

Р. ТИЛЬ

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
ИЗМЕРЕНИЯ
НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ВЕЛИЧИН**

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

Р. ТИЛЬ

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
ИЗМЕРЕНИЯ
НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ВЕЛИЧИН**

**ВТОРОЕ ИЗДАНИЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ
И ДОПОЛНЕННОЕ**

Перевод с немецкого И. П. Кужекина



**МОСКВА
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
1987**

ББК 30.10
Т 40
УДК 621.317.39

Рецензент Е. Г. Шрамков

THIEL R.
ELEKTRISCHES MESSEN NICHELEKTRISCHER GRÖSSEN.
Teubner. Stuttgart, 1983.

Тиль Р.

Т 40 Электрические измерения неэлектрических величин: Пер. с нем. — М.: Энергоатомиздат, 1987.— 192 с ил.:

Основное внимание в книге уделено собственно измерениям неэлектрических величин методам измерений, схемным вопросам, касающимся процесса измерений, начиная от получения измерительной информации, необходимых преобразований измерительных сигналов, погрешностям измерений, помехам и др. В книге нашли отражение современные технические средства, применяемые для измерений

Для инженерно технических работников различных отраслей промышленности

Т 2302010000-004 — 141-87
051(01)-87

ББК 30.10

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ

Р. Тиль

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ВЕЛИЧИН**

Редактор издательства *Э. К. Биленко*
Художественный редактор *А. Т. Кирьянов*
Технический редактор *Н. П. Собакина*
Корректор *З. Б. Драновская*

ИБ № 1751

Сдано в набор 24.07.86 Подписано в печать 08.10.86 Формат
84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 2 Гарнитура литературная Печать
высокая Усл. печ. л. 10,08 Усл. кр.-этт. 10,40 Уч.-изд. л. 10,45.
Тираж 20 000 экз. Заказ 596 Цена 70 к

Энергоатомиздат, 113114, Москва М 114, Шлюзовая наб., 10

Владимирская типография Союзполиграфпрома при Государственном
комитете СССР по делам издательств полиграфии и книжной торговли
600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7

© В. G. Teubner, Stuttgart, 1983

© Перевод на русский язык Энергоатомиздат, 1987

ОТ ПЕРЕВОДЧИКА

Предлагаемая читателям книга посвящена очень важной, быстро развивающейся области измерительной техники — электрическим измерениям неэлектрических величин. При этом используются собственно датчики или чувствительные элементы, преобразующие измеряемые физические величины в электрические, измерительные схемы, с помощью которых электрические величины трансформируются в наиболее пригодную для обработки и регистрации форму и подводятся к измерительному прибору, а также разнообразные регистрирующие и обрабатывающие поступающую информацию устройства.

Развитие техники электрических измерений неэлектрических величин тесно связано с прогрессом в таких областях, как полупроводниковая и лазерная техника, микроэлектроника, телеметрия, вычислительная и информационная техника, кибернетика и др. Поэтому сама техника электрических измерений неэлектрических величин качественно быстро изменяется, и состояние этой области измерительной техники на современном этапе сильно изменилось за последние годы. Поэтому книги, изданные сравнительно недавно по этим вопросам¹, сегодня уже не дают представления об уровне развития этой области измерительной техники.

Данная книга представляет собой перевод с немецкого второго издания расширенного конспекта лекций, читаемых профессором доктором-инженером Романом

¹ Глаголевский Б. А., Пимен И. Д. Электротензометры сопротивления. Л.: Энергия, 1972.

Логинов В. Н. Электрические измерения механических величин. М.: Энергия, 1976.

Левшин Е. С., Новицкий П. В. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи Л. Энергоатомиздат, 1983.

Справочник по средствам автоматики/Под ред. В. Э. Нисе и И. В. Антика. М.: Энергоатомиздат, 1983.

Тилем в Техническом высшем училище, г. Дармштадт, ФРГ. В ней отражен опыт, приобретенный автором за десятки лет работы в различных исследовательских организациях и учебных заведениях. Он занимался разработкой электронно-лучевых осциллографов высокого напряжения, исследованиями ветроэнергетических установок, дистанционного управления летательными аппаратами, измерениями при испытаниях аэродинамических моделей и т. д.

В книге, помимо систематизированного изложения основных принципов построения датчиков для электрических измерений неэлектрических величин, много внимания уделяется современным методам обработки результатов измерений, направленных в основном на автоматизацию процесса обработки с использованием элементов вычислительной техники.

