

Г.А.Кондрашкова, И.В.Бондаренкова, А.В.Черникова

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2013

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ»**

Г.А.Кондрашкова, И.В.Бондаренкова, А.В.Черникова

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Учебное пособие

**Санкт-Петербург
2013**

УДК 658.562 (75)
ББК 30.10я7
К 642

Кондрашкова Г.А., Бондаренкова И.В., Черникова А.В. Средства измерений физических величин: учебное пособие / СПбГТУРП. – СПб., 2013. – 82 с.

Учебное пособие содержит необходимые теоретические сведения для проведения занятий по дисциплинам «Метрология и измерительная техника», «Метрология, стандартизация и сертификация», «Технические измерения и приборы», «Технологические измерения и приборы», «Электрические и компьютерные измерения».

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров 220400 «Управление в технических системах», 220700 «Автоматизация технологических процессов и производств», 140400 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения.

Рецензенты:

профессор Санкт-Петербургского технологического института (технического университета), д-р техн.наук Л.А.Русинов;

профессор Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров, д-р техн.наук В.Д.Кулик.

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия.

© Санкт-Петербургский государственный
технологический университет растительных полимеров, 2013

© Кондрашкова Г.А., Бондаренкова И.В.,
Черникова А.В., 2013

Введение

В современном обществе метрология как наука об измерениях и область практической деятельности, связанной с измерительной техникой, играет большую роль. Это объясняется тем, что практически нет ни одной сферы человеческой деятельности, где бы не использовались результаты измерений. В нашей стране ежедневно исполняется свыше 20 млрд различных измерений, свыше 4 млн человек считают измерения своей профессией. Доля затрат на измерения составляет $10 \div 15 \%$ затрат общественного труда, а в отраслях промышленности, производящих сложную технику (электротехника, станкостроение и др.), она достигает $50 \div 70 \%$. На основе измерений получают информацию о состоянии производственных, экономических и социальных процессов. Измерительная информация служит основой для принятия решений в научных экспериментах, о качестве продукции при внедрении систем качества и т.д. И только достоверность и соответствующая точность результатов измерений обеспечивают правильность принимаемых решений на всех уровнях управления. Получение недостоверной информации приводит к неверным решениям, снижению качества продукции, возможным авариям.

Качество измерений во многом связано с качеством средств измерений (СИ).

Настоящее учебное пособие посвящено изложению устройства датчиков как средств измерений, которые непосредственно воспринимают, селективируют и преобразуют измеряемые физические величины в объектах измерения. Поскольку датчики – это средства измерений, имеющие установленные метрологические характеристики, состоящие из одного или нескольких измерительных преобразователей, оформленных в единое конструктивное целое, предназначенное для установки в объекты измерения, постольку они воспринимают все физические величины, присущие этим объектам. Задачей создания датчиков является обеспечение избирательности к информативному параметру.

В учебном пособии приведены конструкции, материалы, характеристики, в том числе метрологические, и области применения наиболее широко распространенных датчиков для преобразования физических величин, электрических и неэлектрических, в измерительные сигналы. Их применение в информационно-измерительных системах рассматривается с помощью структурных схем.

1. Структурные схемы средств измерений

Изучение современных средств измерений невозможно без их структурного представления, поскольку анализ и синтез измерительных устройств основывается на комбинации измерительных преобразователей и разнообразных вспомогательных блоков, включая в первую очередь вычислительные средства (микропроцессоры, процессоры, компьютеры, периферийные устройства, средства передачи и хранения информации).

Действительно, начиная от самых простых СИ, например, датчиков, и кончая сложными СИ, такими как информационно-измерительные системы или измерительно-вычислительные комплексы, все СИ состоят из сочетаний измерительных преобразователей, вспомогательных и вычислительных элементов, число которых с оригинальными функциями преобразований достаточно обозримо, а число измерительных устройств разнообразного назначения весьма велико и продолжает множиться.

Структурное представление СИ, которое получило распространение от измерительной техники для определения электрических величин, удобно использовать для любых СИ физических величин, имея для связи структур СИ представление об информационно-измерительных сигналах. Под последними следует понимать физический процесс, несущий информацию, в частности измерительную [1].

В этом контексте следует упомянуть, что на входе СИ рассматривают измерительный сигнал, который называют информативным параметром в отличие от неинформативных параметров, которые сопутствуют селекции измеряемого сигнала – измеряемой величины в объекте измерения. Так, например, при измерении температуры объекта неинформативными параметрами являются скорость движения вещества в объекте и изменение конвективного коэффициента при преобразовании тепла объекта во входной сигнал измерительного преобразователя, например, термометра электрического сопротивления.

При этом сам объект измерения, измеряемое свойство которого формируется в модель измеряемой величины, не принято рассматривать как структурную единицу измерительного устройства или канала, хотя от него зависят погрешности или неопределенности результата измерения информативного параметра, в том числе неинформативные параметры при его восприятии первичными измерительными преобразователями.

На выходе первичного измерительного преобразователя как простейшего элемента структуры любого СИ получают выходной сигнал измерительной информации, который так же представляет физический процесс, несущий измерительную информацию, но выбранный за удобство его дальнейших преобразований, обработки, передачи, представления и (или) хранения.

Важным признаком, по которому различают сигналы измерительной информации, является их форма, которая может быть аналоговой (непрерывной) или дискретной (кодовой, цифровой).

Такое разделение сигналов используется в Государственной системе приборов и средств автоматизации, например, стандартная электрическая ветвь имеет аналоговую и дискретную подветви. Это измерительно-информационное различие сигналов в структурном представлении СИ может быть подчеркнуто изображением одинарной (для аналоговых сигналов) и двойной (для дискретных сигналов) стрелками (рис. 1.1).

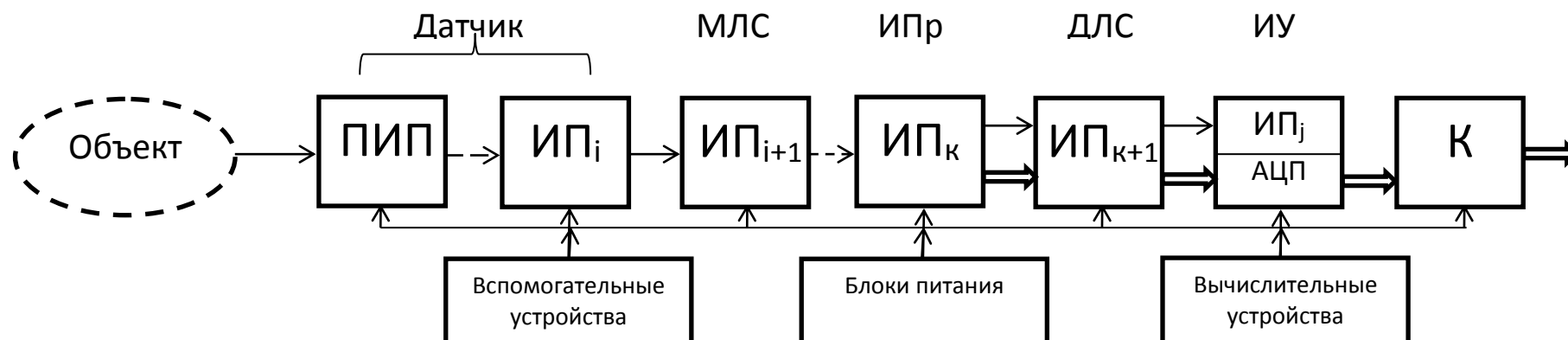


Рис. 1.1. Структурная схема информационно-измерительной системы:

ПИП – первичный измерительный преобразователь;

ИП – измерительный преобразователь;

МЛС – местная линия связи;

ИПр – измерительный прибор;

ДЛС – дистанционная линия связи;

ИУ – измерительное устройство;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

К – компьютер (контроллер)

При составлении структурных схем СИ следует различать два подхода к выделению структурных элементов.

Первый подход используется специалистами, которые составляют измерительные комплекты и (или) системы из готовой измерительной аппаратуры, выпускаемой промышленностью, имеющей определенные назначения и метрологические характеристики (см., например, рис. 1.1).

Второй подход присущ приборостроителям или разработчикам измерительной аппаратуры, исследующим принцип действия, функциональные и метрологические характеристики измерительных преобразователей как элементов того или иного средства измерения конкретного назначения.

По первому подходу общая структурная схема автономного измерительного комплекта (канала) для системы автоматического контроля или управления в локальных системах нижнего уровня иерархического управления может быть представлена на рис. 1.1.

Типовая структурная схема состоит из датчика, в который входят один или несколько i -х измерительных преобразователей ($ИП_i$), включая первичный измерительный преобразователь (ПИП). Датчик с помощью местной линии связи (МЛС) соединен с измерительным прибором ($ИПр$), если по месту необходима визуальная информация. С помощью дистанционной линии связи (ДЛС), аналоговой или дискретной, измерительные сигналы поступают в дистанционные измерительные устройства ($ИУ$): преобразователи ($ИП_j$) или аналого-цифровые преобразователи ($АЦП$) и далее в контроллер или компьютер ($К$). Каждый из элементов измерительного комплекта может иметь в своем составе вспомогательные устройства, блоки питания и вычислительные устройства.

Используя второй подход для СИ нижнего уровня, в качестве примера можно рассмотреть структурную схему измерительного комплекта для измерения температуры, который состоит из датчика термометра электрического сопротивления ($ДТЭС$) с унифицированным измерительным преобра-

зователем (УИП) и миллиамперметром (мА) для визуального отсчета значений температуры (рис. 1.2а). Тогда структурная схема этого комплекта может быть представлена цепью измерительных преобразователей (рис. 1.2б), в которых осуществляются последовательно измерительные преобразования

$$\Delta T \rightarrow \Delta R \rightarrow \Delta I_1 \rightarrow \Delta I_2 \rightarrow \Delta I_3 \rightarrow \alpha ,$$

т.е. изменение температуры ΔT преобразуется в электрическое сопротивление постоянному току ΔR в термометре электрического сопротивления (ТЭС), а в унифицированном измерительном преобразователе (УИП), входящем в состав ДТЭС, на выходе появляется стандартный токовый сигнал ΔI_1 , например, изменяющийся от 4 до 20 мА. Этот ток с помощью дистанционной линии связи в виде ΔI_2 (с помехами) поступает на вход мА. Измерительная цепь (ИЦ) в миллиамперметре (мА) (предназначенная для уменьшения температурной погрешности) на выходе имеет ток ΔI_3 , который в катушке, укрепленной на растяжках в поле постоянного магнита, по закону электромагнитной индукции создает вращающий момент. Последний уравнивается противодействующим моментом растяжек, и указатель останавливается на отметке α шкалы, проградуированной в $^{\circ}\text{C}$ в измерительном механизме (ИМ).

В настоящее время, особенно в автоматизированных и автоматических системах управления технологическими процессами с развитой иерархической структурой, распределенных по сложным технологическим объектам, в которых на всех этапах управления чрезвычайно широко используются вычислительные мощности, в качестве сложных средств измерения применяют информационные измерительные системы (ИИС).

