

В.Ю.ШИШМАРЕВ

ТИПОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Допущено

*Министерством образования Российской Федерации
в качестве учебника для студентов образовательных
учреждений среднего профессионального образования,
обучающихся по специальности 2101 «Автоматизация
технологических процессов и производств (по отраслям)»*

Москва
ACADEMA
2004

Рецензенты:

зав. кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств» Московского политехнического колледжа, преподаватель высшей категории, канд. техн. наук *Б. И. Горошков*; зам. главного конструктора ОАО МНПК «Авионика», канд. техн. наук *А. А. Красильников*

Шишмарев В.Ю.

Ш657 Типовые элементы систем автоматического управления: Учебник для сред. проф. образования / Владимир Юрьевич Шишмарев. — М.: Издательский центр «Академия», 2004. — 304 с.

Рассмотрены основные элементы и устройства, применяемые в системах автоматического управления, и устройства, систематизированные по функциональному признаку. Изложены принципы действия, характеристики и методы построения датчиков, усилителей, реле, исполнительных и других элементов автоматики.

Для студентов техникумов, обучающихся по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств», а также для студентов родственных специальностей. Может быть полезен инженерно-техническим работникам, занимающимся вопросами автоматического управления.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Широкое развитие систем автоматического управления, систем и средств автоматизации во всех областях техники и отраслях современного производства связано с разработкой, модернизацией и выпуском в больших количествах разнообразных технических средств автоматики, к которым относятся функциональные элементы и различные автоматические устройства.

Специалисты в области автоматики, автоматизации производства и управления должны иметь глубокие знания в области теории автоматического управления и уметь проводить анализ и синтез систем автоматизации, т. е. должны быть хорошо знакомы с элементами и устройствами, на базе которых строятся системы автоматики, автоматизации и управления.

Постоянное развитие науки и техники и интенсивное внедрение научно-технических достижений в производство обеспечивают непрерывное пополнение арсенала технических средств автоматики, вытесняя устаревшие элементы новыми, более современными конструкциями. Поэтому в предлагаемом учебнике основное внимание уделяется рассмотрению принципов действия, общих свойств, характеристик и способов реализации различных функциональных элементов автоматики, имеющих в настоящее время наибольшее применение.

При написании учебника автор использовал многолетний опыт преподавания дисциплин «Автоматизация производственных процессов» и «Теория автоматического управления» в МАТИ — РГТУ им. К. Э. Циолковского.

ВВЕДЕНИЕ

Современный научно-технический прогресс тесно связан с широким развитием автоматики. *Автоматика* — это отрасль науки и техники, охватывающая теорию и принципы построения систем управления техническими объектами и процессами, действующих без непосредственного участия человека.

Технический объект (станок, двигатель, летательный аппарат, поточная линия, автоматизированный участок, цех и т.д.), нуждающийся в автоматическом или автоматизированном управлении, называется *объектом управления* (ОУ).

Совокупность ОУ и *автоматического управляющего устройства* называется *системой автоматического управления* (САУ) или *автоматизированной системой управления* (АСУ).

Любое автоматическое устройство представляет собой комплекс отдельных конструктивных или схемных элементов, каждый из которых выполняет задачу по преобразованию энергии, полученной от предыдущего элемента или окружающей среды, и передаче ее последующему элементу.

Элементами автоматики называются конструктивно законченные устройства, выполняющие определенные самостоятельные функции преобразования сигнала (информации) в системах автоматического управления.

В системах автоматического управления в качестве *сигналов* обычно используются электрические и механические величины (например, постоянный ток, напряжение, давление сжатого газа или жидкости, усилие и т.п.), так как они позволяют легко осуществлять преобразование, сравнение, передачу на расстояние и хранение информации. В одних случаях сигналы возникают непосредственно вследствие протекающих при управлении процессов (изменения тока, напряжения, температуры, давления, наличия механических перемещений и т.д.), в других случаях они вырабатываются чувствительными элементами или датчиками.

Соответственно операциям, производимым с сигналами информации в автоматических устройствах, можно выделить функциональные ячейки — элементы. *Элемент* — простейшая в функциональном отношении ячейка (устройство, схема), предназначенная для выполнения одной из следующих основных операций с сигналом:

- преобразование контролируемой величины в сигнал, функционально связанный с информацией об этой величине (чувствительные элементы, датчики);

- преобразование сигнала одного рода энергии в сигнал другого рода энергии: электрической в неэлектрическую, неэлектрической в электрическую, неэлектрической в неэлектрическую (электромеханические, термоэлектрические, электропневматические, фотоэлектрические и другие преобразователи);

- преобразование сигнала по значению энергии (усилители);

- преобразование сигнала по виду, т. е. непрерывного в дискретный или обратно (аналогоцифровые, цифроаналоговые и другие преобразователи);

- преобразование сигнала по форме, т.е. сигнала постоянного тока в сигнал переменного тока и наоборот (модуляторы, демодуляторы);

- функциональное преобразование сигналов (счетно-решающие элементы, функциональные элементы);

- сравнение сигналов и создание командного управляющего сигнала (элементы сравнения, ноль-органы);

- выполнение логических операций с сигналами (логические элементы);

- распределение сигналов по различным цепям (распределители, коммутаторы);

- хранение сигналов (элементы памяти, накопители);

- использование сигналов для воздействия на управляемый процесс (исполнительные элементы).

Таким образом, под элементом следует понимать самую простую часть системы, где выполняется одна функциональная операция с сигналом.

Несмотря на простоту понятия элемента и происходящих в нем процессов, до сих пор во многих случаях существуют трудности не только в формировании понятия элемента, но и в терминологии.

Часто элементы отождествляются с устройствами, в состав которых входят несколько элементов. Например, некоторые датчики, называемые элементами, в действительности являются совокупностью элементов, объединенных единой схемой соединения, обеспечивающих воспроизведение контролируемой величины и преобразование ее в другую величину, более удобную для передачи по

линиям связи.

Современная теория элементов автоматики стремится к наиболее полному раскрытию физической и математической сущности элементов. Одновременно с разработкой физики элементов автоматики рассматриваются и развиваются их классификация, методы расчета и конструирования.

РАЗДЕЛ I КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИКИ

Глава 1

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИКИ

1.1. Основные понятия

Любое автоматическое устройство представляет собой комплекс отдельных конструктивных или схемных элементов, каждый из которых выполняет задачу по преобразованию энергии, полученной от предыдущего элемента, и передаче ее последующему элементу. *Элементами автоматики* называются конструктивно законченные устройства, выполняющие определенные самостоятельные функции преобразования сигнала (информации) в системах автоматического управления и контроля.

На рис. 1.1, а схематически изображен элемент Э. На его вход подается энергия x , после преобразования ее по значению на выходе возникает энергия y . Иногда необходимо, чтобы энергия y на выходе была больше, чем энергия x на входе; в этом случае в элемент вводится дополнительная энергия вида z (рис. 1.1, б). Очевидно, при наличии дополнительной энергии возможно усиление небольшой входной энергии x до большой выходной энергии y .

Величины x и y могут быть электрическими (например, напряжение, ток, сопротивление) и неэлектрическими (например, давление, перемещение, температура, скорость). Чаще всего применяют электрические элементы, т. е. те, у которых величины x или y являются электрическими. Находят также применение и неэлектрические элементы: гидравлические, пневматические, механические и др.

Характеристики элементов оказывают влияние на свойства систем автоматики, которые из них состоят. Изучение свойств этих элементов необходимо для анализа работы устройств и схем, основными показателями которых (характеризующими работу) являются точность, чувствительность, инерционность и др.

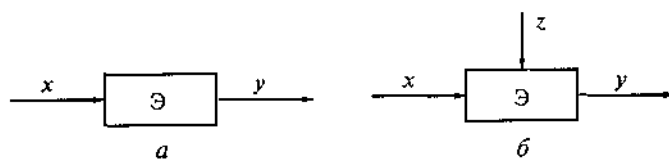


Рис. 1.1. Схемы элементов автоматики:
а — без дополнительной энергии; б — с дополнительной энергией

В настоящей главе рассматриваются функции, выполняемые различными элементами, классифицируются физические принципы, лежащие в основе их действия, и приводятся общие характеристики, применяемые для различных элементов автоматики.

Рассмотрим схемы автоматики и телемеханики, а также основные правила их выполнения.

Комплексы различных технических устройств и элементов, входящих в состав системы управления и соединенных электрическими, механическими и другими связями, на чертежах изображают в виде различных схем: электрических, гидравлических, пневматических и кинематических.

Схема служит для получения концентрированного и достаточно полного представления о составе и связях любого устройства или системы.

Согласно Единой системе конструкторской документации (ЕСКД) и ГОСТ 2.701 электрические схемы подразделяют на структурные, функциональные, принципиальные (полные), схемы соединений (монтажные), подключения, общие, расположения и объединенные.

Структурная схема служит для определения функциональных частей, их назначения и взаимосвязей.

Функциональная схема предназначена для определения характера процессов, протекающих в отдельных функциональных цепях или установке в целом.

Принципиальная схема, показывающая полный состав элементов установки в целом и все связи между ними, дает основное представление о принципах работы соответствующей установки.

Монтажная схема иллюстрирует соединение составных частей установки с помощью проводов, кабелей, трубопроводов.

Схема подключения показывает внешние подключения установки или изделия.

Общая схема служит для определения составных частей комплекса и способов их соединения на месте эксплуатации.

Объединенная схема включает в себя несколько схем разных видов в целях более ясного раскрытия содержания и связей элементов установки.

Чертежи и схемы выполняют по определенным правилам, которые изложены в действующих стандартах ЕСКД.

Каждый функциональный элемент выполняет элементарную функцию, которая заключается в получении, преобразовании и передаче информации в виде сигналов определенной физической природы. Эти элементы в системах автоматики и телемеханики служат звеньями однонаправленного действия, т. е. звеньями, передающими сигнал в одном направлении — с входа на выход.

Назначения основных функциональных элементов автоматики можно рассмотреть на примере построения одномерной системы комбинированного управления температурой воздуха в помещении (рис. 1.2).

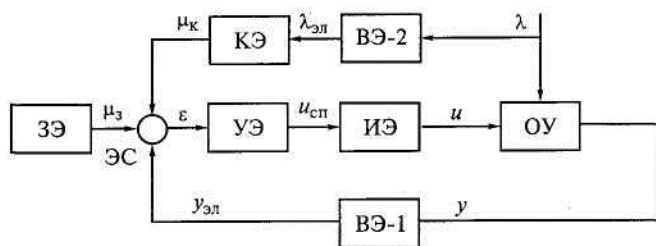


Рис. 1.2. Схема управления температурой воздуха в помещении

На схеме этой системы объект управления (ОУ) — помещение, оборудованное калорифером. Для управления объектом предусмотрен исполнительный элемент (ИЭ), содержащий исполнительный механизм (сервопривод) и регулирующий орган (клапан). От положения u золотника клапана, перемещаемого сервоприводом, зависит расход теплоносителя через калорифер и, как следствие, температура воздуха в помещении y . Сигнал управления сервоприводом $u_{сп}$ формируется управляющим элементом (УЭ) согласно заложенному в нем алгоритму по выходному сигналу элемента сравнения (ЭС): $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$, причем

$$\varepsilon_1 = \mu_z - y_{эл}; \quad \varepsilon_2 = -\mu_k = -\theta_d (d\lambda_{эл}/dt),$$

где μ_z — формируемый задающим элементом (ЗЭ) электрический сигнал, соответствующий требуемому значению температуры воздуха в помещении; $y_{эл}$ — формируемый первым воспринимающим элементом (ВЭ-1) электрический сигнал, соответствующий реальной температуре y воздуха в помещении; μ_k — выходной сигнал корректирующего элемента (КЭ); θ_d — положительная величина, представляющая собой постоянную времени дифференциатора, т.е. корректирующего элемента; $\lambda_{эл}$ — формируемый вторым воспринимающим элементом (ВЭ-2) электрический сигнал, соответствующий температуре λ наружного воздуха.

В рассматриваемой системе КЭ — реальное дифференцирующее звено (приблизительно выполняющее операцию дифференцирования электрического сигнала $\lambda_{эл}$ по времени t), т.е. выходные сигналы μ_k корректирующего элемента пропадают с исчезновением изменений температуры наружного воздуха X . В противном случае сигналы КЭ могут содержать постоянные составляющие, определяемые установившимися значениями температуры X и воспринимаемые ЭС как сигналы ЗЭ. Другими словами, недопустимо наличие постоянных составляющих в выходных сигналах КЭ, так как эти составляющие формируют алгебраическое слагаемое сигнала задания системе управления. Однако сигнал задания цз системе управления должен формироваться оператором только с помощью ЗЭ.

Наличие постоянных составляющих в выходных сигналах КЭ допустимо, если эти сигналы

поступают непосредственно на вход ИЭ. В этом случае КЭ должен содержать необходимый усилитель мощности, приводящий ИЭ в действие, т. е. являться управляющим элементом.

Аналогично строятся схемы для других систем управления. Как видно из рассмотренного примера, каждый элемент в системе управления выполняет вполне определенную функцию.

По выполняемым функциям основные элементы автоматики делятся на датчики, усилители, стабилизаторы, реле, распределители, двигатели и другие узлы (генераторы импульсов, логические элементы, выпрямители и т.д.).

По роду физических процессов, используемых в основе устройств, элементы автоматики делятся на электрические, ферромагнитные, электротепловые, электромашинные, радиоактивные, электронные, ионные и др.

Рассмотрим некоторые основные элементы, наиболее часто применяемые в автоматике, разделяя их по выполняемым функциям.

Датчик (измерительный преобразователь, чувствительный элемент) — устройство, предназначенное для того, чтобы информацию, поступающую на его вход в виде некоторой физической величины, функционально преобразовать в другую физическую величину на выходе, более удобную для воздействия на последующие элементы (блоки). Большинство датчиков преобразуют неэлектрическую контролируемую величину x в электрическую (например, температура преобразуется при помощи термопары в электродвижущую силу (ЭДС); механическое перемещение, связанное с изменением положения якоря электромагнита, изменяет индуктивность его обмотки и т.д.).

Основной характеристикой датчика является зависимость его выходной величины y от входной x , т.е. $y = f(x)$. На рис. 1.3 изображены некоторые распространенные виды зависимости выход-вход датчиков. Как видно из рисунка, функциональная связь может подчиняться любой закономерности, но желательно, чтобы характеристика датчика была линейной.

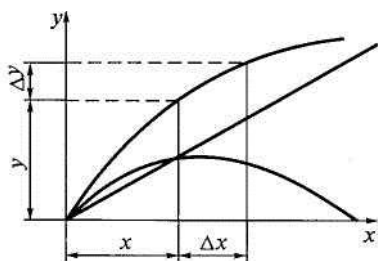


Рис. 1.3. Виды основной характеристики датчиков

Различают два вида датчиков в зависимости от принципа производимого ими преобразования:

параметрические (или пассивные), в которых изменение контролируемой величины x сопровождается соответствующими изменениями активного, индуктивного и емкостного сопротивлений датчика. Наличие постороннего источника энергии вида z (см. рис. 1.1, б) является обязательным условием работы параметрического датчика;

генераторные (или активные), в которых изменение контролируемой величины x сопровождается соответствующими изменениями ЭДС на выходе датчика (например, возникновение ЭДС может происходить вследствие термо-, пьезо-, фотоэффекта и других явлений, вызывающих появление электрических зарядов). Эти датчики выполняются по схеме, приведенной на рис. 1.1, а, т.е. они не требуют дополнительного источника энергии вида z , так как энергия на выходе элемента полностью берется с его входа (вследствие чего мощность выходного сигнала всегда меньше мощности входного сигнала).

В зависимости от вида контролируемой неэлектрической величины различают датчики механические, тепловые, оптические и др. Часто применяются электрические датчики с промежуточным преобразованием, т.е. механический датчик объединяют с электрическим. Преобразование контролируемой величины в таких датчиках происходит по схеме: измеряемая величина — механическое перемещение — электрическая величина. Элемент, преобразующий измеряемую величину в перемещение, называется первичным преобразователем или первичным измерителем (ПИ). Например, давление преобразуется в перемещение стрелки манометра ПИ, которое затем преобразуется в изменение активного сопротивления (проволочный, резистивный (или реостатный) датчики и др.).

Усилитель — элемент автоматики, осуществляющий количественное преобразование (чаще всего усиление) поступающей на его вход физической величины (тока, мощности, напряжения, давления и т.п.). Усилитель обязательно должен иметь дополнительный источник энергии z (см. рис. 1.1, б). Основной характеристикой усилителя является зависимость $y = f(x)$; при этом обычно стремятся к получению линейной или близкой к ней характеристики на рабочем участке. Величины на входе и выходе усилителя имеют одинаковую физическую природу. На рис. 1.4 изображены различные виды характеристики усилителей.

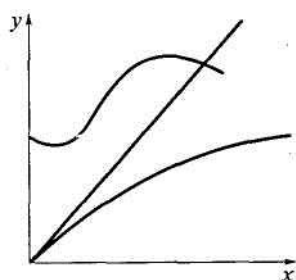


Рис. 1.4. Виды основной характеристики усилителей

По принципу действия усилители разделяются на электронные, полупроводниковые, магнитные, электромашинные, пневматические, гидравлические.

Стабилизатор — элемент автоматики, обеспечивающий постоянство выходной величины y при колебаниях входной величины x в определенных пределах. Эффект стабилизации достигается за счет изменения параметров элементов, входящих в схему стабилизатора; при этом вид энергии на его входе и выходе должен быть один и тот же. Характеристики стабилизаторов показаны на рис. 1.5. Здесь характеристика 1 обеспечивает меньшую стабилизацию выходной величины y , чем характеристика 2. В случае, если кривая не имеет в заданном диапазоне горизонтального участка, а имеет максимум (кривая 3) или минимум, то точность стабилизации будет больше, чем в случае, характеризуемом кривой 1.

В зависимости от вида стабилизируемой величины различают стабилизаторы напряжения и тока, обеспечивающие постоянство напряжения или тока в нагрузке при колебаниях входного напряжения и сопротивления нагрузки.

Реле — элемент автоматики, в котором при достижении входной величины x определенного значения выходная величина y изменяется скачком. Зависимость $y = f(x)$ реле неоднозначна и имеет форму петли (рис. 1.6). При изменении входной величины от 0 до x_2 выходная величина y изменяется незначительно (или остается постоянной и равной y_1). При достижении входной величины x значения x_2 , т.е. $x = x_2$, выходная величина изменяется скачком от значения y_1 до y_2 . Впоследствии при увеличении x выходная величина изменяется незначительно или остается постоянной (имеет установившееся значение). Когда входная величина уменьшается до значения x_1 выходная величина сначала остается также неизменной и почти равной y_2 . В тот момент, когда $x = x_1$ выходная величина скачком уменьшается до значения y_1 и сохраняется приблизительно неизменной при уменьшении x до нуля.

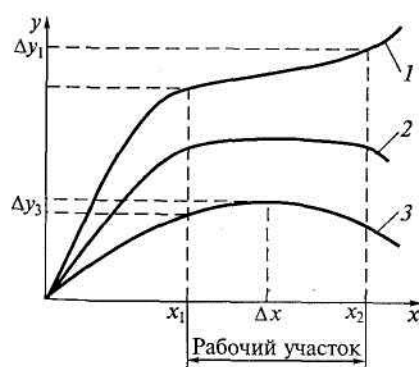


Рис. 1.5. Виды 1...3 основной характеристики стабилизаторов

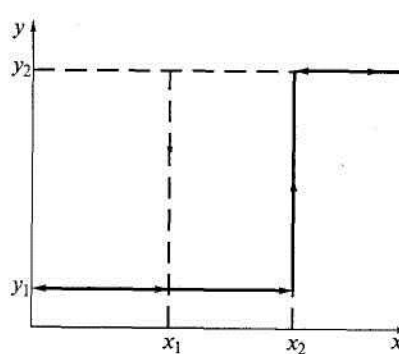


Рис. 1.6. Основная характеристика реле

Скачкообразное изменение выходной величины y в момент, когда $x = x_2$, называется *величиной*

срабатывания (например, ток срабатывания, напряжение срабатывания для электрических реле). Скачкообразное изменение выходной величины y в момент, когда $x = x_1$ называется *величиной отпускания* (ток отпускания, напряжение отпускания). Отношение величины x_x к величине срабатывания x_2 называется коэффициентом возврата, т.е. $K_v = x_1/x_2$. Так как обычно $x_1 < x_2$, то $K_v < 1$.

Существуют различные типы реле, но основными являются электромеханические реле (электромагнитные, магнитоэлектрические, электродинамические и др.), в которых изменение входной электрической величины вызывает замыкание или размыкание контактов. Бывают бесконтактные магнитные реле и бесконтактные реле электронного типа.

Распределитель {шаговый искатель} — элемент автоматики, осуществляющий поочередное подключение одной величины к ряду цепей. При этом подключаемые цепи обычно электрические.

Распределители используются при необходимости управления несколькими объектами от одного и того же управляющего органа и по способу передачи импульсов в управляемые цепи делятся на электромеханические (контактные), электронные и ионные (бесконтактные).

Исполнительные устройства — электромагниты с втяжным и поворотным якорями, электромагнитные муфты, а также электродвигатели, относящиеся к электромеханическим исполнительным элементам автоматических устройств.

Электромагниты преобразуют электрический сигнал в механическое движение; их применяют для перемещения рабочих органов, например клапанов, вентилях, золотников и т. п.

Электромагнитные муфты используются в электроприводах и устройствах управления для быстрого включения и выключения приводимого механизма, а также для его реверса, т.е. изменения направления движения управляемого устройства.

В некоторых случаях электромагнитные муфты применяют для регулирования скорости и ограничения передаваемого момента.

Электродвигатель — это устройство, обеспечивающее преобразование электрической энергии в механическую и преодолевающее при этом значительное механическое сопротивление со стороны перемещаемых устройств. Одним из главных требований, предъявляемых к электродвигателям, является их способность развивать требуемую механическую мощность. Кроме того, электродвигатель должен обеспечивать реверс, а также движение объекта с заданными скоростями и ускорениями.

Наиболее широко в качестве электромеханических исполнительных элементов применяют электродвигатели постоянного и переменного тока.

1.2. Классификация элементов автоматики

Любая самая сложная автоматическая система состоит из определенного комплекса элементов. Многообразие автоматических систем порождает и многообразие элементов, что, в свою очередь, приводит к необходимости их классификации. Нередко признаки классификации выбираются произвольно, и она в этом случае не достигает своей цели и даже дезориентирует при выборе требуемого элемента. Поэтому большое значение приобретают выявление и обоснование признаков, которые должны быть положены в основу классификации элементов автоматики. При этом наиболее важны последовательность расположения, выделение главных и вспомогательных признаков, т. е. разработка соответствующей иерархической структуры. Этим вопросам пока еще уделяется недостаточно внимания, вероятно, из-за некоторой неопределенности представления о многих элементах, но именно эти разработки могут помочь провести научную классификацию элементов и способствовать тем самым укреплению основ теории элементов автоматики.

В основу классификационной схемы могут быть положены функциональные признаки. В этом случае элементы подразделяются на следующие классы (рис. 1.7): элементы информации, сравнения, распределения, усиления, вычисления, памяти, логики, исполнения, вспомогательные.

Известная доля неопределенности заключена в классе вспомогательных элементов, из которых в будущем должны быть сформированы классы с более конкретными функциональными признаками.



Рис. 1.7. Классификация элементов автоматики по функциональным признакам

Предлагаемый набор классов элементов позволяет собрать любую автоматическую систему измерения, контроля, регулирования и управления. Каждый класс элементов в зависимости от выбранных основных и вспомогательных признаков, в свою очередь, может подразделяться на подклассы, группы, подгруппы, виды, подвиды и т. д.

Элементы автоматики могут быть построены на различной физической и конструктивной основе, поэтому основными их признаками являются функциональная зависимость и принципы формирования. Для дальнейшего подразделения могут быть приняты такие признаки, как состояние вещества, из которого строится элемент (твердое, жидкое, газообразное), и характер измеряемой величины (или состояния), т.е. механическая, акустическая, тепловая, электрическая, магнитная, химическая и др. Каждому характеру измеряемой величины соответствует множество конкретных измеряемых величин и состояний (табл. 1.1).

Виды измеряемых элементами автоматики величин и состояний

Характер измеряемой величины	Измеряемая величина	Измеряемое состояние
Механическая	Перемещение (длина, ширина, высота, толщина, уровень), положение, скорость, ускорение, время, объем, количество, расход, давление, работа, мощность, момент и т. д.	Плотность, удельный вес, пористость, проницаемость, капиллярность, поверхностное натяжение, диффузионный потенциал, консистентность, вязкость, пластичность, текучесть, упругость, твердость, точность и т. д.
Акустическая	Давление и скорость звука, частота, фаза и длина волны, сопротивление, энергия, работа звука	Удельное сопротивление, поглощение звука, отражение, скорость звука в веществе
Тепловая	Температура, тепловой поток, тепловая проводимость, количество тепла, параметр сгорания, зажигания и т. д.	Теплопроводность, теплопроводная способность, удельная теплоемкость, тепловое расширение, плавление, кипение, усадка и т. д.
Оптическая	Яркость, освещенность, световой поток, частота волны света, энергия и т. д.	Поглощение света, отражение, поляризация, люминесценция, интерференция и т. д.
Электрическая	Ток, напряжение, напряженность поля, частота тока, мощность, спектр тока и т. д.	Электропроводность, диэлектрическая проницаемость, электрическая прочность, электрострикция и т. д.
Магнитная	Намагничивающая сила, напряженность магнитного поля, магнитный поток, магнитное сопротивление, магнитная индуктивность, взаимоиндуктивность и т. д.	Магнитные восприимчивость и проницаемость, магнитная индукция, магнитострикция и т. д.
Радиоактивная	Поток радиации, интенсивность радиации, энергия радиации и т. д.	Поглощение, трансформация излучения и т. д.

Любые величины и состояния могут быть реализованы двумя путями. Первый путь связан с физическими принципами формирования элемента, второй — с конструктивными. Кроме того, важно знать в качестве признака элемента характер его выходного параметра: механический, акустический, тепловой, оптический, электрический, магнитный, радиоактивный и др. На рис. 1.8 приведены основные классификационные признаки элементов автоматики.

Любой элемент может иметь различный характер преобразования — электрический, пневматический, гидравлический или механический. Таким образом, у элементов сравнения основными классификационными признаками могут быть характер действия (электрический, пневматический, гидравлический) и характер сравнения (амплитуда сигнала, частота, фаза, длительность, знак, число импульсов, код).

В свою очередь, каждая величина (амплитуда, частота и т. д.) имеет свою разветвленную классификационную схему.

Основными классификационными признаками элементов распределения могут быть также характер действия (электрический, пневматический, гидравлический) и принцип действия.

Такой признак, как характер действия, относится почти ко всем элементам, и в дальнейшем, если не будет особо оговорено, его следует рассматривать как признак каждого элемента.

В приведенной классификационной схеме перечисляются только основные признаки ряда элементов, т. е. она неполная и требует дальнейшего уточнения и развития.

К примеру, элементы усиления разделяют прежде всего по выполняемым функциям: усилители тока, напряжения, мощности как постоянного, так и переменного тока. В то же время в зависимости от

принципа действия электрические усилители могут быть электронными, магнитными, ионными, электромашинными, электромеханическими, фотоэлектрическими, гальваномангнитными и на основе использования различных нелинейностей. В свою очередь, усилители любого принципа действия имеют также разветвленную схему классификации.

Для элементов вычисления главным признаком является функциональная зависимость, т.е. то математическое действие, для которого они предназначены — сложение, вычитание, умножение, деление, возведение в степень, извлечение корня, логарифмирование, потенцирование, реализация тригонометрических функций, дифференцирование по времени, параметру, интегрирование по времени, параметру.

Элементы памяти классифицируются как по выполняемым функциям, так и по принципу их действия. Это прежде всего задатчики опорных сигналов, элементы для задания программы, различных временных функций и других параметров.

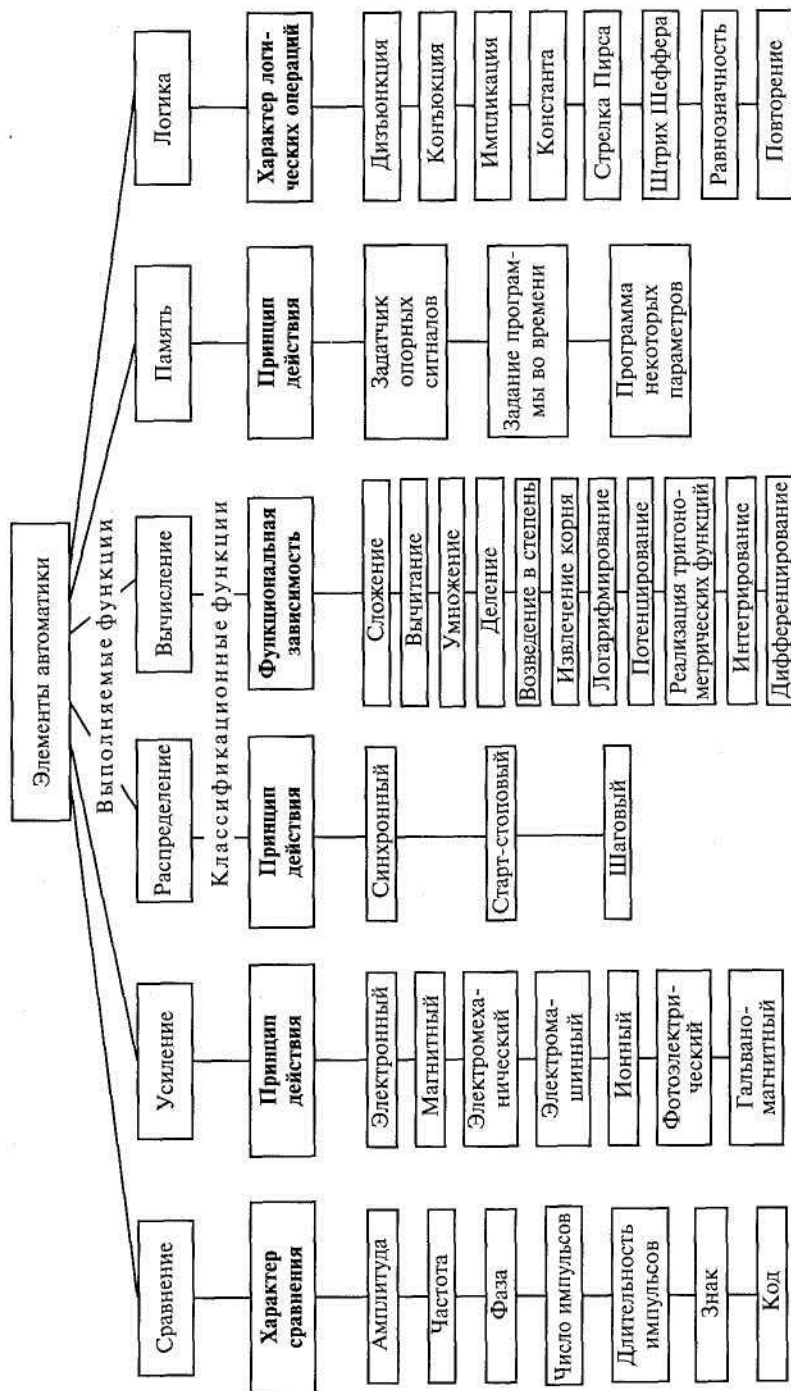


Рис. 1.8. Классификационные признаки элементов автоматики

Элементами исполнения могут быть всевозможные простейшие и сложные устройства, классифицировать которые трудно, хотя, видимо, их можно подразделить по принципу действия, имея в

виду также и разделение в зависимости от характера действия. К классу вспомогательных элементов можно отнести те, которые не получили еще окончательного конструктивного оформления.

Вопросы классификации при формировании определенного научного направления имеют большое значение, поэтому важна и дальнейшая разработка признаков разделения элементов и группирования их с одновременным решением вопросов определения особенностей расчета и исследования каждой группы.

Глава 2 ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИКИ

2.1. Основные понятия и определения

Каждый из элементов характеризуется какими-либо свойствами, которые определяются соответствующими характеристиками. Некоторые из этих характеристик являются общими для большинства элементов.

Главной общей характеристикой элементов является коэффициент преобразования (или коэффициент передачи), представляющий собой отношение выходной величины элемента y к входной величине x , или отношение приращения выходной величины Δy или dy (см. рис. 1.3) к приращению входной величины Δx или dx . В первом случае $K = y/x$ называется *статическим* коэффициентом преобразования, а во втором случае $K' = \Delta y/\Delta x \approx dy/dx$ при $\Delta x \rightarrow 0$ — *динамическим* коэффициентом преобразования. Связь между значениями x и y определяется функциональной зависимостью; значения коэффициентов K и K' зависят от формы характеристики элемента или вида функции $y = f(x)$, а также от того, при каких значениях величин подсчитываются K и K' . В большинстве случаев выходная величина изменяется пропорционально входной, и коэффициенты преобразования равны между собой, т.е. $K = K' = \text{const}$.

Статический и динамический коэффициенты преобразования характеризуются величинами, имеющими размерность. Например, если размерность входной величины $^{\circ}\text{C}$, а выходной a , то размерность коэффициента преобразования будет $a/^{\circ}\text{C}$. Коэффициенты K и K' могут быть также выражены в относительных (безразмерных) величинах при условии, что входная и выходная величины имеют одинаковую размерность.

Величина, представляющая собой отношение относительного приращения выходной величины $\Delta y/y$ к относительному приращению входной величины $\Delta x/x$, называется *относительным коэффициентом преобразования*

$$\eta_{\Delta} = \frac{\Delta y/y}{\Delta x/x} = \frac{\Delta y/\Delta x}{y/x}.$$

При $\Delta x \rightarrow 0$ получим

$$\eta_{\Delta} = \frac{dy/y}{dx/x} = \frac{dy/dx}{y/x} = K' \frac{1}{K}.$$

Например, если изменение входной величины на 2 % вызывает изменение выходной величины на 3 %, то относительный коэффициент преобразования $\eta_{\Delta} = 1,5$. Из последней формулы видно, что относительный коэффициент преобразования равен отношению динамического коэффициента преобразования к статическому. Следовательно, относительный коэффициент преобразования η_{Δ} размерности не имеет. Для преобразователя с пропорциональной характеристикой $\eta_{\Delta} = \eta = 1$.

Применительно к различным элементам автоматики коэффициенты преобразования K' , K , η_{Δ} и η имеют определенный физический смысл и свое название. Например, применительно к датчику коэффициент преобразования называется чувствительностью (статической, динамической, относительной); желательно, чтобы она была как можно больше. Для усилителей коэффициент преобразования принято называть коэффициентом усиления; желательно, чтобы он был также как можно больше. Для большинства усилителей (в том числе и электрических) величины x и y являются однородными, и поэтому коэффициент усиления представляет собой безразмерную величину.

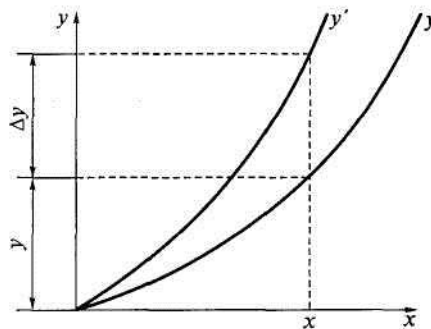


Рис. 2.1. Схема определения погрешности элемента

При работе элементов выходная величина y может отклоняться от требуемого значения за счет изменения их внутренних свойств (износа, старения материалов и т.п.) или за счет изменения внешних факторов (колебания напряжения питания, окружающей температуры и др.), при этом происходит изменение характеристики элемента (кривая y' на рис. 2.1). Это отклонение называется погрешностью, которая может быть абсолютной и относительной.

Абсолютной погрешностью (ошибкой) называется разность между полученным значением выходной величины y' и расчетным (желаемым) ее значением (см. рис. 2.1): $\Delta y = y' - y$.

Относительной погрешностью называется отношение абсолютной погрешности Δy к номинальному (расчетному) значению выходной величины y . В процентах относительная погрешность определяется как $\gamma = \Delta y \cdot 100/y$.

В зависимости от причин, вызывающих отклонение, различают температурную, частотную, токовую и другие погрешности.

Иногда пользуются *приведенной погрешностью*, под которой понимается отношение абсолютной погрешности к наибольшему значению выходной величины. В процентах приведенная погрешность

$$\gamma_{\text{прив}} = \Delta y \cdot 100/y_{\text{max}}.$$

Если абсолютная погрешность постоянна, то приведенная погрешность также постоянна.

Погрешность, вызванная изменением характеристик элемента со временем, называется *нестабильностью элемента*.

Порогом чувствительности называется минимальная величина на входе элемента, которая вызывает изменение выходной величины (т.е. уверенно обнаруживается с помощью данного датчика). Появление порога чувствительности вызывают как внешние, так и внутренние факторы (трение, люфты, гистерезис, внутренние шумы, помехи и др.).

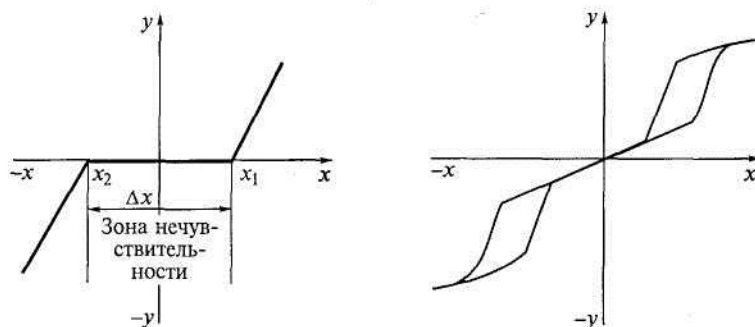


Рис. 2.2. Схема определения порога чувствительности:
а — характеристика элемента при наличии «мертвого» хода; б — характеристика элемента при наличии релейных свойств

На рис. 2.2, а показана характеристика элемента при наличии «мертвого» хода. Из характеристики видно, что когда входная величина x изменяется в пределах от x_1 до x_2 , выходная величина y не

изменяется и равна нулю. Значения x_1 и x_2 называются порогами чувствительности, а расстояние между x_1 и x_2 , равное Δx , — зоной нечувствительности. При наличии релейных свойств характеристика элемента может приобретать реверсивный характер (рис. 2.2, б). В этом случае она также обладает порогом чувствительности и зоной нечувствительности.

2.2. Динамический режим работы элементов

Динамическим режимом называется процесс перехода элементов и систем из одного установившегося состояния в другое, т. е. такое условие их работы, когда входная величина x , а следовательно, и выходная величина y изменяются во времени. Процесс изменения величин x и y начинается с некоторого порогового времени $t = t_n$ и может протекать в инерционном и безынерционном режимах. При отсутствии инерционности процесс изменения x и y может характеризоваться графиком, приведенным на рис. 2.3, а.

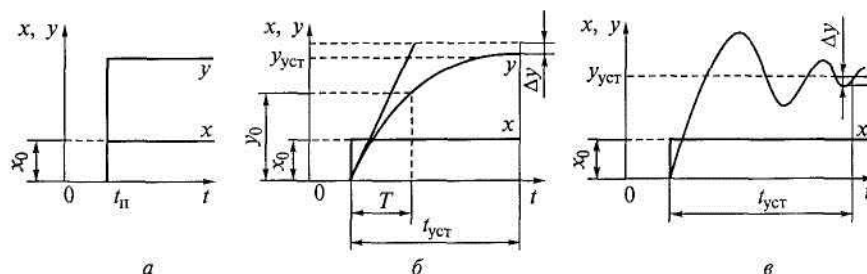


Рис. 2.3. Переходные процессы в элементе при скачкообразном изменении входной величины:

а — при отсутствии инерционности; б, в — при наличии инерционности

При наличии инерционности наблюдается запаздывание изменения y по отношению к изменению x . Тогда при скачкообразном изменении входной величины от 0 до x_0 (рис. 2.3, б) выходная величина y достигает установившегося $y_{уст}$ не сразу, а по истечении промежутка времени, в течение которого происходит переходный процесс. При этом переходный процесс может быть апериодическим (неколебательным) затухающим (см. рис. 2.3, б) или колебательным затухающим (рис. 2.3, в).

Время $t_{уст}$ (время установления), в течение которого выходная величина y достигает установившегося значения, зависит от инерционности элемента, характеризуемой постоянной времени T . В простейшем случае установление величины y происходит по показательному закону:

$$y = y_0(1 - e^{-t/T}),$$

где T — постоянная времени элемента, зависящая от параметров, связанных с его инерционностью.

Установление выходной величины y тем продолжительнее, чем больше значение T . Время установления $t_{уст}$ выбирается в зависимости от необходимой точности измерения датчика и составляет обычно (3... 5) T , что дает ошибку в динамическом режиме не более 5... 1 %. Степень приближения Δy (см. рис. 2.3, б, в) обычно оговаривается и в большинстве случаев составляет от 1 до 10 % от установившегося значения. Разность между значениями выходной величины в динамическом и статическом режимах называется *динамической погрешностью*. Желательно, чтобы она была как можно меньше. В электромеханических и электромашинных элементах инерционность в основном определяется механической инерцией движущихся и вращающихся частей. В электрических элементах инерционность определяется электромагнитной инерцией или другими подобными факторами. Инерционность может быть причиной нарушения устойчивой работы элемента или системы в целом.

2.3. Государственная система приборов

Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП) создана с целью обеспечения техническими средствами систем контроля, регулирования и управления технологическими процессами в различных отраслях народного хозяйства.

На ранних этапах создания средств автоматики в различных организациях и на предприятиях разрабатывалось множество различных приборов измерения и контроля со сходными техническими характеристиками, однако при этом не учитывалась возможность совместной работы приборов различных производителей. Это приводило к увеличению стоимости разработок сложных систем и тормозило широкое внедрение средств автоматизации. Поэтому в 1960 г. было принято решение о создании ГСП, а с 1961 г. начались работы по ее реализации.

В настоящее время ГСП представляет собой эксплуатационно, информационно, энергетически, метрологически и конструктивно организованную совокупность изделий, предназначенных для использования в качестве средств автоматических и автоматизированных систем контроля, измерения, регулирования технологических процессов, а также информационно-измерительных систем. ГСП стала технической базой для создания автоматических систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) и производством (АСУП) в промышленности. Ее развитие и применение способствовали формализации процесса проектирования АСУ ТП и переходу к машинному проектированию.

В основу создания и совершенствования ГСП положены следующие системотехнические принципы: типизация и минимизация многообразия функций автоматического контроля, регулирования и управления; минимизация номенклатуры технических средств; блочно-модульное построение приборов и устройств; агрегатное построение систем управления на базе унифицированных приборов и устройств; совместимость приборов и устройств.

По функциональному признаку все изделия ГСП разделены на следующие четыре группы устройств: получения информации о состоянии процесса или объекта; приема, преобразования и передачи информации по каналам связи; преобразования, хранения и обработки информации, формирования команд управления; использования командной информации.

В первую группу устройств в зависимости от способа представления информации входят: датчики; нормирующие преобразователи, формирующие унифицированный сигнал связи; приборы, обеспечивающие представление измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем, и устройства алфавитно-цифровой информации, вводимой оператором вручную.

Вторая группа устройств содержит коммутаторы измерительных цепей, преобразователи сигналов и кодов, шифраторы и дешифраторы, согласующие устройства, средства телесигнализации, телеизмерения и телеуправления. Эти устройства используют для преобразования как измерительных, так и управляющих сигналов.

Третью группу составляют анализаторы сигналов, функциональные и операционные преобразователи, логические устройства и устройства памяти, задатчики, регуляторы, управляющие вычислительные устройства и комплексы.

В четвертую группу входят исполнительные устройства (электрические, пневматические, гидравлические или комбинированные исполнительные механизмы), усилители мощности, вспомогательные устройства к ним, а также устройства представления информации.

Минимизация номенклатуры средств контроля и управления реализуется на основе двух принципов: унификации устройств одного функционального назначения на основе параметрического ряда этих изделий и агрегатирования комплекса технических средств для решения крупных функциональных задач.

В настоящее время разработаны параметрические ряды датчиков давления, расхода, уровня, температуры и электроизмерительных приборов. Тем не менее продолжается их оптимизация по технико-экономическим показателям, например по критерию минимума суммарных затрат на удовлетворение заданных потребностей. Этот критерий основан на противоречии между интересами потребителя и изготовителя: чем меньше в ряду приборов, тем меньше затраты на их разработку и освоение, и тем большими партиями они выпускаются, что также снижает затраты изготовителя. Увеличение числа приборов в ряду дает экономию потребителю за счет более эффективного использования их возможностей или более точного соблюдения режимов технологических процессов.

Агрегатные комплексы (АК) представляют собой совокупность технических средств, организованных в виде функционально-параметрических рядов, охватывающих требуемые диапазоны измерения в различных условиях эксплуатации и обеспечивающих выполнение всех функций в пределах заданного класса задач.

Принцип агрегатирования в ГСП применяют очень широко. Унифицированная базовая конструкция датчиков теплоэнергетических величин с унифицированными пневматическим и электрическим

сигналами была создана всего из 600 наименований деталей, при этом было получено 136 типов и 863 модификации этих датчиков.

Заложенные в ГСП общие для всех изделий понятия совместимости можно сформулировать следующим образом.

Информационная совместимость — совокупность стандартизированных характеристик, обеспечивающих согласованность сигналов связи по видам и номенклатуре, их информативным параметрам, уровням, пространственно-временным и логическим соотношениям и типу логики. Для всех изделий ГСП приняты унифицированные сигналы связи и единые интерфейсы, которые представляют собой совокупность программных и аппаратных средств, обеспечивающих взаимодействие устройств в системе.

Конструктивная совместимость — совокупность свойств, обеспечивающих согласованность конструктивных параметров и механическое сопряжение технических средств, а также выполнение эргономических норм и эстетических требований при совместном использовании.

Эксплуатационная совместимость — совокупность свойств, обеспечивающих работоспособность и надежность функционирования технических средств при совместном использовании в производственных условиях, а также удобство обслуживания, настройки и ремонта.

Метрологическая совместимость — совокупность выбранных метрологических характеристик и свойств средств измерений, обеспечивающих сопоставимость результатов измерений и возможность расчета погрешности результатов измерений при работе технических средств в составе систем.