Книга предназначена главным образом для студентов и инженеров, изучающих вопросы измерений, поэтому в ней содержатся примеры расчетов параметров измерительных устройств, которые поясняют излагаемый автором материал.

Можно надеяться, что книга будет с интересом встречена советскими читателями. Ваши отзывы и пожелания просим направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Электрические измерения неэлектрических величин имеют большое значение в современной технике. В настоящее время имеются серийные приборы и устройства, которые позволяют проводить практически любые измерения. Однако представляется экономически нецелесообразным создать универсальное измерительное устройство, пригодное на все случаи, и при решении конкретных задач измерений создаются специальные измерительные системы, включающие разнообразные приборы и выполняемые различными методами. Например, для численной обработки большого количества данных измерений практически нет универсальной ЭВМ, однако по мере надобности могут быть использованы специальные приборы для анализа измеряемых величин.

Для правильного выбора и оптимального использования способов измерения и приборов необходимо знать принцип действия и характеристики приборов в различных условиях их применения. В книге приведены необходимые сведения в этой области, полезные как студентам, так и инженерам. В ней в первую очередь рассматривается техника измерений, т. е. применение способов измерений. При изложении материала предполагается, что читатели знакомы с основами электрических измерений.

В начале книги излагаются общие принципы практического применения электрических измерений неэлектрических величин, важнейшие виды измерительных датчиков, схемы их включения и даются краткие указания по их использованию. Далее рассматриваются измерительные цепи, содержащие преобразователи измеряемых параметров, схемы согласования с измерительными усилителями различного рода, а также дается обзор регистрирующих приборов.

Большое значение для сложных измерительных систем имеют описываемые в книге устройства дистанцион-

ной передачи и телеизмерений измеряемых величин. Так как обработка измеряемых величин производится с помощью специальных электронных анализаторов, дается их обзор. Затем обсуждаются проблемы, возникающие при работе с измерительными цепями: согласование параметров измерительных элементов при совместной работе, снижение напряжения помех, повышение чувствительности, уменьшение погрешности и увеличение надежности измерений.

Описание измерительных датчиков разного исполнения и назначения завершается рекомендациями по практическому применению способов измерения различных неэлектрических величин. Даются параметры измерительных элементов и на примерах определяются их численные значения, приводятся основы количественной оценки параметров датчиков и измерительных схем, необходимые для практического применения.

Так как основными элементами измерительных схем являются усилители, электронные модули, измерители, числовые элементы и др., измерительные системы целесообразно представлять в виде структурных схем с пояснением принципа действия и применения отдельных электронных приборов и устройств, с указанием на них направлений перемещения сигналов, не вдаваясь в подробное описание схем.

Роман Тиль

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие науки и техники на современном этапе невозможно без применения электрических измерений неэлектрических величин. Они необходимы при проведении исследований, разработке, экспериментальной проверке, испытаниях, контроле качества продукции, а также при создании устройств управления, регулирования и автоматизации.

1.1. ИЗМЕРЯЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

Электрические измерения неэлектрических величин заключаются в преобразовании этих величин в электрические с использованием разных физических явлений для их дальнейшей обработки.

В табл. 1 приведены примеры неэлектрических величин для демонстрации их максимальных x_{max} и минимальных x_{min} значений и их отношения x_{max}/x_{min} . Максимальное значение соответствует наибольшему измеряемому значению, которое может потребоваться, минимальное — наименьшему, которое еще можно измерить (см. § 6.2).

Т а б л и ц а 1. Диапазоны изменений измеряемых неэлектрических величин

Величина	x_{min}	x_{max}
Удлинение ϵ , мкм/м	10^{-2}	10^5
Расстояние s , м	10^{-6}	10
Угол поворота α , град	$10^{-6} \cdot 360$	360
Частота вращения, мин ⁻¹	$4 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^5$
Ускорение a , м/с ²	10^{-5}	10^6
Сила F , Н	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^7$
Давление P , Па	1	10^9
Время t , с	10^{-10}	10^9
Температура T , К	10^{-6}	10^{12}

Вычисленные по данным табл. 1 значения $x_{\max}/x_{\min}$ составляют 10^6 — 10^{19} ; однако может потребоваться измерение отношения 10^9 — 10^{28} , а в дальнейшем и до 10^{42} . Хотя не все эти отношения наглядно могут быть восприняты, они показывают, какие высокие требования могут быть предъявлены при электрических измерениях неэлектрических величин. Обеспечить измерения во всем диапазоне одним универсальным измерительным устройством практически невозможно и экономически нецелесообразно.

