

# Предисловие

Общепризнано, что технические измерения являются основой построения современных информационно-измерительных и управляющих систем. В силу этого измерениям отводится определяющая роль в научно-техническом прогрессе и именно изучение измерительных устройств представляет благодатное поле для привития будущим специалистам комплексных инженерных навыков в области анализа и проектирования законченных электронных функциональных устройств, включая сенсоры, устройства усиления и нормализации электрических сигналов датчиков и устройства отображения информации.

Несмотря на развитие формальных методов и систем автоматизированного проектирования схем (программы PSpice, AutoCad и др.), получение достоверных результатов невозможно без овладения знаниями из классической системотехники аналоговых измерительных устройств, что подтверждает отечественный и зарубежный опыт. Эти знания, адаптированные к современному уровню развития техники, как представляется, будут востребованы в течение обозримого интервала времени и именно на них будет базироваться проектирование технических устройств в таких революционных технологиях, как робототехника, нанотехнология и технология микромеханических систем. Осознание этого факта предопределяет возродившийся интерес специалистов к получению углубленных знаний в области аналоговой системотехники и послужило толчком к написанию данного пособия.

Учебное пособие «Схемотехника измерительных устройств», являющееся обобщением аналогичного курса, поставленного и читаемого автором на старших курсах факультета «Микроприборов и технической кибернетики» МИЭТ, призвано восполнить дефицит современной учебной технической литературы в области информационно-измерительных устройств и систем. Этот курс

является завершающим в ряду специальных инженерных дисциплин. Предполагается, что читатели изучили институтские курсы по электротехнике, физике, микроэлектронике, радиоэлектронике, преобразователям информации, конструированию радиоэлектронной аппаратуры.

По глубокому убеждению автора, подготовка инженеров напрямую связана с умением проводить адекватный качественный анализ электронных схем. Поэтому особое внимание в пособии уделено инженерным подходам, лежащим в основе анализа измерительных устройств. По этой же причине пособие снабжено большим количеством числовых примеров с инженерным уровнем детализации расчетов.

Хотя пособие в первую очередь ориентировано на подготовку специалистов по специализации 220100 «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети» направления 654600 «Информатика и вычислительная техника», специализирующихся на разработке различных информационно-измерительных и управляющих систем, оно может быть рекомендовано и при изучении смежных дисциплин в области промышленной автоматизации, робототехники, приборостроения, электротехники и радиоэлектроники.

# Список основных сокращений

DC/AC — интегральный преобразователь (конвертор) постоянного тока в переменный.

АЦП (ADC) — аналого-цифровой преобразователь.

АЧХ — амплитудно-частотная характеристика.

Би-МОП — комбинированная биполярная/МОП технология или прибор.

БПЭ — биморфный пьезоэлемент.

ВАХ — вольтамперная характеристика.

ГИП — газоиндикаторная панель.

ГРИ — газоразрядный индикатор.

Д — первичный датчик (сенсор).

ЖКИ — жидкокристаллический индикатор.

ИИС — информационно-измерительная система.

ИМС — интегральная микросхема.

ИУС — информационно-управляющая система.

КВИП — коэффициент влияния источника питания на смещение нуля ОУ.

КДТ — кремниевый датчик температуры.

КЗ — режим короткого замыкания.

КОСС — коэффициент ослабления синфазного сигнала.

КПД — коэффициент полезного действия.

ЛАЧХ — логарифмическая амплитудно-частотная характеристика.

ЛФД — лавинный фотодиод.

МДМ — усилитель с модуляцией и демодуляцией.

МОП (МДП) — прибор, технология «металл-окисел (диэлектрик)-полупроводник».

МР — магниторезистор.

ООС — отрицательная ОС.

ОпС — операционная схема.

ОС — обратная связь.