По роду используемой энергии носителя информационных сигналов устройства ГСП делятся на электрические, пневматические, гидравлические, а также устройства, работающие без использования вспомогательной энергии — приборы и регуляторы прямого действия. Для того чтобы обеспечить совместную работу устройств различных групп, применяют соответствующие преобразователи сигналов. В АСУ наиболее эффективно комбинированное применение устройств различных групп.

Достоинства электрических приборов общеизвестны. Это, в первую очередь, высокая чувствительность, точность, быстродействие, удобство передачи, хранения и обработки информации. Пневматические приборы обеспечивают повышенную безопасность при применении в легко воспламеняемых и взрывоопасных средах, высокую надежность в тяжелых условиях работы и агрессивной атмосфере. Однако они уступают электронным приборам по быстродействию, возможности передачи сигнала на большое расстояние. Гидравлические приборы позволяют получать точные перемещения исполнительных механизмов и большие усилия.

В технической документации наиболее широко используется такой классификационный признак, как *тип изделия* — совокупность изделий одинакового функционального назначения и принципа действия, сходных по конструктивному исполнению и имеющих одинаковые главные параметры. В состав одного типа может входить несколько типоразмеров и модификаций или исполнений изделия. *Типоразмеры* изделия одного типа различаются значениями главного параметра (обычно выделяются для однофункциональных изделий).

Модификация — совокупность изделий одного типа, имеющих определенные конструкционные особенности или определенное значение неглавного параметра. Под *исполнением* обычно понимают изделия одного типа, имеющие определенные конструктивные особенности, влияющие на их эксплуатационные характеристики, например тропическое или морское.

Комплекс — более крупная классификационная группировка, чем тип. В ГСП комплексы разделяются на унифицированные и агрегатные. Отличительной особенностью *унифицированного комплекса* является то, что любые сочетания его технических средств между собой не приводят к реализации этими средствами новых функций. В *агрегатных комплексах* различным сочетанием технических средств можно реализовать новые функции. Наиболее широко используются агрегатные комплексы средств электроизмерительной техники (АСЭТ), вычислительной техники (АСВТ), телемеханики (АСТТ), сбора первичной информации (АСПИ) и др.

Обмен информацией между техническими средствами ГСП реализуется при помощи сигналов связи и интерфейсов.

В АСУ наиболее распространены электрические сигналы связи, достоинствами которых являются высокая скорость передачи сигнала, низкая стоимость и доступность источников энергии, простота прокладки линий связи. Пневматические сигналы применяют в основном в нефтяной, химической и нефтехимической промышленности, где необходимо обеспечить взрывобезопасность и не требуется высокое быстродействие. Гидравлические сигналы в основном применяют в гидравлических следящих

системах и устройствах управления гидравлическими исполнительными механизмами.

Информационные сигналы могут быть представлены в естественном или унифицированном виде. *Естественным сигналом* называется сигнал первичного измерительного преобразователя, вид и диапазон изменения которого определяются его физическими свойствами и диапазоном изменения измеряемой величины. Обычно это выходные сигналы измерительных преобразователей, чаще всего электрические, которые можно передать на небольшое расстояние (до нескольких метров). Вид носителя информации и диапазон изменения *унифицированного сигнала* не зависят от измеряемой величины и метода измерения. Обычно унифицированный сигнал получают из естественного с помощью встроенных или внешних нормирующих преобразователей. Основные виды унифицированных аналоговых сигналов ГСП приведены в табл. 2.1.

Из электрических сигналов наиболее распространены унифицированные сигналы постоянного тока и напряжения. Частотные сигналы используют в телемеханической аппаратуре и комплексе технических средств локальных информационно-управляющих систем.

Таблица 2.1

Основные виды унифицированных электрических сигналов ГСП

Постоянный ток, мА	Постоянное напряжение, мВ	Переменное напряжение, В	Частота, кГц
0...5	0...10	0...2	4...8
0...20	0...20	-1...0...1	2...4
-5...0...5	-10...0...10	—	—
4...20	0...1000	—	—

При создании сложных систем, особенно на базе микропроцессорных устройств и вычислительных средств, обмен информацией между техническими средствами верхнего уровня осуществляется с помощью интерфейсов. *Интерфейс* — это совокупность программных и аппаратных средств, устанавливающих и реализующих взаимодействие устройств, входящих в систему, и предназначенных для сбора, переработки и использования информации.

Интерфейс состоит из программной и аппаратной частей. Программная (информационная) часть определяет протокол (порядок) обмена сигналами и информацией (алгоритмы и временные диаграммы). Аппаратная часть (интерфейсные карты, платы) позволяет осуществлять информационный обмен управляющими, адресными, известительными и другими сигналами между функциональными модулями.

2.4. Бионические аспекты элементов автоматики

Развитие бионики открывает новые возможности в построении элементов автоматики, которые заключаются в изучении тех приемов, к которым прибегает природа для решения различных задач. Конечная цель данных исследований — воплощение таких приемов в виде инструментов и приборов. Это положение может быть распространено на всю технику, но в большей степени оно относится к элементам автоматики, поскольку, выявляя новый механизм работы рецептора, можно в конечном результате рассчитывать на его реализацию в виде элемента. Реализация может быть осуществлена, если имеется достаточно большой арсенал различных известных физических принципов, свойств, эффектов, на основе которых и можно построить данный элемент. В этом отношении важна разработка физических основ теории элементов, от успехов которой зависит развитие бионических разработок элементов автоматики, поскольку здесь плодотворное решение связано с сопоставлением выявленного ранее неизвестного механизма работы живого органа и соответствующего физического принципа, явления, свойства.

Развитие техники, космических исследований, новых производств, средств связи и сообщений определило потребность в новых элементах и новых системах. При этом обнаружилось, что живая природа во многом превосходит сознание человека так же, как многие автоматические системы и устройства превосходят по отдельным параметрам органы чувств человека. Эти и многие другие обстоятельства привели к тому, что постепенно почти все обитатели суши и моря стали предметом изучения инженеров, пытавшихся разгадать тонкости работы органов ощущения, восприятия и

ориентации многих живых организмов. В последние годы такие разработки велись настолько интенсивно, что возникла реальная возможность создания нового научного направления — бионики.

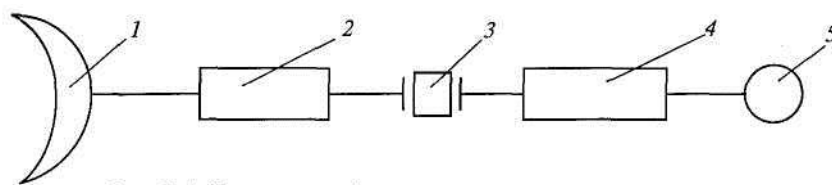


Рис. 2.4. Схема устройства для предсказания штормов:
1 — элемент информации; 2 — резонатор; 3 — пьезоэлектрический элемент; 4 — усилитель; 5 — индикатор

В настоящий момент можно назвать многие приборы, принцип действия которых похож на работу отдельных органов живых организмов. Так, например, по подобию с органами медуз было сконструировано устройство, позволяющее предсказывать шторм. Структурная схема такого устройства представлена на рис. 2.4. Оно состоит из элемента информации 1 в виде воспринимающего инфразвуковые волны рупора, резонатора 2, пьезоэлектрического элемента 3, усилителя 4 и индикатора 5.

Изучение механизмов переработки сигналов в органах чувств всевозможных организмов позволило уже в настоящее время построить много чувствительных, надежных, малогабаритных и необычных по своему действию устройств и систем.

Значительную роль должна сыграть бионика и для выявления новых, углубления содержания существующих характеристик элементов автоматики, поиска единой основы рецепторов живых организмов и технических элементов.

Одной из проблем бионики, непосредственно относящейся к элементам автоматики, является выработка единообразной терминологии. В биологии и технике существуют такие явления, которые не только похожи по существу, но и обозначаются одинаковым термином (например, адаптация). Однако для большинства явлений, свойств, понятий не существует идентичности терминологии. Между тем внимательное изучение их позволяет обнаружить, что в технике и биологии существует много явлений и механизмов, аналогичных по своему действию.

Существует еще целый ряд вопросов, близких как теории элементов автоматики, так и бионике, совместное рассмотрение которых открывает большие перспективы для дальнейшего развития этих двух научных направлений.

РАЗДЕЛ II ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Глава 3

КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

3.1. Общие сведения о преобразователях

Ни одна система управления не может работать без информации о состоянии объекта управления и его реакции на управляющие воздействия. Элементами систем, обеспечивающими получение такой информации, являются измерительные преобразователи. Специалисты по автоматике также используют термины «первичный преобразователь» или «датчик». В дальнейшем термин «первичный преобразователь» будем использовать при описании принципа действия того или иного измерительного устройства, а термин «датчик» — при пояснении конструктивного исполнения.

Автоматизация производственных процессов, научных экспериментов и исследований требует все большего объема измерений различных физических величин. Об их числе можно судить по системе единиц СИ, которая включает в себя более 120 физических единиц. В настоящее время в промышленности существует примерно следующее распределение средств измерений: температуры — 50 %, расхода (объемного и массового) — 15 %, давления — 10 %, уровня — 5 %, количества (массы, объема) — 5 %, времени — 4 %, электрических и магнитных величин — 5 %. Объем выполняемых измерений может быть очень большим.

Число типов измерительных преобразователей значительно превосходит число измеряемых величин, так как одну и ту же физическую величину можно измерять различными методами и датчиками разных конструкций.

Для большинства измерительных преобразователей (ИП) характерно измерение электрическими методами не только электрических и магнитных, но и других физических величин. При этом используется предварительное преобразование неэлектрической величины в электрическую. Такой подход обусловлен достоинствами электрических измерений: электрические сигналы просто и быстро передаются на большие расстояния; легко, быстро и точно преобразуются в цифровой код; позволяют обеспечить высокую точность и чувствительность.

Необходимо отметить, что не всегда измерительный преобразователь выполняет непосредственно функции измерения. В ряде случаев ИП можно использовать в качестве преобразователя одной физической величины в другую, чаще всего из неэлектрической в электрическую. Например, при измерении уровня поплавков в емкости может быть рычажно связан с реостатным преобразователем, включенным в электрическую цепь. В этом случае изменение уровня, измеряемое перемещением поплавка, будет преобразовываться в изменение электрического сигнала (напряжения, тока).

Для эффективного функционирования ИП должны отвечать ряду требований, основными из которых являются: высокая статическая и динамическая точность работы, обеспечивающая формирование выходного сигнала с минимальными искажениями; высокая избирательность — датчик должен реагировать только на изменения той величины, для которой он предназначен; стабильность характеристик во времени; отсутствие влияния нагрузки в выходной цепи на режим входной цепи; высокая надежность при работе в неблагоприятных условиях внешней среды; повторяемость характеристик (взаимозаменяемость); простота и технологичность конструкции; удобство монтажа и обслуживания; низкая стоимость.

Необходимую для управления информацию о состоянии объекта и внешних воздействиях получают в виде значений отдельных физических величин с помощью соответствующих технических устройств, которые в автоматике называют *измерительными преобразователями* (ИП). В отличие от измерительных приборов, где такая информация представлена в виде, удобном для непосредственного восприятия оператором, информация от ИП поступает в виде определенной физической величины, удобной для передачи и дальнейшего преобразования в системе автоматике. Эту величину называют *сигналом*, и она однозначно связана с контролируемой физической величиной или параметром того или иного технологического процесса.

ГСП охватывает лишь часть контролируемых величин, которые наиболее часто используют в практике автоматизации. В ГСП все контролируемые величины разбиты на пять следующих групп: теплоэнергетические, электроэнергетические, механические величины, химический состав и физические свойства.

Теплоэнергетические величины: температура, давление, перепад давлений, уровень и расход.

Электроэнергетические величины: постоянные и переменные ток и напряжение, мощность (активная и реактивная), коэффициент мощности, частота и сопротивление изоляции.

Механические величины: линейные и угловые перемещения, угловая скорость, деформация усилия, вращающие моменты, число изделий, твердость материалов, вибрация, шум и масса.

Химический состав: концентрация, состав, химические свойства.

Физические свойства характеризуют следующие величины: влажность, электропроводность, плотность, вязкость, освещенность и др.

Устройства, в которых однократно (первично) преобразуется измеряемая физическая величина, принято называть *первичными* ИП.

ИП могут соединяться, образуя следующие структурные схемы: однократного прямого преобразования; последовательного прямого преобразования; дифференциальную; с обратной связью (компенсационную).

Простейшие ИП состоят из одного преобразователя. В случае последовательного соединения нескольких первичных преобразователей выходная величина предыдущего преобразователя является входной величиной последующего. Последовательное соединение ИП применяют в том случае, когда однократное преобразование не дает удобного для использования выходного сигнала. При дифференциальной схеме устраняется влияние на результат преобразования искажающих внешних факторов благодаря сопоставлению (сравнению) преобразованной и некоторой эталонной величин, одинаково подверженных действию этих факторов. Схема ИП с обратной связью характеризуется

высокой точностью, универсальностью и малой зависимостью коэффициента преобразования от внешних возмущений.

ИП бывают с естественным и унифицированным выходными сигналами.

Естественный выходной сигнал формируется первичными ИП естественным путем и может представлять собой угол поворота, перемещение, усилие, напряжение (постоянное и переменное), сопротивление (активное и комплексное), электрическую емкость, частоту и др. ИП с естественным выходным сигналом (термопары, терморезисторы, тензодатчики и др.) широко применяют при автоматизации простых объектов.

Унифицированный сигнал — это сигнал определенной физической природы, изменяющийся в определенных фиксированных пределах независимо от вида измеряемой величины, метода и диапазона ее измерения.

Преобразователи, служащие для изменения масштаба сигнала, называют *масштабными* ИП.

Для получения унифицированных аналоговых сигналов применяют ИП, называемые *нормирующими*.

Специфика контролируемой величины существенно влияет на метод преобразования, используемый в первичном ИП.

Типы преобразователей, применяемых в ГСП, подразделяются на шесть групп: механические, электромеханические, тепловые, электрохимические, оптические и электронно-ионизационные.

Преобразователи, предназначенные для передачи сигнала измерительной информации на расстояние, называют *передающими*.

3.2. Классификация измерительных преобразователей

В настоящее время существует множество разнообразных по принципу действия и назначению ИП. Непрерывное развитие науки и технологии приводит к появлению все новых преобразователей. Разрабатываемые классификации помогают разобраться в этом многообразии. Создать универсальную классификацию, удовлетворяющую запросам всех возможных пользователей конкретной предметной области, — задача практически неразрешимая.

В качестве классификационных признаков ИП можно принять многие характеристики преобразователей: вид функции преобразования, вид входной и выходной величин, принцип действия, конструктивное исполнение и т. д.

По виду используемой энергии ИП можно подразделить на электрические, механические, пневматические и гидравлические.

По соотношению между входной и выходной величинами различают следующие виды ИП:

неэлектрических величин в неэлектрические (рычаги, редукторы, мембраны, пружины и др.);

неэлектрических величин в электрические (потенциометры, термопары, емкостные и индуктивные ИП и др.);

электрических величин в электрические;

электрических величин в неэлектрические (измерительные механизмы электроизмерительных приборов).

В зависимости от вида выходного сигнала различают ИП аналоговые, дискретные, релейные, с естественным или унифицированным выходным сигналом.

По виду функции преобразования различают следующие ИП: масштабные — изменяющие в определенное число раз входную величину без изменения ее физической природы; функциональные — осуществляющие однозначное функциональное преобразование входной величины с изменением ее физической природы или без изменения; операционные — выполняющие над входной величиной математические операции высшего порядка (дифференцирование или интегрирование по временному параметру).

По виду структурной схемы различают преобразователи прямого однократного преобразования, последовательного прямого преобразования, дифференциальные, с обратной связью (компенсационная схема).

По характеру преобразования входной величины в выходную ИП подразделяются на параметрические, генераторные, частотные, фазовые.

По виду измеряемой физической величины различают ИП линейных и угловых перемещений, давления, температуры, концентрации вещества и т. д.

По физическим явлениям, положенным в основу принципа действия, в ГСП принята следующая

классификация ИП: *механические* — с упругим чувствительным элементом, дроссельные, ротаметрические, объемные, поплавковые, скоростные; *электромеханические* — тензорезистивные, термоэлектрические, термомеханические, термокондуктометрические, манометрические; *электрохимические* — кондуктометрические, потенциометрические, полярографические; *оптические* — фотоколлометрические, рефрактометрические, оптико-акустические, нефелометрические; *электронные* и *ионизационные* — индукционные, хроматографические, радиоизотопные, магнитные.

По динамическим характеристикам ИП подразделяются в соответствии с видом передаточной функции.

В зависимости от вида статической характеристики ИП делятся на реверсивные (двухтактные), у которых знак выходного сигнала определяется знаком входного, и нереверсивные (однотактные), у которых знак выходного сигнала не зависит от знака входного.

Даже столь развернутая классификация по ряду признаков не является исчерпывающей, так как за каждым определением стоит группа преобразователей с разными техническими и конструктивными характеристиками.

3.3. Статические и динамические характеристики измерительных преобразователей

Статическая характеристика измерительного преобразователя — это функциональная зависимость между входной x и выходной y величинами в установившемся режиме. Как и любую функцию, статическую характеристику можно представить аналитически (уравнением), в виде графика или таблично. Обычно в уравнение преобразования входят конструктивные параметры. Для реального преобразователя статическую характеристику можно получить экспериментально. Для более наглядного восприятия очень широко используют графическую форму представления статической характеристики. Наиболее часто используемые статические характеристики датчиков представлены на рис. 3.1.

В общем случае статические характеристики ИП не отличаются от аналогичных характеристик обобщенных звеньев систем управления, так как сами входят в их число.

Статическая характеристика может быть линейной и нелинейной (см. рис. 3.1, *а*, *б*). При этом необходимо отличать нелинейность как требуемую функциональную зависимость (например, экспоненциальную, логарифмическую) от собственно нелинейности как погрешности линейности.

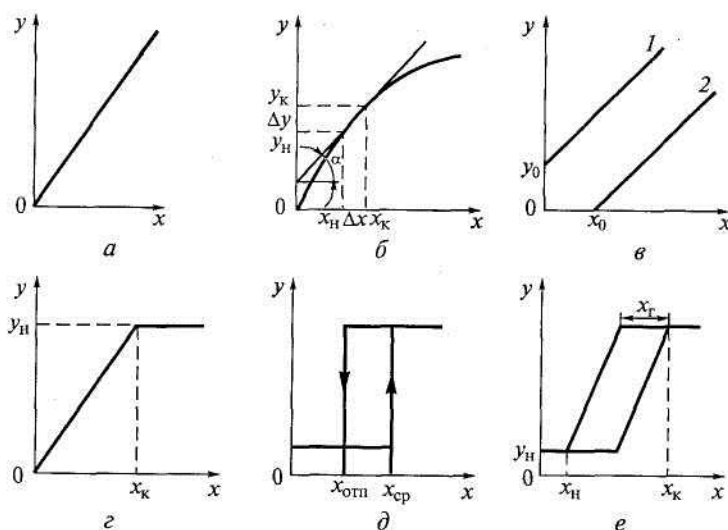


Рис. 3.1. Статистические характеристики датчиков:
а — линейная; *б* — нелинейная; *в* — с сигналом холостого хода и зоной нечувствительности; *г* — с участком насыщения; *д* — релейного характера; *е* — с петлей гистерезиса

В общем случае уравнение преобразования для линейной статической характеристики имеет вид

$$y = f(x) = \pm B + Kx,$$

где B — постоянная; K — коэффициент преобразования.

Если $B = 0$, то график уравнения проходит через начало координат и ИП не имеет ни выходного сигнала холостого хода y_0 , ни зоны нечувствительности $0 \dots x_0$ (см. рис. 3.1, а).

При $B > 0$ характеристика смещена относительно начала координат по оси абсцисс на величину выходного сигнала холостого хода $y_0 = B$ (см. рис. 3.1, в, прямая 1).

При $B < 0$ характеристика имеет зону нечувствительности $0 \dots x_0$, в пределах которой при изменении x $y = 0$ (см. рис. 3.1, в, прямая 2).

Статическая характеристика может иметь участок насыщения (см. рис. 3.1, з), тогда она описывается двумя уравнениями: на участке $0 \dots x_k$ уравнением $y = Kx$; на участке $x > x_k$ уравнением $y = y_n$.

При $K = \infty$ характеристика принимает релейный характер (см. рис. 3.1, д). Такая характеристика, присущая датчикам позиционного регулирования, характеризуется коэффициентом возврата:

$$K_v = x_{отп}/x_{ср},$$

где $x_{отп}$, $x_{ср}$ — значения входного сигнала, обеспечивающие соответственно отпущение и срабатывание датчика (реле).

Ряд датчиков имеет неоднозначность хода статической характеристики при увеличении и уменьшении входной величины x (см. рис. 3.1, е). Это явление носит название гистерезиса и характеризуется соответствующим коэффициентом:

$$K_r = x_r/(x_k - x_n),$$

где x_r — ширина зоны неоднозначности; x_k , x_n — значения соответственно конца и начала рабочего диапазона входной величины.

На рис. 3.1 представлены характеристики одноктактных (неревверсивных) датчиков. Характеристики двухтактных датчиков имеют вторую аналогичную ветвь, расположенную в третьем квадранте симметрично началу координат.

Нелинейную характеристику можно преобразовать в линейную (линеаризовать) или функциональную с помощью аппроксимации.

Для нелинейных характеристик коэффициент преобразования не является постоянной величиной, поэтому в этом случае используют *дифференциальный коэффициент преобразования* K_d , под которым понимают предел отношения выходной и входной величин:

$$K_d = \frac{dy}{dx} = \left. \frac{\Delta y}{\Delta x} \right|_{\Delta x \rightarrow 0}.$$

Дифференциальный коэффициент преобразования в общем случае меняется от точки к точке и определяется углом α наклона касательной к характеристике в рабочей точке; $K_d = \operatorname{tg} \alpha$. Коэффициент преобразования характеризует *чувствительность датчика* K_s и в зависимости от наименования входной и выходной величин может быть представлен в размерном или безразмерном виде.

Если на характеристике выделить линейный участок, в пределах которого работает преобразователь, то разность между верхним и нижним значениями входного (выходного) сигнала определяет рабочий диапазон Δ_p его изменения, а их отношение — динамический диапазон Δ_d (см. рис. 3.1, б):

$$\Delta_p x = x_k - x_n; \quad \Delta_d x = x_k/x_n; \quad \Delta_p y = y_k - y_n; \quad \Delta_d y = y_k/y_n.$$

Порог чувствительности — это минимальное значение входного сигнала x , вызывающего появление заметного выходного сигнала y .

Погрешности датчиков делятся на основные и дополнительные. *Основная погрешность датчика* — максимальная разность между измеренным значением выходного сигнала y_p и его истинным значением y_k , определяемым по идеальной статической характеристике для данной входной величины при нормальных эксплуатационных условиях. Она может выражаться как в абсолютных единицах: $\Delta = y_p - y_k$, так и в относительных. В последнем случае она равна отношению абсолютной погрешности к

истинному значению выходного сигнала:

$$\delta = (y_p - y_n) / y_n = \Delta / y_n.$$

Можно использовать относительную приведенную погрешность γ , равную отношению максимальной абсолютной погрешности Δ в диапазоне измеряемой величины к верхнему значению этого диапазона y_k в процентах:

$$\gamma = (\Delta_{\max} / y_k) 100.$$

Дополнительные погрешности — это погрешности, вызываемые условиями внешней среды и внутренними процессами в деталях преобразователя. К этим процессам можно отнести: изменения температуры, влажности; колебания напряжения источника питания, механические воздействия; старение и износ материала. Дополнительная погрешность выражается обычно в процентах изменения выходной величины на определенную величину возмущающего параметра.

В зависимости от специфики применения датчиков погрешности нормируются абсолютным значением, относительным или *классом точности*, определяющимся обобщенной характеристикой основной приведенной и дополнительных погрешностей.

Статические характеристики позволяют оценить работу преобразователей в установившемся режиме. Однако в реальных условиях датчикам иногда приходится работать в условиях быстроменяющихся процессов, т. е. в динамическом режиме, когда на вход поступают сигналы, изменяющиеся во времени. В этих случаях начинают проявляться явления отставания выходного сигнала от входного изменения его частоты, фазы, амплитуды.

По *динамическим характеристикам* большинство датчиков относится к усилительным, апериодическим и колебательным звеньям первого и более высоких порядков. Наиболее используемые характеристики датчиков: частотная характеристика и передаточная функция, а параметры — постоянная времени, время запаздывания и коэффициент усиления.

Глава 4

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

4.1. Структурные схемы измерительных преобразователей

Несмотря на все многообразие ИП, их структурные схемы можно свести к нескольким типам (табл. 4.1).

Структурная схема *прямого однократного преобразования* реализуется во многих ИП с естественными выходными сигналами (например, в термopарах, датчиках давления и разрежения), в которых измеряемая величина преобразуется непосредственно в электрический сигнал, перемещение или усилие. Статическая характеристика, погрешность и другие свойства здесь полностью определяются параметрами самого чувствительного элемента.

В тех случаях, когда первичное преобразование не позволяет получить удобный или требуемый для дальнейшего использования сигнал, применяют структурные схемы с несколькими *последовательными преобразованиями*, например при необходимости получение унифицированного выходного сигнала, преобразования неэлектрической величины в электрическую, коррекции статической или динамической характеристики преобразователя. Суммарный коэффициент преобразования (общая чувствительность), равный произведению коэффициентов преобразования отдельных звеньев ИП, можно получить достаточно высоким, однако при этом увеличивается общая погрешность преобразования, равная сумме погрешностей составляющих звеньев.

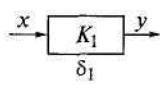
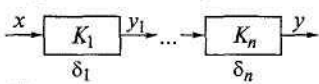
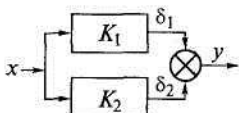
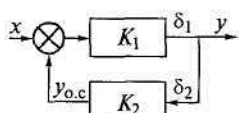
В датчиках, построенных по *дифференциальной схеме*, измеряемая величина подается одновременно на два идентичных измерительных преобразователя. Выходной сигнал датчика пропорционален разности выходных сигналов ИП каждого из каналов. Если выходные сигналы имеют одинаковые знаки, то орган сравнения выполняет операцию вычитания, если знаки разные — операцию суммирования.

Возможны варианты, когда на один из входов подается эталонный сигнал и сравнение

осуществляется с ним или информация преобразуется по одному каналу в реальных условиях, а по другому — в эталонных.

Таблица 4.1

Типовые структурные схемы измерительных преобразователей

Тип схемы	Статическая характеристика	Погрешность преобразования
Прямого однократного преобразования 	$y = K_1 x$	$\delta_n = \delta_1$
Последовательного прямого преобразования 	$y = \prod_{i=1}^n K_i x$	$\delta_n = \sum_{i=1}^n \delta_i$
Дифференциальная 	$y = (K_1 - K_2)x$	$\delta_n = \delta_1 \frac{K_1}{K_1 + K_2} +$ $+ \delta_2 \frac{K_2}{K_1 + K_2}$
С обратной связью (компенсационная) 	$y = \frac{K_1}{1 + K_1 K_2} x$	$\delta_n = \delta_1 \frac{1}{1 + K_1 K_2} -$ $- \delta_2 \frac{1}{1 + 1/(K_1 K_2)}$

* Примечание. В формулах приняты следующие обозначения: x — измеряемая величина; y — выходная величина; δ_i — погрешность звена преобразователя; δ_n — общая погрешность преобразователя; K — коэффициент преобразования

К достоинствам дифференциальных схем построения датчиков следует отнести: значительное уменьшение аддитивных (постоянных) составляющих общей погрешности, обусловленных воздействием возмущающих факторов; увеличение чувствительности вдвое при подаче входного сигнала на оба входа; получение реверсивной статической характеристики; снижение нелинейности статической характеристики и постоянных составляющих выходного сигнала по сравнению с характеристиками отдельных ИП, входящих в схему.

Наиболее совершенной схемой ИП является *схема с обратной связью*, или компенсационная схема. В датчиках, построенных по этой схеме, обеспечивается автоматическое уравнивание контролируемой величины компенсирующей величиной того же рода непосредственно или после предварительного преобразования. Основное достоинство такой схемы состоит в ее способности компенсировать значительные изменения параметров измерительного тракта. Кроме того, основная часть энергии, необходимой для работы датчика, берется от дополнительных источников, а не от измерительного элемента.

Преобразователи с отрицательной обратной связью принципиально точнее, чем схемы прямого последовательного преобразования. Отрицательная обратная связь существенно снижает влияние погрешностей звеньев прямой цепи на результат преобразования. Любые ошибки и возмущение звена, не охваченного обратной связью, полностью передаются на выход преобразователя, поэтому при построении ИП целесообразно стремиться к тому, чтобы охватить обратной связью как можно больше звеньев. При величине $K_1 K_2 = 20 \dots 30$, что нетрудно обеспечить на практике, общая погрешность преобразования практически определяется только погрешностью δ_2 обратной связи, вследствие чего требования к погрешности δ_1 прямого канала можно значительно снизить (см. табл. 4.1).

Датчики с обратной связью обладают высокой чувствительностью и позволяют легко изменять параметры настройки путем изменения коэффициентов преобразования обратной цепи.

Структурные схемы реальных ИП могут представлять собой любую комбинацию из рассмотренных выше типовых структур. В цепи последовательного преобразования измеряемого сигнала принято

различать первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) и промежуточные преобразователи (рис. 4.1). Измеряемая величина воздействует непосредственно на первичный преобразователь. Очень часто метод первичного преобразования входной величины определяет наименование всего измерительного преобразователя -или прибора. Промежуточные преобразователи могут выполнять функции усиления, линеаризации, преобразования рода сигнала и др. В частности, на рис. 4.1 представлена упрощенная схема ИП с естественным и унифицированным выходами.

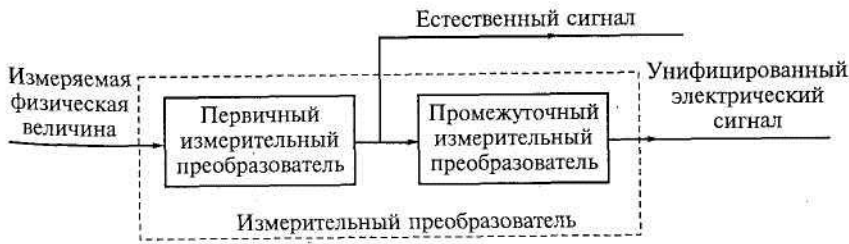


Рис. 4.1. Блок-схема цепи последовательного преобразования

4.2. Унификация и стандартизация измерительных преобразователей

В отечественном приборостроении вопросы унификации и стандартизации измерительных преобразователей решаются в рамках Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации. Для того чтобы создавать сложные информационные системы (управляющие, измерительные), необходимо в первую очередь обеспечить информационную совместимость технических средств. С этой целью в рамках ГСП сначала были унифицированы, а затем и стандартизированы выходные сигналы ИП (ГОСТ 26.010— 83, 26.011-83, 26.013-83, 26.014-83).

По виду выходных сигналов различают измерительные преобразователи с естественным и унифицированным выходными сигналами. Первые представляют собой устройства, в которых осуществляется первичное (обычно однократное) преобразование измеряемой физической величины. Естественное формирование сигнала здесь обеспечивается методом преобразования и конструкцией ИП. Такие преобразователи чаще всего применяют в устройствах прямого регулирования либо при централизованном контроле сравнительно простых объектов. В ГСП приняты десять типов естественных выходных сигналов (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Виды сигналов измерительных преобразователей

При создании относительно сложных систем с использованием ЭВМ и необходимости передачи

сигналов на большие расстояния применяют преобразователи естественных сигналов в унифицированные. Для этих целей разрабатываются специальные нормирующие преобразователи, параметры выходных сигналов которых приведены на рис. 4.2.

Отдельную группу составляют преобразователи с дискретным (релейным) выходным сигналом, контактная группа которых изменяет свое положение при достижении измеряемой величиной заданного значения. Их применяют для позиционного регулирования и сигнализации.

Глава 5

ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ВЫХОДНЫМИ СИГНАЛАМИ

5.1. Основные понятия

Одним из главных элементов в любой системе автоматики и телемеханики являются *электрические датчики*. Назначение датчика — преобразование контролируемой или регулируемой величины в величину другого рода, удобную для дальнейшего использования. В большинстве случаев датчики преобразуют неэлектрическую величину в электрическую, например температура преобразуется при помощи термопары в ЭДС, а механическое перемещение, связанное с изменением положения якоря электромагнита, изменяет индуктивность его обмотки. В некоторых случаях с помощью датчиков производится преобразование одних электрических величин в Другие. В качестве таких датчиков могут служить усилитель, измерительный трансформатор или фазочувствительная схема.

По характеру электрических величин, получаемых на выходе, электрические датчики делятся на параметрические, или пассивные, и генераторные, или активные. К параметрическим датчикам относятся такие элементы, у которых изменение контролируемой величины вызывает соответствующее изменение параметра электрической цепи (активного сопротивления, индуктивности или емкости). К генераторным относятся такие датчики, которые сами являются источниками электрической энергии, причем возникающая на выходе энергия пропорциональна контролируемой величине.

К электрическим датчикам независимо от типа и устройства предъявляются следующие основные требования:

- надежность в работе;

- достаточная чувствительность, что позволяет существенно упростить схему системы, например автоматического контроля. В этом случае отпадает необходимость в усилении сигнала, точность системы повышается;

- непрерывная зависимость его выходной величины y от входной x , т. е. $y = f(x)$, где x — контролируемая величина, а y — выходная, изменяющаяся от величины x ;

- минимальные габаритные размеры и вес;

- необходимый диапазон изменения параметров;

- отсутствие обратного воздействия датчика на измеряемый процесс. Так, например, при изменении температуры контролируемой среды из-за наличия в ней датчика может появиться значительная погрешность измерения;

- небольшая инерционность (интервал времени между изменением входной величины и соответствующим изменением выходной величины);

- работа в заданных условиях окружающей среды.

На работу электрических датчиков оказывают влияние следующие факторы: периодичность и максимальная частота процесса, знакопеременность кривой изменения процесса и наличие в ней постоянной составляющей, температурные условия места измерения, атмосферные условия (влажность, температура воздуха и т.д.), наличие вибрации, ускорений или сотрясений в установке и др.

5.2. Электроконтактные датчики

Контактные датчики — это датчики параметрического типа, в которых изменяется электрическое сопротивление при изменении той или иной механической величины. Они предназначены для преобразования механического перемещения в электрический сигнал. При достижении измеряемой величиной определенного значения замыкаются или размыкаются электрические контакты, включенные в те или иные цепи, которые сигнализируют, что перемещение больше или меньше

определенного значения.

Контактные датчики широко применяются в системах автоматического контроля и сортировки размеров, а также в системах автоматической сигнализации различных физических величин. Статическая характеристика контактного датчика имеет релейный характер, так как его выходная величина — сопротивление электрической цепи — изменяется скачком.

На рис. 5.1, *а* изображен простейший контактный датчик с одной парой контактов — однопредельный. Замыкание контактов/и 2 происходит в результате изменения размера изделия И. Если размер изделия И увеличивается, то измерительный щуп 3 перемещается вверх, в результате чего контакты 1 и 2 приходят в соприкосновение. При этом активное сопротивление между контактами 1 и 2 изменяется от бесконечности до ничтожно малого значения, определяемого контактным сопротивлением. Выводы датчика подключаются к сигнальному устройству. Пружина 4 соединяет измерительный щуп 3 с одним из выводов.

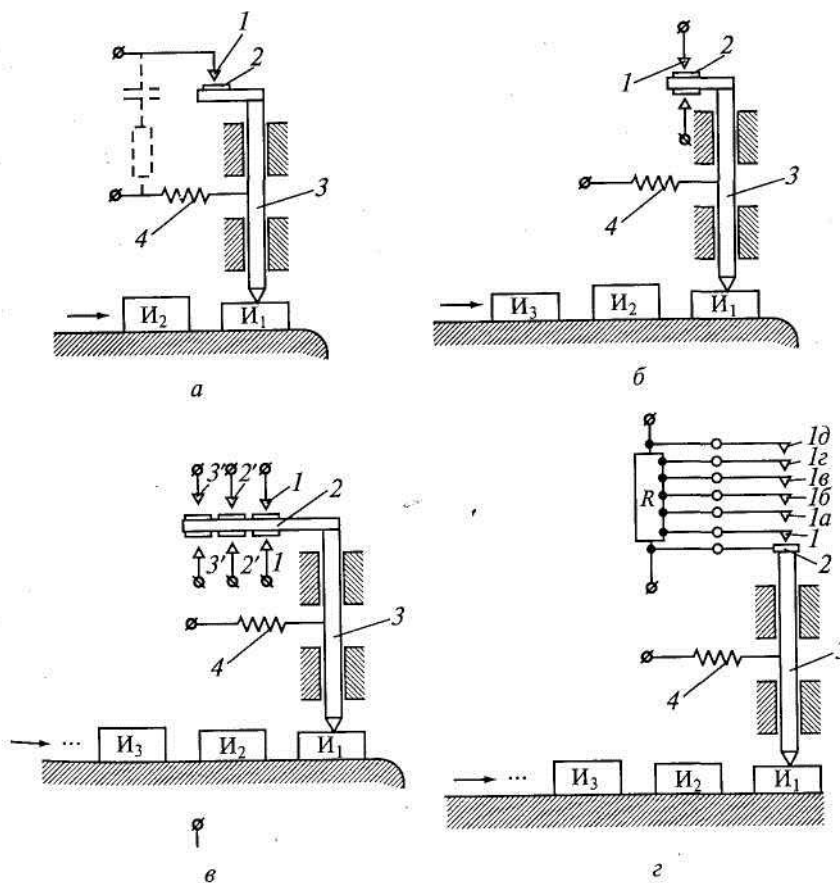


Рис. 5.1. Основные типы контактных датчиков:
а — однопредельный; *б* — двухпредельный; *в*, *г* — многопредельные; 1, 2, 2', 3', 1а ... 1д — контакты; 3 — измерительный щуп; 4 — пружина

На рис. 5.1, *б* изображен двухпредельный контактный датчик — с двумя парами контактов, способный реагировать на перемещение щупа в обе стороны от начального (нулевого) положения. Подобные датчики широко используются для автоматического контроля размеров деталей и подсчета количества выпускаемой продукции.

Многопредельный контактный датчик с несколькими парами контактов показан на рис. 5.1, *в*. Его контакты 1, 2' и 3' замыкаются последовательно друг за другом в зависимости от размеров деталей. Стрелка измерительного прибора, включенного на выходе датчика, показывает три размера.

Иногда контактные датчики могут работать либо на замыкание (размыкание) всей цепи, либо на замыкание части одного из сопротивлений *R* резистора цепи (рис. 5.1, *г*).

5.3. Потенциометрические датчики

Измерительные преобразователи, выполненные в виде реостата, подвижный контакт которого

перемещается под воздействием входной измеряемой величины, называются *реостатными измерительными преобразователями*. Чаще всего реостатные ИП включаются в измерительную цепь по схеме потенциометра, поэтому в ряде источников используется термин «потенциометрические преобразователи».

Выходной величиной ИП является электрическое сопротивление, функционально связанное с положением подвижного контакта. Реостатные преобразователи служат для преобразования угловых или линейных перемещений в соответствующее изменение сопротивления, тока или напряжения. Так как в перемещение могут быть преобразованы многие неэлектрические величины (давление, расход, уровень и др.), то реостатные преобразователи очень часто используют в качестве промежуточных преобразователей неэлектрических величин в электрические.

В зависимости от материала чувствительного элемента реостатные преобразователи разделяются на проволочные и непроволочные.

В устройствах автоматики широко применяют *проволочные реостатные преобразователи*, которые отличаются высокой точностью и стабильностью функции преобразования, имеют малое переходное сопротивление, низкий уровень собственных шумов, малый температурный коэффициент сопротивления (ТКС). К их недостаткам относятся низкая разрешающая способность, сравнительно невысокое сопротивление (до десятков кОм), ограниченная возможность применения на переменном токе, обусловленная остаточными индуктивностью и емкостью намотки.

В зависимости от конструктивного исполнения различают реостатные преобразователи с поступательным и вращательным перемещением подвижного контакта. Последние, кроме того, делятся на одно- и многооборотные.

Конструктивно реостатные преобразователи (рис. 5.2, а, б) состоят из каркаса 1, обмотки из изолированного провода 2 и токосъемного контакта 3 в виде щетки или движка, скользящего по виткам провода, очищенного от изоляции.

Каркас выполняется из изоляционного материала и может иметь форму стержня, кольца, изогнутой пластины. Материал каркаса должен сохранять свои размеры в широком температурном диапазоне, условиях повышенной влажности и химической загрязненности атмосферы. Кроме того, каркасы должны обладать высокой теплопроводностью, что позволяет увеличивать рассеиваемую в преобразователе мощность. В качестве изоляционного материала используют гетинакс, текстолит, керамику или металл, покрытый непроводящим слоем оксида.

Обмотку выполняют изолированным проводом виток к витку или с заданным шагом /ш. Материал обмотки должен отвечать следующим требованиям: высокое удельное электрическое сопротивление, высокая коррозионная стойкость, стабильность характеристик во времени, малый ТКС, большая прочность на разрыв и истирание. В качестве обмоточного провода применяют константан и манганин, а при работе в условиях повышенных температур — железо- и никельхромовые сплавы. В особо ответственных или специфических условиях работы применяют сплавы из благородных металлов: платины с иридием, платины с палладием и др. Например, добавка иридия к платине увеличивает ее твердость, износостойчивость, химическую стойкость, коррозионную стойкость. Диаметр провода зависит от точности и сопротивления преобразователя: 0,01...0,10 мм для датчиков высокого класса; 0,1...0,4 мм — для датчиков низкого класса. Обмоточный провод покрывают слоем эмали или слоем оксидов.

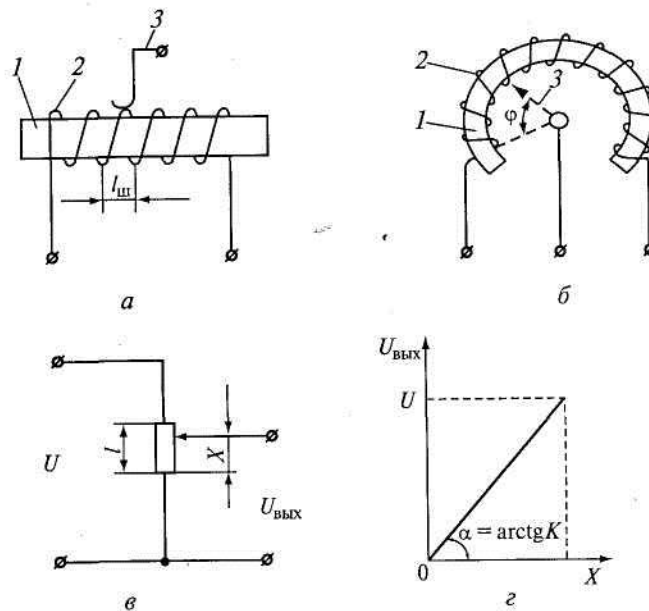


Рис. 5.2. Потенциометрические датчики:
а — линейный; б — угловой; в — схема включения; г — статическая характеристика; 1 — каркас; 2 — провод; 3 — токосъемный контакт

Подвижный контакт (щетка, движок) выполняют в виде двух-трех параллельных проволочек диаметром 0,1 ... 0,2 мм, несколько отличающихся по длине (для прецизионных реостатных преобразователей), или из специально профилированной пластины с разрезами. Ширина контактной поверхности щетки должна быть равна двум-трем диаметрам проволоки чувствительного элемента.

Изготавливают щетку либо из чистых металлов (платины, серебра), либо из сплавов (платины с иридием или бериллием, фосфористой бронзы и др.). Материал щетки должен быть несколько мягче материала проволоки, чтобы проволока не перетиралась. Щетка прижимается к обмотке с усилием $(0,5... 15,0) \cdot 10^{-2}$ Н.

Допустимая плотность тока в обмотке зависит от материала провода и условий его охлаждения. При использовании манганина или константана рабочая температура преобразователя может достигать 40... 50 °С при плотности тока в обмотке около 10 А/мм² для каркаса из пластиковых материалов или 25... 30 А/мм² для металлического каркаса. Использование обмоточного провода из благородных материалов допускает рабочую температуру в пределах 70... 80 °С и плотность тока 40... 50 А/мм² при металлическом каркасе.

К зажимам обмотки реостата подключается напряжение U постоянного или переменного тока неизменного значения. При перемещении движка выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ меняется пропорционально входной величине X . Таким образом осуществляется преобразование перемещения в напряжение (рис. 5.2, в). Учитывая, что по конструктивным особенностям $R = l$, $r = X$, где R — полное сопротивление преобразователя; l — длина намотки обмотки; r — сопротивление части обмотки, приходящейся на перемещение X движка реостата, функция преобразования будет иметь вид

$$U_{\text{вых}} = (U/R)r = (U/l)X = KX,$$

где K — коэффициент преобразования.

Для преобразователя углового перемещения в режиме холостого хода функции преобразования $U_{\text{вых}} = K\phi$, где ϕ — угол поворота движка от нулевого положения (см. рис. 5.2, б).

Анализ полученных выражений для функций преобразования показывает, что статическая характеристика линейных потенциометров при отсутствии нагрузки представляет собой прямую, проходящую через начало координат под углом $\alpha = \arctg K$ (рис. 5.2, г).

Как следует из приведенной статической характеристики, рассмотренные преобразователи относятся к одноктактным элементам, т.е. они не реагируют на знак входного сигнала. В ряде случаев необходимы преобразователи, учитывающие знак входного сигнала, — двухтактные измерительные преобразователи. Их можно построить на основе одноктактных потенциометрических преобразователей, если снимать выходной сигнал с движка и средней точки потенциометра или с диагонали мостовой

схемы, образованной двумя потенциометрическими датчиками со средней точкой. Два возможных варианта включения потенциометрических датчиков по двухтактной схеме приведены на рис. 5.3, а, б. Их статические характеристики соответственно 1 и 2 (рис. 5.3, в) имеют разную крутизну. Это объясняется тем, что при включении преобразователей по мостовой схеме (см. рис. 5.3, б), изменение входного сигнала отрабатывается двумя движками, смещающимися в разные стороны от средней точки, что приводит к появлению удвоенного выходного напряжения по сравнению со схемой, представленной на рис. 5.3, а.

