

Ю. М. Келим

ТИПОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

*Допущено Министерством образования Российской Федерации
в качестве учебного пособия для студентов учреждений среднего
профессионального образования, обучающихся по группе
специальностей 2100 «Автоматизация и управление»*

Москва
ФОРУМ — ИНФРА-М
2002

УДК 53(075)
ББК 22.3 я723
К32

Рецензенты:

преподаватель высшей категории *А. И. Грачев*
(Московский колледж автоматизации и радиоэлектроники);
преподаватель *Э. И. Болотина*
(Московский техникум электронных приборов);
старший научный сотрудник ВНИЭМ *Ю. А. Покатилов*.

Келим Ю. М.

К32 Типовые элементы систем автоматического управления. Учебное пособие для студентов учреждений среднего профессионального образования. — М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2002. — 384 с.: ил. — (Серия «Профессиональное образование»).

ISBN 5-8199-0043-X (ФОРУМ)
ISBN 5-16-000989-2 (ИНФРА-М)

В пособии изложены основы теории, рассмотрены схемы, конструкции и технические характеристики электрических датчиков (контактных, потенциометрических, тензометрических, электромагнитных, пьезоэлектрических, емкостных, термоэлектрических, струнных, фотоэлектрических, ультразвуковых и основанных на эффекте Холла), коммутационных электромеханических элементов (нейтральных и поляризованных реле, контакторов и магнитных пускателей, электромагнитов и электромагнитных муфт), магнитных усилителей, модуляторов и бесконтактных реле, индикаторных устройств, электронных коммутаторов, цифроаналоговых и аналого-цифровых преобразователей, специальных элементов автоматики.

Для учащихся техникумов и колледжей, а также студентов вузов.

УДК 53(075)
ББК 22.3 я723

ISBN 5-8199-0043-X (ФОРУМ)
ISBN 5-16-000989-2 (ИНФРА-М)

© Ю. М. Келим, 2002
© ИД «ФОРУМ», 2002

Предисловие

Настоящий учебник написан в соответствии с Федеральным образовательным стандартом по специальности 2101 «Автоматизация технологических процессов и производств» среднего профессионального образования базового и повышенного уровня. Этим стандартом предусмотрено изучение дисциплины «Типовые элементы систем автоматического управления», которая является предметом итоговой государственной аттестации по данной специальности. Учебник может быть полезен и учащимся других специальностей при изучении основ автоматики.

При изложении материала предполагается, что учащиеся хорошо усвоили курсы физики, математики, электротехники. В результате изучения курса «Типовые элементы систем автоматического управления» учащиеся должны уяснить физические основы и принципы действия элементов автоматики различных типов, знать их основные технические характеристики и особенности конструкций. В книге приведены формулы, описывающие работу элементов автоматики, а также расчетные соотношения, пригодные для практического использования. Учащийся должен уметь технически грамотно и обоснованно выбрать соответствующий поставленной задаче элемент, рассчитать его основные характеристики, правильно использовать его при эксплуатации.

Книга состоит из пяти разделов. В первом разделе приведена классификация элементов автоматики в соответствии с выполняемыми ими функциями в системе автоматического регулирования. Даны краткие сведения по физическим основам работы элементов, основным измерительным схемам, надежности элементов. Во втором — рассмотрены датчики систем автоматики: контактные, потенциометрические, тензометрические, индуктивные, трансформаторные, индукционные, пьезоэлектрические, емкостные, температурные, струнные, фотоэлектрические и основанные на эффекте Холла. В третьем разделе описаны коммутационные элементы с ручным и электромагнитным приводами, в том числе нейтральные и поляризованные реле, контакторы и магнитные пускатели, а также электромагнитные муфты. В четвертом разделе — магнитные усилители, модуляторы и бесконтактные магнитные реле. В пятом разделе рассмотрены электронные коммутаторы, индикаторные

устройства, элементы, используемые в цифровых системах автоматике, специальные элементы, улучшающие качество работы систем автоматике.

Отличием данного учебника является то, что в нем более полно даются многообразные типы датчиков для электрических систем автоматике, в рамках одной книги рассмотрены информационные, коммутационные, усилительно-преобразовательные и исполнительные устройства автоматике.

При изучении курса учащимся следует прежде всего твердо усвоить назначение элементов автоматике и их взаимодействие в системе. Затем каждый элемент можно изучать, используя материал соответствующей главы. Для закрепления практических навыков рекомендуется выполнять примеры расчетов и строить графики основных характеристик, прежде всего зависимости выходного сигнала от входного. При выполнении лабораторного практикума также следует обращаться к соответствующим главам данного учебника.

Автор благодарен рецензентам А. И. Грачеву, Ю. А. Покатилову и Э. И. Болотиной, редактору С. Ц. Малинской, а также кандидатам технических наук Э. В. Андрееву, И. М. Болотину, И. П. Дешко, Г. А. Птицыну, Т. Д. Королевой за полезные советы и замечания, которые были учтены при работе над рукописью, и просит читателей направлять свои пожелания и замечания по адресу: 101831, Москва, Коллачный пер. д. 9а, Издательский Дом «Форум».

Автор

Введение

Повышение производительности труда базируется на механизации и автоматизации производства. Рассмотрим подробнее эти понятия — «механизация» и «автоматизация». Что между ними общего и в чем различие?

Механизация — замена ручных средств труда машинами и механизмами. С их помощью человек может поднимать и перемещать тяжелые грузы, резать, ковать и штамповать металл при изготовлении деталей, добывать руду и топливо из недр земли. Но управление этими механизмами осуществляется человеком: он должен постоянно контролировать ход производственного процесса, анализировать его, принимать решения и воздействовать на этот процесс. Например, рабочий при обработке детали на станке должен измерять размеры детали, определять ее качество, т. е. получать информацию путем измерений. В зависимости от результатов измерений рабочий изменяет скорость резания, величину подачи инструмента, т. е. принимает и исполняет решение. Таким образом, при механизации требуется постоянное участие человека во всем ходе производственного процесса.

Автоматизация производственных процессов — применение технических средств и систем управления, освобождающих человека частично или полностью от непосредственного участия в этих процессах. Автоматизация облегчает умственный труд человека, освобождает его от сбора информации, ее обработки, исполнения принятого решения. В системах автоматики получение, передача, преобразование и использование информации осуществляются без непосредственного участия человека.

Для получения информации о ходе производственного процесса применяют *датчики* — элементы автоматики, преобразующие самые разные физические величины (размеры, температуру, давление, расход, скорость, уровень, влажность и т. д.) в некоторый сигнал, удобный для последующей обработки в автоматическом устройстве или ЭВМ. Затем этот сигнал обрабатывается: сравнивается с другими сигналами, анализируются его изменения.

В результате обработки информационных сигналов вырабатываются исполнительные сигналы, которые и воздействуют на технологический процесс. Эти сигналы в *исполнительных элементах* автома-

тики преобразуются в механическое воздействие, перемещающее деталь или инструмент, закрывающее или открывающее кран, включающее или отключающее нагревательную установку и т. п. Так как это воздействие требует значительной энергии, то обработка информационных сигналов предусматривает, как правило, их усиление.

Таким образом, системы автоматики состоят из датчиков, усилительно-преобразовательных и исполнительных элементов.

Наиболее универсальным и удобным для систем автоматики оказался электрический сигнал. По сравнению с другими (пневматическими или гидравлическими) электрический сигнал имеет следующие преимущества:

1. Электрический сигнал можно передавать на большие расстояния;
2. Энергию электрического сигнала можно преобразовывать в другие виды энергии, прежде всего в механическую и тепловую, необходимые на любом производстве;
3. Электрический сигнал можно обрабатывать, в том числе усиливать, с помощью простых технических средств.

Именно поэтому наибольшее распространение получили электрические системы автоматики, т. е. использующие именно электрический сигнал.

С применением электрических элементов автоматики мы постоянно сталкиваемся в быту: датчики температуры в холодильнике и утюге; переключатели и реле в электрофоне, магнитофоне; потенциометрические, индуктивные и емкостные датчики для настройки радиоприемника и телевизора. Насыщенность же современного производства элементами автоматики во много раз выше. Уже действуют цехи, где нет ни одного рабочего, а всеми механизмами управляют элементы автоматики.

В нашей стране создана Государственная система приборов и средств автоматизации (ГСП), в которую входят тысячи самых разнообразных элементов. С их помощью может быть построена практически любая система автоматики. Естественно, что элементы, входящие в ГСП, непрерывно совершенствуются, а состав системы расширяется.

Раздел I

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕМЕНТАХ АВТОМАТИКИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Глава 1

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

§ 1.1. Состав систем автоматики

Системы автоматики предназначены для получения информации о ходе управляемого процесса, ее обработки и использования при формировании управляющих воздействий на процесс. В зависимости от назначения различают следующие автоматические системы.

Системы автоматической сигнализации предназначены для извещения обслуживающего персонала о состоянии той или иной технической установки, о протекании того или иного процесса.

Системы автоматического контроля осуществляют без участия человека контроль различных параметров и величин, характеризующих работу какого-либо технического агрегата или протекание какого-либо процесса.

Системы автоматической блокировки и защиты служат для предотвращения возникновения аварийных ситуаций в технических агрегатах и установках.

Системы автоматического пуска и остановки обеспечивают включение, остановку (а иногда и реверс) различных двигателей и приводов по заранее заданной программе.

Системы автоматического управления предназначены для управления работой тех или иных технических агрегатов либо теми или иными процессами.

Важнейшими и наиболее сложными являются системы автоматического управления. *Управлением в широком смысле слова называется организация какого-либо процесса, обеспечивающая достижение поставленной цели.*

Общие законы получения, хранения, передачи и преобразования информации в управляющих системах изучает кибернетика. Таким образом, изучение систем автоматики также является одной из задач кибернетики. Технические средства, с помощью которых построены автоматические системы, называются элементами автоматики.

Рассмотрим назначение этих элементов в системе автоматического регулирования. Работа любого технического агрегата или ход любого технологического процесса характеризуются различными физическими величинами, например температурой, давлением, скоростью, расходом вещества. Эти величины должны поддерживаться на заданном уровне или изменяться по заданному закону.

С помощью системы автоматического регулирования (САР) автоматически решаются задачи изменения какой-либо физической величины по требуемому закону. Физическая величина, подлежащая регулированию (изменению по заданному закону) в САР, называется обычно регулируемой величиной, а технический агрегат, в котором осуществляется автоматическое регулирование, — объектом регулирования. Автоматическое регулирование является частным случаем автоматического управления. Цель управления в этом случае как раз и заключается в обеспечении требуемого закона изменения регулируемой величины.

Обозначим через $y(t)$ функцию, описывающую изменение во времени регулируемой величины, т. е. $y(t)$ — регулируемая величина. Через $g(t)$ обозначим функцию, характеризующую требуемый закон ее изменения. Величину $g(t)$ будем называть задающим воздействием. Тогда основная задача автоматического регулирования сводится к обеспечению равенства $y(t) = g(t)$. Большинство САР решают эту задачу, используя принцип регулирования по отклонению. Функциональная схема такой САР показана на рис. 1.1. Суть принципа регулирования по отклонению заключается в следующем. Регулируемая величина $y(t)$ измеряется с помощью датчика D и поступает на элемент сравнения ($\mathcal{E}\mathcal{C}$). На этот же элемент срав-

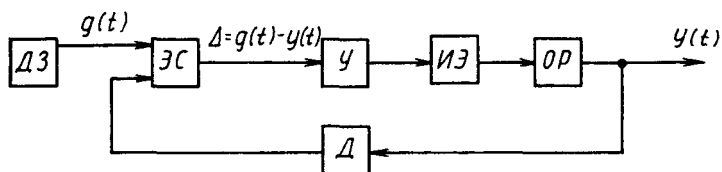


Рис. 1.1. Функциональная схема системы автоматического регулирования

нения от датчика задания (*ДЗ*) поступает задающее воздействие $g(t)$. В ЭС величины $g(t)$ и $y(t)$ сравниваются, т. е. из $g(t)$ вычитается $y(t)$. На выходе ЭС формируется сигнал, равный отклонению регулируемой величины от заданной, т. е. ошибка $\Delta = g(t) - y(t)$. Этот сигнал поступает на усилитель (*У*) и затем подается на исполнительный элемент (*ИЭ*), который и оказывает регулирующее воздействие на объект регулирования (*ОР*). Это воздействие будет изменяться до тех пор, пока регулируемая величина $y(t)$ не станет равна заданной $g(t)$. На объект регулирования постоянно влияют различные возмущающие воздействия: нагрузка объекта, внешние факторы и др. Эти возмущающие воздействия стремятся изменить величину $y(t)$. Но САР постоянно определяет отклонение $y(t)$ от $g(t)$ и формирует управляющий сигнал, стремящийся свести это отклонение к нулю. По своему назначению элементы, входящие в состав систем автоматики, разделяются на *чувствительные, усилительные и исполнительные*.

Датчики являются чувствительными элементами. Они измеряют регулируемую величину объекта регулирования и вырабатывают на выходе сигнал, пропорциональный этой величине. Входной величиной датчика может быть любая физическая величина: механическое перемещение, температура, давление, расход, влажность, усилие и др. Датчики могут использоваться и для формирования задающего воздействия. Входной сигнал в этом случае может поступать от какого-либо штурвала, с перфорированной или магнитной ленты, от управляющей вычислительной машины. Сравнение регулируемой величины и задающей величины осуществляется в элементе сравнения, в качестве которого используется измерительная схема, формирующая сигнал ошибки (отклонения). Полученный сигнал ошибки обычно недостаточен по мощности для создания регулирующего воздействия, поэтому его необходимо усилить. Для этого служат усилительные элементы. Исполнительные элементы воздействуют на объект регулирования в направлении восстановления требуемого значения регулируемой величины. Обычно такое воздействие заключается в перемещении какого-либо регулирующего органа — заслонки, клапана и т. п.

Системы автоматики могут быть построены с использованием сигналов различной физической природы: электрических, механических, пневматических, гидравлических. Наибольшее распространение получил электрический сигнал: его удобно передавать на расстояние, обрабатывать и запоминать, преобразовывать в другие виды сигналов. Поэтому электрические элементы автоматики получили самое широкое распространение.

Одним из основных и важнейших видов электрических элементов являются электромеханические и магнитные элементы, использующие электрические и магнитные явления. Подавляющее большинство различных неэлектрических величин может быть преобразовано в электрический сигнал с помощью электромеханических и магнитных датчиков. Усиление электрических сигналов может быть обеспечено с помощью магнитных или релейных усилителей, построенных на электромагнитных реле. Наряду с магнитными большое распространение получили полупроводниковые усилители, являющиеся более перспективными. В процессе усиления порой возникает задача преобразования электрического сигнала. Для этой цели служат магнитные модуляторы и электронные схемы.

В качестве исполнительных элементов наибольшее распространение получили электромагниты и электродвигатели. Последние изучаются в курсе «Электрические машины».

Для различных переключений в системах автоматики широко применяют коммутационные электромеханические элементы и электронные коммутаторы.

§ 1.2. Физические основы работы электромеханических и магнитных элементов

Работа электромеханических и магнитных элементов, измерительных схем, применяемых в автоматике, основана на электрических и магнитных явлениях. Все эти элементы включаются в электрическую цепь, поэтому для описания их работы прежде всего используются закон Ома и законы Кирхгофа.

Закон Ома. Ток в проводнике I равен отношению напряжения U на участке проводника к электрическому сопротивлению R этого участка:

$$I = U/R.$$

Первый закон Кирхгофа. В узле электрической цепи алгебраическая сумма токов равна нулю:

$$\sum I = 0.$$

Второй закон Кирхгофа. В контуре электрической цепи алгебраическая сумма электродвижущих сил E равна алгебраической сумме падений напряжения на сопротивлениях, входящих в этот контур:

$$\sum E = \sum IR.$$

Элементы и измерительные схемы в автоматике могут быть использованы в цепях постоянного и переменного тока. Законы Ома и Кирхгофа справедливы для электрических цепей переменного тока. Однако при этом используется символический метод с записью величин, входящих в уравнения, в комплексной форме. Полное сопротивление участка цепи в комплексной форме

$$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C),$$

где R — активное сопротивление; X_L — индуктивное сопротивление; X_C — емкостное сопротивление.

Индуктивное сопротивление пропорционально индуктивности L и частоте переменного тока f : $X_L = 2\pi fL$. Емкостное сопротивление обратно пропорционально емкости C и частоте переменного тока f : $X_C = 1/(2\pi fC)$.

Многие элементы автоматики основаны на изменении активного, индуктивного или емкостного сопротивлений. Так, для автоматического измерения температуры используется эффект увеличения активного сопротивления металлического проводника с ростом температуры и уменьшения активного сопротивления полупроводниковых материалов. В индуктивных датчиках, магнитных усилителях и некоторых других элементах используется зависимость индуктивности от насыщения магнитопровода или от взаимного перемещения элементов магнитопровода, в емкостных датчиках — зависимость емкости конденсатора от расстояния между его пластинами или площади пластин.

В ряде элементов автоматики используются электромеханические явления, связанные с взаимными преобразованиями электрической и механической энергии. В основе этих явлений лежат следующие физические законы.

Закон электромагнитной индукции. В замкнутом контуре при изменении сцепленного с ним магнитного потока Φ индуцируется ЭДС e , равная скорости изменения потокосцепления, взятой с обратным знаком:

$$e = -d\Phi/dt.$$

Для катушки с числом витков ω ЭДС e будет в ω раз больше.

Закон Ампера. На проводник длиной l с током I , помещенный в магнитное поле с индукцией B , действует электромагнитная сила $F = BIl$. Если прямолинейный проводник образует с направлением магнитного поля угол α , то в эту формулу вводится множитель $\sin \alpha$.

При перемещении такого проводника длиной l со скоростью v в поле с индукцией B значение ЭДС может быть определено на основании закона электромагнитной индукции: $E = Blv$. Если проводник движется под углом α к направлению магнитного поля, то в формулу вводится множитель $\sin \alpha$: $E = Blv \sin \alpha$.

Магнитная индукция B создается под действием напряженности магнитного поля H . Эти величины связаны между собой зависимостью $B/H = \mu_a$, где μ_a — абсолютная магнитная проницаемость, характеризующая магнитные свойства среды. Для магнитных материалов величина μ_a очень велика, что позволяет получить большие значения индукции B при сравнительно малых напряженностях H .

В свою очередь, величина H определяется током, возбуждающим магнитное поле. Свойство тока возбуждать магнитное поле именуется магнитодвижущей силой (МДС). Зависимость напряженности H от тока I определяется законом полного тока.

Применительно к сердечнику из ферромагнитного материала с катушкой закон полного тока может быть записан в таком виде: $H = I\omega/l$, где ω — число витков катушки; l — длина сердечника. Произведение $I\omega$ называют магнитодвижущей или намагничивающей силой, а иногда числом ампер-витков.

При расчетах магнитных цепей используется аналогия между записью уравнений для тока в электрической цепи и для магнитного потока в магнитной цепи. Ток в электрической цепи можно определить как отношение ЭДС к электрическому сопротивлению, магнитный поток Φ в магнитной цепи — как отношение МДС к магнитному сопротивлению, называемое законом Ома для магнитной цепи. Соответственно можно говорить и о законах Кирхгофа для магнитных цепей. При этом вместо тока I подставляют магнитный поток Φ , вместо ЭДС E — МДС $I\omega$, вместо электрического сопротивления R — магнитное сопротивление, пропорциональное длине сердечника l и обратно пропорциональное абсолютной магнитной проницаемости μ_a и сечению сердечника s . Связь между магнитным потоком Φ и магнитной индукцией B определяется соотношением $\Phi = Bs$.

Приведенные физические законы являются основными. Наряду с ними в отдельных элементах автоматики используются и другие физические закономерности и явления. В магнитных усилителях это явление одновременного намагничивания сердечника постоянным и переменным магнитными полями. В термоэлектрических датчиках — эффект образования термоЭДС в цепи, состоящей из разных металлов (или полупроводников), при разной температуре мест соединения. В фотоэлектрических датчиках — эффект зависи-

мости фотоЭДС между двумя контактирующими полупроводниками от интенсивности освещения, а также вылет электронов из освещенных тел, называемый внешним фотоэффектом. В магнитоупругих датчиках используется зависимость магнитных свойств ферромагнетиков от механических напряжений, а в пьезоэлектрических датчиках — эффект появления ЭДС на гранях некоторых кристаллов при их сжатии.

§ 1.3. Статические характеристики

Наибольший интерес представляет зависимость выходной величины элемента автоматики от его входной величины. При соединении элементов в систему автоматики выходная величина одного элемента подается на вход последующего элемента. Поэтому можно говорить о передаче сигнала в системе. Входную величину обычно называют *входным сигналом* (будем обозначать его через x), а выходную величину — *выходным сигналом* (будем обозначать его через y). Режим работы, при котором входной и выходной сигналы постоянны ($x = x_{уст}$; $y = y_{уст}$), называют статическим или установившимся режимом. Характеристики, определяемые в этом режиме, называются *статическими*.

Следует отметить, что для многих электромеханических и магнитных устройств автоматики сигналом является напряжение или сила переменного тока. В статическом режиме постоянным является действующее значение напряжения или тока, хотя мгновенное значение при этом, естественно, изменяется по синусоидальному закону.

Основной характеристикой всех элементов автоматики является *статический коэффициент преобразования* $K = y_{уст}/x_{уст}$. Коэффициент преобразования может быть определен экспериментально. Для этого устанавливают определенное значение входного сигнала $x_{уст}$ и измеряют соответствующий ему выходной сигнал $y_{уст}$. Таких опытов можно провести несколько (для различных значений $x_{уст}$). По результатам нескольких опытов может быть построена статическая характеристика $y = f(x)$, представляющая функциональную зависимость выходной величины от входной в статическом режиме. Статические характеристики бывают линейными и нелинейными (рис. 1.2). Если коэффициент преобразования не зависит от входного сигнала, то статическая характеристика имеет вид прямой линии (рис. 1.2, а), а элемент, имеющий такую характеристику, называют линейным. Коэффициент преобразования нелинейных элементов

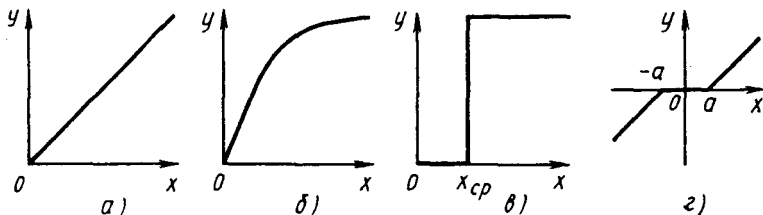


Рис. 1.2. Статические характеристики элементов автоматики

не постоянен, а статическая характеристика может иметь вид, показанный на рис. 1.2, б. Такая характеристика чаще всего бывает у усилительных элементов. Сначала при увеличении входного сигнала пропорционально ему растет выходной сигнал, а затем рост его прекращается. В магнитных усилителях это связано, например, с явлением насыщения магнитной цепи. Поэтому про характеристику типа (рис. 1.2, б) говорят, что она имеет зону насыщения. Особенно явно нелинейность выражена для элементов типа реле. При увеличении входного сигнала реле от нуля до некоторого значения, называемого сигналом срабатывания $x_{ср}$, выходной сигнал равен нулю. При $x = x_{ср}$ выходной сигнал изменяется скачком и при дальнейшем увеличении входного сигнала остается постоянным (рис. 1.2, в).

Для датчиков чаще всего необходима линейная статическая характеристика, это требуется для точной работы системы.

Коэффициент преобразования имеет размерность, определяемую отношением размерностей выходной величины к входной. Например, датчик, преобразующий перемещение (измеряемое в метрах) в напряжение (измеряемое в вольтах), имеет размерность коэффициента преобразования В/м. Если размерности выходного и входного сигнала одинаковы (например, у усилителей), то коэффициент преобразования будет безразмерной величиной. В этом случае его часто называют коэффициентом усиления.

Выходной сигнал некоторых элементов равен нулю при малых значениях входного сигнала, т. е. эти элементы нечувствительны к слабым сигналам. Статическая характеристика элементов показана на рис. 1.2, г. Только при $x \geq |a|$ начинается изменение выходного сигнала y . В этом случае значение $x = a$ называют порогом чувствительности. Диапазон изменения входного сигнала, при котором выходной сигнал равен нулю, называется зоной нечувствительности. Для элемента, характеристика которого показана на рис. 1.2, г, зона нечувствительности равна $2a$.

Точность работы датчика характеризуется погрешностью. Различают *абсолютную, относительную и приведенную погрешности*. При определении погрешности сравнивают реальную статическую характеристику датчика с идеальной линейной статической характеристикой. Реальная статическая характеристика отличается от идеальной, поскольку выходной сигнал может изменяться за счет внутренних свойств элемента (износ, старение и т. д.) или за счет изменения внешних факторов (напряжение питания, температура и т. д.). Абсолютная погрешность представляет собой разность между реальным y_p и расчетным (идеальным) y_n выходными сигналами при одном и том же значении входного сигнала x . Абсолютная погрешность имеет размерность выходной величины, ее называют еще ошибкой: $\Delta = y_p - y_n$.

Относительная погрешность представляет собой отношение абсолютной погрешности к расчетному значению выходной величины и определяется в относительных единицах ($\delta_{от} = \Delta/y_n$) или в процентах ($\delta_{от} = (\Delta/y_n) \cdot 100$).

Приведенную погрешность определяют как отношение абсолютной погрешности к диапазону возможных значений выходного сигнала. Приведенную погрешность вычисляют в относительных единицах или в процентах. О точности датчика судят обычно по максимальной приведенной погрешности.

§ 1.4. Динамические характеристики

Переход системы из одного установившегося режима в другой с иными значениями входного и выходного сигналов называют *динамическим режимом* или *переходным процессом*. В динамическом режиме отношение выходного сигнала к входному может быть не равно коэффициенту преобразования. Поведение элемента или системы автоматики в переходном процессе может быть описано с помощью переходных характеристик. Переходной характеристикой называют зависимость выходного сигнала от времени $y(t)$ при скачкообразном изменении входного сигнала. На рис. 1.3 показаны график изменения входного сигнала (*а*) и соответствующие ему графики (*б, в, г*) переходных характеристик наиболее распространенных элементов автоматики.

В момент времени t_0 входной сигнал скачком изменяется от нуля до x_0 (рис. 1.3, *а*). Если элемент автоматики является безынерционным, то в тот же момент времени t_0 выходной сигнал скачком изменяется от нуля до $y_0 = Kx_0$ (рис. 1.3, *б*). Как правило, электроме-

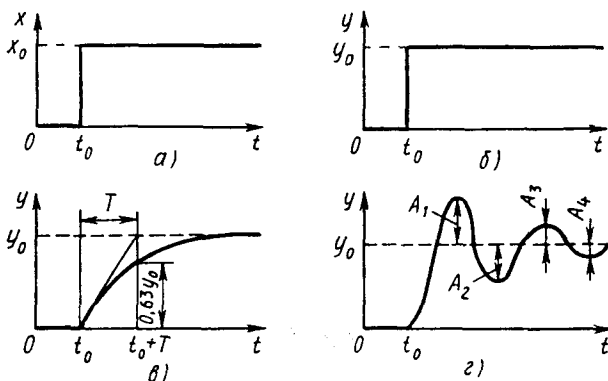


Рис. 1.3. Переходные характеристики элементов автоматики

ханические элементы обладают инерционностью, которая тем больше, чем больше масса подвижных частей или индуктивность обмотки. В этом случае изменение выходного сигнала запаздывает по сравнению с изменением входного (рис. 1.3, в). Переходная характеристика имеет вид экспоненты, т. е. кривой, стремящейся от нуля к значению $y_0 = Kx_0$ со скоростью, пропорциональной в каждый момент времени разности между y_0 и текущим значением выходного сигнала. Инерционность переходного процесса характеризуется значением постоянной времени T , выражаемой в секундах. На графике величину T можно определить, проведя касательную к кривой $y(t)$ при $t = t_0$ и продолжив ее до пересечения с горизонтальной линией $y_0 = Kx_0$. За время, равное T , выходной сигнал достигает 63 % своего нового установившегося значения.

Уравнение переходной характеристики имеет следующий вид:

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

где $e = 2,718$ — основание натурального логарифма.

Обычно на практике считают, что за время $t = (3 \div 5)T$ выходной сигнал достигает нового установившегося значения y_0 . На самом деле за это время выходной сигнал достигает значений соответственно 95—99 % y_0 . Разницу между значениями выходного сигнала в динамическом и установившемся режимах называют динамической погрешностью. Для ее уменьшения стремятся снизить постоянную времени, например делая более легкими подвижные части элементов автоматики.

Во время переходного процесса могут возникнуть и колебания выходного сигнала. В электрических цепях это обычно связано с

процессом обмена энергией между элементами колебательного контура: индуктивностью и емкостью. В механических узлах элементов автоматики колебания возникают обычно в тех случаях, когда одновременно действуют и силы инерции, и силы упругости (например, в пружинах). График колебательного затухающего переходного процесса показан на рис. 1.3, г. Как видно из этого графика, изменение выходного сигнала происходит относительно значения y_0 . Амплитуда этих колебаний постепенно уменьшается, затухает. Для количественной оценки этого процесса вводят понятие коэффициента затухания ψ , который определяют по формуле $\psi = 1 - A_3/A_1$, где A_1 и A_3 – соседние амплитуды колебаний выходного сигнала в одну сторону (т. е. одного знака).

При незатухающем колебательном процессе $A_3 = A_1$ и коэффициент затухания $\psi = 0$. Система автоматики является при этом неустойчивой. Если же коэффициент затухания стремится к единице, то переходный процесс будет аperiodическим (рис. 1.3, в).

§ 1.5. Обратная связь в системах автоматики

В системах автоматики различают *последовательное* и *параллельное* соединения элементов, а также *соединение с обратной связью*. При последовательном соединении выходной сигнал одного элемента является входным сигналом для последующего элемента. При параллельном соединении один и тот же сигнал является входным для двух элементов, а их выходные сигналы суммируются.

Общий коэффициент преобразования двух последовательно соединенных элементов цепи равен произведению коэффициентов преобразования этих элементов: $K_{об} = K_1 K_2$. Общий коэффициент преобразования двух параллельно соединенных элементов равен сумме коэффициентов преобразования каждого из этих элементов: $K_{об} = K_1 + K_2$.

При соединении с обратной связью выходной сигнал одного элемента подается на его вход через элемент обратной связи. На рис. 1.4 показано соединение с обратной связью. Кругом, разделенным на четыре сектора, показано устройство, в котором происходит суммирование сигналов. Если сектор зачернен, то поступающий сигнал берется со знаком минус. В зависимости от знака сигнала обратной связи различают *положительную* и *отрицательную* обратную связь. На рис. 1.4, а показано соединение с положительной обратной связью, на рис. 1.4, б — с отрицательной обратной

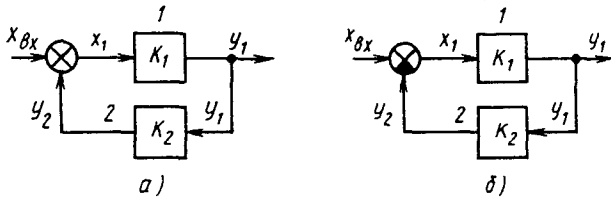


Рис. 1.4. Соединение элементов с обратной связью

связью. Элемент 1 включен в прямую цепь, элемент 2 — в обратную. Можно сказать, что элемент 1 охвачен обратной связью.

Коэффициент преобразования при соединении с обратной связью.

На вход элемента 1 поступает входной сигнал $x_1 = x_{\text{вх}} \pm y_2$, где знак плюс соответствует положительной обратной связи, знак минус — отрицательной. Выходной сигнал элемента 1 равен произведению его входного сигнала на коэффициент преобразования:

$$y_1 = K_1 x_1 = K_1 x_{\text{вх}} \pm K_1 y_2.$$

Этот сигнал поступает на вход элемента 2, включенного в цепь обратной связи. Следовательно, выходной сигнал элемента 2 можно получить умножив сигнал y_1 на коэффициент преобразования элемента 2: $y_2 = K_2 y_1$. Подставив значение y_2 в выражение для y_1 , т. е. $y_1 = K_1 x_{\text{вх}} \pm K_1 K_2 y_1$, и преобразовав его, получим

$$y_1 \pm K_1 K_2 y_1 = K_1 x_{\text{вх}}, \text{ или } y_1 (1 \pm K_1 K_2) = K_1 x_{\text{вх}}.$$

Общий коэффициент преобразования по определению равен отношению выходного сигнала ко входному. В данном случае выходным является сигнал y_1 , а входным — $x_{\text{вх}}$. Их отношение $y_1/x_{\text{вх}} = K_1/(1 \mp K_1 K_2)$. Теперь в этом выражении знак минус соответствует положительной обратной связи, а знак плюс — отрицательной.

Проанализируем выражение для коэффициента преобразования при положительной обратной связи

$$K_{\text{пос}} = \frac{K_1}{1 - K_1 K_2}.$$

Пусть в цепь включен усилитель с коэффициентом усиления 10, т. е. $K_1 = 10$. Малую часть его выходного сигнала (например, 5 %) снова подадим на вход, подключив для этого в цепь обратной связи элемент с коэффициентом преобразования $K_2 = 0,05$:

$$K_{\text{пос}} = \frac{10}{1 - 10 \cdot 0,05} = \frac{10}{0,5} = 20.$$

Таким образом, благодаря положительной обратной связи получен более высокий коэффициент усиления. Положительная обратная связь чаще всего используется в усилительных элементах автоматики.

С помощью положительной обратной связи может быть получена и релейная характеристика. Использование положительной обратной связи в магнитных усилителях и бесконтактных магнитных реле рассмотрено в гл. 23 и 26.

На принципе отрицательной обратной связи основана работа систем автоматического регулирования (САР). Покажем это на примере элемента сравнения ЭС, в котором происходит вычитание выходного сигнала $y(t)$ из входного сигнала $g(t)$ (см. рис. 1.1, в). Именно благодаря отрицательной обратной связи и обеспечивается автоматическое поддержание регулируемой величины на заданном уровне. Ведь благодаря отрицательной обратной связи постоянно определяется отклонение $y(t)$ от $g(t)$ и вырабатывается соответствующее этому отклонению регулирующее воздействие. В САР в цепь обратной связи включен датчик. Усилительные и исполнительные элементы автоматики включены в прямую цепь. Пусть коэффициенты преобразования всех элементов, включенных в прямую цепь, можно учесть, введя общий коэффициент преобразования $K_{пр}$, а датчик имеет коэффициент преобразования K_d . Тогда в установившемся режиме общий коэффициент преобразования САР

$$K_{САР} = K_{пр} / (1 + K_{пр}K_d).$$

При достаточно большом усилении можно принять $K_{пр}K_d \gg 1$ и

$$K_{САР} \approx K_{пр} / (K_{пр}K_d) = 1 / K_d.$$

Как видим, коэффициент преобразования САР полностью определяется коэффициентом преобразования датчика. Следовательно, именно от точности датчика зависит точность всей работы САР. Поэтому датчикам в системах автоматики, а также их метрологическим характеристикам, надежности придается особое значение. Наличие же обратной связи имеет важнейшее значение не только в автоматике, но и в биологических, экономических и социальных системах.

§ 1.6. Надежность элементов систем автоматики

Надежность систем автоматики — это способность сохранять наиболее существенные свойства на заданном уровне в процессе эксплуатации. Для надежной работы системы необходимо использовать

элементы, обладающие хорошими показателями надежности. Это особенно важно в связи с возрастающим многообразием систем автоматики, применением их для выполнения очень ответственных задач. Но чем сложнее эти системы, чем большее число элементов они содержат, тем больше появляется причин для снижения надежности. Возникает противоречие: чем ответственнее и сложнее задача, выполняемая системой автоматики, тем меньше может оказаться надежность этой системы. Основными путями преодоления этого противоречия являются следующие. Прежде всего это повышение надежности элементов автоматики, кроме того, разработка методов создания надежных систем, состоящих из ненадежных элементов; разработка систем контроля, предупреждающих и обнаруживающих отказы; разработка методов обслуживания сложных систем.

Рассмотрим основные показатели надежности, по которым оцениваются элементы автоматики. При оценке надежности используется термин «отказ». Отказами в работе элемента называют как выход из строя, так и изменение его параметров, приводящее к неудовлетворительному выполнению элементов его функций. Отказы, как правило, появляются внезапно, случайно, т. е. подчиняются законам, свойственным случайным величинам. Их изучают с помощью математической статистики. Для количественной оценки надежности элементов автоматики обычно используют следующие показатели: $P(t)$ — вероятность безотказной работы в течение заданного отрезка времени; $\lambda(t)$ — интенсивность отказов; $T_{\text{ср}}$ — среднее время безотказной работы.

Основной количественной характеристикой надежности является вероятность безотказной работы $P(t)$ — вероятность того, что за время t не произойдет отказа в работе. Эта величина может находиться в пределах от 0 до 1.

$$P(0) = 1; P(\infty) = 0; 0 \leq P(t) \leq 1.$$

На рис. 1.5 показан график функции $P(t)$. Вероятность безотказной работы элемента автоматики можно определить по результатам испытаний большого количества одинаковых элементов в течение заданного промежутка времени t :

$$P(t) = (N - n)/N,$$

где N — общее число испытанных элементов, n — число элементов, вышедших из строя за время испытаний.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$, или λ -характеристика, очень часто используется для количественной оценки надежности элементов и при расчете надежности системы автоматики, состоящей из нес-

кольных элементов. Величину λ можно оценить как отношение числа отказавших элементов к числу оставшихся к данному моменту времени работоспособными элементами, взятое за единицу времени. Обычно единицей измерения интенсивности отказов является *число отказов в час*. Типичная кривая интенсивности отказов в зависимости от времени эксплуатации для большого числа однотипных элементов, изготовленных на одном и том же заводе по одинаковой технологии, приведена на рис. 1.6. На этой кривой можно выделить три характерных участка. Первый участок от 0 до t_1 — называют периодом приработки и тренировки. В этот период выходят из строя некачественно изготовленные элементы. Обычно этот период проходит на заводе-изготовителе, дорожащем своей репутацией. Дефектные элементы заранее, как говорится, «выжигают», а не пускают в продажу.

Второй участок (от t_1 до t_2) — это период нормальной эксплуатации элемента, в течение которого интенсивность отказов низкая и примерно постоянная. На этом участке вероятность безотказной работы определяется по формуле $P(t) = \exp(-\lambda t)$.

Третий участок начинается с момента t_2 и характеризуется нарастанием интенсивности отказов, что объясняется старением и износом элементов. Обычно рекомендуется произвести замену элементов до наступления момента времени t_2 .

Среднее время безотказной работы при постоянной интенсивности отказов определяется очень просто: $T_{cp} = 1/\lambda$.

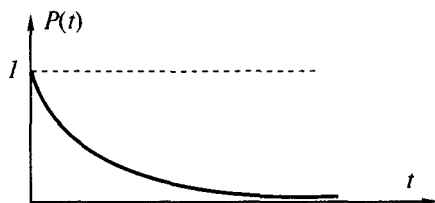


Рис. 1.5. Зависимость безотказной работы элемента от времени работы

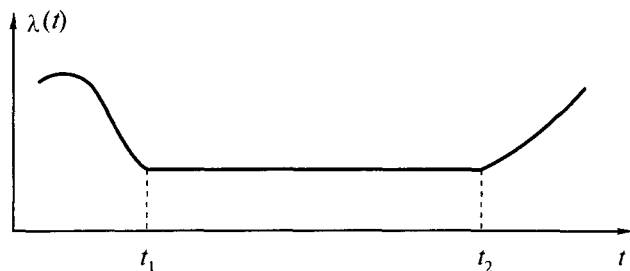


Рис. 1.6. Типичная зависимость интенсивности отказов от времени

Следует отметить, что на величину интенсивности отказов и соответственно на среднее время безотказной работы очень сильно влияют условия эксплуатации.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается автоматизация от механизации?
2. Что такое управление?
3. Нарисуйте функциональную схему системы автоматического регулирования и расскажите ее принцип действия.
4. Что такое статический коэффициент преобразования, как он определяется?
5. Что такое переходная характеристика?
6. Как осуществляется отрицательная обратная связь в системах автоматического регулирования?

Глава 2

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ

§ 2.1. Электрические измерения неэлектрических величин

В системах автоматики сигналы управления зависят от различных неэлектрических и электрических величин, характеризующих данный производственный процесс. Информация об этих величинах должна быть получена от датчика и сформирована в виде некоторого сигнала. Наиболее удобно использовать электрический сигнал. По сравнению с другими сигналами (например, механическими, пневматическими, световыми, звуковыми) электрический сигнал обладает целым комплексом преимуществ: возможностью передачи на большие расстояния, простотой преобразования и усиления, возможностью ввода в ЭВМ. Поэтому электрические методы измерения неэлектрических величин получили широкое распространение. Они должны обеспечивать высокую точность преобразования неэлектрической величины в электрический сигнал и быстро реагировать на ее изменение.

Информация о контролируемой неэлектрической величине получается с помощью датчика. Следует отметить, что многие неэлект-

рические величины удобно предварительно преобразовывать в механическое перемещение, а затем уже с помощью датчика перемещения получить электрический сигнал. Например, в перемещение преобразуются такие неэлектрические величины, как давление (с помощью упругой мембраны), температура (с помощью биметаллической пластины), уровень жидкости (с помощью поплавка), усилие (с помощью пружины). Практически большинство неэлектрических величин сравнительно несложно преобразовать в перемещение. Поэтому в автоматике широкое распространение получили датчики перемещения. Если можно сразу превратить неэлектрическую величину в электрический сигнал, то используются датчики непосредственного преобразования (например, термосопротивления и термопары).

Итак, от датчика получен электрический сигнал, несущий информацию о неэлектрической величине. Этот сигнал представляет собой изменение активного сопротивления, или индуктивности, или напряжения, или тока, или какого-либо другого электрического параметра. Чтобы измерить этот параметр, нужен соответствующий электроизмерительный прибор. А для согласования сигнала датчика с электроизмерительным прибором необходима измерительная схема. Таким образом, схема электрического измерения неэлектрической величины может быть представлена на рис. 2.1. Каждый элемент схемы обладает чувствительностью S и сопротивлением Z . Все они могут питаться от источника электроэнергии (на рис. 2.1 источник питания не показан). Датчик преобразует входную неэлектрическую величину x в электрический параметр y (сопротивление, напряжение или др.). Чувствительность датчика $S_d = \Delta y / \Delta x$. Измерительная схема преобразует изменение одного электрического параметра y в другой электрический параметр z . Чувствительность измерительной схемы $S_{cx} = \Delta z / \Delta y$. Электроизмерительный прибор дает показания α (например, в виде отклонения стрелки на шкале), пропорциональные параметру z . Чувствительность прибора $S_{np} = \Delta \alpha / \Delta z$. Чувствительность, обеспечиваемая при электрическом методе измерения неэлектрической величины x ,

$$S = \Delta \alpha / \Delta x = S_d S_{cx} S_{np}.$$

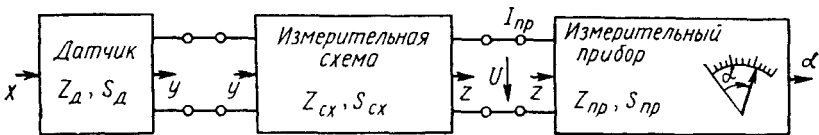


Рис. 2.1. Структурная схема электрического измерения неэлектрической величины

Чувствительность прибора будем полагать величиной заданной и неизменной. А вот чувствительность измерительной схемы можно существенно изменять выбором как самой схемы, так и ее элементов. Различают два режима работы измерительной схемы.

1. Внутреннее сопротивление прибора $Z_{пр}$ значительно больше выходного сопротивления измерительной схемы $Z_{сх}$: $Z_{пр} \gg Z_{сх}$. В этом случае показания прибора зависят от напряжения на выходе схемы и поэтому для такого режима определяют чувствительность по напряжению (полагая $\Delta z = \Delta U$):

$$S_{схU} = \Delta U / \Delta y. \quad (2.1)$$

2. Внутреннее сопротивление прибора соизмеримо с выходным сопротивлением измерительной схемы. Прибор реагирует на изменение силы тока $I_{пр}$. Для такого режима определяют чувствительность по току:

$$S_{схI} = \Delta I_{пр} / \Delta y. \quad (2.2)$$

Очень часто в качестве измерительного прибора используется миллиамперметр. В дальнейшем будем рассматривать именно чувствительность по току.

Существующие методы электрических измерений можно в основном разделить на два класса: непосредственной оценки и сравнения. При непосредственной оценке измерительная схема выполняет лишь функции преобразования выходного сигнала датчика, например усиливает его или согласует выходное сопротивление датчика с входным сопротивлением прибора. Этот метод прост, но применяется сравнительно редко, так как ему свойственны значительные погрешности (особенно при изменении напряжения питания датчика). Метод сравнения обеспечивает более высокую точность и чувствительность. При этом используются мостовые, дифференциальные и компенсационные схемы измерения.

§ 2.2. Мостовая измерительная схема постоянного тока

Принципиальная схема одинарного моста постоянного тока (рис. 2.2) состоит из четырех резисторов с активными сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 и R_4 , которые соединены в замкнутый четырехугольник $АВВГ$. Входящие в схему резисторы $R_1—R_4$ называют плечами или ветвями моста. Плечи можно обозначать и буквами, например плечо $АВ$. В четырехугольнике $АВВГ$ можно выделить две диагонали: $АВ$ и $ВГ$. В диагональ $ВГ$ моста включен измерительный

прибор, имеющий активное сопротивление R_{np} . В диагональ AB включен источник питания с ЭДС E и внутренним сопротивлением R_E .