- ОУ — операционный усилитель.  
ПДТ — полупроводниковый датчик температуры.  
ПЗС — прибор с зарядовой связью.  
ПКД — усилитель с периодической компенсацией дрейфа нуля.  
ПОС — положительная ОС.  
ПОУ — программируемый операционный усилитель.  
ПР — пьезорезистор.  
ПФ — полосовой фильтр.  
ПЭ — пьезоэлемент.  
ПЭВМ — персональная электронная вычислительная машина.  
СВХ — схема выборки и хранения.  
СИД — светоиндикаторный диод.  
ТК — температурный коэффициент, например ТКС — температурный коэффициент сопротивления.  
ТОУ — токоразностный ОУ (усилитель Нортонa).  
ТП — термопара.  
ТПТ — тонкопленочный транзистор.  
ТР — тензорезистор.  
ТТЛ — транзисторно-транзисторная логика.  
УВХ — устройство выборки и хранения сигнала.  
УОИ — устройство отображения информации.  
ФВЧ — фильтр высоких частот.  
ФД — фотодиод.  
ФНЧ — фильтр низких частот.  
ФПЗС — фоточувствительный прибор с зарядовой связью.  
ФР — фоторезистор.  
ФТ — фототранзистор.  
ФЧХ — фазо-частотная характеристика.  
ХХ — режим холостого хода.  
ХЭ — холловский элемент.  
ЦАП (DAS) — цифроаналоговый преобразователь.  
ЧЭ — чувствительный элемент.  
ЭВМ — электронная вычислительная машина.  
ЭЛИ — электролюминесцентный индикатор.  
ЭЛТ — электронно-лучевая трубка.

# Введение

Современные информационно-измерительные системы (рис. В.1) включают первичные датчики физических величин, которые устанавливаются на объекте измерения (датчики движения, давления, температуры, концентрации и т. д.), устройства усиления и нормализации сигналов датчиков, аналоговый мультиплексор (или коммутатор сигналов), который используется для поочередного подключения сигналов датчиков к АЦП через устройство выборки и хранения (УВХ).



Рис. В.1. Укрупненная структурная схема ИУС

Оцифрованный сигнал с датчиков через интерфейс вводится в процессор или ПЭВМ с необходимой периферией (дисплей, клавиатура и т. д.), обрабатывается по определенным алгоритмам,

документируется и выдается в удобном виде пользователю (оператору) с помощью устройств отображения информации (УОИ). В автономных или специализированных измерительных приборах вместо ПЭВМ могут использоваться более дешевые контроллеры с автономными устройствами отображения информации (ЖКИ-индикаторы, газоразрядные панели и т. д.).

Если эту структуру дополнить цифроаналоговыми преобразователями (ЦАП) и исполнительными устройствами, то она становится информационно-управляющей системой (ИУС), которая управляет объектом по цепи обратной связи (ОС) по заданному алгоритму. Такая структура характерна для большинства автоматизированных систем управления технологическими процессами микроэлектроники.

В сложных технических ИУС для обеспечения высокой надежности необходимо применять большое количество датчиков для контроля физических величин. Например, в отечественной космической системе «Буря» использовалось около 3000 датчиков (25% — датчики давления, 40% — датчики температуры), в других изделиях авиационной и космической техники количество датчиков колеблется от 250 до 2000. Комплексное автоматизированное оборудование для производства интегральных микросхем по КМОП-технологии с проектными нормами в 0,5 мкм, поставленное в Россию фирмой Applied Materials в 2002 г., содержит около 1000 датчиков непосредственно в технологическом процессе и около 600 в инженерном оборудовании, обеспечивающем техпроцесс (очистка газов, воздуха, водоподготовка, терморегулирование, бесперебойное питание и т. п.).

Датчики как измерительные преобразователи, преобразующие неэлектрические физические величины в электрические сигналы, стали важнейшими элементами ИИС и ИУС. Во многих случаях это сложные устройства, созданные с применением сигнальных процессоров. Именно они и УОИ в значительной степени определяют качество и стоимость ИИС и систем управления. Особенно перспективны по метрологическим и эксплуатационным характеристикам датчики, созданные по технологии микроэлектроники и микроэлектромеханических систем.

Не менее важна в измерительной технике и роль УОИ, которые обеспечивают эффективное взаимодействие оператора и вычислительных средств в ИУС и которые в определяющей степени влияют на процесс принятия решений. В этой области наблюда-

ется невиданный прогресс на основе новых дисплейных технологий.

Для современного этапа развития техники характерны следующие ориентировочные стоимостные оценки ИИС:

- Датчики — 40% общей стоимости ИИС.
- Устройства обработки данных — 20% стоимости ИИС.
- Устройства регистрации и отображения информации — 40%.