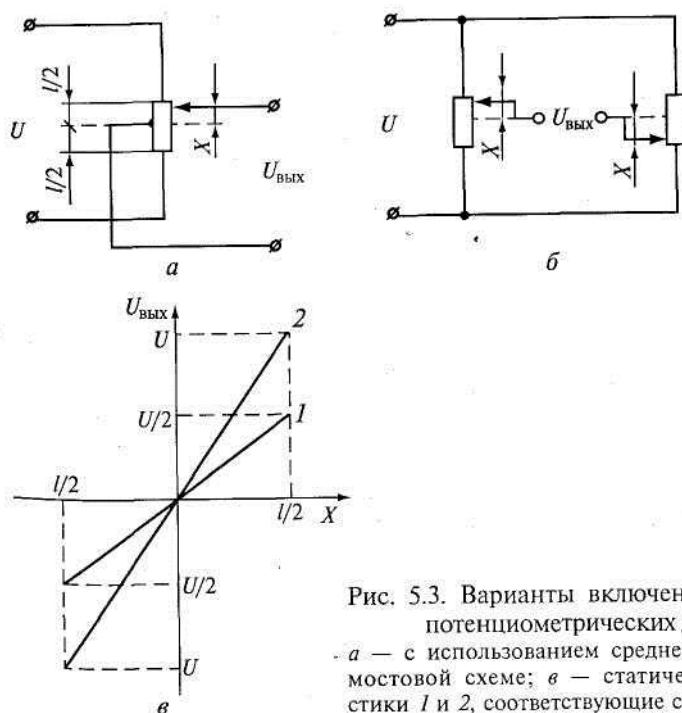


Рис. 5.3. Варианты включения двухтактных потенциометрических датчиков: а — с использованием средней точки; б — по мостовой схеме; в — статические характеристики 1 и 2, соответствующие схемам включения

Реальные характеристики реостатных преобразователей значительно отличаются от рассмотренных идеальных из-за различных погрешностей: дискретности выходного сопротивления; отклонения функции преобразования от расчетной, вызванного непостоянством диаметра намоточного провода и его удельного электрического сопротивления; изменения температуры преобразователя; влияния сопротивления нагрузки и других факторов.

При перемещении движка сопротивление включенной части потенциометра изменяется дискретно с шагом, равным сопротивлению одного витка:

$$\Delta R = R/w,$$

где R — сопротивление реостата; w — число витков обмотки.

Соответственно изменяется и выходное напряжение. Это явление определяет два фактора: порог чувствительности и зону нечувствительности. Если их рассматривать относительно входного перемещения, то численно они будут равны диаметру провода обмотки типа «виток к витку» или шагу намотки $l_{\text{ш}}$ при расположении витков с зазором.

Статическая характеристика с учетом дискретности изменения сопротивления имеет ступенчатый вид (рис. 5.4). Если за идеальную характеристику принять прямую, проходящую через середины ступенек, то абсолютная погрешность дискретности или зона нечувствительности в зависимости от формы представления характеристики (в функции сопротивления, перемещения или напряжения) будет определяться выражениями

$$\Delta R = R/2w; \Delta X = l/2w; \Delta U = U/2w.$$

Соответственно выражения для относительных погрешностей примут вид

$$\delta R = \delta X = \delta U = 1/2w.$$

В реальных конструкциях линейных реостатных преобразователей число витков составляет около 2000 (минимально около 200), а погрешность дискретности соответственно равна 0,02...0,03 %. Суммарная погрешность, вызванная непостоянством электрических параметров преобразователя, достигает 0,03...0,10%. Температурная погрешность, определяемая прежде всего ТКС намоточного провода, не превышает обычно 0,1 % на 10 °С.

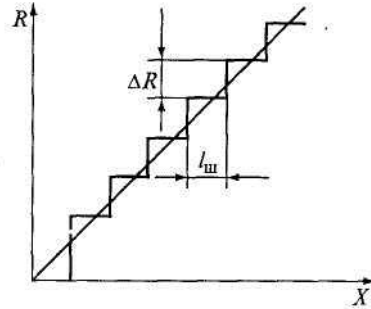


Рис. 5.4. Статическая характеристика потенциометрического датчика с учетом дискретности проволочного сопротивления

Наибольшую погрешность может обусловить неправильно выбранный режим работы преобразователя — малое сопротивление нагрузки. Реостатный преобразователь с подключенной нагрузкой R_H (рис. 5.5, а) можно представить эквивалентной схемой (рис. 5.5, б) недогруженного преобразователя. Для нее справедливы следующие соотношения:

$$U_{\text{вых}} = I \frac{R_H r}{R_H + r}; \quad I = \frac{U}{(R - r) + R_H r / (R_H + r)}.$$

Подставляя второе выражение в первое, получаем

$$U_{\text{вых}} = \frac{U R_H r}{(R_H + r) [(R - r) + R_H r / (R_H + r)]} = \frac{U R_H r}{R R_H + R r - r^2}. \quad (5.1)$$

Как видно из полученного выражения, статическая характеристика $U_{\text{вых}} = f(r)$ зависит от сопротивления нагрузки и определяет методическую погрешность. Существенное значение имеет соотношение R_H и R . Можно рассмотреть два случая: $R_H \gg R$; R_H соизмеримо с R реостата.

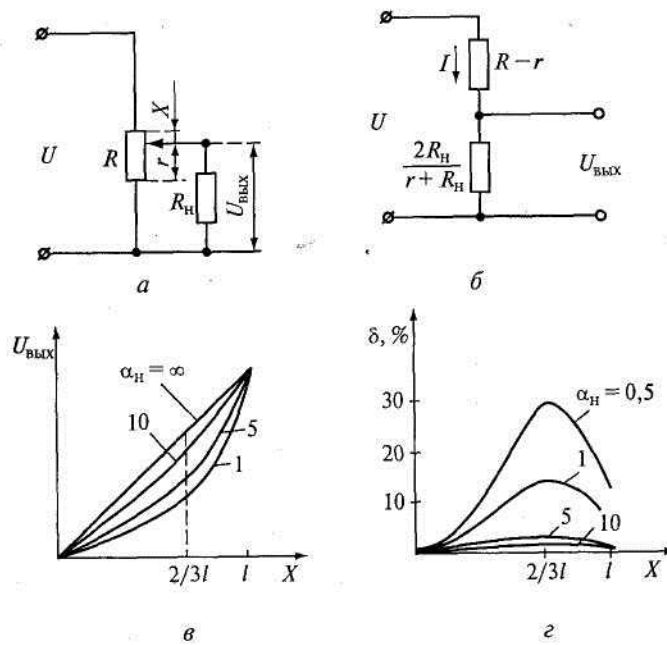


Рис. 5.5. Потенциометрический датчик :
 а — схема включения с нагрузкой; б — эквивалентная схема; в — статические характеристики; г — графики погрешностей

Выражение (5.1) можно представить в виде

$$U_{\text{вых}} = \frac{Ur}{R + (R/R_H)r - r^2/R_H}.$$

Для $R_H \gg R$ величинами $(R/R_H)r$, r^2/R_H можно пренебречь по сравнению с R . Тогда

$$U_{\text{вых}} = (U/R)r = U_{\text{вых}0}.$$

Аналогичный результат можно получить, приняв $R_H \rightarrow \infty$ и прийти к режиму холостого хода, т. е. отсутствию нагрузки на выходе преобразователя.

Для $R_H = R$ абсолютная погрешность от несовпадения идеальной и реальной статической характеристик определится выражением

$$\begin{aligned} \Delta U &= U_{\text{вых}0} - U_{\text{вых}} = \\ &= \frac{Ur}{R} - \frac{UrR_H}{RR_H + Rr - r^2} = U \frac{r^2(R-r)}{R^2R_H + (R^2r - Rr^2)} \approx U \frac{r^2(R-r)}{R^2R_H}. \end{aligned}$$

Последнее выражение получено, исходя из условий $R^2r = Rr^2$ и $(R^2r - Rr^2) = 0$.
 Относительная погрешность

$$\delta = \Delta U/U = r^2(R-r)/R^2R_H. \quad (5.2)$$

Чтобы определить максимальную погрешность, приравняем производную $d\delta/dr$ к нулю:

$$d\delta/dr = (2rR - 3r^2)/(R^2R_H) = 0,$$

что справедливо при условии $2rR - 3r^2 = 0$, откуда получаем

$$r = (2/3)R. \quad (5.3)$$

Следовательно, преобразователь имеет наибольшую погрешность при отклонении движка на $2/3$ общей длины l . Подставив выражение (5.3) в (5.2), получим формулу для расчета максимальной погрешности:

$$\delta_{\max} = \frac{r^2(R-r)}{R^2 R_H} = \frac{U}{27(R_H/R)} = \frac{U}{27\alpha_H}, \quad (5.4)$$

где $\alpha_H = R_H/R$ — коэффициент нагрузки.

Как следует из (5.4) и приведенных статических характеристик преобразователя при различных коэффициентах нагрузки α_H (рис. 5.5, в, г), с увеличением сопротивления нагрузки погрешность уменьшается. В общем случае необходимо, чтобы коэффициент нагрузки был как можно больше, однако на практике его выбирают в пределах 10... 100. Необходимо отметить также, что выходное напряжение преобразователя при подключении нагрузки падает из-за шунтирования сопротивлением R_H части r сопротивления потенциометра R .

Наряду с линейными преобразователями в системах автоматики и управления широко применяют *функциональные преобразователи*.

Для получения функциональных реостатных преобразователей используют следующие способы: изменение диаметра провода вдоль катушки; изменение шага катушки; применение каркаса определенной конфигурации; шунтирование участков линейного потенциометра сопротивлениями различных значений. Первые два способа сопряжены с технологическими трудностями и на практике не применяются.

К достоинствам проволочных реостатных преобразователей можно отнести: простоту конструкции; малые размеры и массу; возможность получения необходимых функциональных зависимостей относительно простыми средствами; получение высокоточных линейных статических характеристик; стабильность характеристик; малое переходное сопротивление; возможность работы на переменном и постоянном токе; малый ТКС.

Недостатками этих элементов следует считать: наличие скользящего контакта, который может стать причиной отказа из-за окисления контактной дорожки, перетирания витков или отгибания движка; сравнительно небольшой коэффициент преобразования и высокий порог чувствительности; наличие шума; подверженность электроэрозии под действием импульсных разрядов; ограниченную скорость линейного перемещения или вращения (до 100...200 об/мин) токосъемника вследствие его вибраций при переходе с витка на виток и повышение при этом уровня динамического шума; ограниченную частоту переменного тока (до 1000 Гц); низкую износостойкость.

5.4. Тензометрические датчики

В основе работы тензометрических датчиков (тензорезисторов) лежит тензоэффект; заключающийся в изменении активного сопротивления проводниковых и полупроводниковых материалов при их механической деформации.

Характеристикой тензоэффекта материала служит *коэффициент тензочувствительности* K_T , определяемый как отношение изменения сопротивления к изменению длины проводника:

$$K_T = \delta R / (\delta l) = E(\delta R / \sigma),$$

где $\delta R = \Delta R / R$; $\delta l = \Delta l / l$; ΔR — приращение сопротивления при изменении длины l на Δl ; E — модуль упругости материала; σ — механическое напряжение.

Коэффициент тензочувствительности связан с деформацией материала и его удельным сопротивлением выражением

$$K_T = 1 + 2\mu + \delta\rho / (\delta l),$$

где μ — коэффициент Пуассона; $\delta\rho$ — относительное приращение удельного сопротивления ρ материала при деформации.

Коэффициент тензочувствительности металлов, наиболее часто применяемых для тензорезисторов, близок к двум: для константана — 2; для нихрома — 2,2; для хромеля — 2,5. Для полупроводниковых материалов $K_T = \delta\rho/(\delta l)$, и он намного больше, чем у металлов. Например, для германия $K_T \approx 100$. Однако полупроводниковые материалы характеризуются малыми механической прочностью и стабильностью по сравнению с металлами.

Тензорезисторы используют для измерения давления жидкости и газа, а также при измерении упругих деформаций материалов: давлений, изгибов, скручивания и т.д.

В качестве тензорезистивного материала можно использовать сплавы с малым ТКС (манганин, константан, нихром, никелин), платиносеребрянные и платиновольфрамовые полупроводниковые материалы (германий, кремний). Наиболее распространены тензорезисторы, выполненные из металла. Они разделяются на проволочные и фольговые.

Проволочные тензорезисторы выполняют из проволоки диаметром 0,002...0,05 мм, которую укладывают частыми петлями на тонкую бумагу или лаковую пленку и приклеивают к ней (рис. 5.6, а). К концам проволоки припаивают или приваривают медные выводы. Сверху преобразователь покрывают лаком. Материал для пленки выбирают в зависимости от условий эксплуатации. Резисторы на пленке из клея БФ-2 работают в диапазоне температур от -40 до 70 °С, а на бакелитовом лаке — до 200 °С. Для более высоких температур используют специальные высокотемпературные клеи или цементы.

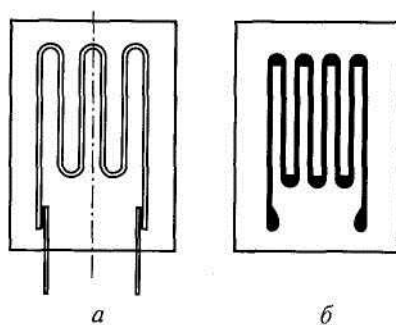


Рис. 5.6. Проволочный (а) и фольговый (б) тензорезисторы

Тензорезистор наклеивают на поверхность испытуемой детали таким образом, чтобы его продольная ось была расположена в направлении измеряемой деформации, т.е. чтобы возможные деформации детали происходили вдоль петель резистора. Это позволяет точнее измерять линейные деформации.

Наиболее часто используют преобразователи с базой (длиной петель) 5...20 мм, обладающие сопротивлением 30...500 Ом. Их номинальный рабочий ток, определяемый условиями отвода выделяемых в них потерь энергии, находится в пределах десятков миллиампер. Максимально допустимые относительные деформации не превышают 0,3 %.

Поскольку изменение сопротивления тензорезисторов, вызванное деформацией, весьма мало и колеблется от единиц миллиом до нескольких десятых долей ома, то для измерений применяют высокочувствительные потенциметрические и мостовые схемы. Чтобы повысить чувствительность тензорезисторов, их можно включать в два и даже четыре плеча мостовой схемы.

Характеристика проволочных тензорезисторов в пределах упругой деформации близка к линейной и определяется выражением

$$\Delta R = RK_T \delta l = (\rho K_T / S) \Delta l,$$

где S — площадь сечения проволоки.

Отклонение от линейности характеристики не превышает 0,1 %. Чувствительность проволочного тензорезистора

$$K_s \approx d(\Delta R)/d(\Delta l) \approx \rho K_T / S.$$

Фольговые преобразователи (рис. 5.6, б) более совершенны, чем проволочные тензорезисторы. Они имеют решетку из тонких полосок фольги прямоугольного сечения толщиной 4... 12 мкм, полученную травлением и нанесенную на лаковую подложку. Благодаря большей площади контакта полосок фольгового тензорезистора с объектом измерения его теплоотдача значительно выше, чем у проволочного, что позволяет увеличить ток, протекающий через резистор, до 0,5 А, и тем самым повысить чувствительность тензопреобразователя. Другое достоинство фольговых тензорезисторов заключается в возможности изготовления решеток сложного профиля, которые наиболее полно удовлетворяют условиям измерений.

Полупроводниковые тензорезисторы имеют ряд существенных преимуществ: их чувствительность в 50...60 раз превышает чувствительность проволочных, размеры существенно меньше, уровень выходного сигнала в ряде случаев достаточен для использования без сложных и дорогих усилителей. Основным их отличием от проволочных является большое (до 50 %) изменение сопротивления тензопреобразователя при деформации.

К недостаткам полупроводниковых тензорезисторов следует отнести малую механическую прочность и гибкость. Реализовать большую тензочувствительность этих тензорезисторов оказывается довольно сложно из-за нелинейности характеристики, высокой чувствительности к воздействию внешних условий и существенного разброса параметров от образца к образцу.

Погрешности тензорезисторов могут быть вызваны изменениями температуры, недостаточным сопротивлением изоляции и влагостойкостью, качеством наклеивания, наличием поперечной деформации (для наклеиваемых преобразователей). Особенно большие погрешности могут внести изменения температуры и не только из-за ухода параметров материала, но и из-за появления добавочных механических напряжений, вызванных разностью температурных расширений материалов тензорезистора и детали. Тем не менее, применяя дополнительные меры (дополнительную установку нуля перед каждым измерением, калибрование и т.д.), погрешность измерений можно довести до 0,2...0,5 % при статических и до 1... 1,5 % при динамических измерениях.

К достоинствам тензорезисторов можно отнести незначительную массу, малые размеры, простоту конструкции, возможность измерения статических и динамических процессов; к недостаткам — относительно невысокую чувствительность, возможность только разового использования (так как он разрушается при отсоединении от детали), необходимость использования мостовой измерительной схемы и компенсации температурных воздействий.

5.5. Индуктивные датчики

Принцип действия индуктивных датчиков основан на изменении индуктивности L или взаимоиנדуктивности обмотки с сердечником вследствие изменения магнитного сопротивления R_m магнитной цепи датчика, в которую входит сердечник.

Индуктивные датчики относятся к классу параметрических. Измеряемое перемещение на входе датчика вызывает изменение параметров магнитной и электрической цепей, что, в свою очередь, вызывает изменение выходной величины — электрического тока I или напряжения U .

С помощью индуктивных датчиков можно контролировать механические перемещения, силы, температуру, свойства магнитных материалов, определять наличие дефектов, контролировать диаметр стальной проволоки, толщину немагнитных покрытий на стали и др.

Индуктивные датчики отличаются рядом достоинств: простота и прочность конструкции, надежность в работе, отсутствие скользящих контактов, большая величина мощности на выходе (до нескольких десятков ватт), высокая чувствительность (до 100 В/мм).

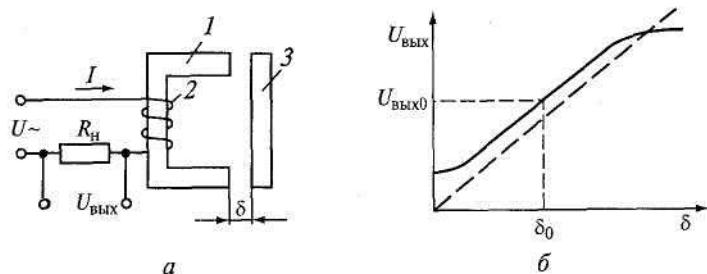


Рис. 5.7. Схема (а) и характеристика (б) одноплатного индуктивного преобразователя:

1 — сердечник; 2 — обмотка; 3 — якорь

Рассмотрим работу *одноплатного индуктивного преобразователя* (рис. 5.7, а). Выходной сигнал получают в виде переменного напряжения, снимаемого с сопротивления нагрузки R_H , включенного в цепь обмотки 2, помещенной на сердечнике 1. Питание осуществляется переменным напряжением U с частотой от 50 до нескольких тысяч герц. Под действием входного сигнала перемещается якорь 3 и изменяется зазор 5. Выходное напряжение датчика

$$U_{\text{вых}} = IR_H.$$

Среднее значение тока в рабочей цепи преобразователя

$$I = U / \sqrt{R^2 + X_L^2} = U / \sqrt{(R_H + R_0)^2 + (\omega L)^2}, \quad (5.5)$$

где R — суммарное активное сопротивление цепи, $R = R_H + R_0$; R_0 — сопротивление обмотки — реактивное сопротивление цепи; ω — круговая частота.

Индуктивность обмотки L является функцией размера зазора с магнитным сопротивлением r_δ :

$$L = w^2 / r_\delta = w^2 / (\delta / \mu_0 S) = \mu_0 S w^2 / \delta, \quad (5.6)$$

где w — число витков обмотки; μ_0 — магнитная проницаемость воздуха в зазоре; S — площадь поперечного сечения зазора.

Учитывая, что на практике для индуктивных преобразователей выполняется условие $R \ll X_L$ и подставляя выражение (5.6) в (5.5), получаем

$$U_{\text{вых}} = \frac{UR_H}{\sqrt{R^2 + (\omega \mu_0 S w^2 / \delta)^2}} = \frac{UR_H \delta}{\omega \mu_0 S w^2} = K \delta.$$

Коэффициент преобразования $K = UR_H / (w \mu_0 S w^2)$ — величина постоянная, поэтому статическая характеристика $U_{\text{вых}} = f(\delta)$ должна представлять собой прямую, проходящую через начало координат под углом $\alpha = \arctg K$ к оси абсцисс (рис. 5.7, б, штриховая линия). Реальная характеристика преобразователя, показанная на рисунке сплошной линией, отличается от идеальной. Это объясняется тем, что при малых значениях δ допущение $r_m \ll r_\delta$ становится неверным, так как магнитное сопротивление ферромагнитного участка магнитной цепи r_m становится соизмеримым с магнитным сопротивлением зазора r_δ ; при больших значениях δ падает индуктивность обмотки L и реактивное сопротивление X_L становится соизмеримым с активным сопротивлением магнитной цепи, т.е. $R \approx X_L$. Это несоблюдение принятых в начале рассмотрения допущений и приводит к искажению статической характеристики.

Анализ принципа действия и статической характеристики одноплатного измерительного индуктивного преобразователя позволяет выявить следующие его недостатки: фаза выходного сигнала не зависит от направления перемещения якоря; для измерения перемещения в обоих направлениях необходим начальный зазор δ_0 , что приводит к наличию остаточного (начального значения) напряжения $U_{\text{вых}0}$ (см. рис. 5.7, б); на якорь постоянно действует электромагнитная сила, стремящаяся притянуть его

к ярму. При большой мощности сигнала выходной цепи она может принимать существенные значения, что требует введения компенсирующих сил, создаваемых противодействующими пружинами, а это значительно усложняет устройство.

Непосредственно для измерительных целей применяют двухтактные измерительные преобразователи, которые могут включаться по дифференциальной или мостовой схемам.

Дифференциальная схема включения индуктивного измерительного преобразователя требует использования трансформатора со средней точкой (рис. 5.8). Оба сердечника идентичны по своим конструктивным и магнитным характеристикам. Расположенные на них обмотки w_1 и w_2 имеют также одинаковые параметры и включены последовательно-встречно. Сопротивление нагрузки R_H включается между средней точкой трансформатора и средней точкой обмоток преобразователя.

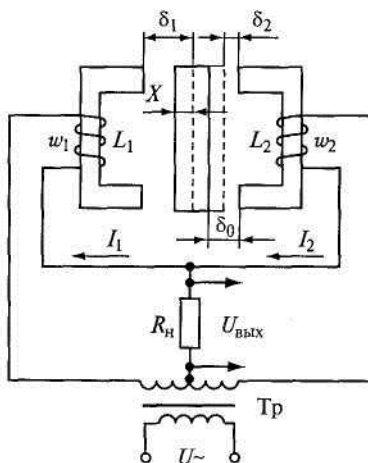


Рис. 5.8. Схема дифференциального индуктивного преобразователя

В такой схеме ток $I_{\text{вых}}$, протекающий по сопротивлению нагрузки, равен разности токов правой и левой половин схемы. В векторной форме это равенство примет следующий вид:

$$\dot{I}_{\text{вых}} = \dot{I}_1 - \dot{I}_2,$$

а выходное напряжение

$$\dot{U}_{\text{вых}} = R_H (\dot{I}_1 - \dot{I}_2).$$

При отсутствии входного сигнала зазоры δ_1 и δ_2 между якорем и ярмом одинаковы: $\delta_1 = \delta_2 = \delta_0$. Равны и индуктивности L_1 и L_2 обеих половин датчика, определяемые размерами зазоров. Следовательно, выходное напряжение преобразователя $U_{\text{вых}}$ равно нулю (рис. 5.9, а).

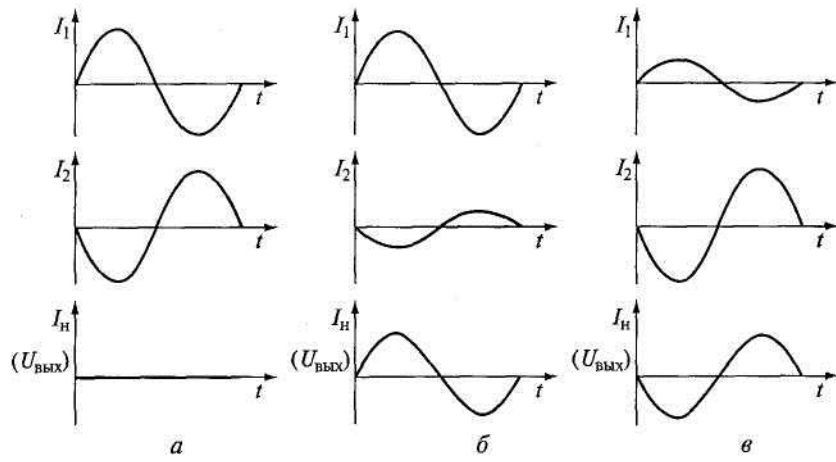


Рис. 5.9. Графики изменения токов и напряжений во времени в дифференциальном индуктивном преобразователе:
 $a - \delta_1 = \delta_2 = \delta_0$; $б - \delta_1 > \delta_2$; $в - \delta_1 < \delta_2$

При перемещении якоря на расстояние X зазоры δ_1 и δ_2 становятся неравными:

$$\delta_1 = \delta_0 + X; \delta_2 = \delta_0 - X.$$

Изменение зазоров приводит к изменению индуктивностей: увеличение δ_1 ведет к уменьшению L_1 а уменьшение δ_1 — к увеличению L_2 . Изменение индуктивностей плечей датчика приводит к дисбалансу токов I_1 и I_2 , в результате чего через сопротивление нагрузки потечет ток $I_H = I_{\text{вых}}$, и появится выходное напряжение (рис. 5.9, б).

Если изменяется направление перемещения якоря, фаза выходного напряжения сдвигается на 180° относительно напряжения питания, являющегося опорным (рис. 5.9, в).

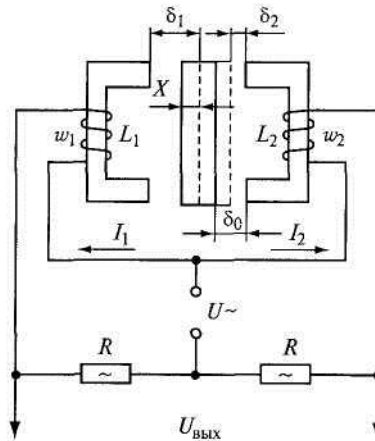


Рис. 5.10. Мостовая схема индуктивного преобразователя

Принцип действия *мостовой схемы* индуктивного преобразователя (рис. 5.10) аналогичен принципу действия дифференциальной схемы. Выходное напряжение мостовой схемы

$$\dot{U}_{\text{вых}} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \dot{I}_1 R - \dot{I}_2 R = R(\dot{I}_1 - \dot{I}_2). \quad (5.7)$$

В исходном состоянии при $\delta_1 = \delta_2 = \delta_0$, $L_1 = L_2 = L_0$, $U_{\text{вых}} = 0$, так как $l_1 = l_2$. Перемещение якоря вправо на расстояние X приводит к изменению зазоров: $\delta_1 = \delta_0 + X$; $\delta_2 = \delta_0 - X$, а также индуктивностей плечей моста:

$$L_1 = L_0 - \Delta L; \quad L_2 = L_0 + \Delta L. \quad (5.8)$$

Считая, что активное сопротивление обмоток мало по сравнению с их индуктивным сопротивлением, можно записать комплексные выражения величин I_1 и I_2 в следующий алгебраической форме:

$$\dot{I}_1 = U / (R + j\omega L_1); \quad \dot{I}_2 = U / (R + j\omega L_2),$$

где j — мнимая единица.

Тогда разность токов

$$\dot{I}_1 - \dot{I}_2 = \frac{2j\dot{U}\omega(L_1 - L_2)}{R^2 + jR\omega(L_1 + L_2) + \omega^2 L_1 L_2}. \quad (5.9)$$

На основании выражения (5.8) можно записать: $L_2 - L_1 = 2\Delta L$; $L_2 + L_1 = 2L_0$; $L_2 L_1 = L_0^2 - \Delta L^2 = \Delta L^2$. При малых изменениях зазора δ функция $L = f(x)$ практически линейна, и для нее справедливо отношение $\Delta L = (L_0/\delta_0)X$; соответственно выражение (5.9) будет иметь вид

$$\dot{I}_1 - \dot{I}_2 = \frac{j\dot{U}\omega L_0}{\delta_0(R + j\omega L_0)^2} X.$$

Умножив и разделив последнее выражение на $(R - j\omega L_0)^2$ и выделив действительную и мнимую части, получим модуль разности токов I_1 и I_2 :

$$|\dot{I}_1 - \dot{I}_2| = \frac{2U\omega L_0}{\delta_0(R^2 + \omega^2 L_0^2)} X,$$

а выходное напряжение согласно формуле (5.7) запишем в виде

$$|U_{\text{вых}}| = R |\dot{I}_1 - \dot{I}_2| = \frac{2U\omega L_0 R}{\delta_0(R^2 + \omega^2 L_0^2)} X. \quad (5.10)$$

Так как все параметры за исключением X являются постоянными, то выражение (5.10) можно привести к виду

$$|U_{\text{вых}}| = KX,$$

где $K = 2U\omega L_0 R / [\delta_0(R^2 + \omega^2 L_0^2)]$ — коэффициент преобразования индуктивного датчика.

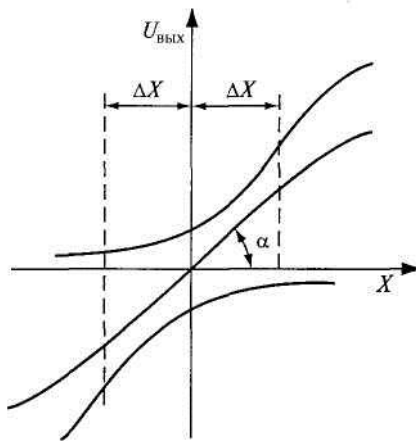


Рис. 5.11. Статическая характеристика двухтактного индуктивного преобразователя

Таким образом, статическая характеристика двухтактного индуктивного измерительного преобразователя представляет собой функцию вида $U_{\text{вых}} = KX$, что соответствует прямой, проходящей через начало координат под углом $\alpha = \arctg K$ (рис. 5.11).

Как видно из рисунка, при изменении направления перемещения входной величины X фаза выходного сигнала изменяется на 180° . Кроме того, с увеличением входного сигнала наблюдается отклонение выходной характеристики от линейной, что объясняется уменьшением индуктивного сопротивления ωL и приближением его значения к сопротивлению нагрузки. В связи с этим значение ΔX для реверсивных индуктивных датчиков не должно превышать $(0,3 \dots 0,4)\delta_0$. В этом случае выходную характеристику можно считать линейной.

Двухтактные измерительные преобразователи с плоскопараллельным воздушным зазором используют при измерении малых перемещений от сотых долей микрометра до $3 \dots 5$ мм.

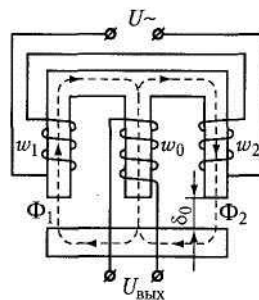


Рис. 5.12. Схема трансформаторного измерительного преобразователя

Трансформаторные измерительные преобразователи. Схема трансформаторного измерительного преобразователя приведена на рис. 5.12. Обмотки цепи питания w_1 и w_2 одинаковы и включены таким образом, что, когда по ним протекает рабочий ток, создаваемые ими магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 направлены встречно в центральном стержне, на котором расположена выходная обмотка w_0 . В этом случае выходное напряжение

$$U_{\text{вых}} = 4,44fw_0(\Phi_2 - \Phi_1),$$

где f — частота питающего напряжения. Если считать ток /в цепи питания постоянным, что достигается включением в цепь питания дополнительного дросселя для однократных датчиков или соответствующим включением обмоток питания двухтактных датчиков, то магнитные потоки пропорциональны индуктивностям обмоток w_1 и w_2 :

$$\Phi_1 = IL_1/w_1; \Phi_2 = IL_2/w_2.$$

Так как в рассматриваемой конструкции преобразователя зазор остается постоянным, а якорь перемещается вдоль зазора, то значение индуктивности зависит от сечения магнитного сердечника, определяемого площадью перекрытия S стержней, которая изменяется при перемещении якоря.

В нейтральном положении при $X = 0$ площади перекрытия стержней равны: $S_1 = S_2 = S_0$, что приводит к равенству потоков: $\Phi_1 = \Phi_2$ и, следовательно, $U_{\text{вых}} = 0$.

При перемещении якоря влево на расстояние X площадь перекрытия правого крайнего стержня изменится на ΔS , и для потоков в крайних стержнях можно записать:

$$\Phi_1 = \frac{I\mu_0 w_1}{\delta_0} S_0; \quad \Phi_2 = \frac{I\mu_0 w_2}{\delta_0} (S_0 - \Delta S).$$

Выходное напряжение датчика можно описать линейной зависимостью $U_{\text{вых}} = K\Delta S = K_1 X$, так как площади перекрытия стержней пропорциональны перемещению якоря X , Коэффициент преобразования на основании приведенных выше выражений можно записать в виде

$$K = 4,44 f w_0 w_1 \mu_0 I / \delta_0. \quad (5.11)$$

Из сравнения формул (5.10) и (5.11) видно, что все приведенные ранее соображения о влиянии конструктивных параметров на характеристики индуктивного датчика справедливы и для трансформаторных датчиков.

К достоинствам рассмотренных индуктивных трансформаторных датчиков следует отнести достаточно высокую выходную мощность, позволяющую во многих случаях обойтись без усилительных устройств; высокие чувствительность и разрешающую способность; сравнительную простоту конструкции; высокую надежность; малые массу и размеры при расчете на напряжение повышенной частоты; невысокую стоимость.

Недостатками рассмотренных измерительных преобразователей являются трудность регулировки и компенсации начального напряжения на их выходе; необходимость экранирования для уменьшения уровня помех, что обуславливает увеличение размеров и массы; возможность работы только на переменном токе; ограниченность диапазона линейной статической характеристики.

5.6. Емкостные датчики

Принцип действия емкостных измерительных преобразователей основан на изменении емкости конденсатора под воздействием входной преобразуемой величины. Емкость конденсатора

$$C = \epsilon \epsilon_0 S / \delta,$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; S — площадь пластины; δ — толщина диэлектрика или расстояние между пластинами.

Из приведенного соотношения видно, что на емкость конденсатора можно влиять изменением площади перекрытия пластин S (рис. 5.13, а), расстояния между ними δ (рис. 5.13, б), диэлектрической проницаемости ϵ вещества, находящегося в зазоре между обкладками конденсатора (рис. 5.13, в). Выбор того или иного изменяемого параметра зависит от характера измеряемой величины.

Емкостные преобразователи используют для измерения угловых и линейных перемещений, линейных размеров, уровня, усилий, влажности, концентрации и др. Конструктивно они могут быть выполнены с плоскопараллельными, цилиндрическими, штыревыми электродами, с диэлектриком между пластинами и без него.

Емкостный плоскопараллельный измерительный преобразователь с изменяемой площадью перекрытия S (см. рис. 5.13, а) описывается уравнением преобразования

$$C = \epsilon\epsilon_0 aX/\delta, \quad (5.12)$$

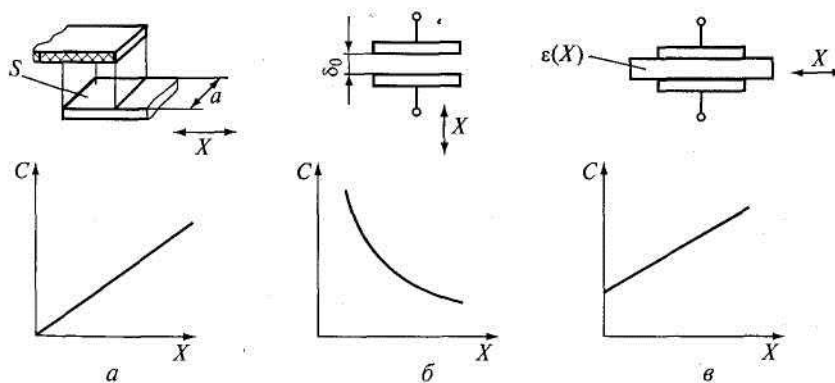


Рис. 5.13. Схемы и характеристики емкостных датчиков с различными изменяемыми параметрами:
a — площади перекрытия пластин; *б* — расстояния между пластинами;
в — диэлектрической проницаемости вещества в зазоре

где a — ширина пластин конденсатора; X — длина перекрытия электродов.

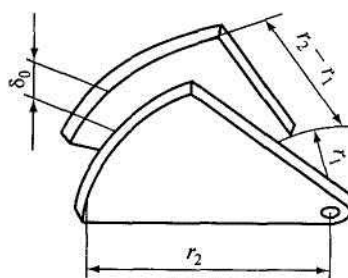


Рис. 5.14. Емкостный датчик для измерения угловых величин

Емкостные преобразователи перемещения с переменной площадью перекрытия (рис. 5.14) используют и для измерения угловых величин. В этом случае емкость измерительного преобразователя

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0(r_2^2 - r_1^2)}{2\delta}(\phi_0 - \phi), \quad (5.13)$$

а чувствительность

$$K_s = \epsilon\epsilon_0(r_2^2 - r_1^2)/2\delta,$$

где r_2, r_1 — соответственно наружный и внутренний радиусы пластин; ϕ, ϕ_0 — соответственно текущий (измеряемый) и начальный углы перекрытия пластин.

Из выражений (5.12) и (5.13) видно, что все входящие в них величины, кроме измеряемых X или ϕ , постоянны, т.е. статическая характеристика такого емкостного датчика линейна (см. рис. 5.13, *a*). Преобразователи такого типа применяют для измерения сравнительно больших (до десятков сантиметров) перемещений.

Емкостный плоскопараллельный преобразователь перемещения с изменяющимся воздушным зазором (см. рис. 5.13, *б*) имеет нелинейную характеристику. Изменение его емкости описывается уравнением

$$C_x = \epsilon\epsilon_0 S / (\delta_0 - X),$$

где δ_0 — начальный зазор; X — перемещение пластины.

В связи с нелинейностью статической характеристики такие датчики применяют для измерения относительно малых перемещений, обычно не более $0,1\delta_0$.

Преобразователи с изменяемой диэлектрической проницаемостью среды ϵ между электродами (см. рис. 5.13, в) широко используют для измерения уровня жидких и сыпучих веществ, анализа состава и концентрации веществ в химической, нефтеперерабатывающей и других областях промышленности, для счета изделий, охранной сигнализации и т.п. Они имеют линейную статическую характеристику.

Для повышения чувствительности и линейности характеристик используют дифференциальные преобразователи, у которых изменение состояния контролируемой величины приводит к изменению емкости одновременно двух чувствительных элементов, включаемых в разные плечи мостовой измерительной схемы. В этом случае получают реверсивную (двухтактную) статическую характеристику. При изменении направления перемещения подвижного элемента выходной сигнал преобразователя изменяет свою фазу на 180° по отношению к фазе напряжения питания датчика, являющегося опорным напряжением.

Емкость измерительных преобразователей в зависимости от конструктивных особенностей колеблется от десятых долей до нескольких тысяч пикофард, что приводит к необходимости использовать для питания датчиков напряжение повышенной частоты — от $1 \cdot 10^3$ до 10^8 Гц. Это один из существенных недостатков подобных преобразователей.

Начальная емкость преобразователя тем больше, чем меньше зазор δ между электродами. Однако уменьшение зазора ограничивается диэлектрической прочностью межэлектродной среды (для воздуха, например, напряженность электрического поля не должна превышать 10^5 В/м) и наличием силы электростатического притяжения пластин

$$F = -(1/2)U^2 (\epsilon\epsilon_0 S / \delta^2).$$

Погрешности емкостных преобразователей в основном определяются влиянием температуры и влажности на геометрические размеры и диэлектрическую проницаемость среды. Уменьшить погрешности можно, используя конструкционные материалы с малым температурным коэффициентом линейного расширения, или с помощью герметизации датчиков.

К достоинствам емкостных измерительных преобразователей можно отнести простоту конструкции, малые размеры и массу, высокую чувствительность, большую разрешающую способность при малом уровне входного сигнала, отсутствие подвижных токосъемных контактов, высокое быстродействие, возможность получения необходимого закона преобразования за счет выбора соответствующих конструктивных параметров, отсутствие влияния выходной цепи на измерительную.

Недостатки емкостных измерительных преобразователей состоят в относительно низком уровне выходной мощности сигналов, нестабильности характеристик при изменении параметров окружающей среды, влиянии паразитных емкостей.

5.7. Пьезоэлектрические датчики

Принцип действия пьезоэлектрических преобразователей основан на использовании прямого или обратного пьезоэлектрических эффектов. Прямой пьезоэффект заключается в способности некоторых материалов образовывать электрические заряды на поверхности при приложении механической нагрузки, обратный — в изменении механического напряжения или геометрических размеров образца материала под воздействием электрического поля.

В качестве пьезоэлектрических используют обычно естественные материалы — кварц и турмалин, а также искусственно поляризованную керамику на основе титаната бария (BaTiO_3), титаната свинца (PbTiO_3) и цирконата свинца (PbZrO_3). Можно использовать и другие материалы.

Количественно пьезоэффект оценивается пьезомодулем K_d , устанавливающим зависимость между возникающим зарядом Q и приложенной силой F :

$$Q = K_d F. \quad (5.14)$$

Из пьезоматериалов наиболее распространен кварц, что объясняется его удовлетворительными пьезоэлектрическими свойствами, очень высоким сопротивлением, стойкостью к воздействиям температуры и влажности, высокой механической прочностью. Кварц имеет незначительный коэффициент линейного расширения, его пьезомодуль, равный $2,3 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, практически не зависит от температуры до 200 °С, в диапазоне 200...500 °С изменяется незначительно, а при 573 °С становится равным нулю; удельное электрическое сопротивление кварца порядка 10^{16} Ом/м; модуль упругости кварца $E = 7,7 \cdot 10^{10}$ Па.

Пьезокерамика представляет собой продукт отжига спрессованной смеси, содержащей мелко раздробленные сегнетоэлектрические кристаллы. Характерным отличием сегнетоэлектриков является их доменная структура с хаотически ориентированными полярными направлениями доменов. Пьезоэлектрические свойства сегнетоэлектрической пьезокерамика приобретает после поляризации в электрическом поле.

Механическая прочность пьезокерамики очень высока, но зависит от технологии и качества обработки соприкасающихся плоскостей. Пьезомодуль, диэлектрическая проницаемость и их стабильность зависят от выбора направления поляризации, направления действия силы F и сема заряда Q .

Пьезокерамика на основе ниобата свинца (НБС) и цирконаттитаната свинца (ЦТС) более стабильна, чем на основе титаната бария, однако уступает в чувствительности. Так, пьезокерамика на основе титаната бария имеет точку Кюри 120 °С при пьезомодуле порядка $100 \cdot 10^{12}$ Кл/Н, а пьезокерамика ЦТС-19 — точку Кюри 290 °С и в два раза более высокое значение пьезомодуля.

Все природные пьезоматериалы имеют кристаллическую структуру, которая определяет свойства пьезопреобразователей. Так, кварц имеет кристаллическую структуру, в которой можно выделить шестигранную призму. По отношению к ней в кристалле выделяют три типа осей: продольную, или оптическую ось Z , электрические оси X , проходящие через ребра призмы кристалла нормально к оптической оси (три) и механические, или нейтральные, оси Y , нормальные к граням кристалла (их также три). Пьезочувствительный элемент обычно вырезают из кристалла кварца в виде пластины (параллелепипеда), стороны которой параллельны осям кристалла (рис. 5.15, а).

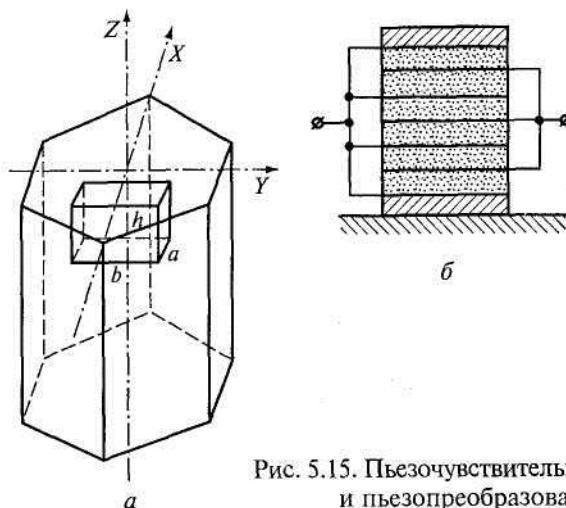


Рис. 5.15. Пьезочувствительный элемент (а) и пьезопреобразователь (б)

В ненапряженном состоянии в пластине все заряды скомпенсированы, и она является электрически нейтральной. Если к пластине кварца вдоль оси X приложена сила F , то на ее гранях, перпендикулярных к оси X , возникают разнополярные электрические заряды Q . Значения этих зарядов в пределах упругих деформаций находятся в линейной зависимости от приложенной силы в соответствии с выражением (5.14). Такой пьезоэффект называется продольным. Значения зарядов не зависят от геометрических размеров пластины, а определяются лишь силой F .

Если пластину подвергнуть сжатию по оси Y , то на тех же гранях вновь появятся заряды, но теперь уже противоположного знака (поперечный пьезоэффект). Значение заряда при поперечном пьезоэффекте

$$Q = -K_d(b/a)F,$$

где a, b — размеры пьезоэлемента соответственно в направлении осей X и Y .

В зависимости от направления действия силы F (сжатие или растяжение) знаки зарядов на гранях пластины будут меняться.

При приложении силы F вдоль оси Z пьезоэффект не наблюдается. Пластина кварца остается также электрически нейтральной при равномерном воздействии на нее со всех сторон (например, при гидростатическом сжатии).

Турмалин (в отличие от кварца) имеет не две, а одну пьезочувствительную плоскость, перпендикулярную к оптической оси Z . Благодаря этой особенности турмалин можно применять для измерения всестороннего давления, что делает его незаменимым при измерении давления жидкостей.