Различные измерительные системы и способы измерений требуются не только для отличающихся измеряемых величин, но и для разных диапазонов их изменения. Поэтому для оптимального выбора и правильного использования измерительных устройств необходимо иметь общее представление об электрических измерениях неэлектрических величин.

1.2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ

На рис. 1 изображена принципиальная структурная схема устройства для электрического измерения неэлектрических величин. Измерительная цепь состоит из таких элементов, как датчик D , устройство согласования C , числовой регистратор или устройство для числовой обработки O , выходной прибор $ВП$. Выделение измерительных элементов выполнено в соответствии с их функциями в измерительном устройстве. Обработка результатов измерений может производиться либо в процессе измерений, либо после измерений. В преобразователях

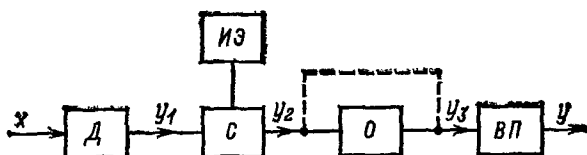


Рис. 1. Структура устройства для электрических измерений неэлектрических величин:

D — датчик (например датчик силы, см. § 7.7); C — схема согласования (например, измерительный усилитель с несущей частотой, см. § 3.3); O — устройство для регистрации и обработки данных (например, процессор, электронная вычислительная машина или анализатор, см. гл. 4); $ВП$ — выходной прибор (например, регистрирующий прибор, см. § 3.4); $ИЗ$ — вспомогательный источник энергии (например, генератор тока); x — входная измеряемая величина; y — измерительные сигналы и выходная величина

измеряемых величин один прибор выполняет функции датчика и согласующего устройства (см. § 1.3, 3.2).

При оценке способов измерения учитываются возможность согласования измеряемых величин, диапазоны измерений, частота, чувствительность, значение помех, а также возможность аналогового и числового многоканального измерения, передачи измеряемого сигнала на расстояние и телеизмерений, автоматизированной обработки результатов, точность и надежность.

1.3. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Чувствительный элемент (зонд, измерительный элемент) представляет собой специальный преобразователь неэлектрической величины в электрическую, включенный в измерительную цепь.

Датчик включает в себя чувствительный элемент и все остальные элементы, необходимые для преобразования физической величины в электрическую. В некоторых случаях чувствительный элемент является датчиком, например тензорезистор или термоэлемент.

Измерительный преобразователь (преобразователь сигнала) представляет собой обычно прибор, в котором входной аналоговый сигнал в соответствии с характеристиками прибора преобразуется в аналоговый выходной сигнал.

Преобразователь измеряемой величины — измерительный преобразователь, в котором входной и выходной сигналы имеют разную физическую природу. Датчик часто является преобразователем измеряемой величины. Так, термоэлемент преобразует входной сигнал — температуру в выходной — электрическое напряжение. Преобразователи измеряемой величины применяются чаще всего в устройствах регулирования промышленных процессов, структурная схема которых и изображение направлений сигналов показаны на рис. 2.

Преобразователь значения измеряемого сигнала имеет на входе и выходе сигналы одной физической природы.

Унифицированный преобразователь (трансмисмиттер) имеет нормированный диапазон сигнала на выходе (см. § 3.2). В унифицированном преобразователе, состоящем из датчика и схемы согласования (см. рис. 1), измеряемая физическая величина преобразуется в электричес-

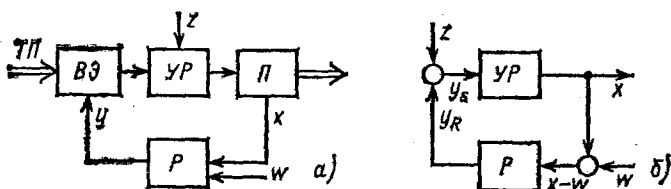


Рис. 2. Структурная схема цепи регулирования (а) и изображение направления сигналов (б) согласно DIN19226:

ТП — процесс (изменение энергии, перемещение материала или массы); УР — участок регулирования; П — преобразователь измеряемой величины; Р — регулятор; ВЭ — элемент, воздействующий на процесс; x — регулируемая (изменяемая) величина; y — управляющая величина; w — задающая величина; z — величина, вызывающая отклонение процесса (помеха)

кую определенного уровня. Входными сигналами такого преобразователя могут быть различные физические величины, например температура, сила и т. д., а выходными — ток, напряжение или частота.