Типовая структурная схема ИИС представлена на рис. 1.3 [2]. Такая структура ИИС подчеркивает состав основных структурных блоков: средств измерений (датчиков, измерительных преобразователей, включая

специализированные вспомогательные устройства, в том числе местные каналы связи), интерфейсных устройств, в том числе сенсорных устройств передачи информационных измерительных сигналов, и вычислительных компьютерных устройств, встроенных в измерительные компоненты и (или) в виде отдельных структурных блоков. На этой схеме показано примерно общепринятое взаимодействие измерительных и компьютерных устройств при выполнении последовательности физических преобразований сигналов и результатов измерительной информации в «к» измерительных каналах (ИК).

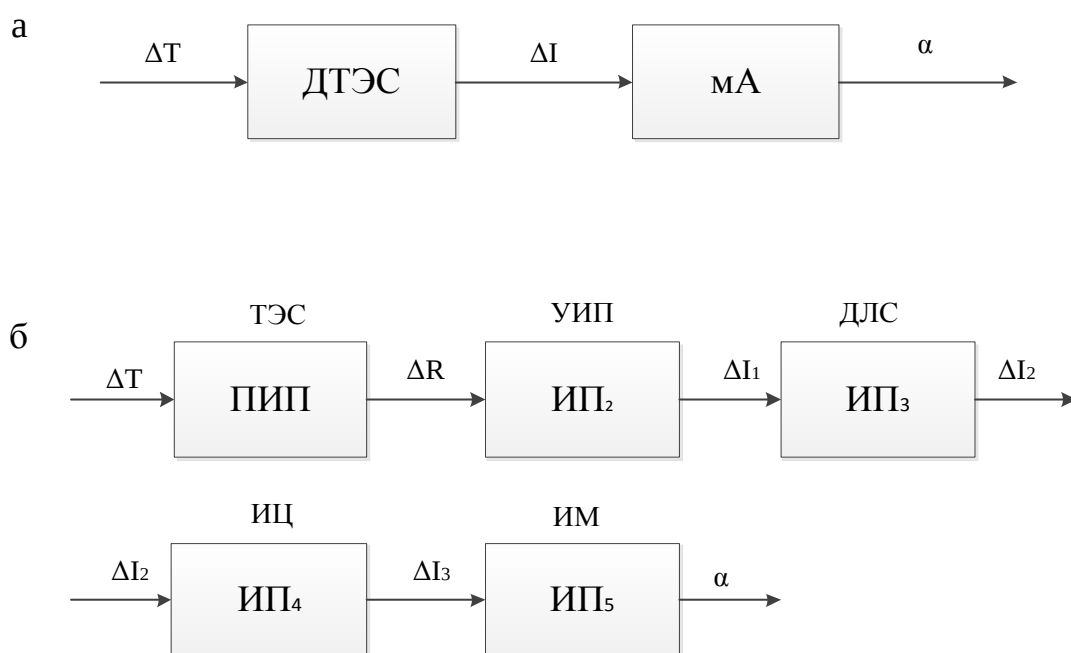


Рис. 1.2. Структурная схема автономного измерительного комплекта

Основную ответственную роль в ИИС имеют датчики физических величин $D_1, D_2 \dots D_k$, преобразующие измеряемые параметры $X_1, X_2 \dots X_k$ в измерительные сигналы (см. рис. 1.3). Последующие измерительные преобразователи в измерительных каналах $ІП_{11}, \dots, ІП_{k1}$ до $ІП_{1m}, \dots, ІП_{km}$ могут быть представлены отдельными самостоятельными конструктивными блоками, а часть из них, особенно в микроминиатюрном исполнении, встраиваться либо в датчики, либо в более компактные конструктивы.

За счет этого улучшается помехоустойчивость ИК, особенно если полевые датчики удалены от остальных компонентов ИИС на значительные расстояния.

На этой схеме показано сочетание компьютерных устройств: устройства выборки и хранения, мультиплексора (измерительного коммутатора), компьютера с «к» измерительными каналами. Структурные схемы ИИС могут иметь специальные сочетания блоков, в том числе вычислительных устройств, в зависимости от конкретного назначения.

Так, например, выделяют *информационно-вычислительные комплексы* (ИВК), в которых используются сочетания средств измерения с вычислительными устройствами, выполняющими функции управления процессом измерений и обработкой получаемых данных. Основная роль ИВК состоит в автоматической обработке информационных измерительных данных по сложным алгоритмам и программам, и автоматизации измерительных процедур, включая самонастройку средств измерений и самодиагностику их метрологических свойств, которые могут быть весьма разнообразными [3].

Многоканальные мультиплексорные ИИС с однотипными сигналами от нескольких датчиков, которые через мультиплексор с помощью одного АЦП обрабатываются и преобразуются в результаты измерений (на этой основе можно создавать ИИС с развертывающим преобразованием) [4].

Сканирующие ИИС, в которых несколькими датчиками с помощью специального сканирующего устройства определяются информативные параметры измеряемых величин, распределенных по пространству объекта. Например, на бумагоделательных машинах (БДМ) используются сканеры с 8-12 датчиками, измеряющими такие параметры бумажного полотна, как масса 1 м^2 , влажность, толщина, белизна, зольность и другие, распределенные по ширине полотна при скорости машины до 1200 м/мин.

Сама структура таких ИИС, как правило, иерархического типа: несколько датчиков с нормированными выходными сигналами через мульти-

плексор и АЦП подключаются к микроконтроллеру (осуществляющему автоматическое управление процедурами измерения на сканирующем устройстве), образуя подсистему нижнего уровня. Несколько таких подсистем объединяются кодовой магистралью (так называемой полевой шиной – fieldbus) в подсистему более высокого уровня, управляемую компьютером, и далее она подключается к той или иной информационной сети (по аналогии с рис. 1.3).

Телеизмерительные системы, предназначенные для измерений физических величин на удаленных и движущихся объектах, на которых трудно или невозможно осуществлять проводную связь датчиков с электронными блоками ИИС.

Поскольку использование ИИС весьма разнообразны: это автоматические системы контроля и измерений, системы технической диагностики, автоматизированные системы научных исследований и т.п., то с применением современных информационных технологий их структурная реализация может быть достаточно индивидуальной [3, 4, 5].

Изложенный подход к анализу и синтезу любых сложных и простых средств измерений позволяет подчеркнуть особую важность первичных средств измерений и первичных измерительных преобразователей. Действительно, в условиях внедрения в измерительную технику вычислительных устройств и использования информационных технологий для обработки измерительной информации самыми ответственными измерительными элементами являются первичные средства измерений. Их совершенствование в значительной мере зависит от развития материаловедения, современной технологии, конструктивной микроминиатюризации и метрологического обеспечения.

Поэтому дальнейшее изложение посвящено наиболее востребованным первичным средствам измерений физических величин.

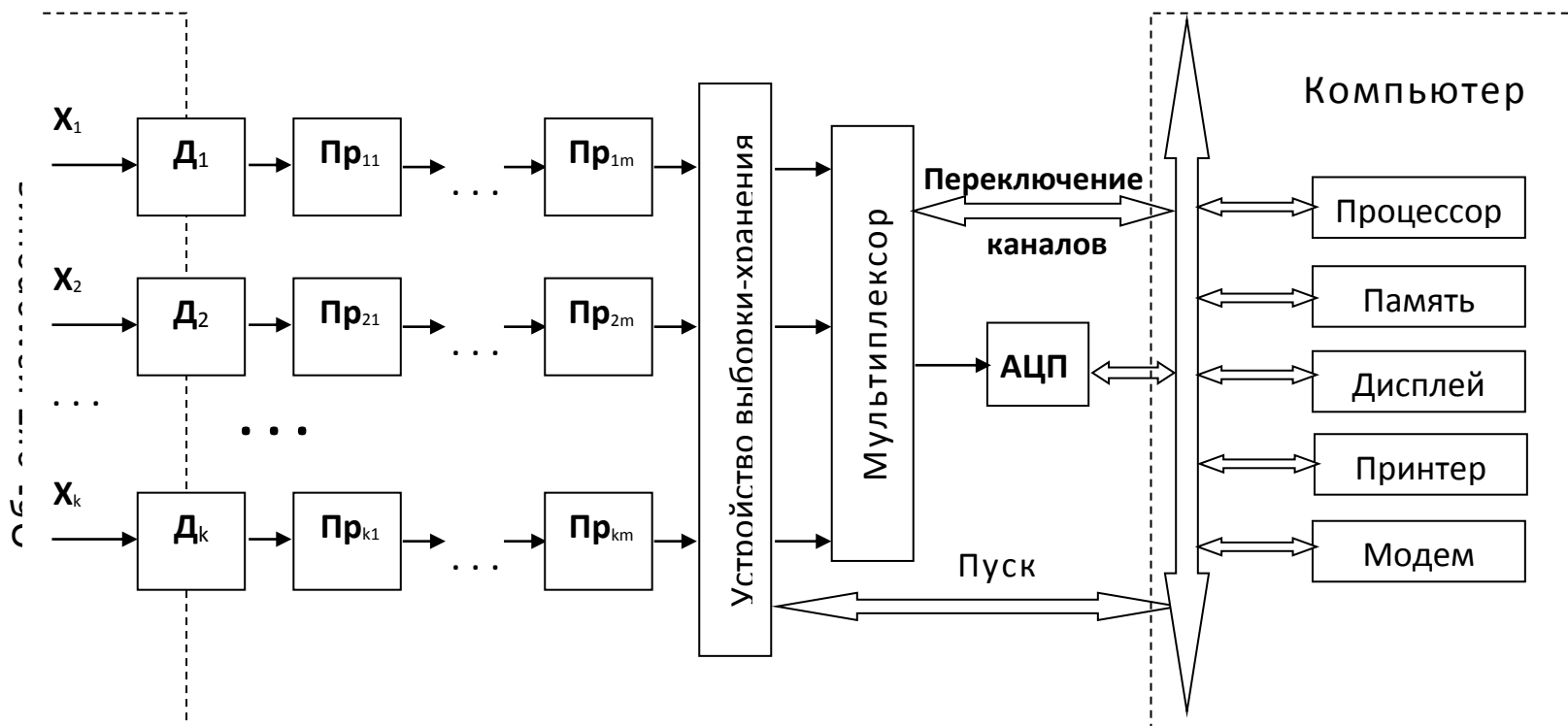


Рис. 1.3. Структурная схема информационно-измерительной системы

2. Средства измерений силы тока и напряжения

Наиболее распространенными электрическими величинами являются токи и напряжение. Для их измерения используется широкая номенклатура выпускаемых промышленностью измерительных приборов. Выбор того или иного прибора определяется целой совокупностью факторов: предполагаемым размером измеряемой величины, родом тока (постоянного или переменного), частотой, требуемой точностью измерения, условиями применения (лабораторные, цеховые, полевые и т.п.), влиянием внешних условий (температуры, магнитного поля, вибраций и т.д.) и др.