Можно подобрать сопротивления плеч моста так, чтобы потенциалы точек B и Γ , между которыми включен измерительный прибор, были одинаковы. В этом случае ток в цепи прибора I_{np} отсутствует ($I_{np} = 0$). Процесс подбора таких сопротивлений, обеспечивающих $I_{np} = 0$, называется уравновешиванием или балансировкой моста. Условие равновесия моста может быть получено на основании законов Кирхгофа, записанных для токов в плечах моста с учетом принятых на рис. 2.2 направлений токов:

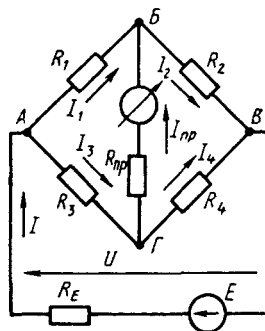


Рис. 2.2. Мостовая измерительная схема

$$I_1 R_1 - I_3 R_3 = 0, \quad I_2 R_2 - I_4 R_4 = 0,$$

откуда

$$I_1 R_1 = I_3 R_3, \quad (2.3)$$

$$I_2 R_2 = I_4 R_4. \quad (2.4)$$

Разделив (2.3) на (2.4), получим

$$I_1 R_1 / (I_2 R_2) = I_3 R_3 / (I_4 R_4). \quad (2.5)$$

Так как в уравновешенном мосте ток в цепи прибора $I_{np} = 0$, то $I_1 = I_2$, $I_3 = I_4$ и равенство (2.5) имеет вид

$$R_1 / R_2 = R_3 / R_4$$

или

$$R_1 R_4 = R_2 R_3, \quad (2.6)$$

т. е. условие равновесия моста можно сформулировать так: произведение сопротивлений противоположащих плеч должны быть равны.

С помощью мостовой схемы можно измерить неизвестное сопротивление R_x , включив его в одно из плеч моста, например в плечо $B\Gamma$ вместо резистора R_4 . При трех известных сопротивлениях R_1 , R_2 , R_3 неизвестное сопротивление $R_x = R_2 R_3 / R_1$. Уравновешивание моста может быть достигнуто изменением либо одного сопротивления (R_2), либо отношения двух сопротивлений (R_3 / R_1). В уравновешенных мостах измерительный прибор должен быть очень чувствительным, он должен реагировать на малые токи. Именно по показа-

ниям этого прибора и фиксируется равновесие моста. Поэтому в уравновешенных мостах в качестве измерительного прибора используется обычно гальванометр.

Кроме уравновешенных существуют так называемые неуравновешенные (или небалансные) мосты, в которых $I_{np} \neq 0$ и измеряемое сопротивление R_x определяется именно по отклонению стрелки прибора, т. е. по величине I_{np} , поскольку $I_{np} = f(R_x)$.

В качестве измерительного прибора в неуравновешенных мостах используются амперметры (так как токи невелики, то обычно милли- или микроамперметры). Уравновешенные мосты требуют ручной или автоматической балансировки, в то время как неуравновешенные мосты не требуют регулировки при каждом измерении. Поэтому неуравновешенные мосты проще, их чаще используют для электрических измерений неэлектрических величин.

На основании законов Кирхгофа могут быть получены выражения для тока в диагонали моста, содержащей измерительный прибор, через напряжение питания U :

$$I_{np} = U (R_1 R_4 - R_2 R_3) / M, \quad (2.7)$$

через ток питания I :

$$I_{np} = I (R_1 R_4 - R_2 R_3) / N, \quad (2.8)$$

где

$$M = (R_1 + R_2)(R_3 + R_4)R_{np} + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2), \quad (2.9)$$

$$N = (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)R_{np} + (R_1 + R_3)(R_2 + R_4). \quad (2.10)$$

Кстати, из (2.7) или (2.8), приравнявая I_{np} нулю, можно вывести уже полученное нами условие равновесия моста (2.6).

Сложное соединение сопротивлений $R_1 \neq R_4$, R_{np} в мостовой схеме можно преобразовать в эквивалентное сопротивление R_M — входное сопротивление моста по диагонали питания AB . Эквивалентная схема моста показана на рис. 2.3. В зависимости от соотношения R_M и R_E различают низкоомные и высокоомные мостовые измерительные схемы.

Если $R_M \ll R_E$, то мост называется низкоомным. В таких мостах изменение сопротивления плеч почти не влияет на ток питания I , т. е. можно считать, что $I \approx \text{const}$. При расчете низкоомных мостов обычно используют уравнение (2.8).

Если $R_M \gg R_E$, то мост называется высокоомным. В этом случае постоянной вели-

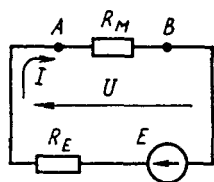


Рис. 2.3. Эквивалентная схема моста

чиной можно считать напряжение на зажимах моста $U = E - IR_E \approx \text{const}$. При расчете высокоомных мостов обычно используют уравнение (2.7).

Разделив (2.7) на (2.8), получим выражение для входного сопротивления моста

$$R_M = U/I = M/N. \quad (2.11)$$

§ 2.3. Чувствительность мостовой схемы

Чувствительность уравновешенного моста определяется как отношение приращения тока в измерительной диагонали $\Delta I_{\text{пр}}$ к вызвавшему его изменению сопротивления одного из плеч моста (например, R_1 на рис. 2.2): $S_{\text{сх}} = \Delta I_{\text{пр}}/\Delta R_1$. В уравновешенном мосте $I_{\text{пр}} = 0$. После изменения R_1 на ΔR_1 ток прибора $I_{\text{пр}} = \Delta I_{\text{пр}}$ определяется по (2.7) или (2.8):

$$\Delta I_{\text{пр}} = U \frac{(R_1 + \Delta R_1)R_4 - R_2R_3}{M} = U \frac{(R_1 + \Delta R_1)R_4 - R_2R_3}{N}.$$

Преобразуем числитель этого выражения, учитывая условие равновесия $R_1R_4 = R_2R_3$:

$$(R_1 + \Delta R_1)R_4 - R_2R_3 = R_1R_4 + \Delta R_1R_4 - R_2R_3 = \Delta R_1R_4.$$

Следовательно, $\Delta I_{\text{пр}} = U\Delta R_1R_4/M = I\Delta R_1R_4/N$ и чувствительность уравновешенного моста по току

$$S_{\text{сх}} = UR_4/M = IR_4/N. \quad (2.12)$$

В некоторых случаях (например, в мостах с автоматическим уравновешиванием) входным сигналом мостовой схемы служит напряжение в измерительной диагонали *БГ*. Тогда следует определять чувствительность по напряжению:

$$S_{\text{сх}U} = \frac{\Delta U_{\text{пр}}}{\Delta R_1} = \frac{\Delta U_{\text{пр}}R_{\text{пр}}}{\Delta R_1} = U \frac{R_4R_{\text{пр}}}{M} = I \frac{R_4R_{\text{пр}}}{N}. \quad (2.13)$$

Оценим влияние сопротивлений плеч моста на чувствительность мостовой уравновешенной схемы. Для этого удобно выразить сопротивления всех плеч моста относительно измеряемого сопротивления R_1 .

Положим $R_2 = mR_1$; $R_3 = nR_1$; $R_{\text{пр}} = qR_1$. Так как в уравновешенном мосту $R_1R_4 = R_2R_3$, то $R_4 = mnR_1$. Подставим значения сопротивлений в (2.12).

1. Для высокоомного моста (полагая $U = \text{const}$)

$$\begin{aligned}
 S_{cx} &= UR_4/M = \\
 &= \frac{UmnR_1}{(R_1 + mR_1)(nR_1 + mnR_1)qR_1 + mR_1^2(nR_1 + mnR_1) + n^2mR_1^2(R_1 + mR_1)} = \\
 &= \frac{UmnR_1}{R_1^3(1+m)^2nq + R_1^3mn(1+m) + R_1^3n^2m(1+m)} = \\
 &= \frac{UmnR_1}{R_1^3(1+m)n[(1+m)q + m + nm]} = \\
 &= \frac{UmnR_1}{R_1^3(1+m)nm[(1/m + 1)q + 1 + n]} = \\
 &= U \frac{1}{R_1^2(1+m)[(1 + 1/m)q + 1 + n]}, \quad (2.14)
 \end{aligned}$$

или

$$S_{cx} = \frac{U}{R_1^2} f(m, n, q), \quad (2.15)$$

где

$$f(m, n, q) = \frac{1}{(1+m)[q(1 + 1/m) + 1 + n]}. \quad (2.16)$$

Анализ уравнения (2.15) показывает, что чувствительность возрастает с увеличением напряжения питания и уменьшением сопротивлений плеч моста. Эти выводы достаточно очевидны. При этом следует иметь в виду, что с уменьшением сопротивлений мост уже не будет высокоомным и к нему неприменимо уравнение (2.15). Менее очевидно, но представляет большой интерес влияние коэффициентов n , m , q . Рассмотрим функцию (2.16). При уменьшении n чувствительность схемы увеличивается. При неизменных коэффициентах n и q чувствительность моста максимальна при

$$m = \sqrt{q(1 + q + n)} \quad (2.17)$$

Уравнение (2.17) можно получить, продифференцировав $f(m, n, q)$ по m и приравняв $\frac{df(m, n, q)}{dm}$ нулю.

На рис. 2.4, а показаны номограммы для случая $U = \text{const}$, с помощью которых можно определить m и n , т. е. сопротивления мос-

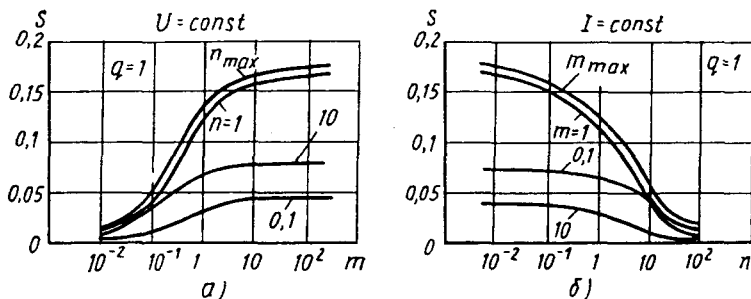


Рис. 2.4. Номограммы к расчету чувствительности мостовой схемы

товой схемы. По виду кривых можно судить о том, что при известном и достаточно большом диапазоне изменения значений m и n чувствительность мостовой схемы изменяется незначительно.

Чувствительность низкоомного моста (при $I = \text{const}$)

$$\begin{aligned}
 S_{\text{сх}} &= I \frac{R_4}{N} = \\
 &= \frac{ImnR_1}{(R_1 + mR_1 + nR_1 + mnR_1)qR_1 + (R_1 + nR_1)(mR_1 + mnR_1)} = \\
 &= \frac{I}{R_1} \frac{mn}{(1 + m + n + mn)q + (m + 2mn + mn^2)}
 \end{aligned}$$

или

$$S_{\text{сх}} = \frac{I}{R_1} \varphi(m, n, q), \quad (2.18)$$

где

$$\varphi(m, n, q) = \frac{1}{(1 + 1/n)[q(1 + 1/m) + 1 + n]}. \quad (2.19)$$

Анализ уравнения (2.19) показывает, что при увеличении m чувствительность схемы возрастает. При неизменных значениях m и q чувствительность моста максимальна при

$$n = \sqrt{q(1 + 1/m) + 1}. \quad (2.20)$$

Уравнение (2.20) можно получить продифференцировав $\varphi(m, n, q)$ по n и приравняв $d\varphi(m, n, q)/dn$ нулю. Номограммы для случая $I = \text{const}$ показаны на рис. 2.4, б.

Рассмотрим теперь чувствительность неуравновешенного моста. Датчики с изменяющимся сопротивлением R можно включить в разные плечи моста. Рассмотрим различные варианты подключения датчиков (рис. 2.5).

1. Чаще всего используется простая (рис. 2.5, а) схема равноплечего ($R_2 = R_3 = R_4 = R_0$) моста с одним датчиком $R_1 = R_0 \pm \Delta R$, где R_0 — сопротивление датчика, соответствующее начальному значению измеряемой неэлектрической величины.

Воспользуемся уравнением (2.8) для определения изменения тока через измерительный прибор:

$$\begin{aligned} \Delta I_{\text{пр}} &= I \frac{(R_0 \pm \Delta R)R_0 - R_0^2}{(R_0 \pm \Delta R + 3R_0)R_{\text{пр}} + (R_0 \pm \Delta R + R_0)2R_0} = \\ &= I \frac{R_0^2 + \Delta RR_0 - R_0^2}{4R_0R_{\text{пр}} \pm \Delta RR_{\text{пр}} + 4R_0^2 \pm 2\Delta RR_0} = \\ &= I \frac{\pm \Delta RR_0}{4R_0R_{\text{пр}} \pm \Delta RR_{\text{пр}} + 4R_0^2 \pm 2\Delta RR_0}. \end{aligned}$$

Для малых приращений ΔR можно пренебречь в знаменателе слагаемыми $\Delta RR_{\text{пр}}$ и $2\Delta RR_0$ по сравнению с другими слагаемыми

$$\Delta I_{\text{пр}} = \pm \Delta RI / [4(R_{\text{пр}} + R_0)].$$

Чувствительность схемы

$$S_{\text{сх}} = \Delta I_{\text{пр}} / \Delta R = I / [4(R_{\text{пр}} + R_0)] = S_0. \quad (2.21)$$

Примем чувствительность моста с одним датчиком за исходную S_0 и выразим чувствительность всех других вариантов мостовых схем через S_0 .

2. На схеме рис. 2.5, б одинаковые датчики с изменяющимся сопротивлением $R_0 + \Delta R$ включены в противоположные плечи моста. В этом случае приращение тока в измерительном приборе

$$\Delta I_{\text{пр}} = \Delta RI / [2(R_{\text{пр}} + R_0)],$$

т. е. чувствительность $S_{\text{сх}} = 2S_0$ увеличивается вдвое. Такое же увеличение чувствительности получается в схеме рис. 2.5, в, где второй датчик включен не в противоположное, а в соседнее плечо и его сопротивление не увеличивается, а уменьшается: $R_0 - \Delta R$. В схемах по рис. 2.5, а—в чувствительность непостоянна, т. е. зависимость $I_{\text{пр}} = f(\Delta R)$ нелинейна.

3. Если датчики с изменяющимися сопротивлениями включить в соседние плечи моста по схеме рис. 2.5, г ($R_0 + \Delta R$ — в плечо R_1 ,

а $R_0 - \Delta R$ — в плечо R_3), то чувствительность его по-прежнему в два раза больше ($S_{сх} = 2S_0$), а зависимость $I_{пр} = f(\Delta R)$ близка к линейной в довольно широких пределах. Недостаток схемы в том, что если датчиками являются сопротивления с подвижным контактом, то питание к схеме подводится именно через этот подвижный контакт, что снижает надежность схемы.

4. При включении датчиков по схемам, показанным на рис. 2.5, *д*, *е*, изменение сопротивления одновременно в обоих плечах не приводит к изменению тока в измерительном приборе, т. е. $S_{сх} = 0$. Такое подключение датчиков является ошибочным.

5. Если включить четыре одинаковых датчика во все четыре плеча моста так, как показано на рис. 2.5, *ж*, то изменение тока в измерительном приборе $\Delta I_{пр} = \Delta R I / (R_{пр} + R_0)$. При этом обеспечивается максимальная чувствительность $S_{сх} = 4S_0$.

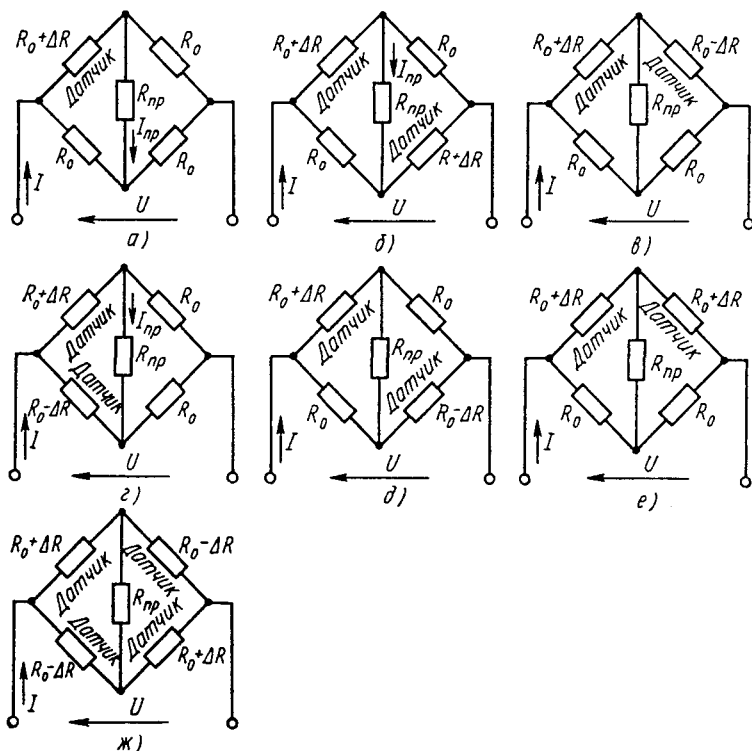


Рис. 2.5. Варианты включения датчиков в мостовую схему

§ 2.4. Мостовая схема переменного тока

В плечи мостовой схемы переменного тока (рис. 2.6) включены полные сопротивления, состоящие из активной и реактивной составляющих. Будем пользоваться комплексной формой записи полных сопротивлений $\underline{Z} = R + jX$. В диагональ AB моста включен источник переменного синусоидального напряжения \underline{U} , а в диагональ $БГ$ — измерительный прибор переменного тока. Направления токов в плечах моста могут быть выбраны произвольно. Ток измерительной диагонали

$$\underline{I}_{np} = \underline{I} \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_4 - \underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{N}} = \underline{U} \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_4 - \underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{M}}, \quad (2.22)$$

где

$$\underline{N} = (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \underline{Z}_4) \underline{Z}_{np} + (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3) \times (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_4); \quad (2.23)$$

$$\underline{M} = (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)(\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4) \underline{Z}_{np} + \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 (\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4) + \underline{Z}_3 \underline{Z}_4 (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2); \quad (2.24)$$

\underline{M} , \underline{N} — комплексные выражения, аналогичные выражениям в уравнениях (2.9) и (2.10) для моста постоянного тока.

Условия равновесия моста переменного тока получим, приравнявая (2.22) нулю:

$$\underline{Z}_1 \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \underline{Z}_3, \quad (2.25)$$

где

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1 = z_1 e^{j\varphi_1}; \quad \underline{Z}_2 = R_2 + jX_2 = z_2 e^{j\varphi_2};$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 + jX_3 = z_3 e^{j\varphi_3};$$

$$\underline{Z}_4 = R_4 + jX_4 = z_4 e^{j\varphi_4}.$$

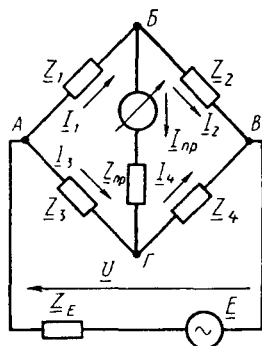


Рис. 2.6. Мостовая измерительная схема на переменном токе

Напомним, что при показательной форме записи комплексной величины модуль $z = \sqrt{R^2 + X^2}$, а аргумент $\varphi = \operatorname{arctg}(X/R)$.

В соответствии с условием равновесия моста подставим в (2.25) значения полных сопротивлений

$$(R_1 + jX_1)(R_4 + jX_4) = (R_2 + jX_2)(R_3 + jX_3).$$

Представим левую и правую части в виде действительной и мнимой составляющих:

$$R_1R_4 - X_1X_4 + j(R_1X_4 + R_4X_1) = R_2R_3 - X_2X_3 + j(R_2X_3 + R_3X_2).$$

Две комплексные величины равны только в том случае, если равны порознь их действительные и мнимые части:

$$R_1R_4 - X_1X_4 = R_2R_3 - X_2X_3, \quad (2.26)$$

$$R_1X_4 + R_4X_1 = R_2X_3 + R_3X_2. \quad (2.27)$$

Таким образом, получаем два независимых условия равновесия, которые должны выполняться одновременно. Если в мостах постоянного тока имеется одно условие равновесия и уравнивание достигается регулировкой одного сопротивления, то в мостах переменного тока для уравнивания необходима регулировка не менее двух параметров схемы. Трудность уравнивания моста переменного тока состоит в том, что в процессе обеспечения одного условия (например, равенства произведений модулей сопротивлений в противолежащих плечах: $z_1z_4 = z_2z_3$) нарушается другое соотношение — между фазовыми сдвигами: $\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$. Обычно такие мосты регулируются вручную методом последовательных приближений.

В некоторых частных случаях уравнивание моста обеспечивается выполнением одного из трех условий.

1. Если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 0$, т. е. плечи моста имеют только реактивные сопротивления, то условие равновесия $X_1X_4 = X_2X_3$.

2. Если $X_1 = X_2 = X_3 = X_4 = 0$, т. е. плечи моста имеют только активные сопротивления, условие равновесия $R_1R_4 = R_2R_3$.

3. Если два соседних плеча имеют только реактивные сопротивления, а два других — только активные (любая пара соседних плеч), например $R_1 = R_3 = X_2 = X_4 = 0$, то условие равновесия $X_1R_4 = R_2X_3$.

Следует иметь в виду, что катушки индуктивности всегда кроме индуктивного сопротивления имеют активное сопротивление, которое в некоторых случаях настолько мало, что им можно пренебречь.

Расчет чувствительности моста переменного тока можно провести в соответствии с (2.12), учитывая, что вместо R_4 следует подставить комплексное сопротивление. Чувствительность моста по току

$$S_{схI} = \underline{U} \underline{Z}_4 / \underline{M}, \quad (2.28)$$

чувствительность по напряжению

$$S_{схU} = \underline{I} \underline{Z}_4 / \underline{N}. \quad (2.29)$$

Уравновешивание моста переменного тока может осуществляться автоматически при соотношениях сопротивлений плеч, рассмотренных для частных случаев 1—3.

Автоматическое уравновешивание мостов переменного и постоянного тока выполняется по схеме, показанной на рис. 2.7. Напряжение разбаланса ΔU снимается с измерительной диагонали моста и подается на исполнительный микроэлектродвигатель (ЭД) через усилитель (У). Двигатель через редуктор (Р) перемещает движок переменного резистора R до тех пор, пока не будет обеспечено условие равновесия и напряжение разбаланса ΔU не станет равным нулю. Одновременно будет перемещаться и стрелка по шкале, которая может быть проградуирована в единицах сопротивления датчика или в соответствующих этому сопротивлению единицах измеряемой неэлектрической величины.

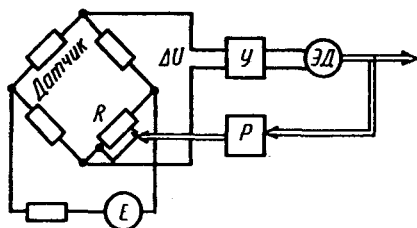


Рис. 2.7. Схема автоматического уравновешивания моста

чено условие равновесия и напряжение разбаланса ΔU не станет равным нулю. Одновременно будет перемещаться и стрелка по шкале, которая может быть проградуирована в единицах сопротивления датчика или в соответствующих этому сопротивлению единицах измеряемой неэлектрической величины.

§ 2.5. Дифференциальные измерительные схемы

Дифференциальная схема состоит из двух смежных контуров с источником питания, а измерительный прибор включен в общую ветвь контуров и реагирует на разность контурных токов. В дифференциальной схеме могут быть использованы как параметрические датчики (с изменяющимися сопротивлениями), так и генераторные (с изменяющейся ЭДС). Дифференциальные схемы включения параметрических датчиков показаны на рис. 2.8 (*a* — датчик включен в один контур; *b* — датчик включен в оба контура). ЭДС, питающие оба контура, одинаковы. Дифференциальная схема включения генераторного датчика показана на рис. 2.9. В этой схеме датчиком яв-

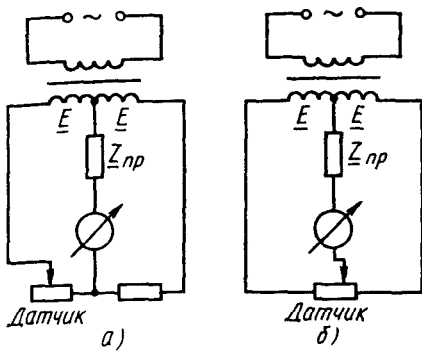


Рис. 2.8. Дифференциальные схемы включения параметрических датчиков

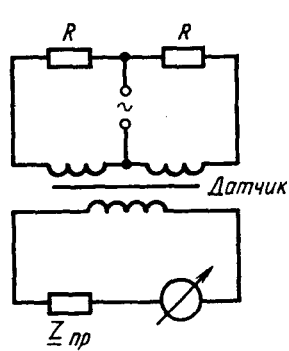


Рис. 2.9. Дифференциальная схема включения генераторного датчика

ляется так называемый дифференциальный трансформатор (подробно рассмотрен в § 6.4). При изменении магнитной связи между обмотками трансформатора ЭДС левого контура, например, возрастает, а правого — уменьшается. Изменение магнитной связи обусловлено контролируемой неэлектрической величиной. Например, оно может быть вызвано перемещением ферромагнитного сердечника в дифференциальном трансформаторе.

Проведем сравнение дифференциальной и мостовой измерительных схем по чувствительности. В обеих схемах (рис. 2.10, а, б) будем использовать одинаковые датчики с изменяющимся активным сопротивлением $R + \Delta R$ и одинаковое питание — от вторичной обмотки трансформатора с ЭДС, равной $2E$ (при дифференциальной схеме имеется вывод от средней точки).

Для расчета токов в дифференциальной схеме используем метод наложения: сначала определим токи от одной ЭДС, затем — от другой (рис. 2.11).

Ток через прибор для расчетной схемы (рис. 2.11, а)

$$I'_{\text{пр}} = \frac{1}{R_{\text{пр}}} \left[E - \frac{ER}{R + R_{\text{пр}}(R + \Delta R)/(R_{\text{пр}} + R + \Delta R)} \right].$$

Ток через прибор для расчетной схемы (рис. 2.11, б)

$$I''_{\text{пр}} = \frac{1}{R_{\text{пр}}} \left[E - \frac{E(R + \Delta R)}{R + \Delta R + R_{\text{пр}}R/(R + R_{\text{пр}})} \right].$$

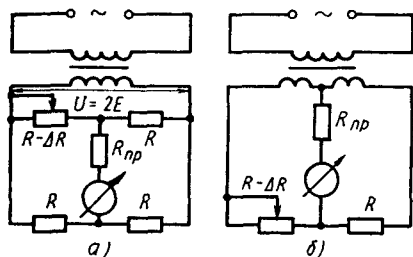


Рис. 2.10. К расчету мостовой схемы включения датчика

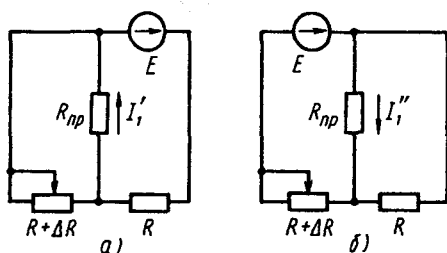


Рис. 2.11. К расчету дифференциальной схемы включения датчика

Результирующий ток через прибор

$$\Delta I_{\text{нп}} = I'_{\text{нп}} - I''_{\text{нп}} = \frac{E}{R_{\text{нп}}} \left[\frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R_{\text{нп}} R / (R_{\text{нп}} + R)} - \frac{R}{R + R_{\text{нп}} (R + \Delta R) / (R_{\text{нп}} + R + \Delta R)} \right]$$

Определение чувствительности дифференциальной схемы в общем виде приводит к довольно сложному уравнению, поэтому рассмотрим числовой пример. Пусть $E = 10$ В; $R = 10$ Ом; $\Delta R = 0,1$ Ом; $R_{\text{нп}} = 0,5$ Ом. Тогда

$$\begin{aligned} \Delta I_{\text{нп}} &= \frac{10}{0,5} \left[\frac{10,1}{10,1 + 5/10,1} - \frac{10}{10 + 0,5 \cdot 10,1/10,6} \right] = \\ &= \frac{10}{0,5} \left[\frac{10,1}{10,6} - \frac{10}{10,475} \right] = -0,036 \text{ А.} \end{aligned}$$

Приращение тока для мостовой схемы определим по (2.7):

$$\Delta I_{\text{пр}} = 20 \frac{10,1 \cdot 10 - 100}{20,1 \cdot 20 \cdot 0,5 + 101 \cdot 20 + 100 \cdot 20,1} = \frac{20}{201 + 1010 + 2010} = 0,0062 \text{ A.}$$

Таким образом, при одинаковых напряжениях питания, сопротивлениях датчика и измерительного прибора, приращения сопротивления датчика дифференциальная схема дает большее приращение тока в измерительной цепи. Следовательно, дифференциальная измерительная схема имеет большую чувствительность, чем мостовая схема.

Ток в измерительной цепи мостовых и дифференциальных схем зависит от напряжения питания. Колебания напряжения питания приводят к появлению погрешности, так как ток через прибор и отклонение его стрелки изменяются даже при неизменном сопротивлении датчика.

Для уменьшения влияния напряжения питания на показания прибора используют так называемые логометрические схемы измерения. Логометром называется магнитоэлектрический прибор, противодействующий момент в котором создается не механически (пружиной), а электрически. На рис. 2.12 приведена принципиальная схема логометра для измерения сопротивления датчика R_d . В магнитном поле постоянного магнита с полюсными наконечниками NS помещен стальной цилиндрический сердечник. В зазоре между сердечником и полюсными наконечниками помещены две обмотки w_1 и w_2 , выполненные в виде рамок. При прохождении тока по рамке создается вращающий момент и рамка поворачивается. Зазор сделан неравномерным, чтобы вращающий момент изменялся в зависимости от угла поворота. Обмотки w_1 и w_2 намотаны так, чтобы моменты рамок были направлены навстречу друг другу. Рамки жестко соединены между собой под определенным углом. Вместе они могут поворачиваться одновременно с закрепленной на рамках стрелкой прибора. Токи к рамкам подводятся с помощью спиральных пружин, которые создают малый противодействующий

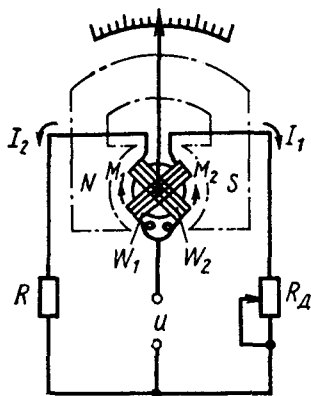


Рис. 2.12. Логометрическая измерительная схема

ющий момент, возвращающий рамки и стрелку в исходное положение, когда тока в приборе нет.

Датчик R_d включен последовательно с обмоткой ω_1 , постоянный резистор R — последовательно с обмоткой ω_2 . Если сопротивления R_d и R равны, то токи в рамках также равны ($I_1 = I_2$) и подвижная система (обе рамки со стрелкой) займет положение, симметричное относительно оси полюсов NS . Если же сопротивление датчика изменится (например, увеличится), то ток I_1 уменьшится и уменьшится момент M_1 , создаваемый этим током в рамке ω_1 . Так как ток I_2 и соответствующий ему момент M_2 остался неизменным, то результирующий момент повернет подвижную систему на некоторый угол. При этом рамка ω_2 с большим током входит в расширяющийся зазор с меньшей индукцией, а рамка ω_1 с меньшим током, наоборот, входит в сужающийся зазор с большей индукцией. Момент M_2 будет уменьшаться, а M_1 — увеличиваться. При определенном угле поворота моменты сравниваются и подвижная система займет новое равновесное положение. Если же изменится напряжение питания цепи U , то в рамках ω_1 и ω_2 изменятся токи, притом одновременно и в одинаковой степени (так как рамки подключены к источнику питания параллельно). Соотношение токов и моментов останется неизменным и положение подвижной системы не изменится. Как видно, на положение стрелки влияют не сами токи, а их отношение, которое определяется сопротивлением датчика и не зависит от напряжения питания.

§ 2.6. Компенсационные измерительные схемы

Компенсационные схемы используют для измерения неэлектрических величин, которые преобразуются датчиками в ЭДС или напряжение. Сигнал датчика сравнивается с компенсирующим напряжением, вырабатываемым потенциометром. Подбор компенсирующего напряжения выполняется вручную или автоматически.

Приборы с автоматической компенсацией называют также автоматическими потенциометрами.

Рассмотрим простейшую компенсационную схему (рис. 2.13) с ручным уравниванием. Измеряемая ЭДС E_x или напряжение U_x уравниваются равным и противоположным по знаку напряжением U_k , снимаемым с переменного проволочного резистора R_k , представляющего собой часть резистора R . Этот резистор имеет два неподвижных вывода и один подвижный, выполненный в виде щетки, скользящей по проволоке. Все сопротивление резистора R включено в цепь источника питания с ЭДС E . Переменное сопро-

тивление R_k пропорционально перемещению x движка (шетки): $R_k = (R/L)x$, где L — общая длина проволочной намотки между неподвижными выводами. Соответственно и компенсирующее напряжение U_k будет пропорционально перемещению движка x $U_k = (IR/L)x$, где I — ток, проходящий через резистор R под действием ЭДС E .

Движок необходимо перемещать до тех пор, пока компенсирующее напряжение U_k не сравняется с измеряемым напряжением U_x : $U_k = U_x$. Для определения положения точной компенсации используется чувствительный прибор (гальванометр или микроамперметр). Ток через прибор

$$I_{\text{пр}} = (U_x - U_k)/(R_d + R_{\text{пр}} + R_k), \quad (2.30)$$

где R_d — сопротивление датчика; $R_{\text{пр}}$ — сопротивление прибора.

Если компенсация произошла, то ток через прибор равен нулю: $I_{\text{пр}} = 0$. Значит, прибор в данном случае нужен не для измерения тока, а для определения его нулевого значения. Поэтому такой прибор называют нуль-индикатором (НИ). О значении измеряемого напряжения можно судить по перемещению движка, т.е. движок можно соединить со стрелкой, а вдоль резистора R расположить шкалу, проградуировав ее в единицах напряжения или сразу в единицах той неэлектрической величины, которая преобразуется датчиком в ЭДС E_x или в напряжение U_x .

Отметим также, что при компенсационном методе измерения $E_x = U_x$. Действительно, $U_x = E_x - I_{\text{пр}}R_d$, но в момент компенсации $I_{\text{пр}} = 0$.

Точность измерения при компенсационном методе зависит от стабильности поддержания тока I в цепи питания резистора R . Ведь именно от силы этого тока зависит значение компенсирующего напряжения U_k . Если ЭДС источника питания E уменьшилась (из-за разряда аккумулятора или батарейки), то уменьшится и ток I . Для компенсации придется на большее расстояние x переместить движок резистора R , и стрелка укажет на иное, ошибочное значение измеряемой величины. Для поддержания стабильного тока питания I можно использовать регулировочный резистор $R_{\text{рег}}$ и миллиамперметр или применить источник стабилизированного напряжения, как в автоматическом потенциометре (рис. 2.14).

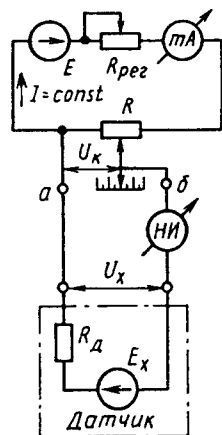


Рис. 2.13. Компенсационная измерительная схема с ручным уравниванием

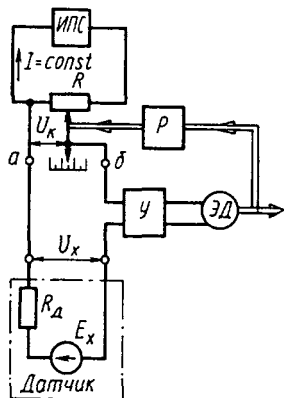


Рис. 2.14. Схема автоматического потенциометра

Чувствительность компенсационной схемы можно определить как отношение приращения тока через прибор к вызывающему его изменению измеряемого напряжения:

$$S_{\text{сх}} = \Delta I_{\text{пр}} / \Delta U_x. \quad (2.31)$$

Если достигнуто состояние компенсации, то измеряемое напряжение U_x уравновешено компенсирующим напряжением U_k ($U_x = U_k$) и ток через прибор равен нулю. Пусть измеряемое напряжение изменилось на ΔU_x , а компенсирующее напряжение не изменилось (движок резистора R неподвижен). В этом случае разность между измеряемым и компенсирующим напряжениями равна ΔU_x . Под действием этого напряжения через прибор пройдет ток

$$\Delta I_{\text{пр}} = \Delta U_x / (R_{\text{аб}} + R_{\text{пр}} + R_{\text{д}}), \quad (2.32)$$

где $R_{\text{аб}}$ — внутреннее сопротивление электрической цепи питания, замеренное на зажимах a — b при отключенном датчике; $R_{\text{пр}}$ — сопротивление прибора (нуль-индикатора); $R_{\text{д}}$ — сопротивление датчика.

Сопротивление $R_{\text{аб}}$ можно представить как параллельное соединение части сопротивления компенсирующего резистора $R_k = (R/L)x$ с сопротивлением, состоящим из оставшейся части компенсирующего резистора ($R - R_k$) и регулировочного резистора $R_{\text{пер}}$:

$$R_{\text{аб}} = \frac{R_k(R - R_k + R_{\text{пер}})}{R_k + R - R_k + R_{\text{пер}}} = \frac{R_k(R - R_k + R_{\text{пер}})}{R + R_{\text{пер}}}. \quad (2.33)$$

Подставив (2.32) и (2.33) в (2.31), получим выражение для чувствительности компенсационной схемы:

$$S_{\text{сх}} = \frac{1}{R_r \left(\frac{R - R_k + R_{\text{пер}}}{R + R_{\text{пер}}} \right) + R_{\text{пр}} + R_{\text{д}}}. \quad (2.34)$$

Анализ формулы (2.34) показывает, что чувствительность схемы зависит от R_k , а так как $R_k = (R/L)x$, то чувствительность зависит от положения движка x . Чувствительность непостоянна в разных точках шкалы. На рис. 2.15 показана зависимость чувствительности от положения движка компенсирующего резистора. В начальном положении движка ($R_k = 0$) чувствительность макси-

мальна: $S_{сх\ max} = 1/(R_{пр} + R_d)$. В среднем положении движка чувствительность минимальна, что необходимо учитывать при точных измерениях ЭДС.

Компенсационный метод измерения применяется в цепях как постоянного, так и переменного токов. Однако потенциометры переменного тока дают меньшую точность измерения и сложнее, поскольку необходимо компенсировать падение напряжения не только по абсолютной величине, но и по фазе. Это требует одновременного регулирования не менее двух параметров для обеспечения полной компенсации. На практике стремятся упростить мост переменного тока, выполняя одну пару плеч моста чисто активными, а другую пару — из однотипных элементов.

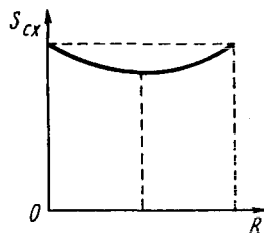


Рис. 2.15. Зависимость чувствительности компенсационной схемы от положения движка потенциометра

§ 2.7. Первичные преобразователи с неэлектрическим выходным сигналом

Большинство неэлектрических величин, которые необходимо измерять и регулировать в системах автоматики, удобно преобразовать в механическое перемещение, а уже затем механическое перемещение преобразуется в электрический сигнал. На рис. 2.16—2.25 показаны примеры первичных преобразователей различных физических величин в механическое перемещение.

Давление определяется по упругой деформации сиффона, мембраны или трубчатой пружины, соответственно для малого, среднего и большого давления.

Сиффон (рис. 2.16) представляет собой тонкостенную (обычно металлическую) цилиндрическую оболочку с поперечной гофрированной боковой поверхностью. Сиффон расширяется или сжимается подобно пружине вдоль оси под действием разности давления внутри и снаружи.

Мембрана (рис. 2.17) представляет собой закрепленную по контуру обычно круглую пластину, которая изгибается под действием давления газа или жидкости. Трубчатая пружина (рис. 2.18) изготавливается из металла (латунь, сталь и др.), обычно в поперечном сечении имеет овальную форму. Под действием

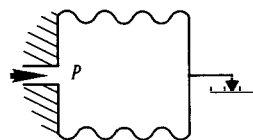


Рис. 2.16. Сиффон

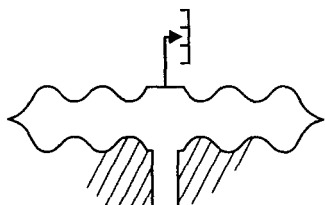


Рис. 2.17. Мембрана

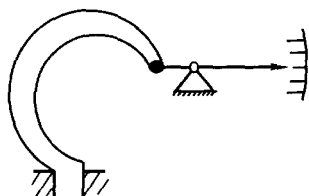


Рис. 2.18. Трубочный манометр

избыточного давления трубчатая пружина стремится разогнуться. В зависимости от используемого чувствительного элемента различают сильфонные, мембранные, трубчатые и иные манометры.

Температура определяется по изгибу биметаллической пружины, давлению жидкости или газа, заполняющих баллон манометрического термометра. Биметаллическая пружина (рис. 2.19) представляет собой двухслойную пластину, изготовленную из металлов с разными коэффициентами линейного расширения. При нагревании пластина изгибается в сторону того слоя, материал которого имеет меньший коэффициент. Обычно в качестве такого материала применяют специальный сплав — инвар.

Принцип действия манометрического термометра поясняется на рис. 2.20. При нагревании баллона с газом его давление увеличивается и сильфон расширяется.

Уровень определяется по перемещению поплавка (рис. 2.21). Кстати, именно такого типа уровнемер использовал И. И. Ползунов в изобретенной им в 1763 году паровой машине для автоматического регулирования уровня воды в котле.

Расход измеряется по перемещению поплавка в трубке переменного сечения. Такой расходомер называют ротаметром (рис. 2.22). Поплавок ротаметра обычно выполнен из металла и в неподвижной жидкости он тонет. Но при движении жидкости снизу вверх поплавок подымается, чтобы обеспечить большее поперечное сечение для прохода жидкости. Чем больше расход, тем выше должен подняться поплавок.

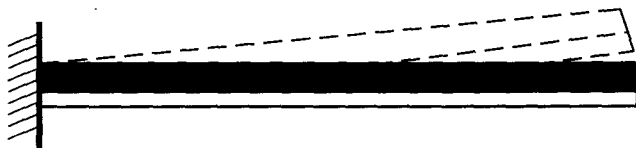


Рис. 2.19. Биметаллическая пластина

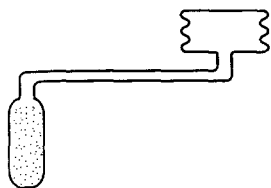


Рис. 2.20. Манометрический термометр

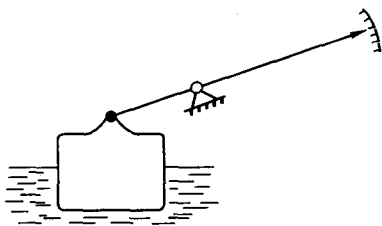


Рис. 2.21. Поплачковый уровнемер

Очень часто расход определяют по перепаду давлений до и после сужающего устройства в трубопроводе. Чем больше расход, тем больше падение давления в сужающем устройстве, но эти величины связаны между собой нелинейной (квадратичной) зависимостью. Подобные расходомеры называют еще дифференциальными манометрами (рис. 2.23).

Усилие определяется по величине упругой деформации пластины (рис. 2.24) или витой пружины. Пружинные весы знакомы всем.

Плотность определяется по глубине погружения поплавка. Такой прибор называют ареометром (рис. 2.25) Принцип действия его основан на законе Архимеда.

Результаты измерения давления, температуры, уровня, расхода, силы, плотности могут быть получены на шкале прибора для местного измерения. Но в системах автоматического управления обычно требуется передавать результаты измерения на расстояние, т. е. осуществлять дистанционное измерение. В нашей стране существует агрегатная унифицированная система (АУС) — система пневматических средств автоматизации общепромышленного назначения. Эта система построена по агрегатному принципу, т. е. представляет собой набор отдельных функциональных блоков (датчиков, усилителей, исполнительных механизмов, преобразователей и др.), входные и выходные параметры которых унифицированы. Поэтому из таких блоков

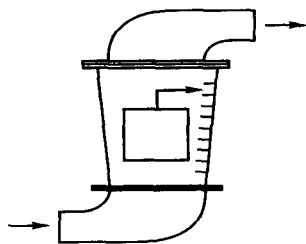


Рис. 2.22. Расходомер-ротаметр

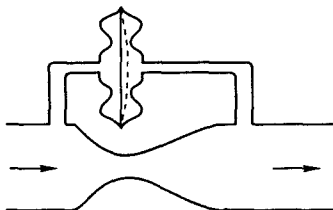


Рис. 2.23. Расходомер-дифференциальный манометр

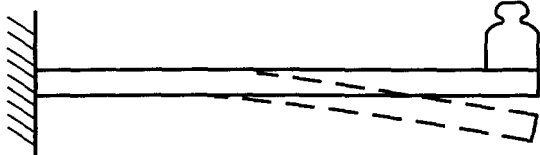


Рис. 2.24. Преобразование силы в перемещение

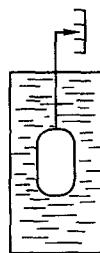


Рис. 2.25. Ареометр

могут быть построены самые различные системы автоматики. В качестве унифицированного (единого) сигнала в пневматической АУС принято давление сжатого воздуха, изменяющееся в диапазоне 2—10 кПа избыточных. Для преобразования различных измеряемых физических величин в давление служат соответствующие приборы с пневматическим выходным сигналом. Как видно из рассмотренных на рис. 2.16—2.25 примеров многие физические величины могут быть преобразованы в перемещение. Преобразование перемещения в давление может осуществляться с помощью заслонки, изменяющей проходное сечение сопла, через которое подается давление воздуха. В пневматической АУС для питания блоков используется очищенный сжатый воздух с избыточным давлением 14 кПа. Для электрических измерений с помощью первичных измерителей (чувствительных элементов), показанных на рис. 2.16—2.25, используются различные датчики перемещения, рассмотренные в гл. 2. А для применения устройств АУС в схемах с электрическими приборами в ней предусмотрены пневмоэлектрические и электропневматические преобразователи.