Пьезоэлектрический преобразователь давления представляет собой пластину из пьезоматериала. На две ее грани нанесены электроды, с которых снимается заряд или напряжение. Напряжение на обкладках при отсутствии нагрузки

$$U_0 = Q/C_p, \quad (5.15)$$

где C_p — емкость пьезоэлектрического элемента преобразователя, $C_p = \epsilon S_x/a$; ϵ — диэлектрическая постоянная материала пластины; $S_x = hb$ — площадь грани, перпендикулярной к оси X ; a — толщина пластины.

Для увеличения сигнала, поступающего с преобразователя, часто пластины-шайбы из пьезокерамики komponуют в столбик (рис. 5.15, б).

Наряду с преобразователями, в которых пьезоэлемент работает на сжатие-растяжение, применяются конструкции, в которых элемент работает на изгиб и сдвиг (рис. 5.16). Преобразователь, работающий на изгиб, представляет собой две одинаковые пластины, склеенные между собой. Между ними располагается металлическая фольга. При изгибе такого элемента одна пластина удлиняется, а другая укорачивается. В зависимости от схемы подключения обкладок можно получить либо сумму напряжений (см. рис. 5.16, а), либо сумму зарядов (см. рис. 5.16, б). Преобразователи, работающие на изгиб, более чувствительны по сравнению с преобразователями, работающими на сжатие. В то же время они уступают последним по прочности и диапазону частот.

Преобразователь, работающий на сдвиг, представляет собой кольцо из керамики 1 (см. рис. 5.16, в), в которое вклеен внутренний электрод 3 и которое само вклеено во внешний электрод 2. Под действием силы F происходит деформация сдвига плоскостей, параллельных направлению поляризации. Достоинством такого преобразователя является отсутствие зарядов на электродах при боковых воздействиях на датчик.

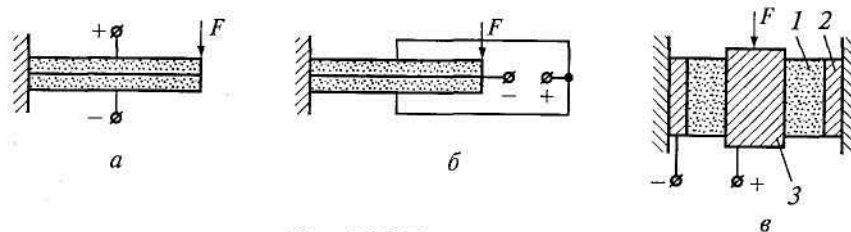


Рис. 5.16. Пьезодатчики:
а, б — работающие на изгиб соответственно с суммой напряжений и суммой зарядов; в — работающие на сдвиг; 1 — кольцо; 2 — внешний электрод; 3 — внутренний электрод

Нагрузка, подключаемая к выходу преобразователя, характеризуется сопротивлением R_H и емкостью C_H , зависящей от емкости соединительных проводов, входной емкости усилителя и т. д.

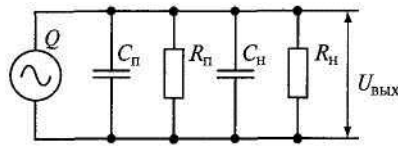


Рис. 5.17. Эквивалентная схема пьезопреобразователя с нагрузкой

В случае использования кварцевых преобразователей $C_{\text{п}} \ll C_{\text{н}}$, а при использовании пьезокерамики емкость пьезоэлемента часто сравнима с емкостью нагрузки и даже превышает ее. Эквивалентная схема преобразователя с нагрузкой представлена на рис. 5.17.

Чувствительность пьезоэлектрического преобразователя $K_s = dU_{\text{вых}}/dF = K_d/(C_{\text{п}} + C_{\text{н}})$.

Для повышения чувствительности преобразователь выполняют из n пластин, располагая их столбиком и соединяя параллельно (см. рис. 5.15, б). В этом случае

$$U_{\text{вых}} = nQ/(nC_{\text{п}} + C_{\text{н}}) = K_d F/(C_{\text{п}} + C_{\text{н}}/n)$$

или

$$U_{\text{вых}} = K'_s F,$$

где $K'_s = K_d/(C_{\text{п}} + C_{\text{н}}/n) > K_s$.

Напряжение на выходе преобразователя сравнительно мало, поэтому обычно требуется его усилить.

Погрешность пьезоэлектрических преобразователей складывается прежде всего из погрешностей от изменения параметров измерительной цепи (емкости $C_{\text{н}}$), температурной погрешности, вызываемой изменением пьезоэлектрического модуля, погрешности вследствие неправильной установки пластин, погрешности из-за чувствительности к силам, действующим перпендикулярно к измерительной оси преобразователя, и частотной погрешности.

Верхняя граница допустимого частотного диапазона определяется в основном механическими параметрами преобразователя. Пьезоэлектрические преобразователи могут быть выполнены с частотой собственных колебаний $f_0 = 100$ кГц, что позволяет измерять механические величины, изменяющиеся с частотой до 7... 10 кГц, причем они являются безынерционным звеном.

К достоинствам пьезоэлектрических преобразователей необходимо отнести простоту конструкции, малые размеры и стоимость, высокую надежность, возможность измерения быстропеременных величин, к недостаткам — невысокую чувствительность, непригодность к измерению статических величин, высокое входное сопротивление измерительной цепи, относительно невысокий уровень выходного сигнала, т.е. необходимость промежуточных усилителей.

5.8. Терморезисторы

Принцип действия терморезистивных преобразователей основан на свойстве проводников и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры.

Для терморезистивных преобразователей используют материалы, обладающие высокой стабильностью ТКС, высокой воспроизводимостью электрического сопротивления при данной температуре, значительным удельным электрическим сопротивлением, высоким ТКС, стабильностью химических и физических свойств при нагревании, инертностью к воздействию исследуемой среды. К таким материалам в первую очередь относятся платина, медь, никель, вольфрам и др. Наиболее широко применяют платиновые и медные терморезисторы.

Сопротивление *платиновых терморезисторов* в диапазоне температур от 0 до 650 °С описывается уравнением

$$R_{\theta} = R_0(1 + A\theta + B\theta^2),$$

где R_0 , R_0 — сопротивления преобразователя соответственно при рабочей и нулевой температурах; A , B

— постоянные коэффициенты.

Для платиновой проволоки, применяемой в промышленных терморезисторах, $A = 3,96847 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; $B = -5,847 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$. В интервале температур от 0 до $-200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ зависимость сопротивления платины от температуры имеет вид

$$R_{\theta} = R_0[1 + A\theta + B\theta^2 + C(\theta - 100)],$$

где $C = -4,356 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-3}$.

К недостаткам платиновых преобразователей температуры относятся довольно высокая загрязняемость платины парами металлов (особенно железа) при высоких температурах и сравнительно невысокая химическая стойкость в восстановительной среде, вследствие чего материал становится хрупким, теряет стабильность характеристик.

Медные терморезистивные преобразователи широко используют в диапазоне температур от 50 до $180 \text{ }^{\circ}\text{C}$ вследствие их низкой стоимости и довольно высокой стойкости к коррозии. Зависимость сопротивления меди от температуры описывается линейным уравнением

$$R_{\theta} = R_0(1 + \alpha\theta),$$

где $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

К недостаткам медных преобразователей температуры относится высокая окисляемость меди при нагревании, вследствие чего их применяют в сравнительно узком диапазоне температур в средах с низкой влажностью и при отсутствии агрессивных газов.

Полупроводниковые терморезисторы отличаются от металлических большими значениями ТКС, а следовательно, меньшими размерами и инерционностью. Температурная зависимость для них описывается выражением

$$R_{\theta} = Ae^{B/\theta},$$

где A, B — постоянные коэффициенты.

Недостатками полупроводниковых терморезисторов, существенно снижающих их эксплуатационные качества, является нелинейность зависимости сопротивления от температуры, значительный разброс номинальных значений сопротивлений различных образцов и их ТКС.

Терморезисторы обычно применяют для измерения температуры. При этом нагрузочный ток, проходящий через преобразователь, должен быть мал. Если через терморезистор пропускать большой фиксированный ток, то его перегрев по отношению к окружающей среде может стать значительным. Установившееся значение перегрева и соответственно сопротивления при этом будет определяться условиями теплоотдачи поверхности терморезистора. Если нагретый терморезистор поместить в среду с переменными теплофизическими характеристиками, то появляется возможность измерения ряда физических величин, например скорости потока жидкостей и газов, плотности газов и т. п.

Чувствительность проволочных медных терморезисторов $K_{SM} = dR_{\theta}/d\theta = \alpha R_0$, платиновых — $K_{sn} = R_0(A + 2B\theta)$.

Чувствительность проволочных медных терморезисторов постоянна, а чувствительность платиновых изменяется с изменением температуры. При одинаковых значениях R_0 чувствительность медных терморезисторов выше.

Основными источниками погрешностей терморезистивных преобразователей температуры являются неточность подгонки сопротивления R_0 при температуре $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и отклонение отношения W_m (сопротивления R_{100} при $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ к сопротивлению R_0) от номинального значения, нестабильность этих параметров во времени, дополнительный нагрев от прохождения рабочего тока, нестабильность сопротивления съемных проводов, подходящих от измерительной схемы к преобразователю, и др. Относительные погрешности $\delta_{\text{подг}}$ и $\delta_{\text{отн}}$ (в процентах), обусловленные неточностью подгонки R_0 и отклонением W_{100} от номинального значения, определяют по следующим выражениям (для платиновых терморезисторов):

$$\delta_{\text{подг}} = \delta R_0 \frac{1 + A\theta + B\theta^2}{(A + 2B\theta)\theta} 100; \quad \delta_{\text{отн}} = \frac{\Delta A}{A + 2B\theta} 100 = \frac{\Delta W_{100}}{A + 2B\theta},$$

где δR_0 — относительное отклонение R_0 от номинального значения; ΔA — отклонение коэффициента A от номинального значения.

Таблица 5.1

Основные характеристики терморезистивных платиновых и медных преобразователей

Тип преобразователя	Номинальное сопротивление, Ом	Условное обозначение	Диапазон рабочих температур, °С
ТСП	1	1П	–50...1100
	5	5П	–100...1100
	10	10П	–200...1000
	(46)	(гр. 21)	–260...1000
	50	50П	–260...1000
	100	100П	–260...1000
	500	500П	–260...300
ТСМ	10	10 М	–50...200
	50	50 М	–50...200
	(53)	(гр. 23)	–50...180
	100	100 М	–200...200

Нестабильность терморезистивных преобразователей объясняется изменением значений R_0 и W_{100} вследствие загрязнения чувствительного элемента конструкционными материалами. Погрешности, возникающие в результате изменения R_0 и W_{100} , имеют разные знаки, поэтому частично компенсируются.

По динамическим свойствам терморезистивные преобразователи идентичны термоэлектрическим преобразователям.

Промышленно выпускаемые термопреобразователи температуры с платиновыми (ТСП) и медными (ТСМ) чувствительными элементами предназначены для измерения температур в диапазоне от –200 до 1100 °С (табл. 5.1).

Промышленные термопреобразователи выпускают в виде чувствительных элементов в защитных корпусах. Чувствительный элемент современного платинового терморезистора имеет вид спирали, помещенной в канавки двух- или четырехканального керамического каркаса и уплотненной порошкообразным оксидом алюминия. Оксид алюминия является хорошим электрическим изолятором, обладает большой теплостойкостью и хорошей теплопроводностью. Чувствительный элемент медных терморезистивных преобразователей сопротивления представляет собой бескаркасную обмотку из медной изолированной проволоки, покрытой фторопластовой пленкой и помещенной в металлический защитный чехол.

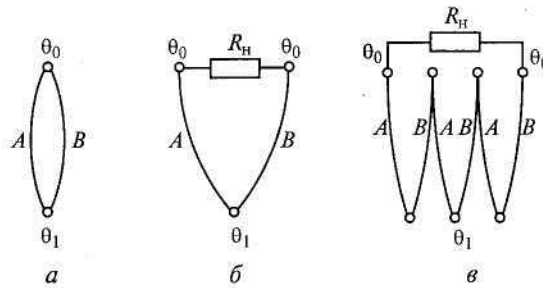
5.9. Термоэлектрические датчики

Термоэлектрический преобразователь (термопара) представляет собой чувствительный элемент, состоящий из двух разных проводников или полупроводников, соединенных электрически, и преобразующий контролируемую температуру в ЭДС. Принцип действия термоэлектрического преобразователя основан на использовании термоэлектродвижущей силы, возникающей в контуре из двух разнородных проводников A и B , места соединения (спаи) которых нагреты до различных температур (рис. 5.18, a). Знак и значение термоЭДС в цепи зависят от типа материалов и разности температур в местах спаев. При небольшом перепаде $\Delta\theta$ температур между спаями термо ЭДС E_{AB} можно считать пропорциональной разности температур $\Delta\theta$:

$$E_{AB} = K_{sAB} \Delta\theta,$$

где K_{sAB} — чувствительность термопары.

Рис. 5.18. Схемы включения термопар:
 а — контур из двух разнородных проводников; б — термопара с милливольтметром; в — последовательное соединение термопар



Если к термопаре подключить милливольтметр с сопротивлением R_n , то по значению термоЭДС можно определить температуру (рис. 5.18, б). Чтобы получить достоверные результаты, необходимо один спай термопары, называемый рабочим, поместить в среду с температурой θ_1 подлежащей измерению, а температуру θ_0 других — нерабочих (холодных; свободных) спаев поддерживать постоянной. Уравнение преобразования будет иметь вид

$$E_{AB} = f(\theta_0, \theta_1) = f(\theta_1) - C = f(\theta_1),$$

где $C = f(\theta_0)$ — постоянная величина.

Обычно термоЭДС не рассчитывают аналитически, а определяют по градуировочным таблицам или графикам, получаемым экспериментально, для различных материалов при температуре холодных спаев $\theta_0 = 0$.

При включении в цепь термопары измерительного прибора или другого преобразователя в местах подсоединения образуются другие спаи, и в общем случае такую цепь можно рассматривать как состоящую из трех проводников. Можно показать, что если точки подключения прибора имеют одинаковую температуру, то подключение прибора не влияет на термоЭДС измерительной термопары.

В качестве материалов для термопар используют различные драгоценные металлы (платину, золото, иридий, родий) и их сплавы, а также неблагородные металлы и сплавы (сталь, никель, хром, сплавы нихром, копель, алюмель и др.). Сравнительно редко применяют термопары из полупроводниковых материалов: кремния, селена и др.

Полупроводниковые термопары имеют малую механическую прочность, обладают большим внутренним сопротивлением, хотя и обеспечивают большую термоЭДС по сравнению с металлами.

ТермоЭДС возникает только в спаях разнородных материалов. При сравнении различных материалов в качестве базовой применяют термоЭДС платины, по отношению к которой определяются термоЭДС других материалов.

Хотя зависимость $E = f(\theta)$ при $\theta_0 = 0$ является нелинейной, в первом приближении значение термоЭДС можно определить по выражению

$$E = e_{\Sigma}(\theta_1 - \theta_0),$$

где e_{Σ} — суммарная термоЭДС материалов термопары.

Суммарную термоЭДС определяют по данным табл. 5.2:

$$e_{\Sigma} = e_1 - e_2,$$

где e_1 e_2 — термоЭДС используемых материалов.

Для термопары стремятся использовать материалы, имеющие разный потенциал по отношению к платине.

Так, если использовать хромель, у которого термоЭДС $e_x = +31,3$ мкВ/°С, и алюмель, у которого $e_A = -10,2$ мкВ/°С, то термоЭДС хромель-алюмелевой термопары составит $E_{xA} = e_x - e_A = 31,3 + 10,2 = +41,5$ мкВ/°С. При выборе материала термопары необходимо учитывать условия эксплуатации (влияние температуры, влажности, загрязненности и других факторов на материал электродов).

Таблица 5.2

**Значения термоЭДС некоторых материалов по отношению
к платине**

Материал	ТермоЭДС, мкВ/°С	Материал	ТермоЭДС, мкВ/°С
Алюмель	-10,2	Медь	7,6
Вольфрам	7,9	Молибден	1,3
Золото	8,0	Платиноиридий	13
Константан	-35	Платинородий	6,46
Копель	-40	Хромель	31,3
Манганин	8		

Чтобы повысить выходную ЭДС, используют последовательное включение термопар — термобатарей (рис. 5.18, в). В этом случае все свободные спаи должны находиться при постоянной температуре, лучше всего при 0 °С.

Важным фактором учета погрешностей при измерениях с помощью термопары является введение поправок A на температуру ее свободных концов. При проведении ответственных измерений применяется термостатирование свободных концов термопары при 0 °С.

Однако в промышленных условиях термостатирование применять технически сложно и экономически нецелесообразно. Значение поправки Δ связано с разностью температур свободных концов через коэффициент K_t . Из-за нелинейности зависимости $E = f(\theta)$ значение K_t различно для каждого участка кривой, поэтому градуировочную кривую (статическую характеристику) разделяют на участки по 100 °С и для каждого участка определяют K_t .

Еще одна причина возможного возникновения погрешности — сопротивление измерительной цепи, состоящей из непосредственно термопары и соединительных проводов.

Таблица 5.3

Характеристики промышленных термопар

Условное обозначение	Материал термоэлектродов	Предел преобразования, (при работе в кратковременном режиме), °С	Погрешность термоЭДС, мВ	
			до 300 °С	свыше 300 °С
ПП	Платинородий (10 % родия) — платина	0... 1300 (1600)	±0,01	$\pm[0,01 + 2,5 \times 10^{-5}(\theta - 300)]$
ПР-30/6	Платинородий (30 % родия) — платинородий (6 % родия)	300... 1600 (1800)	—	$\pm[0,01 + 3,3 \times 10^{-5}(\theta - 300)]$
ХА	Хромель—алюмель	-50... 1000 (1300)	±0,16	$\pm[0,16 + 2,0 \times 10^{-4}(\theta - 300)]$
ХК	Хромель—копель	-50... 600 (800)	±0,2	$\pm[0,2 + 6,0 \times 10^{-4}(\theta - 300)]$
ВР-5/20	Вольфрамовый (5 % рения) — вольфрамовый (20 % рения)	0... 2200 (2500)	±0,08 (до 1000 °С)	$\pm[0,08 + 4,0 \times 10^{-5}(\theta - 1000)]$ (от 1000 до 1800 °С)

В отечественных термоэлектрических термометрах сопротивление этой цепи принимают равным 5 Ом и регулируют его при помощи добавочного сопротивления из манганина непосредственно при наладке прибора.

Для измерения температур в пределах от -200 до 2500 °С выпускают стандартные термопреобразователи температуры (табл. 5.3).

В зависимости от назначения термопары делятся на погружаемые, предназначенные для измерения температуры жидких и газообразных сред, и поверхностные, предназначенные для измерения температуры поверхности твердого тела.

Различают термопары малоинерционные, тепловая постоянная времени которых не превышает 5 с для погружаемых и 10 с для поверхностных; средней инерционности — соответственно не более 60 и 120 с; большой инерционности — соответственно до 180 и 300 с.

Термопары помещают в защитный чехол из металла или керамики.

Для изоляции используют стекло, асбест, фарфор, шамот. При низких температурах можно использовать шелковую и эмалевую изоляцию.

К достоинствам термопар необходимо отнести возможность измерений в большом диапазоне температур, простоту устройства, надежность в эксплуатации. Благодаря этим достоинствам термопары применяют очень широко.

Недостатки термопар — невысокая чувствительность, большая инерционность, необходимость поддержания постоянной температуры свободных спаев.

Глава 6 ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

6.1. Общие сведения

Основное требование, предъявляемое к информационным электрическим машинам автоматических устройств — высокая точность преобразования электрических или механических входных величин (сигналов управления) соответственно в механические или электрические выходные величины, находящиеся в строго постоянной и вполне определенной функциональной зависимости от входной величины. Например, частота вращения n преобразуется в выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, что имеет место в тахогенераторах; величина угла поворота α — в значения выходных напряжений, изменяющихся по вполне определенному закону в зависимости от α , что имеет место во вращающихся трансформаторах, сельсинах, магнесинах и т.п.

К информационным электрическим машинам не предъявляются строгих требований в отношении их энергетических показателей (КПД, $\cos \varphi$), как это имеет место в обычных силовых (энергетических) машинах. Эти требования здесь отступают на второй план, не являясь основными.

Информационные машины весьма разнообразны как по устройству, принципу действия, роду тока, так и по функциям, которые они выполняют в схемах автоматики. Укрупненная классификация информационных электрических машин представлена на рис. 6.1.

6.2. Тахогенераторы

Тахогенераторами называются небольшие электрические машины, предназначенные для преобразования механического перемещения — вращения вала — в электрический сигнал — выходное напряжение.

Основное требование, которое предъявляется к большинству тахогенераторов, — линейность выходной характеристики, т.е. пропорциональность выходного напряжения U_{Γ} частоте вращения n (рис. 6.2):

$$U_{\Gamma} = kn = k_1 \frac{d\alpha}{dt},$$

где k, k_1 — постоянные величины; α — угол поворота.

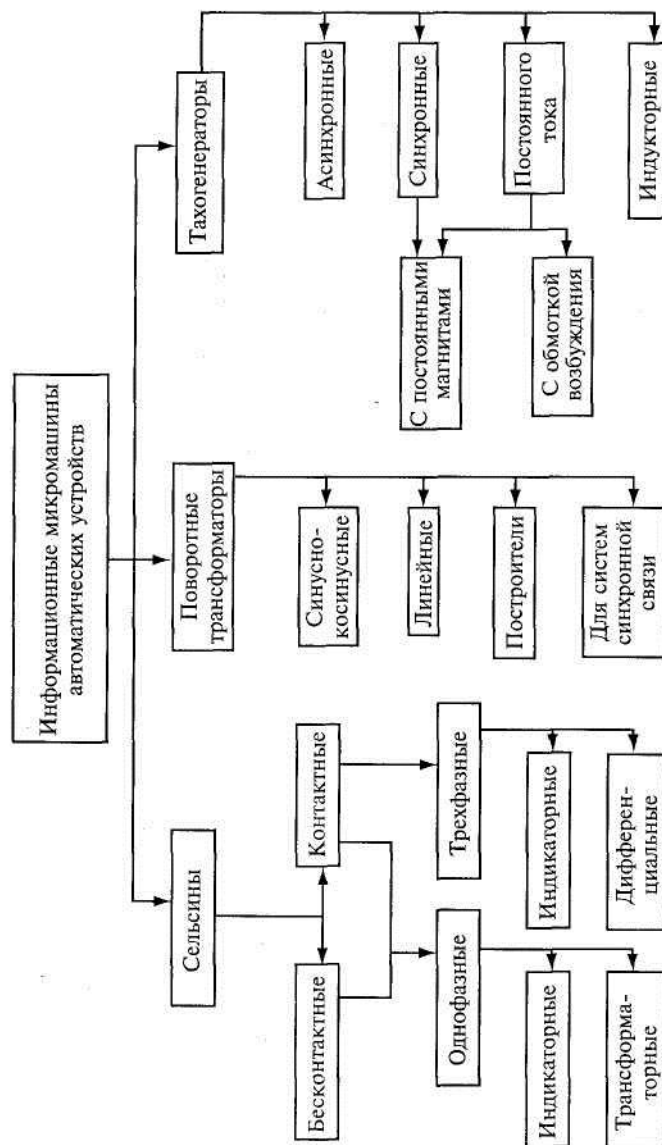


Рис. 6.1. Классификация информационных электрических машин

По роду тока можно различать тахогенераторы переменного и постоянного тока. Тахогенераторы переменного тока могут быть асинхронными и синхронными. Тахогенераторы постоянного тока могут быть либо с постоянными магнитами, либо с электромагнитным возбуждением (с обмоткой возбуждения).

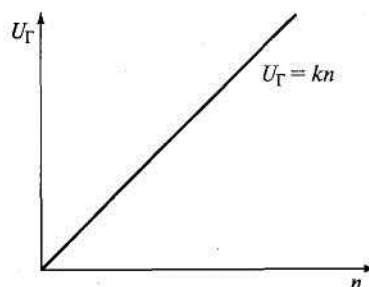


Рис. 6.2. Характеристика идеального тахогенератора

Тахогенераторы в схемах автоматики используются для следующих целей:
 измерения скорости вращения. В этом случае выходное напряжение подается на вольтметр, шкала которого отградуирована в об/мин;
 осуществления обратной связи по скорости в следящих системах;
 осуществления электрического дифференцирования: $U_T = k_1(d\alpha/dt)$;

осуществления электрического интегрирования:

$$\alpha = \frac{1}{k_1} \int U_T(t) dt.$$

Основные требования, предъявляемые к тахогенераторам:

- высокая линейность выходной характеристики — минимальное отклонение ее от прямой $U_T = kn$, являющейся идеальной выходной характеристикой тахогенератора;
- большая крутизна выходной характеристики $k = U_T/n$, мВ/(об/мин);
- симметрия выходного напряжения: $U_T(+n) = U_T(-n)$;
- минимальное значение нулевого напряжения U_T при $n = 0$ (у тахогенераторов переменного тока) и минимальная зона нечувствительности (у тахогенераторов постоянного тока);
- максимальная выходная мощность при минимальной потребляемой мощности;
- минимальная пульсация выходного напряжения (у тахогенераторов постоянного тока);
- минимальное изменение фазы выходного напряжения (у тахогенераторов переменного тока);
- малый момент инерции ротора и малый момент сопротивления;
- стабильность выходной характеристики при изменении окружающих условий;
- малые габаритные размеры и масса;
- высокие показатели надежности (ресурс, интенсивность отказов и др.).

К тахогенераторам, предназначенным для разных целей, предъявляются различные требования. Так, к тахогенераторам, обеспечивающим обратную связь по скорости и демпфирование следящих систем, предъявляются повышенные требования по крутизне выходной характеристики и мощности выходного сигнала. Линейность выходной характеристики для них не играет существенной роли.

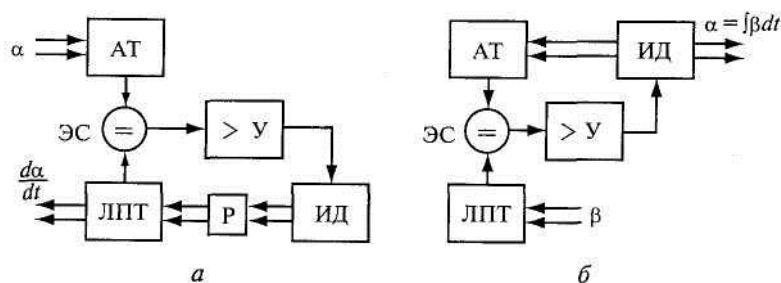


Рис. 6.3. Схемы использования тахогенератора для дифференцирования (а) и интегрирования (б) функций

К тахогенераторам, предназначенным для выполнения операций дифференцирования и интегрирования, наоборот, предъявляются повышенные требования в отношении линейности, точности, стабильности характеристик, в то время как значение мощности выходного сигнала и крутизна выходной характеристики здесь не являются определяющими факторами.

Рассмотрим более подробно работу тахогенераторов как дифференцирующих и интегрирующих элементов.

Для дифференцирования какой-либо функции необходимо вращать ротор тахогенератора — поворачивать его на углы α , пропорциональные данной функции. Выходное напряжение при этом будет прямо пропорционально производной заданной функции:

$$U_T = k_1(d\alpha/dt).$$

В тех случаях, когда производная заданной функции должна быть представлена в виде угловой величины, необходимо использовать специальную схему (рис. 6.3, а), состоящую из асинхронного тахогенератора (АТ), элемента сравнения (ЭС), усилителя (У), исполнительного двигателя (ИД), редуктора (Р), линейного поворотного трансформатора (ЛПТ). Частота вращения ЛПТ пропорциональна производной $d\alpha/dt$.

Для интегрирования заданной функции по времени (рис. 6.3, б) нужно преобразовывать ее в

электрическое напряжение $U(t)$ и вращать ротор тахогенератора так, чтобы его выходное напряжение $U_T(t)$ в любой момент времени компенсировало напряжение $U(t)$. Тогда угол поворота ротора тахогенератора будет пропорционален интегралу заданной функции по времени:

$$\alpha = \frac{1}{k_1} \int U(t) dt \approx \int \beta dt.$$

Устройство и принцип действия асинхронного тахогенератора

Асинхронные тахогенераторы по своей конструкции не отличаются от двухфазных асинхронных исполнительных двигателей с полым немагнитным ротором. Так же как и двигатели, они имеют на статоре две фазные обмотки, оси которых смещены в пространстве относительно друг друга на угол 90° . Одна из них В (рис. 6.4, а) подключается к сети и называется обмоткой возбуждения. С другой обмотки Г снимается выходное напряжение тахогенератора. Эта обмотка называется выходной, или генераторной.

В зависимости от места расположения обмоток различают три конструктивные формы асинхронных тахогенераторов:

- с обмотками только на внешнем статоре;
- с обмотками только на внутреннем статоре;
- с одной обмоткой на внешнем статоре и одной — обычно обмоткой возбуждения — на внутреннем.

Полый ротор асинхронного тахогенератора в отличие от ротора исполнительного двигателя с целью обеспечения большого активного сопротивления, мало меняющегося при изменении температуры, выполняется (в точных тахогенераторах) из константана, специального манганина, фосфористой или марганцовистой бронзы и т. п.

Рассмотрим сначала физические процессы, протекающие в асинхронном тахогенераторе при $n = 0$.

При неподвижном роторе ($n = 0$) ток обмотки возбуждения создает пульсирующий по продольной оси d магнитный поток Φ_{ds} , который, пронизывая ротор, наводит в нем ЭДС трансформации (см. рис. 6.4, а). Контуры токов ротора от ЭДС трансформации располагаются в плоскостях, перпендикулярных продольной оси d — оси потока возбуждения Φ_{ds} . Эти токи создают магнитный поток ротора Φ_{dR} , направленный навстречу потоку возбуждения Φ_{ds} и, который, как в любом трансформаторе, компенсируется возрастающим током первичной обмотки — обмотки возбуждения.

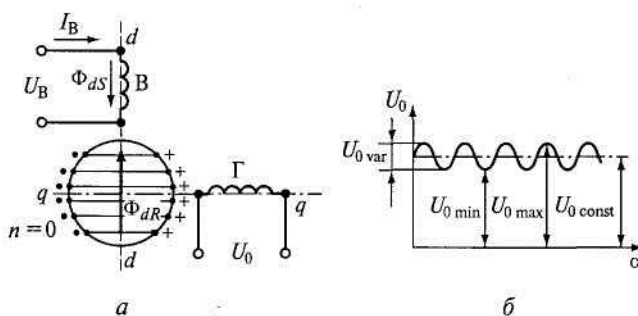


Рис. 6.4. К принципу действия асинхронного тахогенератора при $n = 0$:
а — контуры токов и магнитные потоки; б — зависимость нулевого напряжения от положения ротора

Теоретически при неподвижном роторе ($n = 0$) в тахогенераторе магнитный поток имеется только по продольной оси — оси обмотки возбуждения, поэтому в генераторной обмотке, ось которой смещена на 90° к обмотке возбуждения, никаких ЭДС наводиться не должно. Однако у всех тахогенераторов и при $n = 0$ на зажимах генераторной обмотки имеется некоторое незначительное напряжение, которое называется нулевым или остаточным.

Нулевое напряжение U_0 — напряжение при $n = 0$ — явление весьма нежелательное. Причины его возникновения весьма разнообразны:

- а) неточный сдвиг обмоток;
- б) несимметрия магнитной цепи из-за разной проводимости стали вдоль и поперек проката, наличия

короткозамкнутых контуров, неравномерности воздушного зазора;

в) наличие потоков рассеяния;

г) наличие емкостных связей между обмотками, особенно заметных в тахогенераторах с повышенной частотой питающего напряжения;

д) несимметрия полого ротора и т.п.

Большинство указанных причин приводят к тому, что в тахогенераторе при $n = 0$ появляется поперечная составляющая магнитного потока, которая наводит ЭДС E_0 в генераторной обмотке.

Значение нулевого напряжения U_0 не остается постоянным при повороте ротора (рис. 6.4, б). Его можно разделить на постоянную U_{0const} и переменную U_{0var} составляющие.

Постоянная составляющая U_{0const} , обусловленная причинами, указанными ранее в пунктах «а ...г», у большинства тахогенераторов находится в пределах от 25 до 100 мВ.

Переменная составляющая $U_{0var} = U_{0max} - U_{0min}$ (см. рис. 6.4, б) зависит в основном от толщины, т.е. неодинаковой электрической проводимости полого ротора в различных направлениях (от его несимметрии). Она обычно составляет 3...7 мВ.

Для борьбы с постоянной составляющей нулевого напряжения очень часто обмотки возбуждения и генераторную размещают на разных статорах: одну — на внутреннем, другую — на внешнем. При сборке тахогенератора внутренний статор поворачивают относительно внешнего, находят положение, соответствующее U_{0min} , и в этом положении фиксируют.

В целях борьбы с переменной составляющей нежелательного нулевого напряжения тщательно обрабатывают и калибруют ротор, добиваясь его максимальной симметрии в электрическом отношении. К уменьшению переменной составляющей остаточного напряжения ведет увеличение числа p пар полюсов обмоток статора. Как уже говорилось ранее, обычно $2p > 4$.

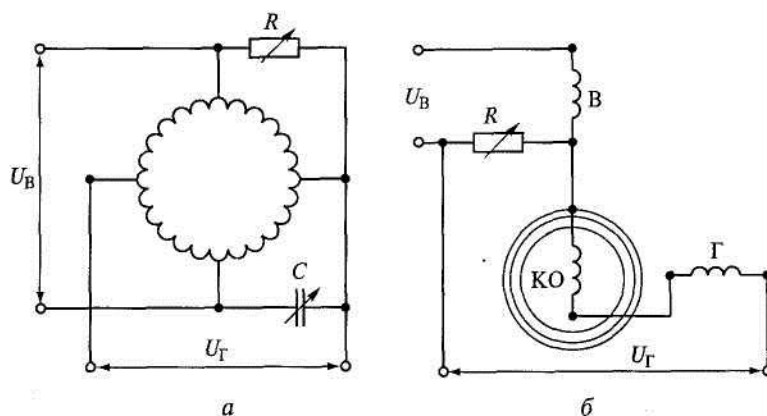


Рис. 6.5. Схемы, применяемые для уменьшения нулевого напряжения тахогенератора:
а — путем подбора R и C ; б — путем подбора числа витков КО и активного сопротивления R

В целом ряде тахогенераторов для борьбы с нулевым напряжением применяются специальные схемы. Они весьма разнообразны. На рис. 6.5 в качестве примера показаны две наиболее простые из них. В первой схеме (см. рис. 6.5, а) нулевое напряжение уменьшается путем подбора R и C , во второй (см. рис. 6.5, б) — путем подбора числа витков компенсационной обмотки (КО), расположенной на внутреннем статоре, и значения активного сопротивления R . Недостатки этих схем: во-первых, неполное устранение U_0 ; во-вторых, наличие электрической связи между обмотками возбуждения и генераторной.

При вращении ротора ($n \neq 0$) его «волокна» — элементарные проводники пересекают магнитный поток возбуждения Φ_{ds} , и в них, кроме ЭДС трансформации, наводится еще ЭДС вращения (резания). Под действием ЭДС вращения по ротору протекают токи, контуры которых при большом активном сопротивлении ротора практически совпадают с осью потока возбуждения Φ_{ds} (рис. 6.6). Эти токи создают свой магнитный поток ротора Φ_{dR} , который направлен по поперечной оси q тахогенератора. Поток Φ_{dR} , сцепляясь с витками генераторной обмотки Γ , наводит в них ЭДС E_Γ — выходную ЭДС тахогенератора. Частота этой ЭДС равна частоте сети. Действительно, так как $E_\Gamma = \omega_\Gamma \times (d\Phi_{qR}/dt)$, то ее частота равна частоте изменения потока Φ_{qR} , вызываемого токами от ЭДС вращения. Частота ЭДС

вращения при $n = \text{const}$ равна частоте изменения во времени потока Φ_{dS} , которым она наводится: $E_{ep} \sim \Phi_{dS}n$; таким образом, частота изменения E_{Γ} во времени равна частоте питающей сети — напряжения U_B .

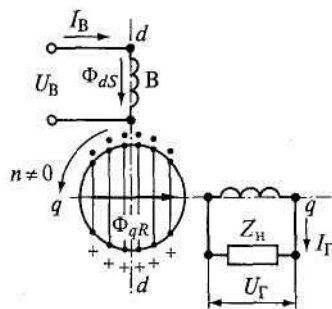


Рис. 6.6. К принципу действия асинхронного тахогенератора при $n \neq 0$

ЭДС вращения ротора E_{qR} , поток ротора Φ_{qR} поперечной оси и выходная ЭДС E_{Γ} тахогенератора по значению (амплитуде) пропорциональны частоте вращения ротора n , т.е. $E_{\Gamma} \sim \Phi_{qR} \sim n$.

Выходное напряжение тахогенератора U_{Γ} меньше ЭДС E_{Γ} на значение падения напряжения на сопротивлении Z_{Γ} генераторной обмотки, т.е. $U_{\Gamma} = E_{\Gamma} - I_{\Gamma}Z_{\Gamma}$.

На рис. 6.7, а представлена схема включения двухфазного несимметричного асинхронного двигателя с конденсатором C в цепи обмотки В. На рис. 6.7, б представлена схема включения асинхронного тахогенератора. Сравнивая эти схемы, нетрудно заметить, что они весьма похожи друг на друга, только в схеме тахогенератора зажимы 1 — Г, на которые у двигателя подается напряжение U_B , замкнуты накоротко; следовательно, у тахогенератора $U_B = 0$. Также в схеме тахогенератора вместо конденсатора C включено сопротивление нагрузки Z_H .

Выходное напряжение тахогенератора U_{Γ} может быть найдено как падение напряжения на сопротивлении Z_H нагрузки:

$$U_{\Gamma} = I_{\Gamma}Z_H.$$

К положительным качествам асинхронных тахогенераторов, которые способствуют их весьма широкому распространению, следует отнести:

бесконтактность — отсутствие скользящих контактов;

малоинерционность, обусловленную малым моментом инерции ротора;

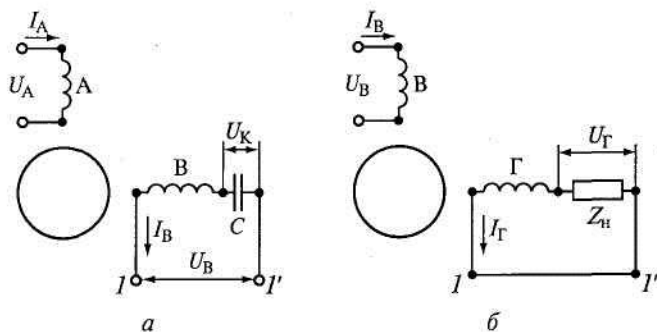


Рис. 6.7. Схемы включения двухфазного конденсаторного двигателя (а) и асинхронного тахогенератора (б)

наличие малого момента сопротивления (трения в подшипниках и тормозящего электромагнитного) вследствие отсутствия радиальных и аксиальных сил, действующих на ротор;

большую надежность;

неплохую стабильность характеристик.

Недостатками асинхронных тахогенераторов, ограничивающих области их применения, являются:

теоретическая и практическая нелинейность выходной характеристики;
 наличие фазовой погрешности;
 наличие нулевого (остаточного) напряжения;
 малая выходная мощность, что приводит к необходимости увеличения габаритных размеров (асинхронный тахогенератор в 2...4 раза больше тахогенератора постоянного тока с такой же выходной мощностью);
 низкий $\cos\varphi$;
 большие габаритные размеры и масса.

Однако несмотря на наличие ряда существенных недостатков, асинхронные тахогенераторы с полым ротором как у нас, так и за рубежом выпускаются в больших количествах.

Синхронные тахогенераторы

Большое распространение в настоящее время получили синхронные тахогенераторы, конструктивно представляющие собой однофазные (а иногда и трехфазные) синхронные генераторы малой мощности с ротором, имеющим явно выраженные полюсы и выполненным в виде постоянного магнита — звездочки. Благодаря выполнению возбуждения постоянным магнитом в синхронном тахогенераторе отсутствуют скользящие контакты, что значительно повышает его надежность.

При вращении ротора тахогенератора в обмотке его статора наводится ЭДС, амплитуда которой прямо пропорциональна частоте вращения n :

$$E_{\Gamma} = 4,44f w_{\Gamma} \Phi = 4,44(pn/60) w_{\Gamma} \Phi = kn,$$

где $f = pn/60$ — частота генерируемой ЭДС; w_{Γ} — эффективное число витков обмотки статора; Φ — магнитный поток; $k = 4,44(pw_{\Gamma}/60)\Phi$ — постоянный (при $\Phi = \text{const}$) коэффициент, равный крутизне выходной характеристики; p — число пар полюсов.

Применение синхронных тахогенераторов в ряде схем затруднительно вследствие того, что у них одновременно с амплитудой при изменении частоты вращения n изменяется и частота f выходного напряжения. Изменение частоты приводит к изменению значения реактивных сопротивлений $X_L = 2\pi fL$ и $X_C = 1/(2\pi fC)$ как самого тахогенератора, так и нагрузки, на которую он работает. Это ведет к искажению выходной характеристики и к появлению погрешностей. При определенных условиях вследствие возникновения резонансных явлений работа синхронного тахогенератора не удовлетворяет требованиям схем автоматики. В схемах автоматики, работающих на частотном принципе, непостоянство частоты/ (пропорциональность ее частоте вращения n), наоборот, считается весьма положительным качеством синхронного тахогенератора.

Положительным качеством всех без исключения синхронных тахогенераторов является то, что они при малых габаритных размерах имеют большую выходную мощность.

Тахогенераторы постоянного тока

Тахогенераторы постоянного тока — это небольшие генераторы постоянного тока чаще с возбуждением тока при помощи постоянных магнитов, реже — с независимым возбуждением (рис. 6.8). Конструктивно они не отличаются от обычных машин постоянного тока малой мощности.

Выходное напряжение тахогенератора U_{Γ} может быть выражено так же, как напряжение обычного генератора постоянного тока через ЭДС якоря E_{Γ} , падение напряжения в обмотке якоря $I_{\Gamma}r_{\Gamma}$ и падение напряжения на щеточном контакте $\Delta U_{\text{щ}}$:

$$U_{\Gamma} = E_{\Gamma} - I_{\Gamma}r_{\Gamma} - \Delta U_{\text{щ}}, \quad (6.1)$$

где I_{Γ} — ток в обмотке якоря; r_{Γ} — сопротивление обмотки якоря.

Выразим ЭДС якоря через магнитный поток Φ и частоту вращения n :

$$E_{\Gamma} = c_E \Phi n, \quad (6.2)$$

а ток якоря — через напряжение на выходе U_{Γ} и сопротивление нагрузки R_H (см. рис. 6.8):

$$I_{\Gamma} = U_{\Gamma}/R_H, \quad (6.3)$$

и, подставив (6.2), (6.3) в (6.1), получим

$$U_{\Gamma} = c_E \Phi n - (U_{\Gamma}/R_H)r_{\Gamma} - \Delta U_{\text{ш}}, \quad (6.4)$$

где c_E — постоянная, определяемая конструктивными параметрами генератора.

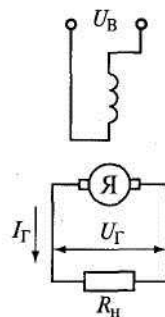


Рис. 6.8. Схема тахогенератора постоянного тока с независимым возбуждением

Используя (6.4), найдем окончательное выражение для выходного напряжения:

$$U_{\Gamma} = \frac{c_E \Phi n}{1 + r_{\Gamma}/R_H} - \frac{\Delta U_{\text{ш}}}{1 + r_{\Gamma}/R_H}. \quad (6.5)$$

Если пренебречь падением напряжения на щеточном контакте (принять $\Delta U_{\text{ш}} = 0$), то выражение (6.5) примет вид

$$U_{\Gamma} = \frac{c_E \Phi}{1 + r_{\Gamma}/R_H} n.$$

При постоянных потоке Φ , сопротивлениях якоря r_{Γ} и нагрузки R_H

$$U_{\Gamma} = kn,$$

где величина

$$k = \frac{c_E \Phi}{1 + r_{\Gamma}/R_H}$$

есть крутизна выходной характеристики тахогенератора.

При $\Phi = \text{const}$, $r_{\Gamma} = \text{const}$ и $R_H = \text{const}$ крутизна k постоянна и выходная характеристика тахогенератора (рис. 6.9) является прямой линией. У современных тахогенераторов постоянного k она находится в пределах от 3 до 100 мВ/(об/мин).

Чем больше c_E , Φ , R_H и меньше r_{Γ} , тем больше крутизна выходной характеристики. Наибольшая крутизна имеет место при холостом ходе тахогенератора, когда $R_H = \infty$ (см. прямую 1 на рис. 6.9):

$$k_{\max} = c_E \Phi; U_{\Gamma \max} = E_{\Gamma \max} = c_E \Phi n.$$

Чем меньше сопротивление нагрузки R_H , тем меньше крутизна выходной характеристики (см. прямую 2 на рис. 6.9).

Влияние сопротивления щеточного контакта на выходную характеристику легко установить, анализируя равенство (6.5). При $\Delta U_{щ} \neq 0$, что бывает в реальных тахогенераторах, выходная характеристика $U_{\Gamma} = f(n)$ пересекает ось ординат (при $n = 0$) не в начале координат, а в точке $U_{\Gamma}' = \Delta U_{щ} / (1 + r_{\Gamma} / R_H)$ (см. прямую 3 на рис. 6.9).



Рис. 6.9. Выходные характеристики 1...4 тахогенератора постоянного тока

За счет падения напряжения на щеточном контакте у тахогенератора постоянного тока появляется зона нечувствительности — зона частот вращения от $n = 0$ до $n = n_{\min}$, при которых выходное напряжение U_{Γ} равно нулю. Границу зоны нечувствительности легко найти из выражения (6.5), считая $U_{\Gamma} = 0$:

$$n_{\min} = \Delta U_{щ} / (c_E \Phi) = \Delta U_{щ} / k_{\max}.$$

В целях уменьшения зоны нечувствительности необходимо тщательно подбирать щетки, чтобы они обеспечивали минимальное падение напряжения $\Delta U_{щ}$. В обычных тахогенераторах устанавливают медно-графитовые или серебряно-графитовые щетки, а в прецизионных тахогенераторах особенно ответственных систем автоматики — проволочные щетки с серебряным, золотым или даже платиновым покрытием.