Измерения токов и напряжений всегда сопровождаются погрешностью, обусловленной сопротивлением используемого средства измерений. Включение в исследуемую цепь СИ искажает режим работы этой цепи. Так, например, включение амперметра, имеющего сопротивление R_a , в цепь, изображенную на рис. 2.1а, приведет к тому, что вместо тока $I = U/R$, который протекал в этой цепи до включения амперметра, после включения амперметра пойдет ток $I' = U/(R + R_a)$. Тогда погрешность $\Delta I = I' - I$ будет тем больше, чем больше сопротивление амперметра. Аналогичная погрешность возникает при измерении напряжений. Например, в цепи, представленной на рис. 2.1б, при включении вольтметра, имеющего сопротивление R_v , для измерения напряжения между точками a и b режим цепи нарушается, так как вместо напряжения $U_{ab} = U \times R_2 / (R_1 + R_2)$, которое было в схеме до включения вольтметра, после его включения будет:

$$U'_{ab} = \frac{U \times R_2 R_v / (R_2 + R_v)}{R_1 + R_2 \times R_v / (R_2 + R_v)}. \quad (2.1)$$

Погрешность $\Delta U = U'_{ab} - U_{ab}$ тем больше, чем меньше сопротивление вольтметра R_v .

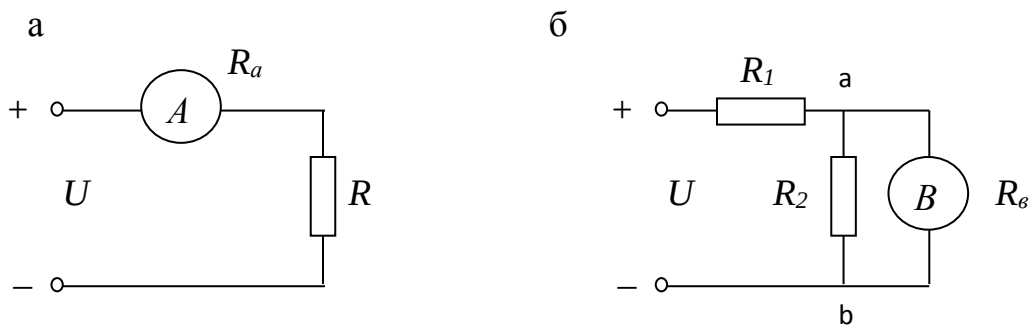


Рис.2.1. Схемы подключения амперметров и вольтметров

Для измерения токов и напряжения в цепях постоянного и переменного тока используются:

- аналоговые электроизмерительные приборы прямого преобразования, которые основаны на электромеханических измерительных преобразователях;
- аналоговые электронные приборы прямого преобразования;
- аналоговые измерительные приборы уравнивающего преобразования (электронные и ручные потенциометры);
- цифровые приборы.

Общие характеристики аналоговых электромеханических измерительных преобразователей представлена в табл. 2.1, в которой приведены уравнения преобразования измеряемых величин (I и U) в выходные сигналы, величины и пределы их измерения, чувствительность, наиболее существенно влияющие величины, потребляемая мощность, погрешности и области применения.

Следует остановиться более подробно на магнитоэлектрических измерительных приборах, которые в силу своего совершенства используются не только для измерения в цепях постоянного тока, но и как выходные приборы в измерительных устройствах переменного тока, преобразующих сигналы переменного тока после их выпрямления или демодуляции в отсчет по постоянному току.

Таблица 2.1

Характеристики аналоговых электромеханических измерительных преобразователей

Разновидность ИП	Входные величины (1)	Род тока и частота	Уравнение преобразования при $МП=W\alpha(1)$	Наиболее существенные влияющие величины (4)	В каких приборах преимущественно применяются (5)	Максимальная чувствительность	Минимальный предел входной величины	Высший класс точности	Потребляемая при $\alpha 1$ мощность, Вт (6)
Электродинамический	I_1 и I_2	—	$\alpha = \frac{1}{W} \cdot \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} \cdot I_1 \cdot I_2$	t, f, M	А, В, Вт, Ф, Сч	0,15x10 ³ рад/А	1x10 ⁻² А	0,1	0,1
Ферродинамический	I	$\approx$	$\alpha = \frac{1}{W} \cdot \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} \cdot I^2$						
	I_1 и I_2	$\sim$ (2)	$\alpha = \frac{1}{W} \cdot \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} \cdot I_1 \cdot I_2 \cos \varphi$	t, f	Вт, Лог	0,3x10 ³ рад/А	5x10 ⁻³ А	0,5	0,025
Магнитоэлектрический	I	—	$\alpha = \frac{1}{W} \cdot \frac{d\Psi_M}{d\alpha} \cdot I$	t	А, В, Лог, Ом	1,5x10 ⁷ рад/А	1x10 ⁻⁷ А	0,1	10 ⁻⁹
Индукционный (многопоточный)	I_1 и I_2	$\sim$ 50 Гц	$\alpha = \frac{K}{W} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \sin \Psi(3)$	t, f	Сч	—	—	0,5	0,8
Электромагнитный	I	$\approx$ 40 Гц ÷ ÷ 8 кГц	$\alpha = \frac{1}{2W} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2$	t, f, M	А, В, Лог	0,15x x10 ³ рад/А	1x10 ⁻² А	0,2	0,1
Электростатический	U	$\approx$ 20 Гц ÷ ÷ 30 МГц	$\alpha = \frac{1}{2W} \cdot \frac{dC}{d\alpha} \cdot U^2$	$t, \mathcal{E}$	В	0,15 рад/В	10 В	0,05	Активной мощности практически не потребляет

Примечания: 1) в формулах для переменного тока: I, U — действующие значения, ψ — угол между I_1 и I_2 ; 2) диапазон частот: для электродинамического 40 Гц ÷ 20 кГц, для ферродинамического 10 Гц ÷ 1,5 кГц; 3) формула дана для случая, когда потоки от токов I_1 и I_2 совпадают с ними по фазе;

4) влияющие величины: t — температура, f — частота, M — магнитное поле, $\mathcal{E}$ — электрическое поле; 5) приборы: А — амперметры, В — вольтметры, Вт — ваттметры, Ф — фазометры, Сч — счетчики, Лог — логометры, Ом — омметры; 6) $\alpha 1$ — полное отклонение.

Общий вид современного магнитоэлектрического прибора узкопрофильного исполнения представлен на рис. 2.2.

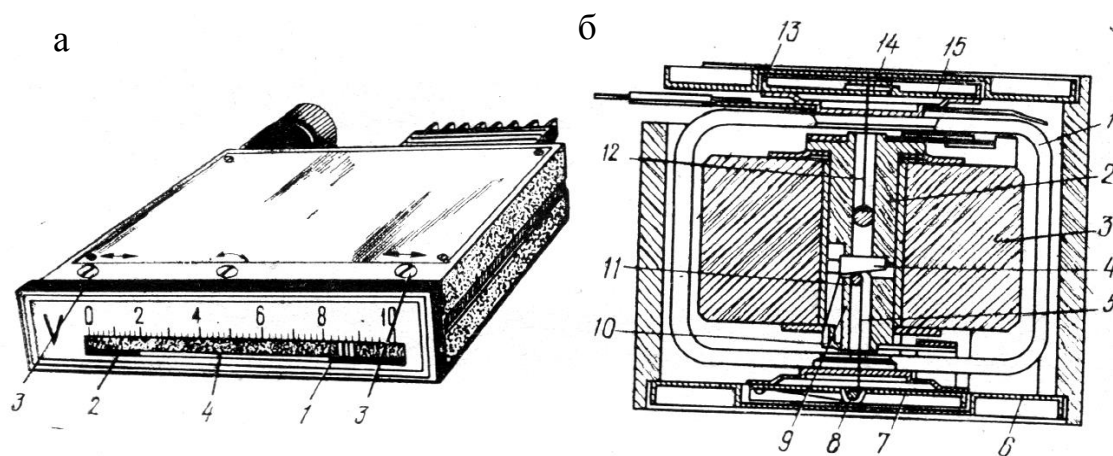


Рис. 2.2. Магнитоэлектрический прибор узкопрофильного исполнения

Внешний вид прибора представлен на рис. 2.2а. Сигнализирующие приборы снабжены двумя цветными светофильтрами-шторками 1 и 2 (слева зеленый, справа – красный), которые перемещаются с помощью винтов 3. Перемещение светофильтров осуществляется через прозрачную щель 4.

Крепление подвижной рамки 1 осуществляется на внутрирамочных растяжках 12 и 5 (рис. 2.2б). Внутри рамки помещен внутрирамочный магнит 3, в центральное отверстие которого вставлена цилиндрическая втулка 2, изготовленная из изоляционного материала. Растяжки пропущены через втулку с обеих сторон, огибают штифты 11 (на рис. 2.2б показан только один штифт), закрепляются клиньями 4, выводятся через фиксирующее их положение продольные радиальные канавки 9 и припаиваются к токоподводам 10. Внешние участки растяжек пропущены через отверстия рамки, огибают штифты 8 и 14 и прикрепляются к периферийным участкам плоских тарельчатых натяжных пружин 15 и 7, установленных на торцевых сторонах подвижной рамки. Необходимое натяжение растяжек во время сборки осуществляется использованием несложного приспособления, имеющего рычаги и грузы, с помощью которых натяжные пружины 15 и 7 одновременно сжимаются, после чего к ним прикрепляются растяжки.

Механизм закрыт крышками 6, в которые входят с небольшим зазором свободно вращающиеся тарельчатые держатели 13. Этим осуществляется ограничение осевых и радиальных смещений подвижной части и обеспечивается защита механизма от механических повреждений и загрязнений. В корпус прибора помещена оптическая система для производства светового отсчета с помощью зеркала, укрепленного на подвижной части прибора, в нем же размещены элементы измерительной цепи.

Погрешность технических магнитоэлектрических миллиампервольтметров может достигать до $\pm (0,1 \div 0,2) \%$. Это объясняется рядом причин. Наличие равномерной шкалы уменьшает погрешность градуировки и отсчета. Благодаря сильному собственному магнитному полю (порядка $0,2 \div 0,3$ Тл) влияние посторонних полей на показания приборов весьма незначительно. Погрешности из-за изменения магнитного потока и удельного противодействующего момента под действием температуры отчасти взаимно компенсируются. Кроме того, используются специальные измерительные цепи температурной коррекции. Следует отметить их сравнительную простоту, надежность и низкую стоимость.

В работе [5] приведены технические характеристики некоторых аналоговых и цифровых приборов современных производителей для измерения токов, напряжений, мощности, в них наиболее часто используются магнитоэлектрические системы измерений.

В табл. 2.2 приведены области применения различных приборов, работающих в цепях постоянного и переменного тока. В ней прямоугольниками из сплошных и пунктирных линий отмечены диапазоны, соответственно, постоянного и переменного тока, измеряемые приборами; числа в пунктирных прямоугольниках – частотный диапазон; линии от прямоугольников указывают на возможность расширения пределов измерения с помощью ДР – добавочных резисторов; Ш – шунтов; ТТ – трансформаторов тока; ТН – трансформаторов напряжения; ДН – делителей напряжения.