Контрольные вопросы

1. Какими преимуществами обладает электрический сигнал по сравнению с другими сигналами?
2. Сформулируйте условие равновесия моста постоянного тока.
3. Сформулируйте условие равновесия моста переменного тока.
4. Сравните дифференциальную измерительную схему с мостовой по чувствительности.
5. Как работает компенсационная измерительная схема с ручным уравновешиванием?
6. Приведите несколько примеров преобразования физических величин (давление, температура, расход, уровень и т. п.) в перемещение.

Раздел II

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Глава 3

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ. КОНТАКТНЫЕ ДАТЧИКИ

§ 3.1. Типы электрических датчиков

Электрические датчики относятся к наиболее важным элементам систем автоматики. С помощью датчиков контролируемая или регулируемая величина преобразуется в сигнал, в зависимости от изменения которого и протекает весь процесс регулирования. Наибольшее распространение в автоматике получили датчики с электрическим выходным сигналом. Объясняется это прежде всего удобством передачи электрического сигнала на расстояние, его обработки и возможностью преобразования электрической энергии в механическую работу. Кроме электрических распространение получили механические, гидравлические и пневматические датчики.

В гл. 1 было отмечено, что входным сигналом датчиков могут быть самые различные физические величины: механическое перемещение, скорость, сила, температура, давление, расход, влажность и др. В зависимости от вида входного сигнала различают датчики перемещения, скорости, силы, температуры и др. Это электрические датчики неэлектрических величин. При автоматизации электросетей и электроустановок возникает необходимость в получении сигналов, соответствующих току, напряжению, мощности и другим электрическим величинам. Для этого используют датчики тока, напряжения, мощности и др. В них одна электрическая величина — входной сигнал — преобразуется в другую электрическую величину — выходной сигнал.

По характеру формирования электрического выходного сигнала электрические датчики делятся на *параметрические* (пассивные) и *генераторные* (активные). В параметрических датчиках изменение входного сигнала вызывает соответствующее изменение какого-либо параметра электрической цепи (активного сопротивления, ин-

дуктивности, емкости). Генераторные датчики являются источниками электрической энергии, зависящей от входного сигнала.

В данной книге принята классификация электрических датчиков в зависимости от принципа действия или метода, используемого при преобразовании входного сигнала в электрический выходной сигнал. В соответствии с этим электрические датчики подразделяют на контактные, потенциометрические, тензометрические, электромагнитные, пьезоэлектрические, емкостные, термоэлектрические, струнные, фотоэлектрические, ультразвуковые и др. Надо отметить, что этот ряд непрерывно расширяется — все новые и новые физические явления используются для преобразования входных сигналов с развитием науки, техники, технологии, появлением новых материалов.

По характеру изменения выходного сигнала различают датчики непрерывного (аналогового) и дискретного типа.

Независимо от значения и типа ко всем электрическим датчикам предъявляются определенные технические требования. Основными из них являются надежность, точность, чувствительность, быстродействие, минимальные габариты, масса.

Датчики различают также по диапазону изменения входного сигнала. Например, одни электрические датчики температуры предназначены для измерения температуры от 0 до 100 °С, а другие — от 0 до 1600 °С. Очень важно, чтобы диапазон изменения выходного сигнала был при этом одинаков (унифицирован) для разных приборов. Унификация выходных сигналов датчиков позволяет использовать общие усилительные и исполнительные элементы для самых разных систем автоматики. В нашей стране такая унификация проведена путем создания Государственной системы приборов и средств автоматизации (ГСП). Унификация элементов и блоков ГСП ускоряет процесс проектирования и изготовления систем автоматики, повышает технологичность конструкций, упрощает комплектацию, монтаж и эксплуатацию автоматических систем. Иными словами, применение элементов и блоков ГСП для систем автоматики экономически выгодно.

§ 3.2. Контактные датчики с дискретным выходным сигналом

Контактные датчики относятся к параметрическим, поскольку их электрическое сопротивление изменяется в зависимости от входной механической величины. Так как сопротивление изменяется

скачком (в результате замыкания или размыкания контактов), то контактные датчики имеют дискретный выходной сигнал. Статическая характеристика контактного датчика имеет релейный характер. Можно считать, что выходной сигнал несет информацию типа «да—нет» или «больше—меньше». Поэтому контактные датчики применяются в основном в системах автоматического контроля и сортировки размеров, а также в системах автоматической сигнализации различных физических величин, преобразуемых в перемещение.

Электрические контактные датчики, используемые для контроля размеров деталей, делят на предельные, определяющие, находится ли заданный размер в поле допуска, и амплитудные, измеряющие отклонения детали от заданной геометрической формы.

Рассмотрим работу предельного контактного датчика (рис. 3.1, а). На установочной плите 1 размещена деталь 2, точность выполнения вертикального размера которой необходимо контролировать. К детали подводится измерительный шуп 3 и прижимается с помощью пружины 4. В зависимости от размера детали шуп перемещается в вертикальном направлении, поворачивая рычаг 5, несущий подвижный контакт 9. При опускании шупа замыкается неподвижный контакт 10, при поднятии — контакт 8. Замыкание происходит в том случае, когда размер детали имеет отклонение в большую или меньшую сторону сверх допустимого. Допустимые пределы откло-

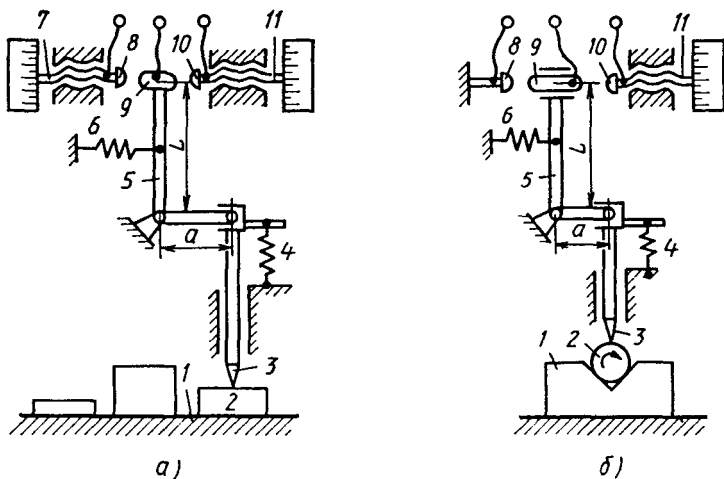


Рис. 3.1. Контактные электрические датчики

нения могут быть установлены с помощью настроечных винтов 7 и 11. Для обеспечения достаточного контактного нажатия служит пружина 6. Электрические зажимы для подключения подвижного контакта 9 и неподвижных контактов 8 и 10 в электрическую цепь на данной кинематической схеме не показаны.

Амплитудный датчик (рис. 3.1, б) отличается от предельного тем, что подвижный контакт 9 имеет осевое перемещение в направляющих рычага 5. При вращении детали 2 в призме 1 сначала происходит замыкание подвижного контакта 9 с неподвижным контактом 8. Если шуп 3 продолжает подниматься, то рычаг перемещается влево, проскальзывая через подвижный контакт 9. Затем, когда максимальный размер будет пройден (т. е. шуп начнет опускаться), рычаг переместится вправо, увлекая за собой без проскальзывания подвижный контакт. Если отклонение размера превышает допустимое, то подвижный контакт замкнется со вторым неподвижным контактом 10 и в электрическую цепь подается сигнал о том, что деталь бракованная. На предельное отклонение размера датчик настраивают с помощью винта 11, используя эталонную деталь.

Рычажная система электроконтактных датчиков играет важную роль. Надежное замыкание и особенно размыкание контактов при малом расстоянии между ними невозможны. Рычажная система позволяет увеличить это расстояние за счет того, что отношение размеров $L/a > 1$ (рис. 3.1). При замыкании контактов датчика происходит изменение сопротивления между подвижным и неподвижными контактами от бесконечности до ничтожно малой величины, определяемой значением контактного сопротивления.

Для уменьшения погрешности измерения рычаги выполняют не на шарнирах, имеющих зазоры между отверстием и осью, а на плоских пружинах. Недостатками рычажных систем являются необходимость в значительных усилиях для перемещения шупа (0,1—3 Н) и повышенная инерционность.

Датчик, показанный на рис. 3.1, является двухпредельным. При необходимости используют одно- и многопредельные датчики. На рис. 3.2 показаны многопредельные датчики. Контакты 1—3 замыкаются последовательно друг за другом при перемещении измерительного шупа 4, контролирующего соответственно размеры деталей D_1 — D_3 . Подсоединение подвижного контакта во внешнюю цепь осуществляется с помощью пружинного подвода 5. Контактный датчик, приведенный на рис. 3.2, а, переключает несколько цепей сигнализации, а датчик на рис. 3.2, б выполняет последовательное замыкание частей резистора R , имеющего несколько отводов.

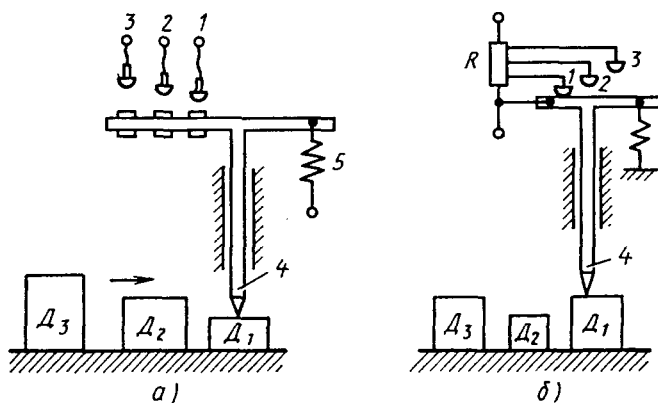


Рис. 3.2. Многопредельные контактные датчики

В последнем случае происходит ступенчатое уменьшение активного сопротивления, включенного в общую внешнюю цепь.

Контактные многопредельные датчики используют в сортировочных автоматах, разделяющих детали по размерам с достаточно высокой точностью (несколько микрометров). Производительность сортировочных автоматов достигает нескольких сотен деталей в минуту. Это предъявляет высокие требования к надежности и точности контактных датчиков. Технические показатели датчиков в значительной степени зависят от материала и качества изготовления контактных пар. Нарушение контакта приводит к отказу датчика, а обгорание и износ контактов снижают точность контроля размеров. Поэтому очень важно создать благоприятные условия для работы контактов путем снижения разрывной мощности.

Нагрузкой контактных датчиков довольно часто являются сигнальные лампы. При использовании для сигнализации обычных ламп накаливания разрывная мощность довольно велика (несколько ватт). Для уменьшения искро- и дугообразования применяют искрогасительную цепочку, состоящую из последовательно соединенных конденсатора и разрядного активного сопротивления. Такая цепочка подключается параллельно контактам датчика. Для повышения надежности контактных датчиков применяют неоновые лампочки, которые потребляют значительно меньшую (по сравнению с лампами накаливания) мощность: 80—150 мВт (ток 1—1,5 мА при напряжении 80—100 В). Еще большего снижения разрывной мощности можно достичь подключая контакты в цепь управления

электронных и полупроводниковых усилителей с большим входным сопротивлением.

Материалы для контактов выбираются в зависимости от контактного давления и условий работы датчика. Для высокочувствительных маломощных контактных датчиков давление на контактах изменяется от 0,001 до 0,02 Н. Контакты таких датчиков выполняют из драгоценных металлов (платина, золото и их сплавы), которые почти не окисляются в нормальных атмосферных условиях. Однако их износостойчивость и твердость невелики. При контактных давлениях 0,05—1 Н применяют серебряные контакты. Для мощных контактных датчиков контактные усилия составляют несколько ньютонов, а в качестве материала контактов используют вольфрам, молибден и их сплавы, обладающие высокими твердостью и износостойчивостью.

Вообще проблема контактов и их надежности очень важна для многих электрических элементов автоматики. Более подробно вопросы выбора материалов и конструкций контактов рассмотрены в гл. 16.

В качестве контактных датчиков могут быть использованы и рассматриваемые в гл. 15 путевые и конечные выключатели. По сравнению с описанными контактными датчиками они требуют существенно больших усилий для перемещения контактов и имеют менее высокую точность, но зато могут быть использованы в более мощных цепях.

Достоинствами контактных датчиков являются простота и дешевизна конструкции, простота регулировки чувствительности, высокая точность, возможность работы в цепях постоянного и переменного токов. К недостаткам относятся трудность обеспечения высокой надежности из-за наличия электрической дуги и искрения, возможность ложных срабатываний при наличии вибраций и ударной нагрузки.

Контрольные вопросы

1. В чем разница между параметрическими и генераторными датчиками?
2. Как работает контактный датчик?

Глава 4

ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

§ 4.1. Назначение. Принцип действия

Потенциометрические датчики предназначены для преобразования механического перемещения в электрический сигнал. Основной частью датчика является реостат, сопротивление которого изменяется при перемещении движка, скользящего по проволоке (схема включения потенциометрического датчика показана на рис. 4.1, а). Напряжение питания подается на всю обмотку реостата через неподвижные выводы этой обмотки. Выходное напряжение, пропорциональное перемещению движка, снимается с одного из неподвижных выводов и с подвижного движка. Такая схема включения в электротехнике называется потенциометрической или схемой делителя напряжения.

Если сопротивление всей обмотки датчика обозначить через R , а сопротивление части этой обмотки, с которой снимается выходное напряжение, через $R_{\text{вых}}$, то потенциометрическая схема включения датчика может быть представлена как последовательное соединение резисторов с сопротивлением $R_{\text{вых}}$ и $(R - R_{\text{вых}})$ (рис. 4.1, б). Ток через обмотку датчика $I = U/R$, а приложенное напряжение распределяется (делится) между последовательно соединенными резисторами: $U = IR_{\text{вых}} + I(R - R_{\text{вых}})$. Если сопротивление обмотки равномерно распределить по длине l , а перемещение движка обозначить через x , то выходное напряжение датчика

$$U_{\text{вых}} = IR_{\text{вых}} = Ux/l. \quad (4.1)$$

Таким образом, выходной сигнал датчика пропорционален перемещению движка.

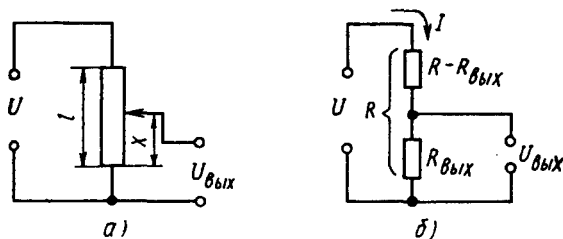


Рис. 4.1. Схема включения потенциометрического датчика

В автоматических системах движок может быть механически связан с каким-либо устройством (клапаном, рулем, антенной, режущим инструментом и т. п.), положение которого надо измерить и передать в виде электрического сигнала. Усилие, под действием которого перемещается движок, в этом случае весьма велико. Поэтому для обеспечения надежного контакта между движком и обмоткой следует иметь достаточно большую силу прижатия движка. В автоматических приборах для измерения различных неэлектрических величин движок датчика соединяется с чувствительным элементом, преобразующим контролируемую величину в перемещение. Усилие, развиваемое чувствительными элементами (мембранами, биметаллическими пластинами, поплавками и т. п.), невелико. Поэтому нельзя сильно прижимать движок к обмотке.

Наличие скользящего контакта снижает надежность потенциометрического датчика и является его основным недостатком. Для питания датчика может быть использовано как напряжение постоянного тока, так и напряжение переменного тока невысокой частоты. Входным сигналом датчика может быть не только линейное, но и угловое перемещение.

В зависимости от закона изменения сопротивления обмотки различают линейные и функциональные потенциометрические датчики.

§ 4.2. Конструкции датчиков

Конструктивно потенциометрический датчик (рис. 4.2) состоит из каркаса 1, на который намотана в один слой обмотка 2 из тонкого провода. По виткам обмотки скользит движок (щетка) 3, который механически связан с объектом, перемещение которого надо измерить. Обмотка выполнена из изолированного провода, а дорожка, по которой скользит движок, предварительно очищена от изоляции.

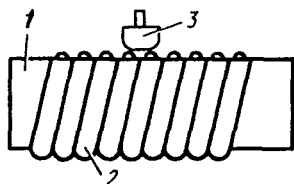


Рис. 4.2. Конструктивная схема потенциометрического датчика

Каркас выполнен обычно плоским или в виде цилиндра. Материалом каркаса может быть изолятор (текстолит, гетинакс, пластмасса, керамика) или металл, покрытый слоем изоляции. Металлические каркасы благодаря лучшей теплопроводности позволяют получить большую мощность электрического сигнала на выходе датчика. В качестве материала для такого каркаса может быть нанесен

слой оксидированного алюминия толщиной около 10 мкм. При рассматривании в лупу с двадцатикратным увеличением слой не должен иметь трещин или неровностей. Напряжение пробоя такого слоя не менее 500 В.

Для обмотки потенциометрического датчика чаще всего применяют провод из манганина, константана и других проводниковых материалов, имеющих малый температурный коэффициент сопротивления. При больших усилиях прижатия движка используется провод диаметром 0,1—0,3 мм, при малых усилиях прижатия — провод из сплавов, в состав которых входят платина, серебро, иридий, рублидий, осмий и др. Диаметр провода d таких точных датчиков выбирается в пределах 0,03—0,01 мм. Характеристики некоторых проводниковых материалов, используемых для потенциометрических датчиков, приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Материалы проводов, используемых для потенциометрических датчиков

Материал провода	Удельное сопротивление при $t = 20^\circ\text{C}$, Ом·мм ² /м	Температурный коэффициент сопротивления α , 1/°C	Допустимая температура нагрева, °C
Константан	0,49	$(3\div 4) \cdot 10^{-6}$	500
Манганин	0,42	$6 \cdot 10^{-6}$	960
Нихром	1,08	$(15\div 20) \cdot 10^{-5}$	110
Вольфрам	0,056	$464 \cdot 10^{-5}$	3400
Платиноиридиевый сплав	0,23	$-111 \cdot 10^{-5}$	1780

Провод наматывается на каркас с некоторым натяжением. При этом необходимо, во-первых, чтобы при понижении температуры провод не распулся из-за разных температурных коэффициентов линейного расширения материалов провода и каркаса; во-вторых, чтобы при нагреве корпуса провод при растяжении не достигал предела упругости. Толщину каркаса не рекомендуется брать менее $4d$, а радиус закругления на углах каркаса — менее $2d$. После намотки провода на каркас для укрепления витков и предохранения их от смещения всю поверхность покрывают тонким равномерным слоем бескислотного лака. Полировка контактной поверхности обмотки (дорожки движения) производится вдоль витков абразивной шкур-

кой на бумажной основе, шлифовальным алмазным кругом с микропорошком, а проводов с эмалевой изоляцией — фетровым кругом. Ширина дорожки составляет обычно $(2\div 3)d$.

При $d = 0,1\div 0,3$ мм движок потенциометрического датчика выполняется в виде пластинчатых щеток из серебра, серебра с палладием или (реже) фосфористой бронзы. Контактное усилие при этом принимается равным $0,05\text{—}0,1$ Н, что обеспечивает силу трения не более $3 \cdot 10^{-2}$ Н. Для точных датчиков при $d < 0,1$ мм движок делается из сплавов платины с иридием, бериллием или серебром в виде двух—пяти тонких параллельных проволок. Контактное усилие при этом принимается равным $10^{-3}\text{—}10^{-2}$ Н, т. е. иногда оно достигает $2 \cdot 10^{-4}$ Н (20 мг) на отдельный контакт. Столь малые контактные усилия необходимы для высокоточных потенциометрических датчиков, используемых, например, в ответственных космических объектах.

На рис. 4.3 приведена конструкция потенциометрического датчика для измерения угловых перемещений. Так же как и датчик линейных перемещений, он состоит из каркаса 1 с обмоткой 2, по которой скользит движок 3. Для съема сигнала с перемещающегося движка служит добавочная щетка 4, скользящая по токосъемному кольцу 5. Выходное напряжение датчика угловых перемещений пропорционально углу поворота подвижной части первичного измерителя, соединенного с осью движка.

В некоторых автоматических приборах в качестве потенциометрического датчика используют так называемый реохорд (рис. 4.4). Он представляет собой натянутую проволоку, по которой скользит ползунк. Сопротивление реохорда пропорционально перемещению ползунка. Часто реохорд используют не в потенциометрической схеме, а включают в плечо мостовой схемы. В этом случае перемещение движка преобразуется в изменение сопротивления R_x .

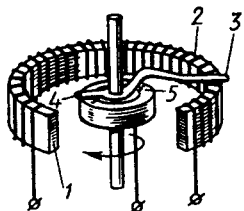


Рис. 4.3. Потенциометрический датчик угловых перемещений

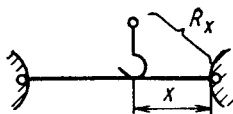


Рис. 4.4. Конструкция реохорда

§ 4.3. Характеристики линейного потенциометрического датчика

Основной характеристикой потенциометрического датчика является зависимость выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от перемещения x . При равномерной намотке эта зависимость линейная только на холостом ходу, т. е. при отсутствии сопротивления нагрузки, подключенной к выходным зажимам датчика. В реальных условиях к этим зажимам подключаются электрические приборы, входное сопротивление которых является сопротивлением нагрузки для датчика (рис. 4.5).

Под нагрузкой обычно понимается ток нагрузки. Когда говорят, что «нагрузка отсутствует», то подразумевают, что именно ток нагрузки равен нулю. Сопротивление же нагрузки при этом, естественно, равно бесконечности. Следовательно, в режиме холостого хода (т. е. при отсутствии нагрузки) сопротивление нагрузки бесконечно велико.

Для анализа влияния сопротивления нагрузки R_H на основную характеристику датчика, полное сопротивление обмотки которого R , введем понятие коэффициента нагрузки $\beta = R_H/R$ и $\alpha = x/l$. Выходное напряжение датчика

$$U_{\text{вых}} = \frac{U\alpha}{1 + \alpha(1 - \alpha)\beta}. \quad (4.2)$$

По этому уравнению построим зависимость $U_{\text{вых}}/U = f(\alpha)$, где U — напряжение питания датчика, для различных значений β (рис. 4.6). С уменьшением сопротивления нагрузки характеристика датчика становится нелинейной и возрастает ошибка преобразования. Относительная погрешность для нагруженного датчика может быть найдена сопоставлением выражений (4.1) и (4.2):

$$\delta = \frac{U_{\text{вых}} - U_{\text{вых}\beta=\infty}}{U} = \frac{\alpha^2(1 - \alpha)}{\beta + \alpha(1 - \alpha)}.$$

Отношение перемещения движка x к длине намотки l обозначаем через $\alpha = x/l$. Если датчик не нагру-

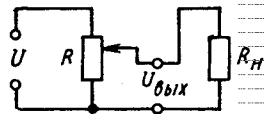


Рис. 4.5. Подключение нагрузки к потенциометрическому датчику

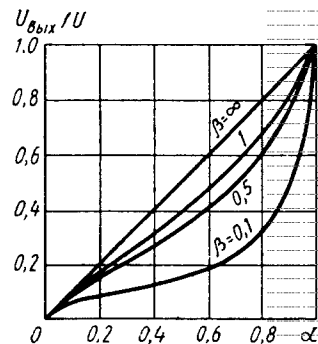


Рис. 4.6. Статические характеристики потенциометрического датчика

жен, т. е. сопротивление нагрузки $R_n = \infty$ и $\beta = \infty$, то выходное напряжение линейно возрастает при изменении α от 0 до 1; $U_{\text{вых}} = \alpha U$. Графически эта зависимость изображается прямой линией. При наличии сопротивления нагрузки R_n , соизмеримого с сопротивлением обмотки R , эта зависимость отличается от линейной, поскольку часть тока, проходящего через датчик, ответвляется в нагрузку. Ток, поступающий от источника питания,

$$I = U \left[(R - \alpha R) + \frac{\alpha R R_n}{\alpha R + R_n} \right],$$

или, подставляя $R_n = \beta R$, имеем

$$\begin{aligned} I &= U / \left[R(1 - \alpha) + \frac{\alpha \beta R^2}{R(\alpha + \beta)} \right] = U / \left[R \frac{(1 - \alpha)(\alpha + \beta) + \alpha \beta}{\alpha + \beta} \right] = \\ &= \frac{U}{R} \frac{\alpha + \beta - \alpha^2 - \alpha \beta + \alpha \beta}{\alpha + \beta} = \frac{U}{R} \frac{\alpha + \beta - \alpha^2}{\alpha + \beta}. \end{aligned}$$

На рис. 4.7 построены кривые 1, 2, характеризующие относительную погрешность датчика при $\beta = 1$; 0,5 соответственно. При больших β абсолютная величина максимальной погрешности $\delta_{\text{max}} = (4/27)\beta$ при $\alpha = 2/3$.

Важной характеристикой качества потенциметрического датчика является плавность изменения выходного напряжения. При перемещении движка по обмотке потенциметра происходит скачкообразное изменение сопротивления, поскольку движок как бы перескакивает с одного витка на другой. Это приводит к тому, что зависимость выходного напряжения от перемещения имеет ступенчатый вид (рис. 4.8). Число ступеней пропорционально, а их высота

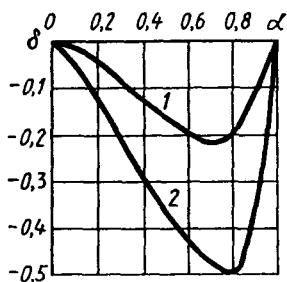


Рис. 4.7. Графики относительной погрешности потенциметрического датчика

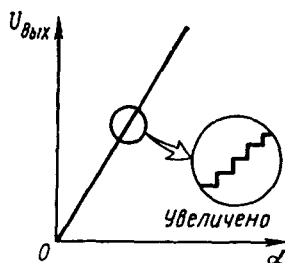


Рис. 4.8. Ступенчатость статической характеристики потенциметрического датчика

обратно пропорциональна числу витков обмотки. Реальная выходная характеристика имеет отклонения от идеальной (плавной, бесступенчатой) как вверх, так и вниз. Следовательно, погрешность, вызванная ступенчатостью, может быть как положительной, так и отрицательной и составляет половину напряжения U_v , приходящегося на один виток намотки. Если обозначить через ω общее число витков потенциометра, то $U_v = U/\omega$ и погрешность ступенчатости $\Delta \leq U/(2\omega)$. Для количественной оценки погрешности, обусловленной ступенчатостью, вводят понятие электрической разрешающей способности потенциометра δ_p . Разрешающая способность определяет максимально возможную точность работы потенциометрического датчика. Улучшить ее можно, увеличивая число витков ω . Для этого можно либо удлинить намотанную часть потенциометра l (при заданном диаметре провода), либо уменьшить сечение провода. Уменьшение диаметра провода приводит к технологическим трудностям изготовления обмотки, но, самое главное, снижает надежность потенциометра, поскольку ухудшается механическая прочность обмотки и она быстрее истирается.

Увеличение длины обмотки, естественно, приводит к увеличению размеров всего потенциометра. Для устранения этого недостатка были разработаны многооборотные потенциометры.

Для улучшения разрешающей способности можно также применять движки с несколькими токосъемными контактами. На рис. 4.9 показан движок с двумя контактами 1 и 2, которые касаются обмотки 3 в двух диаметрально противоположных точках. Наличие двух параллельных контактов повышает и надежность потенциометра.

Принципиально отсутствует погрешность, обусловленная ступенчатостью у датчиков типа реохорда, где движок скользит вдоль натянутой проволоки. Эти датчики имеют малое сопротивление и выходное напряжение, т. е. низкую чувствительность, поэтому в потенциометрических схемах включения они не нашли практического применения. Чувствительность датчика может быть определена как первая производная выходного напряжения по перемещению движка. Для ненагруженного потенциометра чувствительность потенциометра пропорциональна напряжению питания датчика и обратно пропорциональна длине намотки.

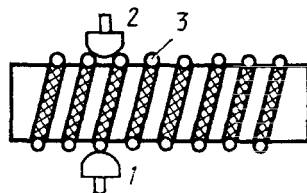


Рис. 4.9. Потенциометрический датчик с двумя токосъемными контактами

§ 4.4. Реверсивные потенциометрические датчики

Выходное напряжение реверсивных датчиков изменяет знак (полярность) при изменении знака входного сигнала. В системах автоматического регулирования обычно требуются именно реверсивные (или двухтактные) датчики.

Схемы реверсивных потенциометрических датчиков показаны на рис. 4.10. В схеме на рис. 4.10, а используется потенциометр с неподвижным выводом от средней точки намотки. Выходное напряжение снимается с движка и средней точки. При переходе движка через среднюю точку выходное напряжение изменяет свой знак: при питании переменным током фаза изменяется на 180° , а постоянным током — полярность изменяется на противоположную. В следящих системах широко используется мостовая схема включения потенциометрических датчиков, показанная на рис. 4.10, б. Потенциометр П1 связан с входной осью следящей системы и является задающим. Потенциометр П2 имеет механическую связь с исполнительным устройством. Выходное напряжение (или ток нагрузки) определяется разницей в положении движков потенциометров П1 и П2, т. е. соответствует сигналу ошибки следящей системы. Знак сигнала ошибки зависит от того, больше или меньше угол поворота исполнительного вала по сравнению с углом поворота входного вала.

Выходное напряжение рассматриваемых реверсивных схем может быть определено на основании теоремы об эквивалентном генераторе. Исследуемую систему представим как цепь, состоящую из четырехполюсника, источника питания с напряжением U_0 и сопротивления нагрузки R_H . Тогда на основании известного из электротехники метода можно утверждать, что схема ведет себя, как цепь, составленная из нагрузки R_H и генератора с внутренним сопротивлением $R_{\text{вых}}$ и электродвижущей силой E , равной напряжению холостого хода U_X . Сопротивление $R_{\text{вых}}$ равно выходному сопротивлению четырехполюсника, которое вычисляют при замкнутом источнике

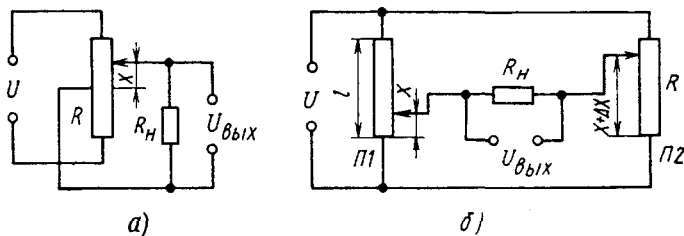


Рис. 4.10. Реверсивные схемы потенциометрических датчиков

ке питания и отключенной нагрузке. Напряжение U_x измеряется на выходе рассматриваемой схемы при отключенном сопротивлении нагрузки R_n . Для четырехполюсников по схемам рис. 4.10 выходное напряжение

$$U_{\text{вых}} = U_x R_n / (R_{\text{вых}} + R_n) \quad (4.3)$$

Например, для схемы, изображенной на рис. 4.10, а, имеем

$$U_x = U_n = U_0 \alpha / 2, \quad (4.4)$$

$$R_{\text{вых}} = R \alpha (1 - \alpha / 2) / 2. \quad (4.5)$$

Подставляя выражения (4.4) и (4.5) в формулу (4.3), получаем

$$U_{\text{вых}} = U_0 \alpha \beta / (\alpha - 0,5\alpha^2 + 2\beta), \quad (4.6)$$

где $\beta = R_n / R$.

Аналогичные вычисления позволяют получить для схемы рис. 4.10, б при одинаковых потенциометрах П1 и П2 уравнение выходного напряжения

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_0 \Delta \alpha \beta}{2\alpha(1 - \alpha) + \Delta \alpha(1 - 2\alpha - \Delta \alpha) + \beta}, \quad (4.7)$$

где $\Delta \alpha = \Delta x / l$ — относительное рассогласование движков потенциометров П1 и П2; $\alpha = x / l$ — относительное перемещение движка задающего потенциометра П1; $\beta = R_n / R$ — отношение сопротивления нагрузки R_n к полному сопротивлению потенциометра R .

На рис 4.11 и 4.12 показаны выходные характеристики реверсивных потенциометрических датчиков, построенные соответственно по уравнениям (4.6) и (4.7). Характеристики построены при различных значениях коэффициента нагрузки β . Расчетные характеристики при холостом ходе ($\beta = \infty$) представляют собой прямые линии, т. е. являются линейными. С уменьшением сопротивления нагрузки увеличивается отклонение характеристики от линейной. Чувствительность датчика со средней точкой (рис. 4.10, а), как следует из уравнения (4.6) и рис. 4.11, в области малых отклонений α практически не зависит от нагрузки и определяется равенством

$$S = \left. \frac{dU_{\text{вых}}}{d\alpha} \right|_{\alpha=0} = \frac{U_0}{2}. \quad (4.8)$$

Характеристики, изображенные на рис. 4.12, соответствуют мостовой схеме (см. рис. 4.10, б) и построены на основании формулы (4.7) для случая, когда движок задающего потенциометра установлен посередине его катушки и, следовательно, $\alpha = 0,5$, а относительное рассогласование движков $\Delta \alpha$ может изменяться в пределах от

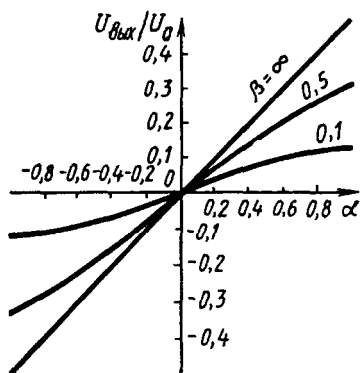


Рис. 4.11. Статические характеристики реверсивного датчика со средней точкой

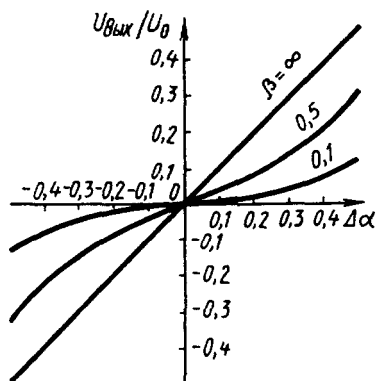


Рис. 4.12. Статические характеристики реверсивного датчика в мостовой схеме

-0,5 до +0,5. Чувствительность мостовой схемы зависит не только от нагрузки, но и от положения движка задающего потенциометра:

$$S = \left. \frac{dU_{\text{вых}}}{d(\Delta\alpha)} \right|_{\Delta\alpha=0} = \frac{U_0\beta}{2\alpha(1-\alpha) + \beta}. \quad (4.9)$$

Анализ этого уравнения показывает, что наименьшее значение чувствительности будет при $\alpha = 0,5$. Этому случаю и соответствуют характеристики, показанные на рис. 4.12.

В маломощных следящих системах в качестве нагрузки мостовой схемы может быть включен якорь исполнительного электродвигателя. При рассогласовании в положениях движков задающего и исполнительного потенциометров через якорь электродвигателя пойдет ток, значение которого будет соответствовать величине рассогласования ($\Delta\alpha$), а направление — знаку рассогласования. Электродвигатель перемещает исполнительную ось следящей системы до тех пор, пока не будет устранено рассогласование.

§ 4.5. Функциональные потенциометрические датчики

Для получения выходного сигнала, изменяющегося по определенному закону, применяют функциональные потенциометрические датчики. В этих датчиках зависимость сопротивления обмотки от перемещения движка является нелинейной. Требуемая нелинейность обеспечивается различными способами: изменением профиля

каркаса; изменением материала или размера провода; изменением шага намотки или длины витка.

Функциональные потенциометрические датчики нашли применение в автоматических вычислительных системах. Например, в автоматических навигационных системах самолетов и кораблей используются электромеханические счетно-решающие устройства, выполняющие операции умножения скорости на синус или косинус курсового угла. С помощью функциональных датчиков может быть компенсирована исходная нелинейность первичного чувствительного элемента. Например, в баке сложного профиля уровень горючего не связан линейно с объемом. С помощью функционального датчика можно обеспечить линейную зависимость между выходным сигналом датчика и количеством горючего в баке.

Чаще всего получение необходимой функциональной зависимости обеспечивается подбором определенного профиля каркаса потенциометра. Конструкция так называемого «профильного» потенциометрического датчика показана на рис. 4.13. Изоляционный каркас *1* имеет небольшую постоянную толщину *b*, а высота его *h* изменяется по длине намотки *l*. На каркас наматывается проволока *2* с высоким удельным сопротивлением. При входных сигналах в виде угловых перемещений каркас с непрерывной обмоткой изгибают в цилиндр. Напряжение питания подается на концы обмотки. Выходное напряжение $U_{\text{вых}} = f(x)$, функционально зависящее от перемещения движка *x*, снимается между одним из концов обмотки и движком (щеткой).

Вид функциональной зависимости $U_{\text{вых}} = f(x)$ определяется формой выреза каркаса потенциометра, т. е. зависимостью его профиля (конкретнее — высоты *h*) от перемещения движка *x*. Если намотка проволоки на каркас выполнена с постоянным шагом, т. е. равно-

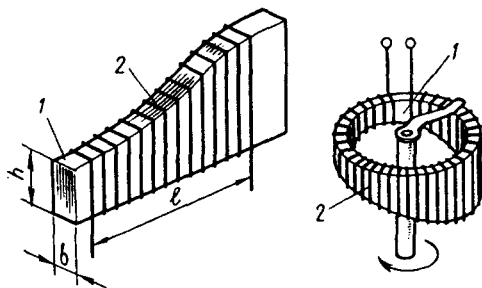


Рис. 4.13. Профильные функциональные потенциометрические датчики

мерно, и потенциометр работает в режиме, близком к холостому ходу ($R_n \gg R$; $\beta \rightarrow \infty$), то высота каркаса определяется по формуле

$$h = \frac{lqR}{2U\omega\rho} \frac{df(x)}{dx} - b = k \frac{df(x)}{dx} - b, \quad (4.10)$$

где l — длина намотки потенциометра; q — сечение провода; R — общее сопротивление намотки; U — напряжение питания; ω — число витков; ρ — удельное сопротивление материала провода; b — толщина каркаса.

Анализ этого уравнения показывает, что форма профиля каркаса зависит от производной функции, воспроизводимой при помощи данного датчика. Для определения нужного профиля каркаса надо продифференцировать по перемещению x заданную зависимость выходного напряжения.

Рассмотрим несколько примеров расчета профиля потенциометрических датчиков.

Пример 4.1. Определить форму профиля каркаса линейного потенциометра с выходной характеристикой $U_{\text{вых}} = cx$.

Решение. Производная выходного напряжения по перемещению $dU_{\text{вых}}/dx = c$. Высота каркаса по уравнению (4.10) равна $h = kc - b$. Все величины, входящие в это выражение, постоянны, значит, и высота каркаса h для линейного потенциометра должна быть постоянной.

Пример 4.2. Определить форму профиля каркаса функционального потенциометра с выходной характеристикой $U_{\text{вых}} = cx^2$.

Решение. Производная выходного напряжения по перемещению $dU_{\text{вых}}/dx = 2cx$. Высота каркаса $h = 2kcx - b$.

Для получения квадратичной функциональной зависимости форма каркаса должна быть треугольной с высотой h , возрастающей пропорционально перемещению x . Из (4.10) следует, что строгое выполнение зависимости $U_{\text{вых}} = f(x)$ из-за конечной толщины каркаса b может быть получено только от некоторого начального значения $x \neq 0$ при $l_{\text{min}} = b/(2kc)$. Если же l_{min} считать за начальную точку потенциометра, то график выходной характеристики будет начинаться не с нулевого значения, как это показано на рис. 4.14.

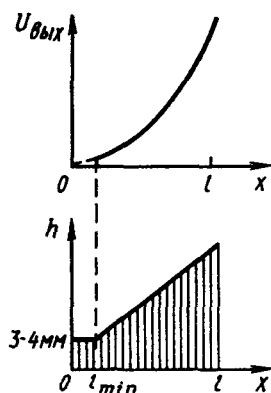


Рис. 4.14. Графики функционального потенциометра с квадратичной зависимостью

Пример 4.3. Определить форму профиля каркаса функционального потенциометра с выходной характеристикой $U_{\text{вых}} = c\sqrt{x}$.

Решение. Производная выходного напряжения по перемещению

$$dU_{\text{вых}}/dx = c/2\sqrt{x}.$$

Высота каркаса $h = kc/(2\sqrt{x}) - b$.

Из формул для h в примерах 4.2 и 4.3 следует, что при $x \rightarrow 0$ высота каркаса потенциометра, воспроизводящего функцию $f(x) = cx^2$, стремится к нулю, а при $f(x) = c\sqrt{x}$ — к бесконечности.

Изготовить каркасы с нулевой или бесконечной высотой невозможно. Из условий прочности и технологичности рекомендуется выбирать минимальную высоту каркаса $h_{\text{min}} = 3\div 4$ мм, а максимальную $h_{\text{max}} = 50\div 60$ мм.

Необходимую функциональную зависимость выходного напряжения можно получить только не от нулевого, а от некоторого начального значения перемещения x , не равного нулю при $l = l_{\text{min}}$. Следовательно, если принять за начальную точку потенциометра l_{min} , то вид зависимости $U_{\text{вых}} = f(x)$ будет начинаться не с нулевого значения (рис. 4.15).

Пример 4.4. Определить форму профиля каркаса функционального потенциометра с выходной характеристикой $U_{\text{вых}} = c \sin x$.

Решение. Производная выходного напряжения по перемещению

$$dU_{\text{вых}}/dx = c \cos x.$$

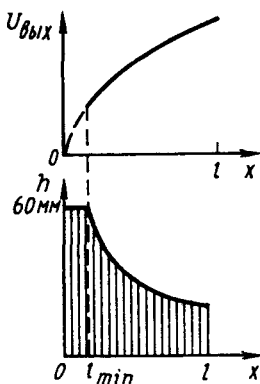


Рис. 4.15. Графики функционального потенциометра с корневозвлекающей зависимостью

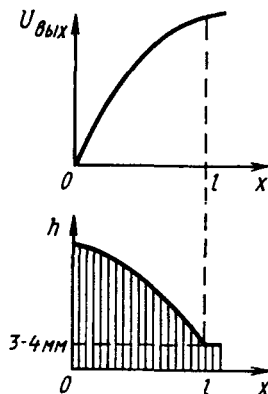


Рис. 4.16. Графики функционального потенциометра с синусоидальной зависимостью

Высота каркаса $h = kc \cos x - b$, т. е. профиль каркаса будет иметь вид косинусоиды (рис. 4.16).

Из формулы (4.10) и рассмотренных выше примеров построения потенциометров с необходимым профилем видно, что высота каркаса выражается функцией, которая пропорциональна производной заданной функции по перемещению.

Выполнить каркас и намотку профильного потенциометра технологически довольно трудно, поэтому в большинстве случаев для получения функциональной выходной характеристики применяют ступенчатые потенциометры.

При расчете ступенчатого функционального потенциометра кривую $U_{\text{вых}} = f(x)$ заменяют отрезками прямых (т. е. аппроксимируют). Нелинейная функция заменяется близкой к ней ломаной прямой. Количество отрезков берут таким, чтобы максимальное значение ошибки аппроксимации не превышало заданного определенного значения. При кусочно-линейной аппроксимации функциональный потенциометр как бы делится на несколько линейных потенциометров.

Пусть функция $f(x)$ задана в виде графика на рис. 4.17, а. Аппроксимируем ее приближенной ломаной 0123. Для получения такой функциональной зависимости выходного напряжения от перемещения можно изготовить потенциометр со ступенчатым каркасом (рис. 4.17, б). Высота участков h_1, h_2, h_3 выбирается таким образом, чтобы обеспечить заданные углы наклона $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ для линейных выходных характеристик на каждом из участков длиной l_1, l_2, l_3 .

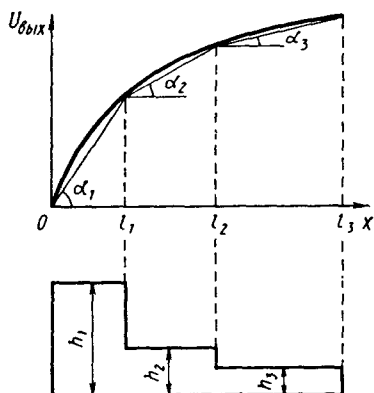


Рис. 4.17. Графики ступенчатого функционального потенциометра

Требуемую функциональную характеристику можно приближенно получить, применяя каркас постоянной высоты h с намоткой, которая на разных участках (l_1, l_2, l_3) выполняется разным шагом (рис. 4.18). Иногда на разных участках намотки используют провода различных сечений или материалов с отличающимися удельными сопротивлениями.