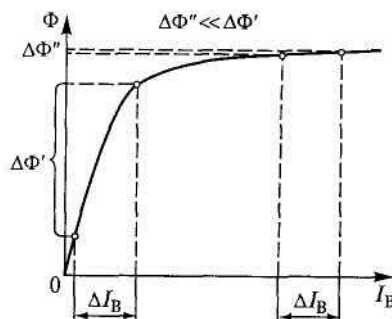


Рис. 6.10. Влияние насыщения на изменение магнитного потока при изменении тока возбуждения

Влияние реакции якоря в тахогенераторах постоянного тока проявляется в виде искажения выходной характеристики. Если тахогенератор рассчитан так, что он работает на изгибе магнитной характеристики (рис. 6.10), то при малом сопротивлении нагрузки R_H вследствие значительного тока I_{Γ} и его увеличения с ростом n магнитный поток Φ тахогенератора не остается постоянным. Из-за размагничивающего действия реакции якоря магнитный поток с увеличением скорости уменьшается,

что приводит к уменьшению крутизны k выходной характеристики, которую можно записать в виде

$$k = \frac{c_E(\Phi - \Delta\Phi)}{1 + r_T/R_n},$$

изменению ее вида (см. кривую 4 на рис. 6.9) и появлению скоростной амплитудной погрешности, составляющей у современных тахогенераторов 0,5...3 %.

6.3. Сельсины

В современной технике очень часто возникает необходимость синхронизации вращения или поворота различных осей механизмов, находящихся на значительном расстоянии друг от друга и механически между собой не связанных. Эта задача чаще всего решается с помощью электрических систем синхронной связи.

Синхронной связью называется такая электрическая связь, которая обеспечивает одновременное вращение или одновременный поворот двух или нескольких механически несвязанных, находящихся на расстоянии друг от друга осей механизмов.

В технике получили распространение два основных вида систем синхронной связи: система электрического вала (синхронного вращения) и система передачи угла (синхронного поворота).

Системы синхронного вращения применяются там, где требуется осуществить синхронное вращение двух или нескольких находящихся на расстоянии друг от друга осей механизмов, имеющих значительные моменты сопротивления. Синхронное вращение осуществляется с помощью обычных электрических машин, чаще всего трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором. Обмотки роторов двигателей в этом случае соединяются друг с другом, обмотки статоров питаются от одной и той же сети трехфазного тока.

Системы синхронного поворота применяются для дистанционного управления, регулирования или контроля. Чаще всего синхронный поворот осуществляется с помощью небольших индукционных электрических машин — трехфазных или однофазных сельсинов.

Трехфазные сельсины конструктивно не отличаются от обычных асинхронных машин с фазным ротором. Простейшая трехфазная система синхронной связи представляет собой соединение двух одинаковых сельсинов: приемника и датчика. Сельсины включаются в сеть переменного тока своими первичными обмотками, которыми могут быть как обмотки статора, так и обмотки ротора (обычно первичной является обмотка статора). Концы соответствующих фаз вторичных обмоток обоих сельсинов соединяются друг с другом (рис. 6.11). В зависимости от порядка следования фаз приемника и датчика сельсины вращаются в одном или разных направлениях.

Наибольшее распространение в настоящее время получили системы передачи угла, осуществляемые с помощью однофазных сельсинов.

Однофазные сельсины — это обычно индукционные машины, которые имеют однофазную обмотку возбуждения и трехфазную обмотку синхронизации. На рис. 6.12 представлена схема однофазного контактного сельсина с обмоткой возбуждения на статоре и трехфазной обмоткой синхронизации на роторе.

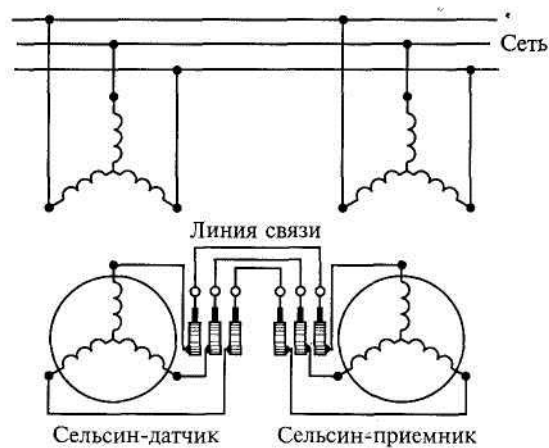


Рис. 6.11. Схема включения трехфазных сельсинов

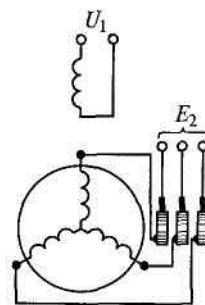


Рис. 6.12. Схема однофазного контактного сельсина

В схемах автоматики используются две принципиально отличные друг от друга системы синхронной передачи угла: индикаторная и трансформаторная.

Индикаторная система синхронного поворота применяется там, где момент сопротивления на ведомой оси мал или совсем отсутствует (ось нагружена стрелкой или шкалой). В индикаторной системе сельсин-приемник самостоятельно отрабатывает угол, задаваемый сельсином-датчиком.

Трансформаторная система синхронного поворота применяется там, где на ведомой оси имеется значительный момент сопротивления. В трансформаторной системе принимающий сельсин (сельсин-приемник) отрабатывает задаваемый сельсином-датчиком угол не самостоятельно, а с помощью механически и электрически связанного с ним исполнительного двигателя.

Сельсины выпускаются как на промышленную частоту 50 Гц, так и на повышенные частоты 400, 500 Гц.

Работа сельсинов в индикаторном режиме

Простейшая индикаторная система синхронной связи для дистанционной передачи угла состоит из двух одинаковых сельсинов (приемника и датчика) и линии связи (рис. 6.13). Обмотки возбуждения (ОВ) обоих сельсинов подключаются к однофазной сети переменного тока. Концы фаз A, B, C обмотки синхронизации приемника соединяются линией связи с концами фаз обмотки синхронизации датчика.

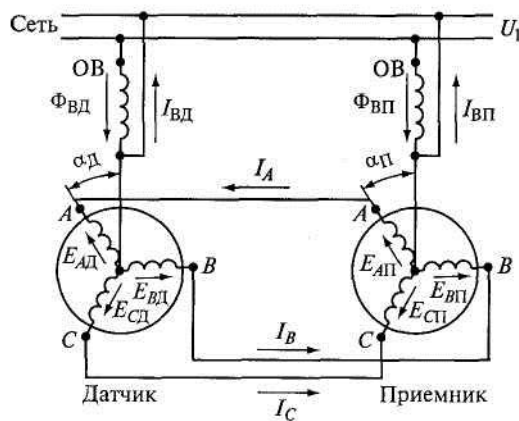


Рис. 6.13. Индикаторная система синхронной связи

Переменные токи $I_{ВД}$ и $I_{ВП}$ обмоток возбуждения сельсинов создают магнитные потоки $\Phi_{ВД}$ и $\Phi_{ВП}$, которые индуцируют в обмотках синхронизации сельсинов электродвижущие силы: $E_{АД}$, $E_{ВД}$, $E_{СД}$, $E_{АП}$, $E_{ВП}$ и $E_{СП}$. Значение ЭДС обмотки той или иной фазы зависит от ее пространственного расположения относительно обмотки возбуждения. Если фазы обмоток синхронизации датчика и приемника расположены одинаково относительно соответствующих обмоток возбуждения ($\alpha_{д} = \alpha_{п}$), то в

соединенных между собой линией связи обмотках синхронизации приемника и датчика индуцируются одинаковые и встречно направленные ЭДС. Эти ЭДС уравнивают друг друга, и в цепи обмоток синхронизации ток отсутствует. Такое положение роторов сельсинов называется согласованным.

Если ротор датчика поворотом на некоторый угол вывести из согласованного положения, то равновесие ЭДС, индуцированных в одноименных обмотках синхронизации, нарушится. За счет этого в обмотках синхронизации и линии связи появятся токи I_A , I_B и I_C . В результате взаимодействия этих токов с магнитными потоками обмоток возбуждения возникнут вращающие моменты как в сельсине-датчике, так и в сельсине-приемнике, которые будут стремиться привести роторы сельсинов в согласованное положение. Вращающие моменты, действующие на роторы приемника и датчика, будут равны по значению и противоположны по направлению.

Так как ротор сельсина-датчика после поворота обычно фиксируется (затормаживается), то поворачиваться (до согласованного положения) будет ротор сельсина-приемника. Значение синхронизирующего момента, развиваемого сельсином-приемником, зависит от угла рассогласования и параметров сельсинов системы.

Точность работы сельсинов в индикаторном режиме. Основным требованием, которое предъявляется к сельсином, работающим в схемах синхронной связи, является точность отработки сельсином-приемником заданного сельсином-датчиком угла. Точность работы сельсинов в схеме синхронной связи зависит как от качества работы (точности) сельсинов-приемников, так и от качества работы (точности) сельсинов-датчиков.

Точность работы сельсина-приемника в индикаторном режиме характеризуется погрешностью $\Delta\theta$, которая определяется как полусумма максимального положительного $\theta_{\max 1}$ и максимального отрицательного $\theta_{\max 2}$ отклонений ротора приемника от согласованного с ротором датчика положения за один оборот:

$$\Delta\theta = (\theta_{\max 1} - \theta_{\max 2})/2.$$

Погрешность в статическом режиме определяется путем поворота ротора датчика сначала по часовой стрелке на 360° . Измерение погрешности производится либо непрерывно (с помощью приборов), либо через 1 или 10° в зависимости от требуемой точности.

По значению погрешности $\Delta\theta$ в статическом режиме при работе по схеме «один на один» различают индикаторные сельсины-приемники четырех классов точности: 1-й класс — $\Delta\theta$ не более $\pm 30'$; 2-й класс — $\Delta\theta$ не более $\pm 45'$; 3-й класс — $\Delta\theta$ не более $\pm 60'$; 4-й класс — $\Delta\theta$ не более $\pm 90'$.

Точность работы сельсинов-приемников в индикаторном режиме определяет ряд факторов:
удельный синхронизирующий момент $M_{уд}$ — момент, приходящийся на 1° угла рассогласования;
момент сопротивления на валу приемника M_c (обычно момент трения самого приемника $M_c = M_T$);
добротность сельсина — отношение удельного синхронизирующего момента к моменту трения ($D = M_{уд}/M_T$);

магнитная и электрическая несимметрия;
дисбаланс ротора;
время успокоения — время, в течение которого успокаивается (останавливается) ротор приемника после рассогласования на $\pm 179^\circ$;
точность сельсинов-датчиков, режим работы и др.

Работа сельсинов в трансформаторном режиме

Простейшая трансформаторная система синхронной связи (рис. 6.14) состоит из двух сельсинов — приемника и датчика, соединенных линией связи, усилителя (У) и исполнительного двигателя (ИД), вал которого механически соединен с валом ротора сельсина-приемника (обратная механическая связь).

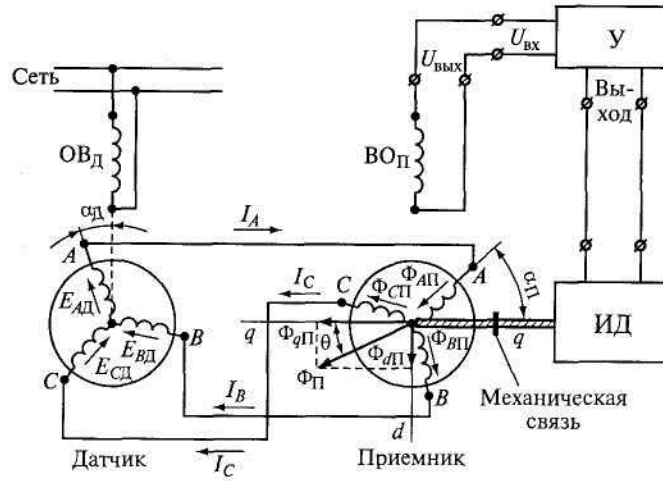


Рис. 6.14. Трансформаторная система синхронной связи

Однофазная обмотка сельсина-датчика ОВД подключается к сети переменного тока. Ток этой обмотки создает пульсирующий магнитный поток $\Phi_{ВД}$, который, сцепляясь с обмоткой синхронизации, наводит в ее фазах следующие ЭДС:

$$\begin{aligned} E_{АД} &= E_{\Phi \max} \cos \alpha_D; E_{ВД} = E_{\Phi \max} \cos (\alpha_D - 120^\circ); \\ E_{СД} &= E_{\Phi \max} \cos (\alpha_D - 240^\circ), \end{aligned} \quad (6.6)$$

где $E_{\Phi \max}$ — максимальная ЭДС, наводимая магнитным потоком в однофазной обмотке возбуждения датчика.

Значения этих ЭДС зависят от расположения фаз обмотки синхронизации относительно обмотки возбуждения.

Под действием ЭДС $E_{АД}$, $E_{ВД}$, $E_{СД}$ ($E_{\Phi Д}$) в соединенных между собой одноименных фазах обмоток синхронизации датчика и приемника, а также в линии связи возникают токи I_A , I_B , I_C (I_{Φ}), которые определяются значениями соответствующих ЭДС, а также полными сопротивлениями фаз датчика $z_{\Phi Д}$, приемника $z_{\Phi П}$ и линии связи z_L :

$$I_{\Phi} = E_{\Phi Д} / (z_{\Phi Д} + z_{\Phi П} + z_L).$$

Считая, что фазы обмоток синхронизации датчика и приемника имеют одинаковые сопротивления и включают в себя каждая по половине сопротивления линии, т.е. $z_{\Phi Д} + z_L/2 = z_{\Phi П} + z_L/2 = z_{\Phi}$, получим

$$I_{\Phi} = E_{\Phi Д} / (2z_{\Phi}). \quad (6.7)$$

Подставив в выражение (6.7) значения ЭДС соответствующих фаз из формулы (6.6), можно найти токи I_A , I_B , I_C . Эти токи, протекая по фазам обмотки синхронизации приемника, создают пульсирующие магнитные потоки $\Phi_{АП}$, $\Phi_{ВП}$, $\Phi_{СП}$ пропорциональные магнитодвижущим силам фаз $F_{АП}$, $F_{ВП}$, $F_{СП}$ и направленные по их осям.

В двухполюсном сельсине магнитодвижущая сила (МДС) фазы (амплитуда ее первой гармоники) может быть найдена по формуле

$$F_{\Phi} = 1,8 I_{\Phi} k_w w,$$

где w — число витков в обмотке фазы; k_w — коэффициент, зависящий от конструкции обмотки.

МДС фаз легко определить, подставив в последнее равенство токи I_A , I_B , I_C из формулы (6.7) с учетом формулы (6.6).

Потоки фаз приемника $\Phi_{АП}$, $\Phi_{ВП}$, $\Phi_{СП}$ складываясь, образуют результирующий магнитный поток Φ_P

обмотки синхронизации приемника, направленный под некоторым (зависящим от угла рассогласования) углом к выходной однофазной обмотке приемника (ВО_П).

Поток $\Phi_{\text{п}}$, пульсируя с частотой сети, наводит в выходной однофазной обмотке приемника ЭДС, являющееся выходным напряжением приемника $U_{\text{вых}}$.

Согласованным положением сельсинов в трансформаторной системе синхронной связи называется такое положение роторов, при котором выходное напряжение приемника $U_{\text{вых}}$ равно нулю. В отличие от согласованного положения сельсинов в индикаторной системе в этом случае поворот ротора сельсина-приемника составляет 90° . Вследствие этого за начало отсчета углов в сельсине-приемнике принимается точка на оси, перпендикулярной оси однофазной выходной обмотки (см. рис. 6.14).

Сельсин-приемник в трансформаторной системе синхронной связи самостоятельно не отрабатывает заданный датчиком угол $\alpha_{\text{д}}$, а лишь вырабатывает ЭДС выходной обмотки, изменяющуюся по закону синуса в зависимости от угла рассогласования θ . Отработка заданного датчиком угла — поворот ротора сельсина-приемника на угол $\alpha_{\text{п}} = \alpha_{\text{д}}$ — осуществляется с помощью исполнительного двигателя.

Принцип действия трансформаторной системы синхронной связи (см. рис. 6.14) состоит в следующем. При выводе ротора сельсина-датчика из согласованного положения (повороте на некоторый угол $\alpha_{\text{д}} = \theta$) на выходной обмотке сельсина-приемника появляется напряжение $U_{\text{вых}}$. Это напряжение подается на вход усилителя, а затем на обмотку управления исполнительного двигателя.

Ротор двигателя начинает вращаться, поворачивая при этом ротор сельсина-приемника, с которым он механически связан. Вместе с ротором приемника поворачивается в пространстве и его магнитный поток $\Phi_{\text{п}}$; при этом изменяются потокоцепление с выходной обмоткой и ее ЭДС (выходное напряжение $U_{\text{вых}}$). Роторы двигателя и сельсина-приемника поворачиваются до тех пор, пока ротор сельсина-приемника не повернется на заданный датчиком угол $\alpha_{\text{п}} = \alpha_{\text{д}}$ и сельсины не займут согласованное положение, в котором поток $\Phi_{\text{п}}$ перпендикулярен оси выходной обмотки ВО_П и выходное напряжение сельсина-приемника $U_{\text{вых}}$, а следовательно, и напряжение на усилителе и обмотке управления исполнительного двигателя, равны нулю.

В отличие от индикаторной системы синхронной связи по проводам линии связи трансформаторной системы всегда, даже в согласованном положении, протекают токи. Сельсины-приемники в трансформаторной системе питаются не от сети (как это имеет место в индикаторной системе), а от обмотки синхронизации датчика.

6.4. Вращающиеся трансформаторы

Вращающиеся трансформаторы — это небольшие индукционные электрические машины, предназначенные для преобразования механического перемещения (угла поворота ротора α) в электрический сигнал — выходное напряжение U , амплитуда которого находится в определенной функциональной зависимости от угла поворота ротора.

Конструктивно вращающиеся трансформаторы весьма разнообразны, однако в настоящее время наибольшее распространение получили двухполюсные вращающиеся трансформаторы, изготавливаемые аналогично двухфазным асинхронным двигателям с контактными кольцами. Пакеты статора и ротора таких вращающихся трансформаторов (ВТ) изготавливают из тщательно изолированных друг от друга листов электротехнической стали, полученных на штампах высокой точности. В полукрытых пазах статора и ротора располагаются двухфазные обмотки, оси которых сдвинуты на 90° относительно друг друга (рис. 6.15). Обычно обе обмотки S и K статора имеют одинаковое число витков ($W_S = W_K$) и одинаковые активные R и реактивные сопротивления X . Обмотки ротора A и B также выполняются одинаковыми ($w_A = w_B$; $R_A = R_B$; $X_A = X_B$).

У большинства вращающихся трансформаторов концы обмоток ротора выводятся к контактными кольцам, по которым скользят щетки. Кольца и щетки обычно изготавливаются из сплавов серебра. В некоторых вращающихся трансформаторах, предназначенных для работы с ограниченным углом поворота ротора, кольца и щетки заменяются гибкими спиральными пружинами из латуни (наподобие токосъемов измерительных приборов).

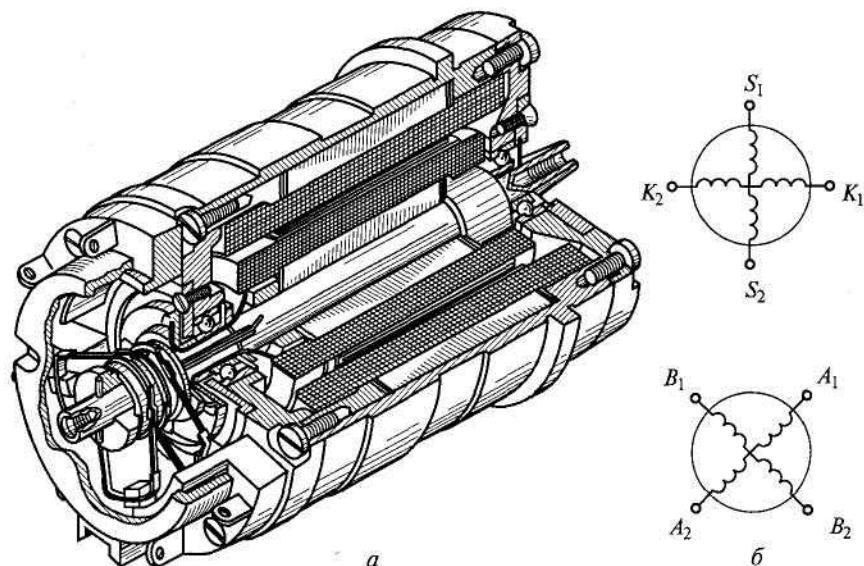


Рис. 6.15. Общий вид (а) и схемы обмоток (б) вращающегося трансформатора

Особенностью вращающихся трансформаторов является то, что у них взаимоиндуктивность между первичными (статора) и вторичными (ротора) обмотками при повороте ротора на угол α изменяется строго по синусоидальному (или косинусоидальному) закону в зависимости от угла α , что при определенных условиях обеспечивает такой же закон изменения амплитуды ЭДС вторичных обмоток.

В зависимости от того, какой функцией угла поворота ротора является выходное напряжение U , различают следующие вращающиеся трансформаторы:

синусные (СВТ) — $U = U_{\max} \sin \alpha$, где $U_{\max}$ — максимальное выходное напряжение.

синусно-косинусные (СКВТ) — $U_A = U_{\max} \sin \alpha$; $U_B = U_{\max} \cos \alpha$;

линейные (ЛВТ) — $U = k\alpha$, где $k = \text{const}$.

Четырехобмоточные вращающиеся трансформаторы, имеющие по две обмотки на статор и ротор, в автоматике и вычислительной технике при определенных схемах соединения обмоток используются в виде:

построителей, позволяющих производить преобразование координат, определять (строить) вектор по его составляющим;

приборов для согласования (масштабирования) напряжений отдельных каскадов — масштабных ВТ (МВТ);

трансформаторных сельсинов в системах синхронной связи;

фазовращателей.

Один и тот же вращающийся трансформатор практически может выполнять различные функции. Его выходные характеристики зависят от схем соединения и питания обмоток.

Синусный и синусно-косинусный вращающиеся трансформаторы

Для того чтобы разобраться в происходящих физических процессах, рассмотрим сначала простейший (синусный) вращающийся трансформатор. Для упрощения анализа здесь и далее будем считать, что трансформатор совершенно ненасыщен (что, как правило, и бывает на практике), и оперировать не МДС, а магнитными потоками Φ обмоток.

Синусный вращающийся трансформатор (СВТ) может работать при наличии всего двух обмоток: обмотки статора S , подключенной к сети переменного тока (назовем ее обмоткой возбуждения), и обмотки ротора A , являющиеся вторичной (выходной) обмоткой (рис. 6.16, а).

При холостом ходе, когда $Z_{AH} = \infty$ и $I_H = 0$, вследствие того что взаимоиндуктивность между обмотками статора и ротора изменяется по синусоидальному закону в зависимости от угла поворота ротора α , ЭДС выходной обмотки, наводимая потоком первичной обмотки Φ_S , будет синусоидальной функцией угла α :

$$E_{A0} = E_{A\max} \sin \alpha, \quad (6.8)$$

где $E_{A\max}$ — максимальная ЭДС обмотки A , наводимая в случае совпадения осей обмоток A и S ($\alpha = 90^\circ$).

Максимальную ЭДС можно выразить через ЭДС E_S , наводимую потоком Φ_S в первичной обмотке статора S , и отношение эффективных чисел витков (w_A и w_S) обмоток A и S , как и в обычном трансформаторе:

$$E_{A\max} = (w_A/w_S) E_S = k_{\max} E_S, \quad (6.9)$$

где $k_{\max} = w_A/w_S = k_{wA} w_A' / (k_{wS} w_S')$ — максимальный коэффициент трансформации; w_A' , k_{wA} , w_S' , k_{wS} — истинные числа витков и обмоточные коэффициенты соответствующих обмоток.

С учетом формулы (6.9) выражение (6.8) для ЭДС выходной обмотки при холостом ходе имеет вид

$$E_{A0} = E_S k_{\max} \sin \alpha = E_S k(\alpha)$$

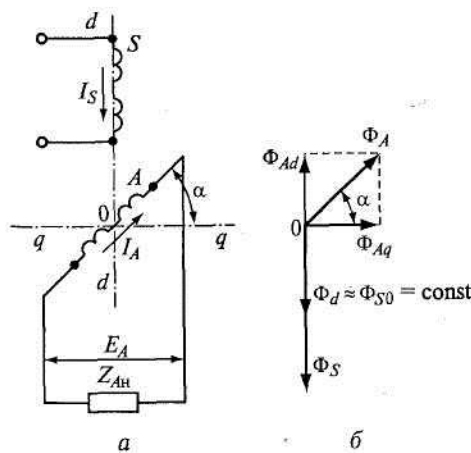


Рис. 6.16. Схема включения синусного вращающегося трансформатора (а) и векторная диаграмма его магнитных потоков (б)

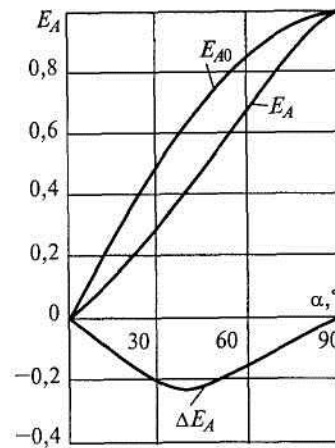


Рис. 6.17. Зависимости ЭДС обмотки A при холостом ходе E_{A0} и нагрузке E_A и погрешности ΔE_A от угла поворота ротора α

или, если не учитывать падение напряжения на собственном сопротивлении обмотки возбуждения S ,

$$E_{A0} \approx U_S k_{\max} \sin \alpha = U_S k(\alpha),$$

где $k(\alpha) = k_{\max} \sin \alpha = (w_A/w_S) \sin \alpha$ — коэффициент трансформации вращающегося трансформатора, который в отличие от коэффициента трансформации обычного трансформатора является функцией угла поворота ротора α .

На рис. 6.17 представлены ЭДС обмотки A при холостом ходе E_{A0} , при нагрузке E_A и погрешность ΔE_A , вносимая поперечным потоком Φ_{Aq} , как функции угла поворота ротора. Погрешность ΔE_A зависит от значения комплексного коэффициента a . В реальных вращающихся трансформаторах он невелик, поэтому погрешность ΔE_A у них значительно меньше, чем на рис. 6.17, где коэффициент a принят равным единице.

На практике чаще применяются не синусные, а синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы.

Синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (СКВТ) имеют не две, а четыре обмотки (рис. 6.18, а). Две обмотки S и K располагаются на статоре. Они сдвинуты в пространстве на 90° и имеют обычно одинаковое число витков, обладая одинаковыми собственными сопротивлениями ($w_S = w_K$; $Z_S = Z_K$). Две другие обмотки A и B располагаются на роторе. Они также сдвинуты на 90° между собой и имеют одинаковые параметры ($w_A = w_B$; $Z_A = Z_B$).

Так как обмотка B сдвинута на 90° относительно обмотки A , то в том случае, когда ЭДС второй

обмотки изменяется по закону синуса в зависимости от угла поворота ротора α , ЭДС первой обмотки изменяется по закону косинуса.

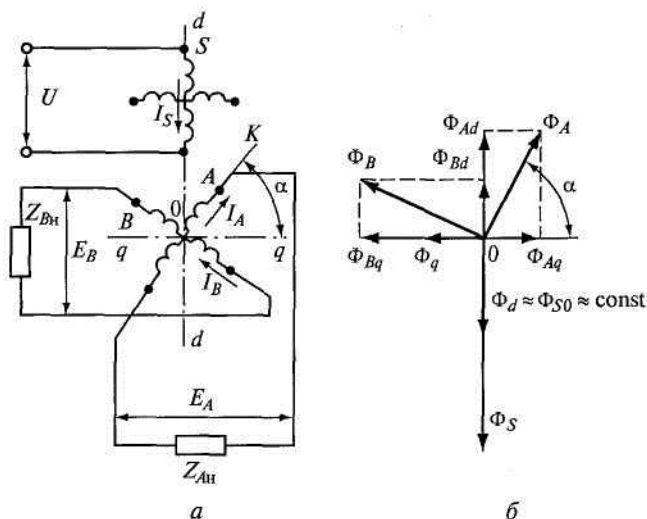


Рис. 6.18. Схема включения СКВТ (а) и векторная диаграмма его магнитных потоков (б)

Анализируя диаграмму магнитных потоков синусно-коси-нусного вращающегося трансформатора, представленную на рис. 6.18, б, нетрудно заметить, что поперечные потоки Φ_{Ad} и Φ_{Bd} обмоток А и В ротора направлены на встречу друг другу. Это значит, что при наличии двух вторичных обмоток А и В суммарный поперечный поток при нагрузке $\Phi_d = \Phi_{Ad} + \Phi_{Bd}$ всегда меньше, чем при наличии одной обмотки. Меньшее значение потока по поперечной оси приводит к меньшей погрешности вращающегося трансформатора.

Глава 7

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

7.1. Погрешности измерений

Результат любого измерения отличается от истинного значения измеряемой величины на некоторое значение, зависящее от точности средств и метода измерения, квалификации оператора, условий, при которых производится измерение. Отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины называется *погрешностью измерения*. Различают *абсолютные* погрешности измерения, которые выражаются в единицах измеряемой величины, и *относительные* погрешности измерения, определяемые как отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины:

$$\Delta = x - x_{и}; \quad \delta = \Delta/x_{и},$$

где Δ — абсолютная погрешность измерения; x — значение, полученное при измерении; $x_{и}$ — истинное значение измеряемой величины; δ — относительная погрешность измерения.

Относительная погрешность, выраженная в процентах истинного значения измеряемой величины, рассчитывается по формуле

$$\delta = (\Delta/x_{и}) 100.$$

В зависимости от характера проявления погрешности делят на систематические, случайные и грубые (промахи).

Погрешность Δ является результирующей погрешностью, т.е. суммой систематической Δ_c и случайной Δ° погрешностей.

Систематической погрешностью измерения называется составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины. Причинами появления систематических погрешностей могут быть неисправности измерительной аппаратуры, несовершенство метода измерений, неправильная установка измерительных приборов и отступление от нормальных условий их работы, индивидуальные особенности оператора. Систематические погрешности в принципе могут быть выявлены и устранены. Для этого требуется проведение тщательного анализа возможных источников погрешностей в каждом конкретном случае.

Случайной погрешностью измерения называется составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Наличие случайных погрешностей выявляется при проведении ряда измерений этой величины, когда оказывается, что результаты измерений не совпадают друг с другом. Часто случайные погрешности возникают из-за одновременного действия многих независимых причин, каждая из которых в отдельности мало влияет на результат измерения.

В некоторых случаях оказывается, что результат того или иного отдельного измерения резко отличается от результатов других измерений, выполненных при тех же контролируемых условиях. Причиной этого может быть ошибка оператора, возникновение сильной кратковременной помехи, толчок, нарушение электрического контакта и т.д. Естественно, что такой результат, содержащий *грубую погрешность* (промах), следует выявить, исключить и не учитывать при дальнейшей статистической обработке результатов измерения.

Термины и определения

Постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации и метрологии (Госстандарт России) от 17 мая 2000 г. № 139 введены в действие с 1 января 2001 г. межгосударственные рекомендации РМГ 29—99 «Метрология. Основные термины и определения». Эти рекомендации разработаны взамен ранее действовавшего ГОСТ 16863—70 и являются фактически межгосударственным стандартом, принятым во всех странах СНГ.

В указанном документе узаконены, в частности, основные термины и определения, касающиеся погрешностей измерений и средств измерений.

Приведем наиболее часто используемые термины и определения погрешностей.

Погрешность результата измерения. Отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины. Истинное значение величины неизвестно, его применяют только в теоретических исследованиях. На практике используют действительное значение величины x_d , в результате чего погрешность измерения $\Delta x_{изм}$ определяют по формуле

$$\Delta x_{изм} = x_{изм} - x_d,$$

где $x_{изм}$ — измеренное значение величины.

Синонимом термина «погрешность измерения» является термин «ошибка измерения», применять который не рекомендуется.

Систематическая погрешность измерения. Составляющая погрешности результата измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же физической величины.

В зависимости от характера измерения систематические погрешности подразделяют на *постоянные, прогрессивные, периодические* и *изменяющиеся по сложному закону*.

Постоянные погрешности — погрешности, которые длительное время сохраняют свое значение, например в течение времени выполнения всего ряда измерений. Они встречаются наиболее часто.

Прогрессивные погрешности — погрешности, непрерывно возрастающие или убывающие. К ним относятся, например, погрешности вследствие износа измерительных наконечников, контактирующих с деталью при контроле ее прибором активного контроля.

Периодические погрешности — погрешности, значения которых являются периодической функцией времени или перемещения указателя измерительного прибора.

Погрешности, изменяющиеся по сложному закону, происходят вследствие совместного действия нескольких систематических погрешностей.

Инструментальная погрешность измерения. Составляющая погрешности измерения,

обусловленная погрешностью применяемого средства измерения.

Погрешность метода измерений. Составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная несовершенством принятого метода измерений.

Вследствие упрощений, принятых в уравнениях для измерений, нередко возникают существенные погрешности, для компенсации которых следует вводить поправки. Погрешность метода измерений иногда называют *теоретической погрешностью*. Иногда такая погрешность может проявляться как случайная.

Субъективная погрешность измерения. Составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная индивидуальными особенностями оператора. Некоторые операторы систематически опаздывают (или опережают) снимать показания средств измерений. Иногда субъективную погрешность называют *личной погрешностью* или *личной разностью*.

Случайная погрешность измерения. Составляющая погрешности результата измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях, проведенных с одинаковой тщательностью, одной и той же физической величины.

Абсолютная погрешность измерения. Погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины.

Относительная погрешность измерения. Погрешность измерения, выраженная отношением абсолютной погрешности измерения к действительному или измеренному значению измеряемой величины. Относительную погрешность в долях находят из отношения

$$\delta = \frac{\Delta x}{x},$$

где Δx — абсолютная погрешность измерений; x — действительное или измеренное значение величины.

Формула для определения относительной погрешности в процентах будет иметь вид

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} 100.$$

Рассеяние результатов в ряду измерений. Несовпадение результатов измерений одной и той же величины в ряду равнооточных измерений, как правило, обусловленное действием случайных погрешностей. Количественную оценку рассеяния результатов в ряду измерений вследствие действия случайных погрешностей обычно получают после введения поправок на действие систематических погрешностей. Оценками рассеяния результатов в ряду измерений могут быть:

размах;

средняя арифметическая погрешность (по модулю);

средняя квадратическая погрешность или стандартное отклонение (среднее квадратическое отклонение, экспериментальное среднее квадратическое отклонение);

доверительные границы погрешности (доверительная граница или доверительная погрешность).

Средняя квадратическая погрешность (СКП) результатов единичных измерений в ряду измерений. Оценка рассеяния S единичных результатов измерений в ряду равнооточных измерений одной и той же физической величины около среднего их значения, вычисляемая по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}},$$

где x_i — результат i -го единичного измерения; $\bar{x}$ — среднее арифметическое значение измеряемой величины из n единичных результатов.

На практике широко распространен термин «среднее квадратическое отклонение» (СКО). Под отклонением в соответствии с предыдущей формулой понимают отклонение единичных результатов в ряду измерений от их среднего значения. В метрологии это отклонение называется погрешностью измерений. Если в результате измерений введены поправки на систематические погрешности, то отклонения представляют собой случайные погрешности. Поэтому с точки зрения упорядочения

понятий наряду с основным термином «погрешность измерения», целесообразно применять термин «средняя квадратическая погрешность». При обработке ряда результатов измерений, свободных от систематических погрешностей, понятия СКП и СКО равнозначны при оценке рассеяния результатов единичных измерений.

Поправка. Значение величины, вводимое в неисправленный результат измерения с целью исключения составляющих систематической погрешности. Знак поправки противоположен знаку погрешности. Поправку, прибавляемую к номинальному значению меры, называют *поправкой к значению меры*; поправку, вводимую для показания измерительного прибора, называют *поправкой к показанию прибора*.

Точность результата измерения. Одна из характеристик качества измерения, отражающая близость к нулю погрешности результата измерения. Считают, что чем меньше погрешность измерения, тем больше его точность.

Статическая погрешность измерения. Погрешность результата измерений, свойственная условиям статического измерения.

Динамическая погрешность измерения. Погрешность результата измерений, свойственная условиям динамического измерения.

Промех. Погрешность результата отдельного измерения, входящего в ряд измерений, которая для данных условий резко отличается от остальных результатов этого ряда. Иногда вместо термина «промах» применяют термин «грубая погрешность измерений».

7.2. Причины возникновения систематических погрешностей

Существуют некоторые общие причины возникновения систематических погрешностей, в соответствии с которыми их подразделяют на методические, инструментальные и субъективные.

Методические погрешности определяются несовершенством метода измерения, использованием упрощающих предположений и допущений при выводе расчетных формул, влиянием измерительного прибора на объект измерения. Например, результат измерения температуры с помощью термопары может содержать методическую погрешность, вызванную нарушением температурного режима исследуемого объекта (вследствие внесения термопары).

Инструментальные погрешности зависят от погрешностей применяемых средств измерений. Неточность градуировки, конструктивное несовершенство, изменение характеристик прибора в процессе эксплуатации и другие факторы являются причинами инструментальных погрешностей.

Погрешности измерения возникают также из-за неправильной установки средства измерения, влияния на него магнитных или электрических полей, наличия дополнительных и динамических погрешностей. Дополнительные погрешности обусловлены отклонением условий, в которых работает прибор, от нормальных. Динамические погрешности возникают из-за инерционности применяемых технических средств при достаточно быстрых изменениях измеряемой величины. Все эти погрешности отличают от инструментальных (ГОСТ 8.009—84), поскольку они связаны не столько с самими средствами измерений, сколько с условиями, при которых они работают. Их устранение производится иными способами, нежели устранение инструментальных погрешностей.

Субъективные погрешности определяются неправильным снятием показаний прибора человеком (оператором), что может случиться, например, из-за неправильного направления взгляда при наблюдении за показаниями стрелочного прибора (погрешность от параллакса). Использование цифровых приборов и автоматических методов измерения позволяет исключить такого рода погрешности. Обнаружение причин и источников систематических погрешностей позволяет устранить их или исключить посредством введения поправки.

Поправкой называется значение величины, одноименной с измеряемой, которое нужно прибавить к полученному при ее измерении значению с целью исключения систематической погрешности.

В некоторых случаях используют *поправочный множитель* — число, на которое умножают результат измерения для исключения систематической погрешности.

7.3. Оценка случайных погрешностей

Математическим аппаратом описания случайных погрешностей является теория вероятностей, согласно которой случайную величину наиболее полно можно охарактеризовать с помощью закона

распределения (или плотности распределения) вероятностей. Для измерений чаще всего приходится принимать нормальную и равномерную плотность распределения, но возможно использование и других законов распределения, которые обычно аппроксимируются стандартными функциями. Если выполняются предположения, что погрешности измерений могут принимать непрерывный ряд значений, что при большом числе измерений частота появления погрешностей, равных по абсолютному значению, но с различным знаком, одинакова, что малые погрешности встречаются чаще, чем большие, то для описания случайных погрешностей следует применять нормальный закон распределения вероятностей.

Суммирование погрешностей. При измерениях может быть несколько источников как систематических, так и случайных погрешностей. Поэтому практически важны правила нахождения суммарной погрешности измерения по известным значениям погрешностей составляющих ее частей. При суммировании составляющих неисключенной систематической погрешности их конкретные реализации можно рассматривать как реализации случайной величины. Если известны границы составляющих неисключенной систематической погрешности, а распределение этих составляющих в пределах границ равномерно, то граница неисключенной систематической погрешности результата измерения вычисляется по формуле

$$\Theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Theta_i^2},$$

где k — коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью (при доверительной вероятности 0,95 он принимается равным 1,1 — ГОСТ 8.207—76).

При суммировании случайных погрешностей необходимо учитывать их корреляционные связи. Суммарная средняя квадратическая погрешность при двух составляющих может быть вычислена по формуле

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2\rho\sigma_1\sigma_2},$$

где σ_1 ; σ_2 — средние квадратические погрешности двух составляющих; ρ — коэффициент корреляции.

Поскольку на практике трудно получить удовлетворительную оценку коэффициента ρ , приходится ограничиваться крайними случаями, т.е. считать, что либо $\rho = 0$, либо $\rho = \pm 1$. Тогда предыдущая формула примет вид

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \text{ если } \rho = 0$$

или

$$\sigma_{\Sigma} = |\sigma_1 \pm \sigma_2|, \text{ если } \rho = \pm 1.$$

Таким образом, при отсутствии корреляционной связи средние квадратические погрешности складываются геометрически, а в случае жесткой корреляционной зависимости — алгебраически. Этот вывод справедлив и при наличии нескольких источников погрешностей.

Необходимое число измерений. Вопрос о том, сколько измерений требуется произвести для того, чтобы суммарная погрешность не превышала допустимое значение, весьма важен.

Надо четко понимать, что увеличением числа измерений можно уменьшить только случайную составляющую погрешности (т.е. средние квадратические погрешности σ и σ_{cp} , которые зависят от числа измерений n). В то же время систематическая погрешность не уменьшается при увеличении n , поэтому если остаточная систематическая погрешность является преобладающей, увеличение числа измерений мало что дает. Чаще всего в этом случае ограничиваются одним измерением. Так, например, при измерении напряжения сети неточным переносным стрелочным прибором нет никакого смысла прибегать к многократным измерениям и статистической обработке их результатов.

Поскольку систематические погрешности заведомо превышают случайные, в большинстве случаев достаточно всего одного измерения. При необходимости более точных измерений на первый план выступают случайные погрешности, тогда проведение многократных измерений является оправданным. При этом число измерений нужно выбирать такое, чтобы средняя квадратическая случайная погрешность $\sigma_{\text{ср}}$ не превышала максимально допустимого значения $\sigma_{\text{ср доп}}$.

7.4. Погрешности средств измерений

Термины и определения

Приведем наиболее часто употребляемые термины и определения, касающиеся погрешностей средств измерений.

Погрешность средства измерения. Разность между показанием средства измерения и истинным (действительным) значением измеряемой физической величины.

Систематическая погрешность средства измерения. Составляющая погрешности средства измерения, принимаемая постоянной или закономерно изменяющейся. Систематическая погрешность одного экземпляра средства измерения, как правило, будет отличаться от систематической погрешности другого экземпляра средства измерения этого же типа, вследствие чего для группы однотипных измерений систематическая погрешность может иногда рассматриваться как случайная погрешность.

Случайная погрешность средства измерений. Составляющая погрешности средства измерений, изменяющаяся случайным образом.

Абсолютная погрешность средства измерений. Погрешность средства измерений, выраженная в единицах измеряемой физической величины.

Относительная погрешность средства измерений. Погрешность средства измерений, выраженная отношением его абсолютной погрешности к результату измерения или к действительному значению измеренной физической величины.

Приведенная погрешность средства измерений. Относительная погрешность, выраженная отношением абсолютной погрешности средства измерений к условно принятому значению величины, постоянному во всем диапазоне измерений или в части этого диапазона. Условно принятое значение величины, называемое *нормирующим значением*, часто определяется верхним пределом измерений. Приведенную погрешность обычно выражают в процентах.

Основная погрешность средства измерений. Погрешность средства измерений, применяемого в нормальных условиях.

Дополнительная погрешность средства измерений. Составляющая погрешности средства измерений, возникающая дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих на нее величин от нормального значения или вследствие выхода за пределы нормальной области значений.

Статическая погрешность средства измерений. Погрешность средства измерений, применяемого при измерении физической величины, принимаемой за неизменную.

Динамическая погрешность средства измерений. Погрешность средства измерений, возникающая при измерении изменяющейся (в процессе измерений) физической величины.

Класс точности средств измерений. Обобщенная характеристика средств измерений данного типа, как правило, отражающая уровень их точности, выражаемая пределами допустимых основной и дополнительных погрешностей, а также другими параметрами, влияющими на точность. Класс точности позволяет судить о том, в каких пределах находится погрешность измерений приборов одного типа, но не является непосредственным показателем точности измерений, выполняемых с помощью каждого из этих средств, что важно при выборе требуемых средств измерений. Класс точности средств измерений конкретного типа устанавливают в стандартах, технических требованиях (условиях) или других нормативных документах.

Нормируемые метрологические характеристики средств измерений

ГОСТ 8.009—82 «Государственная система обеспечения единства измерения. Нормируемые метрологические характеристики средств измерения» позволяет оценивать погрешности средств измерений и нормировать их метрологические характеристики (МХ). Основная направленность

стандарта заключается в стремлении приблизить оценку погрешностей средств измерений (СИ) (в частности, аналоговых электроизмерительных приборов — АЭП) к ее действительному значению.

При нормировании МХ АЭП данный стандарт позволяет решать важнейшие задачи теории и практики измерений, например подбора комплекта аналоговых измерительных преобразователей, обеспечивающих получение заданной погрешности АЭП. В стандарте предусмотрены четыре составляющие погрешности, обусловленные:

отличием реальной характеристики преобразования СИ в нормальных условиях эксплуатации от номинальной характеристики преобразования — *основная погрешность СИ*;

изменением характеристик аналогового СИ при изменении влияющих факторов окружающей среды и неинформативных параметров входного сигнала — *дополнительная погрешность АЭП*;

неидеальностью динамических характеристик АЭП и преобразователей — *динамическая погрешность*;

мощностью потребляемой СИ — погрешность *взаимодействия*, зависящая от свойств СИ и источника измерительных сигналов, а также от характеристик этих сигналов.

Метрологические характеристики аналоговых средств измерений, регламентируемые стандартами. В соответствии с ГОСТ 8.508—84 и другими для аналоговых СИ нормируются следующие метрологические характеристики:

номинальная статическая характеристика преобразования в нормальных условиях эксплуатации $f_{ном}(x)$;

характеристики систематической составляющей погрешности Δ_c ;

характеристики случайной составляющей погрешности Δ ;

характеристики погрешности Δ ;

вариация показаний B ;

дрейф показаний d ;

входной $Z_{вх}$ и выходной $Z_{вых}$ импедансы;

динамические характеристики СИ;

неинформативные параметры входного сигнала;

функция влияния на систематическую погрешность СИ — $\psi(\xi)$;

наибольшее допустимое изменение метрологической характеристики, вызываемое изменением внешних влияющих факторов и неинформативных параметров входного сигнала;

диапазон измерений — $x_{из}$;

классы точности (в соответствии с ГОСТ 8.401—80).