Таблица 2.2

Области применения различных приборов для измерений напряжений и токов

Разновидность прибора и наивысший класс точности	Измеряемая величина											
	напряжение, В						ток, А					
	$10^{-6} \div 10^{-3}$		$10^{-3} \div 1$		$1 \div 10^3$		$10^{-6} \div 10^{-3}$		$10^{-3} \div 1$		$1 \div 10^3$	
Магнитоэлектрический 0,1						ДР						
Электродинамический 0,1												
Ферродинамический 0,5						ДР и ТН						
Электромагнитный 0,2						ТН и ДР						
Электростатический 0,05												
Тепловой 2,5												
Термоэлектрический 1,0												
Выпрямительный 1,5												
Электронный 0,5												
Потенциометр постоянного тока 0,001						ДН						
Потенциометр переменного тока 0,1						ДН						
Цифровые $0,01 = I$; $0,001 = U$ $0,4 \sim I$; $0,1 \sim U$												

Как известно, особенностью измерений переменных токов и напряжений является измерение их информативных параметров в виде следующих вариантов:

- действующего значения: $x = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$;
- среднего значения: $x_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$;
- среднего выпрямленного значения: $x_{cp. вып} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt$,

а также амплитудных и мгновенных значений.

Поэтому следует учитывать разнообразие этих значений, хотя в основном СИ в цепях переменного тока градуируются в действующих значениях для синусоидальной формы кривых тока или напряжения.

Электронные вольтметры постоянного тока можно представить упрощенной структурной схемой, представленной на рис. 2.3, в которой последовательно соединены делитель напряжения ДН, усилитель постоянного тока УПТ и магнитоэлектрический прибор МЭП. ДН обеспечивает многопредельное измерение напряжения постоянного тока в широком диапазоне его значений, особенно в сочетании с УПТ. Последний обладает малыми и нестабильными коэффициентами преобразования и дрейфом нуля, поэтому в современных, в том числе универсальных, вольтметрах (для постоянного и переменного тока) применяются усилители постоянного тока, использующие модуляторы, усилители переменного тока и демодуляторы (МДМ-усилители) [4].



Рис. 2.3. Структурная схема электронного вольтметра постоянного тока

Электронные вольтметры переменного тока так же имеют в упрощенном виде такую же структурную схему, как электронные вольтметры по-

стоянного тока. Причем в одном варианте используется преобразование переменного напряжения в постоянное, и далее оно преобразуется в выходной сигнал аналогично тому, как в вольтметрах постоянного напряжения. В другом варианте применяют после делителя напряжения (ДН) (см. рис. 2.3) предварительный усилитель переменного тока перед усилителем постоянного тока (УПТ), который позволяет обеспечить высокую чувствительность, но сравнительно узкий частотный диапазон измеряемых напряжений (от 40 Гц до 5 МГц).

Среди потенциометров наибольшее применение для измерения напряжений имеют потенциометры постоянного напряжения, которые широко используются в комплекте с датчиками, выходным сигналом которых является напряжение постоянного тока (термоэлектрические датчики-термометры, пьезоэлектрические датчики давления и др.).

В потенциометрах (или компенсаторах) постоянного тока, так же как и в потенциометрах переменного тока [4], используются ручной и автоматический режимы.

Принципиальная схема ручного потенциометра представлена на рис. 2.4 и соответствует переносному потенциометру типа ПП.

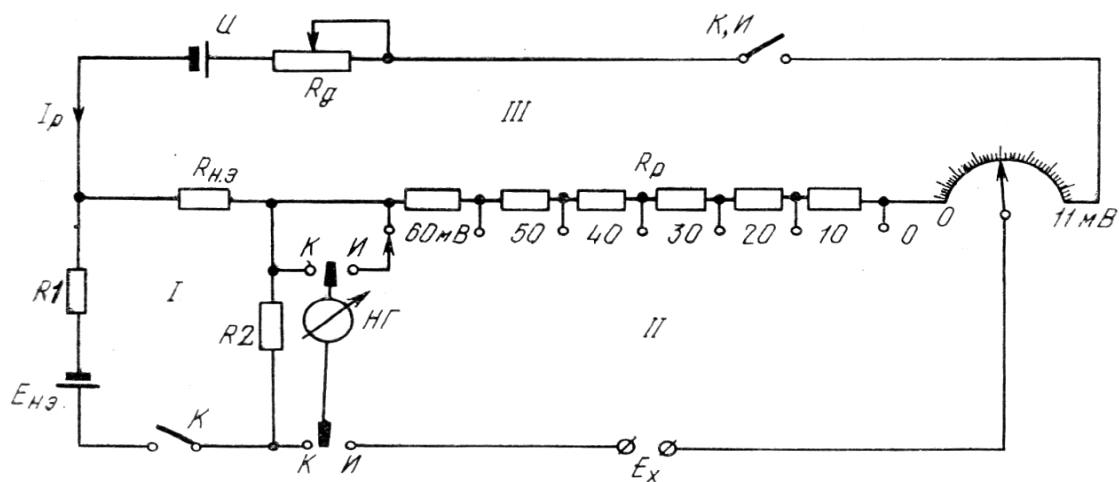


Рис. 2.4. Принципиальная схема ручного потенциометра

На первом этапе в положении ключей К нуль-гальванометр НГ подключают к цепи I. Изменением значения R_d добиваются установки гальванометра на нуль. При этом

$$E_{HЭ} = R_{HЭ} \times I_p, \quad (2.2)$$

где $E_{HЭ}$ – ЭДС образцовой меры – нормального элемента.

Сопротивления R_1 и R_2 служат для ограничения тока, протекающего по нормальному элементу, создающему опорное напряжение $E_{HЭ}$, при установке рабочего тока. Таким образом, на первом этапе при установке рабочего тока I_p , протекающего по цепи III, устанавливается его расчетное значение. Расчетное значение тока выбирается таким, чтобы падение напряжения на сопротивлениях реохорда R_p было равно значениям, приведенным в схеме (см. рис.2.4).

На втором этапе измеряют U_x . Ключи перебрасываются в положение И, и нуль-гальванометр подключается к цепи II. С помощью секционного ступенчатого изменения сопротивления реохорда (падение напряжения на котором соответствует ступеням по 10 мВ) и плавного изменения сопротивления (падение напряжения на нем составляет 11 мВ) осуществляется уравновешивание U_x . Текущее значение измеряемого напряжения составляет

$$U_x = R_p I_p,$$

или с учетом (2.2)

$$U_x = \frac{R_p}{R_{HЭ}} \times E_{HЭ}. \quad (2.3)$$

Выражение (2.3) подтверждает возможность получения в потенциометрах высокой точности измерения. Действительно, если учесть,

что на современном уровне развития измерительной техники порог чувствительности обычных нуль-гальванометров магнитоэлектрической системы составляет $10^{-8} \div 10^{-9}$ А на 1 деление, то погрешность измерения определяется согласно (2.3) из выражения

$$\delta_{U_X} = \delta_{R_P} - \delta_{R_{HЭ}} - \delta_{E_{HЭ}}. \quad (2.4)$$

Из чего следует, что δ_{U_X} зависит от погрешностей изготовления сопротивлений R_P , $R_{HЭ}$ и нормального элемента $E_{HЭ}$. Все три составляющие достаточно малы, поскольку погрешность манганиновых специально составленных сопротивлений составляет $\pm (0,01 + 0,001) \%$, а $\delta_{E_{HЭ}} = \pm 0,05 \%$. Кроме того, в момент компенсации в I и II цепях токи равны нулю, т.е. не потребляется ток ни от нормального элемента, ни от измерительной цепи.

Структурная схема автоматического потенциометра постоянного тока, используемого для работы с термоэлектрическими термометрами (ТТ), представлена на рис. 2.5. Измеряемое напряжение постоянного тока U_X и разбалансное напряжение неравновесной мостовой измерительной цепи (НМИЦ) ΔU_P в противофазе поступают в устройство преобразования недокомпенсации (УПН) (или электронный нуль-индикатор (ЭНИ)), которое состоит из модулятора (М), преобразующего разницу постоянных напряжений $\Delta U = U_X - \Delta U_P$ в напряжение переменного тока (с $f = 50; 400; 800$ Гц). Напряжение ΔU усиливается усилителем переменного тока (УПТ), в состав которого входит фазочувствительный каскад усиления мощности. Напряжение воздействует на реверсивный двигатель, обеспечивая знаочувствительное ($\pm \Delta U$) перемещение движка реохорда, соединенного с реверсивным двигателем (РД), чем достигается уравнивание $\pm \Delta U = 0$ до порога чувствительности УПН. Этот порог чувствительности зависит от коэффициента усиления УПТ и уровня помех, которые появляются на входе УПН. При

достаточной фильтрации этих помех и значительном коэффициенте усиления УПТ погрешность таких потенциометров составляет $(0,1 - 0,25) \%$ [8].

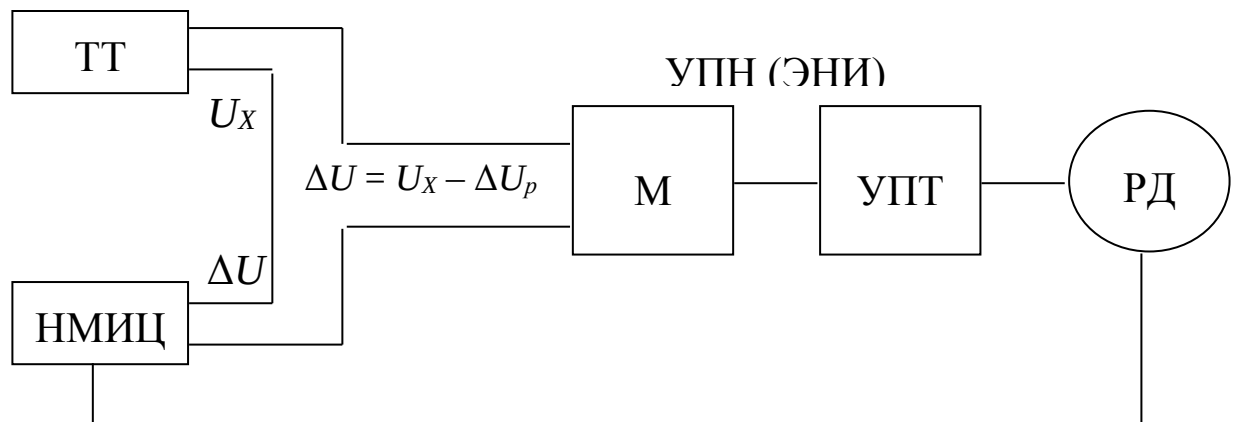


Рис. 2.5. Структурная схема автоматического потенциометра постоянного тока

Цифровые приборы для измерения напряжения* в основном базируются на поразрядном уравнивании или использовании генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН), иначе – устройство время-импульсного преобразования. Структурная схема цифрового вольтметра для измерения напряжения постоянного тока с ГЛИН приведена на рис. 2.6.

