщить в следующих правилах.

- Необходимо четко определить пути протекания тока. Токи, текущие от силового оборудования, должны возвращаться к тем же устройствам. Проводники, присоединенные к электрическим элементам, могут называться землей, но в действительности функционировать как замкнутый контур и вызывать искажение напряжения или пиковые возмущения из-за импеданса кабелей. Следует применять провода соответствующего сечения, как для силовых цепей, так и для цепей заземления.

- Цифровые и аналоговые цепи должны заземляться отдельно. Когда цифровая система изменяет свое логическое состояние, на "цифровом заземлении" могут появляться значительные всплески напряжения.

Поскольку аналоговые цепи обычно очень чувствительны к возмущениям, то раздельное заземление снижает влияние резистивной связи.

### **12.5. Выбор носителя сигнала: напряжение или ток**

Выбор носителя сигнала для передачи измерительных данных от датчика к компьютеру зависит от нескольких факторов. Наиболее существенное соображение, которое следует принимать во внимание, — сигнал должен быть по возможности малочувствительным к электрическим возмущениям.

#### *Передача сигнала напряжением*

Каждый кабель обладает определенным погонным сопротивлением. Если входное сопротивление последнего элемента в цепи — устройства обработки сигнала — не бесконечность, то по кабелю будет протекать ток и в результате произойдет падение напряжения. Если изменяется амплитуда сигнала, то некоторый ток потечет между проводами из-за распределенных емкостей. Следовательно, разумно всегда считаться с некоторым падением напряжения в линии передачи. Требование, чтобы устройства обработки имели высокое входное сопротивление, приводит к тому, что они очень чувствительны к помехам. Следовательно, напряжение не слишком пригодно для передачи данных в случаях, когда могут быть заметные помехи.

Одним из способов передачи сигнала напряжением является организация трехпроводной системы (рис. 12.10).

По одному проводу течет постоянный ток для питания датчика, по другому поступают сигналы от датчика к согласующим и обрабатывающим устройствам, а третий провод является общим для обоих контуров. Преимущество этого решения в том, что изменения сопротивления сигнального провода, например из-за колебаний температуры, не сказываются на сигнале: по этому проводу не протекает ток и, следовательно,

на нем нет падения напряжения. Чувствительность к внешним помехам остается, однако, неизменной.

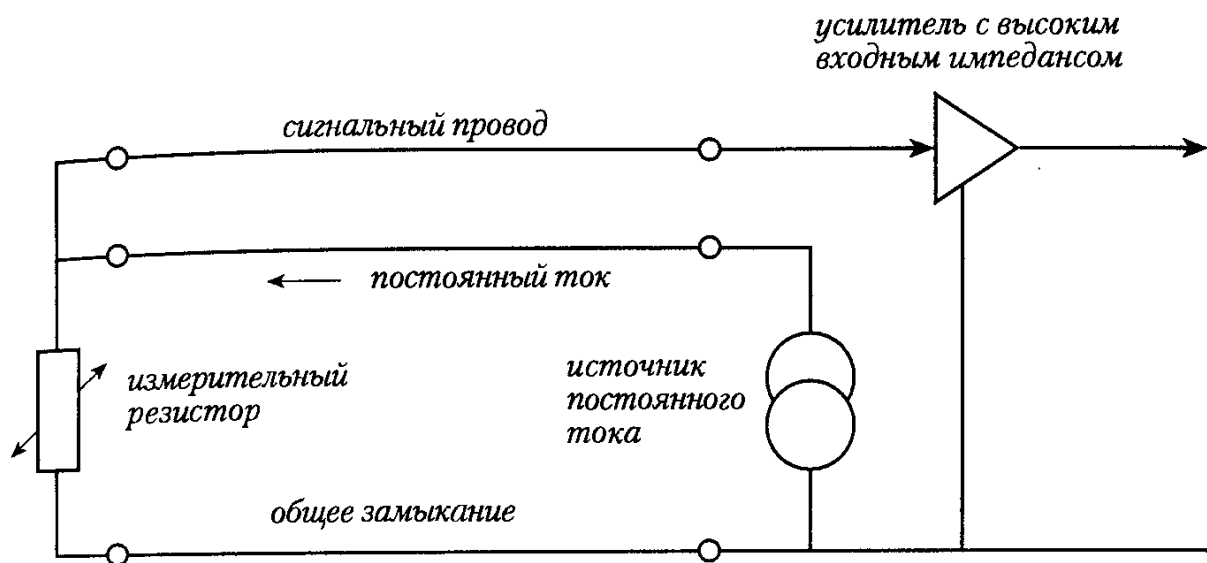


Рисунок 12.10 Подключение датчика в трехпроводной цепи

Главная причина популярности напряжения для передачи сигналов — это с одной стороны, присущая этому методу простота, а с другой — широкая доступность устройств для усиления, фильтрации и других видов обработки. Например, необходимо, чтобы один и тот же сигнал поступил на вход нескольких схем, достаточно соединить эти схемы параллельно (с учетом входного сопротивления). Несмотря на это, напряжение не очень часто используется в промышленных системах, поскольку сигналы в них должны передаваться на большие расстояния и влияние источников помех может стать значительным.

### Передача сигнала током

Для передачи сигнала на значительное расстояние лучше использовать не напряжение, а ток, потому что он остается постоянным по длине кабеля, а напряжение падает из-за сопротивления кабеля. На конце кабеля токовый сигнал можно преобразовать в напряжение с помощью высокоточного шунтирующего резистора (рис. 12.11).