Довольно распространенным способом получения функциональной зависимости между выходным напряжением и перемещением является включение дополнительных постоянных резисторов, сопротив-

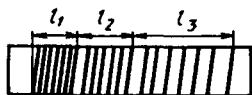


Рис. 4.18. Функциональный потенциометр с неравномерной намоткой

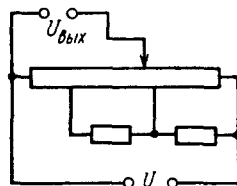


Рис. 4.19. Функциональный потенциометр с шунтирующими сопротивлениями

ление которых шунтирует участки намотки (рис. 4.19). На шунтированном участке наклон характеристики уменьшается, т. е. шунтирование равносильно уменьшению ширины каркаса.

Контрольные вопросы

1. Как устроен потенциометрический датчик?
2. Схема включения и принцип действия потенциометрического датчика.
3. Как зависит точность потенциометрического датчика от сопротивления нагрузки?
4. Что такое функциональный потенциометрический датчик?

Глава 5

ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

§ 5.1. Назначение. Типы тензодатчиков

Тензометрические датчики служат для измерения деформаций и механических напряжений в деталях машин и механизмов. Они могут также использоваться для измерения других механических величин (давления, вибрации, ускорения и др.), которые предварительно преобразуются в деформацию.

Работа тензодатчиков основана на изменении активного сопротивления материала при его механической деформации. В качестве материала тензодатчиков используются проводники (в виде проволоки, фольги или пленки) и полупроводники.

В данной главе рассматриваются проволочные, фольговые, пленочные и полупроводниковые тензодатчики, относящиеся к параметрическим датчикам. В них выходной сигнал формируется за счет изменения активного сопротивления. Поэтому их называют еще тензорезисторами. Для измерения деформаций используются и тензометрические датчики, основанные на других принципах: магнитоупругие датчики (рассмотрены в § 6.5) и струнные датчики (рассмотрены в гл. 11).

§ 5.2. Принцип действия проволочных тензодатчиков

Принцип работы проволочного тензодатчика основан на изменении активного сопротивления проволоки при ее деформации. Изменение активного сопротивления проволоки происходит по двум причинам: во-первых, изменяются геометрические размеры проволоки (длина l , сечение s); во-вторых, при деформации изменяется удельное сопротивление ρ материала проволоки. А эти величины и определяют активное сопротивление проволоки:

$$R = \rho l / s. \quad (5.1)$$

Рассмотрим (рис. 5.1) провод длиной l , радиусом r , сечением $s = \pi r^2$ и объемом $V = \pi r^2 l$, который при деформации (растяжении) под влиянием силы F получает удлинение dl и уменьшение радиуса dr . Следовательно, новый объем проволоки

$$V + dV = \pi (r - dr)^2 (l + dl). \quad (5.2)$$

Пренебрегая бесконечно малыми высших порядков [вида $(dr)^2$, $dr dl$], получим

$$V + dV \approx \pi r^2 + \pi r^2 dl - 2\pi r l dr,$$

откуда приращение объема

$$dV = \pi r^2 dl - 2\pi r l dr. \quad (5.3)$$

Преобразуем уравнение (5.3), помножив и поделив вычитаемое на rdl и заменив πr^2 на s :

$$\begin{aligned} dV &= s dl - 2\pi r l \frac{rdl}{rdl} = s dl - 2s dl \frac{dr}{rdl} = \\ &= s dl \left(1 - 2 \frac{dr/r}{dl/l} \right) = s dl (1 - 2\mu), \end{aligned} \quad (5.4)$$

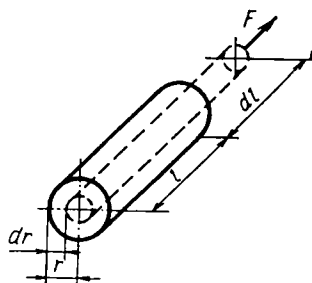


Рис. 5.1. Деформация провода

где $\mu = \frac{dr/r}{dl/l}$ — коэффициент Пуассона, характеризующий изменение

размеров проволоки при растяжении; для металлов $\mu = 0,24 \pm 0,5$. Если бы материал не изменял объем при растяжении, то $dV = 0$ и $\mu = 0,5$. Таким образом, реальные металлы изменяют свой объем, а следовательно, они претерпевают и внутрискруктурные изменения: очевидно меняется плотность материала и его удельное сопротивление.

Для определения изменения сопротивления проволоки при растяжении продифференцируем уравнение (5.1), полагая, что все входящие в него члены зависят от усилия F .

Напомним формулу для дифференцирования произведения функций

$$d[v(x)u(x)] = v(x)du(x) + u(x)dv(x)$$

и для дифференцирования частного функций

$$d\left[\frac{v(x)}{u(x)}\right] = \frac{u(x)dv(x) - v(x)du(x)}{[u(x)]^2}$$

Используя эти правила дифференцирования, записываем:

$$\begin{aligned} dR &= \frac{sd(\rho l) - \rho l ds}{s^2} = \frac{spdl}{s^2} + \frac{s/dp}{s^2} - \frac{\rho l ds}{s^2} = \\ &= \frac{\rho dl}{s} + \frac{l dp}{s} - \frac{\rho l ds}{s^2}. \end{aligned} \quad (5.5)$$

Продифференцируем также выражение для объема проволоки $V = \pi r^2 l = ls$:

$$dV = l ds + s dl. \quad (5.6)$$

Сравнивая (5.6) и (5.4), получаем

$$l ds = -s dl / 2\mu. \quad (5.7)$$

Подставляя (5.7) в (5.5), имеем

$$dR = \frac{\rho dl}{s} + \frac{l dp}{s} + \frac{\rho 2\mu dl}{s}. \quad (5.8)$$

Выражение для относительного изменения сопротивления получим, разделив (5.8) на (5.1):

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} + \frac{dp}{\rho} + 2\mu \frac{dl}{l} = \frac{dl}{l} (1 + 2\mu) + \frac{dp}{\rho}. \quad (5.9)$$

Чувствительность проволочного тензодатчика определяем как отношение величины относительного изменения сопротивления по (5.9) к относительному изменению линейного размера:

$$S_n = \frac{dR/R}{dl/l} = 1 + 2\mu + \frac{l}{\rho} \frac{d\rho}{dl}. \quad (5.10)$$

Обозначим третье слагаемое в (5.10) через коэффициент m , учитывающий изменение удельного сопротивления, связанное с изменением размеров

$$m = \frac{d\rho/\rho}{dl/l}.$$

Тогда чувствительность

$$S_n = \frac{dR/R}{dl/l} = 1 + 2\mu + m. \quad (5.11)$$

Слагаемое $(1 + 2\mu)$ для металлов может иметь максимальное значение 1,8 (при $\mu = 0,4$). Но чувствительность для некоторых сплавов превышает 2. Это как раз и означает, что $m > 0$, т. е. при деформации изменяется удельное сопротивление.

В табл. 5.1 приведены характеристики некоторых сплавов, используемых для проволочных тензодатчиков. Следует иметь в виду, что деформация не является единственной причиной изменения сопротивления тензодатчика. Сопротивление меняется и в зависимости от температуры. Это явление используется в термосопротивлениях (см. гл. 9). Очевидно, для уменьшения температурной погрешности тензодатчика его материал должен иметь высокую чувствительность S_n при малом температурном коэффициенте расширения и малом значении термоЭДС при контакте с медными соединительными проводами. В табл. 5.1 приведены пределы изменения характеристик материалов проволочных тензодатчиков, поскольку эти характеристики зависят не только от состава сплава, но и от технологии изготовления.

Тензочувствительность полупроводников во много раз больше тензочувствительности металлов.

§ 5.3. Устройство и установка проволочных тензодатчиков

Устройство наиболее распространенного проволочного тензодатчика показано на рис. 5.2. На полосу тонкой прочной бумаги наклеена уложенная зигзагообразно тонкая проволока.

Таблица 5.1. Характеристики сплавов для проволочных тензодатчиков

Материал (его состав)	Относительная чувствительность $\frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}$	Температурный коэффициент сопротивления, 1/1°C	Удельное сопротивление, Ом·мм ² /м	ТермоЭДС в паре с медью, мкВ/1°C	Предел прочности	Температурный коэффициент линейного расширения, 1/1°C
Константан (медь, никель)	1,9–2,1	(-5÷+5) · 10 ⁻⁵	0,46–0,50	47	650	14–15
Нихром (никель, хром)	2,0	(15÷17) · 10 ⁻⁵	0,9–1,7	25	–	14
Железохромалюминиевый сплав	2,8–2,9	(0,7÷2) · 10 ⁻⁵	1,35–1,55	5–6	1200	–
Манганин (медь, марганец, никель)	0,47–0,5	(-3÷+2) · 10 ⁻⁵	0,4–0,45	2	–	16–18
Хромель (никель, железо, хром)	2,5	(10÷50) · 10 ⁻⁵	0,7–1,1	16	–	14,8

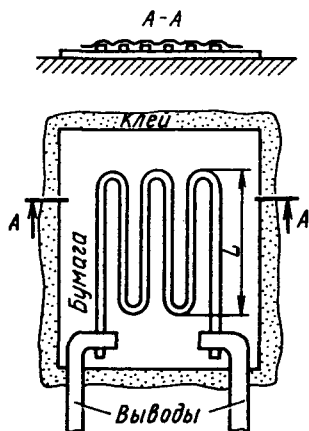


Рис. 5.2. Проволочный наклеиваемый тензодатчик

К концам проволоки с помощью пайки или сварки присоединены выводы из медной фольги, с помощью которых датчик подключен в измерительную цепь. Сверху проволока также защищена от внешних воздействий тонкой бумагой. Тензодатчик приклеивают к испытуемой детали, благодаря чему деформацию детали воспринимает проволочная решетка. Длина детали, занимаемая проволокой, называется измерительной базой датчика L .

Для того чтобы получить наибольшее изменение сопротивления датчика, его надо расположить в направлении действия деформирующего усилия (сжатия или растяжения), т. е. направление

измерительной базы должно совпадать с осью, по которой направлено усилие. Если же направления базы и усилия взаимно перпендикулярны, то деформация и изменение сопротивления очень малы. Если расположить несколько датчиков под углом друг к другу, то можно определить не только величину деформации, но и направление приложенных к детали усилий.

Приклейка датчика к детали — очень важная технологическая операция. Качество ее выполнения сильно влияет на точность и надежность работы тензодатчика. Перед приклейкой производят тщательную очистку и обезжиривание поверхности детали. Наиболее часто для приклейки используются бакелито-фенольные клеи: БФ-2 для температуры до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и кислой среды; БФ-4 для температуры до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и щелочной среды. Сушка проводится при повышенных температурах в течение часа. Для защиты от влаги используют парафиновые и другие покрытия. Разработаны специальные клеи (на кремнийорганической основе) и покрытия для использования тензодатчиков при температурах до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При выборе измерительной схемы для тензодатчиков необходимо учитывать два обстоятельства. Во-первых, проволочные тензодатчики имеют малое относительное изменение сопротивления ($\Delta R/R < 1\%$). Для увеличения чувствительности применяют мостовые схемы с двумя или четырьмя одинаковыми датчиками, наклеиваемыми на испытуемую деталь таким образом, что датчик, включенный в одно плечо моста, работает на сжатие, а датчик, включенный в смежное плечо моста, работает на растяжение. Во-вторых,

необходимо принимать меры для компенсации температурной погрешности. Мостовая схема включения тензодатчиков с компенсацией температурной погрешности показана на рис. 5.3, а.

Рабочий датчик с сопротивлением R_p наклеивается в направлении действия усилия, а другой — компенсационный — датчик с сопротивлением R_k наклеивается в перпендикулярном направлении. Датчики R_p и R_k находятся в одинаковых тепловых условиях. При деформации детали изменяется сопротивление только датчика R_p . А при изменении температуры в одинаковой степени изменяются сопротивления R_p и R_k . Поэтому при деформации нарушается баланс моста ($R_1 R_k = R_2 R_p$) и появляется выходной сигнал ΔU , пропорциональный усилию или деформации. При изменении температуры баланс моста не нарушается.

На рис. 5.3, б показана мостовая схема включения тензодатчиков повышенной чувствительности, а на рис. 5.3, в показаны места крепления тензодатчиков. В противоположные плечи моста R_1 и R_3 включены датчики, работающие на растяжение (приклеенные к верхней поверхности изгибающейся под действием силы F пластины). А в плечи моста R_2 и R_4 включены датчики, работающие на сжатие (приклеенные к нижней поверхности пластины). Условие баланса моста ($R_1 R_3 = R_2 R_4$) при деформации пластины нарушается весьма сильно: R_1 и R_3 увеличиваются, R_2 и R_4 уменьшаются. Поэтому выходной сигнал мостовой схемы ΔU значительно больше, чем при одном изменяющемся плече моста. Чувствительность при этом повышается примерно в четыре раза. Одновременно такая схема обеспечивает и температурную компенсацию.

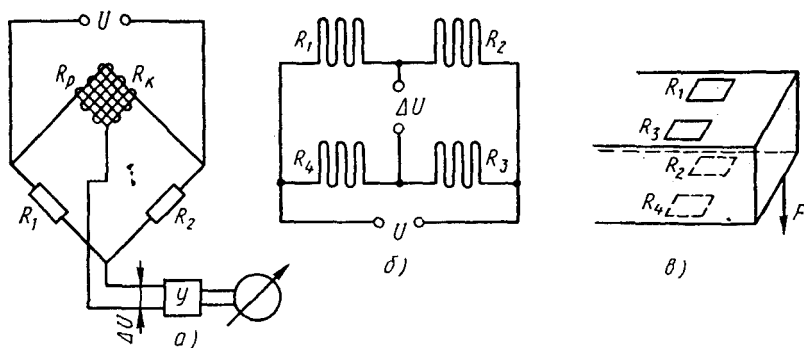


Рис. 5.3. Схемы включения и места крепления тензодатчиков

По конструктивным параметрам тензодатчики подразделяются на датчики с малой базой ($L = 0,4 \div 4$ мм); со средней базой ($L = 4 \div 25$ мм); с большой базой ($L > 25$ мм). Активное сопротивление датчиков с малой базой 5—100 Ом, со средней базой 100—400 Ом, с большой базой до 1000 Ом. Ширина датчиков от 3 до 60 мм. Длина выводов датчиков составляет 20—80 мм. Относительная чувствительность проволочных тензодатчиков зависит от материала проволоки: для константана $S_d = 1,9 \div 2,1$; для элинвара $S_d = 6 \div 8,5$ (см. табл. 5.1).

§ 5.4. Фольговые, пленочные, угольные и полупроводниковые тензодатчики

Фольговые тензодатчики изготовляют методом фотохимического травления. Решетка такого датчика выполняется из разных сплавов (медь с никелем, серебро с золотом и др.), которые обеспечивают достаточную чувствительность и в то же время имеют надежное сцепление (адгезию) с изоляционной основой, на которой выполняется датчик.

Пленочные тензодатчики изготовляют путем напыления слоя германия, теллура, висмута или сульфида свинца на эластичное изоляционное основание из слюды или кварца.

В отличие от проволочных, фольговые и пленочные тензодатчики имеют решетку не круглого, а прямоугольного сечения с очень большим отношением ширины к высоте. По сравнению с проволочными они имеют ряд преимуществ. Благодаря большой площади соприкосновения токопроводящих полосок датчика с деталью обеспечиваются хорошие условия теплоотдачи. Это позволяет в несколько раз повысить плотность тока фольговых датчиков и в десятки раз — плотность тока пленочных датчиков (до 10^3 А/мм²). Благодаря большому отношению периметра сечения плоской полосы к площади ее сечения улучшается восприимчивость к деформации и точность ее измерения. Чувствительность пленочных датчиков достигает 50. Благодаря увеличенному сечению концов фольговой и пленочной решетки увеличивается надежность пайки (или приваривания) выводов датчика.

Фольговые датчики имеют толщину проводящего покрытия 3—15 мкм. Сопротивление фольговых датчиков находится в пределах от 30 до 300 Ом. Фотохимический способ позволяет выполнить любой рисунок решетки, что также является достоинством фольговых датчиков. На рис. 5.4 показаны различные типы фольговых

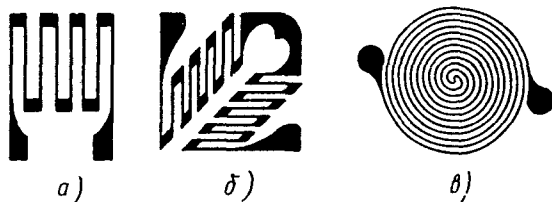


Рис. 5.4. Фольговые тензодатчики

тензодатчиков: *a* — предназначен для измерения линейных перемещений; *б* — розетка из двух датчиков, позволяющая измерять деформации в двух взаимно перпендикулярных направлениях; *в* — датчик, предназначенный для наклеивания на мембрану и измерения давления.

Для измерения механических усилий и напряжений используются и угольные датчики. Их работа основана на зависимости активного сопротивления угольных (или графитовых) контактов от силы контактного сжатия. Устройство угольного датчика показано на рис. 5.5, *a*. Угольные диски 3 зажимаются между прижимным винтом 6 и упором 5, воспринимающим измеряемое усилие F . Давление на угольные диски 3 передается через металлические диски 1, изоляционные прокладки 4 и медные прокладки 2, имеющие выводы для включения датчика в измерительную схему.

Активное сопротивление R_d угольного столбика складывается из внутреннего сопротивления шайбы R_i и переходного контактного сопротивления между шайбами R_k :

$$R_d = R_i + R_k. \quad (5.12)$$

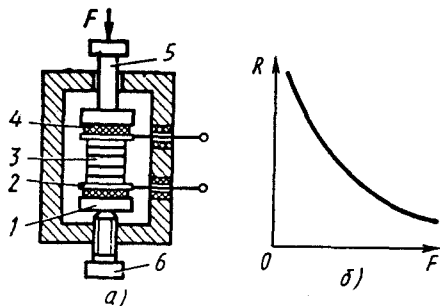


Рис. 5.5. Угольный датчик для измерения усилия

Внутреннее сопротивление диска определяется электрическими свойствами материала дисков и не зависит от усилия F . Удельное сопротивление электродных углей составляет, например, 30—150 Ом·мм²/м. Переходное контактное сопротивление зависит от усилия F следующим образом:

$$R_k = 1/(kF), \quad (5.13)$$

где k — коэффициент, зависящий от свойств материала шайб. Подставляя (5.12) в (5.13), получим

$$R_d = R_i + 1/(kF). \quad (5.14)$$

Зависимость сопротивления угольного датчика от усилия показана на рис. 5.5, б. Характеристика имеет небольшую петлю гистерезиса при прямом и обратном ходе из-за некоторого залипания угольных дисков. При небольших усилиях ($F < F_0$) из-за слабого контакта между дисками статическая характеристика угольного датчика имеет зону неопределенности. Для устранения этой зоны неопределенности и служит прижимный винт б, обеспечивающий начальное усилие сжатия F_0 .

Для измерения упругих деформаций используются угольные датчики тензолитового типа. Изготавливаются они из угольного (графитового) порошка или сажи, смешанной с изолирующим лаком (бакелит или шеллак). Такая масса называется тензолитом.

Выполняются угольные тензометрические датчики (рис. 5.6) в виде стержней 1 диаметром около 1 мм с медными выводами. На контролируемую деталь наклеивают полоску изоляционной бумаги 2, а к бумаге приклеивают стержень. При деформации детали стержень также деформируется. Происходит изменение плотности контакта, между частицами угля, и, следовательно, сопротивление датчика изменяется: при сжатии — уменьшается, при растяжении — увеличивается.

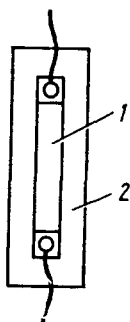


Рис. 5.6. Тензолитовый угольный датчик

Относительная чувствительность тензолитового датчика определяется, как и для волоочных тензодатчиков, по формуле $S_d = \frac{dR/R}{dl/l}$. Она не является постоянной величиной из-за нелинейной зависимости $R_d = f(F)$ (см. рис. 5.5, б) и может достигать больших величин (до 20).

В полупроводниковых тензодатчиках используются кристаллические полупроводниковые материалы. Принцип действия их такой же, как

и у проволочных тензодатчиков: изменение активного сопротивления из-за механической деформации самого проводника и изменения удельного сопротивления. Но если в металлических проводниках главным является изменение размеров [коэффициент μ в уравнении (5.11)], то в металлических полупроводниках главным является изменение удельного сопротивления [коэффициент m в уравнении (5.11)].

Наиболее заметен тензоэффект в таких полупроводниках, как германий Ge, кремний Si, соединения индия In, галлия Ga. Для них можно на практике считать, что $S_d \approx m$. Чувствительность полупроводникового тензодатчика зависит от ориентировки действия сил (кристаллографического направления). Влияют на чувствительность также наличие примесей и температура.

Наибольшее распространение получили германиевые и кремниевые тензодатчики, причем последние способны работать при высоких температурах (до 540 °С) и больших механических нагрузках.

§ 5.5. Методика расчета мостовой схемы с тензодатчиками

Расчет мостовой схемы с тензодатчиками выполняется на основе следующих исходных данных: максимальное усилие F ; чувствительность S_d ; сопротивление датчика R_d ; сопротивление измерительного прибора, или входное сопротивление усилителя, $R_{пр}$; допустимый ток элементов схемы I ; размеры испытуемой детали и модуль упругости E ее материала.

Эскиз крепления тензодатчика на консольной балке шириной b и толщиной h показан на рис. 5.7.

Расчет выполняется в такой последовательности:

1. Прогиб балки под действием силы F , приложенной на расстоянии L от места закрепления

$$\theta = -FL^3/(3FJ), \quad (5.15)$$

где J — осевой момент инерции; $J = bh^3/12$.

2. Относительное удлинение балки

$$\lambda = 6LF/(Ebh^2). \quad (5.16)$$

3. Относительное изменение сопротивления датчика

$$\varepsilon = \Delta R/R = S_d \lambda. \quad (5.17)$$

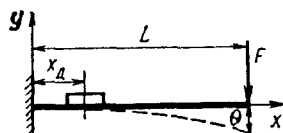


Рис. 5.7. Крепление тензодатчика на консольной балке

4. Общая чувствительность измерения

$$S_{\text{из}} = \Delta\alpha / (R\epsilon), \quad (5.18)$$

где $\Delta\alpha$ — используемая шкала прибора. Желательно использовать всю шкалу прибора, что позволит полностью реализовать точность измерительного прибора.

5. Необходимая чувствительность мостовой схемы: для схемы с двумя датчиками

$$S_{\text{сх}} = S_{\text{из}} / (2S_{\text{пр}}), \quad (5.19a)$$

для схемы с четырьмя датчиками

$$S_{\text{сх}} = S_{\text{из}} / (4S_{\text{пр}}), \quad (5.19б)$$

где $S_{\text{пр}}$ — чувствительность измерительного прибора.

6. Затем по методике, изложенной в гл. 2, на основании (2.16) находим функцию коэффициентов m , n , q , которые выражают соотношение сопротивлений плеч моста и измерительного прибора:

$$f(m, n, q) = S_{\text{сх}} R_d^2 / U. \quad (5.20)$$

7. Определяем коэффициенты q и m : $q = R_{\text{пр}} / R_d$; $m = 1$ (для двух датчиков).

8. Необходимое значение коэффициента n находим по номограмме, построенной для полученных значений q и m аналогично рис. 2.4. Полученное значение чувствительности сопоставляется с формулой (5.20), и решается вопрос об использовании всей шкалы прибора.

Значение коэффициента n не должно превышать определенного предела, при котором ток не превышает допустимого значения при напряжении питания мостовой схемы U .

9. При измерении динамических деформаций частота питания должна быть в 5—10 раз выше частоты измеряемой деформации. При измерении деформаций частотой более 1 кГц мост обычно питают постоянным током.

10. Если невозможно обеспечить требуемую точность измерения, то применяют методы тарировки (градуировки) измерительного прибора по образцовому прибору.

Контрольные вопросы

1. Почему сопротивление проволоки изменяется при деформации?
2. Какими преимуществами обладают фольговые и пленочные тензодатчики по сравнению с проволочными?
3. Из каких материалов чаще всего делают проволочные и полупроводниковые тензодатчики?

Глава 6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ДАТЧИКИ

§ 6.1. Назначение. Типы электромагнитных датчиков

Электромагнитные датчики предназначены для преобразования перемещения в электрический сигнал за счет изменения параметров электромагнитной цепи. Эти изменения могут заключаться, например, в увеличении или уменьшении магнитного сопротивления R_m магнитной цепи датчика при перемещении сердечника. Если перемещается не сердечник, а обмотка, то происходит изменение потокоцепления обмотки. Таким образом, изменения в электромагнитной цепи датчика могут быть вызваны как перемещением элемента магнитной цепи (сердечника или якоря), так и перемещением элемента электрической цепи (обмотки). В результате таких перемещений изменяется индуктивность обмотки L или ее взаимоиндуктивность M с обмоткой возбуждения. Поэтому в технической литературе электромагнитные датчики часто называют *индуктивными*.

Электромагнитные датчики обычно рассматривают как параметрические, поскольку величины L и M зависят от перемещения x : $L = f(x)$, $M = f(x)$. Но электромагнитные датчики с изменяющейся взаимоиндуктивностью можно отнести и к генераторному типу, поскольку в результате изменяется и ЭДС обмотки, т. е. $E = f(x)$.

Так как ЭДС в выходной обмотке появляется за счет изменения коэффициента взаимоиндукции с обмоткой возбуждения, то такие электромагнитные датчики называют *трансформаторными*. Ведь обмотку возбуждения можно рассматривать как первичную обмотку трансформатора, а выходную обмотку — как вторичную. К генераторным относятся и *индукционные датчики*, в обмотках которых генерируется ЭДС в зависимости от скорости перемещения: $E = f(dx/dt)$.

С помощью электромагнитных датчиков можно автоматически измерять механические силы, давление, температуру, свойства магнитных материалов, определять внутренние полости и трещины в деталях (дефектоскопия), толщину немагнитных покрытий на стали, расход жидкостей и газов в трубопроводах и др.

Электромагнитные датчики имеют следующие достоинства: простота и дешевизна конструкции, механическая прочность, высокая надежность за счет возможности съема выходного сигнала без скользящих контактов, возможность питания от промышленной

сети частотой 50 Гц, возможность получения достаточно высокой мощности выходного сигнала, возможность работы как в диапазоне малых (доли мм), так и больших (метры) перемещений.

К недостаткам электромагнитных датчиков следует отнести влияние на выходной сигнал внешних электромагнитных полей и частоты питающего напряжения, а также возможность работы только на переменном токе (питание постоянным током возможно лишь для индукционных датчиков, рассмотренных в § 6.6).

Изменение индуктивности и взаимоиндуктивности может происходить и под влиянием механических напряжений в сердечнике электромагнитного датчика. Такие напряжения приводят к изменению магнитной проницаемости ферромагнитного материала сердечника. Электромагнитные датчики, основанные на таком физическом явлении, называются *магнитоупругими* датчиками.

Электромагнитные датчики (индуктивные, трансформаторные, индукционные, магнитоупругие) получили широкое распространение в системах автоматики.

§ 6.2. Принцип действия и основы расчета индуктивных датчиков

Простейший индуктивный датчик представляет собой дроссель с переменным воздушным зазором в магнитопроводе. На рис. 6.1 показаны две наиболее распространенные конструктивные схемы индуктивных датчиков на одном сердечнике. Это одинарные индуктивные датчики. На сердечнике 1 из электротехнической стали размещена обмотка 2, подключаемая к источнику переменного напряжения. Магнитный поток в сердечнике замыкается через якорь 3, который может перемещаться относительно сердечника 1. Якорь 3 механически связан с деталью, перемещение которой необходимо измерить. Эта деталь на рисунке не показана, но перемещение x ее может происходить в вертикальном (рис. 6.1, *а*) или в горизонтальном направлении (рис. 6.1, *б*). Перемещение якоря изменяет магнитное сопротивление магнитной цепи, состоящей из сердечника, якоря и воздушного зазора δ . Следовательно, изменится индуктивность обмотки 2. Поскольку эта обмотка включена на переменное напряжение, ток в обмотке 2 будет определяться ее полным сопротивлением, в которое входит и индуктивное сопротивление. С увеличением воздушного зазора магнитное сопротивление увеличивается, а индуктивность, индуктивное и полное сопротивления

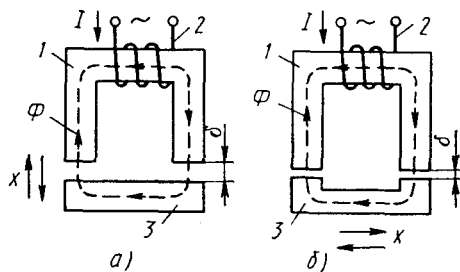


Рис. 6.1. Простые индуктивные датчики

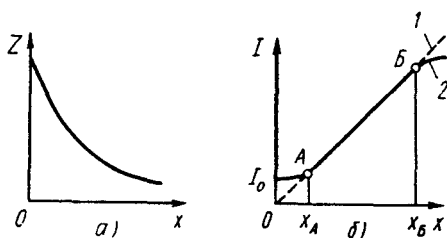


Рис. 6.2. Характеристики индуктивного датчика

уменьшаются (рис. 6.2, а). Следовательно, ток в обмотке увеличивается (рис. 6.2, б). Полагая ток I в обмотке за выходной сигнал датчика, а перемещение x — за входной сигнал, имеем выходную статическую характеристику в виде графика $I = f(x)$.

Найдем выражение, определяющее зависимость тока в обмотке датчика от перемещения. Анализ проведем применительно к конструктивной схеме, показанной на рис. 6.1, а. В этом случае приращение перемещения x всегда равно приращению зазора δ , поэтому нам необходимо получить математическую зависимость тока I от зазора δ : $I = f(\delta)$.

Пусть обмотка датчика включена на напряжение питания; $u = \sqrt{2}U \sin \omega t$, где U — действующее значение напряжения, ω — угловая частота, рад/с. По закону Ома, действующее значение тока в обмотке

$$I = U/z, \quad (6.1)$$

где z — полное сопротивление обмотки датчика, Ом, состоящее из активного R и индуктивного X_L сопротивлений: $z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$. Индуктивное сопротивление X_L пропорционально индуктивности L и

частоте питания f : $X_L = 2\pi fL = \omega L$. (Напомним, что $\omega = 2\pi f$.) После подстановки имеем

$$z = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}. \quad (6.2)$$

Индуктивность обмотки датчика с числом витков ω

$$L = \omega\Phi/I, \quad (6.3)$$

где Φ — магнитный поток сердечника, Вб. Принимаем, что весь магнитный поток проходит через воздушный зазор, т. е. потоки рассеяния отсутствуют. Тогда

$$\Phi = I\omega/R_M. \quad (6.4)$$

Здесь R_M — магнитное сопротивление магнитопровода датчика, Гн^{-1} . Это сопротивление складывается из сопротивления стали сердечника и якоря $R_{ст}$ и сопротивления воздушного зазора R_B :

$$R_M = R_{ст} + R_B. \quad (6.5)$$

Сопротивление воздушного зазора пропорционально удвоенной длине воздушного зазора δ , поскольку магнитный поток проходит через воздушный зазор дважды:

$$R_B = 2\delta/(\mu_0 s_M), \quad (6.6)$$

где s_M — поперечное сечение воздушной части магнитопровода, равное активной площади поперечного сечения сердечника в зоне воздушного зазора, м^2 ; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная проницаемость вакуума (магнитная постоянная).

После подстановки (6.5) и (6.6) в (6.4) получим выражение для магнитного потока:

$$\Phi = \frac{I\omega}{R_{ст} + 2\delta/(\mu_0 s_M)}. \quad (6.7)$$

Выражение для индуктивности получаем подстановкой (6.7) в (6.3):

$$L = \frac{\omega^2}{R_{ст} + 2\delta/(\mu_0 s_M)}. \quad (6.8)$$

Индуктивное сопротивление обмотки

$$X_L = \omega L = \frac{\omega\omega^2}{R_{ст} + 2\delta/(\mu_0 s_M)}. \quad (6.9)$$

Полное сопротивление обмотки

$$z = \sqrt{R^2 + \omega^2 \left[\frac{\omega^2}{R_{\text{ст}} + 2\delta/(\mu_0 s_m)} \right]^2}. \quad (6.10)$$

Анализ формулы (6.10) показывает, что с увеличением воздушного зазора (а следовательно, и перемещения) полное сопротивление уменьшается, стремясь в пределе к величине активного сопротивления обмотки R . Зависимость полного сопротивления z от величины зазора δ показана на рис. 6.2, а. Ток в обмотке датчика

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 \left[\frac{\omega^2}{R_{\text{ст}} + 2\delta/(\mu_0 s_m)} \right]^2}}. \quad (6.11)$$

Если входным сигналом датчика считать перемещение якоря x от начального положения при $\delta = 0$ в сторону увеличения зазора (по рис. 6.1, а), то формула после замены δ на x представляет собой статическую характеристику одинарного индуктивного датчика, т. е. $I = f(x)$. График статической характеристики показан на рис. 6.2, б. Как видно из анализа формулы (6.11) и графика, зависимость $I = f(x)$ имеет нелинейный характер. Однако на графике можно выделить участок AB , на котором соблюдается прямая пропорциональность между входным и выходным сигналами. Этот участок называется рабочим, датчик используется именно в диапазоне входных сигналов от x_A до x_B . Следовательно, датчик всегда имеет некоторый воздушный зазор, не меньший x_A . В большинстве конструкций индуктивных датчиков магнитопровод ненасыщен и магнитная проницаемость материала сердечника весьма велика. Поэтому магнитное сопротивление воздушного зазора (уже при $\delta = x_A$) значительно больше магнитного сопротивления стального сердечника, т. е. $R_B \gg R_{\text{ст}}$.

Пренебрегая величиной $R_{\text{ст}}$ в формуле (6.9), получаем упрощенное выражение для индуктивного сопротивления (с учетом $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м):

$$X_L = \frac{\omega^2}{2\delta/(4\pi \cdot 10^{-7} s_m)} = \frac{2\pi\omega^2 s_m}{\delta} \cdot 10^{-7}. \quad (6.12)$$

В этом же диапазоне изменения воздушного зазора от x_A до x_B активное сопротивление R значительно меньше индуктивного сопротивления X_L : $R \ll X_L$.

Пренебрегая в (6.2) величиной R , с учетом (6.12) получаем приближенное выражение статической характеристики индуктивного датчика

$$I = \frac{10^7 U}{2\pi\omega^2 s_m} x = Kx, \quad (6.13)$$

где K — коэффициент передачи, определяемый напряжением и частотой питания, конструктивными размерами сердечника и числом витков обмотки датчика:

$$K = \frac{10^7 U}{2\pi\omega^2 s_m}.$$

Таким образом, в некотором диапазоне изменения входного сигнала $x_A \leq x \leq x_B$ статическая характеристика индуктивного датчика является линейной с постоянным коэффициентом передачи.

График такой статической характеристики имеет вид прямой линии (штриховая линия 1 на рис. 6.2, б). Это идеальная характеристика датчика. Реальная характеристика (сплошная линия 2 на рис. 6.2, б) совпадает с идеальной на рабочем участке AB . Проанализируем причины отклонения реальной характеристики от идеальной.

В зоне $x < x_A$ воздушный зазор очень мал и его магнитное сопротивление становится соизмеримым с магнитным сопротивлением стальных сердечника и якоря. Реальная характеристика начинается не от нуля, поскольку даже при $\delta = 0$ индуктивное сопротивление не может быть равно бесконечности. Следовательно, некоторый ток будет протекать по обмотке, выполненной даже на замкнутом магнитопроводе. Для уменьшения значения начального тока I_0 используют для сердечника и якоря индуктивного датчика материалы с высоким значением магнитной проницаемости.

В зоне $x > x_B$ индуктивное сопротивление обмотки уже настолько уменьшается, что становится соизмеримым с активным сопротивлением обмотки, которое и ограничивает нарастание тока. Следует также отметить, что при больших зазорах часть магнитного потока уже не замыкается через якорь, а замыкается непосредственно по воздуху.

На практике диапазон изменения воздушного зазора для индуктивных датчиков по рис. 6.1, а не превышает 4—5 мм. Значительно больший диапазон изменения входного сигнала (перемещения) имеют индуктивные датчики по рис. 6.1, б. Такие датчики имеют близкую к линейной статическую характеристику при перемещении якоря до 10—15 мм.

Величину начального воздушного зазора δ_0 (т. е. исходное положение якоря, при котором входной сигнал равен нулю) рекомендуется выбирать в середине линейного участка статической характеристики датчика. Оценим чувствительность индуктивного датчика при включении его в одно плечо мостовой измерительной схемы в качестве переменного сопротивления. Питание моста осуществляется напряжением переменного тока. В этом случае чувствительность представляет собой относительное изменение сопротивления, деленное на приращение величины воздушного зазора:

$$S_d = \frac{\Delta z/z}{\Delta \delta}, \quad (6.14)$$

где $\Delta \delta$ — приращение величины воздушного зазора, вызывающее изменение полного сопротивления обмотки датчика z на Δz .

Пренебрегая $R \ll X_L$, имеем $z = \omega L$. Возьмем производную полного сопротивления по перемещению при $\omega = \text{const}$

$$dz/d\delta = \omega dL/d\delta. \quad (6.15)$$

Подставим в (6.15) значение индуктивности из (6.9), пренебрегая $R_{\text{ст}}$:

$$\frac{dz}{d\delta} = -\frac{\omega \omega^2 \mu_0 s_m}{2\delta^2},$$

или, переходя к конечным приращениям,

$$\frac{\Delta z}{\Delta \delta} = -\omega \omega^2 \mu_0 s_m / (2\delta^2). \quad (6.16)$$

Поделив (6.16) на $z = \omega L$, получим выражение для чувствительности:

$$S_d = \left| \frac{\Delta z/\Delta \delta}{z} \right| = \frac{\omega \omega^2 \mu_0 s_m}{2\delta^2 \omega L} = \frac{\omega^2 \mu_0 s_m 2\delta}{2\delta^2 \omega^2 \mu_0 s_m} = \frac{1}{\delta}. \quad (6.17)$$

С увеличением зазора чувствительность датчика резко уменьшается. А при выборе в качестве начальной точки малой величины зазора можно получить большую чувствительность и значительный сигнал разбаланса мостовой схемы, что позволяет в ряде случаев отказаться от использования усилителя на выходе моста. Например, при $\delta_0 = 1$ мм и $\Delta \delta = 0,1$ мм чувствительность $S_d = 1/10^{-3} = 1000$ 1/м и относительное изменение сопротивления $\Delta z/z = S_d \Delta \delta = 1000 \cdot 10^{-4} = 0,1$, т. е. при изменении зазора на 0,1 мм сопротивление датчика изменяется на 10 %.

Одним из недостатков одинарного индуктивного датчика является то, что на его якорь действует сила притяжения к сердечнику. Эта сила вносит погрешность в работу датчика тем большую, чем меньше перестановочное усилие детали, перемещение которой надо измерить. Индуктивный датчик представляет собой электромагнит, тяговая сила которого, как известно из электротехники, пропорциональна производной магнитной энергии W_m по перемещению:

$$F = - \frac{dW_m}{d\delta}. \quad (6.18)$$

Знак минус означает, что сила направлена в сторону, соответствующую уменьшению магнитной энергии. Энергия магнитного поля катушки с током

$$W_m = \frac{LI^2}{2}. \quad (6.19)$$

Если сделать те же допущения, что и при выводе уравнения статической характеристики датчика (6.13), то для электромагнитной силы, действующей на якорь, можно записать уравнение

$$F_3 = \frac{1}{2} I^2 \frac{dI}{d\delta} = \frac{1}{\omega^2 \mu_0 S_m} - \frac{U^2}{\omega^2}. \quad (6.20)$$

Анализ уравнения (6.20) показывает, что в рабочем диапазоне входных перемещений при принятых допущениях электромагнитная сила притяжения не зависит от зазора δ . Эта сила пропорциональна квадрату напряжения питания и обратно пропорциональна квадрату частоты питания. Повышение частоты питания снижает силу притяжения, но ухудшает точность работы датчика, поскольку возрастают потери в стали из-за вихревых токов.

Кроме наличия электромагнитной силы притяжения индуктивные датчики имеют также и другие серьезные недостатки: при изменении знака входного сигнала не меняется знак выходного сигнала (т. е. датчик не является реверсивным); диапазон изменения входного сигнала, при котором сохраняется линейность статической характеристики, невелик.

Указанные недостатки ограничивают область применения одинарных индуктивных датчиков. На практике они нашли применение в качестве бесконтактных датчиков положения и концевых выключателей при управлении механизмами, имеющими значительные перестановочные усилия. В таких схемах автоматики наиболее полно проявляются достоинства одинарных индуктивных датчиков: простота конструкции и высокая надежность.

§ 6.3. Дифференциальные (реверсивные) индуктивные датчики

Дифференциальные индуктивные датчики представляют собой совокупность двух одинарных (нереверсивных) датчиков с общим якорем. Предназначены дифференциальные индуктивные датчики для получения реверсивной статической характеристики и для компенсации электромагнитной силы притяжения якоря.

Рассмотрим работу дифференциального индуктивного датчика (рис. 6.3, а), состоящего из двух одинаковых сердечников 1 и 2 с обмотками и расположенного между сердечниками якоря 3, способного перемещаться влево и вправо относительно среднего симметричного положения. Питание дифференциального датчика осуществляется от трансформатора с выводом от средней точки вторичной обмотки. Сопротивление нагрузки R_H включается между этой средней точкой и общей точкой обмоток сердечников 1 и 2. Ток в сопротивлении нагрузки можно представить как алгебраическую сумму двух токов: в левом и правом контурах. Каждый контур состоит из половины вторичной обмотки трансформатора, одинарного индуктивного датчика и сопротивления нагрузки R_H , общего для обоих контуров. Рассмотрим направления контурных токов в момент времени, когда во вторичной обмотке трансформатора индуцируется условно положительный полупериод напряжения: плюс — у левого зажима; минус — у правого. Полярность средней точки относитель-

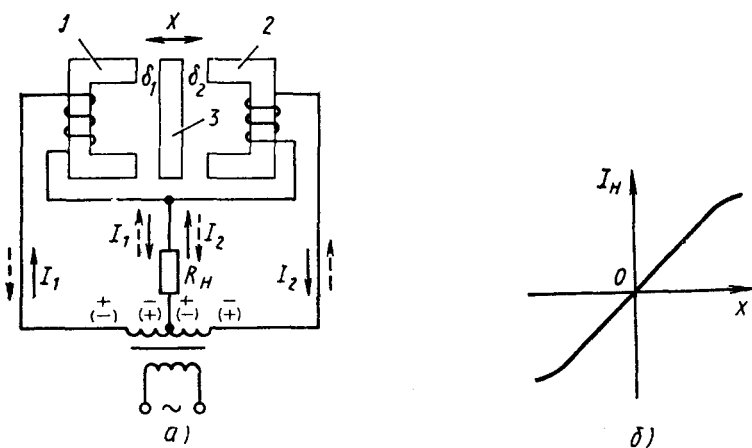


Рис. 6.3. Дифференциальный индуктивный датчик

но левого зажима будет минусовая, а относительно правого — плюсовая. Принимая за положительное направление тока во внешней цепи от плюса к минусу, определяем, что ток левого контура I_1 направлен сверху вниз, а ток правого контура I_2 — снизу вверх. Следовательно, эти токи вычитаются, а через нагрузку пойдет разностный ток. В следующий полупериод полярность изменится на противоположную (на рис. 6.3 показана в скобках). Соответственно изменится направление токов в нагрузке, но опять ток в нагрузке будет равен разности токов I_1 и I_2 (направление их показано пунктиром). Очевидно, что каждый из этих контурных токов можно определить по формулам (6.11) или (6.13). При среднем (симметричном) положении якоря 3 индуктивности обмоток 1 и 2 одинаковы. Следовательно, токи I_1 и I_2 равны, разность их равна нулю, выходной сигнал (ток в сопротивлении нагрузки) равен нулю: $I_n = I_1 - I_2 = 0$.

При перемещении якоря вправо (примем его за положительный входной сигнал) индуктивность L_2 возрастает, поскольку воздушный зазор в одинарном индуктивном датчике 2 уменьшается, а индуктивность L_1 убывает, поскольку зазор в датчике 1 увеличивается. Следовательно, $I_1 > I_2$ и появляется выходной сигнал в виде тока нагрузки определенной полярности. При перемещении якоря влево (отрицательный входной сигнал) соответственно уменьшается L_2 и увеличивается L_1 соотношение токов $I_1 < I_2$ и полярность тока нагрузки изменяется. Поскольку речь идет о переменном синусоидальном токе, это означает, что фаза тока изменяется на 180° . Таким образом, статическая характеристика дифференциального датчика (рис. 6.3, б) будет реверсивной, зависящей от знака входного сигнала. А дифференциальным датчик называется потому, что выходной сигнал формируется как разность сигналов двух одинаковых датчиков.

Силы притяжения якоря к сердечникам возникают и в этом случае, но направлены они в противоположные стороны и поэтому почти полностью взаимно компенсируются. Поэтому для перемещения якоря требуется незначительное усилие. Очень важной особенностью дифференциального датчика является равенство нулю выходного сигнала при нулевом входном сигнале. Напомним, что в одинарном датчике выходной сигнал (ток через обмотку) был не равен нулю даже при нулевом воздушном зазоре.