Согласно DIN/VDE2600 нормированные сигналы постоянного тока должны находиться в диапазонах $0 \div \pm 5$ или $0 \div \pm 20$ мА. В некоторых случаях используют устройства со смещенным нулем. В них диапазоны тока сужены: $\pm 1 \div \pm 5$ мА или $\pm 4 \div \pm 20$ мА. По отклонениям токов покоя от нижних значений указанных диапазонов обнаруживаются различные неисправности, например повреждения регистрирующего прибора или в питающей сети, обрыв соединительного провода, по которому поступает измеряемый сигнал. При необходимости регулирования границы диапазона токовых сигналов должны лежать в пределах: нижняя — от 0 до 5 мА, верхняя — от 12 до 25 мА. В устройствах с нормированными токовыми сигналами допускается применение различных измерительных приборов с внутренним сопротивлением не более 1 кОм.

Нормированные значения диапазонов сигналов напряжения составляют $0 \div \pm 10$ и $0 \div \pm 1$ В, причем внутреннее сопротивление измерительных приборов не должно быть менее 1 кОм.

При использовании в качестве выходной величины частоты рекомендуемый диапазон ее изменения составляет 5—25 Гц.

В пневматических системах нормировано давление газа. Оно должно находиться в диапазоне 0,02—0,1 МПа.

2. ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

2.1. АКТИВНЫЕ И ПАССИВНЫЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

При преобразовании неэлектрической величины в электрическую используются два принципа: воздействие на электрические параметры (пассивный чувствительный элемент) и генерирование электрического сигнала (активный).

Пассивные элементы воздействуют на электрические параметры через механический контакт, путем использования физических зависимостей, а также посредством компенсации расстояния s или силы F . Они воздействуют на сопротивления, индуктивности и емкости, а также на токи, напряжения, интенсивность излучения. Активные элементы генерируют электрические сигналы (напряжение, ток, заряд) путем преобразования механической, тепловой, световой или химической энергии.

2.2. РЕЗИСТИВНЫЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

2.2.1. Принцип действия

Чувствительным элементом в этом случае является резистор, сопротивление которого при температуре 20°C рассчитывается по выражению

$$R = \rho l / S = l / \sigma S, \quad (1)$$

где l — длина проводника; S — его сечение; ρ — удельное электрическое сопротивление материала проводника; σ — удельная электрическая проводимость при указанной температуре.

При температуре T , отличающейся от температуры 20°C , сопротивление R рассчитывается по соотношению

$$R = R_{20} [1 + \alpha (T - 20^\circ\text{C})], \quad (2)$$

где R_{20} — сопротивление при температуре 20°C ; α — температурный коэффициент сопротивления.

При непосредственном физическом воздействии на резистивный чувствительный элемент можно изменить его сопротивление за счет механической силы (измене-

ние длины l или сечения S), температуры T или оптического излучения (влияние на удельную электрическую проводимость σ). Изменение сопротивления чувствительного элемента можно измерить различными способами.

2.2.2. Применение

На рис. 3 представлены условные графические обозначения резистивных чувствительных элементов.

Аналоговые резистивные чувствительные элементы изготавливаются из проводников, полупроводников или

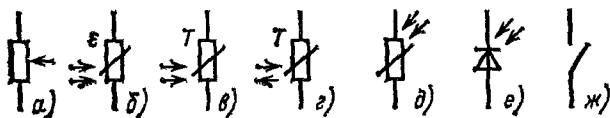


Рис. 3. Обозначения резистивных чувствительных элементов по DIN40700 и DIN40716:

а — датчик перемещения или угла поворота; б — резистивный или полупроводниковый тензодатчик; в — резистивный термометр, терморезистор, охлаждаемый проводник с сопротивлением, изменяющимся пропорционально влияющей величине T ; г — резистивный термометр, терморезистор, нагреваемый проводник с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления; д — фотодиод; ж — контактный элемент в цифровых устройствах

проводящих жидкостей. Они имеют сопротивления от 1 до 10^6 Ом.

Цифровые датчики представляют собой коммутаторы, например механические, тиристоры, транзисторы, управляемые с помощью электрических сигналов, или фотоэлектрические устройства, управляемые светом, причем их сопротивление изменяется примерно от нуля до бесконечности.

2.2.3. Измерительные схемы с делителями напряжения

На рис. 4, а, б представлены схемы со стрелочным выходным прибором. В них используются источники постоянного напряжения U_0 (рис. 4, а) или тока I_0 (рис. 4, б) (DIN5489). Далее напряжение питания измерительной схемы будем обозначать U_0 .