Из приведенной обобщенной структурной схемы ИУС (рис. В.1) становится ясным, что для ее проектирования или грамотной эксплуатации необходимо, помимо прочего, иметь современные представления о первичных датчиках физических величин (сенсорах), способах их подключения к устройствам усиления и нормализации сигналов и устройствах отображения информации (УОИ). Изучению именно этих вопросов посвящено пособие «Схемотехника измерительных устройств» (СИУ).

# Глава 1

## Общие сведения о датчиках физических величин и измерительных схемах

### 1.1. Классификация датчиков

Основой любой ИИС и ИУС являются первичные датчики (сенсоры). Обычно они преобразуют входные физические величины (температуру, давление, влажность, освещенность, магнитный поток, ускорение и т. д.) в пропорциональный электрический выходной сигнал. Датчики делятся на две большие группы: генераторные и параметрические (рис. 1.1).

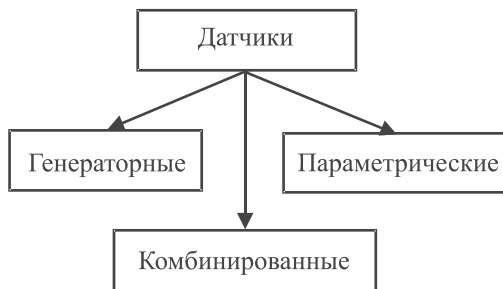


Рис. 1.1. Укрупненная классификация датчиков физических величин

В генераторных датчиках измеряемая величина вызывает генерацию электрического сигнала — тока, напряжения, заряда, частоты ( $I$ ,  $U$ ,  $q$ ,  $f$ ) и т. д. Они являются активными датчиками. Наиболее часто в активных датчиках используются термоэлектрический эффект, пьезоэффект, фотоэффект, эффект электромагнитной индукции и т. д.

В параметрических датчиках изменяются параметры электрических, магнитных, оптических цепей — сопротивления, индуктивности, емкости, пропускания ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $\tau$ ) и т. д. Они являются пассивными (т. е. позволяют косвенно судить о физической



величине путем включения такого датчика в электрическую цепь). Такие датчики нуждаются в подведении питания. В пассивных датчиках наиболее часто используются эффект изменения активного сопротивления (терморезистивный, фоторезистивный, магниторезистивный эффекты), изменение диэлектрической проницаемости, изменение пропускания света в волокне и т. д.

Промежуточное положение занимают комбинированные датчики. В комбинированных датчиках для получения результата используется целая цепь последовательных преобразований. Например, датчики давления могут работать по схеме: давление → деформация мембраны → изменение сопротивления тензодатчика, закрепленного на мембране → изменение выходного электрического сигнала мостовой схемы.

В последнее время в обиход введено понятие интеллектуальные и интегрированные датчики. Такие датчики оснащаются встроенными микропроцессорами (сигнальными процессорами), которые работают по достаточно сложным алгоритмам и позволяют придать измерительным приборам многие дополнительные функциональные возможности, такие как фильтрация сигналов, коррекция, обнаружение отказов, линеаризация передаточной характеристики, реконфигурация измерительной схемы и т. п. Тем не менее основой и этих приборов являются первичные датчики (сенсоры), знание основ функционирования которых является необходимым условием грамотного применения датчиков в инженерной практике.

## 1.2. Генераторные датчики сигналов

Первичные датчики сами по себе маломощные устройства и генерируют сигналы в следующих диапазонах напряжений ( $U$ ), токов ( $I$ ) и зарядов ( $q$ ):

$$U: 10^{-6} \div 10^{-10} \text{ В};$$

$$I: 10^{-6} \div 10^{-15} \text{ А};$$

$$q: 10^{-6} \div 10^{-12} \text{ Кл.}$$

При подключении датчиков к измерительным цепям приходится решать множество проблем:

- Выбор схемы подключения.
- Усиление сигналов.

- Согласование датчиков с нагрузкой для обеспечения оптимальной чувствительности и линейности.
- Подавление синфазных сигналов и помех.
- Коррекция нелинейности передаточной характеристики.
- Учет или парирование дестабилизирующих факторов (температуры, давления, паразитных термоэлектрических эффектов и т. п.).