Для получения реверсивной статической характеристики используют и мостовую схему включения индуктивных датчиков (рис. 6.4, а, б). Плечи моста образованы обмотками двух сердечников 1 и 2 с индуктивностями соответственно L_1 и L_2 и двумя постоянными резисторами с сопротивлением R . К одной диагонали моста

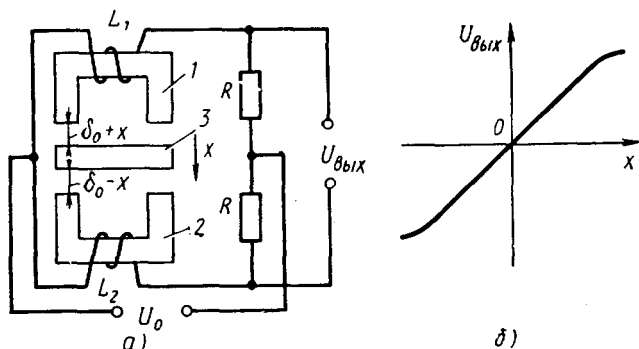


Рис. 6.4. Мостовая схема реверсивного индуктивного датчика

подводится напряжение питания U_0 переменного тока, со второй диагонали снимается выходное напряжение $U_{\text{вых}}$. Если якорь 3 занимает среднее положение, то индуктивности L_1 и L_2 одинаковы и мост сбалансирован. Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ при этом равно нулю. При отклонении якоря от среднего положения баланс моста нарушается, так как индуктивность одной обмотки увеличивается, а другой — уменьшается. Изменение направления перемещения якоря вызывает изменение фазы выходного напряжения на 180° , т. е. характеристика мостовой схемы индуктивных датчиков является реверсивной (см. рис. 6.3, б).

Оценим чувствительность датчика в мостовой схеме. Сначала преобразуем уравнение (6.12) для индуктивности:

$$L_1 = \frac{2\omega^2 s_m}{\delta_0 + x} 10^{-7} = \frac{2\omega^2 s_m}{\delta_0(1 + \sigma)} 10^{-7} = \frac{L_0}{1 + \sigma};$$

$$L_2 = \frac{2\omega^2 s_m}{\delta_0 - x} 10^{-7} = \frac{2\omega^2 s_m}{\delta_0(1 - \sigma)} 10^{-7} = \frac{L_0}{1 - \sigma},$$

где $\sigma = \frac{x}{\delta_0}$ — относительное перемещение якоря, $L_0 = \frac{2\omega^2 s_m}{\delta_0} \cdot 10^{-7}$ —

индуктивность датчика при среднем положении якоря, когда якорь 3 находится на одинаковом расстоянии от сердечников 1 и 2, равном δ_0 . Уравнение для L_1 помножим и поделим на $(1 - \sigma)$:

$$L_1 = \frac{L_0(1 - \sigma)}{(1 + \sigma)(1 - \sigma)} = \frac{L_0(1 - \sigma)}{1 - \sigma^2}.$$

Уравнение для L_2 помножим и поделим на $(1 + \sigma)$:

$$L_2 = \frac{L_0(1 + \sigma)}{(1 - \sigma)(1 + \sigma)} = \frac{L_0(1 + \sigma)}{1 - \sigma^2}.$$

Чувствительность оценивается при малых входных сигналах, когда $x < \delta_0$ и $\sigma < 1$. Поэтому $\sigma^2 \ll 1$ и σ^2 в знаменателе можно пренебречь. В первом приближении для малых входных сигналов принимаем

$$L_1 = L_0(1 - \sigma); \quad L_2 = L_0(1 + \sigma). \quad (6.21)$$

Полагая, что мост не нагружен, для установившегося режима можно записать выражение для выходного напряжения схемы:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\text{вых}} = \underline{I}_1 R - \underline{I}_2 R = \underline{U}_0 R [R_2 - R_1 + j\omega(L_2 - L_1)] / [(j\omega L_1 + \\ + R_1 + R)(j\omega L_2 + R_2 + R)]. \end{aligned} \quad (6.22)$$

Формулу (6.22) можно упростить в предположении, что активные сопротивления обмоток (R_1, R_2) значительно меньше их индуктивных сопротивлений ($\omega L_1, \omega L_2$).

Подставляя в (6.22) значения индуктивностей L_1 и L_2 , определяемых выражением (6.21), получим для малых отклонений σ

$$\underline{U}_{\text{вых}} = \underline{U}_0 R (-j\omega 2L_0\sigma) / (j\omega L_0 + R)^2. \quad (6.23)$$

Модуль выражения (6.23) определяет амплитуду выходного напряжения, а аргумент — фазу.

Амплитуда выходного напряжения

$$|\underline{U}_{\text{вых}}| = \frac{U_0 2\omega L_0 R \sigma}{\omega^2 L_0^2 + R^2}.$$

Чувствительность (или коэффициент преобразования) датчика определяется как производная выходного напряжения по перемещению при $x = 0$:

$$S_d = \left[\frac{dU_{\text{вых}}}{dx} \right]_{x=0} = \frac{U_0}{\delta_0} \frac{2\omega L_0 R}{\omega^2 L_0^2 + R^2}. \quad (6.24)$$

Повысить чувствительность можно увеличением напряжения питания и снижением величины начального воздушного зазора, т. е. сближением сердечников 1 и 2.

Питание индуктивных датчиков всегда осуществляется переменным током, но с помощью выпрямительных схем выходной ток может быть и постоянным. Для того чтобы иметь реверсивную характеристику, используют фазочувствительный выпрямитель. Схема

реверсивного индуктивного датчика с выходным постоянным током показана на рис. 6.5. Сердечники на схеме показаны Ш-образной формы. Такие сердечники используются чаще, чем П-образные, показанные на предыдущих рисунках, хотя принцип действия одинаков для датчиков с сердечниками разной формы. Выходной сигнал датчика снимается с помощью измерительного трансформатора 1 и подается на одну диагональ выпрямительного моста 3. Опорное напряжение снимается с трансформатора 2 и подается на другую диагональ моста 3. Нагрузка R_H включается между средними точками вторичных обмоток трансформаторов 1 и 2. При фазочувствительном выпрямлении изменение фазы сигнала на 180° приводит к изменению полярности выпрямленного напряжения.

Следует отметить, что при неидентичности одинарных индуктивных датчиков, используемых в дифференциальной или мостовой схемах, возникает остаточное напряжение даже в среднем положении якоря. Это остаточное напряжение сдвинуто по фазе относительно напряжения питания, определяющего фазу полезного сигнала. Следовательно, остаточное напряжение может быть разложено на две составляющие. Одна составляющая, совпадающая по фазе с полезным сигналом, называется синфазной. Другая составляющая, сдвинутая по фазе на 90° относительно полезного сигнала, называется квадратурной. Остаточное напряжение является напряжением погрешности, и поэтому желательно его скомпенсировать. Синфазную составляющую остаточного напряжения можно скомпенсировать соответствующим перемещением якоря от среднего положения. Одновременно скомпенсировать и синфазное и квадратурное напряжения погрешности таким способом нельзя. Для подавления квадратурной составляющей могут быть использованы фазочувстви-

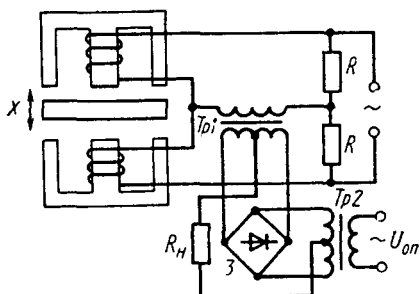


Рис. 6.5. Схема включения реверсивного индуктивного датчика с выходным постоянным током

тельные выпрямители, обладающие свойством не пропускать сигналы, сдвинутые по фазе на 90° относительно опорного напряжения.

Реверсивные индуктивные датчики с сердечниками Ш- и П-образной формы используются для измерения довольно малых перемещений; они имеют начальный зазор порядка $0,3-1$ мм.

Для измерения больших перемещений применяют индуктивные датчики в виде катушки с подвижным внутренним сердечником. Если сердечник полностью введен внутри катушки, на которую намотана обмотка, то ее индуктивное сопротивление максимально, а ток в обмотке имеет минимальное значение. При выводе сердечника из катушки индуктивное сопротивление уменьшается, а ток соответственно увеличивается. Индуктивные датчики в виде катушки с перемещающимся внутри нее сердечником получили название *плунжерных* датчиков. Их также называют индуктивными датчиками с разомкнутым магнитопроводом, поскольку даже при максимальной индуктивности обмотки основной путь магнитного потока проходит по воздуху. С этой точки зрения рассмотренные выше датчики с обмоткой на неподвижном сердечнике и с перемещающимся якорем называют индуктивными датчиками с замкнутым магнитопроводом.

У плунжерных датчиков есть одна очень важная особенность: они позволяют получить информацию о перемещении из замкнутого, изолированного пространства. Пусть, например, надо измерить уровень какой-либо очень вредной жидкости, пары которой ядовиты, да еще находятся под большим давлением. Тогда катушку 1 плунжерного датчика (рис. 6.6) надевают на разделительную трубку 3

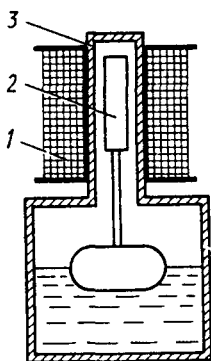


Рис. 6.6. Индуктивный датчик плунжерного типа

из нержавеющей немагнитной стали, внутри которой и перемещается сердечник 2 из ферромагнитного материала. Перемещение сердечника изменяет индуктивность катушки, а разделительная трубка не экранирует магнитное поле, поскольку материал трубки имеет очень малую магнитную проницаемость. Таким образом, обмотка датчика, все другие электрические элементы измерительной схемы размещены в обычных, нормальных условиях. В связи с этим про плунжерные датчики говорят, что они позволяют вывести перемещение из замкнутого объема. В этом основное преимущество плунжерных датчиков перед датчиками с замкнутым магнитопроводом. А вот по чувствительности, мощно-

сти выходного сигнала плунжерные датчики уступают индуктивным датчикам с замкнутым магнитопроводом.

С помощью плунжерных датчиков могут быть реализованы такие же дифференциальные и мостовые схемы, какие были рассмотрены выше (см. рис. 6.3, 6.4).

Рассмотрим в качестве примера использование плунжерных датчиков в схеме индуктивного моста (рис. 6.7). Обмотка каждого из двух датчиков *A* и *B* имеет вывод от средней точки. Обмотки датчиков соединены друг с другом проводами линии связи. Напряжение питания приложено между средними точками обмоток. Каждая из половин обмоток образует плечо моста переменного тока. Датчик *A* установлен в передающем приборе, датчик *B* — в приемном приборе. При перемещении сердечника датчика *A* изменяется индуктивное сопротивление каждой из половин его обмотки. Например, при перемещении сердечника вверх возрастает индуктивность L_{A1} и уменьшается индуктивность L_{A2} . Баланс моста нарушается, и по проводам линии связи протекают токи разбаланса I_1 и I_2 . Эти токи, протекая по обмотке датчика *B*, вызывают электромагнитную силу, перемещающую сердечник датчика *B*. Под действием этой силы сердечник датчика *B* устанавливается в такое же положение, что и сердечник датчика *A*. При этом, естественно, происходит соответствующее изменение индуктивностей L_{B1} и L_{B2} . Условием баланса моста является, как известно, равенство произведений сопротивлений противоположных плеч моста или соответствующих индуктивностей: $L_{A1}L_{B2} = L_{A2}L_{B1}$.

Схема индуктивного моста позволяет осуществить дистанционную передачу линейных перемещений. Однако усилие на приемной стороне весьма невелико. Например, выпускались приборы с катушками диаметром 65 мм, высотой 135 мм и массой 2,5 кг. При полном ходе в 30 мм обеспечивалось усилие в несколько сантиньютон на 1 % полного хода сердечника. Такого усилия достаточно лишь для перемещения стрелки в приемном приборе.

Для получения значительно больших усилий схема индуктивного моста используется совместно с усилителем и электродвигателем. Напряжение разбаланса моста ΔU снимается с измерительной диагонали моста и подается на вход усилителя, который питает электродвигатель, перемещающий (через редуктор) сердечник датчика *B* до тех пор, пока не наступит баланс моста, т. е. $\Delta U = 0$.

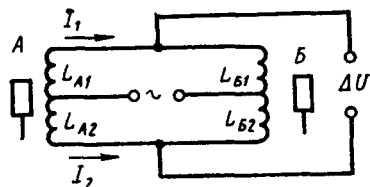


Рис. 6.7. Индуктивный мост для дистанционной передачи линейных перемещений

§ 6.4. Трансформаторные датчики

Принцип действия трансформаторных датчиков основан на изменении коэффициента взаимной индукции обмоток при перемещении якоря. Они относятся к электромагнитным датчикам генераторного типа. Магнитные системы трансформаторных датчиков такие же, как и у рассмотренных в предыдущем параграфе индуктивных датчиков. Отличие заключается лишь в том, что добавляется еще обмотка, с которой и снимается выходной сигнал. Благодаря этому в трансформаторных датчиках отсутствует непосредственная электрическая связь между цепью питания и измерительной цепью. Существует связь лишь за счет магнитного поля (трансформаторная связь), что позволяет выбором числа витков выходной обмотки получить любой уровень выходного напряжения.

На рис. 6.8 показан трансформаторный датчик с подвижным якорем. Обмотка возбуждения w_1 питается напряжением U_1 , которое создает в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ . Во вторичной обмотке w_2 индуцируется ЭДС E_2 , значение которой зависит от величины воздушного зазора δ . Максимальная ЭДС E_2 получается при $\delta = 0$, поскольку при этом магнитное сопротивление замкнутого магнитопровода минимально и по нему проходит максимальный магнитный поток Φ . С увеличением δ уменьшаются магнитный поток и соответствующая ему ЭДС E_2 . Такой датчик используется для измерения малых линейных перемещений, но имеет серьезный недостаток: зависимость ЭДС E_2 от перемещения якоря x нелинейна и не проходит через нуль.

На рис. 6.9, а показан трансформаторный датчик с поворотной обмоткой. Магнитопровод датчика неподвижен и состоит из ярма 1 и сердечника 2. Обмотка возбуждения w_1 размещена на ярме 1, за-

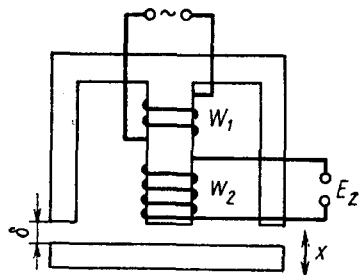


Рис. 6.8. Трансформаторный датчик линейных перемещений

питана переменным напряжением U_1 и создает в зазоре между ярмом 1 и сердечником 2 переменный магнитный поток Φ , амплитудное значение которого неизменно. В зазоре с равномерным распределением индукции размещена поворотная рамка 3 с вторичной обмоткой w_2 , в которой индуцируется ЭДС E_2 , являющаяся выходным сигналом датчика. В зависимости от угла поворота α E_2 изменяется от нуля (при $\alpha = 0$ плоскость рамки размещена вдоль на-

правления магнитного потока) до максимального значения (при $\alpha = 90^\circ$ плоскость рамки размещена поперек направления магнитного потока, весь магнитный поток сцеплен с витками вторичной обмотки w_2). При изменении знака угла поворота α фаза ЭДС E_2 изменяется на 180° , т. е. датчик является реверсивным. В некотором диапазоне входного сигнала (угла поворота α) обеспечивается линейная зависимость $E_2 = f(\alpha)$. Статическая характеристика трансформаторного датчика с поворотной обмоткой показана на рис. 6.9, б. Такие датчики получили распространение для дистанционных передач показаний различных приборов под названием *ферродинамических преобразователей*. Недостатком ферродинамических преобразователей является зависимость выходного сигнала от колебаний напряжения и частоты питания.

Если необходимо измерять большие угловые перемещения в одну сторону, то последовательно с вторичной обмоткой включается дополнительная обмотка смещения $w_{см}$, размещенная на ярме I. Потокосцепление ее неизменно; следовательно, в ней индуцируется ЭДС $E_{см}$ с постоянным амплитудным значением. При последовательном соединении обмоток w_2 и $w_{см}$ ЭДС E_2 и $E_{см}$ суммируются (с учетом фазы). Результирующая статическая характеристика датчика с обмоткой смещения показана на рис. 6.9, б.

Трансформаторные датчики с входным сигналом в виде углового перемещения часто выполняют в виде электрических микромашин, известных под названием «вращающиеся трансформаторы» (ВТ). На статоре и роторе ВТ размещены по две взаимно перпендикулярные обмотки. Коэффициент взаимоиндукции статорных и роторных обмоток изменяется по синусоидальному закону в зависимости от угла поворота α . В зависимости от схемы соединения об-

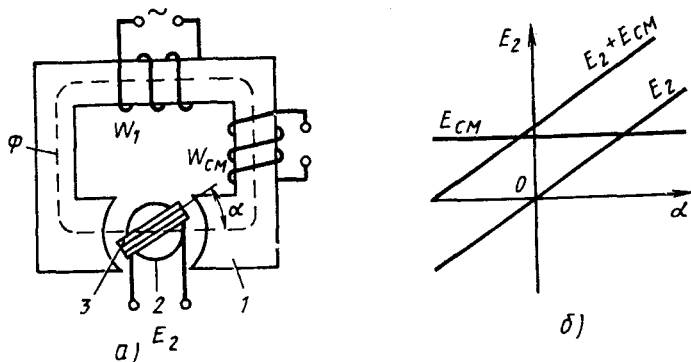


Рис. 6.9. Трансформаторный датчик угловых перемещений

моток различают *синусно-косинусные* вращающиеся трансформаторы (СКВТ) и *линейные* вращающиеся трансформаторы (ЛВТ).

Схема соединения обмоток СКВТ показана на рис. 6.10. Напряжение питания U_1 подано на одну обмотку статора. С роторных обмоток снимаются два выходных сигнала U_2 и U_3 , изменяющиеся соответственно по закону синуса и косинуса в функции угла поворота ротора. Если роторные обмотки подключить к каким-нибудь измерительным цепям, то по обмоткам пойдут токи нагрузки. Под влиянием токов нагрузки синусная и косинусная зависимости искажаются. Для устранения таких искажений выполняются так называемые операции симметрирования ВТ, заключающиеся в подборе соответствующих сопротивлений R_1 (*первичное симметрирование*) и R_2, R_3 (*вторичное симметрирование*).

Выходные напряжения вторичных напряжений СКВТ могут быть записаны в виде $U_2 = kU_1 \sin \alpha$; $U_3 = kU_1 \cos \alpha$. Коэффициент пропорциональности k зависит от соотношения витков $\omega_2/\omega_1 = \omega_3/\omega_1$ и при выполнении симметрирования не зависит от угла поворота α (обычно $\omega_2 = \omega_3$).

Схема соединения обмоток ЛВТ показана на рис. 6.11. Зависимость выходного напряжения U_2 от угла поворота ротора имеет вид

$$U_2 = U_1 \frac{k \sin \alpha}{1 + k \cos \alpha}.$$

Для малых углов α можно принять $\sin \alpha \approx \alpha$, а $\cos \alpha \approx 1$, и зависимость $U_2 = f(\alpha)$ принимает вид

$$U_2 = U_1 \frac{k}{1 + k} \alpha,$$

т. е. выходное напряжение имеет линейную зависимость от угла α . Относительная приведенная погрешность ЛВТ при соответствующей

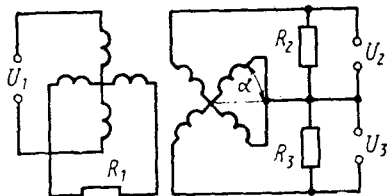


Рис. 6.10. Синусно-косинусный вращающийся трансформатор

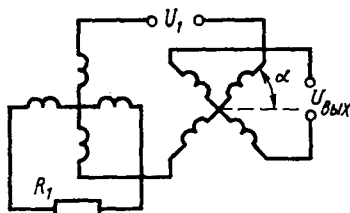


Рис. 6.11. Линейный вращающийся трансформатор

шем выборе обмоточных данных в диапазоне углов α до 50° может не превышать 0,05 %.

Для дистанционных передач угловых перемещений широко применяются также электромашинные элементы автоматики — сельсины. Они имеют однофазную обмотку на статоре и трехфазную обмотку синхронизации на роторе (возможно и обратное расположение обмоток). Сельсины могут работать в *индикаторном* и *трансформаторном* режимах. На передающей стороне устанавливается сельсин-датчик, а на приемной — сельсин-приемник, который должен автоматически повторять угол поворота сельсина-датчика. В индикаторной схеме (рис. 6.12) обмотки возбуждения сельсина-датчика и сельсина-приемника подключаются к сети переменного тока, а обмотки синхронизации обоих сельсинов соединяются друг с другом проводами линий связи. ЭДС в каждой из фаз обмотки синхронизации изменяется пропорционально косинусу угла между осью обмотки возбуждения и осью этой фазы. ЭДС фаз синхронизации датчика, ротор которого повернут на угол α , будут определяться уравнениями

$$E_{дА} = kU_1 \cos \alpha;$$

$$E_{дВ} = kU_1 \cos (\alpha + 120^\circ);$$

$$E_{дС} = kU_1 \cos (\alpha + 240^\circ).$$

ЭДС фаз синхронизации приемника, ротор которого повернут на угол β , будут определяться уравнениями

$$E_{пА} = kU_1 \cos \beta; \quad E_{пВ} = kU_1 \cos (\beta + 120^\circ);$$

$$E_{пС} = kU_1 \cos (\beta + 240^\circ).$$

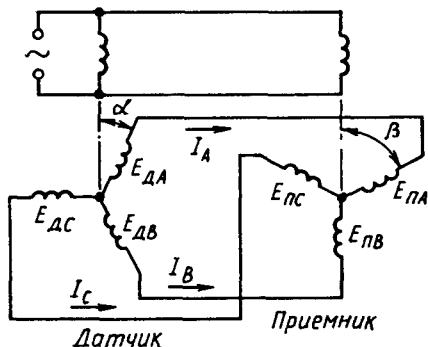


Рис. 6.12. Индикаторная схема включения сельсинов

Под действием разности этих ЭДС по проводам линии связи между обмотками синхронизации пойдут токи

$$I_A = \frac{E_{дА} - E_{пА}}{z};$$

$$I_B = \frac{E_{дВ} - E_{пВ}}{z};$$

$$I_C = \frac{E_{дС} - E_{пС}}{z},$$

где z — сопротивление фаз приемника, датчика и линии связи. В сельсине-приемнике взаимодействие этих токов с магнитным потоком возбуждения вызывает появление вращающего момента

$$M_{вр} = k_m (U_1/z)^2 \sin(\alpha - \beta),$$

где k_m — постоянный коэффициент, определяемый обмоточными и конструктивными данными сельсина.

Под действием этого момента сельсин-приемник поворачивается в то же положение, что и датчик, поскольку только при $\beta = \alpha$ вращающий момент становится равным нулю. Вращающий момент воздействует и на вал сельсина-датчика, однако его угол поворота задан механизмом или чувствительным элементом, угловое перемещение которого подлежит контролю. Для сельсинной индикаторной схемы очень важной характеристикой является величина удельного синхронизирующего момента, т. е. момента на 1° рассогласования. Для сельсинов, используемых в промышленности, эта величина составляет $(4 \div 50) \cdot 10^{-4}$ Нм.

Для повышения вращающего момента используется трансформаторная схема включения сельсинов. В этой схеме обмотка возбуждения сельсина-приемника не подключается к сети, а с нее снимается напряжение, которое пропорционально синусу угла рассогласования. Это напряжение подается на усилитель, который питает электродвигатель, приводящий через редуктор сельсин-приемник в согласованное с сельсином-датчиком положение. Одновременно устанавливается в требуемое положение и нагрузка — тот производственный механизм, угловым перемещением которого требуется управлять на расстоянии. Такие автоматические устройства называются следящими системами: приемник как бы «следит» за датчиком.

Наряду с контактными сельсинами большое распространение получили бесконтактные сельсины. В контактных сельсинах подключение обмоток ротора во внешнюю цепь осуществляется с по-

мощью контактных колец и щеток. В бесконтактных сельсинах обмотки возбуждения и синхронизации размещены на статоре, а изменение магнитной связи между ними по синусоидальному закону обеспечивается с помощью безобмоточного ротора с неодинаковым магнитным сопротивлением по взаимно перпендикулярным осям. Надежность бесконтактных сельсинов существенно выше, чем контактных.

Трансформаторные датчики, так же как и индуктивные, часто используют с дифференциальной схемой включения обмоток. Если в дифференциальном индуктивном датчике с подвижным якорем использовалось два одинарных индуктивных датчика (см. рис. 6.3), а следовательно, и два сердечника, то в дифференциальном трансформаторном датчике возможно использование общего сердечника.

На рис. 6.13, а показана схема дифференциально-трансформаторного датчика с общим сердечником 1 и подвижным якорем 2, перемещающимся в горизонтальном направлении.

Сердечник Ш-образной формы набирается из тонких (толщиной 0,5 или 0,35 мм) листов электротехнической стали. На среднем сердечнике размещена первичная обмотка w_1 , на двух крайних — вторичные обмотки w_2 , которые включены встречно. Первичная обмотка w_1 включается на напряжение переменного тока и создает магнитный поток Φ . Этот поток проходит через средний стержень и разветвляется в правый и левый сердечники пропорционально магнитным проводимостям зазоров под этими стержнями.

Магнитная проводимость воздушного зазора пропорциональна площади s зазора и обратно пропорциональна его длине δ : $G = \mu_0 s / \delta$.

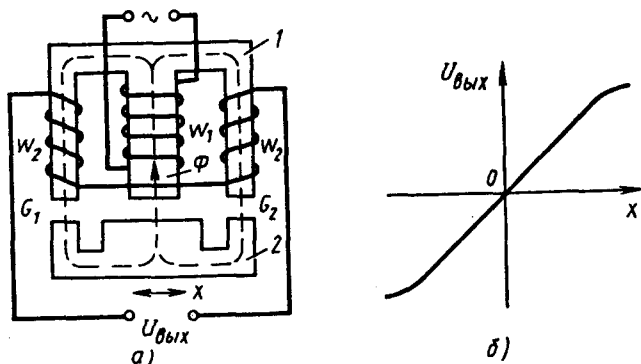


Рис. 6.13. Дифференциально-трансформаторный датчик с магнитопроводом

При перемещении якоря в горизонтальном направлении (рис. 6.13) изменяется не длина зазора, а его площадь s . При симметричном расположении якоря относительно сердечника магнитная проводимость зазора под левым стержнем сердечника (G_1) равна проводимости под правым стержнем (G_2). Следовательно, одинаковы и магнитные потоки в стержнях и соответствующие им ЭДС во вторичных обмотках: $E_1 = E_2$. Выходной сигнал датчика формируется в виде разности этих ЭДС, которая в данном случае равна нулю. При смещении сердечника под одним стержнем площадь зазора и соответствующая магнитная проводимость возрастают, а под другим — уменьшаются. Например, при перемещении якоря влево $G_1 > G_2$ и через левый стержень проходит больший магнитный поток, чем через правый. Соответственно ЭДС вторичной обмотки на левом стержне становится больше ЭДС вторичной обмотки правого стержня: $E_1 > E_2$. Выходной сигнал датчика $U_{\text{вых}} = E_1 - E_2$. При изменении направления смещения якоря относительно среднего положения фаза выходного сигнала меняется на 180° . Статическая характеристика дифференциально-трансформаторного датчика показана на рис. 6.13, б.

Дифференциально-трансформаторный датчик плунжерного типа показан на рис. 6.14, а, б. На общем изоляционном каркасе размещены три катушечные обмотки: первичная w_1 и две вторичные w_2' и w_2'' . Обе вторичные обмотки одинаковы, имеют одно и то же число витков, намотаны проводом одного и того же диаметра. Внутри катушек перемещается цилиндрический сердечник (плунжер) из ферромагнитного материала. Обмотка w_1 включена на напряжение переменного тока. Выходное напряжение снимается со встречно включенных обмоток w_2' и w_2'' . При нейтральном (среднем) положении сердечника наведенные во вторичных обмотках ЭДС

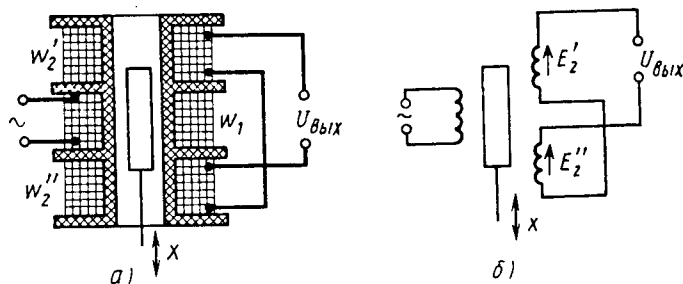


Рис. 6.14. Дифференциально-трансформаторный датчик плунжерного типа

равны ($E'_2 = E''_2$) и выходное напряжение $U_{\text{вых}} = E'_2 - E''_2 = 0$. При смещении сердечника от среднего положения равенство ЭДС нарушается и появляется выходное напряжение. Например, при перемещении сердечника вверх возрастает E'_2 и убывает E''_2 . При перемещении сердечника вниз фаза выходного сигнала изменяется на 180° . Статическая характеристика имеет такой же вид, как и для других конструкций дифференциально-трансформаторных датчиков (см. рис. 6.13, б). Дифференциально-трансформаторный датчик плунжерного типа может быть выполнен с разделительной трубкой (см. рис. 6.6), т. е. позволяет получить выходной сигнал о перемещении из зоны, где могут быть высокая температура, высокое давление или вакуум, вредные пары или излучение и т. п.

Дифференциально-трансформаторные датчики могут работать в широком диапазоне перемещений: от малых долей миллиметра до десятков сантиметров. Они имеют высокую чувствительность, точность и надежность. Для питания датчиков обычно используется сеть с промышленной частотой 50 Гц, но можно использовать и источники повышенной частоты (до 10 кГц), что позволяет повысить чувствительность и коэффициент преобразования.

§ 6.5. Магнитоупругие датчики

Принцип действия магнитоупругих датчиков основан на *магнитоупругом эффекте* — физическом явлении, проявляющемся в виде изменения магнитной проницаемости ферромагнитного материала в зависимости от механических напряжений в нем. Магнитоупругие датчики используются для измерения силовых параметров: усилий, давлений, крутящих и изгибающих моментов, механических напряжений и т. п.

Конструктивно магнитоупругие датчики представляют магнитопровод с одной или несколькими обмотками. Магнитное сопротивление сердечника $R_m = l/(s\mu)$, где l и s — длина и площадь сечения сердечника. Если к сердечнику приложено механическое усилие F , то магнитная проницаемость μ изменится. Следовательно, изменятся и магнитное сопротивление сердечника, и индуктивность обмотки на сердечнике. Как видим, есть аналогия с индуктивными датчиками. В индуктивных датчиках также происходит изменение магнитного сопротивления, но за счет длины или сечения воздушного зазора. В магнитоупругих датчиках зазор не нужен, сердечники могут быть замкнутыми.

Так же как и индуктивные датчики, магнитоупругие датчики могут быть использованы в виде одинарных (рис. 6.15, а), трансформаторных (рис. 6.15, б), дифференциально-трансформаторных (рис. 6.15, в).

Зависимость магнитной проницаемости от механических напряжений имеет нелинейный характер. Связано это как с нелинейностью кривой намагничивания, так и с нелинейной зависимостью деформаций от усилия. Нелинейность магнитоупругого эффекта выражена очень сильно. Например, в слабых магнитных полях магнитная проницаемость под действием механических напряжений возрастает, а в сильных полях — уменьшается. Однако при определенных значениях напряженности магнитного поля H в сердечнике можно получить близкую к линейной зависимость изменения магнитной проницаемости $\Delta\mu$, сердечника от относительной деформации $\Delta l/l$ или нормального механического напряжения σ в зоне линейных деформаций. Наиболее заметен магнитоупругий эффект в пермалловых (железокобальтовых и железоникелевых) сплавах. На рис. 6.16 показана зависимость относительной магнитной проницаемости $\Delta\mu/\mu$ от изменения механического напряжения σ . Относитель-

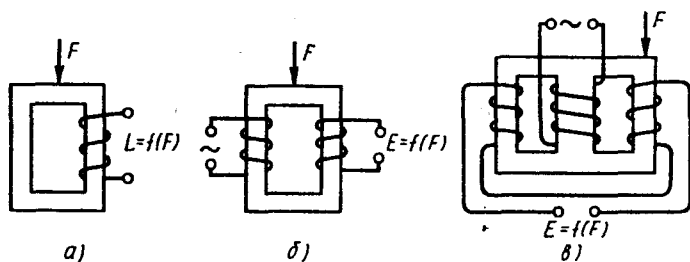


Рис. 6.15. Схемы магнитоупругих датчиков

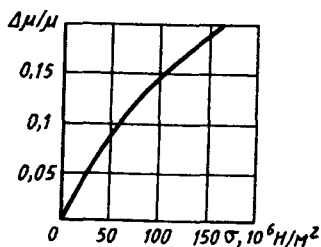


Рис. 6.16. Зависимость относительной магнитной проницаемости от механического напряжения

льная деформация $\Delta l/l$ в зоне упругих деформаций связана с механическим напряжением σ через модуль упругости E :

$$\Delta l/l = E\sigma.$$

Чувствительность магнитоупругого датчика определяется по формуле

$$S_d = \frac{\Delta\mu/\mu}{\Delta l/l};$$

она может достигать значений 200—300. Зависимость индуктивности от механического напряжения σ для магнитоупругого датчика по рис. 6.15, а показана на рис. 6.17.

В магнитоупругих датчиках, используемых в тензомерах, магнитопровод имеет отверстия, в которые наматываются обмотки. На рис. 6.18 показан магнитоупругий датчик с взаимно перпендикулярными обмотками. Первичная обмотка, проходящая через отверстия 1 и 2, при отсутствии механической нагрузки ($F=0$) создает магнитный поток Φ_0 , не сцепленный с витками вторичной обмотки, проходящей через отверстия 3 и 4.

Под действием усилия F в основном изменяется магнитная проницаемость в направлении сжатия, что вызывает поворот вектора магнитной индукции на угол α и одновременно изменение магнитного потока Φ_F . Этот поток уже пересекает плоскость вторичной обмотки, на выходе которой появляется ЭДС E_2 .

Если до приложения усилия магнитный материал был изотропен (имел одинаковые магнитные свойства во всех направлениях), то при наличии усилия материал становится анизотропным. Угол поворота α вектора магнитной индукции достигает 10—12°.

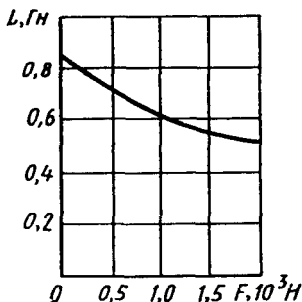


Рис. 6.17. Зависимость индуктивности магнитоупругого датчика от силы сжатия

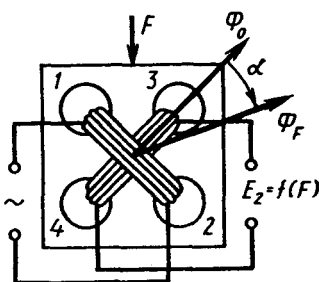


Рис. 6.18. Тензометрический магнитоупругий датчик с взаимно перпендикулярными обмотками

К достоинствам магнитоупругих датчиков следует отнести высокую чувствительность и возможность измерения больших усилий (до нескольких тысяч тонн). В то же время магнитоупругие датчики имеют и следующие серьезные недостатки: 1) наличие температурной погрешности, вызванной влиянием температуры окружающей среды на магнитные свойства сердечника; 2) наличие погрешности, вызванной влиянием гистерезиса (как магнитного, так и механического, связанного с остаточной деформацией); 3) наличие погрешности, вызванной колебаниями напряжения питания.

Следует отметить, что в магнитоупругих датчиках имеет место и еще одно физическое явление — *магнитострикционный эффект*. Его действие обратно магнитоупругому эффекту: ферромагнитное тело, помещенное в магнитное поле, изменяет свои геометрические размеры, т. е. в нем появляются механические деформации.

В переменном магнитном поле и деформации будут переменными. А так как знак деформации не зависит от направления магнитного поля, то частота колебаний деформации будет в два раза выше частоты переменного тока. На этом принципе работают, например, магнитострикционные излучатели ультразвуковых колебаний.

§ 6.6. Индукционные датчики

Индукционные датчики предназначены для преобразования скорости линейных и угловых перемещений в ЭДС. Они относятся к датчикам генераторного типа. Принцип действия индукционных датчиков основан на законе электромагнитной индукции. Выходным сигналом индукционных датчиков является ЭДС, которая пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего витки катушки. Это изменение происходит за счет перемещения катушки в постоянном магнитном поле или за счет вращения ферромагнитного индуктора относительно неподвижной катушки.

Основным отличием индукционных датчиков от индуктивных является то, что в них используется постоянное магнитное поле, а не переменное (питание индуктивных датчиков осуществляется от сети переменного тока). Постоянное магнитное поле в индукционных датчиках создается двумя способами: постоянными магнитами или катушкой, обтекаемой постоянным током.

На рис. 6.19, а показана схема датчика с обмоткой ω_2 , размещенной в воздушном зазоре, в котором постоянный магнитный поток Φ создается катушкой ω_1 , включенной на постоянное напряжение U_- . При перемещении катушки в магнитном поле в ней индуци-

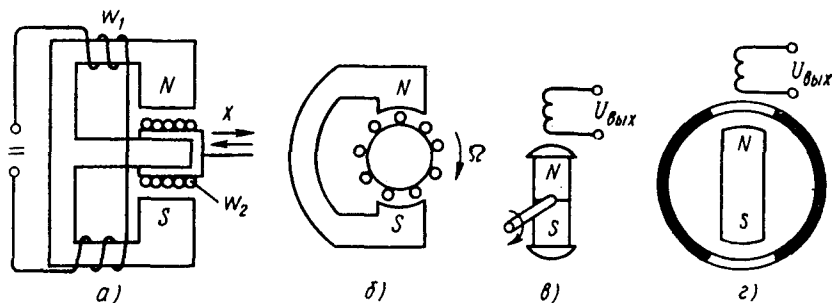


Рис. 6.19. Схемы индукционных датчиков

руется ЭДС, пропорциональная скорости перемещения: $E = k\Phi \frac{dx}{dt}$, где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от числа витков w_2 и конструктивных параметров датчика.

На рис. 6.19, б показан датчик, в котором постоянный магнитный поток создается с помощью постоянного магнита с полюсными наконечниками. ЭДС, индуцируемая во вращающейся катушке, пропорциональна скорости вращения Ω :

$$E = k\Phi\Omega.$$

В обоих этих датчиках катушки подвижны, поэтому для отвода от них выходного сигнала (ЭДС) необходимы гибкие токоподводы или контактные кольца со щетками.

Индукционный датчик может быть выполнен и другой конструкции: с неподвижной катушкой и вращающимся постоянным магнитом (рис. 6.19, в). Надежность при этом повышается за счет отсутствия скользящего контакта.

Возможен и другой способ повышения надежности датчика по схеме рис. 6.19, б: и катушка, и постоянный магнит неподвижны, а в зазоре между ними вращается ферромагнитное кольцо с вырезами (рис. 6.19, г) или иной элемент, имеющий существенно разную магнитную проводимость по взаимно перпендикулярным осям. При вращении изменяется поток, пронизывающий плоскость катушки.

В датчиках (рис. 6.19, б, в, г) в качестве выходного сигнала можно использовать частоту ЭДС. Принцип их действия по существу такой же, как у синхронных генераторов. Для измерения частоты вращения используются и специальные электрические машины малой мощности — тахогенераторы.

Тахогенератор постоянного тока (рис. 6.20, а) имеет обмотку возбуждения, создающую при питании постоянным током магнит-

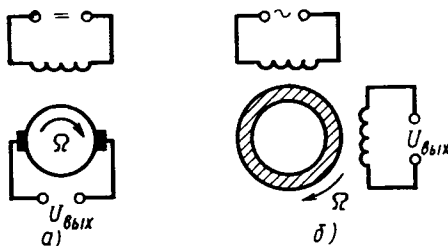


Рис. 6.20. Тахогенераторы

ный поток Φ . При вращении якоря в нем создается ЭДС, пропорциональная частоте вращения n : $E = k\Phi n$, где k — постоянная, определяемая конструкцией.

Напомним, что частота вращения n обычно выражается в 1/мин (количество оборотов в минуту) и связана со скоростью вращения Ω выражением

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} \quad \text{или} \quad n = \frac{60\Omega}{2\pi}.$$

С помощью коллектора и щеток выходной сигнал подается на нагрузку в виде выпрямленного напряжения.

Тахогенератор переменного тока (рис. 6.20, б) имеет на статоре две обмотки, сдвинутые одна относительно другой на 90 эл. град. Одна обмотка включается в сеть переменного тока. При вращении ротора, выполненного в виде тонкостенного электропроводящего цилиндра, в другой обмотке наводится переменная ЭДС, которая пропорциональна частоте вращения n . Для повышения температурной стабильности в качестве материала полюго ротора используется константан.

Тахогенераторы обладают высокой чувствительностью и мощностью выходного сигнала. Общим недостатком всех генераторных датчиков является зависимость выходного сигнала от сопротивления нагрузки.

Контрольные вопросы

1. Почему в электромагнитных датчиках изменяется индуктивность обмотки?
2. Объясните вид статической характеристики $I = f(x)$ индуктивного датчика при малых и больших перемещениях.
3. Почему индуктивные датчики работают только на переменном токе?

4. Чем отличается характеристика реверсивного датчика от нереверсивного?
5. Какие бывают трансформаторные электромагнитные датчики?
6. В каких случаях следует применять плунжерные датчики?
7. В чем заключается магнитоупругий эффект?
8. Какие датчики применяют для измерения скорости?

Глава 7

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

§ 7.1. Принцип действия

Работа пьезоэлектрического датчика основана на физическом явлении, которое называется *пьезоэлектрическим эффектом*. Этот эффект проявляется в некоторых кристаллах в виде появления на их гранях электрических зарядов разных знаков при сжатии кристалла в определенном направлении. Слово «пьезо» по-гречески означает «давлению». В зависимости от значения силы сжатия (или растяжения) меняется количество зарядов, а следовательно, и разность потенциалов, замеренная между гранями. Пьезоэлектрические датчики относятся к генераторному типу.

Широко известны пьезоэлектрические звукопередатчики: игла звукопередатчика воспринимает все изменения глубины звуковой дорожки и передает их на пьезокристалл. Выходное напряжение с пьезокристалла усиливается, и через динамик мы слышим записанные звуки. Появление зарядов на гранях в зависимости от сжатия называется *прямым пьезоэффектом*. Существует и *обратный пьезоэффект*: при подаче напряжения на грани кристалла изменяются его размеры (он сжимается или разжимается). Обратный пьезоэффект (наряду с магнитострикционным, упомянутым в § 6.6) нашел применение в ультразвуковых генераторах. А основанные на прямом пьезоэффекте пьезоэлектрические датчики используются в автоматике для измерения давлений, вибраций, ускорений, других параметров быстропротекающих процессов.

Рассмотрим появление зарядов на гранях кристалла кварца, у которого пьезоэлектрический эффект достаточно сильно выражен. На рис. 7.1 изображен кристалл кварца, который имеет вид шестигранной призмы. В кристалле можно выделить три оси симметрии: Z — продольная ось, называемая оптической осью; X — поперечная

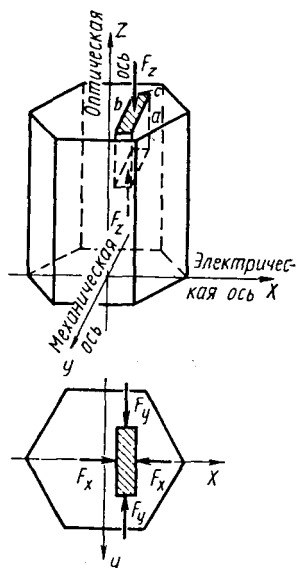


Рис. 7.1. Кристалл кварца и его оси симметрии

ось, проходящая через ребра призмы перпендикулярно продольной оси; Y — поперечная ось, проходящая через грани призмы перпендикулярно им и осям Z , X . Ось X называется электрической осью, ось Y — механической, или нейтральной.

Вырежем из кристалла кварца параллелепипед таким образом, чтобы его грани были перпендикулярны осям X , Y , Z , и рассмотрим появление зарядов на его гранях под действием сил, ориентированных по осям X , Y , Z , т. е. нормально к плоскостям граней. Под действием силы F_x вдоль электрической оси X на каждой из граней параллелепипеда, перпендикулярной оси X , появляются электрические заряды. Величина зарядов не зависит от геометрических размеров кристалла, а определяется силой F_x :

$$q_x = K_0 F_x, \quad (7.1)$$

где K_0 — пьезоэлектрическая постоянная материала, или пьезоэлектрический модуль. Знак зарядов (полярность) зависит от направления силы по оси X (сила сжатия или сила растяжения).