Основная погрешность

Основная погрешность отражает свойства СИ и нормируется для нормальных или рабочих условий эксплуатации, если дополнительные погрешности малы. Для аналоговых СИ, применяемых в качестве отдельных самостоятельных приборов, может нормироваться только основная погрешность для указанной области значений влияющих факторов, в случае если изменение погрешности СИ во всей рабочей области значений влияющих факторов составляет менее половины основной погрешности. Для аналоговых СИ, предназначенных для информационной связи с другими СИ (ГОСТ 12997—76), основная погрешность нормируется для нормальных условий эксплуатации в случае, если наибольшее изменение погрешности СИ во всей рабочей области значений влияющих факторов составляет более 20 % основной погрешности.

Характеристики основной погрешности в общем случае должны отражать свойства всей совокупности СИ данного типа. Для каждого конкретного СИ ее можно определить, если задаться моделью погрешности СИ. Модель основной погрешности можно принять в виде

$$\Delta_0(t) = \Delta_{0c}(t) + \overset{0}{\Delta_0}(t) + \Delta_{0в},$$

где $\Delta_{0c}(t)$ — случайная величина, учитывающая явления типа гистерезиса; $\Delta(t)$ — систематическая погрешность СИ (в общем случае — это нестационарный процесс, но изменяющийся настолько медленно, что на практике величину $\Delta_{0c}(t)$ считают постоянной или закономерно изменяющейся); $\Delta_{0в}$ — стационарный эргодический центрированный случайный процесс (эта составляющая может иметь

широкий спектр частот, поэтому удобно полагать, что $\Delta_0(t) = \Delta_{0вч}^0(t) + \Delta_{0нч}^0(t)$, где $\Delta_{0вч}^0(t), \Delta_{0нч}^0(t)$ — соответственно высокочастотная и низкочастотная составляющие погрешности СИ; соседние значения процесса $\Delta_{0вч}^0(t)$ не коррелированы, а соседние значения процесса $\Delta_{0нч}^0(t)$ коррелированы).

Естественно, что значения погрешностей могут изменяться вдоль шкалы АЭП, поэтому возникает задача определения числа точек, в которых необходимо найти значение погрешностей СИ, чтобы по ним оценить с известной погрешностью точность СИ. В ГОСТ 8508—84 указано, что эти точки должны соответствовать 5, 25, 50, 75, 95 % диапазона измерений, если в АЭП имеется существенная вариация показаний, и 0, 25, 50, 75, 100 % диапазона, если вариация показаний отсутствует. После получения значений погрешности СИ в ряде точек шкалы необходимо оценить его точность.

Дополнительная погрешность

Дополнительная погрешность отражает влияние изменения внешних факторов и неинформативных параметров сигнала на работу АЭП. Весь диапазон возможных значений внешних факторов, влияющих на работу АЭП, делится на условные зоны, одну из которых принимают за нормальные условия его работы (ГОСТ 22261—76, 23222—78, 12997—76). При отклонении каждого фактора за пределы, соответствующие этой зоне, на некоторое заранее определенное число единиц измерения этого фактора $\Delta_{\text{д}}$ оговаривается, что появляется дополнительная погрешность $\Delta_{\text{д}}(x, \xi)$ или изменяются метрологические характеристики (например, частотная). Если изменение погрешности во всей рабочей области значений внешних влияющих факторов невелико, можно нормировать только основную погрешность для этой области. Рабочие области значений внешних влияющих факторов указаны в стандартах (ГОСТ 22261—76, 12997—76) или технических условиях на СИ конкретного типа. Погрешность $\Delta_{\text{д}}(x, \xi)$ должна нормироваться теми же числовыми характеристиками, что и основная погрешность АЭП.

Динамическая погрешность

В АЭП динамические погрешности возникают из-за отличия их характеристик от идеальных, поэтому при вычислении погрешностей полагают, что известна идеальная характеристика АЭП. В АЭП с идеальной характеристикой динамическая погрешность будет отсутствовать. Естественно, что значения динамических погрешностей зависят от свойств входного сигнала и внешних влияющих факторов.

Для определения динамических погрешностей необходимо знать одну из динамических характеристик АЭП, описывающую связь между входным и выходным сигналами, изменяющимися во времени. К числу таких характеристик относятся полные и неполные динамические характеристики АЭП.

Полная динамическая характеристика определяет изменение выходного сигнала прибора или преобразователя при любом изменении во времени информативного или неинформативного параметра входного сигнала или влияющей величины. *Неполная*, частотная динамическая характеристика представляет собой параметр или функционал полной динамической характеристики АЭП. Например, параметры переходной характеристики электронно-лучевого осциллографа: время нарастания, выброс, неравномерность вершины; время установления показаний показывающих приборов; полоса частот, пропускаемая измерительным преобразователем, и прочие характеристики, знание которых позволяет выполнить измерение с требуемой точностью.

РАЗДЕЛ III УСИЛИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

Глава 8

КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УСИЛИТЕЛЯХ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

8.1. Классификация усилителей

Выходные сигналы датчиков и других элементов во многих случаях оказываются слабыми и недостаточными для приведения в действие последующих элементов систем автоматического управления, например реле, не говоря уже о таких исполнительных устройствах, как электродвигатели и тяговые электромагниты. Поэтому возникает необходимость усиления сигналов управления, измерения и контроля с помощью усилителей.

Усилителем называется устройство, предназначенное для увеличения мощности сигнала за счет энергии N дополнительного источника питания; при этом выходная (усиленная) величина y является функцией входного сигнала x и имеет одинаковую с ним физическую природу. Усилители относятся к активным элементам автоматики (рис. 8.1, б).

В зависимости от вида энергии, получаемой от дополнительного источника питания, различают электрические, пневматические, гидравлические, механические и другие усилители.

Наиболее широкое применение находят электрические усилители, так как они обладают высокой чувствительностью, допускают сравнительно простую регулировку коэффициента усиления, хорошо сочетаются с электрическими исполнительными устройствами (двигателями, электромагнитами и т.п.).

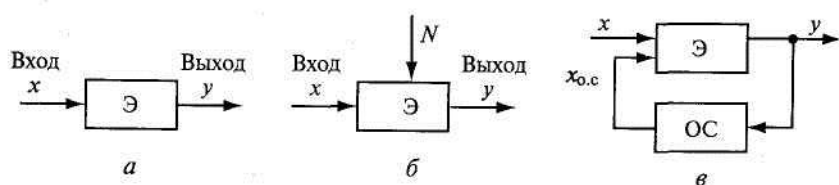


Рис. 8.1. Функциональные схемы элементов САУ:
а — пассивный элемент (Э); б — активный элемент Э (усилитель); в — элемент с обратной связью (ОС)

По принципу действия электрические усилители делятся на две группы. Первую весьма большую группу составляют усилители, в основу которых положен усилительный элемент (электронная лампа, транзистор, управляемая индуктивность, управляемая емкость). В таких усилителях маломощный входной сигнал управляет передачей гораздо большей энергии от источника питания в полезную нагрузку, присоединенную к выходу усилителя. В соответствии с типом управляющего (усилительного) элемента различают ламповые, транзисторные, магнитные, диэлектрические усилители. Ламповые и транзисторные усилители часто объединяют названием электронные усилители, так как принцип их действия основан на электронных процессах в вакууме и полупроводнике.

Электронные усилители можно разделить по следующим признакам:

виду активного элемента — ламповые, транзисторные, на туннельных диодах, параметрических диодах;

диапазону частот — электрометрические, постоянного тока, низкой частоты, радио- и промежуточных частот, СВЧ;

ширине полосы частот — узкополосные, широкополосные;

виду сигнала — гармонические, импульсные;

электрическому параметру — напряжение, ток, мощность;

типу нагрузки — резисторные, резонансные.

На рис. 8.2 показаны диапазоны частот различных типов усилителей.

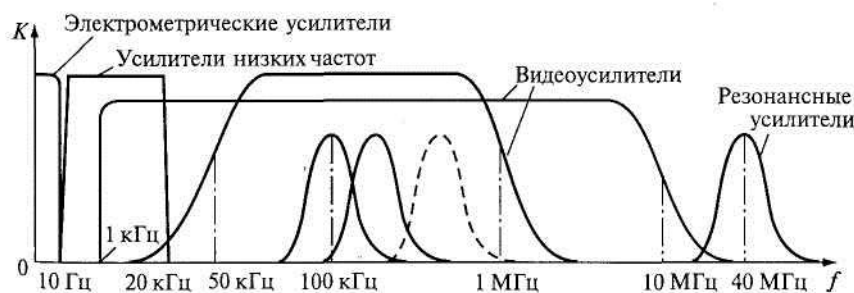


Рис. 8.2. Диапазоны частот различных типов усилителей

Вторую группу составляют усилители, в которых происходит преобразование энергии питания, отличной от вида энергии выходного и управляющего сигналов. Наиболее типичным для этой группы является электромашинный усилитель, в котором механическая энергия привода преобразуется в электрическую энергию.

По характеру усиливаемых электрических сигналов различают усилители непрерывных сигналов различных величин и форм и импульсные усилители, предназначенные для усиления импульсных периодических и непериодических сигналов.

По частоте усиливаемых сигналов различают усилители переменного тока, усиливающие сигналы в полосе частот от нижней рабочей частоты $f_n > 0$ до верхней рабочей частоты f_v , но не усиливающие их постоянную составляющую; усилители постоянного тока, усиливающие в полосе частот от нуля ($f_n = 0$) до f_v как переменные составляющие сигнала, так и его постоянную составляющую.

Управляющий (усилительный) элемент вместе с резисторами, конденсаторами и другими деталями схемы принято называть *усилительным каскадом*. При недостаточном усилении сигнала одним каскадом используется соединение нескольких каскадов, выполняющих роль предварительного усиления и обеспечивающих работу мощного выходного каскада. Исходя из этого различают однокаскадные и многокаскадные усилители. Каскады нумеруются в возрастающем порядке от входа к выходу усилителя, при этом первый каскад от входа называется входным, а последний — выходным (оконечным).

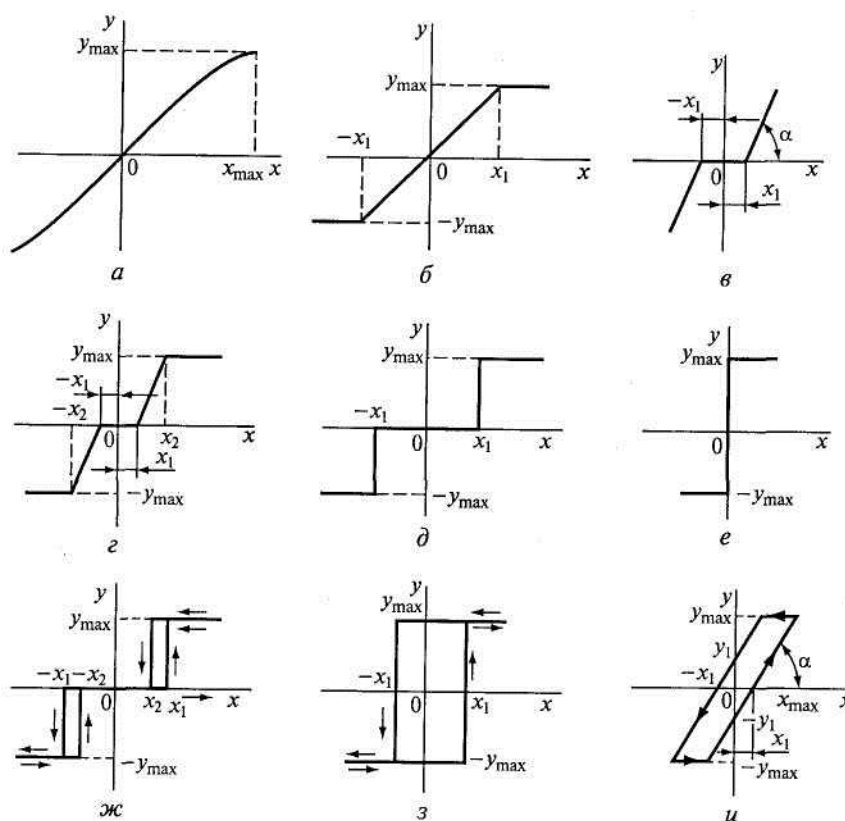


Рис. 8.3. Характеристики управления элементов:
 а — непрерывная нелинейная; б — с ограниченной зоной линейности; в — с зоной нечувствительности; г — с зонами нечувствительности и насыщения; д — релейная с зоной нечувствительности; е — идеальная релейная; ж — с зоной нечувствительности и неоднозначностью; з — с неоднозначностью; и — с петлей гистерезиса

Основными характеристиками и параметрами усилителей систем автоматического управления являются характеристика управления, динамические характеристики, коэффициент усиления мощности, входное и выходное сопротивление, коэффициент полезного действия (для выходных каскадов), уровень собственных шумов.

Характеристики управления усилителей (рис. 8.3) чаще всего нелинейные и могут быть, в частности, с зонами нечувствительности и насыщения; с зонами нечувствительности, насыщения и неоднозначностью; релейного типа. По форме эти характеристики аналогичны некоторым характеристикам управления, приведенным ранее. Следует отметить, что от усилителя в ряде случаев

требуется существенно нелинейная (релейная) зависимость между выходной и входной величинами. В релейном режиме практически может работать любой усилитель, при этом часто используется релейный режим работы электронных и магнитных усилителей. Так, например, транзисторные усилители в релейном режиме широко применяются в системах импульсного управления электродвигателями и электромагнитными механизмами.

8.2. Характеристики усилителей

Одним из важных параметров усилителя является *коэффициент усиления мощности*, который в установившемся режиме определяется соотношением

$$K_P = P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}},$$

где $P_{\text{вых}}$, $P_{\text{вх}}$ — мощности выходного и входного сигналов.

Однако в ряде случаев практическое значение имеет не усиление мощности сигнала, а увеличение его уровня по напряжению или току. В связи с этим принято условное подразделение на усилители мощности, усилители напряжения, усилители тока, хотя принципиально все они являются усилителями мощности и у каждого из них $P_{\text{вых}} > P_{\text{вх}}$.

Для усилителей напряжения и тока соответственно различают коэффициенты усиления по напряжению и току, которые в установившемся режиме определяются соотношениями

$$K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}; \quad K_I = I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}},$$

где $U_{\text{вых}}$, $U_{\text{вх}}$, $I_{\text{вых}}$, $I_{\text{вх}}$ — соответственно напряжения и токи выходного и входного сигналов.

Режим работы усилителя определяется соотношениями входного $R_{\text{вх}}$ и выходного $R_{\text{вых}}$ сопротивлений и сопротивлений источников сигнала R_{Γ} и нагрузки $R_{\text{н}}$. Для усилителя напряжения $R_{\Gamma} \ll R_{\text{вх}}$, $R_{\text{н}} \gg R_{\text{вых}}$, т.е. он работает в режиме, практически близком к холостому ходу на выходе; входной и выходной его величинами является напряжение. Для усилителя тока $R_{\Gamma} \gg R_{\text{вх}}$, $R_{\text{н}} \ll R_{\text{вых}}$, т.е. он работает в режиме, практически близком к короткому замыканию на выходе; входной и выходной величинами здесь является ток. Для усилителя мощности $R_{\text{вх}} \approx R_{\Gamma}$, $R_{\text{н}} \approx R_{\text{вых}}$, т.е. он работает в условиях согласованной нагрузки, при этом выходной величиной является мощность (максимальная в условиях согласования).

К усилителю напряжения предъявляется дополнительное требование $U_{\text{вых}} > U_{\text{вх}}$, в то время как в усилителях мощности оно может и не выполняться. Однако усилитель мощности должен отдавать в нагрузку определенную мощность при соответствующей амплитуде входного сигнала.

Коэффициент усиления мощности в зависимости от принципа действия и конструкции усилителя может составлять $1 \dots 10^7$.

Обычно коэффициент усиления является безразмерной величиной, поскольку входные и выходные величины в усилителях имеют одинаковую размерность. В некоторых случаях коэффициент усиления может иметь размерность. Например, усилители напряжения с токовым выходом характеризуются коэффициентом усиления — крутизной

$$S_y = I_{\text{вых}} / E_{\Gamma} \approx I_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}.$$

Для усилителей большой мощности важным показателем является коэффициент полезного действия, представляющий собой отношение мощности, отдаваемой в нагрузку, к потребляемой мощности.

Динамические свойства усилителей определяются их *частотными характеристиками*. Обычно усилители замещаются апериодическими и колебательными звеньями. Безынерционными в устройствах автоматики в ряде случаев можно считать транзисторные усилители.

По частотным характеристикам можно оценивать вносимые усилителем *нелинейные искажения* — отклонения формы выходного сигнала от формы входного сигнала, обусловленные наличием в усилителе реактивных элементов.

При подаче на вход усилителя сложного периодического колебания отдельные гармонические составляющие неодинаково усиливаются им и по-разному сдвигаются во времени (т. е. по фазе). В

усилителе при изменении частоты сигнала коэффициент усиления меняется как по модулю, так и по фазе из-за наличия в схеме реактивных сопротивлений. Таким образом, неодинаковое усиление различных частот и сдвиг фазы приводят к искажению формы выходного сигнала. Чаще всего усиление уменьшается на высоких и низких частотах.

При рассмотрении частотных характеристик усилителей и искажений усиливаемого сигнала вводятся понятия граничной частоты и полосы пропускания. *Граничной частотой* $f_{гр}(\omega_{гр})$ называется частота, при которой усиление уменьшается на заданное значение от усиления, принятого за номинальное.

Обычно принимают, что граничная частота соответствует уменьшению усиления относительно максимального значения до уровня $1/\sqrt{2} = 0,707$ по напряжению или току и до уровня 0,5 по мощности, т.е. в обоих случаях на 3 дБ. Граничная частота может быть верхней $f_B(\omega_B = 2\pi f_B)$ и нижней $f_H(\omega_H = 2\pi f_H)$ (рис. 8.4, а, б) в зависимости от того, по какую сторону от частоты ω_0 , соответствующей максимальному значению коэффициента усиления K_0 , амплитудно-частотной характеристики она расположена. Диапазон частот $f_H \dots f_B$ ($\omega_H \dots \omega_B$) носит название условной *полосы пропускания*.

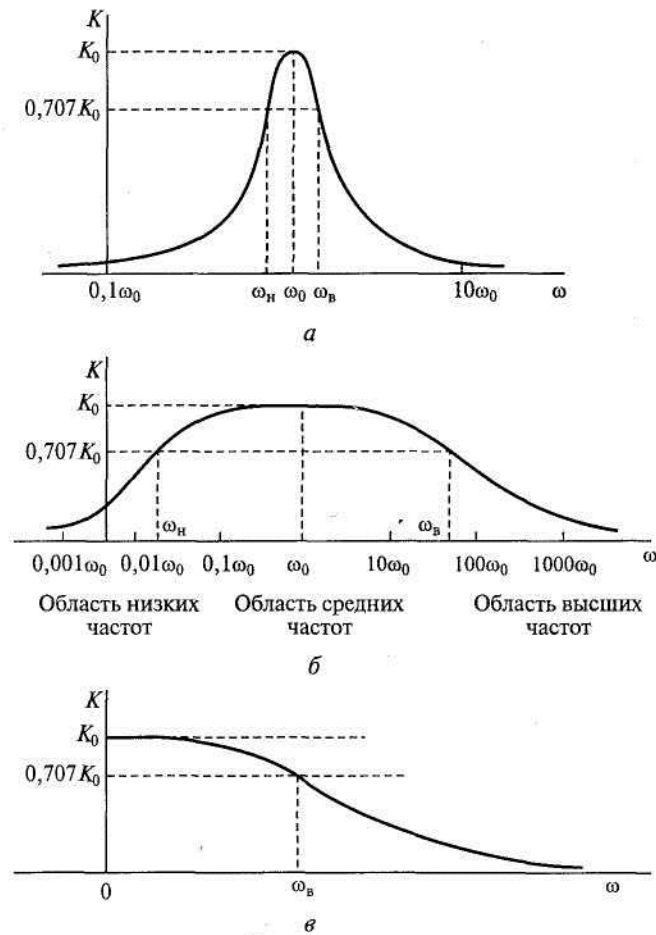


Рис. 8.4. Амплитудно-частотные характеристики усилителей:
а — переменного тока избирательного; б — переменного тока широкополосного;
в — постоянного тока

По виду амплитудно-частотной характеристики и полосе частот усилители подразделяют на избирательные (см. рис. 8.4, а), для которых справедливо соотношение $\omega_B - \omega_H \ll \frac{\omega_B + \omega_H}{2}$ или $\omega_B \approx \omega_H$,

и широкополосные (см. рис. 8.4, б), которые характеризуются большим превышением верхней граничной частоты над нижней: $\omega_B \gg \omega_H$. В широкополосных усилителях различают области высших и низших частот, т. е. области, где существенны амплитудно- и фазочастотные искажения, а также область средних частот, где искажения невелики.

Особый класс составляют усилители постоянного тока, амплитудно-частотная характеристика которых представлена на рис. 8.4, в. Эти усилители способны воспроизводить сколь угодно медленно изменяющиеся сигналы.

В усилителях существуют также нелинейные искажения, обусловленные наличием в них элементов с

нелинейными характеристиками (нелинейной связью тока и напряжения на одних и тех же зажимах, нелинейной зависимостью тока в одной цепи от напряжения в другой цепи и т.п.). Нелинейные искажения могут вносить, например, трансформаторы (вследствие нелинейности характеристики намагничивания материала их сердечников) и транзисторы.

При рассмотрении нелинейных искажений усиливаемого синусоидального сигнала несинусоидальный выходной сигнал можно разложить в ряд, состоящий из основной гармоники с частотой входного сигнала и ряда высших гармоник. Нелинейные искажения в усилителях гармонических сигналов оцениваются коэффициентом нелинейных искажений

$$K_{н.и} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}{U_1^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}},$$

где U_1 , I_1 , — действующие значения первых гармоник напряжения и тока на выходе; U_n , I_n — действующие значения n -ых гармоник напряжения и тока на выходе; n — номер гармоники.

Допустимое значение коэффициента нелинейных искажений определяется назначением усилителя.

Работа усилителей сопровождается собственными шумами, в состав которых входят тепловые шумы, шумы управляющих (усилительных) элементов и т.п. Шумы на выходе не должны превышать определенного уровня, т.е. некоторой заранее установленной доли от выходного сигнала, так как в противном случае выходной сигнал может получиться недопустимо искаженным.

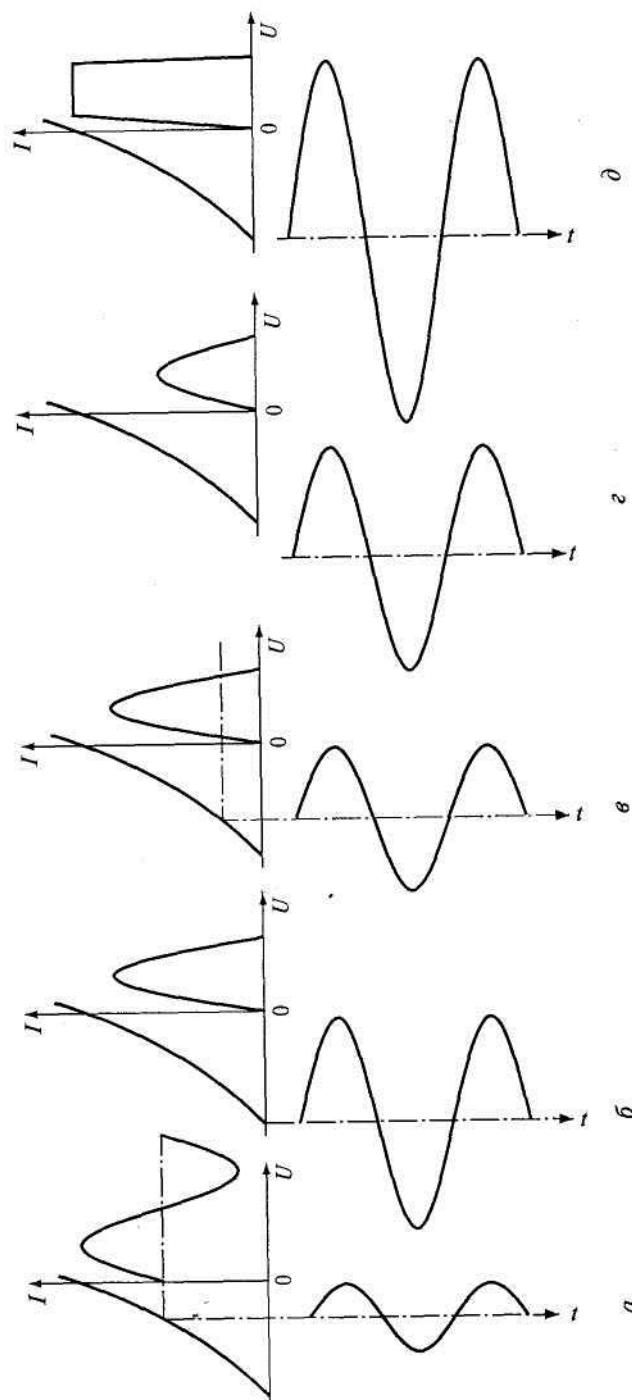


Рис. 8.5. Входные и выходные сигналы усилителей при различных режимах работы:
 а — режим А; б — режим В; в — режим АВ; г — режим С; д — режим Д

В современных системах автоматики выражена тенденция к расширению использования полупроводниковых транзисторных усилителей, которые в наибольшей степени отвечают таким основным требованиям, предъявляемым к усилителям, как высокая надежность, большой срок службы, малогабаритность и постоянная готовность к действию.

Переходной характеристикой называется зависимость мгновенного значения выходной величины от времени при импульсном изменении входной величины (см. рис. 2.3).

Динамический диапазон определяется отношением

$$D_U = \frac{U_{\text{вх max}}}{U_{\text{вх min}}}.$$

Как правило, во всех усилителях стремятся к созданию большого *входного сопротивления* и малого *выходного сопротивления*. Это позволяет не шунтировать входной сигнал со стороны генератора и уменьшать влияние нагрузки на параметры усилителя.

Режимы работы усилителя делятся на классы: А, В, АВ, С и Д — *классы усиления сигналов*.

При работе усилителя в режиме А (рис. 8.5, а) переменный ток протекает в выходной цепи в течение всего периода. От источника питания непрерывно, независимо от уровня входного сигнала, потребляется одна и та же мощность, пропорциональная току в рабочей точке. КПД усилителя при этом низкий.

Режим В (рис. 8.5, б) характеризуется тем, что ток покоя равен нулю. Угол отсечки равен 180° . Ток протекает в течение полупериода. Усилитель имеет высокий КПД. Применяется в силовых устройствах. Имеет большие нелинейные искажения.

В режиме АВ (рис. 8.5, в) угол отсечки от 180 до 360° . КПД по сравнению с режимом В выше, а нелинейные искажения меньше.

В режиме С (рис. 8.5, г) угол отсечки меньше 180° , появляются большие нелинейные искажения. Усилитель применяется в умножителях частоты.

В режиме Д (рис. 8.5, д) усилитель преобразует гармонический сигнал в импульсный.

8.3. Обратные связи в усилителях

Обратной связью называется передача сигнала с выхода на вход. Если за счет обратной связи значение сигнала на выходе увеличивается, обратная связь называется положительной. Если выходной сигнал понижается, обратная связь называется отрицательной. Обратные связи могут производиться по напряжению и току.

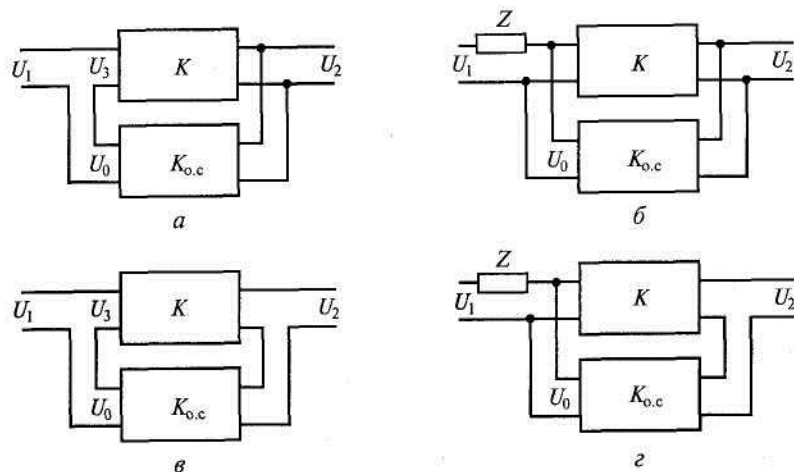


Рис. 8.6. Обратные связи в усилителях:
а, б — по напряжению; в, г — по току

На рис. 8.6, а, б показаны обратные связи по напряжению, а на рис. 8.6, в, г — по току. Обратная связь по напряжению перестает действовать при коротком замыкании на выходе. Обратная связь по току перестает действовать при холостом ходе на выходе.

Во всех схемах с обратной связью коэффициент передачи усилителя

$$K_y = \frac{U_2}{U_1},$$

где U_1 U_2 — напряжения соответственно на входе и выходе усилителя.

Коэффициент обратной связи усилителя определяется отношением

$$K_{o.c} = \frac{U_{o.c}}{U_2},$$

где $U_{o.c}$ — напряжение обратной связи

Для схем, показанных на рис. 8.6, а, б, имеем:

$$U_3 = U_1 + K_{o.c}U_2; \quad U_2 = K(U_1 + K_{o.c}U_2),$$

где U_3 — напряжение на входе усилителя при наличии напряжения обратной связи $U_{o.c}$.

Тогда коэффициент усиления каскада (коэффициент передачи)

$$K_y = \frac{K}{1 - K_{o.c}K},$$

где или $K = U_2/U_3$ — коэффициент усиления без обратной связи.

Отрицательная обратная связь существенно влияет на технические параметры усилителя. При наличии этой связи: уменьшаются нелинейные, частотные, фазовые искажения и шумы; повышается стабильность коэффициента передачи; уменьшается выходное и увеличивается входное сопротивление.

К недостаткам отрицательной обратной связи следует отнести уменьшение коэффициента усиления.

Положительная обратная связь применяется в генераторах для возбуждения незатухающих гармонических колебаний. Эта связь определяет стабильность частоты сигнала генератора.

Глава 9 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ УСИЛИТЕЛИ

9.1. Усилители на биполярном транзисторе

Функциональная схема усилителя на биполярном транзисторе приведена на рис. 9.1, а. Резисторы R_1 и R_2 задают режим покоя каскада, при котором в транзисторе протекают только постоянные токи покоя базы $I_{Бп}$, коллектора $I_{Кп}$ и эмиттера $I_{Эп}$.

На базе, коллекторе и эмиттере действуют постоянные напряжения покоя $U_{Бп}$, $U_{Кп}$, $U_{Эп}$.

Конденсаторы C_1 и C_2 — разделительные. Конденсатор C_1 препятствует протеканию постоянного тока с делителя R_1 , R_2 . Конденсатор C_2 препятствует прохождению постоянного напряжения на резистор R_H . На этом резисторе действует переменная составляющая коллекторного напряжения. Резистор $R_Э$ определяет ток покоя через транзистор при заданном напряжении $U_{Бп}$. Этот резистор для переменного сигнала является отрицательной обратной связью, предназначенной для стабилизации режима покоя транзистора при изменении его температуры. При увеличении (например, из-за роста температуры) тока коллектора покоя $I_{Кп}$ возрастают ток эмиттера покоя $I_{Эп}$ и падение напряжения на резисторе $R_Э$, поскольку $U_{Эп} = I_{Эп}R_Э$.

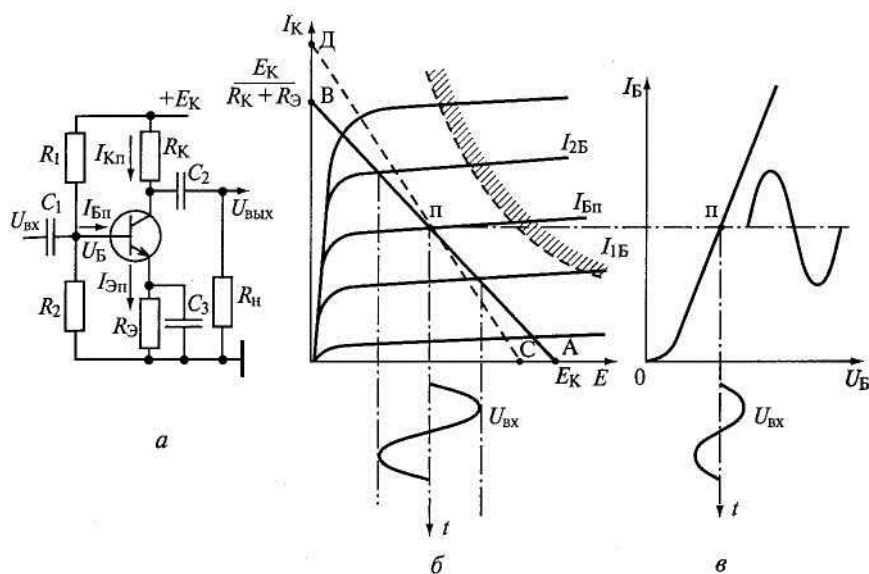


Рис. 9.1. Усилитель на биполярном транзисторе:
а — схема; б — статические входные характеристики; в — выходные характеристики

Так как напряжение $U_{Бп}$ фиксировано делителем R_1 , R_2 , то с увеличением $U_{Эп}$ происходит закрывание

транзистора. Это ведет к уменьшению коллекторного тока. Происходит автоматическая балансировка режима работы транзистора в режиме покоя.

Введение резистора $R_Э$ изменяет работу каскада и при усилении переменного входного сигнала. Переменный ток эмиттера создает на резисторе падение напряжения $U_Э = T_Э R_Э$, которое уменьшает усиливаемое напряжение. Коэффициент усиления каскада

$$K = \frac{R_K}{R_Э}.$$

Для исключения резистора $R_Э$ для протекания переменного тока его необходимо шунтировать конденсатором $C_Э$ достаточно большой емкости. При наличии конденсатора общее сопротивление в цепи эмиттера

$$R_{Э0} = \frac{R_Э X_C}{R_Э} + X_C,$$

где $X_C = 1/j\omega C$.

Расчет параметров каскада в режиме покоя по постоянному току проводят графоаналитическим методом с использованием статических входных и выходных вольт-амперных характеристик (ВАХ) (рис. 9.1, б, в).

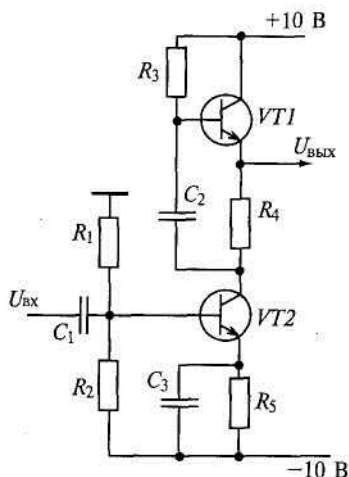


Рис. 9.2. Схема усилителя с динамической коллекторной нагрузкой

Для определения параметров выходного сигнала в динамическом режиме усиления сопротивление нагрузки R_H подключается параллельно сопротивлению R_K .

Общее сопротивление в цепи коллектора $R_{K0} = R_K R_H / (R_K + R_H)$. При этом следует учитывать, что $X_{C2} = 0$. Поскольку $R_K > R_{K0}$, то нагрузочная прямая проходит по линии СД.

Рассмотренный каскад дает ограниченное усиление из-за того, что сопротивление R_K определяет рабочую точку на выходных характеристиках по постоянному току с учетом допустимых нелинейных искажений. С увеличением R_K нелинейные искажения увеличиваются. Чтобы исключить эту зависимость, применяют динамическую коллекторную нагрузку.

На рис. 9.2 показана схема усилителя с динамической коллекторной нагрузкой. В схеме переменный (на рис. 9.1, а) сигнал в цепи коллектора создает падение напряжения на резисторе нагрузки. Через резистор R_K проходит ток $I_K = U_K / R_K$, т.е. чем больше сопротивление резистора R_K , тем меньше ток I_K . При динамической нагрузке усилителя переменный сигнал коллектора транзистора VT2 подается на базу транзистора VT1. При этом на коллекторах транзисторов VT2 и VT1 будет одинаковое переменное напряжение U_K .

Следовательно, на выводах сопротивления нагрузки R_4 напряжение равно U_K , т.е. переменный ток через резистор R_4 равен нулю. Значит, динамическое сопротивление нагрузки стремится к

бесконечности. В таком каскаде можно получить усиление по напряжению более 500.

9.2. Усилитель напряжения на полевом транзисторе

Функциональная схема этого усилителя приведена на рис. 9.3, а. Эквивалентная электрическая схема показана на рис. 9.3, б. Емкость C_0 является здесь входной емкостью второго каскада.

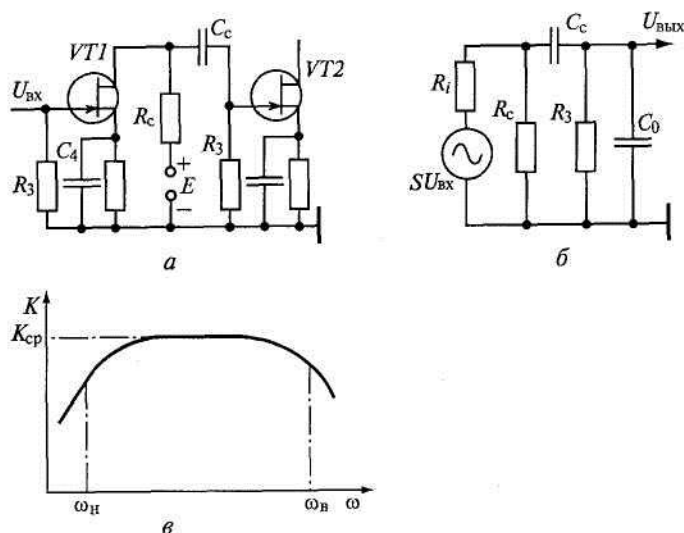


Рис. 9.3. Усилитель напряжения на полевом транзисторе:
а — функциональная схема; б — эквивалентная схема; в — частотная характеристика

По эквивалентной схеме можно рассматривать работу усилителя на различных частотах. В средней части частотного диапазона (от 200 до 3000 Гц) сопротивление емкости C_0 достаточно большое и она не шунтирует сопротивления R_c и R_3 , поэтому общее сопротивление в стоке транзистора

$$R_1 = \frac{R_c R_3}{R_c + R_3}.$$

Коэффициент усиления каскада

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{I_c R_1}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{\mu R_1}{R_1 + R_i} = \frac{\mu}{1 + R_i/R_1} = \frac{\mu \alpha}{1 + \alpha},$$

где I_c — ток в стоке транзистора; μ — статический коэффициент усиления полевого транзистора, $\mu = \Delta U_{\text{стока, истока}}/\Delta U_{\text{затвора}}$; $\alpha = R_i/R_1$ — коэффициент нагрузки.

При $R_i \gg R_3$, $R_3 \gg R_c$ можно считать $R_1/R_c \gg (1 + R_i/R_3)$, тогда коэффициент усиления в средней части частотного диапазона

$$K_{\text{ср}} = \frac{\mu}{R_i/R_c} = S R_c,$$

где S — крутизна характеристики полевого транзистора.

Для низких частот ω_H (меньше 200 Гц) сопротивление конденсатора C_c становится существенным, поэтому на резисторе R_3 падает только часть усиленного сигнала. Коэффициент усиления на этих частотах

$$K_H = \frac{K_{cp}}{\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega_H C_c R_3)^2}}}.$$

На высоких частотах ω_B (свыше 3 кГц) начинает сказываться сопротивление конденсатора C_0 . Общее сопротивление нагрузки в цепи стока транзистора в этом случае

$$Z_c = \frac{R_1}{1 + j\omega_B C_0 R_1}.$$

Коэффициент усиления на этих частотах

$$K_B = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{I_c Z_c}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{\mu Z_c}{Z_c + R_i} = \frac{\mu}{1 + j\omega_B C_0 R_i + R_i/R_1}.$$

Частотная характеристика усилителя приведена на рис. 9.3, в.

Схема усилителя с динамической нагрузкой показана на рис. 9.4. В этой схеме коэффициент усиления достигает нескольких сотен.

Переменный сигнал со стока транзистора VT2 подается в затвор транзистора VT1. При этом на одном выводе резистора R_1 действует сигнал $U_{\text{блх}}$ и на другом выводе действует аналогичный сигнал, т.е. падение напряжения на резисторе R_1 отсутствует. Следовательно, через него протекает нулевой ток. Это признак того, что резистор имеет бесконечное сопротивление для переменного сигнала.

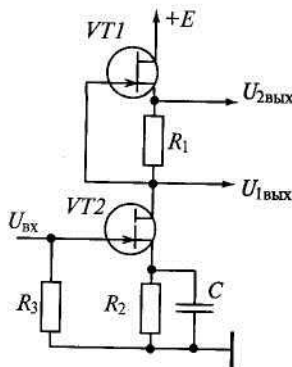


Рис. 9.4. Усилитель с динамической нагрузкой

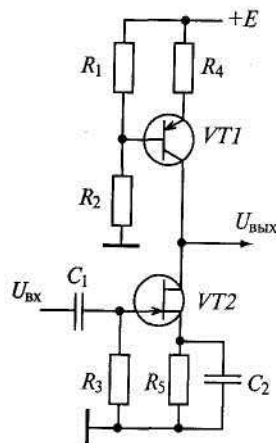


Рис. 9.5. Схема усилителя с большим коэффициентом усиления по току

В схеме рис. 9.5 полевой транзистор VT1 выступает в роли генератора тока. Ток стока полевого транзистора направлен в базу биполярного транзистора. В этой схеме входное напряжение преобразуется в полевом транзисторе в ток, который усиливается биполярным транзистором. Схема может обеспечить большой коэффициент усиления по току. Ограничение коэффициента усиления в этой схеме происходит за счет того, что полевой транзистор работает при малых токах стока, где крутизна характеристики значительно отличается от справочных данных на полевой транзистор. В результате общий коэффициент усиления не превышает 100. Рассмотренная схема имеет очень важное преимущество по сравнению с другими. Колебания питающего напряжения и помехи, существующие в цепях питания, не влияют на входной и выходной сигналы усилителя, так как они развязаны с питающим источником большим выходным сопротивлением биполярного транзистора.

9.3. Операционные усилители

Операционные усилители (ОУ) нашли применение в электронной аппаратуре за счет своей

универсальности и многофункциональности. Они представляют собой специальные усилители постоянного тока. Электрические схемы ОУ весьма разнообразны. ОУ могут быть с одним или двумя входами. Различают также ОУ с параметрической компенсацией дрейфа нуля, преобразованием сигнала и автоматической коррекцией дрейфа нуля. В усилителях с непосредственными связями компенсация дрейфа нуля осуществляется за счет построения входных каскадов по симметричной балансной или дифференциальной схемам. В усилителях с преобразованием сигнала для усиления постоянной составляющей используется импульсная стабилизация типа модуляция-усиление—демодуляция.

Операционные усилители без преобразования сигнала

Наиболее широкое распространение получили ОУ без преобразования сигнала, где входной каскад построен по дифференциальной схеме. ОУ этого типа состоят из каскадов: дифференциального усилителя, схемы смещения уровня напряжений, выходного усилителя мощности.

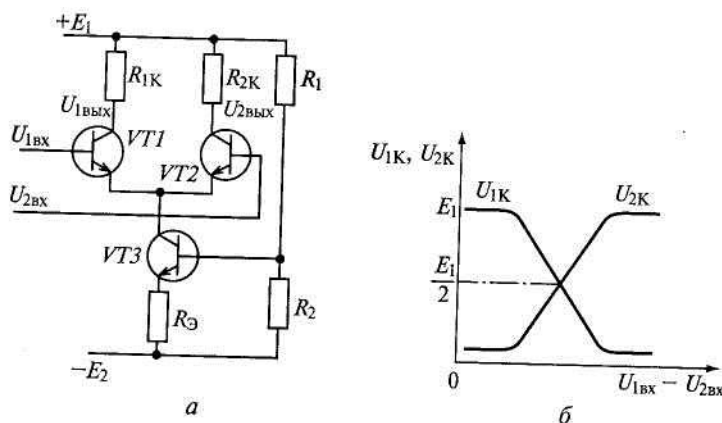


Рис. 9.6. Дифференциальный каскад ОУ без преобразования сигнала:
а — схема; б — характеристики выходных напряжений

Простой *дифференциальный каскад* включает в себя три транзистора (рис. 9.6, а). Транзистор VT3 работает в режиме генератора тока. Коллекторный ток этого транзистора задается стабильным напряжением на делителе R_1 R_2 и сопротивлением R_3 . При равенстве U_{1BX} и U_{2BX} ток I_3 транзистора VT3 протекает равными частями через транзисторы VT1 и VT2. В коллекторах этих транзисторов устанавливается напряжение

$$U_{1ВЫХ} = U_{2ВЫХ} = E_1 - R_{1K}I_3/2 = E_1 - R_{2K}I_3/2.$$

Напряжения $U_{1ВЫХ}$ и $U_{2ВЫХ}$ равны $E_1/2$.

В зависимости от разности между U_{1BX} и U_{2BX} выходные напряжения меняются, как показано на рис. 9.6, б.

Схема смещения уровня постоянного напряжения, которое устанавливается на коллекторах транзисторов дифференциального каскада, показана на рис. 9.7, а.

На базе транзистора VT2 устанавливается напряжение $E_2/2$. Через этот транзистор протекает ток $I_3 = E_2/2R_4$. На эмиттер транзистора VT1 подается напряжение $U_K = E_1/2$ (положительной полярности). Коллекторный ток транзистора VT2 $I_K = I_3$ создает падение напряжения на резисторе R_3 $I_K R_3 = E_1/2$.

В результате напряжение положительной полярности эмиттера VT1 полностью падает на резисторе R_3 и напряжение $U_{1ВЫХ}$ будет равняться нулю.