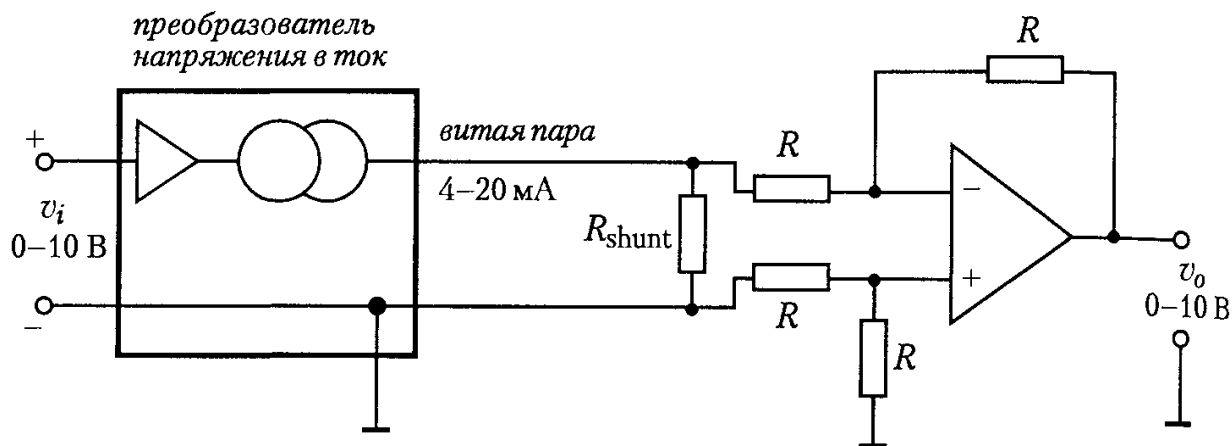


Рисунок 12.11. Передача аналогового сигнала по токовой петле

При передаче токовых сигналов выходное напряжение датчика преобразуется операционным усилителем в ток. Приемник - операционный усилитель на цепи в идеале должен иметь нулевое входное сопротивление. В действительности, сопротивление определяется шунтом и обычно имеет порядок нескольких сотен Ом. Для тока 20 мА при сопротивлении шунта 250 Ом падение напряжения будет составлять 5 В. Если источник сигнала, т. е. преобразователь напряжения в ток, имеет высокое выходное сопротивление, любая помеха при передаче приведет к небольшому, обычно допустимому падению напряжения на шунте.

Токовые сигналы, как правило, используются на низких частотах до 10 Гц. При постоянном токе и идеальной изоляции сопротивление кабеля не влияет на сигнал, т.е. величина тока на входе приемника — обрабатывающей схемы — такая же, как на выходе источника сигнала. При переменном токе влияние емкостного эффекта становится заметным, и часть тока будет теряться по длине кабеля, уходя либо в обратный провод, либо в заземленный экран. Международный стандарт IEC 381 рекомендует для передачи сигналов диапазон токов 4-20 мА. Минимальный уровень сигнала определен как 4 мА, чтобы можно было обнаружить разрыв цепи (0 мА).

Питание и датчика, и преобразователя и передача выходного сигнала могут осуществляться по одной и той же паре проводов. Это можно сделать

при условии, что ток, потребляемый датчиком и преобразователем, не меняется, тогда любое изменение тока в цепи, очевидно, отражает работу датчика. Напротив, как было сказано ранее, передача сигнала напряжением требует трех кабелей.

Подводя итоги, можно сказать, что измерительная система, использующая ток для передачи сигнала и датчик, гальванически изолированный от выходного сигнала, имеет несколько преимуществ:

- удовлетворительно работает на протяженных коммуникациях;
- допускает простую процедуру проверки, поскольку величина тока 0 мА означает, что датчик отключен или линия разомкнута;
- обеспечивает хорошую защиту от помех;
- для системы достаточно только два провода, что позволяет снизить затраты.

## **12.6. Передача оптических сигналов**

Передача сигналов по оптоволоконному кабелю стала обычной практикой во многих измерительных и коммуникационных приложениях. Оптическая передача информации требует весьма сложного и, соответственно, дорогостоящего цифрового коммуникационного оборудования. С помощью **светодиодов (LED)** цифровые электрические сигналы преобразуются в световые импульсы, которые затем передаются по оптическому волокну. На приемном конце световые импульсы снова преобразуются в электрические сигналы с помощью оптоэлектронных датчиков

Оптический сигнал невосприимчив к магнитным и электрическим помехам и обеспечивает абсолютную изоляцию. Этот способ передачи предпочтителен для больших расстояний (>1 км), а также в сложных условиях, например, вблизи электродвигателей и преобразователей частоты. Применение оптических сигналов в технических системах обусловлено в большей степени их помехоустойчивостью, чем высокой пропускной способностью.

## 13. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА (МЕХАНИЗМЫ)

### 13.1. Бинарные (двухпозиционные) исполнительные механизмы

Очень часто для управления достаточно исполнительных механизмов, имеющих только два рабочих состояния. Эти механизмы называются **двухпозиционными** или **бинарными**. Они похожи на электрический выключатель: включен — есть ток, выключен — тока нет. К двухпозиционным исполнительным механизмам, в частности, относятся магнитные клапаны, электромагнитные реле и электронные твердотельные выключатели. Для управления такими механизмами достаточно одного - двух бит, которые легко можно получить на выходе управляющего компьютера. Управляющий сигнал можно усиливать простым переключателем, а не сложным линейным усилителем.

Бинарные исполнительные механизмы бывают с одним (*monostable*) и двумя (*bistable*) устойчивыми состояниями. Исполнительный механизм с одним устойчивым состоянием, которому соответствует отключение питания, управляется только одним сигналом. Дистанционный контактор электродвигателя обычно является устройством такого типа. Пока на контактор приходит управляющий сигнал, двигатель получает питание, но как только сигнал пропадает, питание выключается.

Устройство с двумя устойчивыми состояниями сохраняет свое текущее состояние до тех пор, пока не получит новый управляющий сигнал, изменяющий его. Можно сказать, что исполнительный механизм "помнит" свое последнее положение. Например, чтобы привести в движение цилиндр, управляемый магнитным клапаном с двумя устойчивыми положениями, необходимы один сигнал для открытия и другой сигнал для закрытия. Исполнительные механизмы с двумя устойчивыми состояниями управляются импульсными, а не аналоговыми сигналами.



### 13.1.1. Управляемые выключатели

Уровень мощности выходного сигнала компьютера обычно очень мал: уровень напряжения "мощного" выходного сигнала лежит между +2 В и +5 В, а "маломощно" – менее 1 В. Максимальный ток зависит от присоединенной нагрузки, но, как правило, он менее 20 мА. Обычный выходной порт компьютера выдает мощность порядка 100 мВт. Это означает, что для управления большинством исполнительных механизмов сигнал компьютера нужно усилить. Для этого используются управляемые выключатели.