На вход сравнивающего устройства (СУ) подается измеряемое напряжение U_X и уравнивающее напряжение $U_{ур}$ от специального источника уравнивающего напряжения. Таким источником является ГЛИН (рис. 2.6а). Блок управления (БУ) периодически запускает генератор линейно изменяющегося напряжения, одновременно открывая ключ К. В моменты равенства напряжений U_X и $U_{ур}$ сравнивающее устройство, воздействуя на ключ, закрывает его.

* Цифровые приборы имеют широчайшее распространение не только для измерения напряжений и токов, но и для преобразования частота–цифра (код) или интервал (период)–цифра (код), их адекватное название АЦП. Они используются в ИИС, ИВК, АСУТП и других системах [2].

Таким образом, измеряемое напряжение оказывается преобразованным в интервал времени Δt_x между началом периода линейно изменяющегося напряжения $U_{ур}$ и моментом равенства напряжений $U_{ур}$ и U_x , т.е. $U_x = S\Delta t_x$, где S -чувствительность, или крутизна изменения во времени уравнивающего напряжения $U_{ур}$, т.е. $S = U_N/T_N$ (рис. 2.6б).

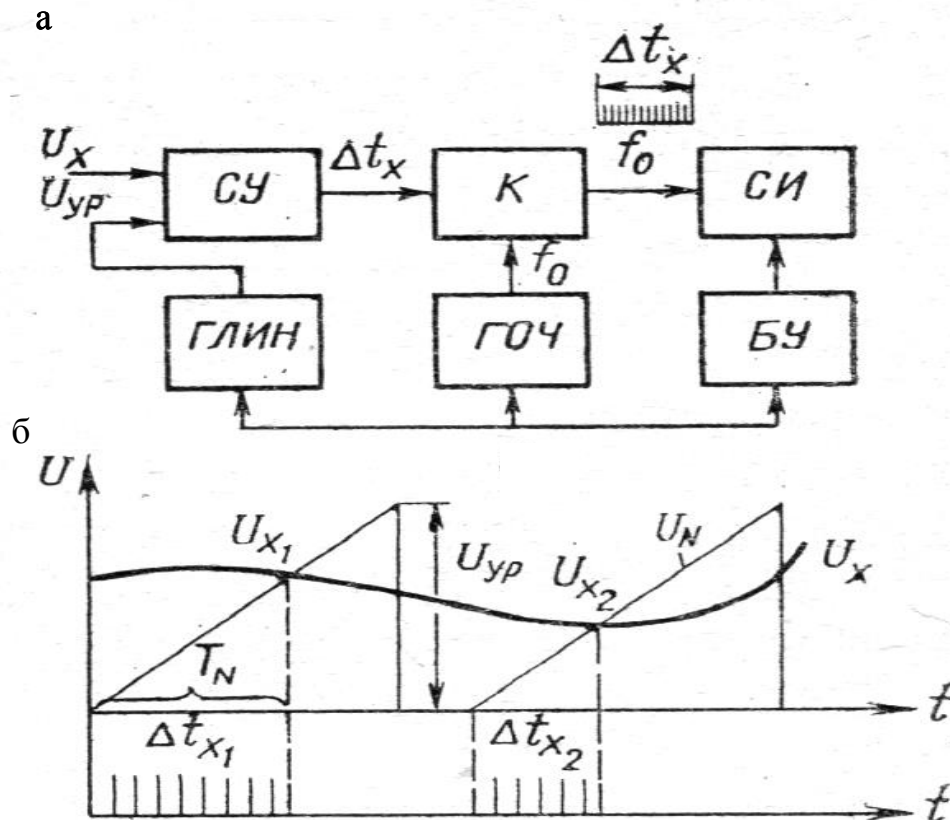


Рис. 2.6. Схема цифрового вольтметра

Поскольку электронный ключ K пропускает к счетчику импульсов СИ импульсы от генератора образцовой частоты ГОЧ только в течение времени, равного Δt_x , то число импульсов $N = f_0 \Delta t_x$, сосчитанных счетчиком, оказывается пропорциональным величине U_x :

$$N = \frac{f_0 \times T_N}{U_N} \times U_x. \quad (2.5)$$

Цифровые вольтметры постоянного тока также можно использовать для измерения сопротивлений при известном токе, проходящем через измеряемое сопротивление.

3. Средства измерений мощности и энергии

В настоящее время в промышленности и быту производят измерения мощности и энергии в очень широких пределах. Измерения осуществляют в цепях как постоянного, так и переменного однофазного и трехфазного токов, для последних получая информацию об активной и реактивной их составляющих. Так, мощность постоянного и однофазного переменного тока измеряют в диапазоне от 10^{-18} Вт в радиотехнических устройствах высокой частоты и до 10^{10} Вт у крупных потребителей электроэнергии. Требуемая погрешность измерения мощности постоянного и переменного тока для постоянного и переменного однофазного и трехфазного тока промышленной частоты находится в пределах $\delta = \pm(0,01 \div 0,1) \%$; а при сверхвысоких частотах до $\delta = \pm(1 \div 5) \%$.

Измерение реактивной мощности имеет практическое значение лишь у крупных потребителей электроэнергии, которые всегда используют трехфазный переменный ток: пределы измерений от 3-10 вар до 10^6 вар, погрешность приборов $\delta = \pm (0,1 \div 0,5) \%$.

Для измерения мощности в цепях постоянного и переменного однофазного тока применяются в основном электродинамические и ферродинамические ваттметры. Основные характеристики электродинамических и ферродинамических измерительных преобразователей приведены в разделе 2 (см. табл. 2.1). Для точных измерений мощности постоянного и переменного токов на промышленной и повышенной частоте (до 5000 Гц) выпускают электродинамические ваттметры в виде переносных приборов классов точности $0,1 \div 0,5$.

Для измерения мощности в производственных условиях в цепях переменного тока промышленной или более высоких фиксированных частот (400, 500 Гц) применяются щитовые ферродинамические ваттметры классов точности 1,5 ÷ 2,5. Для измерений мощности на высоких частотах применяются термоэлектрические и электронные ваттметры.

Диапазон измерения электрической энергии определяется диапазонами изменения номинальных токов и напряжений. Нижний предел диапазона измерения энергии, потребляемой различными электротехническими устройствами, соответствует значениям токов примерно 10^{-9} А и напряжения – 10^{-6} В. Однако средств измерений для непосредственного измерения таких малых энергий не существует, а малые значения энергии определяются косвенными методами (например, определяются мощность и время). Верхний предел диапазона измерения энергии достигает при токовых нагрузках порядка 10^4 А и напряжении – 10^6 В. Погрешность измерения энергии составляет $\delta = \pm (0,1 \div 2,5) \%$.

Измерение реактивной энергии необходимо только в промышленных трехфазных цепях. Поэтому нижний предел диапазона измерения в этом случае находится на уровне тока 1 А, а напряжения – 100 В, а верхний – по току до 50 А, напряжений до 380 В. Погрешность измерения реактивной энергии составляет $\delta = \pm (1 \div 2,5)\%$.

Измерение энергии постоянного тока осуществляется с помощью счетчиков постоянного тока. Энергия однофазного переменного тока измеряется индукционными счетчиками электрической энергии (см. табл. 2.1). Электрическую энергию также измеряют с помощью электронных счетчиков электрической энергии, не имеющих подвижных частей. Такие счетчики обладают лучшими метрологическими характеристиками и могут использоваться в трехфазных цепях [4].

4. Средства измерений частоты и временных интервалов

В производственной практике и научных исследованиях часто возникает необходимость измерения частоты и временных интервалов. Диапазон частот периодических сигналов, используемых в различных областях науки и техники, очень широк: от долей герца до десятков гигагерц. Весь спектр частот электромагнитных колебаний подразделяется на два диапазона: низких и высоких частот. К низким частотам относят инфразвуковые (ниже 20 Гц), звуковые (20 ÷ 20000 Гц) и ультразвуковые (20 ÷ 200 кГц). Высоко-частотный диапазон, в свою очередь, подразделяется на высокие частоты (200 кГц ÷ 30 МГц), ультравысокие (30 ÷ 300 МГц) и сверхвысокие (свыше 300 МГц).

Измерение частоты, по сравнению с измерениями других физических величин, возможно с очень большой точностью, которая обеспечивается лучшими метрологическими свойствами эталонов времени, высокой помехозащищенностью частотного сигнала и возможностью преобразования частоты с большой точностью в цифровой сигнал.

Измерение временного интервала отличается многообразием информативных параметров этой физической величины: период синусоидальных колебаний, период следования импульсов, интервал между импульсами, длительность импульса и т.п. Диапазон размеров измеряемых временных интервалов очень широк: от долей микросекунды до десятков часов и более. В некоторых случаях частота и время связаны между собой обратно пропорциональной зависимостью и могут быть измерены с одинаковой точностью. Предельная точность измерений временных интервалов и частоты определяется точностью государственного первичного эталона, обеспечивающего воспроизведение единиц времени со средним квадратическим отклонением результата измерения в относительных единицах 10^{-14} .

Погрешность измерения частоты и временных интервалов колеблется в широком диапазоне, в зависимости от требований практики, от десятых процента до почти погрешности эталонов ($\sim 10^{-12}$ относительных единиц). Это объясняется также и тем, что частота и отрезок времени являются удобными физическими величинами для преобразования их в дискретные цифровые информационно-измерительные сигналы. Это их свойство широко используется в выходных сигналах разнообразных датчиков физических величин и в электронной части ИИС. К тому же эти сигналы, как указано выше, обладают лучшим метрологическим обеспечением, помехозащищенностью, большей пропускной способностью интерфейсных устройств и малыми погрешностями.

Для измерения частоты используются приборы прямого преобразования: электродинамические и электромагнитные частотомеры (см. табл. 2.1.), в них используют частотнозависимые цепи в сочетании с электромеханическими измерительными преобразователями.

Наибольшую популярность для измерения частоты и периода приобрели в настоящее время цифровые электронные частотомеры (периодомеры)*, упрощенная структурная схема которых приведена на рис. 4.1. Цифровой частотомер, реализующий косвенный метод измерений частоты, представляет собой счетчик импульсов напряжения f_x , поступающих на вход прибора за точный интервал времени T_0 (часто $T_0 = 1$ с). Он состоит из пяти блоков. Формирующее устройство (ФУ) преобразует импульсы входного напряжения по величине и форме в такие, которые удобны для воздействия на счетчик (С) импульсов. Формирующее устройство включает масштабирующий преобразователь, усилитель, ограничитель, дифференциатор.

* Частотомеры отличаются от периодометров тем, что в последних ключ (К) открывается и закрывается под воздействием начального и конечного фронтов входного сигнала, соответствующего измеряемому периоду, а на счетчик (С) за этот интервал времени поступают импульсы образцовой частоты f_0 от генератора образцовой частоты (ГОЧ), а не времени (ГОВ).