Делитель напряжения. В схемах с делителями напряжения (рис. 5) сопротивление R_0 подключается к источнику питания. Измеряемый сигнал снимается с нижнего плеча или подвижного контакта делителя. При

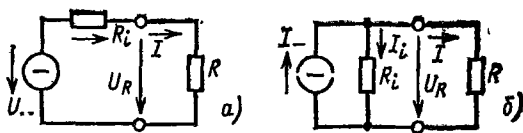


Рис. 4. Схемы замещения с источниками напряжения U_0 (а) и тока I_0 (б):

R_i — внутреннее сопротивление; R — нагрузка; U_R — падение напряжения на нагрузке

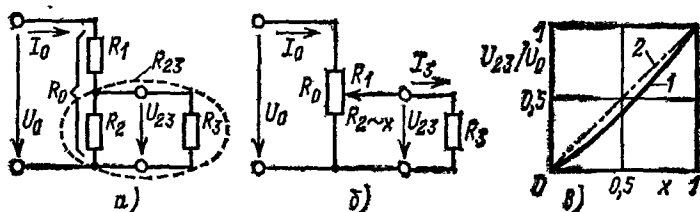


Рис. 5. Нагруженные делители напряжения с сопротивлениями R_1 и R_2 (а), с подвижным контактом (б) и его характеристики (в):

1 — характеристика делителя при $R_3/R_0=1$; 2 — идеальная характеристика

последовательном соединении плеч делителя сигнал, снимаемый с него, пропорционален сопротивлению R_{23} .

Снимаемое с делителя напряжение

$$U_{23} = U_0 R_{23} / (R_1 + R_{23}), \quad (3)$$

где

$$R_{23} = R_2 R_3 / (R_2 + R_3).$$

Для нагруженного делителя

$$\frac{U_{23}}{U_0} = \frac{R_2 R_3 / (R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 R_3 / (R_2 + R_3)}. \quad (4)$$

В ненагруженном делителе $R_0 = R_1 + R_2$ и $R_3 = \infty$, поэтому $U_2/U_0 = R_2/R_0$, и зависимость U_2 от R_2 линейна.

Характеристика нагруженного делителя. В линейном делителе с сопротивлением R_0 и напряжением питания U_0 (рис. 5, б) расстояние подвижного контакта от конца резистора x , отн. ед., меняется от 0 до 1. Определим отношение напряжений U_{23}/U_0 в зависимости от x .

Из (4) получим:

$$\frac{U_{23}}{U_0} = \frac{R_2}{R_1 [(R_2/R_3) + 1] + R_2}. \quad (5)$$

Зависимость напряжения U_{23} от R_2 нелинейна (рис. 5, в).

При $R_2 = xR_0$ и $R_1 = (1-x)R_0$ получим:

$$\frac{U_{23}}{U_0} = \frac{x}{1 + (x - x^2)R_0/R_3}. \quad (6)$$

Введя коэффициент нагрузки $c = R_3/R_0$, можно записать:

$$\frac{U_{23}}{U_0} = \frac{x}{1 + (x - x^2)/c} = \frac{cx}{c + x - x^2}. \quad (7)$$

Относительная погрешность напряжения. Отклонение U_{23}/U_0 нагруженного делителя от U_2/U_0 ненагруженного, или относительная погрешность напряжения

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{U_{23}}{U_0} - \frac{U_2}{U_0} = \frac{cx}{c + x - x^2} - \\ &- x = \frac{x^3 - x^2}{c + x - x^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Малая относительная погрешность (практически линейная характеристика) достигается при условии $R_3 \gg R_0$ ($I_3 \ll I_0$).

Как правило, в измерительных цепях соблюдается условие $R_3 \geq 100 R_0$ (соответственно $I_0 \geq 100 I_3$) и относительная погрешность напряжения не превышает —0,15 %. При выборе параметров делителя напряжения, предназначенного для проведения экспериментов, обычно достаточно взять $R_3 \geq 10 R_0$, при этом погрешность будет менее —1,5 %.

Линеаризация характеристики делителя может быть достигнута включением последовательно с делителем дополнительного резистора R . Тогда, обозначив $R/R_0 + 1$ через k , получим:

$$\frac{U_{23}}{U_0} = \frac{cx}{kc + kx - x^2}. \quad (9)$$

Оптимальная линеаризация получается при $R = R_0/2$, т. е. при $k = 1,5$.