Наиболее распространенным электрически изолированным выключателем в системах управления всегда было электромеханическое реле. **Реле** - надежный выключатель, который может работать как на переменном, так и на постоянном токе. Ток, протекающий по обмотке реле, создает магнитное поле, перемещающее якорь из одного положения в другое. Таким образом, размыкаются и замыкаются электрические контакты, которые сами по себе могут пропускать токи, значительно большие, чем требуется для управления собственно реле. Типичный ток обмоток реле составляет около 0.5 А при напряжении 12 В, поэтому реле нельзя управлять непосредственно с выхода компьютера; требуется промежуточный выключатель средней мощности, например транзисторный усилитель, который устанавливается между выходом компьютера и реле. При проектировании систем с реле всегда необходимо помнить о проблемах энергоснабжения, поэтому при снятом питании реле должно принимать безопасное положение. Другими словами, отключение питания релейной системы не должно приводить к нежелательному поведению присоединенной нагрузки.

Существуют различные типы реле в широком диапазоне мощностей от милливольтовых поляризованных реле до киловаттных контакторов. Маломощные поляризованные реле для коммутаций сигналов небольшой мощности существуют в исполнении на платах расширения компьютера.

Реле для больших мощностей слишком велики для этого и устанавливаются отдельно, чаще всего в закрытых стойках. Дополнительным преимуществом реле является то, что их работа хорошо знакома монтажникам и обслуживающему персоналу.

Среди недостатков реле следует отметить их относительно низкое быстродействие — переключение требует порядка нескольких миллисекунд, вместо микросекунд для электронных устройств. У реле, так же как и у механических выключателей, бывает так называемое дребезжание контактов, которое может вызвать помехи, что в свою очередь влияет на измерительную аппаратуру и электронику компьютера.

**Твердотельные полупроводниковые приборы** применяются для переключений больших мощностей, поскольку лишены многих недостатков реле. Твердотельный выключатель имеет управляющий вход, присоединенный к устройству управления. Твердотельные силовые выключатели могут приводиться в действие непосредственно выходными сигналами цепей цифровой логики, поэтому их довольно просто использовать в компьютерном управлении.

Различные типы управляемых выключателей используются для коммутации малых и средних мощностей. Интегральные схемы с транзисторным выходом можно использовать до напряжений порядка 80 В и токов до 1.5 А; такие схемы управляются выходным сигналом компьютера. Когда уровень выходного сигнала компьютера превышает 2.4 В, ток, управляемый электронным выключателем, протекает через исполнительный механизм, а когда уровень сигнала ниже 0.4 В, транзистор заперт и ток не течет. В такой конфигурации транзистор работает как простой насыщающийся усилитель.

Для больших мощностей конструкция выключателя может основываться на **пороговых транзисторах** или полевых **МОП-транзисторах** (полевой транзистор со структурой металл-оксид-полупроводник). Такие цепи могут пропускать токи 5-10 А и выдерживать

разность потенциалов более 100 В. Из-за наличия внутреннего сопротивления при прохождении тока транзистор рассеивает некоторую энергию, потому, чтобы избежать перегрева, их нужно монтировать с учетом требований охлаждения.

При управлении большими мощностями (> 100 Вт) между выходом компьютера и электронным выключателем не должно быть прямых электрических связей, в противном случае выключатель является источником помех, которые могут повлиять на работу компьютера. Кроме того, при пробое выключателя высокое напряжение, предназначенное для питания привода, может повредить компьютер через прямую электрическую связь. Чтобы избежать указанных проблем, необходима гальваническая развязка, например схема с использованием оптической передачи сигнала управления, включающая светодиод и фототранзистор, расположенные вблизи друг друга и исключающие прямой электрический контакт.

Важный класс полупроводниковых выключателей — **тиристоры**. Типичными представителями этого класса являются симметричный триодный тиристор, или **симистор** (*TRIode AC semiconductor* — Triacs), и однооперационный триодный тиристор или однооперационный тринистор (*Silicon-Controlled Rectifier* — SCR). Другое название этих полупроводниковых приборов — управляемые твердотельные выпрямители.

После того как тиристор открывается управляющим импульсом, он будет оставаться включенным до тех пор, пока через него течет ток. Другими словами, в отличие от силового или полевого транзистора тиристор не выключается, когда исчезает управляющий сигнал. Тиристор не отключается, даже если приложенное напряжение падает до нуля. Отключение происходит только в том случае, если управляющее напряжение меняет знак — вынужденная коммутация. Тиристоры чаще всего используются для отключения переменных токов, потому что изменение полярности через одинаковые промежутки времени, по крайней мере, один раз за период,

позволяет закрыть тиристор при отсутствии управляющего импульса — естественная коммутация.

Тиристоры могут управлять значительно большими мощностями, чем силовые полевые транзисторы. В проводящем (открытом) состоянии внутреннее сопротивление тиристора практически равно нулю, соответственно, падение напряжения и выделение тепла минимальны, и ими можно пренебречь.

### 13.1.2. Отключение индуктивных нагрузок

Если отключать исполнительное устройство с индуктивностью — например, электродвигатель или обмотки соленоида — с помощью обычного выключателя, то могут возникнуть проблемы. Напряжение на индукторе исполнительного устройства равно

$$v = L \cdot \frac{di}{dt}$$

где  $L$  - индуктивность, а  $i$  — ток исполнительного устройства. Если ток отключается достаточно быстро, напряжение на индуктивности в процессе отключения может стать значительным (рис. 13.1).



Рисунок 13.1. Броски напряжения, возникающие в индуктивном исполнительном механизме при размыкании выключателя

Броски напряжения могут повредить выключатель, поэтому их необходимо гасить. Для этого можно использовать разрядный (шунтирующий) диод, подключенный параллельно нагрузке (рис. 13.2).