Под действием силы растяжения F_y вдоль механической оси Y возникают заряды на тех же гранях, что и при действии силы F_x (т. е. на гранях, перпендикулярных оси X), но знак заряда будет тот же, что при действии силы сжатия F_x . Соответственно сила сжатия

F_Y приводит к появлению зарядов на тех же гранях и того же знака, что сила растяжения F_X . Величина зарядов под действием сил F_Y зависит от геометрических размеров кристалла b и c (рис. 7.1) и пропорциональна силе:

$$q_Y = -K_0 F_Y (b/c). \quad (7.2)$$

Коэффициент K_0 в формулах (7.1) и (7.2) один и тот же. Знак минус означает, что полярность заряда от сил сжатия по осям X и Y противоположна. Появление зарядов под влиянием силы F_X называется *продольным* пьезоэффектом, а под влиянием силы F_Y — *поперечным* пьезоэффектом. Сжатие или растяжение по оси Z не вызывает появления зарядов на гранях. Появляющиеся на гранях пьезоэлемента под действием сил F_X и F_Y электрические заряды исчезают, как только прекращается действие силы. Кроме того, даже если сила приложена постоянно, заряды стекают через воздух или изоляцию. Поэтому пьезоэлектрические датчики используют лишь для измерения динамических процессов, когда под действием переменных сил заряды на гранях все время восполняются. В пьезоэлектрических датчиках получили применение кроме кварца сегнетова соль и титанат бария. Свойства кристаллов этих материалов, имеющие значение для изготовления пьезодатчиков, приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1. Свойства пьезоэлектрических кристаллов

Кристалл	Пьезоэлектрический модуль K_0 , К/Н	Диэлектрическая проницаемость ϵ	Удельное сопротивление, Ом·мм ² /м
Кварц	$2,1 \cdot 10^{-3}$	4,5	$1 \cdot 10^{12}$ — вдоль оптической оси, $2 \cdot 10^{14}$ — перпендикулярно оптической оси
Сегнетова соль	2,1	$9 \cdot 10^3$	—
Титанат бария	0,225	10^4	—

Пьезоэлектрический модуль кварца сравнительно невысок. Но его главное достоинство — низкая стоимость. Ведь кварц — это один из самых распространенных породообразующих минералов, его состав (SiO_2) тот же, что и у обычного песка. Кварц также имеет большую механическую прочность, хорошие изоляционные свойства, незначительную зависимость параметров от температуры.

Наиболее ярко пьезоэлектрический эффект выражен в кристаллах сегнетовой соли: при одной и той же силе появляется в тысячу раз большее количество электричества, чем у кварца. Однако эти за-

ряды довольно быстро стекают из-за малого удельного сопротивления. Свойства сегнетовой соли изменяются в зависимости от температуры и влажности. Поэтому пьезоэлементы из сегнетовой соли применяются для измерения быстропеременных сил и давлений при малой влажности и нешироком диапазоне изменения температуры окружающей среды.

Титанат бария имеет и большое значение пьезоэлектрического модуля (на два порядка выше, чем у кварца), и высокую механическую прочность, и независимость параметров от изменения влажности. Его недостаток — старение, со временем он теряет свои свойства (примерно на 10 % за год).

§ 7.2. Устройство пьезодатчиков

Пьезоэлектрические датчики применяются для измерения давления, силы, ускорения. На рис. 7.2 показано устройство пьезоэлектрического датчика давления с двумя кварцевыми пластинами. Измеряемое давление действует на мембрану 1, представляющую собой дно корпуса датчика. Кварцевые пластины 2 зажаты между металлическими прокладками 3. Средняя прокладка 3 соединена с выводом 4, проходящим через экранированную втулку 5 из изоляционного материала. Крышка 6 соединяется с корпусом и через шарик 7 передает давление пластинам, благодаря чему измеряемое давление распределяется по поверхности кварцевых пластин более равномерно. Кварцевые пластины обычно расположены таким образом, что в измерительную схему подается отрицательный потенциал. Положительный потенциал подается на корпус датчика. Для уменьшения утечки зарядов необходима очень качественная изоляция. С этой же

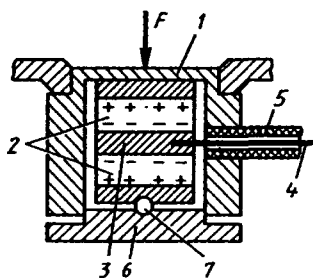


Рис. 7.2. Пьезоэлектрический датчик давления

целью поверхность кварцевых пластин тщательно полируют. Использование двух (а иногда и больше) пластин повышает выходную ЭДС, поскольку выходные сигналы пластин складываются.

На рис. 7.3 показан пьезоэлектрический датчик ускорения, используемый в виброизмерительной аппаратуре. Пьезоэлемент 1 из титаната бария расположен в корпусе прибора 2 между инерционной массой 3 и подпятником 4. Для увеличения силы, дей-

ствующей на пьезоэлемент при ускорениях, инерционная масса имеет относительно большие размеры и изготовлена из вольфрама. Пакет из инерционной массы 3, пьезоэлемента 1 и подпятника 4 прижат к основанию корпуса гайкой 5 через сферическую пятую 6, изоляционную прокладку, пружинную шайбу и контактную пластину. Вывод сигнала выполнен с помощью специального antivибрационного кабеля. Датчик измеряет ускорения от 0,2 до 200 *g*. Коэффициент преобразования порядка 8 мВ на 1 *g*. Минимальная частота виброускорений 5 Гц.

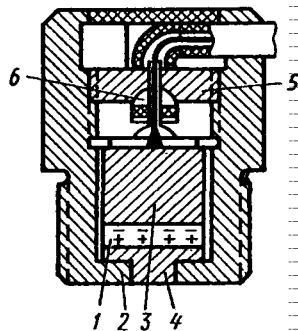


Рис. 7.3. Пьезоэлектрический датчик ускорения

§ 7.3. Чувствительность пьезодатчика и требования к измерительной цепи

Пьезоэлектрический датчик подобен электрическому конденсатору. Количество электричества q , появившееся под воздействием механической силы, заряжает грани пьезоэлемента и соединенные с ним проводники до напряжения U , определяемого как $U = q/C$, где C — емкость между проводниками (включая емкость пьезоэлемента). Чувствительность датчика определяется как приращение выходного напряжения, соответствующее изменению силы F . При параллельном соединении n пластин их емкость складывается. Чувствительность пьезодатчика в этом случае

$$S_d = nK_0 / (C_{\text{вх}} + C_0n), \quad (7.3)$$

где n — количество пластин; K_0 — пьезоэлектрический модуль материала пластины; $C_{\text{вх}}$ — емкость измерительной цепи; C_0 — емкость одной пластины.

Емкость одной пластины датчика толщиной d и площадью S можно определить как емкость плоскопараллельного конденсатора:

$$C_0 = \epsilon\epsilon_0 S/d,$$

где ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м. Емкость пьезоэлемента C на практике бывает невелика и выражается в пикофарадах (1 пФ = 10^{-12} Ф). Выходной сигнал пьезодатчика $U = S_d F$, где F — измеряемая сила.

Заряженный до напряжения U конденсатор будет разряжаться через сопротивление датчика R_0 и сопротивление измерительной цепи $R_{вх}$. Для уменьшения скорости разряда необходимо стремиться к увеличению постоянной времени цепи разряда $T = (R_0/n + R_{вх})(nC_0 + C_{вх})$. При практически реализуемых значениях сопротивления датчика R_0 (десятки и сотни МОм) и его емкости C_0 (десятки пФ) надо обеспечить очень большое входное сопротивление измерительной цепи. Для этого используются специальные электронные лампы, называемые электрометрическими. Электрометрические схемы могут обеспечить входное сопротивление измерительной цепи до 10^{13} Ом. Для увеличения постоянной времени разряда параллельно датчику иногда включают конденсатор. Применение измерительных цепей с очень большим входным сопротивлением позволяет снизить нижнюю границу частоты входных сигналов до нескольких герц.

При измерении высокочастотных (быстроизменяющихся) ударных нагрузок и ускорений пьезоэлектрические датчики имеют преимущество перед датчиками других типов.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается пьезоэлектрический эффект?
2. В каких материалах наиболее сильно проявляется пьезоэлектрический эффект?

Глава 8

ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ

§ 8.1. Принцип действия. Типы емкостных датчиков

Работа емкостных датчиков заключается в преобразовании измеряемой величины в емкостное сопротивление. Поэтому емкостные датчики относятся к параметрическим. Принцип действия емкостных датчиков основан на зависимости емкости конденсатора от размеров обкладок, расстояния между ними, диэлектрической проницаемости среды между обкладками.

Емкость конденсатора, имеющего две плоские обкладки,

$$C = \epsilon\epsilon_0 S/d, \quad (8.1)$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками; ϵ_0 — диэлектрическая постоянная ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); s — площадь обкладок; d — расстояние между обкладками.

Из (8.1) следует, что изменение емкости конденсатора может происходить из-за изменения любой из трех величин: d , s , ϵ . Наибольшее распространение получили емкостные датчики, измеряющие линейные перемещения. На рис. 8.1, *a*, *б* показаны схема емкостного датчика линейного перемещения и зависимость емкости датчика от входного сигнала — перемещения x .

На рис. 8.2, *a*, *б* показаны схема емкостного датчика углового перемещения и зависимость емкости датчика от входного сигнала — угла поворота α . В этом датчике емкость изменяется из-за изменения площади взаимного перекрытия двух обкладок — пластин 1 и 2. Одна из пластин (1) неподвижна, другая (2) — может поворачиваться на оси относительно пластины 1. Расстояние между пластинами не меняется, при повороте пластины 2 меняется активная площадь между пластинами 1 и 2 (на рис. 8.2, *a* отмечена штриховкой).

На рис. 8.3 показан емкостный датчик уровня. В этом датчике емкость изменяется в зависимости от уровня жидкости, поскольку изменяется диэлектрическая проницаемость среды между неподвижными пластинами.

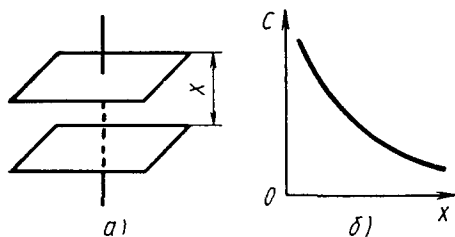


Рис. 8.1. Емкостный датчик линейного перемещения

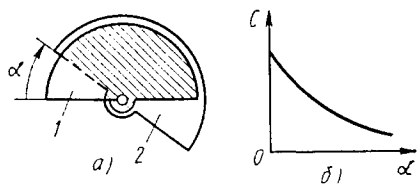


Рис. 8.2. Емкостный датчик углового перемещения

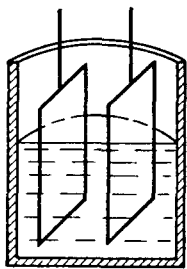


Рис. 8.3. Емкостный датчик уровня

Емкостные датчики используются в цепях переменного тока. Емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте питания: $X_C = 1/(\omega C) = 1/(2\pi fC)$, где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота; f — частота, Гц.

При малой частоте питания емкостное сопротивление настолько велико, что изменение тока в цепи с емкостным датчиком очень трудно зафиксировать даже высокочувствительным прибором. Применение емкостных датчиков предпочтительнее при питании повышенной частотой (400 Гц и больше).

§ 8.2. Характеристики и схемы включения емкостных датчиков

Чувствительность емкостного датчика определяется как отношение приращения емкости к вызвавшему это приращение изменению измеряемой величины. Для простого плоского двухобкладочного емкостного датчика линейного перемещения с воздушным зазором емкость

$$C = 8,85 \cdot 10^{-12} s / (d_{\text{нач}} + x), \quad (8.2)$$

где $d_{\text{нач}}$ — начальное расстояние между пластинами площадью s .

Начальное расстояние $d_{\text{нач}}$ выбирается по конструктивным соображениям, но оно не должно быть меньше некоторого значения, при котором возможен электрический пробой конденсатора. Для воздуха пробивное напряжение составляет порядка 3 кВ на 1 мм. Минимальное расстояние воздушного промежутка в высокочувствительных емкостных микрометрах принимают порядка 30 мкм. Чувствительность плоского емкостного датчика получаем дифференцированием уравнения (8.2):

$$S_d = \frac{dC}{dx} = -8,85 \cdot 10^{-12} \frac{s}{(d_{\text{нач}} + x)^2}. \quad (8.3)$$

Чувствительность, как следует из (8.3) и графика (рис. 8.1, б), не постоянна в диапазоне возможных перемещений x . Она максимальна при малых входных сигналах (когда пластины расположены близко друг к другу) и быстро уменьшается при удалении пластин.

При включении емкостного датчика в измерительную мостовую схему переменного тока чувствительность измерения можно увели-

чить повышением напряжения питания моста (см. гл. 2). Однако и здесь необходимо иметь в виду опасность пробоя между пластинами. Для значительного увеличения напряжения питания между обкладками конденсатора помещают тонкую слюдяную пластинку. Для повышения чувствительности измерительной схемы с емкостным датчиком необходимо повышать частоту питающего напряжения. Однако при этом необходимы специальные меры по экранированию схемы и подводящих проводов для уменьшения погрешности измерения, вызванной токами утечки и токами наводки.

В емкостном датчике давления (рис. 8.4) одной из обкладок конденсатора является плоская круглая мембрана *1*, воспринимающая давление *P*. Другая обкладка *2* датчика неподвижна и имеет такой же радиус *R*, что и мембрана *1*. Между обкладками конденсатора имеется начальный воздушный промежуток $d_{нач}$. Под воздействием измеряемого давления *P* мембрана прогибается, причем наибольшее перемещение δ имеет центр мембраны. Неравномерное изменение воздушного промежутка между пластинами затрудняет вывод формулы для емкости такого датчика. Приведем ее в окончательном виде:

$$C = \frac{\epsilon_0 \pi R^2}{2\sqrt{d_{нач}}\delta} \ln \frac{\sqrt{d_{нач}^2 + \sqrt{\delta}}}{\sqrt{d_{нач}^2 - \sqrt{\delta}}} \quad (8.4)$$

Непосредственное объединение чувствительного элемента (мембраны) с датчиком без промежуточных кинематических элементов обеспечивает простоту конструкции и высокую надежность, а отсутствие потерь на трение обуславливает высокую чувствительность по давлению такого датчика. При взаимном перемещении пластин в конденсаторе изменяется энергия электрического поля, что приводит к появлению усилий, приложенных к пластинам.

Энергия электрического поля в конденсаторе

$$W_3 = C \frac{U^2}{2} \quad (8.5)$$

Сила, действующая на пластины, определяется как производная энергии по перемещению:

$$F_3 = \frac{dW_3}{dx} = \frac{U^2}{2} \frac{dC}{dx} \quad (8.6)$$

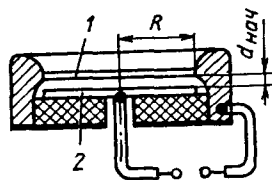


Рис. 8.4. Емкостный датчик давления

Для повышения точности и чувствительности, а также с целью уменьшения влияния механических сил емкостный датчик можно выполнить дифференциальным (рис. 8.5) и включить в мостовую схему.

Дифференциальный емкостный датчик представляет собой плоский конденсатор с металлической обкладкой 1, на которую действует измеряемая сила F . Обкладка 1 закреплена на упругой подвеске 6 и под действием силы F перемещается параллельно самой себе.

Две неподвижные обкладки 2 и 3 изолированы от корпуса специальными прокладками 4 и 5. При отсутствии силы F обкладка 1 занимает симметричное положение относительно неподвижных обкладок 2 и 3. При этом емкость конденсатора, образованного пластинами 1 и 2, равна емкости конденсатора, образованного пластинами 1 и 3: $C_{1-2} = C_{1-3} = C$. Под воздействием измеряемой силы F , преодолевающей противодействие упругой подвески 6, обкладка 1 перемещается и емкости верхнего и нижнего конденсаторов получают приращения разных знаков:

$$C_{1-3} = C + \Delta C; C_{1-2} = C - \Delta C.$$

Поскольку эти емкости включены в смежные плечи мостовой схемы; чувствительность измерительной схемы возрастает вдвое (см. гл. 2). Силы, действующие между парами обкладок, направлены противоположно друг другу, т. е. взаимно компенсируются.

Питание моста осуществляется от генератора высокой частоты (ГВЧ). Частота питания составляет несколько килогерц. Напряжение в измерительной диагонали моста ΔU зависит от измеряемой силы. При изменении направления силы изменяется фаза выходного напряжения на 180° .

Для повышения чувствительности емкостных датчиков углового перемещения с изменяющейся площадью взаимного перекрытия пластин по рис. 8.2 применяют систему, состоящую из нескольких неподвижных и подвижных пластин. Такие воздушные конденсато-

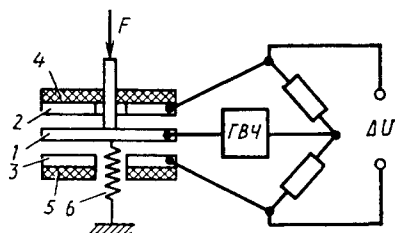


Рис. 8.5. Дифференциальный емкостный датчик в мостовой схеме

ры переменной емкости применяются, например, для настройки радиоприемников.

Если пластины имеют форму половины круга (как на рис. 8.2), а ось вращения подвижных пластин проходит через центры окружности всех пластин, то емкость датчика изменяется в зависимости от угла поворота:

$$C = 8,85 \cdot 10^{-12} s(n-1)\alpha / (d \cdot 180); \quad (8.7)$$

где n — общее количество неподвижных и подвижных пластин; s — площадь взаимного перекрытия пластин при $\alpha = 0$ (подвижные пластины полностью вдвинуты между неподвижными); d — постоянное расстояние между подвижными и неподвижными пластинами.

Диапазон изменения угла поворота α от 0 до 180° . Все подвижные пластины электрически соединены между собой, а все неподвижные также соединены между собой. Таким образом, имеется параллельное соединение конденсаторов, при котором общая емкость, как известно, равна сумме емкостей параллельно соединенных конденсаторов.

Чувствительность такого датчика определяется как изменение емкости при повороте на 1° , т. е.

$$S_d = 8,85 \cdot 10^{-12} s(n-1)/(180d). \quad (8.8)$$

Датчики угловых перемещений используют в мостовых измерительных схемах. Для повышения чувствительности возможно применение дифференциального датчика, показанного на рис. 8.6. При повороте по часовой стрелке подвижной пластины 1 увеличивается емкость между этой пластиной и неподвижной пластиной 2 и уменьшается емкость между пластиной 1 и неподвижной пластиной 3.

Дифференциальная схема, как уже отмечалось, обеспечивает компенсацию противодействующего момента, поскольку суммарная емкость датчика остается неизменной.

На рис. 8.7 показан емкостный датчик с цилиндрическими обкладками, применяемый для измерения уровня токонепроводящей жидкости или сыпучих тел. Одной обкладкой может служить металлический бак или резервуар с внутренним радиусом r_1 , вторая обкладка выполнена в виде металлического стержня или цилиндра с наруж-

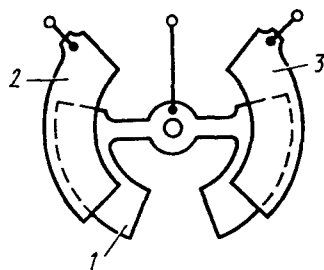


Рис. 8.6. Дифференциальный емкостный датчик повышенной чувствительности

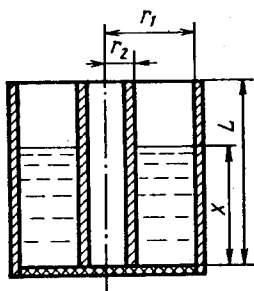


Рис. 8.7. Емкостный датчик уровня с цилиндрическими обкладками

ным радиусом r_2 . Если резервуар заполнен до уровня x жидкостью с диэлектрической проницаемостью ϵ_n , то емкость датчика можно представить как емкость двух параллельно соединенных конденсаторов:

$$C = C_x + C_{L-x}, \quad (8.9)$$

где C_x — емкость нижней части резервуара, заполненной жидкостью; C_{L-x} — емкость верхней части резервуара, заполненной воздухом. Чувствительность такого датчика тем больше, чем больше диэлектрическая проницаемость ϵ_n материала, уровень которого измеряется.

Общая формула для емкости конденсатора с цилиндрическими обкладками

$$C = \epsilon_0 \epsilon \frac{l}{2 \ln(r_1/r_2)}, \quad (8.10)$$

где l — длина обкладок.

Для емкости нижней части датчика

$$C_x = \epsilon_0 \epsilon_n \frac{x}{2 \ln(r_1/r_2)}. \quad (8.11)$$

Для емкости верхней части датчика

$$C_{L-x} = \epsilon_0 \frac{L-x}{2 \ln(r_1/r_2)}. \quad (8.12)$$

Подставляя (8.11) и (8.12) в (8.9), получим

$$C = \frac{\epsilon_0}{2 \ln(r_1/r_2)} [L + (\epsilon_n - 1)x], \quad (8.13)$$

где L — высота обкладок датчика, т. е. максимальный уровень заполнения резервуара.

Чувствительность датчика определяем, дифференцируя (8.13) по уровню

$$S_n = \frac{\epsilon_0 (\epsilon_n - 1)}{2 \ln(r_1/r_2)}. \quad (8.14)$$

Из уравнения (8.14) видно, что чувствительность датчика постоянна во всем диапазоне измерений. При измерении уровня химиче-

ски агрессивных жидкостей наружная и внутренняя обкладки покрываются защитным покрытием. Измерение уровня с помощью емкостных датчиков используется в космической и авиационной технике, химии, нефтехимии, других отраслях промышленности.

Емкостные датчики нашли применение также для автоматического измерения толщины различных материалов и покрытий в процессе их изготовления.

Рассмотрим емкостный датчик (рис. 8.8) для измерения толщины материала из диэлектрика (например, изоляционной ленты). Между неподвижными обкладками конденсатора 1 протягивается с помощью роликов 2 контролируемый материал 3.

Емкость датчика, представляющего собой плоский двухобкладочный конденсатор с двухслойным диэлектриком,

$$C = \frac{\epsilon_0 s}{d - (1 - 1/\epsilon_n)\Delta}. \quad (8.15)$$

где s — площадь обкладок; d — расстояние между обкладками; Δ — толщина контролируемого материала; ϵ_n — диэлектрическая проницаемость контролируемого материала. Чувствительность датчика

$$S_d = \frac{\epsilon_0 s (1 - 1/\epsilon_n)}{[d - (1 - 1/\epsilon_n)\Delta]^2}. \quad (8.16)$$

Чем меньше разница между d и Δ , чем больше диэлектрическая проницаемость материала ϵ_n , тем выше чувствительность. Повысить чувствительность измерения с помощью емкостных датчиков можно за счет выбора соответствующей измерительной схемы.

Включение емкостного датчика в мостовую схему (см. рис. 8.5), питаемую от источника повышенной частоты, позволяет зафиксировать изменения емкости на 0,1 %. Более высокая чувствительность позволяет получить так называемая резонансная схема. В этом случае емкостный датчик включается в колебательный контур совместно с индуктивным сопротивлением. Резонансная схема показана на рис. 8.9, а. Высокочастотный генератор 1 имеет частоту напряжения f_r и питает индуктивно связанный с ним контур, состоящий из индуктивности L_k , подстроечного конденсатора C_0 и емкостного датчика C_d . Напряжение U_k , снимаемое с контура, усиливается усилителем 2 и измеряется прибором 3, шкала которого может быть проградуи-

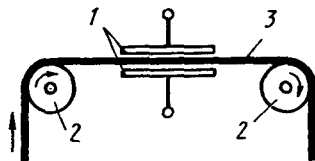


Рис. 8.8. Емкостный датчик толщины ленты

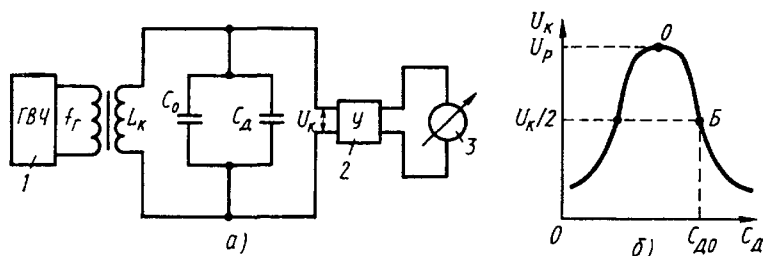


Рис. 8.9. Резонансная измерительная схема включения емкостного датчика

рована в единицах измеряемой величины. При помощи подстроечного конденсатора C_0 контур настраивается на частоту f_0 , близкую (но не равную) к частоте генератора.

Настройка производится при средней емкости датчика в диапазоне возможных изменений измеряемой величины

$$C_{д0} = (C_{\max} + C_{\min})/2.$$

В результате настройки напряжение U_k , снимаемое с контура, должно быть примерно вдвое меньше (точка B на рис. 8.9, б), чем напряжение при резонансе U_p (точка O на рис. 8.9, б). Таким образом, рабочая точка B будет находиться примерно посередине одного из склонов резонансной характеристики. Этим обеспечиваются высокая чувствительность измерения (до 0,001 %) и примерно линейная шкала измерительного прибора \mathcal{Z} . Малейшее перемещение подвижной пластины датчика C_d приводит к резкому изменению напряжения контура. Уменьшение емкости ($C_{д0} - \Delta C$) приводит к резкому увеличению напряжения, увеличение емкости ($C_{д0} + \Delta C$) — к резкому уменьшению напряжения. При выборе рабочей точки на левом склоне резонансной характеристики (с помощью подстроечного конденсатора) уменьшение емкости приводит к уменьшению напряжения, и наоборот.

Резонансная частота контура определяется из условия резонанса (равенства емкостного и индуктивного сопротивлений) $2\pi fL = 1/(2\pi fC)$,

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_k(C_0 + C_d)}}. \quad (8.17)$$

Резонансная кривая идет тем круче, чем меньше активная составляющая сопротивления контура.

Контрольные вопросы

1. Под влиянием каких величин изменяется емкость конденсатора?
2. Какие схемы используют для включения емкостного датчика?
3. В чем достоинство резонансной схемы включения?

Глава 9 ТЕРМОРЕЗИСТОРЫ

§ 9.1. Назначение. Типы терморезисторов

Терморезисторы относятся к параметрическим датчикам температуры, поскольку их активное сопротивление зависит от температуры. Терморезисторы называют также термометрами сопротивления или термосопротивлениями. Они применяются для измерения температуры в широком диапазоне от -270 до 1600 °С.

Если терморезистор нагревать проходящим через него электрическим током, то его температура будет зависеть от интенсивности теплообмена с окружающей средой. Так как интенсивность теплообмена зависит от физических свойств газовой или жидкой среды (например, от теплопроводности, плотности, вязкости), в которой находится терморезистор, от скорости перемещения терморезистора относительно газовой или жидкой среды, то терморезисторы используются и в приборах для измерения таких неэлектрических величин, как скорость, расход, плотность и др.

Различают металлические и полупроводниковые терморезисторы. Металлические терморезисторы изготавливают из чистых металлов: меди, платины, никеля, железа, реже из молибдена и вольфрама. Для большинства чистых металлов температурный коэффициент электрического сопротивления составляет примерно $(4-6,5) \cdot 10^{-3}$ 1/°С, т. е. при увеличении температуры на 1 °С сопротивление металлического терморезистора увеличивается на 0,4–0,65 %. Наибольшее распространение получили медные и платиновые терморезисторы. Хотя железные и никелевые терморезисторы имеют примерно в полтора раза больший температурный коэффициент сопротивления, чем медные и платиновые, однако применяются они реже. Дело в том, что железо и никель сильно окисляются и при этом меняют свои характеристики. Вообще добавление в металл незначительного количества примесей уменьшает температурный

коэффициент сопротивления. Сплавы металлов и окисляющиеся металлы имеют низкую стабильность характеристик. Однако при необходимости измерять высокие температуры приходится применять такие жаропрочные металлы, как вольфрам и молибден, хотя терморезисторы из них имеют характеристики, несколько отличающиеся от образца к образцу.

Широкое применение в автоматике получили полупроводниковые терморезисторы, которые для краткости называют *термисторами*. Материалом для их изготовления служат смеси оксидов марганца, никеля и кобальта; германий и кремний с различными примесями и др.

По сравнению с металлическими терморезисторами полупроводниковые имеют меньшие размеры в большие значения номинальных сопротивлений. Термисторы имеют на порядок бóльший температурный коэффициент сопротивления (до $-6 \cdot 10^{-2} 1/^{\circ}\text{C}$). Но этот коэффициент — отрицательный, т. е. при увеличении температуры сопротивление термистора уменьшается. Существенный недостаток полупроводниковых терморезисторов по сравнению с металлическими — непостоянство температурного коэффициента сопротивления. С ростом температуры он сильно падает, т. е. термистор имеет нелинейную характеристику. При массовом производстве термисторы дешевле металлических терморезисторов, но имеют большой разброс характеристик.

§ 9.2. Металлические терморезисторы

Сопротивление металлического проводника R зависит от температуры:

$$R = Ce^{\alpha T}, \quad (9.1)$$

где C — постоянный коэффициент, зависящий от материала и конструктивных размеров проводника; α — температурный коэффициент сопротивления; e — основание натуральных логарифмов.

Абсолютная температура (К) связана с температурой в градусах Цельсия соотношением $T \text{ K} = 273 + T^{\circ}\text{C}$.

Определим относительное изменение сопротивления проводника при его нагреве. Пусть сначала проводник находился при начальной температуре T_0 и имел сопротивление $R_0 = Ce^{\alpha T_0}$. При нагреве до температуры T его сопротивление $R_T = Ce^{\alpha T}$. Возьмем отношение R_T и R_0 :

$$R_T/R_0 = Ce^{\alpha T}/(Ce^{\alpha T_0}) = e^{\alpha(T-T_0)}. \quad (9.2)$$

Известно, что функцию вида e^x можно разложить в степенной ряд:

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

Для нашего случая $x = \alpha(T - T_0)$. Так как величина α для меди сравнительно мала и в диапазоне температур до $+150^\circ\text{C}$ может быть принята постоянной $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, то и произведение $\alpha(T - T_0)$ в этом диапазоне температур меньше единицы. Поэтому не будет большой ошибкой пренебречь при разложении членами ряда второй степени и выше:

$$R_T/R_0 = 1 + \frac{\alpha(T - T_0)}{1!}. \quad (9.3)$$

Выразим сопротивление при температуре T через начальное сопротивление при T_0

$$R_T = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]. \quad (9.4)$$

Медные терморезисторы выпускаются серийно и обозначаются ТСМ (термосопротивления медные) с соответствующей градуировкой: гр. 23 имеет сопротивление 53,00 Ом при 0°C ; гр. 24 имеет сопротивление 100,00 Ом при 0°C . Медные терморезисторы выполняются из проволоки диаметром не менее 0,1 мм, покрытой для изоляции эмалью.

Для платиновых терморезисторов, которые применяются в более широком диапазоне температур, чем медные, следует учитывать зависимость температурного коэффициента сопротивления от температуры. Для этого берется не два, а три члена разложения в степенной ряд функции e^x .

В диапазоне температур от -50 до 700°C достаточно точной является формула

$$R_T = R_0[1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2], \quad (9.5)$$

где для платины $\alpha = 3,94 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, $\beta = 5,8 \cdot 10^{-7} \text{ (1/}^\circ\text{C)}^2$.

Платиновые терморезисторы выпускаются серийно и обозначаются ТСП (термосопротивления платиновые) с соответствующей градуировкой; гр. 20 имеет сопротивление 10,00 Ом при 0°C , гр. 21 — 46,00 Ом; гр. 22 — 100,00 Ом. Платина применяется в виде неизолированной проволоки диаметром 0,05—0,07 мм.

В табл. 9.1 приведены зависимости сопротивления металлических терморезисторов от температуры; они называются стандартными градуировочными таблицами.

Таблица 9.1. Зависимость сопротивления терморезисторов от температуры

Температура, °C	Сопротивление, Ом				
	Платиновые термометры сопротивления			Медные термометры сопротивления	
	гр. 20	гр. 21	гр. 22	гр. 23	гр. 24
-200	1,73	7,95	17,28	—	—
-150	3,88	17,85	38,80	—	—
-100	5,97	27,44	59,65	—	—
-50	8,00	36,80	80,00	41,71	78,70
-30	8,80	40,50	88,04	46,23	87,22
-10	9,60	44,17	96,03	50,74	95,74
0	10,00	46,00	100,00	53,00	100,00
20	10,79	46,94	107,91	57,52	108,52
40	11,58	53,26	115,78	62,03	117,04
60	12,36	56,86	123,60	66,55	125,56
80	13,14	60,43	131,37	71,06	134,08
100	13,91	63,99	139,10	75,58	142,60
120	14,68	67,52	146,78	80,09	151,12
140	15,44	71,03	154,41	84,61	159,64
160	16,20	74,52	162,00	89,13	168,16
180	16,95	77,99	169,54	93,64	176,68
300	21,38	98,34	213,79	—	—
400	24,94	114,72	249,38	—	—
500	28,38	130,55	283,80	—	—
600	31,70	145,85	317,06	—	—
650	33,33	153,30	333,25	—	—

На рис. 9.1 показано устройство платинового термометра сопротивления. Сам терморезистор выполнен из платиновой проволоки 1, намотанной на слюдяную пластину 2 с нарезкой. Слюдяные накладки 3 защищают обмотку и крепятся серебряной лентой 4. Серебряные выводы 5 пропущены через фарфоровые изоляторы 6. Термосопротивление помещается в металлический защитный чехол 7.

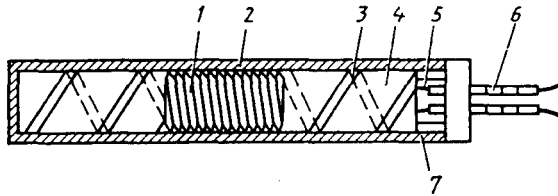


Рис. 9.1. Платиновый термометр сопротивления

§ 9.3. Полупроводниковые терморезисторы

Сопротивление полупроводниковых терморезисторов (термисторов) резко уменьшается с ростом температуры. Их чувствительность значительно выше, чем металлических, поскольку температурный коэффициент сопротивления полупроводниковых терморезисторов примерно на порядок больше, чем у металлических. Если для металлов $\alpha = (4\div 6) \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, то для полупроводниковых терморезисторов $|\alpha| > 4 \cdot 10^{-2} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Правда, для термисторов этот коэффициент непостоянен, он зависит от температуры и им редко пользуются при практических расчетах.

Основной характеристикой терморезистора является зависимость его сопротивления от абсолютной температуры T :

$$R_T = Ae^{B/T}, \quad (9.6)$$

где A — постоянный коэффициент, зависящий от материала и конструктивных размеров термистора; B — постоянный коэффициент, зависящий от физических свойств полупроводника; e — основание натуральных логарифмов.

Сравнение формулы (9.6) с формулой (9.1) показывает, что у термисторов с ростом температуры сопротивление уменьшается, а у металлических терморезисторов — увеличивается. Следовательно, у термисторов температурный коэффициент сопротивления имеет отрицательное значение.

Вообще чувствительность терморезистора (как датчика температуры) можно оценить как относительное изменение его сопротивления $(\Delta R/R)$, деленное на вызвавшее это изменение приращение температуры:

$$S_d = (\Delta R/R)/\Delta T. \quad (9.7)$$

В пределе при $\Delta T \rightarrow 0$

$$S_d = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}. \quad (9.8)$$

Для металлического терморезистора чувствительность можно получить, дифференцируя (9.4). Следовательно, $S_d = \alpha$, т. е. именно температурный коэффициент сопротивления определяет чувствительность.

Для полупроводникового терморезистора (термистора) чувствительность получим, дифференцируя (9.6):

$$S_d = \frac{1}{R} \frac{d(Ae^{B/T})}{dT} = A \frac{e^{B/T}}{R} \frac{d(B/T)}{dT} = -\frac{B}{T^2}. \quad (9.9)$$

Из (9.9) видно, что чувствительность термистора имеет нелинейную зависимость от температуры.

Серийно выпускаются медно-марганцевые (тип ММТ) и кобальтово-марганцевые (тип КМТ) термисторы. На рис. 9.2 показаны зависимости сопротивления от температуры для термисторов этих типов и для сравнения — для медного терморезистора. Величина B для термисторов составляет 2—5 тыс. К (меньше — для ММТ, больше для КМТ).

Электрическое сопротивление термистора при окружающей температуре $+20^\circ\text{C}$ называют номинальным или холодным сопротивлением. Для термисторов типов ММТ-1, ММТ-4, ММТ-5 эта величина может составлять 1—200 кОм, а для типов К.МТ-1, ММТ-4 — от 20 до 1000 кОм.

Верхний диапазон измеряемых температур для типа ММТ — 120°C , а для типа КМТ — 180°C .

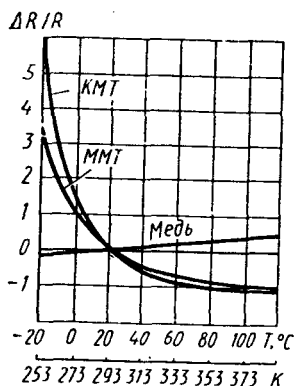


Рис. 9.2. Зависимости сопротивления от температуры для термисторов и медного терморезистора

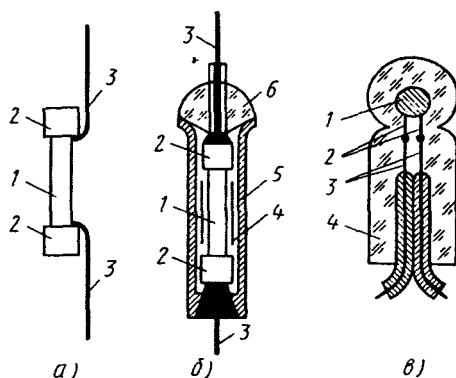


Рис. 9.3. Конструкции термисторов

Термисторы выпускаются в различных конструктивных исполнениях: в виде стерженьков, дисков, бусинок. На рис. 9.3 показаны некоторые конструкции термисторов.

Термисторы типов ММТ-1, КМТ-1 (рис. 9.3, а) внешне подобны высокоомным резисторам с соответствующей системой герметизации. Они состоят из полупроводникового стержня 1, покрытого эмалевой краской, контактных колпачков 2 с токоотводами 3. Термисторы типов ММТ-4 и КМТ-4 (рис. 9.3, б) также состоят из полупроводникового стержня 1, контактных колпачков 2 с токоотводами 3. Кроме покрытия эмалью стержень обматывается металлической фольгой 4, защищен металлическим чехлом 5 и стеклянным изолятором 6. Такие термисторы применимы в условиях повышенной влажности.

На рис. 9.3, в показан термистор специального типа ТМ-54 — «Игла». Он состоит из полупроводникового шарика 1 диаметром от 5 до 50 мкм, который вместе с платиновыми электродами 2 впрессован в стекло толщиной порядка 50 мкм. На расстоянии около 2,5 мм от шарика платиновые электроды приварены к выводам 3 из никелевой проволоки. Термистор вместе с токоотводами помещен в стеклянный корпус 4. Термисторы типа ТМ-54 обладают очень малой тепловой инерцией, их постоянная времени порядка 0,02 с, и они используются в диапазоне температур от -70 до $+250$ °С. Малые размеры термистора позволяют использовать его, например, для измерений в кровеносных сосудах человека.

§ 9.4. Собственный нагрев термисторов

Термисторы применяются в самых различных схемах автоматики, которые можно разделить на две группы. В первую группу входят схемы с термисторами, сопротивление которых определяется только температурой окружающей среды. Ток, проходящий при этом через термистор, настолько мал, что не вызывает дополнительного разогрева термистора. Этот ток необходим только для измерения сопротивления и для термисторов типа ММТ составляет около 10 мА, а для типа КМТ — 2—5 мА. Во вторую группу входят схемы с термисторами, сопротивление которых меняется за счет собственного нагрева. Ток, проходящий через термистор, разогревает его. Поскольку при повышении температуры сопротивление уменьшается, ток увеличивается, что приводит к еще большему выделению теплоты. Можно сказать, что в данном случае проявляется положительная обратная связь. Это позволяет получить в схемах с термисторами своеобразные характеристики релейного типа.

На рис. 9.4, *а* показана вольт-амперная характеристика термистора. При малых токах ($I < I_{\text{доп}}$) влияние собственного нагрева незначительно и сопротивление термистора практически остается постоянным. Следовательно, напряжение на термисторе растет пропорционально току (участок *ОА*). При дальнейшем увеличении тока ($I > I_{\text{доп}}$) начинает сказываться собственный нагрев термистора, сопротивление его уменьшается. Вольт-амперная характеристика изменяет свой вид, начинается ее «падающий» участок *АБ*. Этот участок используется для создания на базе термистора схем термореле, стабилизатора напряжения и др.

Резко выраженная нелинейность вольт-амперной характеристики термистора позволяет использовать его в релейном режиме. На рис. 9.4, *б* представлена схема включения, а на рис. 9.4, *в* — характеристика термистора в этом режиме. Если в цепи термистора отсутствует добавочное сопротивление ($R_{\text{доб}} = 0$), то при некотором значении напряжения ток в цепи термистора резко увеличивается, что может привести к разрушению термистора (кривая U_T на рис. 9.4, *в*). Для ограничения роста тока необходимо в цепь термистора R_T включить добавочный резистор $R_{\text{доб}}$ (рис. 9.4, *б*) с прямолинейной характеристикой (кривая U_R на рис. 9.4, *в*). При графическом сложении этих двух характеристик ($U_T + U_R$) получим общую вольт-амперную характеристику U_0 (имеющую S-образный вид на рис. 9.4, *в*). Эта характеристика похожа на характеристику бесконтактного магнитного реле (см. гл. 26). Рассмотрим по этой характеристике процесс изменения тока I в цепи (рис. 9.4, *б*) при плавном увеличении напряжения питания U_0 . При достижении значения напряжения срабатывания $U_{\text{ср}}$ (этому напряжению соот-

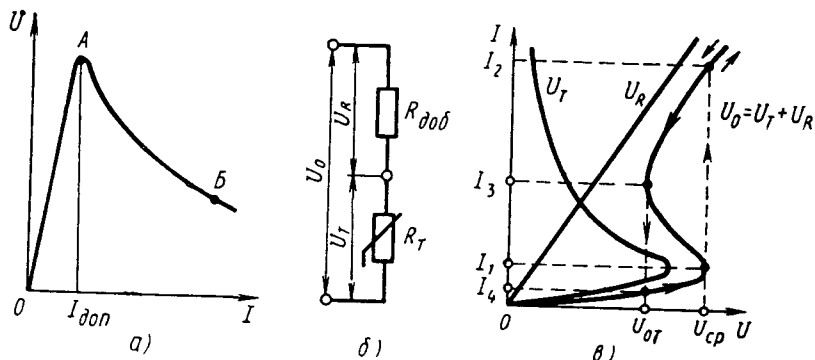


Рис. 9.4. Получение релейной характеристики в схеме с термистором

ветствует ток I_1) ток скачком возрастает от значения I_1 до существенно большего значения I_2 . При дальнейшем увеличении напряжения ток будет плавно возрастать от I_2 . При уменьшении напряжения ток вначале плавно уменьшается до значения I_3 (этому току соответствует напряжение отпущения $U_{от}$), а затем скачком падает до значения I_4 , после чего ток плавно уменьшается до нуля. Скачкообразное изменение тока происходит не мгновенно, а постепенно из-за инерционности термистора.

§ 9.5. Применение терморезисторов

При использовании терморезисторов в качестве датчиков систем автоматики различают два основных режима. В первом режиме температура терморезистора практически определяется только температурой окружающей среды. Ток, проходящий через терморезистор, очень мал и практически не нагревает его. Во втором режиме терморезистор нагревается проходящим по нему током, а температура терморезистора определяется изменяющимися условиями теплоотдачи, например интенсивностью обдува, плотностью окружающей газовой среды и т. п.

При использовании терморезисторов в первом режиме они играют роль датчиков температуры и называются обычно термометрами сопротивления. Наибольшее распространение получили термометры сопротивления типов ТСП (платиновые) и ТСМ (медные), включаемые в мостовую измерительную схему.

В процессе измерения температуры с помощью термометров сопротивления могут возникать следующие погрешности: 1) от колебания напряжения питания; 2) от изменения сопротивления соединительных проводов при колебаниях температуры окружающей среды; 3) от собственного нагрева датчика под действием протекающего через него тока.

Рассмотрим схему включения термометра сопротивления (рис. 9.5), в которой приняты меры для уменьшения отмеченных трех видов погрешностей. Для уменьшения погрешности от колебаний напряжения питания используется измерительный прибор логометрического типа (см. гл. 2). Угол отклонения подвижной системы логометра пропорционален отношению токов в двух катушках, одна из которых создает вращающий, а вторая — противодействующий моменты. Через одну катушку проходит ток разбаланса, зависящий от сопротивления терморезистора R_T . Вторая катушка питается тем же напряжением, что и мостовая измерительная схема.

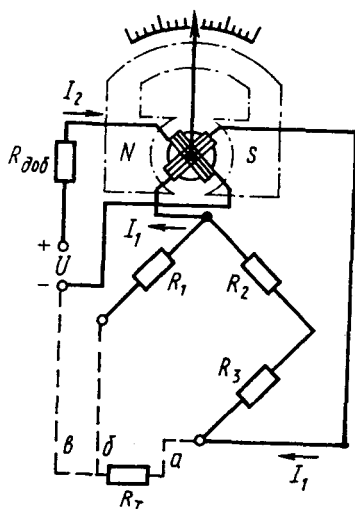


Рис. 9.5. Логометрическая схема включения терморезистора

льших расстояниях (сотни метров) $R_{\text{пр}}$ может достигать 3—5 Ом. Еще одним способом уменьшения погрешности от температурных изменений сопротивления соединительных проводов является применение многопроводных схем. На рис. 9.5 показана схема включения датчика $R_{\text{д}}$ в мостовую схему посредством трех проводов (a , $б$, $в$). Сопротивления проводов a и $б$ включены в смежные плечи моста, поэтому одновременное их изменение не нарушает равновесия моста. Сопротивление проводов $в$ вообще не входит в мостовую схему. Погрешность за счет самонагрева датчика может быть учтена при градуировке шкалы измерительного прибора.