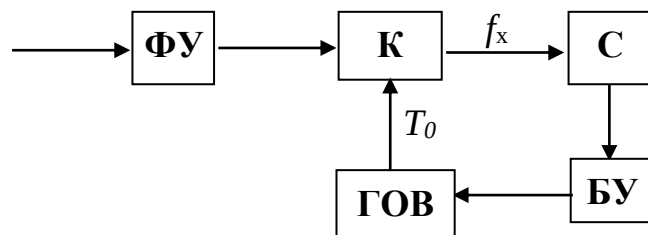


Рис. 4.1. Упрощенная структурная схема цифрового частотомера

После преобразования входной сигнал поступает на ключ (К), пропускающий последовательность импульсов к счетчику (С) только в течение строго определенного интервала времени T_0 , на которое ключ открывает блок генератора образцового времени (ГОВ). Для управления последовательностью операций при счете импульсов в частотомере используется блок управления (БУ).

Число входных импульсов N , сосчитанное счетчиком импульсов С, за время T_0 , заданное ГОВ, на которое открыт ключ К, управляемый блоком управления БУ, составляет

$$N = T_0 \times f_x. \quad (4.1)$$

Из зависимости (4.1) следует, что погрешность измерения числа импульсов N определяется погрешностью нестабильности образцового интервала времени T_0 и погрешностью дискретности счета за время T_0 . Первая составляющая зависит от погрешности ГОВ и оценивается величиной $\delta_r = \pm(10^{-5}-10^{-6})$, а погрешность дискретности равна $\Delta_d = \pm 1$ знак отсчета или в относительном выражении с учетом (4.1)

$$\delta_d = \frac{1}{N} = \frac{1}{T_0 \times f_x}. \quad (4.2)$$

Поэтому погрешность частотомера

$$\delta = \frac{1}{T_0 \times f_x} + \delta_G. \quad (4.3)$$

При измерении низких частот с помощью цифровых частотомеров могут получаться значительные погрешности. Например, при $f_x = 50$ Гц и $T_0 = 1$ с погрешность дискретности составляет $\delta_D = \pm 2$ %. Поэтому

– либо время измерения такой частоты увеличивают, если она за это время неизменна, т.е. производят обмен быстродействия на точность, например, если $T_0 = 10$ с, то $\delta_D = \pm 0,2$ %;

– либо ее определяют путем измерения периода $T_x = \frac{1}{f_x}$, например, при $f_x = 50$ Гц, $T_x = 20000$ мкс и при $f_x = 1$ МГц, т.е. $T_0 = 1$ мкс, число импульсов 20000 будет измерено с $\delta_D = \frac{1}{20000} = \pm 0,005$ %.

Более подробно принцип действия цифровых частотомеров приведен в [8].

5. Средства измерений магнитных величин – магнитоизмерительные преобразователи

Как известно [3], измерения магнитных величин чрезвычайно разнообразны не только из-за видов магнитных полей (постоянного, переменного, импульсного), их различной интенсивности и пространственной направленности, но и тех многочисленных информативных параметров магнитных величин, которые подлежат определению в электромагнитных полях: магнитные потоки, индукция, напряженность магнитного поля, магнитный момент, магнитная проницаемость, намагниченность и ряд других.

Учитывая тот факт, что немагнитных веществ не существует, поскольку все вещества состоят из элементарных частиц, обладающих магнитным

моментом, круг магнитных явлений, которые используются в технике и подлежат определению, настолько многообразен, что изучение магнитной измерительной техники является сложной и специфической задачей.

В данном разделе кратко рассмотрены СИ, предназначенные для измерения наиболее распространенных в технике магнитных величин, а именно принципы действия некоторых магнитоизмерительных преобразователей (МИП).

Действительно, во все магнитные СИ, начиная с датчиков и кончая измерительными установками и системами, входят МИП, которые, как правило, состоят из двух преобразователей. Первичный измерительный преобразователь преобразует магнитную величину в физическую величину иного рода, удобную для дальнейших преобразований, вторичный измерительный преобразователь используется для получения удобного выходного измерительного сигнала, часто унифицированного (стандартизованного).

В первичных МИП используются различные физические явления: электромагнитные взаимодействия, гальваномагнитные явления, взаимодействия магнитного поля с полем постоянного магнита или контура с током, взаимодействия микрочастиц с магнитным полем, изменения магнитных свойств материалов в магнитном поле, явления сверхпроводимости.

Наибольшее распространение получили следующие МИП:

1. Индукционные и сверхпроводниковые преобразователи, основанные на действии закона электромагнитной индукции, к ним относятся собственно индукционные и ферроиндукционные преобразователи, разновидностью последних являются феррозонды.

Индукционный преобразователь представляет собой катушку, витки которой сцепляются с измеряемым магнитным потоком Φ . При изменении потока Φ в катушке с числом витков W_k возникает ЭДС E , в соответствии с выражением:

$$E = -W_k \frac{d\Phi}{dt}. \quad (5.1)$$

Из выражения (5.1) следует, что с помощью катушки величина магнитного потока Φ может быть преобразована в электрическое напряжение E . Индукционный преобразователь с известной постоянной, определяемой как сумма площадей поперечных сечений всех витков обмотки, называется измерительной катушкой. Измерительная катушка должна иметь такие форму и размеры и быть так расположена, чтобы с ее витками сцеплялся лишь тот поток, который подлежит измерению. Плоскость ее должна быть расположена перпендикулярно вектору магнитной индукции или напряженности магнитного поля. Если поле в пространстве, охватываемом катушкой, однородно и ось катушки совпадает с направлением векторов магнитной индукции B и напряженности магнитного поля H , то выражение (5.1) можно представить в виде:

$$E = -W_k \frac{d\Phi}{dt} = -W_k S_k \frac{dB}{dt} = -\mu_0 W_k S_k \frac{dH}{dt}, \quad (5.2)$$

где W_k – постоянная измерительной катушки; S_k – площадь катушки; μ_0 – магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

Из выражения (5.2) следует, что индукционный преобразователь может быть использован также для измерения магнитной индукции и напряженности магнитного поля. Если измерительная катушка предназначена для измерения магнитной индукции в изделии, изготовленном из испытуемого магнитного материала, то витки ее должны охватывать это изделие и плотно прилегать к его поверхности. Этот преобразователь в виде измерительной катушки может быть использован для измерения параметров как переменного, так и постоянного магнитных полей.

В сверхпроводниковых преобразователях под действием критической температуры сердечник, выполненный из специального металла, например, ниобия, переходит в сверхпроводящее состояние, а в контуре, его охватывающем, возникает ЭДС, пропорциональная значению индукции измеряемого поля.

2. Механические и квантовые преобразователи основаны на силовом взаимодействии с измеряемым полем тел или частиц, обладающих магнитным моментом. Они содержат в качестве чувствительного элемента магниты или контуры с током (реже), поворачивающиеся под влиянием магнитного поля на определенный угол. Пассивные механические преобразователи представляют собой свободно поворачивающиеся магнитные стрелки и применяются для определения направления вектора магнитной индукции или значений его составляющих. Такими, например, являются магнитные компасы, которые применяются человечеством уже несколько веков.

Квантовые преобразователи основаны на использовании магнитных резонансов, которые могут быть получены во всех типах магнитного состояния вещества (диамагнетиках, парамагнетиках, ферри- и ферромагнетиках, антиферромагнетиках) при воздействии на них двух полей: постоянного магнитного поля B и электромагнитного поля H с частотой ω . Физические процессы, происходящие при этом, обусловлены атомным магнетизмом (магнитными свойствами изолированных частиц) или магнетизмом вещества в целом (магнитными свойствами групп атомов и молекул), т.е. наличием у них магнитных моментов μ и связанных с ними механических моментов количества движения ρ (спинами). Под действием постоянного магнитного поля магнитные моменты начинают медленно вращаться вокруг направления этого поля с так называемой частотой прецессии ω_0 . Это периодическое стационарное движение квантовано, т.е. угол между плоскостями орбит и направлением поля принимает дискретные значения.

Если на вещество дополнительно воздействовать электромагнитным полем H , направленным перпендикулярно B , то при совпадении частоты переменного поля ω с частотой прецессии ω_0 происходит поглощение веществом электромагнитной энергии – магнитный резонанс, т.е. нарушается равновесное состояние системы. В зависимости от того, с магнитным моментом какой частицы (ядра, электрона, атома) взаимодействует поле H , выделяют три основные группы квантовых преобразователей: электронно-прецессионные, основанные на парамагнитном электронном резонансе; ядерно-прецессионные, использующие явление ядерного магнитного резонанса; атомно-прецессионные, работающие на базе оптической ориентации атомов.

3. Гальваномагнитные преобразователи основаны на сочетании двух ранее отмеченных принципов действия: силовом – в них происходит искривление траектории заряженных частиц под воздействием силы Лоренца, и индукционном. К гальваномагнитным преобразователям относятся:

- магниторезистивные преобразователи, с использованием изменения внутреннего сопротивления (проводимости) преобразователя под действием магнитного поля, т.е. эффекта Гаусса [2];

- преобразователи Холла, основанные на эффекте Холла, выходной величиной которых является электродвижущая сила при наличии электрического тока и внешнего магнитного поля, приложенных определенным образом. Эффект Холла и эффект изменения сопротивления сопутствуют друг другу и имеют место в обеих перечисленных группах преобразователей, но в каждой группе один из них преобладает.

К *магниторезистивным преобразователям* относятся магниторезисторы, магнитодиоды, биполярные магнитотриоды, гальваномагниторекомбинационные преобразователи. Магниторезисторы (магнитосопротивления), основанные на эффекте Гаусса, изменяют свое электрическое сопротивление R под действием магнитного поля B в соответствии с зависимостью:

$$\frac{\Delta R}{R} = AB^m, \quad (5.3)$$

где A – коэффициент, зависящий от свойств материала преобразователя и его конструкции. Изменение сопротивления не связано с направлением (поляризованностью) поля. Эта зависимость в общем виде нелинейная: в слабых полях с магнитной индукцией, $B \leq 0,3$ Тл, $m \approx 2$. А в сильных полях, при $B > 0,3$ Тл, значение $m = 1$, и выходная характеристика линейна. Это обстоятельство обусловило применение магниторезисторов для измерения сильных магнитных полей. Обычно они включаются в мостовые схемы.

Преобразователи Холла (ПХ) основаны на гальваномагнитных явлениях, т.е. эффекте Холла, который возникает в тонкой полупроводниковой пластинке (или пленке), если по последней пропускают ток, а она находится в магнитном поле, направленном перпендикулярно к ее поверхности (рис. 5.1), тогда носители зарядов отклоняются из-за действия силы Лоренца, равной

$$E_X = evB, \quad (5.4)$$

где e – заряд носителя тока, движущегося со скоростью v перпендикулярно магнитному потоку с индукцией B . В результате на одной боковой стороне пластины количество зарядов увеличивается, а на другой – уменьшается, что создает разность потенциалов – ЭДС Холла E_X .