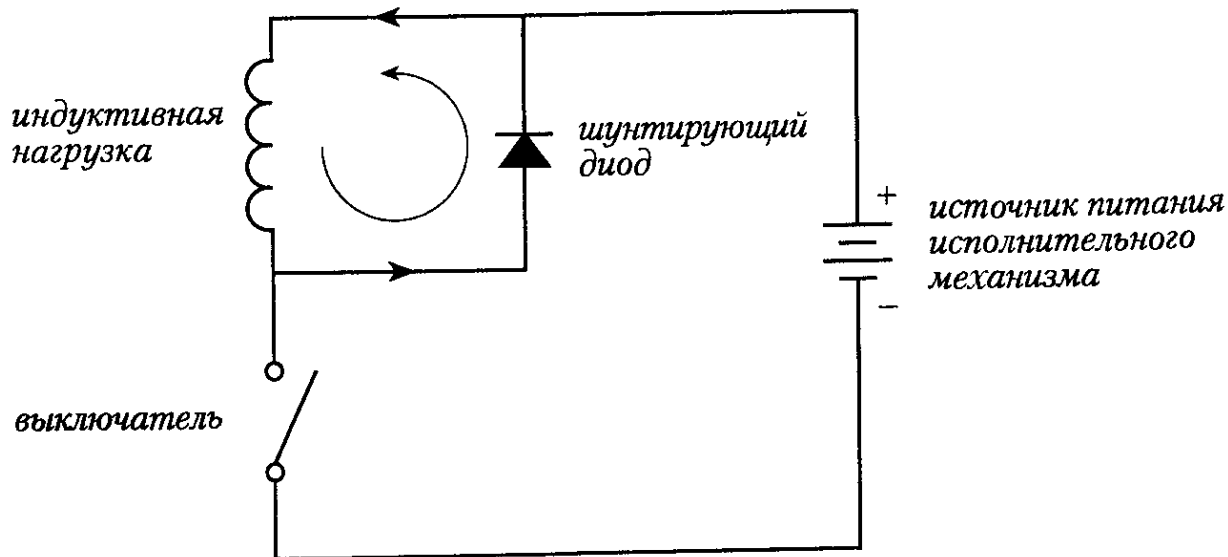


Рисунок 13.2. Применение шунтирующего диода для гашения бросков напряжения, возникающих при отключении индуктивных нагрузок

При размыкании выключателя ток индуктивности протекает через диод. Напряжение на исполнительном устройстве ограничено величиной менее 1 В, что соответствует падению напряжения на диоде. Выключатель должен выдерживать только номинальное напряжение, а не перенапряжения. Ток индуктивности через разрядный диод затухает экспоненциально; скорость затухания можно увеличить, включив последовательно с диодом резистор.

### 13.2. Исполнительные механизмы с электроприводом

Термин **привод** обозначает комбинацию двигателя с управляющей электроникой. Применение управляющих схем значительно улучшает функциональные свойства электродвигателя, позволяя регулировать скорость и момент, в широких пределах и с высокой точностью. Большинство исполнительных механизмов, используемых в системах управления,

являются аналоговыми, например двигатели постоянного тока, синхронные и асинхронные двигатели переменного тока. Широко применяются и шаговые двигатели, но их системы управления заметно отличаются приводов непрерывного действия. Привод может быть частью другого механизма, например системы позиционирования клапана, манипулятора робота и т. д. Обычный CD-плеер содержит приводы для вращения диска и позиционирования держателя считывающего лазерного датчика. При этом и скорость диска, и положение головки должны выдерживаться с высокой точностью. В этом разделе рассмотрены наиболее важные аспекты точного управления электроприводом.

### 13.2.1. Усилители мощности

Выходные порты компьютера имеют очень низкую мощность и не могут непосредственно управлять каким-либо физическим устройством. Для того чтобы возбуждать исполнительные механизмы, взаимодействующие с физическим процессом (двигатели и т. п.), выходной сигнал компьютера необходимо усиливать. Усилители мощности управляющих сигналов могут быть выполнены как отдельные устройства, так и входить непосредственно в состав исполнительного механизма. При уровнях мощности до нескольких сотен ватт можно использовать усилители, аналогичные применяемым в аудиосистемах, которые называются **операционными усилителями**. При больших мощностях чаще используется название сервоусилитель или **программируемый источник энергоснабжения**. Конструктивно последние обычно выполнены таким образом, чтобы их можно было монтировать вместе с двигателями или электроклапанами. Выходным напряжением программируемых источников можно управлять с помощью аналогового или цифрового сигнала.

**Широтно-импульсная модуляция** (ШИМ, *pulse-width modulation* — PWM). В этом случае выходное напряжение переключается между двумя постоянными значениями с высокой частотой, обычно в диапазоне

нескольких кГц. Средний уровень напряжения поддерживается изменением (модуляцией) ширины импульсов. На рис. 13.3 приведен пример такого сигнала.

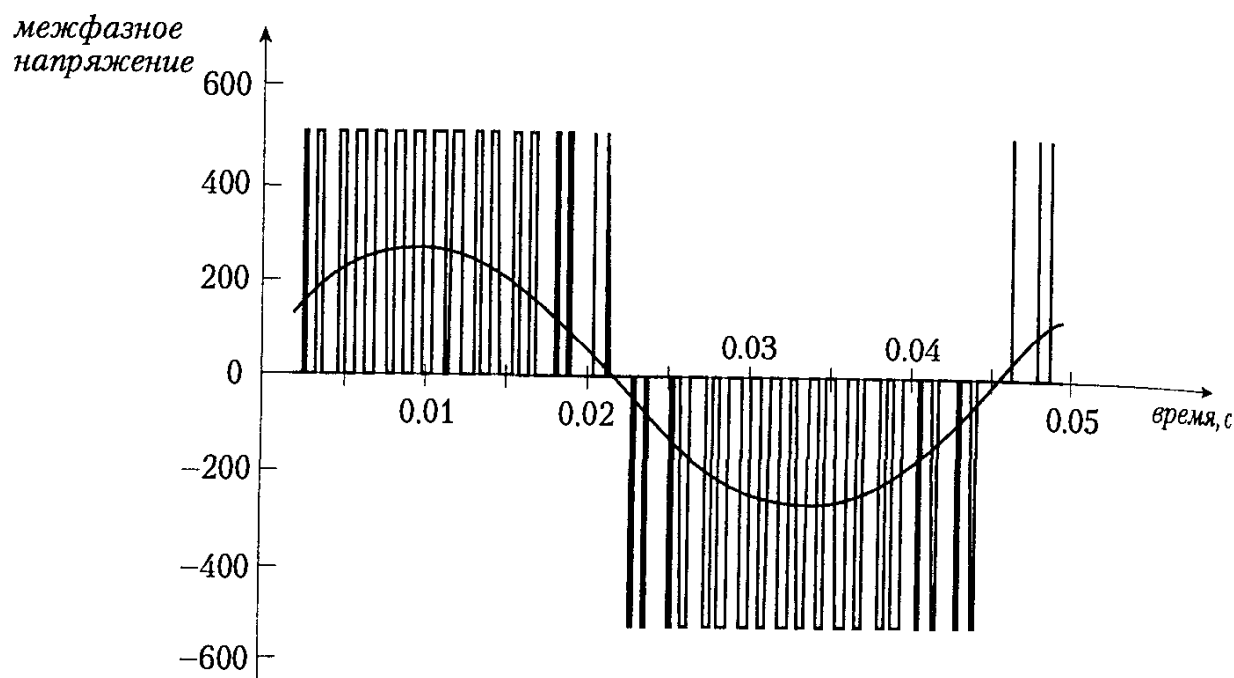


Рисунок 13.3. Огибающая результирующего напряжения в цикле ШИМ

"Узкие" импульсы соответствуют низкому, а "широкие" - высокому среднему напряжению. Устройство ШИМ включается в схему управления мощностью на основе твердотельных выключателей типа транзисторов, мощных полевых МОП-транзисторов или тиристоров. В преобразователях для мощностей порядка 300 кВт используются так называемые **биполярные транзисторы с изолированным затвором**.