При быстром изменении температуры появляется динамическая погрешность, обусловленная тепловой инерцией датчика. Передача теплоты от измеряемой среды к терморезистору происходит мгновенно, а в течение некоторого времени.

Для количественной оценки тепловой инерции датчика пользуются понятием «постоянная времени»:

$$\tau = c_{\text{д}} m_{\text{д}} / (ks), \quad (9.1)$$

где $c_{\text{д}}$ — удельная теплоемкость датчика; $m_{\text{д}}$ — масса датчика; k — коэффициент теплопередачи; s — поверхность соприкосновения средой.

При колебаниях напряжения питания одновременно будут изменяться токи в обеих катушках, а их отношение будет оставаться постоянным.

В автоматических уравновешенных мостах колебание напряжения питания не приводит к появлению пропорциональной погрешности измерения, незначительно изменяется лишь порог чувствительности.

Для уменьшения погрешности от изменения сопротивления соединительных проводов необходимо правильно выбирать сопротивление датчика. Эта погрешность сводится к минимуму, если сопротивление датчика выбрать из условия $R_{\text{д}} \gg R_{\text{пр}}$, где $R_{\text{пр}}$ — сопротивление соединительных проводов. При бо-

Если холодный датчик поместить в среду с температурой $T_{cp}(^{\circ}C)$, то его температура будет изменяться во времени по следующему закону:

$$T_d(^{\circ}C) = T_{cp}(^{\circ}C) (1 - e^{-t/\tau}). \tag{9.11}$$

Чем больше постоянная времени t , тем больше пройдет времени, пока температура датчика сравняется с температурой среды. За время $t = \tau$ датчик нагреется только до температуры $T_{cp} = 0,63^{\circ}C$, а за время $t = 4,6\tau$ — до температуры $T_{cp} = 0,99^{\circ}C$. Графиком уравнения (9.11) является экспонента, показанная на рис. 1.3, в.

Рассмотрим теперь некоторые примеры использования собственного нагрева терморезисторов в устройствах для измерения различных физических величин, косвенно связанных с температурой.

Автоматическое измерение скорости газового потока проводится с помощью термоанемометра. Датчик этого прибора (рис. 9.6, а) состоит из терморезистора, представляющего собой тонкую платиновую проволоку 1, припаянную к двум манганиновым стержням 2, закрепленным в изоляционной втулке 3. С помощью выводов 4 терморезистор включается в измерительную схему. Через терморезистор пропускается ток, вызывающий его нагрев. Но температура (а следовательно, и сопротивление) терморезистора будет определяться скоростью газового потока, в который помещен датчик. Чем больше будет эта скорость, тем интенсивнее будет отводиться теплота от терморезистора. На рис. 9.6, б показана градуировочная кривая термоанемометра, из которой видно, что при увеличении скорости примерно вдвое сопротивление терморезистора уменьшается примерно на 20 %.

На аналогичном принципе основана работа электрического газоанализатора. Если взять два одинаковых саморазогреваемых терморезистора и поместить один в камеру, наполненную воздухом, а другой — в камеру, наполненную смесью воздуха с углекислым га-

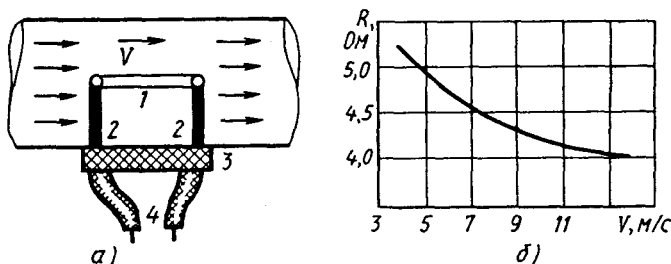


Рис. 9.6. Термоанемометр — датчик скорости газового потока

зом CO_2 , то из-за различной теплопроводности воздуха и углекислого газа сопротивление терморезисторов будет разным. Так как теплопроводность углекислого газа значительно меньше теплопроводности воздуха, то и отвод теплоты от терморезистора в камере с CO_2 будет меньше, чем от терморезистора в камере с воздухом. По разнице сопротивлений терморезисторов можно судить о процентном содержании углекислого газа в газовой смеси.

Зависимость теплопроводности газа от его давления позволяет использовать терморезисторы с собственным нагревом в электрических вакуумметрах. Чем глубже вакуум (т. е. более разрежен газ), тем хуже условия теплоотдачи с поверхности терморезистора, помещенного в вакуумную камеру. Если через терморезистор пропускать ток для его нагрева, то температура терморезистора будет возрастать при уменьшении давления контролируемого газа.

Таким образом, с помощью терморезисторов можно измерять скорости и расход газов и жидкостей, давление и плотность газов, определять процентное содержание газов в смеси. Кроме платины в таких приборах используют вольфрам, никель, полупроводниковые терморезисторы. Для того чтобы исключить влияние колебаний температуры окружающей среды, стремятся обеспечить достаточно интенсивный собственный нагрев (до 200—500 °С).

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия терморезистора.
2. Какие материалы применяют для металлических терморезисторов?
3. Как изменяется сопротивление полупроводникового терморезистора при нагреве?
4. Назовите три причины погрешности термометров сопротивления.

Глава 10

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

§ 10.1. Принцип действия

Термоэлектрические датчики относятся к датчикам генераторного типа. Их работа основана на одном из термоэлектрических явлений — появлении *термоэлектродвижущей силы* (термоЭДС).

Сущность этого явления заключается в следующем. Если составить электрическую цепь из двух разнородных металлических проводников (или полупроводников), причем с одного конца проводники спаять, а место соединения (спай) нагреть, то в такой цепи возникает ЭДС. Эта ЭДС будет пропорциональна температуре места спаивания (точнее — разности температур места спаивания и свободных, неспаиваемых концов). Коэффициент пропорциональности зависит от материала проводников и в определенном интервале температуры остается постоянным. Цепь, составленная из двух разнородных материалов, называется термопарой; проводники, составляющие термопару, называются термоэлектродами; места соединения термоэлектродов — спаями. Спай, помещаемый в среду, температуру которой надо измерить, называется горячим или рабочим. Спай, относительно которого измеряется температура, называется холодным или свободным. Возникающая при различии температур горячего и холодного спаев ЭДС называется термоЭДС. По значению этой термоЭДС можно определить температуру.

Физическая сущность возникновения термоЭДС объясняется наличием свободных электронов в металлах. Эти свободные электроны хаотически движутся между положительными ионами, образующими остов кристаллической решетки. В разных металлах свободные электроны обладают при одной и той же температуре разными скоростью и энергией. При соединении двух разнородных металлов (электродов) свободные металлы из одного электрода проникают в другой. При этом металл с большей энергией и скоростью свободных электронов больше их теряет. Следовательно, он приобретает положительный потенциал. Металл с меньшей энергией свободных электронов приобретает отрицательный потенциал. Возникает контактная разность потенциалов. При одинаковой температуре спаев ($\theta_1 = \theta_2$ на рис. 10.1, а) контактная разность потенциалов не может создать тока в замкнутой цепи. Контактная разность в спае 1 направлена навстречу контактной разности в спае 2. Но если нагреть

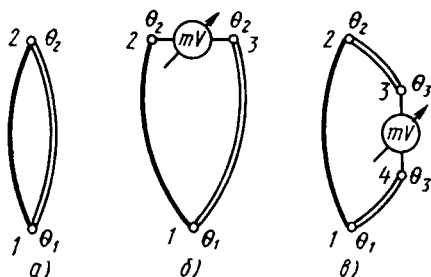


Рис. 10.1. Термопара и схемы ее включения

один из спаев (рабочий) до температуры $\theta_1 > \theta_2$, то контактная разность в спае 1 увеличится, а в спае 2 останется без изменения. В результате в контуре и возникает термоЭДС, тем большая, чем больше разность температур спаев 1 и 2 ($\theta_1 - \theta_2$).

Для измерения термоЭДС, вырабатываемой термопарой, в цепь термопары включают измерительный прибор (например, милливольтметр). Милливольтметр включают, разомкнув свободный спай (рис. 10.1, б), либо в разрыв одного из термоэлектродов (рис. 10.1, в). Как видно из схем включения измерительного прибора, в случае разомкнутого свободного спаия (рис. 10.1, б) у термопары три спаия: один горячий 1 и два холодных 2 и 3, которые должны иметь постоянную температуру. При включении милливольтметра в разрыв одного из термоэлектродов (рис. 10.1, в) имеется четыре спаия: один горячий 1, один холодный 2 (он должен иметь постоянную температуру), два нейтральных 3 и 4 (они должны находиться при одинаковой, но не обязательно постоянной температуре). Для обеих схем термоЭДС и показания прибора будут одинаковыми, если соответственно одинаковыми будут температуры горячих и холодных спаев. В этом нетрудно убедиться, если составить уравнения по второму закону Кирхгофа для каждого из контуров.

Способ изготовления спаия (сваркой, спайкой и т. п.) на термоЭДС не влияет, если только размеры спаия таковы, что температура его во всех точках одинакова.

ТермоЭДС, вырабатываемая термопарой, составленной из электродов A и B , является разностью двух термоЭДС: $e_{AB}(\theta_1)$ — термоЭДС горячего спаия при температуре θ_1 ; $e_{AB}(\theta_2)$ — термоЭДС холодного спаия при температуре θ_2 , т. е.

$$E_{AB} = e_{AB}(\theta_1) - e_{AB}(\theta_2). \quad (10.1)$$

Значения термоЭДС и ее направление зависят от материалов электродов A и B .

В табл. 10.1 приведены термоЭДС для разных материалов в паре с платиной при температуре горячего спая $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (373 K) и температуре холодного спая $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (273 K). Знак плюс перед термоЭДС означает, что в холодном спае ток идет по направлению к платиновому электроду.

Таблица 10.1. ТермоЭДС основных материалов для термопар в паре с платиной (температура рабочего спая при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура холодного спая равна нулю)

Материал	ТермоЭДС, мВ	Материал	ТермоЭДС, мВ
Платина	0	Платинородий (10 % родия)	+0,64
Кремний	+44,8	Вольфрам	+0,8
Хромель	+2,95	Модибден	+1,3
Железо	+1,8	Алюмель	-1,15
Медь	+0,76	Копель	-4,0

Если составить термопару из материалов, которые по отношению к платине имеют термоЭДС разных знаков, то термоЭДС такой термопары будет равна сумме термоЭДС материалов по отношению к платине. Например, из табл. 10.1 берем данные для термоЭДС меди в паре с платиной $+0,76\text{ мВ}$ и термоЭДС сплава копель в паре с платиной $-4,0\text{ мВ}$. Термопара медь—копель на основании уравнения (10.1) будет иметь термоЭДС $E_{AB} = 0,76 - (-4) = +4,76\text{ мВ}$. Материалы для термопар следует подбирать таким образом, чтобы термоЭДС имели достаточно большие значения, обеспечивающие высокую чувствительность измерения.

§ 10.2. Материалы, применяемые для термопар

К материалам для термоэлектродов термопар кроме требования получения большого значения термоЭДС предъявляются и другие требования. Пожалуй, наиболее важным из них является обеспечение взаимозаменяемости. Это означает, что термопары одного и того же типа должны иметь при одинаковых температурах одну и ту же термоЭДС. В этом случае замена термопары не должна привести к перенастройке или переградировке измерительного прибора. Поскольку термопары часто используются в очень тяжелых условиях (высокие температуры, агрессивная среда и т. п.), порой их необходимо менять уже через 1—2 тыс. ч. А измерительные приборы способны

работать годами, их менять при замене термопары нецелесообразно. К тому же в промышленности получили большое распространение так называемые обтекающие системы автоматического контроля, когда на один и тот же измерительный прибор последовательно подаются сигналы от нескольких десятков термопар, контролирующих температуру в разных местах. Поэтому необходима стабильность и повторяемость свойств термопар. В табл. 10.2 приведены основные типы термопар, выпускаемых серийно, и их характеристики. В паре материалов первым указан положительный электрод.

Таблица 10.2. Зависимость термоЭДС от температуры для стандартных термопар (при температуре свободных концов 0 °С)

Температура, °С	ТермоЭДС, мВ		
	термопара платинородий—платина, гр. ПП	термопара хромель—алюмель, гр. ХА	термопара хромель—копель, гр. ХК
-50	—	—	-3,11
-20	-0,109	-0,77	-1,27
0	0	0	0
50	0,301	2,02	3,35
100	0,640	4,10	6,95
200	1,421	0,13	14,66
300	2,311	12,21	22,91
400	3,244	16,40	31,49
600	5,214	24,91	49,02
800	7,323	33,32	—
1000	9,569	41,32	—
1100	10,745	45,16	—
1300	13,152	—	—
1500	15563	—	—

В зависимости от материала электродов термопары, получившие практическое применение, разделяются на две основные группы: из благородных и неблагородных металлов.

Наибольшее распространение из первой группы получила термопара типа ТПП. Один электрод ее изготовлен из платинородия

(90 % платины и 10 % родия), другой — из чистой платины. Эта термопара может использоваться как образцовая. Достоинствами ее являются химическая стойкость к окислительной среде, взаимозаменяемость термоэлектродов, повторяемость характеристик. Недостаток — малое значение термоЭДС. Термопара типа ТПП может длительно работать при температуре 1300 °С, термоЭДС ее при этой температуре составляет 13,152 мВ.

Для более высоких температур (длительно — до 1600 °С, кратковременно — до 1800 °С) применяется термопара ТПР. Один электрод — платинородий (70 % платины и 30 % родия), другой электрод также платинородий (94 % платины и 6 % родия). При температуре 1800 °С термоЭДС составляет 13,927 мВ.

Существенно большие значения термоЭДС имеют термопары из неблагородных металлов, материалом для электродов которых служат специально разработанные сплавы: хромель (89 % никеля, 9,8 % хрома, 1 % железа, 0,2 % марганца), алюмель (94 % никеля, 2,5 % марганца, 2 % алюминия, 1 % кремния, 0,5 % железа), копель (55 % меди, 45 % никеля).

Наибольшее распространение получили термопары типа ТХА (хромель—алюмель) и типа ТХК (хромель—копель). Зависимость термоЭДС этих термопар от температуры показана на рис. 10.2. Хромель-алюмелевые термопары применяют для измерения температур в пределах от -50 до 1000 °С. Они способны работать в окислительной среде, поскольку образуемая при нагреве тонкая защитная пленка препятствует проникновению кислорода внутрь металла. Зависимость термоЭДС от температуры для термопар ТХА близка к

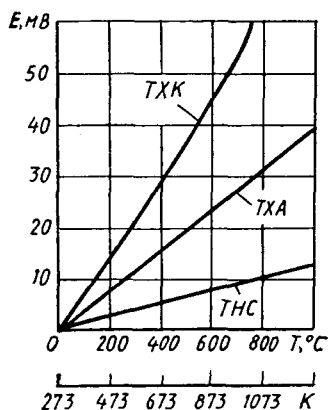


Рис. 10.2. Зависимости термоЭДС от температуры

линейной. Хромель-копелевые термопары имеют самую высокую чувствительность: 6,95 мВ на 100 °С. Однако диапазон измеряемых температур (от -50 до 600 °С) несколько ниже, чем у термопар типа ТХА. Несколько хуже у термопар типа ТХК и линейность характеристики. Их достоинством является более высокая влагостойкость.

Термопара типа ТНС (электроды выполнены из сплавов НС-СА) применяется в диапазоне температур от 300 до 1000 °С. ТермоЭДС ее невелика — всего 13,39 мВ при 1000 °С. Но характерной особенностью этой термопары является то, что на точность ее работы почти не влияет температура холодного спая. Объясняется это тем, что термоЭДС термопары типа ТНС в диапазоне низких температур (до +200 °С) практически близка к нулю. Следовательно, изменения температуры холодного спая, вызванные обычными погодными колебаниями в помещении и даже на улице, почти не влияют на результаты измерения.

Кроме перечисленных материалов для термопар используются и другие, менее распространенные, но имеющие свои достоинства. Для измерения высоких температур применяют термопару из тугоплавких металлов — вольфрама и молибдена. Достоинством термопар медь—копель и железо—копель является низкая стоимость.

Конструктивно термопары выполняются в специальной арматуре, обеспечивающей защиту электродов от действия горячих химически агрессивных газов и паров, электрическую изоляцию выводов. Для защиты термопар из благородных металлов применяют стальные трубки диаметром 21 мм и с максимальной глубиной погружения до 2 м.

Для защиты термопар из благородных металлов применяются кварцевые и фарфоровые трубки диаметром 8 и 20 мм. Для изоляции используют асбест (до 300 °С), кварц (до 1000 °С), фарфор (до 1400 °С).

Так как термопары являются датчиками генераторного типа, то их в принципе можно использовать и для получения электроэнергии. Измерительные термопары для этой цели практически непригодны, поскольку их термоЭДС невелика. Но термопары с электродами из полупроводниковых материалов имеют термоЭДС, на порядок большую (до 65 мВ на 100 °С). С помощью таких термопар может осуществляться, например, и преобразование солнечной энергии в электрическую. Нашли применение они в быту: термогенераторы используются для питания радиоприемников. КПД полупроводниковых термоэлементов достигает 10 %. Для целей измерения полупроводниковые термопары пока не применяются из-за не-

линейности характеристики, малой механической прочности и сравнительно малого (до 500 °С) температурного диапазона.

§ 10.3. Измерение температуры с помощью термопар

При автоматическом измерении температуры с помощью термопар используются два основных метода: непосредственное измерение термоЭДС с помощью милливольтметра и компенсационный метод, рассмотренный в § 2.7.

Так как значение термоЭДС, развиваемой термопарой, невелико, для непосредственного измерения ее необходимы высокочувствительные милливольтметры магнитоэлектрического типа. Приборы этого типа работают на основе взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и измеряемого тока, протекающего по подвижной рамке. Для создания достаточного вращающего момента при весьма небольшом токе рамка выполняется из большого числа витков тонкого медного провода. Противодействующий момент создается спиральными пружинами, по которым и подводится ток в рамку. Шкала милливольтметра градуируется непосредственно в градусах и на ней указывается тип термопары, для которой предназначен данный милливольтметр.

Обозначим через R_B сопротивление милливольтметра, R_T — сопротивление термопары, R_n — сопротивление соединительных проводов. Ток, проходящий по рамке милливольтметра под действием термоЭДС $E_{тп}$,

$$I_B = E_{тп} / (R_B + R_T + R_n). \quad (10.2)$$

Из этой формулы видно, что показания прибора зависят не только от термоЭДС $E_{тп}$, но и от сопротивлений R_B , R_T , R_n . Так как шкала прибора уже проградуирована для термопары определенного типа, то сопротивления R_T и R_B уже учтены при градуировке. А сопротивления внешней цепи также указываются на шкале (обычно 0,6; 5; 15 или 25 Ом).

Оценим показания прибора, шкала которого проградуирована в милливольтгах. Напряжение на его зажимах $U_B = I_B R_B$.

С учетом (10.2)

$$U_B = E_{тп} R_B / (R_B + R_T + R_n). \quad (10.3)$$

Обозначим внешнее сопротивление цепи $R_{вн} = R_T + R_n$ и выразим из (10.3) термоЭДС

$$E_{тп} = U_B (R_B + R_{вн}) / R_B = U_B + U_B (R_{вн} / R_B). \quad (10.4)$$

Из (10.4) видно, что измеряемое милливольтметром напряжение будет всегда меньше, чем ЭДС термопары, на $U_b(R_{вн}/R_b)$. Эта величина будет тем меньше, чем больше сопротивление милливольтметра R_b по сравнению с внешним сопротивлением $R_{вн}$. Обычно милливольтметры имеют кроме сопротивления рамки еще добавочное сопротивление из манганина, что в сумме дает не менее 100 Ом.

Обычно градуировка термопар осуществляется при температуре холодного спая $\theta_2 = 0$. На практике при измерении температуры θ_1 холодный спай имеет $\theta_2 \neq 0$. Следовательно, по измеренной термоЭДС нельзя точно определить θ_2 . Необходимо вводить так называемую поправку на температуру холодных спаев. Существует несколько способов поддержания неизменной температуры холодных спаев. Например, можно поместить холодные спаи в ванну с тающим льдом, но это возможно лишь в лабораторных условиях или при наладке. Можно холодные спаи закапывать в землю на глубину нескольких метров, где температура довольно стабильна, или помещать холодные спаи в специальную коробку с тепловой изоляцией.

Если температура холодных спаев известна, то к показаниям измерительного прибора добавляют поправку, соответствующую термоЭДС при θ_2 . Эту поправку следует брать из градуировочной кривой.

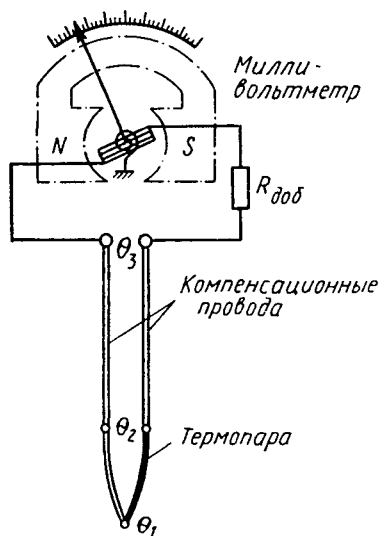


Рис. 10.3. Измерение термоЭДС милливольтметром

Поправку на температуру холодных спаев можно ввести и механическим путем: при отключенной термопаре сместить стрелку на шкале прибора на отметку, соответствующую температуре холодных спаев (обычно температуре окружающей среды). Применяют также схемы автоматической коррекции температурных погрешностей, в которых используются свойства терморезисторов изменять сопротивление в зависимости от температуры.

Рассмотрим принципиальную схему включения термопары и милливольтметра (рис. 10.3). Измерительный прибор может находиться на довольно значительном удалении от термопары. Длина со-

единительных проводов может составлять несколько метров. В местах присоединения этих проводов также возникают термоЭДС. Для точной компенсации этих термоЭДС необходим определенный подбор материалов проводов и термопар. Для присоединения термопар служат специальные так называемые компенсационные провода. Каждой паре материалов компенсационных проводов присваивают буквенное обозначение, а каждому материалу придают определенную расцветку, для чего используют оплетку из цветной пряжи или цветные опознавательные нити, проложенные в проводе.

Для термопар типа ТПП применяют компенсационные провода с обозначением П в красной и зеленой оплетке с зелено-белыми нитями внутри. Материал провода — медь в паре с медно-никелевым сплавом. Для термопар типа ТХА применяют провода с обозначением М в красной и коричневой оплетке с красно-белыми нитями из меди в паре с константаном. Для термопар ТХК применяют провода с обозначением ХК в фиолетово-желтой оплетке с нитями такого же цвета и материалом хромель—копель, т. е. компенсационными проводами могут быть и основные термоэлектроды.

Рассмотрим измерение температуры компенсационным методом с помощью термопары и автоматического потенциометра. На рис. 10.4 показаны термопара ТП, вырабатывающая термоЭДС E_d , и мостовая схема, вырабатывающая компенсирующее напряжение U_k , снимаемое между точками А и В. Разность этих напряжений подается на вход усилителя (У), который питает управляющую обмотку исполнительного электродвигателя (ЭД). Обмотка возбуждения ЭД постоянно подключена к источнику переменного напряжения, а

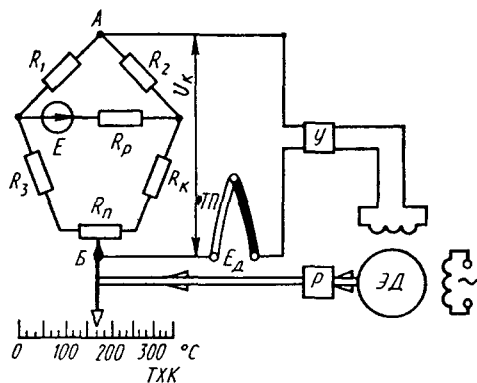


Рис. 10.4. Автоматический потенциометр для измерения температуры

скорость вращения ЭД зависит (примерно пропорционально) от напряжения на его управляющей обмотке. Электродвигатель (ЭД) через редуктор (Р) перемещает движок калиброванного реохорда (потенциметрического датчика) R_n до тех пор, пока напряжение U_k не сравняется с E_d . Одновременно перемещаются указатель на шкале прибора и перо самописца. При $U_k = E_d$ напряжение на входе усилителя равно нулю ($U_k - E_d = 0$) и электродвигатель (ЭД) остановится. Каждому значению выходного сигнала датчика $E_d = f(T \text{ } ^\circ\text{C})$ соответствует определенное положение указателя на шкале. Шкала проградуирована в $^\circ\text{C}$ и на ней указан тип термопары, для которой выполнена градуировка.

Мостовая схема в данном случае служит не для измерения, а для выработки компенсирующего напряжения U_k и автоматической коррекции из-за изменения температуры холодного спае. Плечи моста состоят из проволочных резисторов $R_1 - R_3$, выполненных из материала с малым температурным коэффициентом сопротивления (например, из манганина), и терморезистора R_k , изготовленного из материала с большим температурным коэффициентом сопротивления (например, из меди или никеля). Резистор располагается вблизи холодных спаев термопары. Мост питается от источника постоянного тока E — обычно это батарейка (например, сухой элемент типа ЭСЛ-30). При всяком изменении температуры холодных спаев термопары изменяется E_d и одновременно меняется сопротивление R_k , что приводит к изменению компенсирующего напряжения U_k на ту же величину, на какую изменилось E_d . Следовательно, колебания окружающей температуры не изменяют показаний на шкале прибора. Регулировочное сопротивление R_p служит для установки тока питания моста при разряде батареи (уменьшении E).

Обычно на панели автоматического потенциометра имеется кнопка с самовозвратом, обозначенная словами «Установка рабочего тока». При нажатии этой кнопки, не показанной на рис. 10.4, рабочая цепь прибора размыкается, а усилитель включается на разность ЭДС батарейки и специального стабильного нормального элемента. Если батарейка разрядилась, то под действием разности этих ЭДС, усиленной усилителем, электродвигатель ЭД перемещает движок регулировочного резистора R_p , автоматически устанавливая требуемое значение тока питания моста.

Ответственной деталью в измерительной схеме является реохорд. Он выполнен из манганиновой проволоки, намотанной на медной изолированной основе. Движок реохорда выполнен в виде контактного ролика.

Автоматические потенциометры могут иметь переключатели для поочередного подключения до 24 термопар.

Контрольные вопросы

1. Какое физическое явление используется при измерении температуры с помощью термопар?
2. Какие материалы применяются для термопар?
3. Какими способами поддерживается неизменная температура холодных спаев?
4. Поясните принцип действия автоматического потенциометра для измерения температуры. Сравните его схему с функциональной схемой на рис. 1.1.

Глава 11

СТРУННЫЕ ДАТЧИКИ

§ 11.1. Назначение и принцип действия

Для измерения неэлектрических величин применяется и *частотный* метод, при котором измеряемая величина преобразуется в переменное напряжение, частота которого зависит от этой величины. Достоинством частотного метода измерения является то, что в процессе передачи и дальнейшей обработки частотного выходного сигнала не возникает дополнительной погрешности. Действительно, если выходным сигналом датчика является напряжение, то при передаче такого сигнала на расстояние происходит падение напряжения на проводах линии связи. Если выходным сигналом датчика является, например, сопротивление, то к нему добавляется сопротивление проводов линии связи. А в частотном методе измерения наличие сопротивления проводов линии связи и внутреннего сопротивления измерительного прибора не изменяют частоту сигнала. Еще одним достоинством частотного сигнала является удобство преобразования его в цифровой код. Это особенно важно в связи с развитием в последнее время цифровых измерительных приборов и применением в автоматике цифровых вычислительных машин.

Наибольшее развитие для преобразования неэлектрических величин в частоту получили струнные датчики. Принцип действия струнного датчика основан на зависимости собственной частоты

колебаний натянутой струны длиной l и массой m от силы натяжения F :

$$f = 0,5\sqrt{F/(ml)}. \quad (11.1)$$

Струнные датчики используются в приборах для измерения силы, давления, расхода, температуры и др. При воздействии на струну измеряемой силы струна практически не растягивается, поэтому первичный преобразователь (например, мембрана в датчике давления) работает, почти не деформируясь. Это обстоятельство существенно снижает погрешность измерения из-за механического гистерезиса и упругого последействия материала первичного преобразователя.

Струнный датчик (рис. 11.1) состоит из струны 1, возбудителя 2 и приемника 3. Одним концом струна жестко закреплена, а другим концом соединена с первичным преобразователем, например мембраной 4 на рис. 11.1. При изменении давления P изменяется сила натяжения струны. С помощью возбудителя 2, которым может быть электромагнит, струна выводится из состояния равновесия и начинает колебаться с частотой f , определяемой давлением P . Приемник 3 преобразует перемещение струны с частотой f в электрический сигнал такой же частоты. В качестве приемника 3 может использоваться индуктивный, емкостный или любой другой датчик. На практике чаще всего применяют электромагнитный датчик. Дело в том, что он может попеременно выполнять функции то возбудителя, то приемника. Когда на его обмотку подается напряжение, то он создает электромагнитную силу притяжения струны и возбуждает ее колебания. А когда струна уже колеблется, то с этой же обмотки снимается переменное напряжение, частота которого равна частоте колебаний струны.

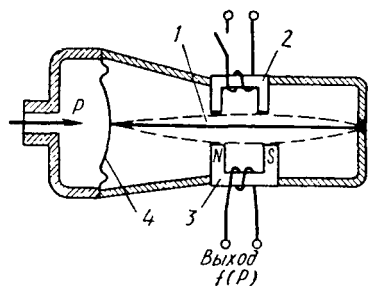


Рис. 11.1. Струнный датчик для измерения давления

Струнные датчики используются в двух режимах: автогенераторном и в режиме работы по запросу. В первом случае струна постоянно колеблется, а во втором — работает в более легких условиях, срок службы ее увеличивается и датчик получается несколько проще.

§ 11.2. Устройство струнных датчиков

Для обеспечения требуемой точности, чувствительности и надежности струнных датчиков необходимо выбрать соответствующий материал струны. Этот выбор определяется как условиями применения датчика, так и способом возбуждения колебаний струны. К материалу струны предъявляются следующие требования: высокая прочность при вибрационных нагрузках, определенное значение температурного коэффициента линейного расширения (либо малое, либо равное этому же коэффициенту конструкционного материала датчика), независимость упругих свойств от времени и температуры.

Возможно применение как ферромагнитных, так и неферромагнитных материалов струны. При использовании ферромагнитной струны применяются электромагнитные возбудители колебаний. Под действием тока, протекающего по обмотке неподвижного электромагнита, к струне прикладывается сила притяжения, выводящая ее из состояния покоя. При использовании неферромагнитной струны применяются магнитоэлектрические возбудители колебаний. При пропускании через струну тока она испытывает силу притяжения (или отталкивания) к полюсам постоянного магнита.

Наибольшее распространение в струнных датчиках с электромагнитным возбуждением получили стальные струны из круглой рояльной проволоки диаметром 0,1—0,3 мм. При длине в 40—60 мм в таких струнах возбуждаются колебания с частотой 700—2000 Гц. В последнее время используются более гибкие и поддающиеся более надежному креплению стальные ленты толщиной 0,08—0,1 мм и шириной 1—2 мм. Частота колебаний стальной ленты достигает 3 кГц и выше. Стальные струны и ленты работают в режиме заданной длины. В этом режиме струна крепится к относительно более массивному упругому первичному преобразователю, изготовленному также из стали. Одинаковый температурный коэффициент линейного расширения материала струны и материала конструкции датчика позволяет уменьшить температурную погрешность.

В режиме заданной длины струна очень чувствительна к нестабильности крепления, а при использовании неферромагнитных струн обычно требуется изолировать хотя бы один из концов струны, что ухудшает механическую стабильность крепления. Поэтому неферромагнитные струны обычно используют в режиме заданной силы. В качестве материала применяют бериллиевую бронзу, вольфрамые сплавы, а также специальный железокобальтовый сплав. Струны из вольфрамых сплавов бывают как круглыми, так и ленточными. Другие материалы обычно используют в виде лент.

При выборе размеров струны исходят из следующих противоречивых требований. При малой длине уменьшаются габариты датчиков, повышаются чувствительность и виброустойчивость. Однако при этом увеличивается погрешность из-за несовершенства крепления и влияния собственной жесткости струны. Для обеспечения малой погрешности от собственной жесткости следует стремиться к выполнению условия $l/d \geq 300 \div 500$, где l — длина струны, d — диаметр круглой или толщина ленточной струны. Обычно не рекомендуется выбирать длину струны l менее 20 мм. Сечение струны выбирается по требуемому пределу изменения натяжения и целесообразному механическому напряжению в струне. Например, для бронзы рекомендуется выбирать напряжение не более 0,5 % от модуля упругости.

Конструкция и материал крепления струны играют первостепенную роль для обеспечения стабильности струнного датчика. При малых механических напряжениях (до 200 Н/мм²) более хорошие результаты дают способы крепления, показанные на рис. 11.2. Крепление с помощью винта (рис. 11.2, а) приводит к значительному смятию струны и ухудшению стабильности. Более хорошие результаты дает крепление в щели (рис. 11.2, б). Ленточные струны закрепляют между двумя хорошо обработанными и подогнанными параллельными плоскостями (рис. 11.2, в). Таким же способом можно крепить и круглые струны. Для высокоточных датчиков применяют более сложные конструкции крепления струны. Для снятия механических напряжений при установке крепления используют температурное старение в виде нескольких циклов нагрева до 80—100 °С (по 4—8 ч каждый).

С помощью струнных датчиков возможно автоматическое измерение силы, давления, перемещения, ускорения, температуры и других неэлектрических величин. На базе струнных датчиков созданы также цифровые электроизмерительные приборы постоянного и

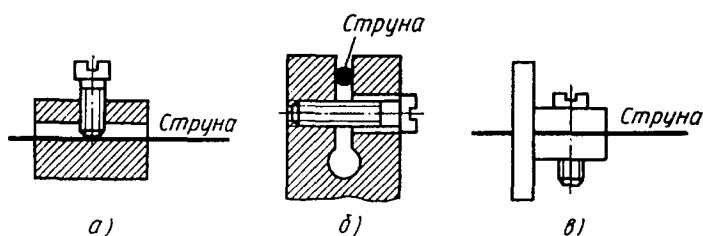


Рис. 11.2. Способы крепления струны

переменного тока. Диапазон изменения выходного сигнала — частоты — составляет 300—500 Гц. Для исключения помех промышленной частоты стремятся увеличить минимальное значение частоты. Высокая частота облегчает и преобразование ее в цифровой код. Например, для получения погрешности дискретности счета, не превышающей 0,1 %, при частоте в 1000 Гц достаточно производить счет импульсов выходного сигнала датчика в течение 1 с. Наибольшее распространение получили струнные тензометры. Рассмотрим схему измерения с помощью струнного тензометра (рис. 11.3, а). В корпусе 1 закреплена струна 2, начальное натяжение которой может устанавливаться с помощью регулировочного винта 3. Колебания струны возбуждаются с помощью электромагнита 4. Выходной сигнал приемника 5, в качестве которого используется, например, электромагнитный трансформаторный датчик, измеряется частотомером. В струнных тензометрах применяются струны длиной 20—200 мм с начальным механическим напряжением 300—400 Н/мм² и максимальным до 800 Н/мм². С их помощью может быть обеспечена чувствительность измерения относительной деформации в $1 \cdot 10^{-6}$.

На рис. 11.3, б показаны диаграммы напряжения, подаваемого на обмотку электромагнита 4, и напряжения, снимаемого с приемника 5 в режиме работы по запросу. Периодически посылаются сигналы запроса в виде одиночного импульса, а сигнал ответа имеет вид затухающих колебаний с частотой f , определяемой силой, приложенной к струне. Как следует из уравнения (11.1), эта зависимость имеет нелинейный характер. С помощью некоторых конструктивных мер можно уменьшить эту нелинейность. Но в датчиках с одной струной довольно трудно обеспечить нелинейность меньше чем 2—3 % от диапазона изменения частоты.

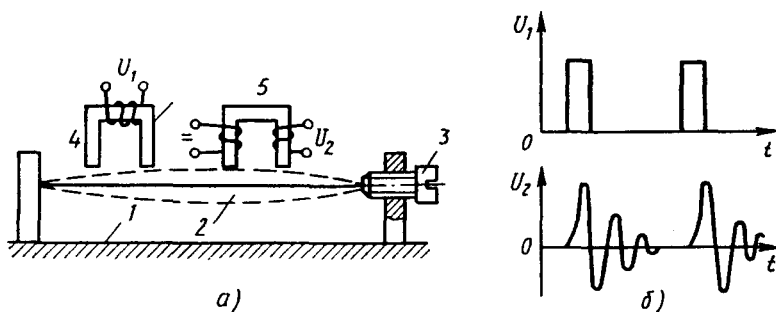


Рис. 11.3. Струнный тензометр

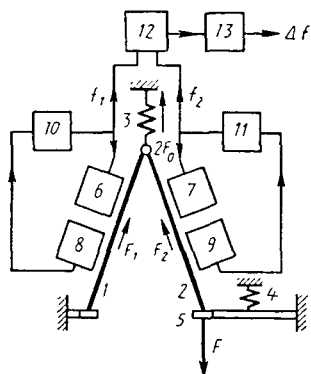


Рис. 11.4. Дифференциальный струнный датчик

Для увеличения точности преобразования и повышения линейности используют двухструнные дифференциальные датчики. Преобразователь силы в частоту (рис. 11.4) состоит из двух струн 1 и 2, размещенных под малым углом друг к другу и натянутых с силой $2F_0$, создаваемой пружиной 3.

Пружина 4 уравнивает начальное натяжение F_0 в струне 2. Измеряемая сила F , приложенная к рычагу 5, перераспределяет суммарную силу натяжения $2F_0$, увеличивая натяжение F_2 струны 2 и уменьшая натяжение F_1 струны 1. Под струнами 1 и 2 расположены возбуждители колебаний 6 и 7 и приемники колебаний 8 и 9. Приемники подключены на вход усилителей 10 и 11, а возбуждители — на выход этих усилителей. Напряжения с усилителей 10 и 11 с частотами соответственно f_1 и f_2 поступают на смеситель 12 и фильтр 13, на выходе которого получается сигнал разностной частоты $\Delta f = f_2 - f_1$. Для уменьшения нелинейности струна, работающая на укорочение, выбирается несколько большей длины.

Контрольные вопросы

1. В чем достоинство частотного метода измерения?
2. Как зависит частота колебаний натянутой струны от силы натяжения и от длины струны?

Глава 12

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

§ 12.1. Назначение. Типы фотоэлектрических датчиков

Фотоэлектрические датчики реагируют на изменение освещенности. Как правило, фотоэлектрический датчик состоит из источника и приемника светового потока (ПСП). Источником светового потока может быть сам объект измерения или специальный осветитель (на-

пример, в виде обычной лампы накаливания). Опытный сталевар, рассматривая через темно-синий светофильтр расплавленный металл, может определить «на глаз» его температуру, необходимость внесения каких-либо добавок.

По световому потоку, исходящему от раскаленного или расплавленного металла, фотоэлектрический пирометр автоматически измеряет температуру. В данном случае источником светового потока является сам объект измерения (рис. 12.1, а).

Однако чаще используются лампы накаливания, создающие постоянный световой поток, а его изменение происходит под влиянием перемещения шторки (рис. 12.1, б), прохождения света через контролируемую среду (рис. 12.1, в), под влиянием свойств контролируемого объекта, от которого отражается световой поток (рис. 12.1, г). В соответствии с этими возможными вариантами изменения светового потока с помощью фотоэлектрических датчиков можно измерять перемещение и подсчитывать число предметов, определять уровень, прозрачность, задымленность, цвет различных материалов, оценивать качество обработанной поверхности (блеск, шероховатость, окраска). Фотоэлектрические датчики используют в оптико-электронных преобразователях различных величин. Здесь следует напомнить, что более 75 % всей информации, которую получает человек, воспринимается с помощью зрения. Поэтому и фотоэлектрические датчики, воспринимающие оптическую информацию, находят широкое применение. С помощью фотоэлектрических датчиков осуществляется и так называемое «техническое зрение».

В приемниках светового потока фотоэлектрических датчиков используется фотоэффект. Под фотоэффектом понимают изменение свойств материала при изменении его освещенности. Различают внешний, внутренний и вентильный фотоэффект. *Внешний фотоэффект* состоит в том, что под влиянием потока излучения электроны вылетают из катода электронной лампы и ток эмиссии зависит от освещенности катода. *Внутренний фотоэффект* проявляется в том,

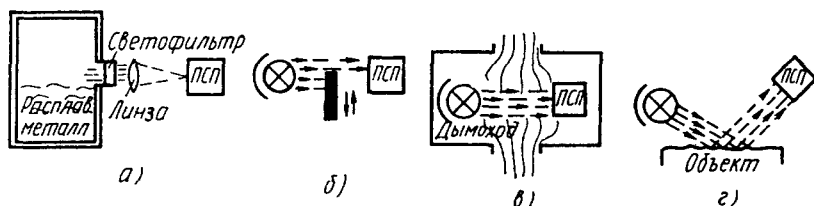


Рис. 12.1. Применение фотоэлектрических датчиков (ПСП — приемник светового потока)

что активное сопротивление полупроводникового материала зависит от его освещенности. При *вентильном фотоэффекте* между слоями освещенного проводника и неосвещенного полупроводника, разделенных тонким изоляционным слоем, возникает ЭДС, которая зависит от освещенности. При внешнем фотоэффекте носители тока выходят за пределы материала, при внутреннем — остаются внутри полупроводника. Вентильный фотоэффект, строго говоря, тоже является внутренним фотоэффектом.

Все фотоэлектрические датчики являются селективными (избирательными), т. е. их чувствительность зависит от частоты светового излучения. Иными словами, эти датчики реагируют на определенный цвет: красный, зеленый, синий или другой, включая и невидимую часть спектра (инфракрасное и ультрафиолетовое излучения). Диапазон длин волн видимого света $\lambda = 0,38 \div 0,78$ мкм. Более короткие волны относятся к ультрафиолетовому диапазону, более длинные — к инфракрасному.

§ 12.2. Приемники излучения фотоэлектрических датчиков

К приемникам излучения на основе внешнего фотоэффекта относятся электровакуумные или газонаполненные фотоэлементы, фотоэлектронные умножители и передающие электронно-лучевые трубки. К приемникам излучения на основе внутреннего фотоэффекта относятся фоторезисторы, фотодиоды и фототриоды. Все приемники излучения являются электронными и полупроводниковыми приборами и изучаются в курсе электроники. Здесь будут рассмотрены только краткие физические основы их работы и характеристики тех приемников излучения, которые нашли применение в системах автоматики.

На рис. 12.2 приведена схема включения вакуумного фотоэлемента.

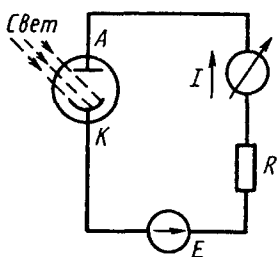


Рис. 12.2. Схема включения фотоэлемента

Анод A и катод K фотоэлемента находятся в стеклянном баллоне, из которого откачан воздух. Когда световой поток падает на катод, покрытый активным слоем, электроны получают энергию, позволяющую им вылететь из катода. Это явление называется *фотоэлектронной эмиссией*. Под действием источника питания с ЭДС E между катодом и анодом создается электрическое поле, которое и заставляет электроны перемещаться от катода к аноду.

В электрической цепи создается электрический ток, называемый *фототоком*. Когда действие света прекращается, ток в фотоэлементе и внешней электрической цепи исчезает.

Зависимость фототока от светового потока называется *световой характеристикой*. Эта характеристика при постоянных значениях E и R практически линейная. Фотоэлемент характеризуется также чувствительностью, которая равна отношению фототока (в микроамперах) к световому потоку (в люменах). В газонаполненных фотоэлементах благодаря ионизации молекул газа, заполняющего баллон, фототок увеличивается. Поэтому чувствительность газонаполненных фотоэлементов больше, чем у вакуумных. Однако световая характеристика вакуумного фотоэлемента более стабильна, менее зависима от колебаний напряжения питания, чем у газонаполненных элементов. Поэтому для целей автоматического измерения чаще применяются вакуумные фотоэлементы.

Промышленностью серийно выпускаются электривакуумные фотоэлементы типа СЦВ (сурьмяно-цезиевый, вакуумный) и типа Ф разных модификаций. Например, фотоэлемент типа Ф-1 имеет наилучшую чувствительность при $\lambda = 0,215$ мкм, Ф-3 — при $\lambda = 0,750$ мкм, Ф-5 — при $\lambda = 1,1$ мкм. Это означает, что фотоэлемент Ф-1 реагирует на ультрафиолетовое излучение, Ф-3 — на ви-

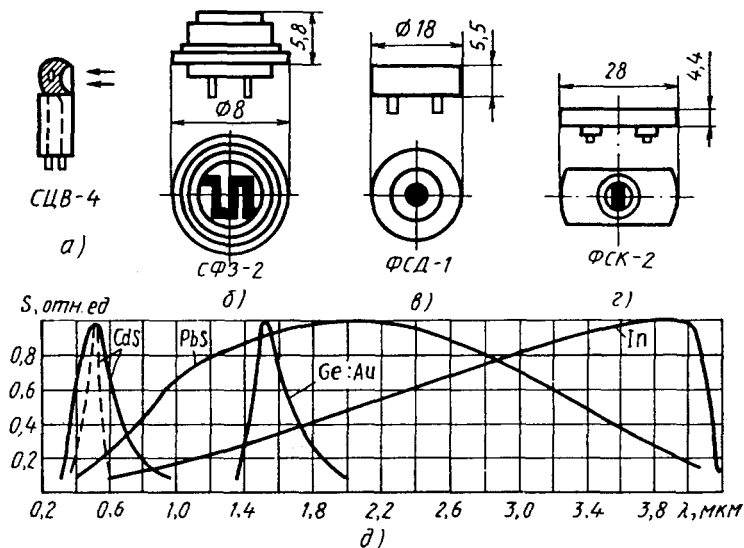


Рис. 12.3. Конструкции фотоэлементов (а, б, в, г) и спектральные характеристики (д)

димый свет, Ф-5 — на инфракрасный цвет. Фотоэлементы работоспособны и при других длинах волн, но выходной сигнал при этом будет меньше. На рис. 12.3, а показан фотоэлемент типа СЦВ-4, имеющий размеры диаметр 27 мм и длину 62 мм и интегральную чувствительность 80 мкА/лм. Фотоэлектронные умножители (ФЭУ) в отличие от фотоэлементов имеют дополнительные электроды. Благодаря вторичной эмиссии электронов из этих электродов чувствительность ФЭУ во много раз превышает чувствительность фотоэлементов. Однако для ФЭУ требуется и значительно большее напряжение питания.