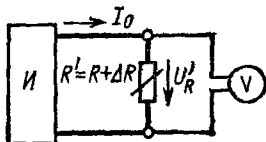
Пример 1. Рассчитаем относительную погрешность напряжения ΔU слабо нагруженного делителя при расположении движка в середине ($x=0,5$ отн. ед.), $R_2=0,5 R_0$ и $c=R_3/R_0=100$.

Из (8) получим погрешность

$$\Delta U = \frac{0,5^3 - 0,5^2}{100 + 0,5 - 0,5^2} = \frac{-0,125}{100,25} \approx -0,125 \text{ \%}.$$

Случай малых изменений сопротивления и напряжения. Далее покажем, как изменяется падение напряжения U'_R на сопротивлении R' в схеме, показанной на рис. 6,

Рис. 6. Измерение напряжения U'_R вольтметром V при малом изменении сопротивления ΔR и питании от источника I постоянным током I_0



при увеличении сопротивления R , равном ΔR ($R' = R + \Delta R$), и постоянном токе I_0 .

Напряжение на сопротивлении R'

$$U'_R = R' I_0 = U_R + \Delta U_R. \quad (10)$$

Так как $R I_0 + \Delta R I_0 = R I_0 + \Delta U_R$, то $\Delta U_R = \Delta R I_0$. При постоянном токе $I_0 = U_R / R$ относительное изменение напряжения равно

$$\Delta U_R / U_R = \Delta R / R. \quad (11)$$

Это равенство справедливо при измерении как постоянных, так и изменяющихся во времени величин в диапазонах частот, приведенных ниже:

Процесс	Диапазон частот, Гц
Статический	0
Квазистатический	0—1
Динамический	1— $\geq 10^6$
Статико-динамический	0— $\geq 10^6$

Пример 2. Для измерительной схемы, приведенной на рис. 6, при $R=100$ Ом, $I_0=10$ мА и малом изменении $\Delta R=\pm 1$ Ом сравнить возникающее изменение напряжения с базовым $U_R=R I_0=1$ В.

По (11) находим абсолютное изменение напряжения $\Delta U_R = U_R \Delta R / R = 1 (\pm 1/100) = \pm 10$ мВ.

Измерение напряжения непосредственно на резисторе при малых изменениях его сопротивления практически неприемлемо, так

как зарегистрировать показания вольтметра при базовом напряжении $U_R=1000$ мВ с отклонением всего ± 10 мВ затруднительно. Точная регистрация этого отклонения практически невозможна без компенсации базового напряжения.

Если вольтметр V (рис. 6) подсоединен к измерительному резистору R через конденсатор C , то базовое напряжение не измеряется. Недостаток такой схемы заключается в том, что она применима только при регистрации динамических процессов. Кроме того, любое изменение во времени тока питания I_0 (или напряжения питания в схеме с делителем) будет восприниматься как измеряемая величина.

Компенсация базового напряжения может быть осуществлена включением дополнительного источника напряжения или же с помощью мостовых схем.

2.2.4. Мостовые схемы

Для упрощения расчетов измерительных мостовых схем используют следующие приближения. Считают, что внутреннее сопротивление источника питания постоянного напряжения (рис. 7) пренебрежимо мало ($R_i=0$).

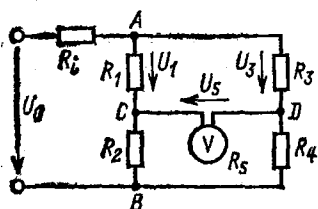


Рис. 7. Мостовая схема:

U_0 — напряжение питания; R_i — внутреннее сопротивление источника питания; R_1 — R_4 — сопротивления плеч моста; R_5 — сопротивление диагонали

Сопротивление резистора в диагонали моста R_5 намного больше сопротивлений остальных резисторов моста R_1 — R_4 , т. е. можно принять, что $R_5 \approx \infty$. При этих приближениях обе стороны моста R_1 — R_2 и R_3 — R_4 представляют собой ненагруженные делители напряжения общего источника питания.

Расчет напряжения диагонали мостовой схемы. Рассчитаем напряжение диагонали U_5 мостовой схемы, показанной на рис. 7. Согласно второму закону Кирхгофа $U_3 + U_5 - U_1 = 0$ и $U_5 = U_1 - U_3$. Напряжения обоих ненагруженных делителей равны:

$$U_1 = U_0 R_2 / (R_1 + R_2) \text{ и } U_3 = U_0 R_4 / (R_3 + R_4). \quad (12)$$