Для равномерности плотности тока по ширине пластины токовые электроды располагаются равномерно по ширине пластины (на рис. 5.1 не показано). Электроды имеют форму квадрата со стороной «а» и для снятия E_X привариваются (см. рис. 5.1) по эквипотенциальным линиям в середине пластины с тем, чтобы при отсутствии магнитного поля $E_X = 0$.

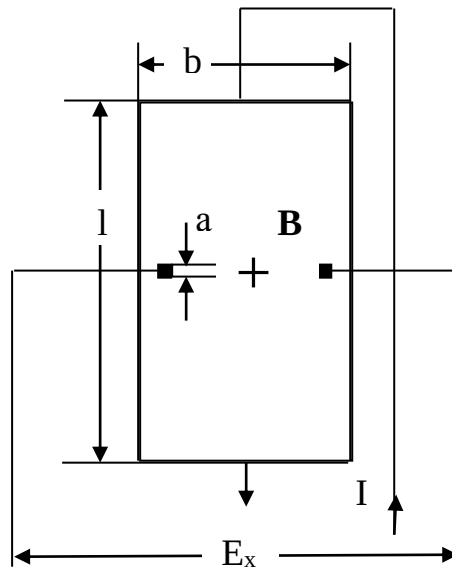


Рис. 5.1. Схема преобразователя Холла

Тогда

$$E_x = \frac{R_{хол}}{d} \cdot I \cdot B \cdot \cos \alpha, \quad (5.5)$$

где $R_{хол}$ – постоянная Холла, зависящая от свойств материала пластины; d – толщина пластины; I – сила тока; B – магнитная индукция (перпендикулярно площади рис. 5.1); α – угол между вектором магнитного поля и осью пластины, близко совпадающей с нормалью к ее плоскости.

По (5.5) видно, что E_x однозначно определяется значением магнитной индукции B , для измерения которой в основном* и применяются эти преобразователи. Последние, в сочетании со вторичными измерительными преобразователями, в которых E_x преобразуется в выходное напряжение, получили название датчиков Холла (ДХ).

Основные полупроводниковые материалы, из которых изготавливаются серийные ДХ, это арсенид индия InAs, антимонид индия InSb или арсенид галлия GaAs. Делаются также ДХ из германия и кремния. Они выпол-

* Из этой зависимости следует, что преобразователи Холла часто используются для перемножения двух величин I и B (или величин, в них преобразованных).

няются в виде тонких пластин или пленок на подложках из слюды, ультрафарфора или стекла. Толщина d этих пленок составляет от 10 мкм до 200 мкм.

Размеры l (длина) и b (ширина) поверхностей ДХ составляют единицы миллиметров.

К основным характеристикам ДХ относятся:

Гальванометрическая чувствительность ДХ при $\alpha = 0$ из выражения (5.5) равна

$$S_{BI} = \frac{R_{хол}}{d},$$

что для разных типов ДХ составляет $(0,3 \div 10)$ В/(АТл).

Чувствительность ДХ к магнитной индукции при $I_{ном} = \text{const}$ ($I_{ном}$ от 50 до 200 мА) равна $S_B = R_{хол} \times I_{ном} / d$ и составляет примерно $(0,03 \div 1)$ В/Тл.

Чувствительность к току определяется при индукции $B = 1$ Тл как $S_I = R_{хол} \frac{B}{d}$ и находится в пределах $(0,3 \div 50)$ В/А.

Остаточное напряжение $E_{Х0}$ при $B = 0$ связано с неточным расположением холловских электродов по эквипотенциальным линиям и наличием термо ЭДС. Оно может достигать при градиенте температуры между холловскими электродами $0,1$ °С от 10 мкВ до 100 мкВ. В паспорте ДХ указываются значения $E_{Х0}$ и меры, принятые для его уменьшения.

Метрологические свойства ДХ, особенно его погрешности, объясняются рядом причин:

во-первых, погрешности ДХ связаны с нестабильностью тока, пропускаемого через пластину, для уменьшения влияния которой требуется его стабилизация;

во-вторых, наличие собственного магнитного поля порождает погрешность из-за его влияния на измеряемое поле B . Конструктивно уменьшение этой составляющей погрешности обеспечивается созданием такого витка подводящих ток проводов, чтобы он имел минимальную площадь и специальное расположение;

в-третьих, погрешность от наличия E_{xo} (аддитивная составляющая) устраняется с помощью регулируемого делителя напряжения;

в-четвертых, у ДХ проявляется нелинейность функции преобразования при воздействии сильных магнитных полей, так как S_{BI} зависит от магнитной индукции. Методом коррекции является линеаризация этой функции;

в-пятых, температурная погрешность ДХ, вызываемая самонагревом, внешней температурой окружающей среды, термоЭДС, эффектом Пельтье, уменьшается специальными способами.

Динамическая погрешность ДХ определяется временем установления $E_{хол}$ при ступенчатом изменении магнитного поля или тока. Это время составляет от 10^{-11} до 10^{-13} с. Поэтому ДХ могут быть использованы и для измерения индукции в переменных магнитных полях, и для перемножения переменных токов и индукций.

Основная погрешность ДХ не превышает $\gamma = \pm (0,5 - 1) \%$. При использовании сложных методов коррекции перечисленных выше составляющих погрешностей ДХ их интегральное значение достигает погрешности $\gamma = \pm 0,2 \%$.

Так, на рис. 5.2 представлена примерная структурная схема СИ с преобразователем Холла, приведенном на рис. 5.1, например, предназначенного для измерения индукции магнитного поля, – тесламетра.

Блок питания (БП) обеспечивает питание датчика заданным в паспорте током I . Ток I может быть переменным, постоянным и импульсным. Выбор

рода тока определяется характером измеряемого поля (постоянное, переменное, импульсное) и его значением.

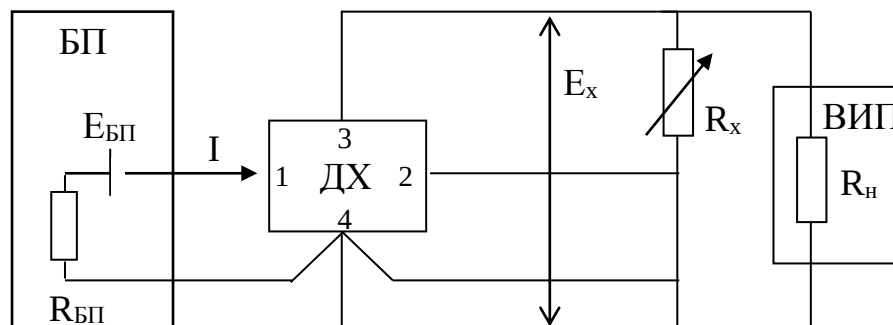


Рис.5.2. Структурная схема тесламетра

Постоянный управляющий ток чаще всего применяется при измерении сильных полей, когда E_x достигает значительного размера (десятки милливольт – единицы вольт). Переменный ток применяется при измерении средних и слабых полей (E_x от сотен микровольт до десятков милливольт) для повышения помехозащищенности и уменьшения влияния собственных шумов ДХ. Импульсный управляющий ток, больший по размеру постоянного, используется в целях увеличения чувствительности ДХ, так как при таком виде тока не происходит повышение рассеиваемой в пластине Холла мощности, и отсутствует ее перегрев даже при естественном охлаждении.

С выхода датчика Холла E_x поступает во вторичный измерительный преобразователь (ВИП), выходной сигнал которого измеряется милливольтметром, согласованным по входному сопротивлению с нагрузочным сопротивлением R_H ВИП. В этой схеме возможны два режима работы ДХ: режим заданного напряжения, когда входное сопротивление ДХ значительно больше выходного сопротивления БП, и режим заданного тока, в кото-

ром входное сопротивление ДХ значительно меньше сопротивления БП. Выбор режима диктуется мерами, принимаемыми для коррекции погрешностей ДХ.

Интерес представляет использование ДХ в качестве преобразователей больших токов в индукцию магнитных полей. Удобным способом преобразования сильных токов в индукцию является концентрация магнитного потока, окружающего проводник с измеряемым током с помощью магнитопровода (подобно как в токовых клещах), в зазоре которого помещается ДХ. Индукция в зазоре пропорциональна измеряемой силе тока, и она в виде выходной E_X определяет измеряемый размер этого тока. Подобные СИ с ДХ применяются, например, фирмой АВВ для измерения и регистрации больших постоянных токов [2].

6. Средства измерений магнитной индукции

Для измерения магнитной индукции (или напряженности магнитного поля) в малых постоянных и низкочастотных переменных магнитных полях используются ферромодуляционные тесламетры [4]. Эти приборы обладают высокой чувствительностью, достаточно высокой точностью измерения и результаты измерения выдают непрерывно, что обусловило их широкое распространение (в частности, для измерения магнитного поля Земли).

В них используются ферромодуляционные преобразователи (феррозонды), принцип работы которых основан на изменении магнитного состояния ферромагнитного сердечника при одновременном воздействии на него переменного и постоянного магнитных полей (либо двух переменных полей различных частот) и явления электромагнитной индукции. Наиболее рас-

пространенный тесламетр, основанный на дифференциальном ферро-модуляционном преобразователе (ФМП), представлен на рис. 6.1 [4].

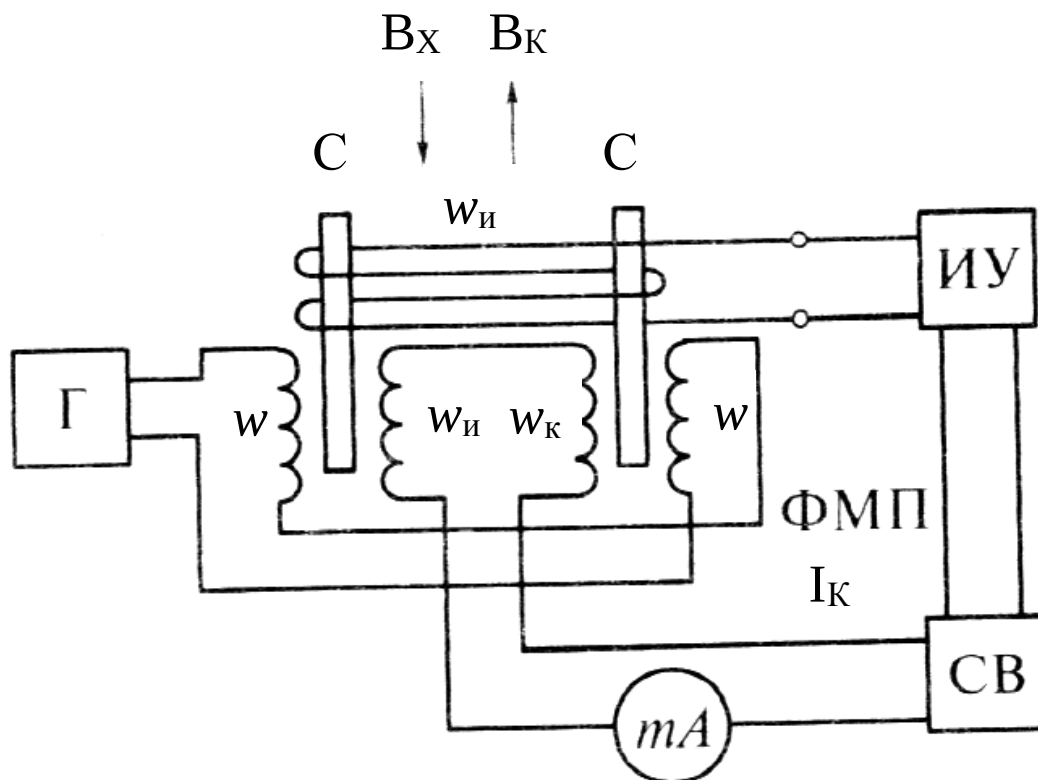


Рис.6.1. Схема дифференциального ферро-модуляционного тесламетра

Такой тесламетр состоит из двух идентичных по размерам и свойствам пермалловых сердечников (С) и одинаковых, включенных встречно, обмоток возбуждения w , которые питаются переменным током от генератора (Г). Оба сердечника охватывает индикаторная обмотка $w_{и}$. При отсутствии постоянного поля ЭДС на зажимах индикаторной обмотки равна нулю, так как потоки, создаваемые обмотками w , одинаковы и направлены встречно. Если на переменное поле (после возбуждения) наложить постоянное измеряемое поле B_x , вектор которого параллелен оси сердечника, то кривая переменной составляющей индукции B_k станет несимметричной относительно оси времени, т.е. в составе этой кривой, наряду с нечетными, появятся четные гармоники, причем степень асимметрии зависит от значения B_x .