Технология ШИМ используется в тех случаях, когда обычный усилитель просто сгорит из-за высокого уровня мощности. Переключения приводят к тому, что твердотельные приборы загружены полной мощностью лишь короткое время и, соответственно рассеяние мощности в них мало, а значит, ШИМ-усилители имеют высокую эффективность. Дополнительным преимуществом ШИМ-усилителей является возможность непосредственного управления переключениями через цифровой выходной порт компьютера.

ШИМ-управление широко используется в технике исполнительных механизмов непрерывного действия, таких как двигатели переменного и постоянного тока и гидропривод. Если частота переключений ШИМ-усилителя достаточно высока по сравнению с постоянной времени исполнительного механизма, то результирующий сигнал имеет некое среднее значение (рис. 13.3). Входное напряжение переключается между нулевым и максимальным значениями, в результате вырабатывается определенное среднее значение выходной мощности. Если частота переключения достаточно высока по сравнению с постоянной времени управляемой системы, то колебания выходных величин пренебрежимо малы.

**Частотный преобразователь** — это регулятор частоты вращения и момента двигателя, основанный на применении ШИМ-технологии; он применяется для двигателей переменного тока. Частотные преобразователи можно использовать как в новых системах, так и для модификации старых. Поскольку большинство насосов и компрессоров уже имеют асинхронные двигатели, то в некотором смысле они подготовлены к применению частотных преобразователей. При реализации сложных режимов с широким рабочим диапазоном, при низких скоростях и больших моментах может потребоваться дополнительное охлаждение по сравнению с обычно применяемым в двигателях.

### **13.2.2. Управление позиционированием и скоростью приводов**

Стандартной задачей в промышленности и автоматизации процессов является высокоточное управление позиционированием сервомеханизма, например манипулятора робота, инструмента станка или магнитной головки дисководов компьютера. Для ее решения двигатель сервомеханизма должен быть снабжен системой обратной связи, вырабатывающей необходимое управляющее воздействие. Структура системы управления позиционированием показана на рис.13.4; она не зависит ни от типа двигателя (переменного или постоянного тока), ни от типа управления (цифровое или аналоговое).



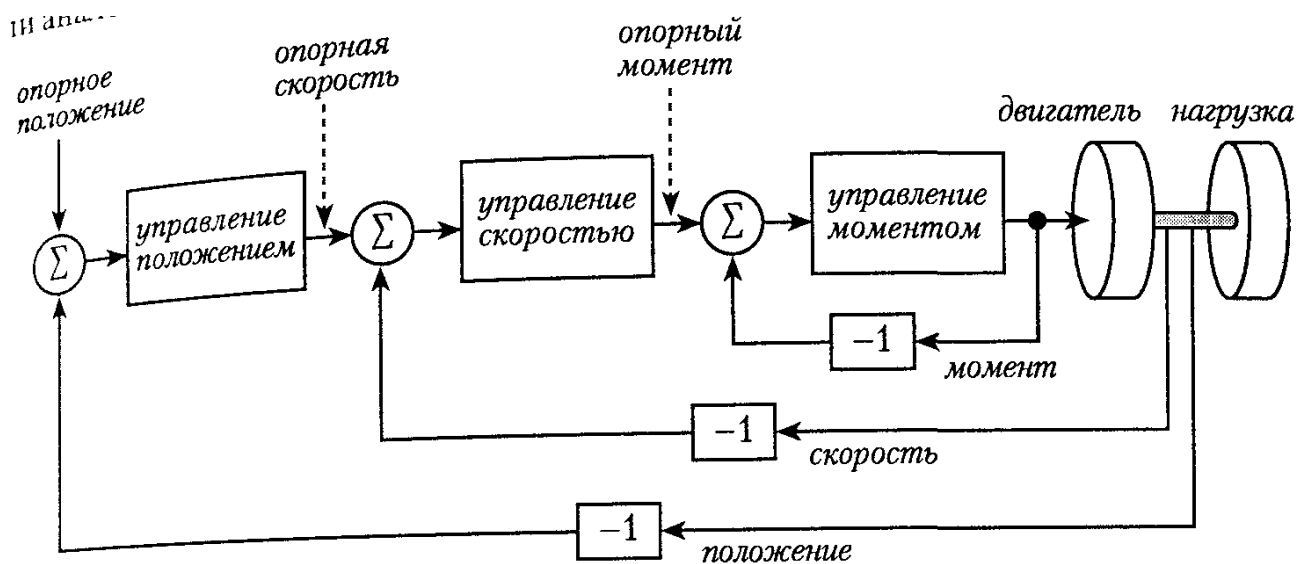


Рисунок 13.4. Схема структуры сервосистемы управления позиционированием

Сервосистема управления позиционированием содержит в каскадной конфигурации три вложенных контура для момента, скорости и положения. Угол поворота измеряется датчиком и сравнивается с опорным значением. Исходя из величины отклонения регулятор вычисляет новое значение скорости, обеспечивающее требуемое изменение положения.

Чтобы изменить угловую скорость, двигатель должен изменить вращающий момент. Требуемый момент вычисляется регулятором скорости на основе встроенной динамической модели используемого двигателя. Вычисленное значение затем сравнивается с текущим, которое, например, можно оценить, измеряя ток ротора. Разность моментов используется как входная величина для регулятора момента, оборудованного силовой электроникой, вырабатывающей напряжение и частоту для управления двигателем.

Показанную систему управления позиционированием можно использовать, например, для продольного позиционирования лазерного датчика устройства чтения компакт-дисков. Во многих исполнительных механизмах требуется управлять угловой скоростью, а не положением, например в приводе вращения диска того же CD-плеера. В этом случае

внешний контур управления позиционированием можно удалить из каскада управления. Опорное значение для регулятора угловой скорости в этом случае устанавливается непосредственно.