При анализе схем подключения датчик удобно заменять своей эквивалентной схемой. По виду эквивалентной схемы различают три классических случая подключения различных типов генераторных датчиков:

1. Датчик напряжения.
2. Датчик тока.
3. Датчик заряда.

### 1.2.1. Датчики напряжения

Датчик напряжения (Д) представляется эквивалентной схемой в виде последовательного соединения ЭДС  $U_c$  с выходным сопротивлением  $R_c$  (рис. 1.2). Заметим, что в общем случае выходное сопротивление датчика и сопротивление нагрузки носят комплексный характер. Однако, если это не оговаривается особо, будем считать, что в рассматриваемой частотной области они носят омический характер. В такой схеме  $U_{\text{ВЫХ}} = U_c R_n / (R_n + R_c)$  и, в принципе, связь между  $U_c$  и  $U_{\text{ВЫХ}}$  является нелинейной и чувствительность датчика зависит от изменения нагрузки. При  $R_n \gg R_c$  достигается линеаризация передаточной характеристики, т. е.  $U_{\text{ВЫХ}} = U_c$ .

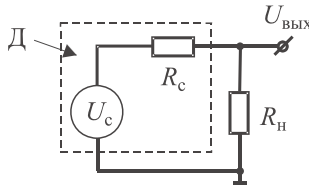


Рис. 1.2. Эквивалентная схема датчика напряжения

Для обеспечения условия линеаризации передаточной характеристики ( $R_n \gg R_c$ ) и низкого выходного сопротивления схемы,

как правило, используется буфер на операционном усилителе (ОУ) в режиме повторителя напряжения (рис. 1.3). На рис. 1.3 также показаны эквивалентные входные цепи ОУ.

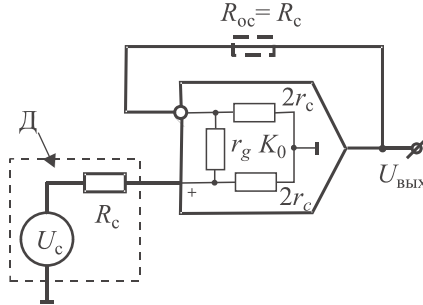


Рис. 1.3. Подключение датчика напряжения через повторитель на ОУ

Как известно, в таком включении входное сопротивление ОУ в области низких частот  $R_{вх} \cong r_g \cdot K_0 \cdot \beta$ , где  $r_g$  — дифференциальное входное сопротивление ОУ,  $K_0$  — коэффициент усиления разомкнутого ОУ,  $\beta$  — коэффициент передачи цепи обратной связи (ОС), и составляет очень большую величину. В данном случае имеем 100% ОС, т. е.  $\beta = 1$  и  $R_{вх} \rightarrow r_g \cdot K_0$ . Заметим, что иногда резистор  $R_{oc} = R_c$  вводят для уменьшения напряжения смещения нуля ОУ ( $U_{см0}$ ) от входных токов ОУ.

Например, при биполярной технологии:  $r_g \approx 10^4$  Ом,  $K_0 = (10^5 \div 10^6)$  и, следовательно,  $R_{вх}$  должно быть по расчету не менее  $(10^9 \div 10^{10})$  Ом. На самом деле реализовать входное сопротивление по формуле  $R_{вх} = r_g \cdot K_0 \cdot \beta$  невозможно по причине того, что в биполярном дифференциальном усилителе  $r_g$  шунтируется синфазным сопротивлением ОУ  $r_c = (10^6 \div 10^7)$  Ом (рис. 1.3). Для униполярных технологий (МОП, КМОП)  $r_c \geq 10^{10}$  Ом и входное сопротивление достигает астрономических величин ( $r_g \geq (10^9 \div 10^{10})$  Ом).

Во многих случаях измерения сигналов датчиков  $U_c$  проходят на фоне большой синфазной составляющей  $E_c$  (помехи). Для ее подавления применяется дифференциальное включение ОУ (рис. 1.4).

В этом случае выходной сигнал датчика  $U_c$  прикладывается между дифференциальными входами ОУ. Для того чтобы обеспечить равенство коэффициентов передачи по обоим входам

[ . . . ]