Выходной каскад строится на сдвоенном эмиттерном повторителе. Когда напряжение $U_{1ВЫХ}$ положительное, открывается транзистор VT1, обеспечивающий выходной ток. Отрицательная полярность $U_{1ВЫХ}$ открывает транзистор VT2, обеспечивая выходной ток (рис. 9.7, б).

На графическом изображении ОУ (рис. 9.7, в) указаны следующие выводы: 1 — инвертирующий вход, 2 — неинвертирующий вход, 3 — подключение положительного источника питания, 4 — подключение отрицательного источника питания, 5 — выходной сигнал. Частотная характеристика ОУ приведена на рис. 9.7, г.

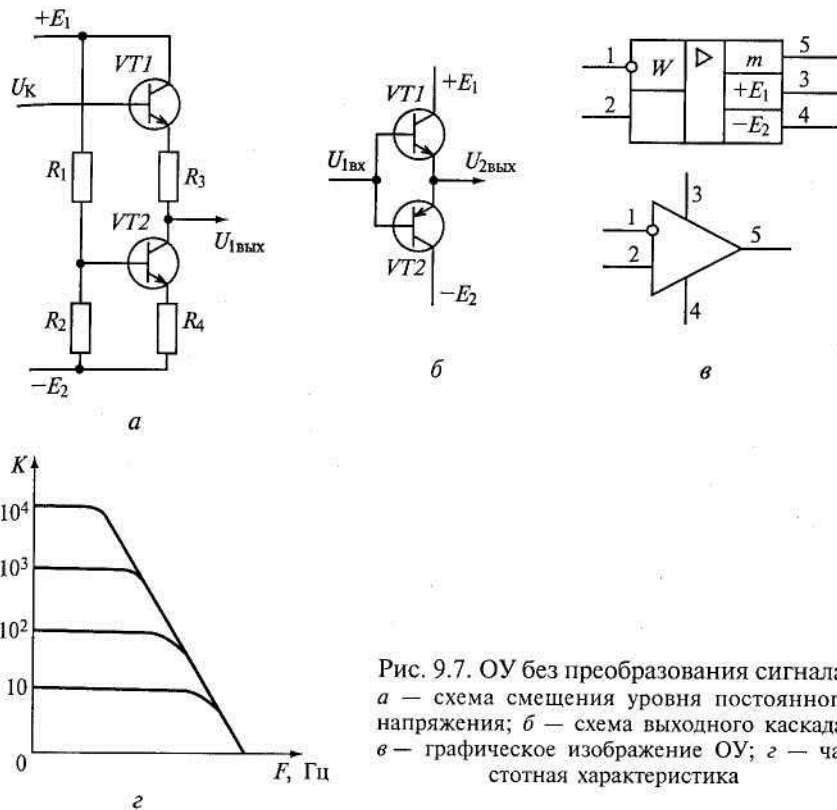


Рис. 9.7. ОУ без преобразования сигнала:
 а — схема смещения уровня постоянного напряжения;
 б — схема выходного каскада;
 в — графическое изображение ОУ; г — частотная характеристика

Перечислим основные параметры ОУ.

1. Входное сопротивление — дифференциальное сопротивление переменному току

$$R_{dвх} = \Delta U_{вх} / \Delta I_{вх}.$$

2. Средний входной ток, при отсутствии сигнала не превышающий сотен nanoamper.
3. Входной ток сдвига $\Delta I_{вх} = I_{вх}^+ - I_{вх}^-$ — разность между входными токами (он в несколько раз меньше среднего входного тока).
4. Напряжение смещения (прикладывается к одному из входов, Для получения $U_{вых} = 0$), равное 1 мВ.
5. Температурный дрейф напряжения смещения

$$\Delta U_{см} / \Delta T = (1 - 5) \text{ мкВ/}^\circ\text{C}.$$

6. Выходное сопротивление, составляющее 1 ... 5 кОм.
7. Коэффициент усиления в пределах $10^2 \dots 10^5$.
8. Полоса пропускания — полоса частот, в которой выходное напряжение уменьшается не более чем до 0,7 от максимального значения.
9. Скорость нарастания выходного напряжения $p = \Delta U_{вых} / \Delta t$.
10. Время установления выходного напряжения, определяемое между уровнями (0,1...0,9) $U_{вых}$ и составляющее единицы мкс.
11. Максимальный выходной ток, составляющий 5 мА и более.

Для ОУ принципиальное значение имеют три параметра: p , $R_{вх}$, $\Delta U_{см} / \Delta T$. Любой из параметров ОУ можно улучшить за счет ухудшения других. Различают ОУ:

- прецизионные, предназначенные для применения в контрольно-измерительной аппаратуре;
- быстродействующие — для схем, где требуются широкая полоса пропускания, высокая скорость нарастания выходного напряжения и малое время установления;
- универсальные, или средней точности;
- микрометричные, где рабочий ток усилителя задается внешним резистором;
- с высоким входным сопротивлением;
- малошумящие;

многоканальные;
мощные.

Прецизионные, быстродействующие, микромощные, малошумящие, широкополосные ОУ относятся к классу специализированных, поскольку один или несколько их параметров имеют значения, близкие к предельным.

Универсальные операционные усилители

На рис. 9.8 приведена базовая схема двухкаскадного универсального ОУ, содержащая входной дифференциальный усилитель на транзисторах $VT1... VT4$ и второй каскад усиления с общим эмиттером — транзисторы $VT5$ и $VT6$. На выходе схемы включен двухтактный усилитель мощности — эмиттерный повторитель, работающий в режиме АВ. Второй каскад работает как интегратор на высоких частотах, поскольку на инвертирующем входе (базе $VT5$) включен конденсатор коррекции $C = 30$ пФ. Работу входного дифференциального каскада можно проиллюстрировать диаграммой распределения токов, показанной на рис. 9.8, б. При равенстве входных напряжений токи эмиттеров транзисторов $VT1$ и $VT2$ равны по значению I_1 , поэтому одинаковы и токи эмиттеров $VT3$ и $VT4$. При этом полагают, что базовые токи транзисторов пренебрежимо малы. При идентичности технологических параметров токи транзисторов $VT4$ и $VT3$ всегда будут равны. Такое включение транзисторов называют «зеркалом токов». Нагрузка «зеркало тока» удваивает $\Delta I_{1\text{вых}}$ на выходе первого каскада. Далее сигнал усиливается вторым каскадом на транзисторах $VT5$ и $VT6$ и поступает на усилитель мощности ОУ, построенный на транзисторах $VT7$ и $VT8$. Токи I_1 и I_2 каскадов ОУ стабилизируются различными по конфигурации схемами внутренней стабилизации. Коэффициент усиления по напряжению ОУ на низкой частоте K равен произведению коэффициентов усиления каскадов.

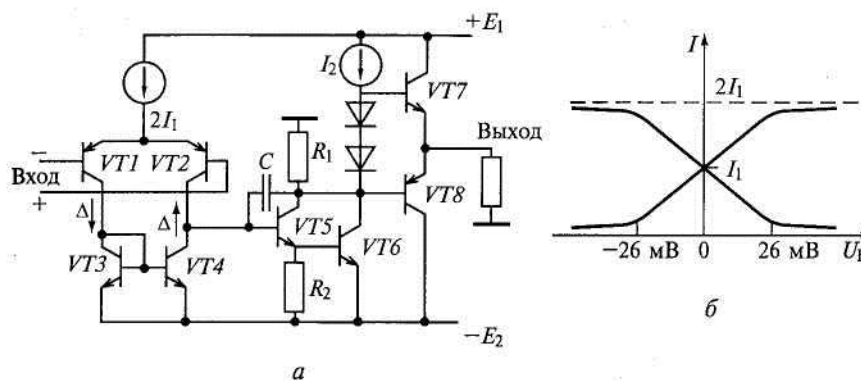


Рис. 9.8. Универсальный ОУ:
а — базовая схема; б — диаграмма распределения токов

Полная принципиальная схема двухкаскадного ОУ отличается от схемы-модели большим числом вспомогательных элементов, обеспечивающих надежную работу микросхем при изменяющихся внешних условиях (температуре, напряжении питания). Операционный усилитель КР140УД7 имеет более сложный входной усилитель, что позволяет повысить входное сопротивление до 100 кОм. В состав ОУ входит стабилизатор, схема которого имеет внутренний конденсатор коррекции $C = 30$ пФ, поэтому АЧХ ОУ полностью скорректирована. Наклон логарифмической АЧХ, составляющий -20 дБ на декаду, и постоянный фазовый сдвиг на высоких частотах, равный 90° , допускают использование ОУ в режиме повторителя без дополнительной частотной коррекции (рис. 9.9,а). Для увеличения скорости нарастания выходного напряжения до 10 В/мкс к выводу 12 подключают емкость $C_1 = 150$ пФ (рис. 9.9, б). Схема балансировки ОУ состоит из одного внешнего переменного резистора, подключенного к выводам 3 и 9.

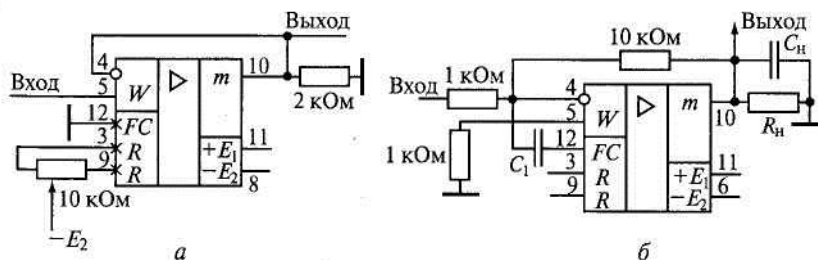


Рис. 9.9. Операционный усилитель типа КР140УД7:
а — схема включения; б — схема для увеличения скорости нарастания выходного напряжения

Прецизионные операционные усилители

В измерительных устройствах необходимо усиливать без искажения слабые сигналы датчиков, сопровождаемые значительным уровнем синфазных, температурных и других помех. Прецизионные усилители, используемые для этих целей, должны обладать не только очень большими значениями коэффициентов усиления (более 10^5), но и малым напряжением смещения нуля (не более 0,5 мВ) и его дрейфом, малыми уровнями шумов, большим входным сопротивлением. Для построения усилителя, называемого иногда инструментальным, и способного с большой точностью фиксировать перечисленные параметры, обычно используют два-три ОУ общего применения с несколькими высокоточными хорошо подобранными по температурным коэффициентам резисторами отрицательной обратной связи. Приемлемую схему инструментального усилителя можно получить, если на входе универсального ОУ использовать специальный прецизионный усилитель с небольшим коэффициентом усиления напряжения, но с высоким входным сопротивлением и малым дрейфом напряжения смещения.

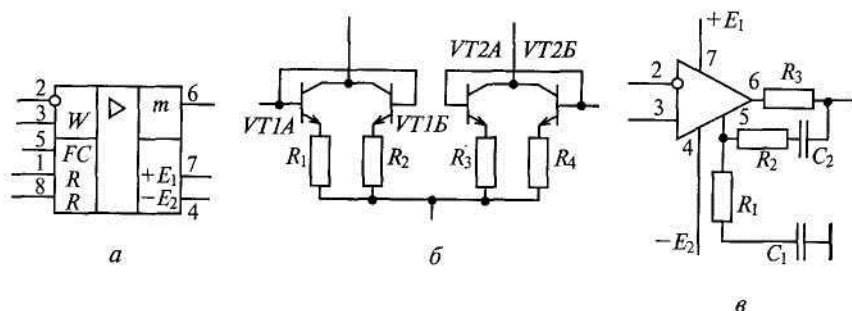


Рис. 9.10. Прецизионный ОУ типа КМ551УД1:
а — схема включения; б — принципиальная схема; в — схема цепей частотной коррекции

В настоящее время по этому принципу разработано несколько ОУ. Операционный усилитель КМ551УД1 (рис. 9.10) имеет малое напряжение смещения нуля (менее 0,5 мВ), малые уровни дрейфа и шумов и $K > 10^6$. Но основным свойством этого ОУ является то, что он позволяет поддерживать с высокой точностью большое значение коэффициента усиления ОУ, замкнутого отрицательной обратной связью. Можно получить $K = 1000 \pm 0,3 \%$. Характеристики усилителя обеспечиваются входным каскадом, который построен по простой дифференциальной схеме с резисторными нагрузками (см. рис. 9.10, а). Для уменьшения дрейфов входные транзисторы VT1 и VT2 представляют как параллельные соединения двух транзисторов (см. рис. 9.10, б). Амплитудно-частотная характеристика ОУ корректируется двумя цепями частотной коррекции (см. рис. 9.10, в).

Быстродействующие операционные усилители

Ограниченное быстродействие — один из существенных недостатков стандартных ОУ. Усилители общего назначения с коррекцией до частоты единичного усиления имеют малосигнальную полосу частот около 1 МГц и скорость нарастания выходного напряжения приблизительно до 0,6 В/мкс. Этот

недостаток можно преодолеть, если ввести в схему ОУ высокочастотный канал.

Существуют быстродействующие ОУ, отличающиеся способом построения ВЧ-канала. Например, ОУ типа КР140УД11 (рис. 9.11, а), выполненный по планарно-эпитаксиальной технологии с изоляцией $p-n$ -перехода, имеет скорость нарастания выходного напряжения 50 В/мкс и частоту единичного усиления 15 МГц. Широкополосность для этого ОУ — результат применения в схеме ВЧ-канала, по которому высокочастотные составляющие «обходят» низкоскоростной $p-n-p$ -транзистор. Кроме того, за счет оригинальной схемы ОУ отличается высокой стабильностью параметров во всем диапазоне питающих напряжений $\pm 5 \dots \pm 16$ В. Этот ОУ построен по трехкаскадной схеме.

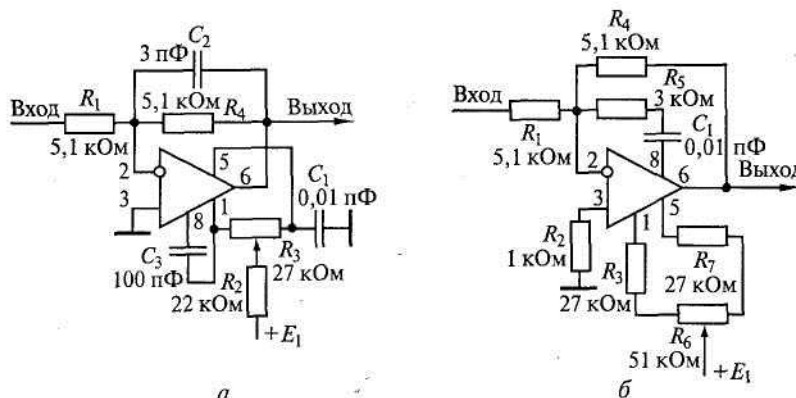


Рис. 9.11. Быстродействующий ОУ типа КР140УД11:
а — схема включения; б — схема с цепями внешней коррекции

Быстродействующие усилители менее устойчивы по сравнению с универсальными ОУ, поэтому для предотвращения генерации в схеме необходимо уменьшить паразитную емкость между выходом ОУ и его инвертирующим входом. Для уменьшения указанной емкости применяют специальные внешние цепи коррекции (рис. 9.11, б), состав которых зависит от задачи, которую решает ОУ. Балансировка усилителя осуществляется включением переменного резистора между выводами 1 и 5.

Микромощные и регулируемые операционные усилители

Для применения в аппаратуре, работающей в режиме ожидания, требуются ОУ, работающие от источника питания малой мощности. На рис. 9.12 приведена схема включения ОУ типа К1423УД1, предназначенного для работы в устройствах с ограниченной потребляемой мощностью, а также для построения высокочувствительных фотоприемных устройств, добротных фильтров, устройств выборки и хранения.

Микросхема может работать в диапазоне напряжений источников питания $\pm 0,9 \dots \pm 8$ В или $1,8 \dots 16$ В, при этом ее максимальное выходное напряжение составляет 0,9 В.

Основной недостаток ОУ типа К1423УД1 — их низкое быстродействие (0,1 ... 0,3 В/мкс). Улучшения скоростных свойств микромощных ОУ можно добиться за счет совершенствования технологии.

Так, операционный усилитель 154УД1 имеет один усилительный каскад со сложной динамической нагрузкой, что позволяет обеспечить стабильность схемы при замкнутой петле обратной связи за счет минимальной емкости корректирующего конденсатора, шунтирующего сопротивление нагрузки усилительного каскада. Скорость нарастания выходного напряжения определяется перезарядкой этого конденсатора и достигает 10 В/мкс при токе потребления около 0,1 мА.

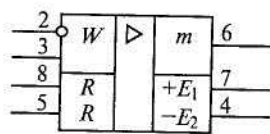


Рис. 9.12. Схема включения микромощного ОУ типа К1423УД1

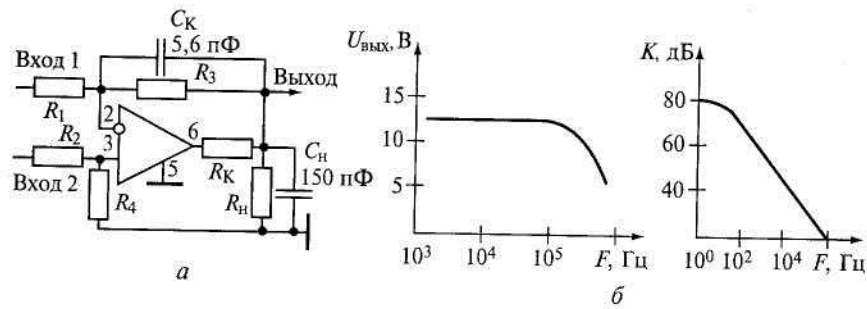


Рис. 9.13. Схема включения (а) и частотные характеристики (б) операционного усилителя 154УД1

На рис. 9.13 показана основная схема включения ОУ типа 154УД1 и приведены зависимости амплитуды выходного напряжения и коэффициента усиления от частоты.

Мощные операционные усилители

Операционный усилитель К157УД1 представляет собой мощный усилитель с выходным током до 0,5 А, построенный по классической двухкаскадной схеме на основе полупроводниковой технологии с изоляцией $p-n$ -перехода (рис. 9.14, а). Кристалл ОУ помещен в прямоугольный пластмассовый корпус, позволяющий рассеивать значительную мощность. Характеристики ОУ приведены на рис. 9.14, б.

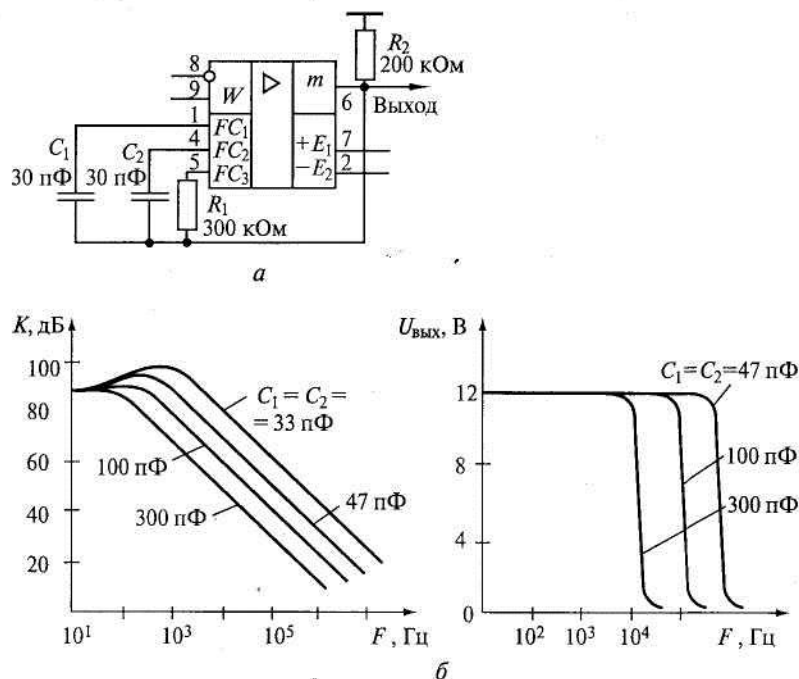


Рис. 9.14. Схема включения (а) и частотные характеристики (б) мощного ОУ типа К157УД1

Многоканальные операционные усилители

Широкое применение при построении аналоговых и цифровых устройств находят микросхемы, содержащие в одном корпусе несколько ОУ. Таким способом удастся значительно уменьшить габаритные размеры электронных узлов при сохранении их надежности.

Микросхема КР140УД20 представляет собой двухканальный ОУ. Каждый усилитель в этой

микросхеме по своим характеристикам и электрической схеме идентичен ОУ типа КР140УД7 (см. рис. 9.9). На рис. 9.15, а приведено условное графическое обозначение микросхемы КР140УД20, балансировка каждого усилителя которой осуществляется подключением переменного резистора к соответствующим выводам.

Микросхема К157УД2 представляет собой двухканальный ОУ с общим на оба канала стабилизатором, устанавливающим режим работы усилителей (рис. 9.15, б). Каждый ОУ здесь построен по двухкаскадной схеме и имеет коэффициент усиления более 10^4 . Выходной каскад рассчитан на ток нагрузки до 45 мА. На частоте 20 кГц значение коэффициента усиления падает до 300... 800.

Микросхема КР1427УД1 (рис. 9.16) представляет собой сдвоенный регулируемый ОУ с токовым выходом. В состав микросхемы кроме двух усилителей входят два отдельных эмиттерных повторителя. При подключении к ОУ буферного каскада выходное напряжение может достигать 13 В. Максимальный выходной ток составляет 300 мА при напряжении питания, равном $\pm 13,5$ В. Ток по выводу управления равен 0,5 мА, входной сигнал — 60 мВ, сопротивление нагрузки — 330 Ом.

Микросхемы серии К1401 представляют собой пример сборок, состоящих из четырех ОУ. Так, микросхема К1401УД1 содержит четыре ОУ, работающих от общих шин питания при напряжениях $\pm 2... \pm 15$ В. Каждый такой ОУ имеет коэффициент усиления более 10^3 и полосу пропускания до 2,5 МГц. Максимально допустимый выходной ток каждого усилителя зависит от схемы подключения нагрузки.

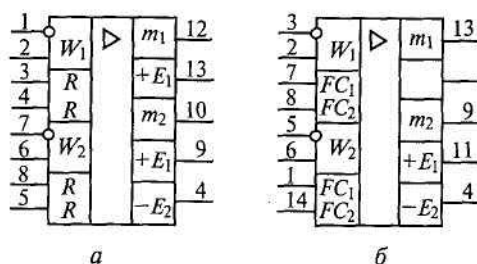


Рис. 9.15. Условное графическое обозначение двухканальных ОУ:
а — микросхема КР140УД20; б — микросхема К157УД2

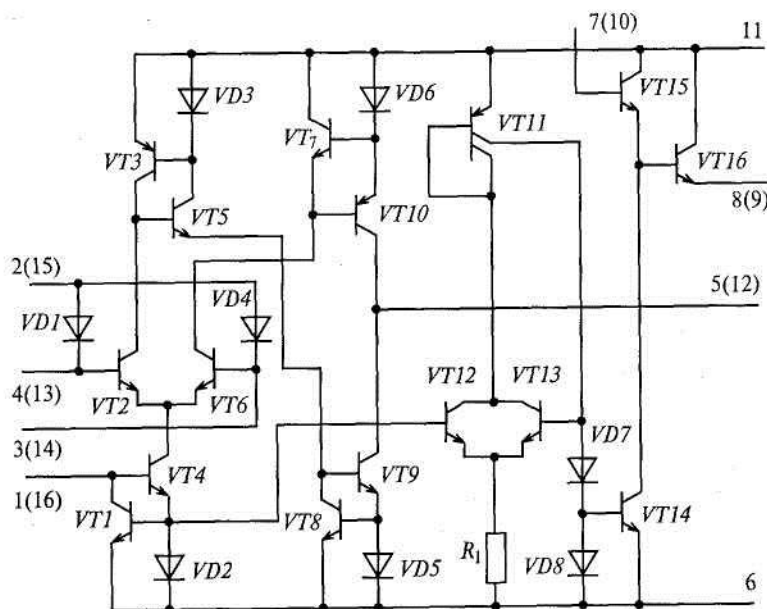


Рис. 9.16. Микросхема сдвоенного регулируемого ОУ типа К1427УД1 с токовым выходом

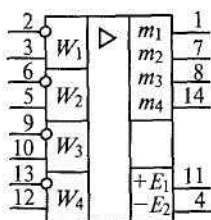


Рис. 9.17. Обозначение четырехканального ОУ типа К140УД1

При включении нагрузки между выводом и положительным источником питающего напряжения выходной ток не должен превышать 1 мА, а при подключении сопротивления нагрузки к отрицательному источнику питающего напряжения его значение составляет менее 10 мА. При работе ОУ от источника питающего напряжения 5 В коэффициент усиления составляет более 700 при выходном напряжении более 2,8 В. Ток потребления четырех ОУ при напряжении питания ± 15 В и отсутствии входного сигнала не превышает 8,5 мА. Максимально допустимая мощность рассеивания корпусом микросхемы не превышает 400 мВт. Графическое изображение этой микросхемы представлено на рис. 9.17. Такое же обозначение имеет микросхема К1401УД2 с напряжением питания $\pm 1,5 \dots \pm 16,5$ В.

Операционные усилители в моделировании математических операций

С помощью ОУ (рис. 9.18) можно смоделировать различные математические преобразования. На базе этих элементов строятся аналоговые вычислительные машины.

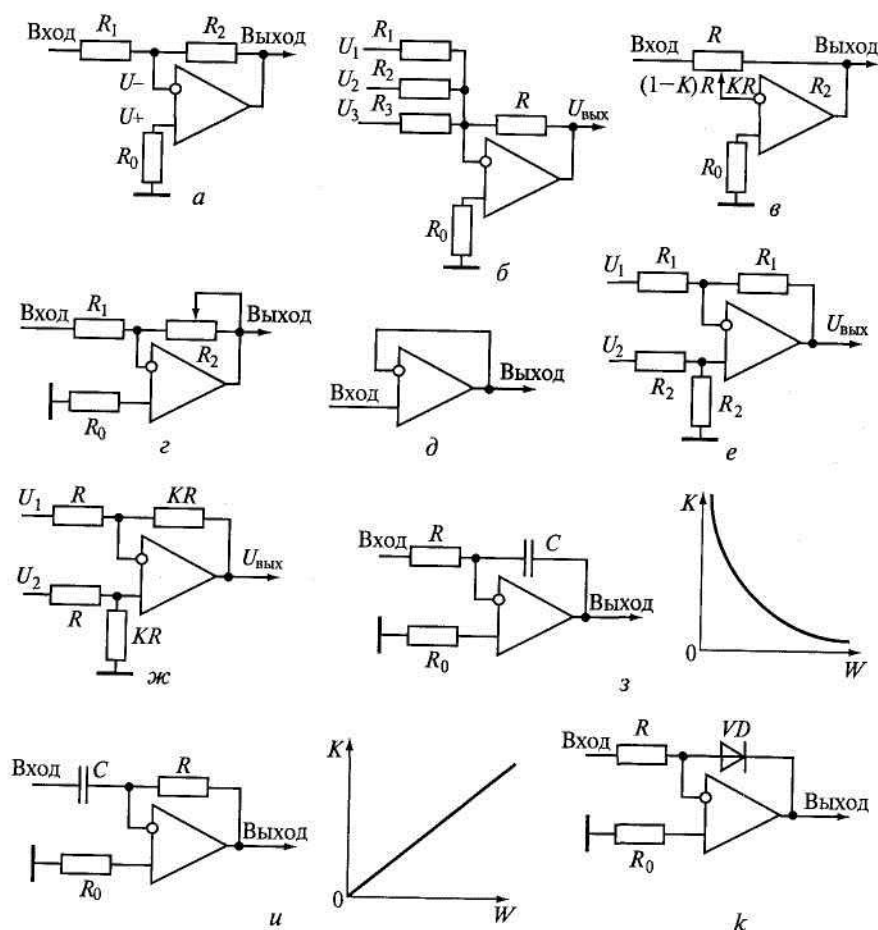


Рис. 9.18. Схемы ОУ для моделирования математических операций:
a — инвертирующий усилитель; *б* — инвертирующий сумматор; *в* — инвертор с регулируемым усилением; *г* — инвертор-усилитель с линейной зависимостью; *д* — повторитель; *е* — каскад вычитания; *ж* — усилительное вычитающее устройство; *з* — аналоговый интегратор; *и* — идеальный дифференциатор; *к* — логарифмический усилитель

На рис. 9.18, *a* представлена схема *инвертирующего усилителя*. Для расчета элементов этого усилителя воспользуемся двумя положениями:

напряжения на инвертирующем и неинвертирующем входах равны, т.е. $U_+ = U_-$;

входной ток усилителя равен нулю по любому из входов, $I_1 = I_2 = 0$

В этом случае $U_+ = 0$ и $U_- = 0$. Следовательно, входной ток $I_{вх} = U/R_1$. Ток I_2 , протекающий через резистор R_2 , равен U/R_2 . Так как ток $I_{вх} = I_2$, то $U_{вх}/R_1 = U_{вых}/R_2$, и коэффициент передачи

$$K = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = R_2/R_1.$$

На рис. 9.18, б показана схема *инвертирующего сумматора*, выходной сигнал которого описывается выражением

$$U_{\text{вых}} = -(U_1 R/R_1 + U_2 R/R_2 + U_3 R/R_3 + \dots + U_n R/R_n).$$

Инвертор с регулируемым усилением изображен на рис. 9.18, в, его выходной сигнал

$$U_{\text{вых}} = -KU/(1 - K).$$

Инвертор-усилитель с линейной зависимостью усиления от положения движка показан на рис. 9.18, г. Его передаточное уравнение имеет вид

$$U_{\text{вых}} = -kR_2 U_{\text{вх}}/R_1,$$

где k — часть переменного сопротивления R .

В схеме *повторителя*, приведенной на рис. 9.18, д, выполняются равенство

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}.$$

В *каскаде вычитания* двух входных сигналов, показанном на рис. 9.18, е, выполняется следующее равенство:

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{вых}}.$$

Тогда $(U_1 - U_+)/R_1 = (U_{\text{вых}} - U_+)/R_1$ и $U_1 - U_+ = U_{\text{вых}} + U_+$. Учитывая, что $U_- = U_2/2 = U_+$, получим

$$U_1 - U_2/2 = U_{\text{вых}} + U_2/2,$$

или $U_1 - U_2/2 - U_2/2 = U_{\text{вых}}$.

Тогда выражение для выходного напряжения запишем в виде

$$U_{\text{вых}} = U_1 - U_2.$$

Усилительное вычитающее устройство показано на рис. 9.18, ж; его передаточная функция описывается выражением

$$U_{\text{вых}} = K(U_1 - U_2).$$

Схема *аналогового интегратора* и его частотная характеристика показаны на рис. 9.18, з. Передаточная функция аналогового интегратора описывается выражением

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{RC} U t dt.$$

Схема *идеального дифференциатора* и его частотная характеристика показаны на рис. 9.18, и. В этом каскаде для высоких частот коэффициент усиления принимает максимально возможное значение.

Схема *логарифмического усилителя* показана на рис. 9.18, к. Для этого каскада можно составить уравнение

$$U_{\text{вых}}/R = I_0 \exp(SU_{\text{вых}}),$$

где S — коэффициент пропорциональности.

Передачная функция этого усилителя описывается выражением

$$U_{\text{вых}} = A \lg(U_{\text{вх}}/I_0 R).$$

где A — коэффициент передачи.

Во всех схемах с ОУ на свободный от функций входной вывод подключается резистор R_0 , номинал которого определяется суммарным сопротивлением по другому входу.

9.4. Электрометрические и измерительные усилители

Эти усилители предназначены для измерения напряжения и тока сверхмалых значений. Измерение напряжения производится в диапазоне от 0 до 100 мВ, а измерение тока — от 10^{-16} до 10^{-3} А. Для электрометрических усилителей основным параметром является большое входное сопротивление. Они работают в области частот от 0 до 10 Гц. Основной погрешностью этих усилителей является временной и температурный дрейфы нуля. Электрометрические усилители нашли большое применение для усиления малых сигналов и потенциалов различных датчиков.

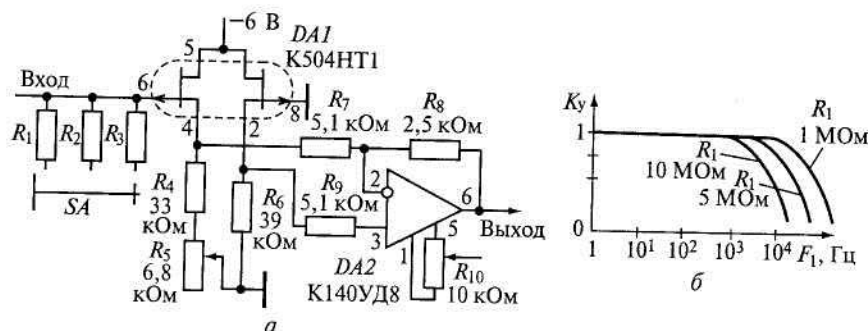


Рис. 9.19. Схема электрометрического усилителя (а) и его частотная характеристика (б)

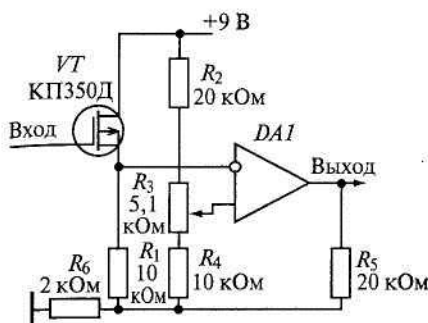


Рис. 9.20. Схема мостового усилителя

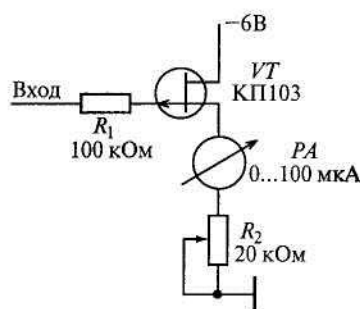


Рис. 9.21. Схема измерительного усилителя

На рис. 9.19 показана схема и характеристики термостабильного электрометрического усилителя, который позволяет измерять минимальный ток 10^{-5} А. Выходное напряжение при этом равно 50 мВ. Усилитель содержит входной каскад на сборке полевых транзисторов $DA1$. Сигнал с полевых транзисторов подается на вход ОУ. Для балансировки схемы служат потенциометры R_5 и R_{10} . Временной дрейф схемы составляет 20 мВ/ч, а температурный — 5 мВ/°С.

На рис. 9.20 приведена схема простого мостового усилителя, которая позволяет измерять входной ток до 10^{-15} А с входным сопротивлением более 10^{14} Ом. Коэффициент усиления схемы равен 10.

На рис. 9.21 приведена схема простого измерительного усилителя. Этот вольтметр позволяет измерять напряжение от -1 до 1 В. Входное сопротивление — 100 МОм. При нулевом напряжении на входе через измерительный прибор протекает ток, значение которого регулируется резистором R_2 . С помощью этого резистора стрелка прибора устанавливается в середине шкалы.

9.5. Многокаскадные усилители

Разработка многокаскадных усилителей связана с тем, что получить большой (более 100) коэффициент усиления на одном активном элементе практически нельзя. Многокаскадные усилители должны строиться с таким расчетом, чтобы при большом коэффициенте усиления в устройстве не возникали паразитные колебания. Для исключения паразитных возбуждений приходится применять специальные меры. К ним относятся:

- разделение общего коэффициента усиления на нечетное число каскадов;
- питание каждого каскада от своего источника (или имеется индивидуальная конденсаторная развязка);
- максимальное удаление выхода последнего каскада от входа первого каскада.

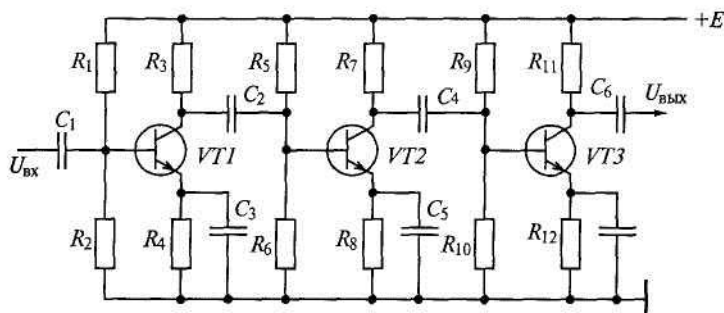


Рис. 9.22. Трехкаскадный усилитель с конденсаторной связью

На рис. 9.22 показана схема трехкаскадного усилителя с конденсаторной развязкой между каскадами. Режим по постоянному току у каждого каскада свой. Входной переменный сигнал проходит от каскада к каскаду через разделительные конденсаторы.

В схеме, приведенной на рис. 9.23, применяется гальваническая связь между каскадами усилителя при последовательном горизонтальном включении транзистора. Второй каскад собран на транзисторе противоположной полярности.

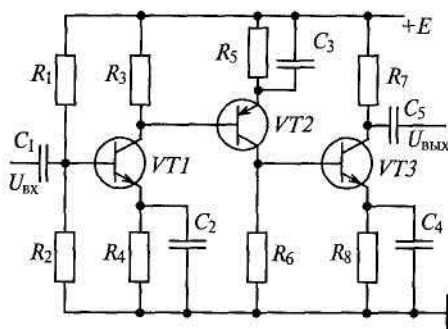


Рис. 9.23. Трехкаскадный усилитель с гальванической связью

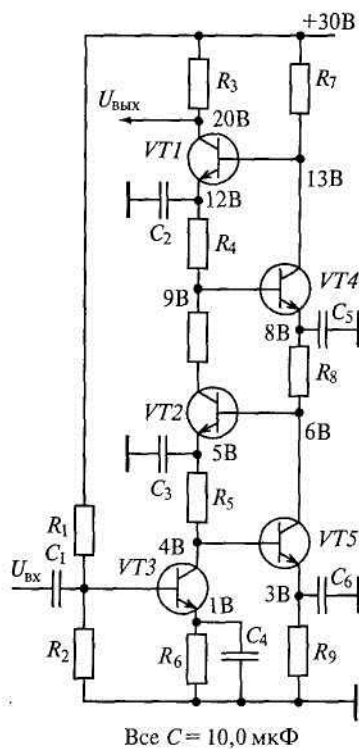


Рис. 9.24. Усилитель с последовательным вертикальным подключением транзисторов

Для связи каскадов необходимо установить постоянные напряжения в эмиттерах и коллекторах транзисторов.

На рис. 9.24 показана схема усилителя с последовательным «вертикальным» подключением транзисторов, через которые задается ток равный 1 мА. С помощью делителя $R_1 R_2$ в коллекторах и эмиттерах транзисторов устанавливаются напряжения, указанные в схеме. Это режим усиления по постоянному току. Для режима усиления по переменному току в эмиттеры транзисторов включены конденсаторы. Общий коэффициент усиления каскада $K = \beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 \beta_5$, где β_i — коэффициент усиления одного каскада. Несмотря на большой коэффициент усиления такая схема более устойчива к возникновению паразитных колебаний, чем две предыдущие схемы.

9.6. Усилители мощности

Мощные усилители низкой частоты гармонических сигналов являются необходимым элементом любых систем.

Одним из основных параметров этих усилителей является коэффициент усиления по мощности, который зависит от сопротивления нагрузки и входного сопротивления, а также от изменения питающего напряжения.

Рабочий диапазон частот — это полоса частот усилителя, в которой коэффициент усиления остается неизменным. Для усилителей низких частот (УНЧ) рабочий диапазон с удовлетворительными качествами лежит в диапазоне от 16 Гц до 20 кГц. В УНЧ, работающих в полосе частот от 50 Гц до 10 кГц, неравномерность коэффициента усиления частот составляет менее 5 дБ.

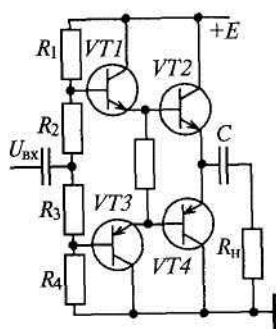


Рис. 9.25. Схема бестрансформаторного усилителя мощности

Нелинейные искажения в УНЧ обусловлены динамической характеристикой. При повышении уровня входного сигнала увеличивается выходная мощность, но возрастает и уровень нелинейных искажений. Искажения менее 1 % для определенной мощности на выходе считаются небольшими и вполне допустимыми для качественного воспроизведения звука. Динамический диапазон усилителя — это разность $U_{\max} - U_{\min}$, где $U_{\min}$ — превышение номинального уровня выходного сигнала над минимальным уровнем, еще различимым на фоне собственных шумов. Верхний предел выходного сигнала ограничивается заданной нормой нелинейных искажений и номиналом питающего напряжения.

Схема бестрансформаторного усилителя мощности приведена на рис. 9.25. Для этих усилителей мощность в нагрузке $P_n = 10$ Вт, сопротивление нагрузки (динамик типа 0,5 ГД14) $R_n = 8$ Ом, полоса частот от нижней граничной $f_H = 250$ Гц до верхней граничной $f_v = 10\,000$ Гц, коэффициент гармоник $K_r = 10\%$.

9.7. Интегральные усилители низкой частоты

В настоящее время создан ряд интегральных УНЧ. Схема УНЧ типа К174УН7 (рис. 9.26) имеет выходную мощность 4,6 Вт. Входной каскад усилителя построен на составном $p-n-p$ -транзисторе ($VT1, VT2$), нагрузкой которого служит транзистор $VT3$. Предварительный каскад выполнен на транзисторах $VT7, VT8, VT10$. С целью уменьшения нагрузки на входной каскад транзисторы $VT7$ и $VT8$ включены по схеме с общим коллектором. Нагрузкой транзистора $VT10$ является генератор тока на транзисторе $VT9$. Мощный выходной каскад построен на транзисторах $VT14, VT16, VT11, VT17$ и обеспечивает выходной ток 1 А. Ток смещения выходного транзистора $VT10$ определяется током,

проходящим через транзистор $VT9$, и падением напряжения на диоде $VD3$. Ток смещения выходного транзистора $VT17$ определяется током на транзисторе $VT13$ и падением напряжения на $VD4$, $VD5$, $VT15$. На транзисторах $VT4$ и $VT5$ выполнена цепь стабилизации рабочей точки усилителя по постоянному току.

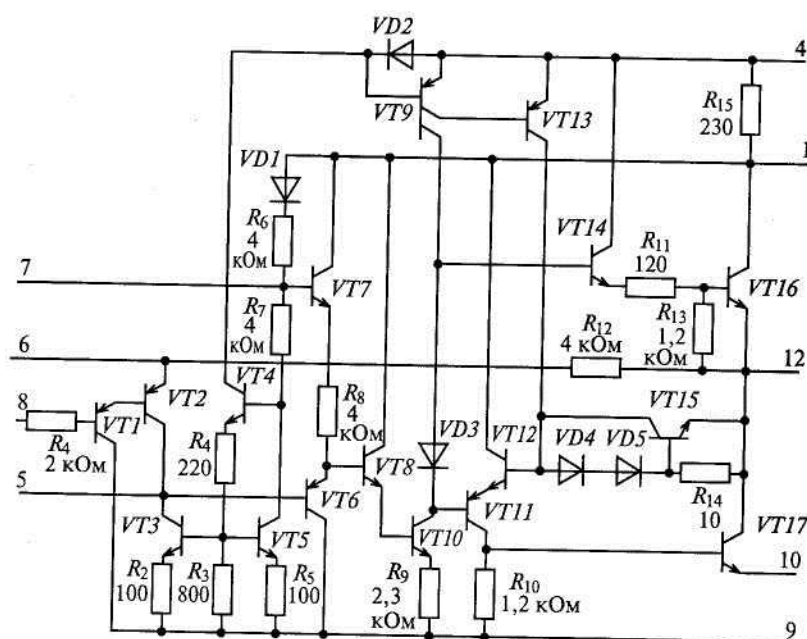
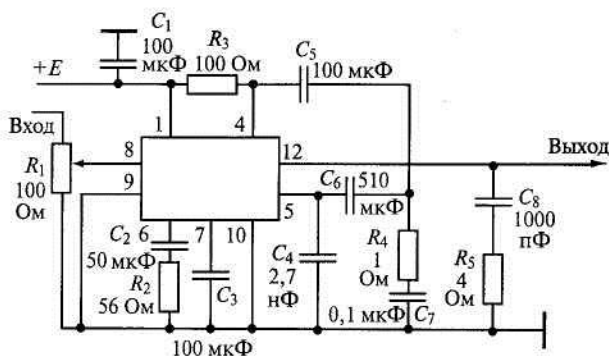


Рис. 9.26. Схема интегрального усилителя низкой частоты К174УН7

Рис. 9.27. Схема интегрального УНЧ типа К174УН7 с цепями коррекции



К выводу 5 на рис. 9.26 и 9.27 подключается внешняя цепь, корректирующая частотную характеристику на высоких частотах, а к выводу 6 — цепь обратной связи, которая служит для регулирования коэффициента усиления. Усилитель обеспечивает выходную мощность до 4,5 Вт на нагрузке 4 Ом при напряжении источника питания 15 В.

9.8. Импульсные усилители

Импульсный сигнал имеет широкий спектр частот, которые должны усиливаться электронным устройством. Ограничение полосы пропускания усилителя приводит к искажениям формы выходного импульса по сравнению со входным. Наибольшие искажения возникают при усилении сигналов прямоугольной формы.

Параметрами, характеризующими искажения, являются длительности переднего фронта t_f и заднего склона t_c , спад вершины импульса ΔU_c и выброс на вершине импульса ΔU_B (рис. 9.28).

Из теории известно, что вершину импульса (медленное изменение напряжения) определяет низкочастотная часть амплитудно-частотной характеристики усилителя, а передний и задний склоны (быстрое изменение напряжения) — ее высокочастотная часть. Следовательно, для неискаженной передачи импульсов прямоугольной формы через усилитель верхняя граничная частота F_B полосы пропускания усилителя должна стремиться к бесконечности, а нижняя граничная частота F_H — к нулю.

В обычных условиях это практически невозможно выполнить.