Если система управления позиционированием базируется на аналоговой технике, управляющий компьютер должен вырабатывать аналоговые сигналы; это можно сделать, например, с помощью цифро-аналогового преобразователя. Частоту вращения можно измерять тахометром, а положение — потенциометром.

Другой подход заключается в сочетании аналоговой и цифровой технологии. В этом случае управление частотой вращения осуществляется аналоговой электроникой, а управление положением — компьютером (рис.13.5).

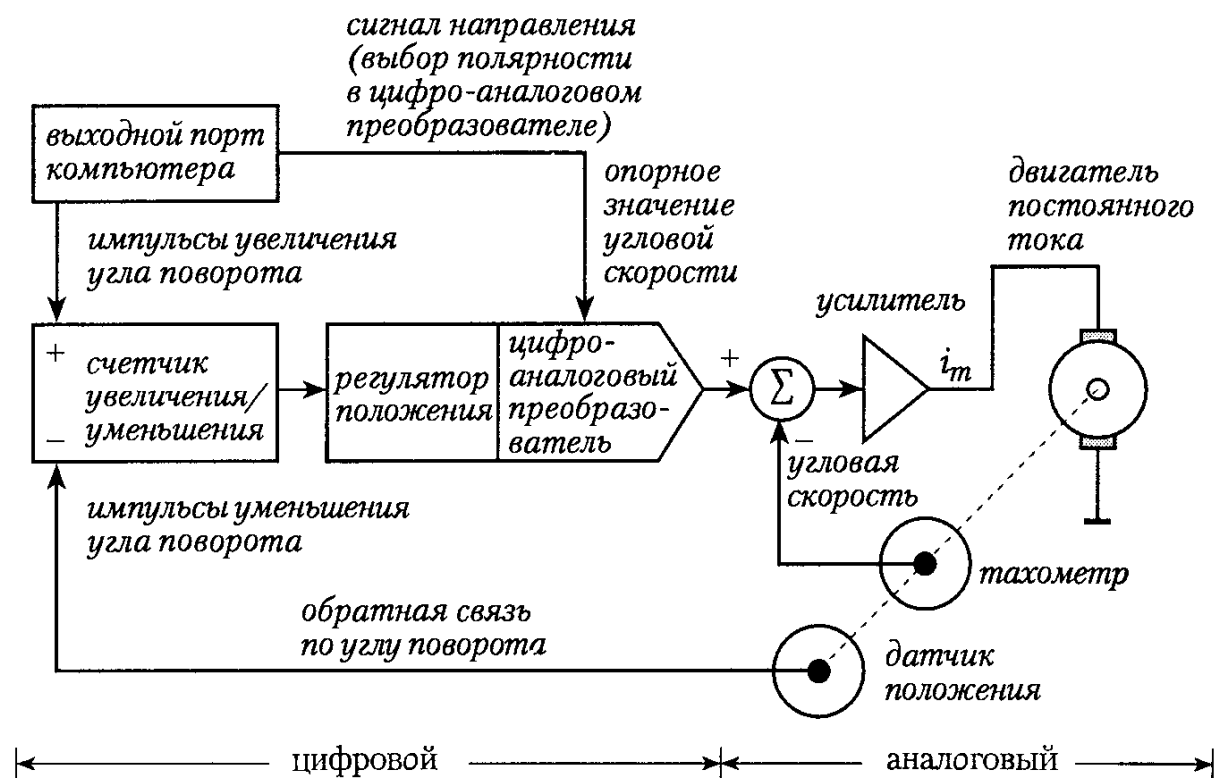


Рисунок 13.5. Соединение аналогового и цифрового контуров сервоуправления

Датчик положения — это относительный кодер угла поворота, который выдает фиксированное число импульсов на каждый оборот вала двигателя.

Когда двигатель вращается, генерируется последовательность импульсов, скорость поступления которых пропорциональна частоте вращения. Компьютер посылает импульсы позиционирования, которые добавляются к счетчику импульсов. Импульсы от датчика положения, напротив, вычитаются из него. Разность в числе положительных и отрицательных импульсов (значение счетчика) определяет ошибку позиционирования; эта величина подается в ЦАП, который вырабатывает аналоговый сигнал — напряжение, используемый в качестве опорного для скорости. Компьютер получает и выдает только импульсные сигналы, как при управлении шаговым двигателем, а не реальным двигателем постоянного тока.

Контур сервоуправления можно полностью реализовать на цифровой технике. Датчик положения вала обеспечивает измерительную информацию и о положении, и о скорости. Специальные платы, содержащие необходимые цифровые контуры управления, существуют для многих типов микрокомпьютеров. Такие контроллеры выпускаются и в исполнении с сервоусилителями.

### **13.2.3. Шаговые двигатели**

**Шаговые двигатели** являются приводными исполнительными механизмами, обеспечивающими фиксированные угловые перемещения (шаги). Каждое изменение угла поворота ротора - это реакция шагового двигателя на входной импульс. Поскольку каждый шаг двигателя соответствует определенному углу поворота ротора, а движение строго задано управляющими импульсами, то управлять позиционированием и скоростью вращения очень просто. Это, однако, справедливо при допущении, что ни один шаг не был пропущен, т. е. положение ротора полностью определено входными импульсами. В этом случае нет необходимости в обратной связи по углу поворота ротора — разомкнутый контур управления. В условиях переходного процесса при моменте, близком к номинальному, часть импульсов может быть пропущена. Если шаговому двигателю

приходится работать в таких условиях, необходимо предусматривать контур обратной связи для компенсации ошибок.

#### Преимущества шаговых двигателей:

- высокая точность, даже в разомкнутой структуре управления, т. е. без датчика угла поворота;
- естественная интеграция с приложениями цифрового управления;
- отсутствие механических коммутаторов, которые часто создают проблемы в двигателях других типов.

#### Недостатки шаговых двигателей:

- малый вращающий момент по сравнению с двигателями приводов непрерывного типа;
- ограниченная скорость;
- высокий уровень вибрации из-за скачкообразного движения;
- большие ошибки и колебания при потере импульсов в системах с разомкнутым контуром управления.

Преимущества шаговых двигателей намного превосходят их недостатки, поэтому они часто применяются в тех случаях, когда достаточно небольшой мощности приводных устройств.