Фоторезистор состоит из светочувствительного слоя полупроводника толщиной около микрометра, нанесенного на стеклянную или кварцевую пластинку. Токосъемные электроды выполнены с применением драгоценных металлов. При внутреннем фотоэффекте под действием светового потока в полупроводнике появляются дополнительные свободные электроны, благодаря чему увеличивается электропроводность, а сопротивление фоторезистора уменьшается.

Промышленностью выпускаются фоторезисторы типов СФ, ФР, ФС различных модификаций. В них используются полупроводниковые материалы: сернистый кадмий, сернистый свинец, германий, индий и др.

На рис. 12.3, б, в, г показан внешний вид некоторых фоторезисторов, а на рис. 12.3, д — спектральные характеристики фоторезисторов из некоторых полупроводниковых материалов. По вертикальной оси отложена чувствительность в относительных единицах, а по горизонтальной — длина волны монохроматического (т. е. определенного цвета) светового потока. Вид кривой (острый пик или пологая вершина) зависит и от технологии изготовления полупроводникового материала.

Надо отметить, что чувствительность схем с фоторезисторами во много раз больше, чем схем с фотоэлементами. Например, фоторезистор типа СФЗ-2А имеет в освещенном состоянии ток в 3 мА. При отсутствии света и напряжении на фоторезисторе в 10 В через него протекает ток в 2 мкА. Таким образом, кратность изменения сопротивления может достигать $3 \cdot 10^{-3} / (2 \cdot 10^{-6}) = 1500$.

Для автоматического измерения фоторезисторы используют чаще всего в мостовой схеме. Для исключения погрешности из-за потока излучения фона в два плеча моста включают одинаковые фоторезисторы, один из которых воспринимает только излучение фона, а другой освещается одновременно измеряемым объектом и фоном.

К недостаткам фоторезисторов следует отнести их инерционность. Она заключается в том, что при освещении фоторезистора фототок не сразу достигает своего конечного значения, а при прекращении освещения ток снижается до первоначального значения также не мгновенно, а по истечении определенного времени. Постоянная времени фоторезисторов составляет десятые и сотые доли секунды. Еще один недостаток фоторезисторов — зависимость сопротивления от температуры.

Фотодиодами называются полупроводниковые приборы, основанные на внутреннем фотоэффекте и использующие одностороннюю проводимость *p-n*-перехода.

Различают два режима работы фотодиодов: *фотогальванический* и *фотодиодный*. В фотогальваническом режиме не требуется источник питания, поскольку при освещении *p-n*-перехода появляется ЭДС, под действием которой возникает ток во внешней цепи. В этом режиме фотодиод непосредственно преобразует энергию света в электрическую энергию. При освещенности в $8 \cdot 10^3$ лк фотоЭДС составляет около 0,1 В. В фотодиодном режиме к фотодиоду прикладывается напряжение обратной полярности, т. е. такое, при котором обычный диод не проводил бы ток. При освещении фотодиода (его *n*-области) обратный ток резко увеличивается, фотодиод начинает проводить ток в обратном направлении.

Промышленностью выпускаются фотодиоды типа ФД различных модификаций. В качестве материала чувствительного слоя используются германий, кремний, селен. На рис. 12.4, *а, б* показаны конструкции некоторых фотодиодов, на рис. 12.4, *в* — его устройство. На металлическую пластинку 1 наносится слой полупроводника 2, поверх которого осаждается полупрозрачная пленка золота 3. Между золотой пленкой и полупроводником создается запирающий слой. Поверх пленки 3 накладывается защитный слой прозрачного лака 4. С внешней цепью фотодиод соединяется с помо-

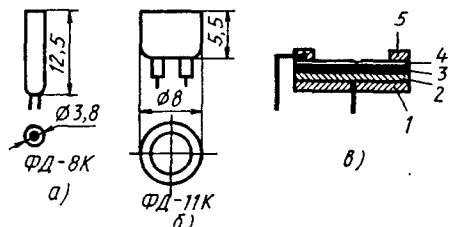


Рис. 12.4. Конструкции и устройство фотодиодов

шью выводов, одним из которых является контактное металлическое кольцо 5.

При замыкании фотодиода на сопротивление нагрузки по внешней цепи потечет ток, зависящий от светового потока. Такой режим работы фотодиода называется фотогальваническим. В этом режиме фотодиод непосредственно преобразует энергию света в электроэнергию. Чувствительность фотодиода к суммарному световому потоку при коротком замыкании селеновых фотоэлементов довольно велика и составляет 0,5 мА на 1 лм. При увеличении внешнего сопротивления в цепи фотодиода его чувствительность падает. Инерционность фотодиодов примерно на порядок меньше, чем у фоторезисторов.

Фотодиоды чаще используются не для целей автоматического измерения, а в схемах фотореле. Для этих же целей используются и фототранзисторы, совмещающие свойства фотодиода и усилительного транзистора.

§ 12.3. Применение фотоэлектрических датчиков

Фотоэлектрические датчики получили очень широкое распространение в системах автоматики и имеют хорошую перспективу дальнейшего распространения. Наиболее часто они используются в схемах релейного действия, где выдают дискретный сигнал: «Освещено» или «Затемнено».

Фотореле состоит из осветителя, создающего световой поток, и приемника излучения (фотоэлемента, фоторезистора, фотодиода или фототранзистора). Приемник излучения включен в цепь обмотки электромеханического реле (непосредственно или чаще через усилитель). При попадании светового потока на приемник скачком изменяется фототок и срабатывает реле, осуществляя необходимые переключения в схеме управления каким-либо устройством. Такие фотореле используются в турникетах, пропускающих пассажиров в метро, фиксируют достижение различными механизмами определенных положений, очень широко применяются в автоматических устройствах защиты обслуживающего персонала от производственных травм. Когда рука рабочего случайно пересекает световой барьер, ограждающий опасную зону, подается предупреждающий сигнал или механизм вообще останавливается. С помощью фотодатчиков осуществляется считывание дискретной информации с перфоленты. Информация на такой ленте записана с помощью отверстий, пробиваемых в определенных местах. Наличие отверстия означает циф-

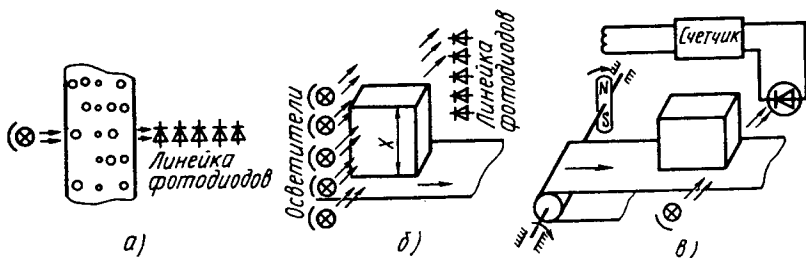


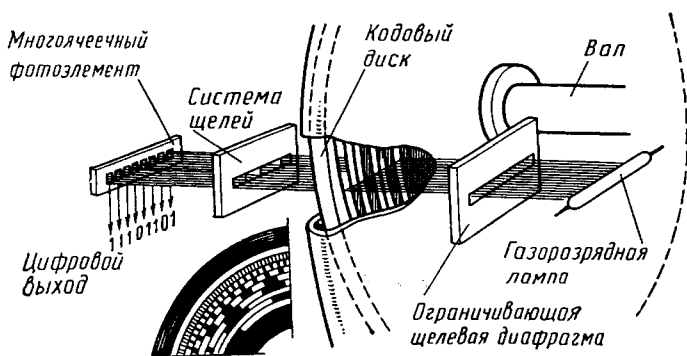
Рис. 12.5. Применение фотодиодов

ру 1, а отсутствие отверстия — цифру 0 в двоичном коде. Каждому разряду в двоичной форме счисления соответствует место расположения отверстий на перфоленте. Перфолента прокручивается между осветительной лампой и несколькими фотодатчиками (рис. 12.5, а), количество которых соответствует числу считываемых разрядов. Для таких целей могут использоваться специальные полупроводниковые приборы, объединяющие в одной конструкции несколько фотодатчиков. Эти фотодатчики располагаются в одну линию друг за другом, например, так называемая *линейка фотодиодов*. Имеются и фотодиодные матрицы, где фотодатчики расположены, как клетки в таблице.

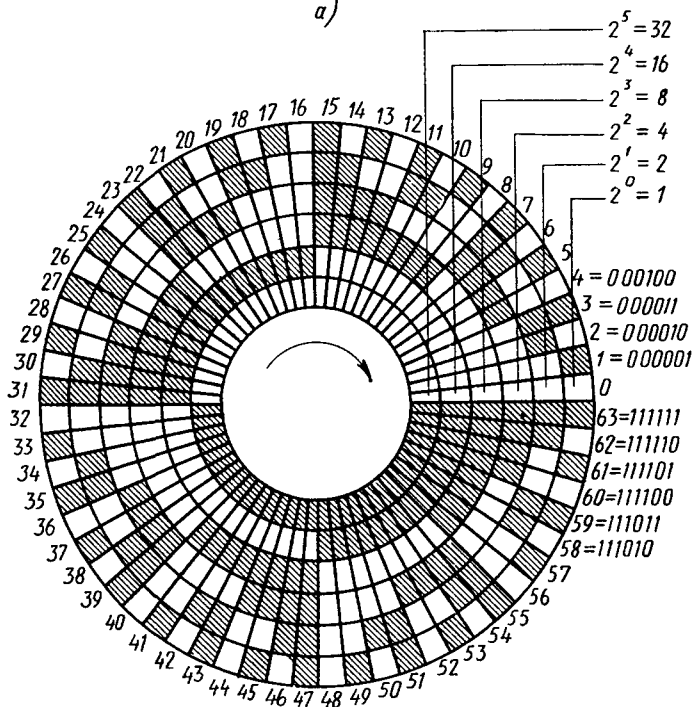
Линейку фотодиодов используют для измерения размеров детали, перемещаемой на конвейере. Деталь перекрывает световой поток (рис. 12.5, б) и затемняет такое количество фотодиодов, которое соответствует высоте детали.

Измерение длины перемещаемой детали может выполняться и по сигналу одного фотодатчика (рис. 12.5, в). Деталь, пересекая передней кромкой световой барьер, дает сигнал на подсчет числа импульсов. Когда фотодатчик снова освещается, подсчет импульсов заканчивается. По зафиксированному счетчиком количеству импульсов определяется длина движущегося предмета. Датчик импульсов кинематически связан с приводом конвейера. Поэтому колебания скорости движения детали не влияют на точность измерения ее длины.

Рассмотрим применение фотоэлектрических датчиков для преобразования угла поворота в цифровой код (рис. 12.6, а, б). Осветитель направляет световой поток через прозрачный диск, на который фотохимическим способом нанесена кодовая шкала с прозрачными и непрозрачными участками. С другой стороны диска расположены фотоприемники, количество которых равно числу разрядов двоичного числа. На рис. 12.6 показан кодовый диск с шестью разрядами.



а)



б)

Рис. 12.6. Фотоэлектрический датчик для преобразования угла поворота в цифровой код

Самый старший разряд расположен ближе всего к центру диска. Прозрачный участок означает двоичную цифру «1», непрозрачный — двоичную цифру «0». Если во всех разрядах стоит «0», то это двоичный код числа 0. Если во всех разрядах стоит «1», то это двоичный код десятичного числа 63 ($111111_2 = 63_{10}$). Свет, проходя через кодový диск, попадает на фотоприемники. Наличие выходного сигнала с фотоприемника принимается за «1», отсутствие — за «0». Такое устройство называется аналого-цифровым преобразователем или кодовым датчиком.

Для измерения крутящего момента применяются фотоэлектрические *торзиометры*. Перед проволочными тензометрами они имеют то преимущество, что не нуждаются в токосъемном устройстве. Они обеспечивают бесконтактный съем сигнала с вращающегося вала. Принцип действия фотоэлектрического торзиометра показан на рис. 12.7. На испытуемом валу 1 укреплены два диска 2, имеющие прорезы (окна) в радиальном направлении. Эти диски вращаются вместе с валом. Под действием момента нагрузки вал скручивается и диски смещаются друг относительно друга на угол, пропорциональный моменту и расстоянию между дисками. На неподвижной части торзиометра расположены источник света 3 (лампа накаливания) и два фотоприемника 4. Лампа помещена посередине между дисками, а фотоприемники расположены по обе стороны дисков. При отсутствии крутящего момента прорезы правого и левого дисков находятся на одной оси и световой поток одновременно попадает на оба фотоприемника. Следовательно, в этом случае фототоки обоих приемников будут совпадать по фазе. При увеличении крутящего момента диски смещаются друг относительно друга и освещение фотоприемников будет происходить не одновременно, а со сдвигом во времени. Поэтому фототоки приемников 4 окажутся сдвинутыми по фазе. Количество прорезей на каждом

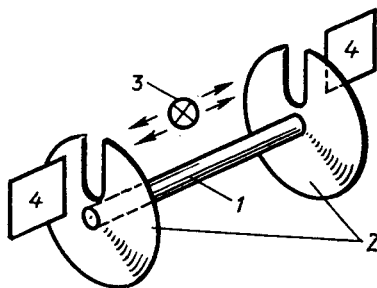


Рис. 12.7. Фотоэлектрический датчик крутящего момента

диске и расстояние между ними обычно выбирают так, чтобы при максимальном крутящем моменте фазовый сдвиг между фототоками составлял 180° . Измерительная цепь прибора осуществляет измерение фазового сдвига между токами, или измерение времени между импульсами фототоков.

В последнее время в качестве источников света для фотоэлектрических датчиков все чаще применяются не лампы накаливания, а светодиоды, имеющие большую надежность и очень малое потребление электроэнергии для питания.

Вообще надо отметить, что сейчас очень быстро развивается *оптоэлектронная* техника, которая обеспечивает как преобразование энергии света в электроэнергию, так и обратное преобразование. В качестве датчиков положения, определения качества поверхностей, для считывания графической информации начинают применяться отражательные оптроны.

Для высокоточных измерений малых перемещений используют фотоэлектрические датчики, у которых между источником света и фотоприемником помещаются диски или линейки из прозрачного материала с нанесенными на них непрозрачными штрихами. В настоящее время известны линейки, имеющие до тысячи штрихов на 1 мм длины. Поэтому даже при малом перемещении линейки возникает значительное изменение сигнала фотоприемника. Еще более высокую чувствительность можно получить с использованием двух линеек, штрихи одной из которых выполнены с небольшим наклоном. При взаимном перемещении таких линеек возникает так называемый «муаровый» эффект. При незначительном перемещении линеек появляются темные «муаровые» полосы и световой поток, падающий на фотоприемник, резко изменяется.

Во всех рассмотренных выше примерах сам фототок не влиял на точность измерения или преобразования. Фотоприемники работали не в аналоговом, а в дискретном режиме. Такой режим позволяет иметь более простые конструкции и схемы приборов, так как не требуется обеспечить высокую стабильность светового потока и напряжения питания.

Однако фотоэлектрические датчики используются и в аналоговом режиме, когда именно по значению фототока определяется измеряемая неэлектрическая величина. При измерении высоких температур (более 1000°C) широкое распространение получили пирометры, использующие лучистую энергию тел, температура которых измеряется. С помощью фотоэлектрических датчиков построены яркостные пирометры и цветковые пирометры.

Фотоэлектрический яркостный пирометр основан на использовании зависимости между током I фотоэлемента и температурой T источника излучения, освещающего фотоэлемент. Эта зависимость имеет вид $I = aT^n$, где коэффициент a зависит от чувствительности фотоэлемента, а n — от его спектральной характеристики. Коэффициент n достигает 10—12 и может быть увеличен подбором соответствующих светофильтров. При использовании в качестве фотоприемников фоторезисторов их включают в мостовую схему (рис. 12.8). На фоторезистор ФР1 падает световой поток от контролируемого объекта. На фоторезистор ФР2 падает световой поток от лампочки накаливания. При нарушении баланса моста напряжение с его измерительной диагонали подается на усилитель, который питает лампу накаливания и изменяет ее накал таким образом, чтобы уменьшить разбаланс моста. Амперметр в цепи лампы накаливания может быть проградуирован в единицах температуры. Градуировка проводится по показаниям образцового пирометра.

В основу работы фотоэлектрических *цветовых пирометров* положено следующее физическое явление, называемое законом смещения. При нагреве тело излучает световой поток, где присутствуют разные цвета, т. е. имеются электромагнитные колебания с разными длинами волн. Однако каждой температуре соответствует определенная длина волны, на которой интенсивность излучения максимальна.

В цветовых пирометрах определяется отношение интенсивностей излучения данного тела в лучах двух заранее выбранных длин волн. Это отношение для каждой температуры будет различным, оно однозначно определяет температуру тела.

На рис. 12.9 показана схема фотоэлектрического цветового пирометра. Излучение от объекта измерения A поступает на фотоэлемент I через диск 2 , в котором попеременно расположены красные

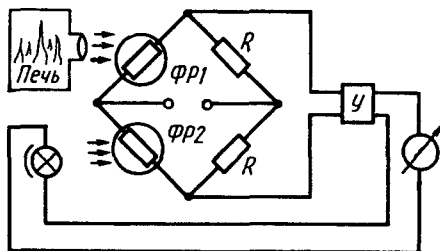


Рис. 12.8. Фотоэлектрический яркостный пирометр — датчик высоких температур

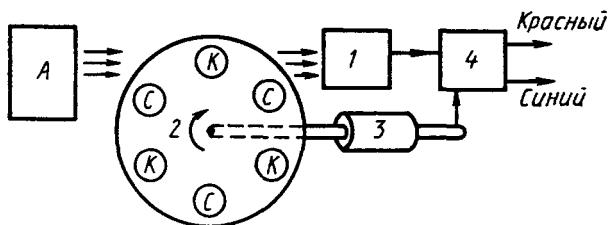


Рис. 12.9. Фотоэлектрический цветовой пирометр

и синие светофильтры. Диск приводится во вращение с постоянной скоростью электродвигателем 3. Таким образом, на фотоэлемент попеременно попадают то красные, то синие лучи. Синхронно с вращением диска 2 усиленный сигнал с фотоэлемента переключается коммутатором 4, выделяющим два сигнала: соответствующий интенсивности красных лучей и соответствующий интенсивности синих лучей. Измеритель отношения сигналов (например, логометрического типа) проградуирован в единицах температуры.

Представляет интерес использование фотоэлектрического датчика в измерителе влажности (*психрометре*). Влажность можно определить по так называемой «точке росы». Известно, что водяной пар, имеющийся в газе, начинает конденсироваться (осаждаться в виде росы) при определенной температуре, зависящей от влажности. Для определения начала осаждения росы и служит фотодатчик. Луч осветителя падает на маленькое зеркальце и отражается на фотоприемник. Поверхность зеркальца может охлаждаться и нагреваться системой терморегулирования, включаемой по сигналу фотодатчика. Если температура зеркала понижается до точки росы, то появляющийся на поверхности зеркала туман уменьшает световой поток, падающий на фотоприемник, и фототок резко уменьшается. Срабатывает реле, включающее нагреватель зеркала. Спустя некоторое время температура зеркала повысится, туман на нем исчезнет, фототок резко возрастет и сработает реле, включающее охладитель зеркала. Таким образом, температура зеркальца будет непрерывно колебаться относительно точки росы. Измеряя ее с помощью терморезистора или термопары, можно определить влажность.

Фотоэлектрические датчики применяют для измерения различных неэлектрических величин. В машиностроении применяются фотоэлектрические датчики размеров деталей. С помощью оптических систем можно спроецировать контур маленькой детали на весьма большую площадь, что существенно повышает чувствительность и точность измерения. В механических контактных датчиках

для этого потребовались бы рычажные системы, которые бы оказывали силовое воздействие на деталь. А фотоэлектрический датчик не нагружает деталь. С его помощью можно контролировать размеры хрупких и непрочных деталей и узлов.

Применяются фотоэлектрические датчики для определения задымленности и загазованности при промышленных выбросах в атмосферу, что очень важно для охраны природы и здоровья людей. Фотоэлектрические колориметры, блескомеры, нефелометры позволяют объективно оценить качество изготовления и отделки различных изделий по их цвету, полировке, прозрачности соответственно. С помощью фотоэлектрических датчиков выполняется автоматическое прочтение машинописных и рукописных буквенных и цифровых текстов.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о различных проявлениях фотоэффекта: о внешнем, внутреннем и вентильном фотоэффектах.
2. Что такое спектральная характеристика?
3. Приведите примеры применения фотоэлектрических датчиков в повседневной жизни.

Глава 13

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ДАТЧИКИ

§ 13.1. Принцип действия и назначение

Работа ультразвуковых датчиков основана на взаимодействии ультразвуковых колебаний с измеряемой средой. К ультразвуковым относят механические колебания, происходящие с частотой более 20 000 Гц, т. е. выше верхнего предела звуковых колебаний, воспринимаемых человеческим ухом. Распространение ультразвуковых колебаний в твердых, жидких и газообразных средах зависит от свойств среды. Например, скорость распространения этих колебаний для разных газов находится в пределах от 200 до 1300 м/с, для жидкостей — от 1100 до 2000, для твердых материалов — от 1500 до 8000 м/с. Очень сильно выражена зависимость скорости колебаний в газах от давления.

Различны коэффициенты отражения ультразвуковых волн на границе раздела разных сред, различна и звукопоглощательная способность разных сред. Поэтому в ультразвуковых датчиках информация о различных неэлектрических величинах получается благодаря измерению параметров ультразвуковых колебаний: времени их распространения, затухания амплитуды этих колебаний, фазового сдвига этих колебаний.

Ультразвуковые методы измерения относятся к электрическим методам постольку, поскольку возбуждение ультразвуковых колебаний и прием этих колебаний выполняются электрическим способом. Обычно для этого используют пьезоэлементы и магнитострикционные преобразователи. В гл. 7 были рассмотрены пьезоэлектрические датчики, преобразующие давление в электрический сигнал. Это прямой пьезоэффект. Он используется в приемниках ультразвукового излучения. Обратный пьезоэлектрический эффект заключается в сжатии и растяжении пьезокристалла, к которому приложено переменное напряжение. Для возбуждения ультразвуковых колебаний и используется этот эффект. Таким образом, пьезоэлемент может использоваться попеременно то излучателем, то приемником ультразвуковых колебаний.

Магнитострикционные излучатели ультразвука используют явление деформации ферромагнитов в переменном магнитном поле.

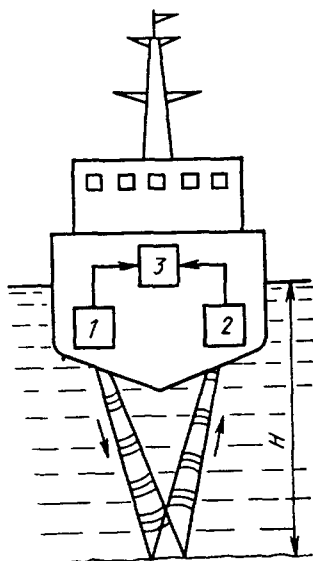


Рис. 13.1. Эхолот с ультразвуковым датчиком

Поясним работу ультразвукового датчика на примере эхолота — прибора для измерения глубины моря (рис. 13.1). При подаче переменного напряжения на пьезоэлемент 1 возбуждаются ультразвуковые колебания, направленные вертикально вниз. Отраженный ультразвуковой импульс воспринимается пьезоэлементом 2. Электрический прибор 3 измеряет время t между посылаемым и принимаемым импульсами. Глубина моря пропорциональна этому времени и скорости распространения звука v в воде:

$$H = vt/2. \quad (13.1)$$

Шкала прибора градуируется непосредственно в метрах. Аналогично действует ультразвуковой лоцатор, опреде-

ляющий расстояние до препятствия на пути корабля в горизонтальном направлении. Некоторые животные (например, летучие мыши и дельфины) имеют органы ориентировки, действующие по принципу ультразвукового локатора.

Ультразвуковые колебания имеют энергию значительно большую, чем звуковые, поскольку энергия пропорциональна квадрату частоты. Кроме того, сравнительно просто осуществляется направленное излучение ультразвука.

С помощью ультразвуковых датчиков обнаруживают дефекты в металлических деталях: трещины в изделиях, полости в отливках и т. д. Ультразвуковые датчики играют важную роль в дефектоскопии, в неразрушающих методах контроля. Кроме того, ультразвуковые датчики используются в приборах для измерения расхода, уровня, давления.

§ 13.2. Излучатели ультразвуковых колебаний

В ультразвуковых электрических датчиках наибольшее распространение получили магнитострикционные и пьезоэлектрические излучатели, возбуждаемые с помощью полупроводниковых и электронных генераторов, вырабатывающих переменное напряжение с частотой более 10 кГц. Часто применяется и импульсное возбуждение ультразвуковых излучателей.

Магнитострикционный излучатель стержневого типа (рис. 13.2, а) представляет собой набор тонких листов из ферромагнитного материала, на который намотана обмотка возбуждения. Чаще всего в магнитострикционных излучателях используется никель и его сплавы (инвар и монель), а также ферриты. Форма пластины показана на рис. 13.2, б.

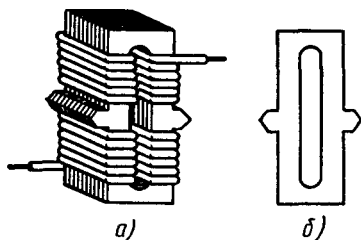


Рис. 13.2. Магнитострикционный излучатель

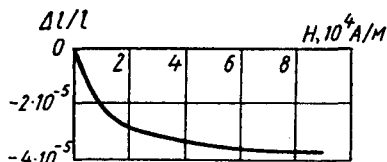


Рис. 13.3. Зависимость относительного изменения длины от напряженности магнитного поля

Если стержень из ферромагнитного материала находится в переменном магнитном поле, то он будет попеременно сжиматься и разжиматься, т. е. деформироваться. Зависимость относительного изменения длины $\Delta l/l$ стержня из никеля от напряженности магнитного поля H показана на рис. 13.3. Так как знак деформации не зависит от направления поля, то частота колебаний деформации будет в два раза больше частоты переменного возбуждающего поля. Для получения больших механических деформаций используют постоянное подмагничивание стержня, чтобы работать на наиболее крутом участке кривой (рис. 13.3).

Магнитострикционные излучатели работают в условиях резонанса, когда частота возбуждающего поля совпадает (настроена в резонанс) с частотой собственных упругих колебаний стержня, которая определяется по формуле

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (13.2)$$

где l — длина стержня; E — модуль упругости; ρ — плотность материала.

Для никелевого стержня длиной $l = 100$ мм частота собственных колебаний составляет 24,3 кГц, амплитуда достигает примерно 1 мкм. Наивысшая частота, на которой еще удается возбудить достаточно интенсивные колебания, составляет 60 кГц, что соответствует длине 40 мм. Помимо основной частоты в стержне можно возбудить и колебания на высших гармониках (при соответствующем креплении стержня), но с меньшей амплитудой.

В пьезоэлектрическом излучателе ультразвуковых колебаний используется пластина кварца (рис. 13.4), к которой приложено переменное напряжение U_x , создающее электрическое поле в направлении электрической оси X (см. рис. 7.1). Продольный обратный пьезоэффект заключается в деформации пластины по оси X .

При этом относительное изменение толщины пластины

$$\Delta a/a = k U_x/a. \quad (13.3)$$

Поперечный обратный пьезоэффект заключается в деформации пластины в направлении механической оси Y . При этом относительное изменение длины пластины

$$\Delta l/l = -k U_x/a. \quad (13.4)$$

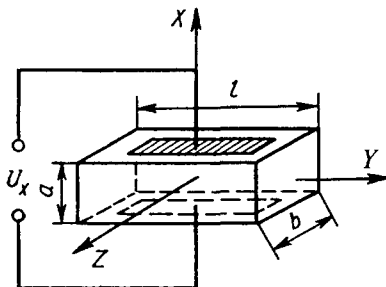


Рис. 13.4. Пьезоэлектрический излучатель ультразвуковых колебаний

Как видно из (13.3), продольная деформация не зависит от размеров пластины, а поперечная деформация, как следует из (13.4), увеличивается с ростом отношения l/a . При напряжениях до 2,5 кВ сохраняется прямая пропорциональность между величиной деформации и напряжением. При больших напряжениях деформация увеличивается не столь быстро и при $U_x = 25$ кВ оказывается на 30 % меньшей, чем рассчитанная по (13.3) и (13.4). Амплитуда колебаний достигает максимума при равенстве частоты приложенного напряжения и частоты собственных колебаний пластины.

Частота собственных продольных колебаний определяется по формуле, аналогичной (13.4), где модуль упругости берется в направлении оси X :

$$f_a = \frac{1}{2a} \sqrt{\frac{E_x}{\rho}}. \quad (13.5)$$

Частота собственных поперечных колебаний зависит от модуля упругости в направлении оси Y :

$$f_l = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E_y}{\rho}}. \quad (13.6)$$

Для кварцевых пластин $f_a = 285/a$ [кГц] и $f_l = 272,6/l$ [кГц], где размеры пластины выражены в сантиметрах.

По сравнению с магнитострикционными пьезоэлектрические излучатели обеспечивают значительно бóльшую (на 1–2 порядка) частоту ультразвуковых колебаний.

§ 13.3. Применение ультразвуковых датчиков

В ультразвуковых уровнемерах и дефектоскопах используется свойство ультразвука отражаться от границы двух сред. Соотношение между энергиями отраженных и падающих колебаний называется *коэффициентом отражения*. Этот коэффициент весьма велик для сред, существенно отличающихся по плотности и скорости распространения звука. Например, коэффициент отражения на границе вода — сталь составляет 88, а на границе вода — трансформаторное масло он равен 0,6. Но даже и при малых коэффициентах отражения полученный отраженный сигнал вполне достаточен для измерения положения уровня раздела двух сред. Мерой уровня является время распространения колебаний от источника излучения к границе раздела и обратно к приемнику. Эти величины уровня и времени связаны между собой соотношением (13.1). Благодаря свойству ульт-

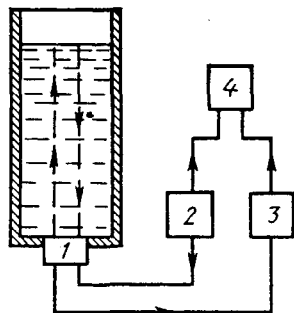


Рис. 13.5. Ультразвуковой датчик уровня

тразвуковых колебаний распространяться в любых упругих средах между излучателем и измеряемой средой может находиться металлическая стенка, что позволяет вести измерение без контакта измерительных элементов с контролируемой средой и без электрических вводов в резервуар.

В ультразвуковых уровнемерах используется в основном импульсный режим передачи колебаний в среду. При этом пьезоэлемент может попеременно работать то излучателем, то приемником ультразвука. Схема ультразвукового уровнемера показана на рис. 13.5. Электрические высокочастотные импульсы от генератора 2 подаются по кабелю к пьезоэлементу датчика 1, который излучает ультразвуковые колебания в измеряемую среду. Эти колебания отражаются от границы раздела сред и возвращаются к пьезоэлементу, который преобразует их в электрический сигнал. Этот сигнал усиливается усилителем 3 и подается на измерительное устройство 4, определяющее время между посылкой импульса генератором 2 и приходом импульса в усилитель 3. В результате многократного отражения посланного импульса могут вернуться три-четыре сигнала, убывающие по амплитуде и запаздывающие друг относительно друга на одинаковое время. Частота посылаемых импульсов должна быть не слишком большой, чтобы все отраженные сигналы успели вернуться до посылки следующего импульса. Ультразвуковые уровнемеры обеспечивают точность в 1 % при измерениях уровня в 5—10 м в условиях высокой температуры, высокого давления, большой химической активности контролируемой среды. В воздухе ультразвуковые колебания затухают во много раз быстрее, чем в жидких (и вообще в более плотных) средах. Поэтому предпочтительнее располагать излучатель и приемник под резервуаром, а не сверху (рис. 13.5).

В ультразвуковом расходомере используется эффект сложения скорости распространения ультразвука в упругой среде со скоростью движения этой среды. Схема ультразвукового расходомера показана на рис. 13.6. Пьезоэлементы 1 и 2 располагаются вдоль трубопровода и возбуждаются от генератора 3 на частоте в несколько сотен кГц. Каждый из пьезоэлементов попеременно с помощью переключателя 4 работает то излучателем, то приемником. Таким образом, ультразвуковые колебания посылаются то по потоку

среды, то навстречу ему. В первом случае скорости колебаний и потока складываются, во втором случае — вычитаются. После прохождения по среде сигналы, принятые пьезоэлементами, усиливаются усилителем 5 и поступают попеременно на измерительное устройство 6. Разность фаз принятых колебаний будет пропорциональна скорости среды. Градуировка прибора выполняется для определенной среды. При использовании прибора для измерений расхода среды с другим значением скорости распространения ультразвука изменяется и градуировка.

Следует отметить, что измерительные схемы для ультразвуковых датчиков довольно сложны.

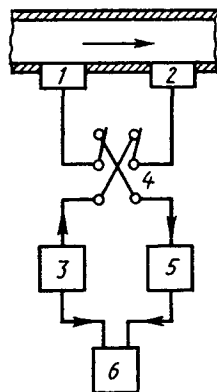


Рис. 13.6. Ультразвуковой датчик расхода

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип действия эхолота.
2. Как работает излучатель ультразвуковых колебаний?

Глава 14

ДАТЧИКИ ХОЛЛА И МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ

§ 14.1. Физические основы эффекта Холла и эффекта магнитосопротивления

Эффект Холла — это физическое явление, которое заключается в следующем. Рассмотрим пластинку (рис. 14.1) из проводящего материала, вдоль которой проходит ток I . Если перпендикулярно плоскости пластинки и направлению тока действует магнитное поле напряженностью H , то в пластине возникает ЭДС, пропорциональная току, и напряженности магнитного поля:

$$E = KIH, \quad (14.1)$$

где $K = k_x / d$ — коэффициент, зависящий от материала и толщины пластины d ; k_x — постоянная Холла.

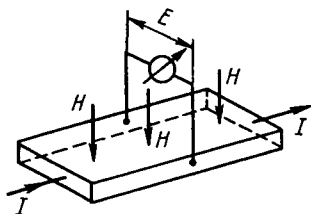


Рис. 14.1. Датчик Холла

Направление этой ЭДС, которая называется ЭДС Холла, перпендикулярно току и полю, т. е. ее можно измерить между боковыми продольными гранями пластины (рис. 14.1) с помощью электроизмерительного прибора. Причина появления ЭДС Холла в том, что на движущиеся заряды в магнитном поле действует сила Лоренца. Ток в пластине — это и есть упорядоченное движение зарядов (в металле — электронов). Под действием магнитного поля они смещаются перпендикулярно направлению своего движения и вблизи одной продольной грани возникает избыток зарядов, а вблизи другой — недостаток. В обычных проводниковых материалах ЭДС Холла очень мала, что объясняется малой скоростью (точнее — подвижностью) носителей тока из-за их большой концентрации. Хотя эффект Холла известен уже более ста лет, практическое применение его началось лишь в итоге развития технологии получения полупроводников. Именно в чистых полупроводниках обеспечивается высокая подвижность носителей тока, поэтому постоянная Холла для чистых полупроводников во много раз больше, чем для металлов.

Эффект магнитосопротивления — это другое физическое явление, заключающееся в изменении сопротивления проводящих тел в магнитном поле. Объясняется это тем, что в присутствии магнитного поля на носители тока действует сила Лоренца, изменяющая траекторию их движения. Если бы не было магнитного поля, то под действием приложенного к проводящему телу напряжения носители тока перемещались бы по кратчайшему направлению. Изменение траектории под действием магнитного поля всегда удлиняет путь носителей тока, что проявляется как увеличение сопротивления. В сильных поперечных магнитных полях некоторые вещества могут иметь относительное увеличение сопротивления $\alpha = \Delta R/R$ в десятки раз. Чаще всего величина α связана с напряженностью магнитного поля H квадратичной зависимостью

$$\alpha = k_R H^2, \quad (14.2)$$

где k_R — коэффициент, зависящий от материала и размеров.

Эффекты Холла и магнитосопротивления используются в датчиках, с помощью которых могут быть измерены различные электрические и магнитные величины. Кроме того, они могут использоваться для математической обработки электрических сигналов: слож-

ния, умножения, деления, возведения в квадрат и извлечения корня; для различных преобразований электрических сигналов.

§ 14.2. Материалы для датчиков Холла и датчиков магнитосопротивления

Использование датчиков Холла для целей автоматического измерения будет рациональным в том случае, если они имеют достаточно высокую чувствительность и мало подвержены влиянию температуры. Чувствительность датчика зависит от выходной ЭДС, т. е. от постоянной Холла, которая, в свою очередь, определяется подвижностью носителей тока. В проводящих телах носителями тока являются электроны. При обычных температурах электроны находятся в хаотическом тепловом движении с самыми различными скоростями. Однако если вдоль тела создать электрическое поле E , приложив напряжение U , то все электроны начнут передвигаться в направлении поля с некоторой средней скоростью v (при этом отдельные электроны могут иметь как большую, так и меньшую скорости). Подвижность носителей тока (m) определяется как отношение скорости v к напряженности электрического поля E :

$$\mu = v/E. \quad (14.3)$$

Подвижность зависит от того, как часто электрон при своем движении сталкивается с решеткой твердого тела. Следует особо отметить, что большое значение ЭДС Холла еще не означает, что в этом веществе велик эффект Холла и оно годится для технических применений. Большое значение ЭДС может быть получено за счет большого напряжения U , т. е. больших затрат электрической энергии. В то же время в другом материале такая же ЭДС Холла и те же скорости носителей тока могут быть получены при меньшем напряжении только за счет большей подвижности. Такой материал выгоднее для применения в датчике Холла.

Короче говоря, основным требованием, предъявляемым к материалам для датчиков, является сочетание большой подвижности носителей тока с минимальными температурными зависимостями.

В зависимости от технологии изготовления различают кристаллические (в форме пластинки) и пленочные датчики.

В качестве материала кристаллических датчиков используются различные соединения индия: мышьяковистый индий $InAs$, фосфид индия InP , сурьмянистый индий $InSb$, а также германий Ge и кремний Si .

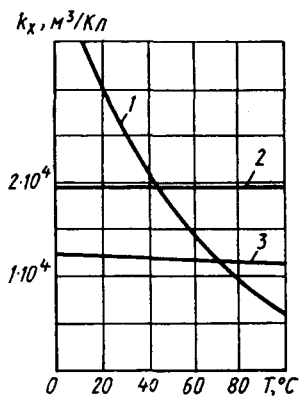


Рис. 14.2. Зависимости постоянной Холла от температуры

Наибольшее значение постоянной Холла у материала InSb, но оно сильно зависит от температуры. На рис. 14.2 показаны зависимости постоянной Холла от температуры для разных материалов (1 — InSb, 2 — InAs, 3 — твердый раствор InAs и InP). Для германия постоянная Холла в десятки раз меньше, но он обладает значительно большим удельным сопротивлением. Из германия можно делать датчики с сопротивлением в несколько килоом. Еще большим удельным сопротивлением обладает кремний, но его труднее очистить от примесей. Высокую степень очистки полупроводниковых материалов получают при плавке в космических лабораториях.

Для размещения в узких зазорах очень удобны пленочные датчики Холла. Для их изготовления используется метод испарения в вакууме исходного вещества с последующим осаждением на подложку из слюды. Толщина пленочных датчиков составляет 10—30 мкм, что в сотни раз меньше, чем у кристаллических датчиков. Материалом для пленочных датчиков служат соединения ртути: селенид ртути HgSe и теллурид ртути HgTe. Чем тоньше пленка, тем меньше постоянная Холла. По своим возможностям применения в системах автоматики пленочные датчики примерно равноценны с германиевыми и даже лучше по температурной стабильности. Но они очень дорогие. В настоящее время проводятся исследования новых материалов, пригодных для использования в датчиках Холла и магнитосопротивления.

§ 14.3. Применение датчиков Холла и датчиков магнитосопротивления

Основное применение датчики Холла и датчики магнитосопротивления находят для измерения магнитных полей. Они применяются в очень широком диапазоне напряженности магнитного поля: от 1 до 10^9 А/м. С их помощью можно определять кривые намагничивания магнитных материалов, распределение магнитных полей в электрических машинах и электромагнитных устройствах. При измерениях в сильных магнитных полях ($H > 10^7$ А/м) ЭДС Холла составляет десятые доли вольт и может быть измерена вольтметром с большим

внутренним сопротивлением или с помощью компенсационной схемы. Регулировка чувствительности производится изменением напряжения, питающего датчик. Для увеличения выходного сигнала используют последовательное соединение нескольких датчиков Холла. При измерениях в средних магнитных полях ($10^5 \text{ А/м} < H < 10^7 \text{ А/м}$) требуется усиление выходного напряжения датчика. При измерениях в слабых магнитных полях ($H < 10^5 \text{ А/м}$) используют так называемые концентраторы магнитного поля. В качестве таких концентраторов используют круглые длинные стержни с узким зазором между ними, куда и помещается датчик. Стержни изготавливают из материалов с высокой магнитной проницаемостью, чаще всего из пермаллоя. При длине стержней в 1 метр, диаметре 5 мм и зазоре в 0,3 мм можно получить коэффициент усиления магнитного поля в 1500 раз. Датчики Холла с концентраторами магнитного поля способны чувствовать напряженность магнитного поля в 0,1 А/м. С их помощью можно исследовать даже очень слабое магнитное поле Земли. Однако надо отметить, что измерения средних и слабых магнитных полей с помощью датчиков Холла пока целесообразны лишь в лабораторных, а не промышленных условиях.

В средних и слабых магнитных полях датчики Холла очень чувствительны к колебаниям температуры и нуждаются в стабильном питании и сложных измерительных схемах. Например, термоЭДС между материалом датчика и его выводами соизмерима с выходным сигналом. Да и при измерениях в сильных магнитных полях используют схемы термокомпенсации погрешности с помощью терморезисторов, а порой даже и термостатирование, т. е. измерения проводят в камере, где автоматически поддерживается постоянная температура.

По существу, датчик Холла является элементарным умножающим устройством, поскольку его выходной сигнал пропорционален произведению напряженности на ток. На этом, в сущности, и основаны все возможные применения датчика Холла. При постоянном токе через датчик выходной сигнал пропорционален напряженности магнитного поля. А поместив датчик в постоянное магнитное поле, можно измерять ток, проходящий через него, по значению ЭДС Холла. Это единственный способ определения распределения токов в электролитических ваннах.

Датчики магнитосопротивления также вначале использовались для измерения магнитных полей, но затем были вытеснены более совершенными датчиками Холла на новых полупроводниковых материалах. Однако датчики магнитосопротивления по устройству проще датчиков Холла. Наилучшей формой для датчика магнитосопротивления является диск с одним выводом в центре и другим

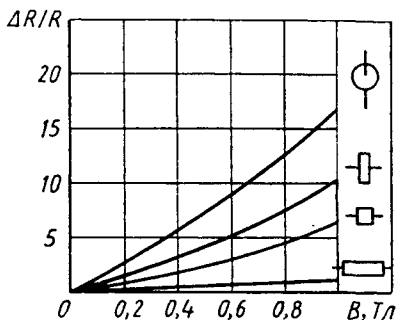


Рис. 14.3. Характеристики датчиков магнитосопротивления

на окружности. Зависимости относительного изменения сопротивления датчиков магнитосопротивления разной формы от магнитной индукции показаны на рис. 14.3.

Основным достоинством датчика магнитосопротивления является возможность бесконтактного изменения активного сопротивления.

Одним из возможных применений датчиков магнитосопротивления является создание бесконтактных клавишных выключателей. При нажатии на кнопку такого выключателя перемещается магнит и изменяется магнитный поток, воздействующий на датчик магнитосопротивления.

Известны также применения датчиков Холла и магнитосопротивления в системах автоматики в качестве измерителей тока в токоведущих шинах, бесконтактных потенциометров для преобразования механического перемещения (линейного или углового) в пропорциональный электрический сигнал. Удобно применять датчики Холла в автоматических устройствах, контролирующих состояние стальных канатов.

Пока еще датчики Холла и датчики магнитосопротивления сравнительно мало применяются в системах промышленной автоматики. Но бурное развитие полупроводниковой технологии ведет к расширению их применения.

Следует отметить, что в последнее время к таким датчикам прибавились еще и близкие по принципу действия магнитодиодные и гальваномагнитно-рекомбинационные преобразователи.

Контрольные вопросы

1. Как проявляется эффект Холла?
2. Почему в магнитном поле изменяется сопротивление проводника?