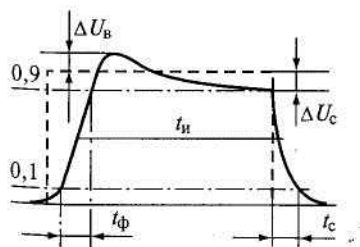


Рис. 9.28. Параметры импульса

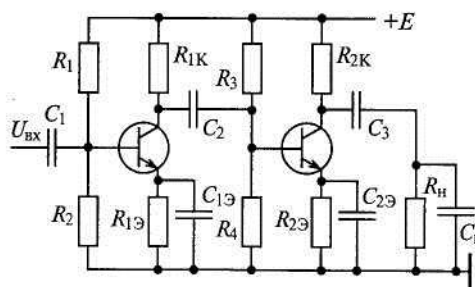


Рис. 9.29. Схема импульсного усилителя

Поэтому требования, предъявляемые к t_f , t_c и ΔU_c зависят от конкретных условий. Во многих случаях выходной импульс считается удовлетворительным, если $t_f = t_c = (0,1 \dots 0,2)t_{и}$, относительный спад вершины импульса

$$\delta_c = \Delta U_c / U_{вх} < (0,05 \dots 0,1),$$

а относительный выброс на вершине импульса

$$\delta_v = \Delta U_v / U_{вх} < 0,01.$$

Схема импульсного усилителя представлена на рис. 9.29.

9.9. Усилители с преобразованием

Для измерения очень малых сигналов постоянного тока (менее 1 мВ) применение усилителей с непосредственной связью невозможно из-за большого дрейфа выходного сигнала и возбуждения. В этом случае используются усилители с модуляцией и демодуляцией (МДМ), которые мало чувствительны к изменениям питающего напряжения и температуры окружающей среды и значительно стабильнее во времени, чем усилители с непосредственными связями. В усилителях МДМ сигнал постоянного тока преобразуется с помощью модулятора в переменный сигнал. Этот переменный сигнал усиливается до необходимой величины, а затем детектируется и преобразуется из переменного в постоянный. На выходе усилителя стоит фильтр нижних частот для сглаживания помех различного рода.

На рис. 9.30 приведена практическая схема МДМ-усилителя. В этой схеме на транзисторах VT1 и VT2 собран модулятор, усилитель переменного сигнала собран на элементах DA1 и DA2, демодулятор собран на транзисторах VT5 и VT6, интегратор собран на операционном усилителе DA3, а на транзисторах VT3 и VT4 собран генератор, который управляет работой модулятора и демодулятора.

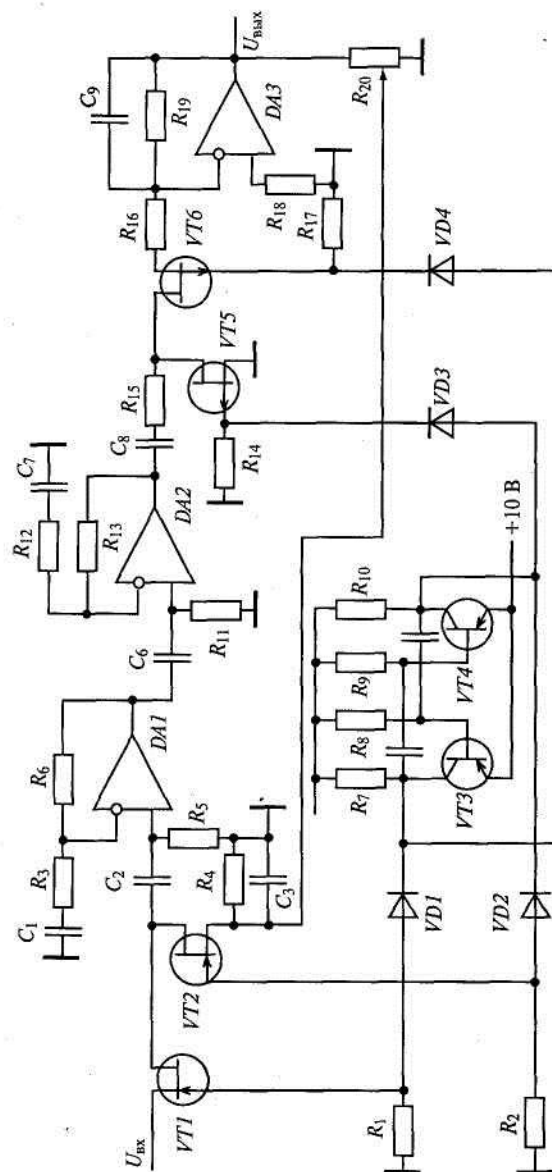


Рис. 9.30. Практическая схема МДМ-усилителя

Глава 10 МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

10.1. Классификация и принцип действия магнитных усилителей

Магнитным усилителем называется усилитель электрических сигналов, действие которого основано на использовании нелинейности характеристик ферромагнитных материалов. Магнитные усилители применяются в разнообразных устройствах: от точных измерительных приборов до схем автоматического управления крупными производственными агрегатами (прокатными станами, экскаваторами и т.п.). Широкое применение магнитных усилителей определяется рядом их достоинств:

- большим сроком службы, высокой надежностью, простотой эксплуатации;
- широким диапазоном усиливаемых мощностей: от $10^{-13} \dots 10^{-6}$ Вт до несколько десятков и даже сотен кВт; постоянной готовностью к работе;
- возможностью суммировать на входе несколько управляющих сигналов;
- значительной перегрузочной способностью; пожаро- и взрывобезопасностью;
- стабильностью характеристик в процессе эксплуатации. Магнитные усилители различают по следующим признакам: виду статической характеристики — однотактные (неревверсивные) и двухтактные (реверсивные);
- способу осуществления обратной связи (ОС) — без ОС и с ОС (внешней, внутренней, смешанной);
- форме кривой выходного напряжения — с выходом на несущей или удвоенной частоте, на постоянном или выпрямляемом токе и т.д.;

способу включения нагрузки — с последовательным и параллельным включением нагрузки и рабочих обмоток;

числу и конструкции сердечников в однотактной схеме — с одним двухстержневым или тороидным сердечником, с двумя сердечниками, трехстержневым и четырехстержневым сердечниками;

способу осуществления смещения — постоянным или переменным током и шунтированием выпрямителей ОС;

режиму работы — линейные (или пропорциональные) и релейные.

Простейшие магнитные усилители без ОС выполняются в виде двух одинаковых трансформаторов. Рабочие обмотки этих трансформаторов с числом витков w_p включаются последовательно с источником питания переменного напряжения U (рис. 10.1). Управляющие обмотки с числом витков w_y включаются встречно относительно рабочих обмоток для устранения трансформаторной связи между цепями, образуемыми управляющими и рабочими обмотками. Усиливаемый сигнал постоянного тока I_y поступает в управляющие обмотки w_y трансформаторов и вследствие нелинейного характера кривой намагничивания сердечников вызывает уменьшение их магнитной проницаемости и пропорциональное уменьшение индуктивности L_1 рабочих обмоток.

Устройство, имеющее схему, приведенную на рис. 10.1, часто называют *дросселем насыщения* или *управляемым дросселем*, так как, изменяя степень магнитного насыщения его сердечников путем подмагничивания их постоянным током, можно в широких пределах изменять индуктивность рабочих обмоток. Нагрузка R_H , показанная на рисунке пунктиром, включается в цепи переменного тока параллельно или чаще последовательно с управляемой индуктивностью.

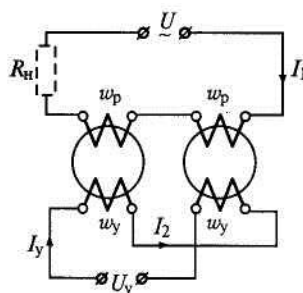


Рис. 10.1. Схема простейшего магнитного усилителя на двух трансформаторах

Токи I_1 и I_2 , протекающие соответственно в рабочей и управляющей обмотках трансформаторов, создают магнитные поля, которые в течение одного полупериода переменного тока в одном из сердечников имеют одинаковые, а в другом — противоположные направления. В результате первый сердечник насыщается, а второй остается ненасыщенным. Для ненасыщенного сердечника справедливо уравнение обычного трансформатора:

$$I_1 w_p = I_\mu w_p + I_2 w_p,$$

где I_μ — намагничивающий ток трансформаторов.

При отсутствии сигнала на входе усилителя $I_2 = 0$ и $I_1 = I_\mu$. В этом режиме среднее значение тока нагрузки имеет минимально возможное значение, равное току холостого хода трансформатора I_{xx} .

При наличии существенного сигнала I_y на входе усилителя обычно можно пренебречь слагающей $I_\mu w_p$ в правой части уравнения ампервитков по сравнению с $I_2 w_y$. Тогда, интегрируя в пределах полупериода, в течение которого рассматриваемый сердечник ненасыщен, получим

$$I_H \approx \frac{w_y}{w_p} I_y,$$

т.е. ток нагрузки в схеме на рис. 10.1 определяется лишь током управления и конструктивными параметрами усилителя и не зависит от нагрузки.

Коэффициенты усиления по току k_I и мощности k_P для простейшего магнитного усилителя определяют по формулам

$$k_I = \frac{\Delta I_H}{\Delta I_Y} \approx \frac{w_Y}{w_P}; \quad k_P = \frac{\Delta I_H^2 R_H}{\Delta I_Y^2 R_Y} \approx \frac{w_Y^2 R_H}{w_P^2 R_Y},$$

где R_Y — активное сопротивление управляющей обмотки.

Существенным недостатком таких магнитных усилителей является их относительно высокая инерционность, которую обычно характеризуют постоянной времени τ цепи управления: $\tau = k_P / 4\eta f$, где η — КПД цепи нагрузки; f — частота источника питания. Для уменьшения инерционности магнитных усилителей применяют переменный ток повышенной частоты (400... 10 000 Гц и выше).

10.2. Магнитные усилители с самонасыщением

Лучшими динамическими характеристиками, т. е. меньшей инерционностью при данном k_P , обладают магнитные усилители с самонасыщением. Простейшая схема магнитного усилителя с самонасыщением, на базе которой строятся более сложные схемы, дана на рис. 10.2. Идеализированная петля гистерезиса ферромагнитного сердечника магнитного усилителя представлена на рис. 10.3. Наличие выпрямителя В (см. рис. 10.2) в цепи рабочей обмотки (обмотка w_P усилителя, последовательно с которой включена нагрузка R_H) приводит к тому, что напряжение питания U приложено к этой обмотке и нагрузке лишь в течение проводящего для выпрямителя полупериода, называемого рабочим.

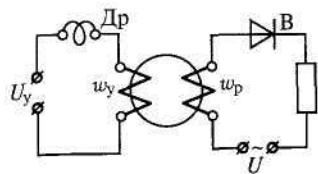


Рис. 10.2. Схема однотактного магнитного усилителя с самонасыщением

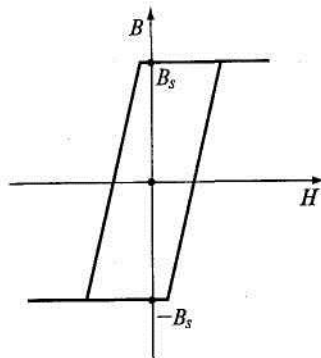


Рис. 10.3. Зависимость индукции B от напряженности магнитного поля H ферромагнитного сердечника магнитного усилителя

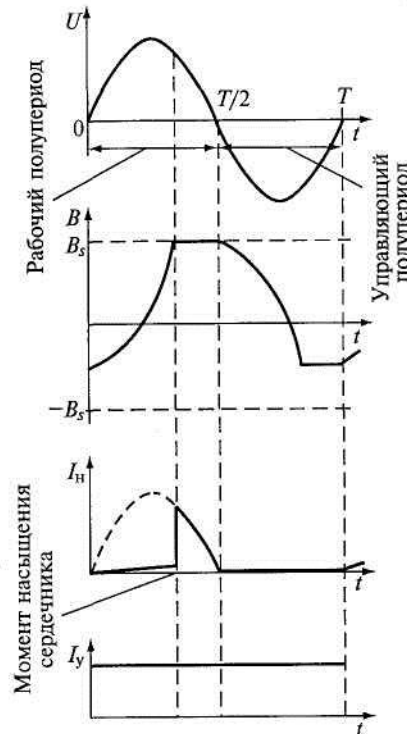


Рис. 10.4. Диаграммы изменения индукции B в сердечнике магнитного усилителя с самонасыщением, тока нагрузки I_H и управляющего тока I_Y во времени t

В соответствии с законом электромагнитной индукции изменение индукции в рабочем сердечнике усилителя в этот полупериод происходит только под действием напряжения питания U :

$$B = \frac{1}{S w_P} \int U dt,$$

где S — поперечное сечение сердечника.

В следующий полупериод изменение индукции в сердечнике происходит только под действием управляющего напряжения U_y , приложенного к обмотке управления w_y . Этот полупериод называется управляющим.

Для того чтобы воспрепятствовать трансформации напряжения из рабочей цепи в цепь управления, в последнюю включают либо дроссель Dp , либо клапан.

Изменение индукции в рабочем и управляющем полупериодах происходит во взаимнообратных направлениях. Обычно напряжение питания магнитных усилителей U выбирают таким, чтобы за время $T/2$, равное полупериоду питающего напряжения, оно было бы способно изменить индукцию в сердечнике на величину $\Delta B = 2B_s$, от точки $-B_s$ до B_s , где B_s — индукция насыщения материала сердечника. Это изменение пропорционально входному сигналу. Если к началу рабочего полупериода исходная рабочая точка, характеризующая магнитное состояние сердечника, окажется не в точке $-B_s$, а выше на петле гистерезиса, то в рабочем полупериоде сердечник по закону электромагнитной индукции насытится не в конце периода, а несколько раньше. После этого напряжение питания окажется полностью приложенным к сопротивлению нагрузки, а ток в нагрузке скачком возрастет до $I = U_{\max} \sin \omega t / R$. Чем больше управляющее напряжение, тем ниже по петле гистерезиса опустится рабочая точка в управляющий полупериод. В результате в рабочий полупериод сердечник насытится позднее, и к нагрузке будет приложено меньшее напряжение. При максимальном управляющем напряжении по нагрузке в течение всего рабочего полупериода протекает только намагничивающий ток.

Если управляющее напряжение равно нулю, то в управляющий полупериод индукция не изменяется и исходной точкой тока будет точка B_s . Следовательно, в течение всего рабочего полупериода ток в нагрузке будет следовать за изменением напряжения. Диаграммы изменения индукции B в сердечнике, тока нагрузки I_n , тока в обмотке управления I_y во времени t даны на рис. 10.4. Зависимость тока I_n нагрузки от тока I_y в обмотке управления для магнитных усилителей с самонасыщением приведена на рис. 10.5.

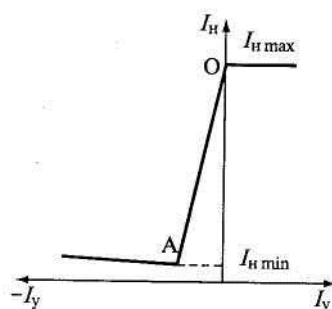


Рис. 10.5. Статическая характеристика однотактного магнитного усилителя с самонасыщением

Характеристики подобного типа называются статическими характеристиками, а участок АО — рабочим участком. Магнитный усилитель, обладающий статической характеристикой, показанной на рис. 10.5, называют *однотактным* (неревверсивным). Основная особенность такого усилителя в том, что при изменении полярности управляющего сигнала ток в нагрузке, изменяясь по значению, остается все время однополярным.

Схема, приведенная на рис. 10.2, является основой — типовым элементом при создании большинства современных магнитных усилителей. Рабочие полупериоды двух сердечников в схемах на рис. 10.6, 10.7 сдвинуты друг относительно друга на половину периода питающего напряжения. Обмотки управления двух сердечников соединены между собой так, чтобы в цепи управления не наводилось питающее напряжение. Если в однотактном магнитном усилителе (см. рис. 10.2) ток на выходе появляется лишь в течение одного из полупериодов питающего напряжения, то в усилителях, представленных на рис. 10.6 и 10.7, он появляется в течение каждого полупериода питающего напряжения.

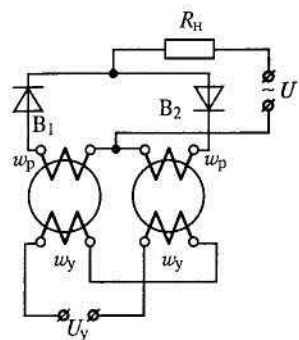


Рис. 10.6. Схема магнитного усилителя для нагрузки переменным током

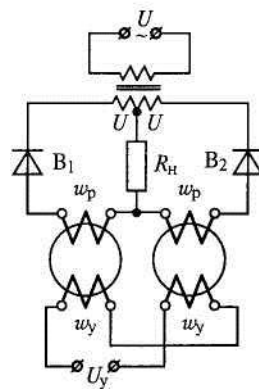


Рис. 10.7. Схема магнитного усилителя для нагрузки постоянным током

В то время как один из сердечников находится в рабочем полупериоде и ток от источника может протекать через его рабочую обмотку w_p и нагрузку, один из диодов блокирует рабочую обмотку другого сердечника, для которого наступает управляющий полупериод, т.е. его индукция изменяется под действием входного сигнала. В следующем полупериоде сердечники меняются ролями. В схеме на рис. 10.6 через нагрузку протекает переменный ток той же частоты, что и питающее напряжение, а в схеме на рис. 10.7 — выпрямленный двухполупериодный ток.

В магнитных усилителях с самонасыщением при отсутствии управляющего сигнала среднее значение тока нагрузки равно максимальному I_{Hmax} . Однако иногда бывает необходимо при отсутствии сигнала на входе усилителя получить минимальный ток в нагрузке. Поэтому в магнитных усилителях часто предусматривается так называемое смещение или начальное подмагничивание, что равноценно включению дополнительного управляющего напряжения. Под действием напряжения смещения изменение индукции в управляющем полупериоде происходит даже при отсутствии сигнала управления. Чем больше напряжение смещения, тем ниже по петле гистерезиса переместится рабочая точка.

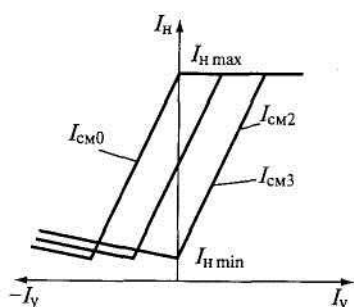


Рис. 10.8. Перемещение статической характеристики магнитного усилителя в зависимости от тока смещения

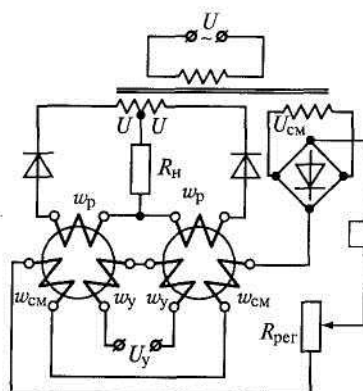


Рис. 10.9. Схема магнитного усилителя со смещением постоянным током

В том случае, когда на вход усилителя подается также сигнал управления, перемещение рабочей точки в управляющий полупериод определяется суммой напряженностей, создаваемых сигналами смещения и управления (если эти сигналы вызывают изменение намагниченности сердечника в одном направлении), или их разностью (если действие сигналов противоположно). Введение начального подмагничивания позволяет как бы перемещать статическую характеристику усилителя вдоль оси абсцисс в зависимости от значения тока смещения (рис. 10.8). Очевидно, что при изменении тока смещения $I_{см}$ ток на выходе усилителя при отсутствии управляющего сигнала I_y может принимать любые значения от I_{Hmax} до I_{Hmin} .

Принципиально смещение в магнитных усилителях может осуществляться тремя способами: постоянным или выпрямленным током, переменным током, шунтированием выпрямителей в рабочей

цепи сопротивлением. Наиболее широко применяется смещение постоянным током (рис. 10.9). Обмотки смещения обычно выполняются так же, как и обмотки управления. Последовательно с обмотками смещения для регулирования тока в них включают дополнительное сопротивление.

10.3. Магнитные усилители с обратными связями

В магнитных усилителях с самонасыщением по рабочим обмоткам наряду с переменной протекает и постоянная составляющая напряжения, которая дополнительно подмагничивает сердечники. По этой причине их иногда называют магнитными усилителями с *внутренней обратной связью*. В таких усилителях большую часть подмагничивающего поля составляет именно магнитное поле обратной связи и лишь сравнительно небольшую часть — магнитное поле управляющего сигнала.

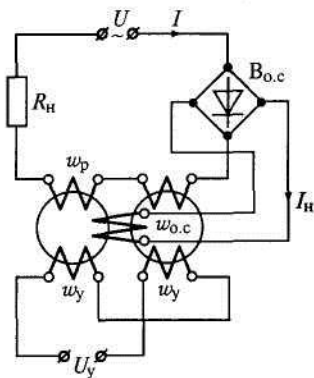


Рис. 10.10. Схема магнитного усилителя с внешней обратной связью

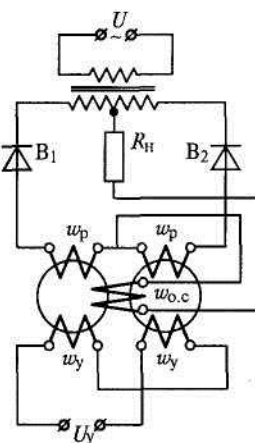


Рис. 10.11. Схема магнитного усилителя со смешанной обратной связью

Магнитное поле обратной связи может быть создано, например, путем подачи тока нагрузки в специальную обмотку обратной связи $w_{o.c}$ (рис. 10.10), называемую *внешней*.

Использование внутренней обратной связи, особенно в мощных магнитных усилителях (по сравнению с магнитными усилителями с внешней обратной связью) существенно повышает их КПД и максимальную мощность.

Для достижения больших значений $k_{o.c}$ в схемы усилителей с внутренней обратной связью дополнительно вводится обмотка обратной связи (рис. 10.11). Поскольку в этом случае в усилителе действует как внутренняя, так и внешняя обратная связь, эту схему часто называют схемой со *смешанной обратной связью*. Статические характеристики усилителя при различных значениях $k_{o.c}$ даны на рис. 10.12.

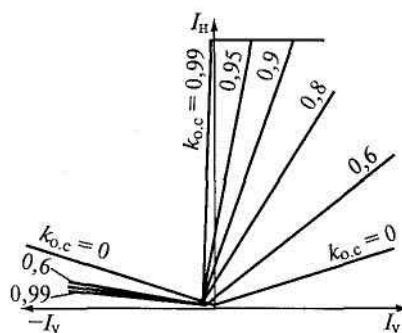


Рис. 10.12. Статические характеристики магнитного усилителя со смешанной обратной связью

Динамические свойства магнитных усилителей с самонасыщением характеризуются постоянной времени

$$\tau = w_y k_U / (2h w_p f),$$

где k_U — коэффициент усиления по напряжению, $k_U = \Delta U_H / \Delta U_y$.

10.4. Двухтактные магнитные усилители

Двухтактным магнитным усилителем называется усилитель, обладающий статической характеристикой, при которой изменение полярности управляющего сигнала вызывает изменение полярности выходного напряжения или изменение фазы выходного напряжения на 180° (рис. 10.13).

Двухтактные схемы нередко применяют для повышения стабильности характеристик усилителя или снижения тока холостого хода, равного $I_{H\min}$, и повышения коэффициента кратности тока нагрузки $I_{H\max}/I_{H\min}$ даже в тех случаях, когда не требуется изменять фазу или полярность выходного напряжения.

Двухтактные магнитные усилители могут быть выполнены с обратной связью и без нее, а также по специальным быстродействующим схемам.

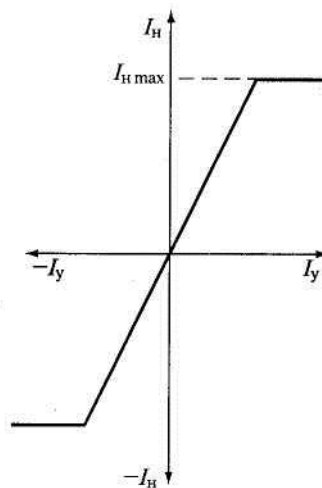


Рис. 10.13. Статическая характеристика двухтактного магнитного усилителя

Двухтактные магнитные усилители с выходом на несущей частоте применяются главным образом для управления двигателями переменного тока и их реверсирования, а также в качестве магнитных модуляторов.

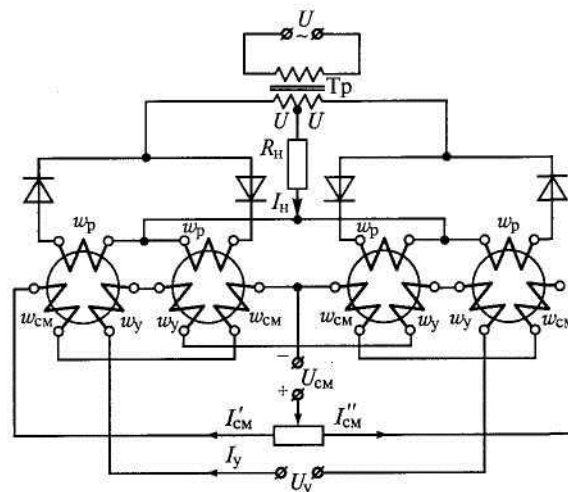


Рис. 10.14. Дифференциальная схема двухтактного магнитного усилителя

Двухтактные магнитные усилители с выходом на постоянном токе используются для управления

двигателями постоянного тока и их реверсирования, а также для управления полем генератора постоянного тока, поляризованными электромагнитами, реле, муфтами и т.д. Простейшие двухтактные магнитные усилители обычно выполняются путем соединения двух однократных усилителей по дифференциальной схеме (рис. 10.14). Оба усилителя в этой схеме питаются от одного трансформатора Тр с двумя одинаковыми вторичными обмотками. Токи смещения $I_{с'м}$ и $I_{с''м}$ поступающие в обмотки $w_{см}$, создают начальное подмагничивающее поле. Переменное сопротивление $R_{см}$ служит для балансирования (установки нуля) усилителя при отсутствии сигнала на его входе. Ток усиливаемого сигнала I_y поступает в обмотки w_y и создает магнитное поле, совпадающее по направлению с полем смещения в одной паре сердечников и имеющее противоположное направление в другой паре. Поэтому ток I_1 на выходе одного усилителя растет, а ток I_2 на выходе другого усилителя уменьшается. Благодаря тому, что в нагрузке эти токи вычитаются, на выходе усилителя появляется ток нагрузки, значение которого $I_n = I_1 - I_2$. При отсутствии сигнала на входе усилителя $I_1 = I_2$ и ток нагрузки равен нулю. При изменении полярности управляющего сигнала ток I_1 на выходе первого усилителя начинает уменьшаться, а ток I_2 на выходе второго усилителя возрастает. При этом результирующий ток I_n изменит свою фазу на 180° .

10.5. Электромашинные усилители

Электромашинный усилитель (ЭМУ) представляет собой коллекторный генератор постоянного тока. В электромашинных усилителях выходная (управляемая) электрическая мощность создается за счет механической мощности приводного двигателя.

В зависимости от способа возбуждения электромашинные усилители подразделяют на усилители продольного поля и усилители поперечного поля. В *усилителях продольного поля* основной поток возбуждения направлен по продольной оси машины, в *усилителях поперечного поля* основной поток возбуждения направлен по поперечной оси машины.

Важнейшей характеристикой ЭМУ является *коэффициент усиления*. Различают коэффициенты усиления по мощности k_p , току k_I и напряжению k_U :

$$k_p = P_{\text{вых}}/P_y; \quad k_I = I_{\text{вых}}/I_y; \quad k_U = U_{\text{вых}}/U_y; \quad k_I k_U = k_p.$$

Электромашинные усилители могут иметь достаточно высокий коэффициент усиления по мощности ($10^3 \dots 10^5$).

Важным показателем ЭМУ является *быстродействие*, характеризующее постоянными времени его цепей. Электромагнитная постоянная времени определяется энергией магнитного поля, изменяющегося в процессе регулирования. Для электрической цепи постоянная времени

$$\tau = L/R,$$

где L — индуктивность цепи; R — активное сопротивление цепи.

В ЭМУ постоянная времени $\tau = 0,02 \dots 0,20$ с.

ЭМУ должны обладать большим коэффициентом усиления по мощности и высоким быстродействием, т. е. иметь минимальные постоянные времени. Для удобства сравнения различных усилителей вводят коэффициент добротности k_d , равный отношению коэффициента усиления по мощности к сумме постоянных времени ступеней усиления:

$$k_d = k_p / \sum \tau.$$

К ЭМУ, работающим в системах автоматического регулирования, предъявляется требование минимальности погрешности отображения функциональной зависимости, т. е. отклонения от линейной действительной зависимости их выходного напряжения от тока управления. При выполнении этого требования ЭМУ сохраняет неизменное значение коэффициента усиления при изменении сигнала управления.

В системах автоматического регулирования ЭМУ применяют в качестве усилителей мощности, работающих в основном при переходных режимах, в процессе которых возникают значительные

перегрузки по току. Поэтому одним из требований к ЭМУ является хорошая перегрузочная способность.

Простейшим электромашинным усилителем (независимым ЭМУ) является обычная коллекторная машина постоянного тока, работающая в режиме генератора независимого возбуждения. В качестве обмотки управления в ней «Используется обмотка возбуждения главных полюсов. При необходимости число обмоток управления может быть увеличено от 2 до 4. Выходная мощность ЭМУ снимается с обмотки якоря.

Коэффициент усиления независимого ЭМУ относительно невелик: $k_p = 20 \dots 100$. Однако в системах генератор—двигатель, где от двигателя требуется изменение частоты вращения в широком диапазоне, генератор работает в режиме ЭМУ независимого возбуждения. Для малых мощностей наиболее распространенными являются ЭМУ поперечного поля.

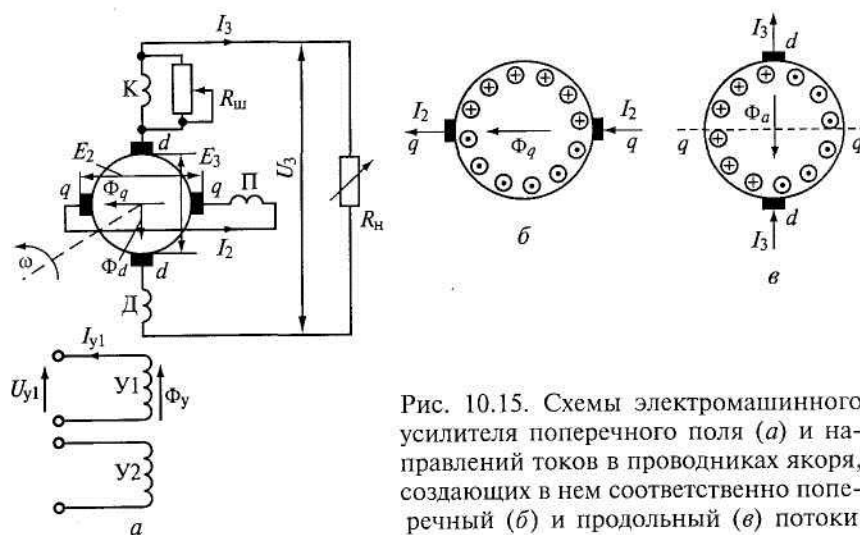


Рис. 10.15. Схемы электромашинного усилителя поперечного поля (а) и направлений токов в проводниках якоря, создающих в нем соответственно поперечный (б) и продольный (в) потоки

На рис. 10.15, а представлена схема ЭМУ поперечного поля. Конструктивно ЭМУ выполнен подобно генератору постоянного тока, но имеет дополнительный комплект щеток, установленных на поперечной оси qq машины и замкнутых накоротко. На статоре ЭМУ расположен ряд обмоток. Вдоль продольной оси dd полюсов находятся обмотки управления $У$ (обычно две или четыре). Соосно с ними расположена компенсационная обмотка $К$. Для регулирования степени компенсации усилителя последняя шунтирована регулирующим сопротивлением $R_{ш}$.

В этой же цепи для улучшения коммутации включена обмотка дополнительных полюсов $Д$. Иногда для этого в поперечную цепь последовательно с якорем включают поперечную обмотку подмагничивания $П$, имеющую малое сопротивление.

Рассмотрим принцип действия ЭМУ поперечного поля. Пусть угловая скорость ω приводного двигателя равна номинальной $\omega_{ном}$, т. е. $\omega = \omega_{ном}$, и к одной из обмоток управления приложено напряжение постоянного тока U_{y1} . При высоком коэффициенте усиления на вход усилителя подается малая мощность. Тогда под действием небольшого магнитного потока управления Φ_y в поперечной цепи qq обмотки якоря возникает небольшая ЭДС

$$E_2 = k\omega\Phi_y,$$

где $k = pN/(2\pi a)$ — конструктивный коэффициент, зависящий от числа пар полюсов/» машины, числа пар параллельных ветвей a и числа проводников N в обмотке якоря. В поперечной цепи якоря проходит ток I_2 , значение которого довольно велико, так как цепь имеет малое сопротивление.

На рис. 10.15, б показано направление тока I_2 в проводниках якоря, создающего поперечный поток якоря Φ_q . Под действием этого потока в продольной цепи dd якоря возникает ЭДС $E_3 = k\omega\Phi_q$, которая снимается продольными щетками. ЭДС E_3 вызывает появление тока I_3 , и на сопротивлении R_n происходит падение напряжения U_3 .

На рис. 10.15, в показано направление тока I_3 в проводниках якоря, создающего продольный поток якоря Φ_d , который направлен навстречу потоку управления Φ_y . Если не принять мер, то большой по значению поток Φ_d размагнитит усилитель и никакого усиления не произойдет. Для компенсации

продольного потока якоря на статоре расположена компенсационная обмотка К.

Продольный поток якоря F_d пропорционален магнитодвижущей силе (МДС):

$$F_d = I_3 w_a,$$

где w — число витков в параллельной ветви обмотки якоря.

Таким образом, продольная МДС F_d якоря и, следовательно, пропорциональный ей магнитный поток Φ_d изменяются с изменением тока I_3 , т. е. зависят от сопротивления нагрузки R_H . Хорошее компенсирующее действие обмотка К производит в том случае, если МДС этой обмотки также зависит от тока I_3 . Поэтому обмотку К включают в продольную цепь машины последовательно с обмоткой якоря. Тогда МДС компенсационной обмотки

$$F_k = I_3 w_k,$$

где w_k — число витков компенсационной обмотки.

Степень компенсации усилителя характеризуется коэффициентом компенсации

$$k_k = F_k / F_d.$$

Различают три возможных случая работы усилителя: $k_k = 1$ — машина скомпенсирована; $k_k < 1$ — машина недокомпенсирована; $k_k > 1$ — машина перекомпенсирована.

Обычно ЭМУ выпускают с небольшой перекомпенсацией: МДС компенсационной обмотки примерно на 5 % больше продольной МДС якоря, т. е. $k_k = 1,05$.

Регулирование степени компенсации производится шунтирующим сопротивлением $R_{ш}$. С учетом $R_{ш}$ МДС компенсационной обмотки

$$F_k = I_3 w_k \frac{R_{ш}}{R_k + R_{ш}}.$$

Для улучшения коммутации в продольной цепи якоря располагают на статоре по оси dd дополнительные полюса. Для улучшения коммутации в поперечной цепи якоря снижают значение тока I_2 , а чтобы при этом не снизить магнитный поток по поперечной оси, на статоре укладывают поперечную обмотку подмагничивания П (см. рис. 10.15, а). Эта обмотка создает поток $\Phi_{\text{п}}$, направленный согласно с поперечным потоком якоря. Таким образом, при включении обмотки подмагничивания П в цепь поперечных щеток магнитный поток поперечной оси $\Phi'_q = \Phi_q + \Phi_{\text{п}}$.

Статические и динамические характеристики электромашинного усилителя поперечного поля

Важнейшим показателем ЭМУ поперечного поля является *коэффициент усиления по мощности*. Высокое значение этого коэффициента обусловлено тем, что ЭМУ поперечного поля является двухступенчатым. Первая ступень усиления — обмотка управления — короткозамкнутая цепь поперечных щеток. Вторая ступень усиления — короткозамкнутая цепь поперечных щеток — выходная цепь продольных щеток. Общий коэффициент усиления по мощности

$$k_p = k_{p1} k_{p2},$$

где k_{p1} — коэффициент усиления первой ступени; k_{p2} — коэффициент усиления второй ступени. Причем

$$k_{p1} = U_2 I_2 / (U_y I_y); \quad k_{p2} = U_3 I_3 / (U_2 I_2).$$

Подставляя значения коэффициентов усиления ступеней в формулу для вычисления общего коэффициента усиления по мощности, получим

$$k_P = \frac{U_3 I_3}{U_y I_y} = \frac{I_3^2 R_H}{I_y^2 R_y},$$

где R_y — сопротивление обмотки управления.

Коэффициенты усиления по мощности каждой ступени можно записать через основные параметры машины и нагрузки. Для этого токи в продольной и поперечной цепях якоря следует выразить в соответствии с законом Ома через ЭДС якоря и сопротивления, ЭДС якоря — через угловую скорость якоря и магнитный поток, а последний — через ток и индуктивность обмоток, создающих этот поток.

При полной компенсации ЭМУ ($k_k = 1$) формула результирующего коэффициента усиления по мощности, полученная в результате указанного преобразования, примет вид

$$k_P = c \frac{\Lambda_d \Lambda_q \omega^4 R_H}{R_2 (R_3 + R_H)^2} \tau_y \tau_2,$$

где c — конструктивный коэффициент; Λ_d, Λ_q — магнитные проводимости соответственно по продольной и поперечной осям машины; R_2, R_3 — активные сопротивления соответственно поперечной и продольной цепей ЭМУ; ω — угловая скорость якоря; $\tau_y = L_y/R_y$ — постоянная времени обмотки управления; $\tau_2 = L_2/R_2$ — постоянная времени поперечной цепи; L_y, L_2 — соответственно индуктивности обмоток управления и поперечной цепи ЭМУ.

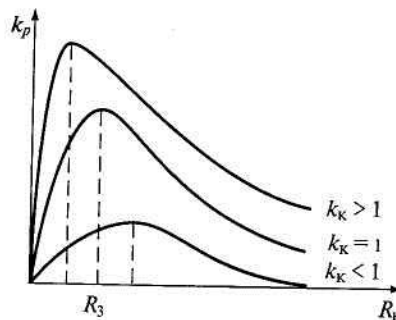


Рис. 10.16. Зависимость коэффициента усиления ЭМУ от сопротивления нагрузки и степени компенсации

Из приведенной формулы видно, что коэффициент усиления по мощности тем больше, чем меньше воздушный зазор и насыщение магнитной цепи (больше Λ_d и Λ_q) и выше угловая скорость. В то же время чрезмерно увеличивать угловую скорость нельзя, так как могут ухудшиться условия коммутации под продольными и поперечными щетками и условия механической прочности машины.

Коэффициент усиления k_P прямо пропорционален постоянным времени обмоток управления и поперечной цепи, т. е. требования максимального усиления и максимального быстродействия взаимно противоречивы.

Коэффициент усиления по мощности существенно зависит от сопротивления нагрузки и степени компенсации ЭМУ (рис. 10.16). При полной компенсации $k_k = 1$ коэффициент усиления по мощности достигает максимального значения при соблюдении условия $R_3 = R_H$, т. е. общего условия для работы генератора на пассивную нагрузку. В случае перекомпенсации $k_k > 1$ за счет подмагничивающего действия разностной МДС компенсационной обмотки и продольной цепи якоря коэффициент усиления по мощности больше и его максимум наступает при меньшем сопротивлении нагрузки, чем при $k_k = 1$. При недокомпенсации $k_k < 1$, соответственно, все наоборот.

Основными статическими характеристиками ЭМУ поперечного поля являются внешние и регулировочные.

Внешние характеристики — это зависимость $U_3 = f(I_3)$ при постоянных угловой скорости приводного двигателя $\omega = \text{const}$ и сигнале на обмотке управления. Вид внешних характеристик непосредственно связан с зависимостью тока в поперечной цепи I_3 от выходного тока, проходящего

через нагрузку (рис. 10.17). Характеристики построены для всех трех случаев компенсации: полной ($k_k = 1$), перекомпенсации ($k_k > 1$) и недокомпенсации ($k_k < 1$).

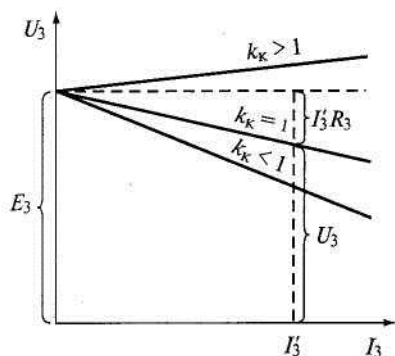


Рис. 10.17. Внешние характеристики ЭМУ

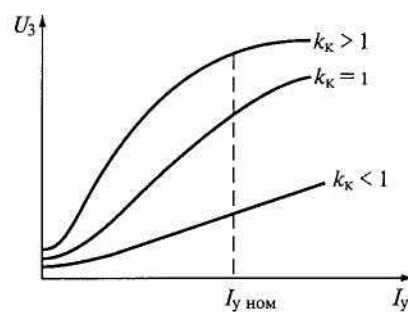


Рис. 10.18. Регулировочные характеристики ЭМУ

При полной компенсации выходное напряжение на сопротивлении нагрузки

$$U_3 = E_3 - I_3 R_3,$$

где E_3 — ЭДС холостого хода.

Регулировочные характеристики — это зависимости выходного напряжения или выходного тока от тока управления при $\omega = \text{const}$ и $R_H = \text{const}$ (рис. 10.18). Вид этих характеристик определяется формой кривой намагничивания машины. При малых токах управления нелинейность характеристики, т. е. погрешность ЭМУ, и соответственно непостоянство коэффициента усиления объясняются наличием остаточной ЭДС. В области больших токов управления эти явления связаны с насыщением магнитной цепи.

При использовании ЭМУ в замкнутых системах автоматического регулирования (стабилизаторах, регуляторах, следящих системах) машина должна быть несколько недокомпенсирована ($k_k = 0,97 \dots 0,99$), так как в случае перекомпенсации в системе во время работы может возникнуть возмущение за счет избытка МДС компенсационной обмотки, которое приведет к возникновению автоколебаний системы.

Применение электромашинных усилителей

Электромашинные усилители выпускают серийно и широко применяют в системах автоматического регулирования и автоматизированного электропривода. В системах генератор — двигатель — генератор, а часто и возбудитель, по существу представляет собой независимые ЭМУ, соединенные в каскад. Наибольшее распространение получили ЭМУ поперечного поля. Эти усилители имеют следующие основные преимущества:

большой коэффициент усиления мощности (до $0,5 \cdot 10^4$ у ЭМУ мощностью менее 750 Вт и до 10^5 у ЭМУ большей мощности);

малую входную мощность, позволяющую питать обмотки управления от электронных усилителей;

достаточное быстродействие, т. е. малые постоянные времени цепей усилителя (у ЭМУ мощностью до 750 Вт эквивалентная электромагнитная постоянная времени составляет около 0,1 ... 0,2 с);

достаточные надежность, долговечность и широкие диапазоны изменения мощности;

возможность изменения характеристик путем регулирования степени компенсации.

Недостатком ЭМУ является наличие остаточной ЭДС. Наводимая в якоре потоком остаточной намагниченности, она искажает линейную зависимость выходного напряжения от входного сигнала в зоне малых сигналов; при этом нарушается однозначность зависимости выходных параметров ЭМУ от входных и изменяется полярность входного сигнала, так как поток остаточного магнетизма при одной полярности сигнала увеличивает поток управления, а при другой — уменьшает.

Следует отметить, что с внедрением магнитных и тиристорных усилителей использование ЭМУ в системе генератор—двигатель значительно сократилось. Однако ЭМУ находит все большее применение в системах ЭМУ—двигатель, где ЭМУ используется в качестве генератора, питающего двигатель. В

результате использования промежуточных полупроводниковых усилителей значительно увеличились диапазоны регулирования и быстродействие электроприводов, работающих по системе ЭМУ—двигатель. Такие электроприводы применяют в различных областях, в связи с чем растет производство ЭМУ поперечного поля. Последнему обстоятельству способствует наличие нескольких обмоток управления в ЭМУ, что позволяет сравнивать сигналы и вводить обратные связи.

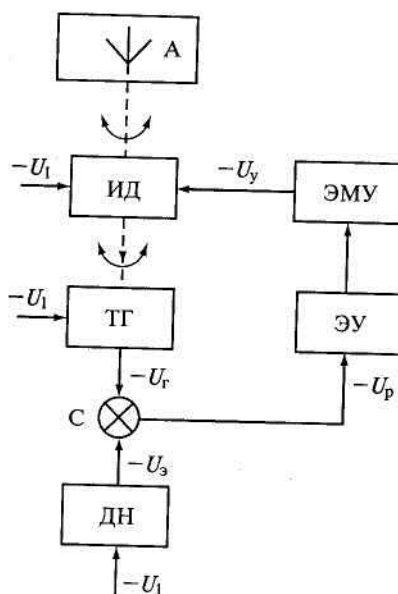


Рис. 10.19. Структурная схема привода антенны радиолокационной станции

На рис. 10.19 показана схема привода антенны радиолокационной станции в режиме кругового вращения с постоянной угловой скоростью. Схема состоит из исполнительного двигателя постоянного тока с якорным управлением ИД, приводящего во вращение антенну А, тахогенератора постоянного тока ТГ, механически связанного с валом ИД, и двух усилителей: электронного ЭУ и ЭМУ поперечного поля. При мощности исполнительного двигателя в несколько сотен ватт и более такая двухступенчатая схема усиления с ЭМУ поперечного поля может иметь лучшие технико-экономические характеристики, чем чисто электронная. Задающим элементом является делитель напряжения ДН, питающийся от источника постоянного тока.

Привод работает следующим образом. Необходимая угловая скорость задается соответствующим эталонным напряжением U_3 . Это напряжение через элемент сравнения С поступает на вход усилителя ЭУ. После усиления в ЭУ и ЭМУ напряжение U_y подается на обмотку управления исполнительного двигателя, обмотка возбуждения которого постоянно подключена к источнику напряжения U_1 . Ротор двигателя начинает вращаться и поворачивать антенну А и ротор тахогенератора ТГ. Выходное напряжение тахогенератора U_T сравнивается в узле С с эталонным напряжением U_3 , и на выходе усилительного каскада устанавливается постоянное значение U_y , определяемое напряжением рассогласования U_p . Ротор ИД и антенна непрерывно вращаются с постоянной угловой скоростью.