### **13.2.4. Двигатели постоянного тока**

Двигатели постоянного тока широко используются в качестве сервомоторов, несмотря на то, что в настоящее время все чаще для этого применяются двигатели переменного тока. Основным недостатком двигателей постоянного тока является наличие механического коммутатора (коллектора), который ограничивает как мощность, так и частоту вращения двигателя. Этот недостаток отсутствует у безщеточных двигателей постоянного тока, т.е. двигателей с ротором в виде постоянного магнита, у которых коммутация осуществляется электронным переключением токов статора. Безщеточный двигатель постоянного тока имеет сходство с шаговым двигателем и некоторыми типами синхронных двигателей.

Управление двигателем постоянного тока осуществляется регулированием напряжения, приложенного к ротору, и иногда напряжением возбуждения. Применение переменных резисторов включенных последовательно с источником питания, имеет много недостатков. Резистор рассеивает энергию, причем выделившееся тепло должно быть отведено из-за возможных нежелательных эффектов. Распространенный способ управления напряжением питания — использование твердотельных приборов и ШИМ-управления. Напряжение питания "нарезается" таким образом, что его среднее значение имеет заданный уровень. В качестве переключателей в схемах управления двигателями постоянного тока обычно используются тиристоры.

### **13.2.5. Асинхронные и синхронные двигатели**

Двигатели переменного тока, как правило, применяются в тяжелых эксплуатационных условиях, однако они находят все большее распространение в системах промышленного управления, например в качестве сервомоторов. Некоторые преимущества двигателей переменного тока перечислены ниже:

- экономичность;
- надежная и простая конструкция;
- высокая эксплуатационная надежность;
- простое энергопитание;
- отсутствие коммутатора;
- практическое отсутствие дуговых явлений (поскольку нет коммутаторов).

Отрицательными чертами двигателей переменного тока являются более низкий момент трогания, чем у двигателей постоянного тока, и более сложные цепи управления. Однако преимущества систем привода переменного тока таковы, что они успешно конкурируют с двигателями

постоянного тока в роботах, манипуляторах и других промышленных системах силового привода.

Широкое применение двигателей переменного тока в качестве сервомоторов стало возможным по мере развития силовой электроники в сочетании с новыми методами управления. Применение микроэлектроники обеспечивает вполне приемлемое управление частотой питающего напряжения. Вращающий момент двигателя нельзя измерить так же просто, как у двигателей постоянного тока, однако существуют способы его оперативной оценки. Из-за жестких временных требований для управления должны использоваться микропроцессоры со специальной архитектурой, обеспечивающей очень высокую скорость вычислений, — **цифровые сигнальные процессоры** (*Digital Signal Processors — DSP*).

У асинхронного (индукционного) двигателя магнитное поле статора не постоянно, в отличие от двигателя постоянного тока. В простейшей (двухполюсной) машине имеются три статорные обмотки, расположенные вокруг статора под углом  $120^\circ$  друг относительно друга. Когда по ним подается трехфазное переменное напряжение, результирующий магнитный поток статора вращается с частотой приложенного напряжения. Поскольку к обмотке ротора не подводится никакого внешнего питания (она короткозамкнута), то нет необходимости в щеточных коммутирующих устройствах.

Вращающееся поле статора пересекает обмотки ротора и индуцирует в них ток. Результирующий поток ротора взаимодействует с вращающимся потоком статора и создает вращающий момент в направлении вращения поля статора. Этот момент есть рабочий момент двигателя. Из-за потерь на трение ротор не может даже на холостом ходу достичь так называемой синхронной частоты вращения, т. е. точного значения частоты вращения поля статора. Вращающий момент образуется именно из-за разности частот вращения ротора и поля статора. Относительная разность частот вращения называется скольжением ротора:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s}$$

где  $\omega_s$  — частота вращения поля статора (синхронная частота), а  $\omega_m$  — частота вращения ротора. Очевидно, что при  $s = 0$  вращающий момент равен нулю.

Ротор синхронного двигателя движется синхронно с вращающимся магнитным полем, создаваемым обмотками статора (статор синхронного двигателя в принципе такой же, как у асинхронного). В отличие от асинхронного, обмотки ротора синхронного двигателя возбуждаются от внешнего источника постоянного тока. Полюса возникающего магнитного поля ротора занимают фиксированное положение относительно вращающегося поля статора и вращаются вместе с ним; следовательно, скорости вращения поля статора и ротора идентичны и скольжение равно нулю. Синхронные двигатели часто используются в тех случаях, когда необходима постоянная скорость вращения при переменной нагрузке. В сочетании с современными преобразователями частоты синхронные двигатели могут работать с переменной скоростью вращения. Большое распространение приобретают синхронные двигатели с постоянными магнитами. Шаговые двигатели можно рассматривать как специальный тип синхронного двигателя.

### 13.3. Управляющие клапаны

Управляющий клапан (*control valve*) состоит из тела клиновидной или цилиндрической формы (иногда называется тарелкой), закрепленного на стержне (штоке), который движется вверх и вниз относительно цилиндрического седла. Стержень обычно перемещается под давлением сжатого воздуха на поршень или диафрагму с пружиной. Пружина может либо открывать, либо закрывать клапан в зависимости от того, какое положение требуется в случае прекращения подачи сжатого воздуха. Иногда для управления потоком используется электрический или гидравлический

привод. Конструкции тела и седла клапана различаются в зависимости от требований к соотношению между производительностью и потерями напора на клапане, типа жидкости и расхода при разных положениях штока.

Размер клапана обычно выбирают в соответствии с параметрами трубопровода, в котором он устанавливается. Выбор формы клапана и сочетания размеров седла и тела (тарелки) требует оценки следующих факторов.

- **Потери напора** (*pressure drop*). Большие потери напора на клапане могут затруднить движение штока. Специальная конструкция клапана заставляет поток двигаться в противоположных направлениях через два запирающих элемента, тем самым, уравнивая силы. Необходимость снижения потерь напора может потребовать применения различных типов клапанов, например типа "бабочка".

- **Максимальный расход** (*maximum flowrate*). Это требование сводится к сочетанию максимального расчетного расхода с максимальной зоной управления. Последняя должна в идеале составлять 30-50 % от расчетного расхода. Иногда неопытные специалисты задают эту величину на уровне 10 %, что заметно ухудшает рабочие характеристики.

- **Управляемость** (*rangeability*). Это отношение расходов при двух различных положениях штока. Оно в основном связано с конструкцией тела и седла и зависимостью потерь напора от расходных характеристик, которые, в свою очередь, связаны характеристиками нагнетающего насоса. Управляемость должна обеспечивать номинальный диапазон расходов с соответствующими зонами управления (желательно 30-50 %) по обе стороны диапазона.

