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 автоматики, специальные элементы, улучшающие качество работы систем автоматики.

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

При изучении курса учащимся следует прежде всего твердо усвоить назначение элементов автоматики 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, Колпачный 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 все 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 *Д* и поступает на элемент сравнения (*ЭС*). На этот же элемент срав-

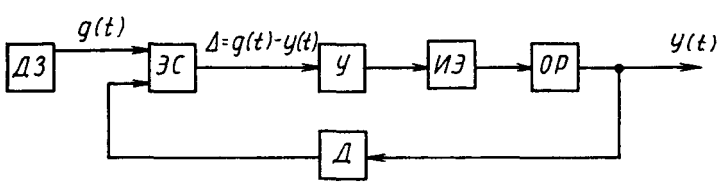

Рис. 1.1. Функциональная схема системы автоматического регулирования

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 Ф индуцируется ЭДС e, равная скорости изменения потокосцепления, взятой с обратным знаком:

$$e = -\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t.$$

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

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

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 сомножитель $\sin\alpha$: $E = Blv\sin\alpha$.

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: $H = Iw/l$, где w — число витков катушки; l — длина сердечника. Произведение Iw 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 Ф 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 Ф, вместо ЭДС E — МДС Iw, 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 Ф 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 ферромагнитов 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 $y_{уст}$). 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