- **Чувствительность** (*sensitivity*). Связана с управляемостью и величиной управляющего воздействия, необходимого для управления с заданной точностью. Иногда большой клапан обеспечивает номинальный расход, а малый, установленный параллельно, обеспечивает необходимую чувствительность



- **Линейность** (*linearity*). Желательно, чтобы в контуре управления существовала линейная зависимость между выходами регулятора и датчика, т. е. в цепочке "клапан — процесс — датчик". Если контур управления не обладает линейной зависимостью выходных и входных величин, ее можно обеспечить выбором характеристик клапана, а иногда и датчика. Качество управления при отсутствии линейности иногда может оказаться низким, или потребуются реализация специальных способов управления.

- **Гистерезис** (*hysteresis*). Это обычная проблема управляющих клапанов, возникающая из-за процессов сухого трения (прилипания) в месте прилегания запорного элемента клапана к седлу, а также потерь напора на клапане. Как правило, гистерезис является причиной небольших постоянных колебаний в контуре управления, для борьбы с которыми можно применять устройства точного позиционирования клапана. Это специальное устройство управления с большим коэффициентом усиления, которое обеспечивает нужное положение штока клапана. В этом случае управляющий компьютер не осуществляет точного контроля за открытием клапана, а только вырабатывает опорные значения для устройства позиционирования клапана.

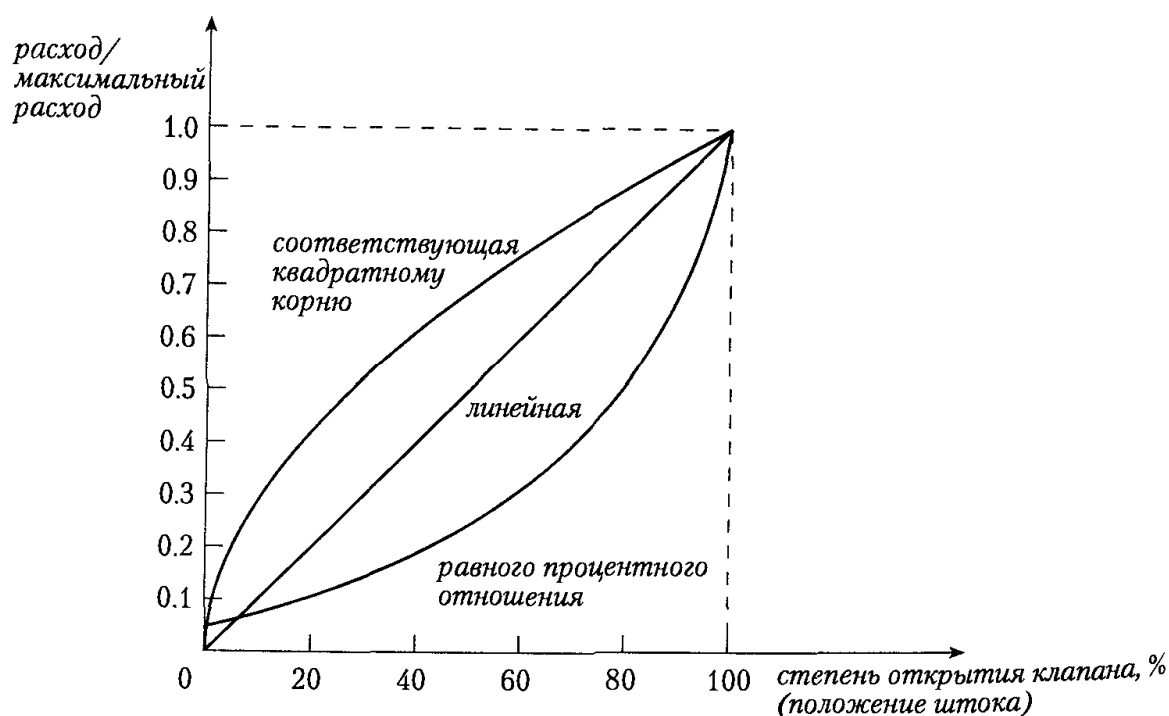


Рисунок 13.6. Характеристики клапанов

Управляемость клапана можно определить на основании расчета двух расходов, равных, например, 15% и 85% от максимального расхода. В этом случае необходимо знать функцию  $f(x)$ , которая характеризует клапан. Клапаны поставляются со следующими характеристиками:

-  $f(x) = x$  - линейная;

-  $f(x) = \sqrt{x}$  - соответствующая квадратному корню;

-  $f(x) = A^{(x-1)}$  - равного процентного отношения (где конструктивная постоянная  $A$  обычно лежит в пределах от 20 до 50)

Эти зависимости показаны на рис.13.6. Следует отметить, что идеальный клапан равного процентного отношения не закрывается полностью. На практике их проектируют таким образом, чтобы получить линейную характеристику при очень малых открытиях, и, следовательно, они закрываются полностью.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Ксеневи́ч И.П., Тараси́к В.П. Теория и проектирование автоматических систем: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1996. – 480 с.
- 2 Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления.- М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004.- 911 с.
- 3 Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью.- М.: Лаборатория Базовых знаний.- 2001 - 616 с.
- 4 Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления.- М.: Лаборатория Базовых знаний.- 2002 - 832 с.
- 5 Густав Олсон, Джангуидо Пиани Цифровые системы автоматизации и управления. Санкт-Петербург, 2001
- 6 Ефимов В.Т., Молчанов В.И., Ефимов А.В. Методы расчетов в автоматизации химико-технологических и теплоэнергетических процессов: Учебное пособие. Харьков, 1998.
- 7 Груба В.И., Никулин Э.К., Оголобченко А.С. Технические средства автоматизации в горной промышленности: Учебное пособие. Киев, 1998.

Учебное издание  
Конспект лекций по курсу  
"Основы автоматизации производственных процессов"

Для студентов, обучающихся по направлению  
6.050201 "Системная инженерия"  
(для дневной и заочной форм обучения)

Составители: Федюн Роман Валериевич, к.т.н., доцент  
Попов Владислав Александрович, к.т.н., доцент

Рецензент Шумяцкий Валерий Матвеевич, к.т.н., доцент  
Жукова Наталья Викторовна, к.т.н., доцент

Отв.  
за выпуск Воропаева Виктория Яковлевна, к.т.н., доцент, зав .каф.