Значения ЭДС четных гармоник, индуцированных в индикаторной обмотке, в частности ЭДС второй гармоники, зависят от значения напряженности или магнитной индукции постоянного измеряемого магнитного поля B_X .

ЭДС второй гармоники E_2 является линейной функцией составляющей магнитной индукции (или напряженности) постоянного магнитного поля, параллельного оси преобразователя:

$$E_2 \approx kB_X = k_1 H_X, \quad (6.1)$$

где k и k_1 – коэффициенты преобразования, зависящие от параметров ФМП, частоты и значения напряженности поля возбуждения; B_X – измеряемая магнитная индукция; H_X – напряженность магнитного поля. Выходной сигнал индикаторной обмотки ω_{II} (ЭДС четных гармоник) поступает на вход избирательного усилителя (ИУ), усиливающего вторую гармонику, затем на синхронный выпрямитель (СВ), синхронизируемый генератором (Г). СВ преобразует ЭДС второй гармоники E_2 в пропорциональный ей, а следовательно, и измеряемой B_X (H_X), постоянный ток I_K , который протекает через обмотку обратной связи ω_K , размещаемую на ФМП и создающую компенсирующее поле с индукцией B_K . Благодаря уравнивающему преобразованию устанавливается такая сила тока I_K , чтобы поле с индукцией B_K стало равным по значению и обратным по направлению измеряемому с индукцией B_X , т.е. происходит автоматическая компенсация измеряемого поля (B_X) компенсирующим полем (B_K). Миллиамперметр (mA), включенный в цепь обмотки обратной связи, градуируют в единицах измеряемой величины – тесла или ампер на метр. Диапазон измерений такими приборами лежит в пределах $10^{-6} \div 1,0$ мТл; погрешность измерения $1,0 \div 5$ %.

В настоящее время находят все более широкое применение цифровые ферромодуляционные тесламетры, которые имеют повышенные точность и быстродействие.

Наиболее распространенным видом магнитометров для измерения постоянных, переменных и импульсных магнитных полей являются тесламетры на гальваномагнитных эффектах. Их диапазон измерений магнитных полей очень широк: от 10^{-5} до 10^2 Тл, частотный диапазон составляет $0 \div 30$ кГц, погрешность измерения индукции $\gamma = \pm(0,2 \div 2,5) \%$. Магнитометры этого типа подразделяются на следующие группы: магнитометры с датчиками Холла (тесламетры Холла) (см. рис. 5.2), магнитометры с датчиками в виде магниторезисторов, магнитометры на прочих гальваномагнитных эффектах (например, с использованием гальваномагниторекомбинационных преобразователей) [4].

1. Магнитометры на датчиках Холла (рис. 5.1) отличаются большим разнообразием схем и могут быть построены по принципу аналоговых или цифровых устройств. Они обеспечивают высокую точность при измерении средних полей. При измерении слабых полей применяются специальные методы коррекции погрешностей.

2. Магнитометры второй группы применяются для измерения сильных магнитных полей в диапазоне от 1 до 10 Тл, так как именно в этом диапазоне функция преобразования магниторезисторов линейна.

3. Третий тип магнитометров применяется для измерения малых переменных магнитных полей (порядка 10^{-5} Тл) в широком частотном диапазоне (до 1000 Гц).

Наиболее распространены тесламетры с датчиками Холла. Упрощенная структурная схема такого простейшего электронного тесламетра показана на рис. 6.2.

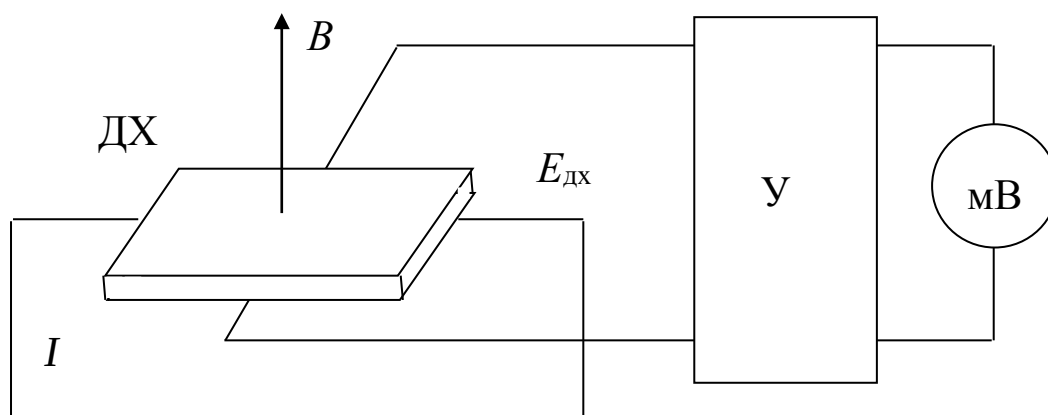


Рис. 6.2. Упрощенная структурная схема электронного тесламетра с датчиком Холла

ЭДС датчика Холла $E_{дх} = S_B B$, пропорциональная индукции магнитного поля, усиливается усилителем (У) и измеряется магнитоэлектрическим милливольтметром (мВ). Его шкала градуируется в единицах магнитной индукции при условии постоянства силы тока I . Такие тесламетры с датчиками Холла достаточно просты, позволяют измерять магнитную индукцию или напряженность постоянных, переменных (в достаточно широком диапазоне частот) и импульсных магнитных полей. Их структурные схемы значительно сложнее, к тому же вместо магнитоэлектрических милливольтметров в настоящее время используют цифровые милливольтметры с автоматической коррекцией погрешностей, в том числе датчиков Холла. Развитие квантовых МИП позволило создавать квантовые тесламетры (магнитометры).

Для них характерны высокая точность измерения магнитной индукции (погрешность измерения менее $\pm 0,005\%$) и практическая безынерционность (быстродействие прибора $0,1 \div 0,001$ с). Эти приборы позволяют измерять значение магнитной индукции или напряженности постоянных и переменных магнитных полей в широком диапазоне значений от 0,01 до 10 Тл. Для постоянных полей этот диапазон расширяется в сторону малых ин-

дукций (10^{-6} Тл). Для измерения слабых магнитных полей (например, магнитного поля Земли) применяют приборы, основанные на ядерном магнитном резонансе.

В последние годы созданы сверхпроводниковые тесламетры, использующие явление сверхпроводимости, которое в сочетании с эффектами Мейснера и Джозефсона позволяет создавать приборы уникальной чувствительности, высокой точности и быстродействия [4].

7. Средства измерений магнитного потока

Для измерения силы магнитного потока, как правило, используют явление электромагнитной индукции.

Приборы для измерения магнитного потока называются веберметрами, или флюксметрами. Они относятся к группе интегрирующих приборов, которые требуют подключения на вход магнитоиндукционного преобразователя – магнитную катушку с заданным числом витков W_k . Тогда из выражения (5.1) следует, что для получения потокосцепления $\Delta\Psi$ по индуцированной в измерительной катушке электродвижущей силе E необходимо интегрировать ее значение во времени

$$\Delta\Psi = W_k \Delta\Phi = -\int_0^x E dt \approx -R \int_0^x I dt,$$

где $\Delta\Phi$ – магнитный поток; R – сопротивление цепи измерительной катушки; I – сила тока в цепи измерительной катушки. Иначе такие приборы должны содержать устройство, осуществляющее интегрирование E .

В настоящее время применяется три группы флюксметров: электромеханические приборы (баллистический гальванометр и магнитоэлектрический веберметр), фотогальванометрические веберметры и электронные аналоговые и цифровые веберметры.

Старейшими приборами, которые выполняют операцию интегрирования с помощью магнитоэлектрического измерительного механизма, являются баллистический гальванометр (интегратор тока) и магнитоэлектрический веберметр (интегратор ЭДС). Баллистический гальванометр – это магнитоэлектрический гальванометр с увеличенным моментом инерции и периодом свободных колебаний $T_0 = 10$ с, благодаря чему первый максимальный отброс его указателя I_{max} пропорционален количеству электричества Q , т.е. он является интегратором кратковременного импульса тока (длительность импульса тока должна быть не более $0,1 T_0$). При изменении магнитного потока $\Delta\Phi_x$ изменение потока сцепления

$$\Delta\Psi = W_k \Delta\Phi_x = RC_Q I_{max} = C_\Phi I_{max},$$

где R – сопротивление гальванометра и измерительной катушки; C_Q – баллистическая постоянная гальванометра; C_Φ – постоянная баллистического гальванометра по магнитному потоку, $C_\Phi = RC_Q$.

Баллистический гальванометр обеспечивает высокую чувствительность и точность при измерении магнитных величин, но является прибором с неградуированной шкалой, требующим определения постоянной C_Φ при каждом значении R . Размер C_Φ можно найти, используя образцовую катушку взаимной индуктивности M с известным магнитным потоком, т.е. постоянная гальванометра в единицах магнитного потока определяется экспериментально. Тогда с допущением о независимости первого отброса от времени (что может вызывать систематическую погрешность, исключаемую опытным путем):

$$\Delta\Phi_x \approx \frac{C_\Phi \cdot \alpha_{max}}{W_k}. \quad (7.1)$$

В современных стационарных гальванометрах постоянная C_ϕ находится в пределах $10^{-6} \div (5 \cdot 10^{-5})$ Вб/дел. , в переносных – $(5 \cdot 10^{-6}) \div (5 \cdot 10^{-3})$ Вб/дел.

В магнитоэлектрическом веберметре используется магнитоэлектрический измерительный механизм (см. табл. 2.1) без противодействующего момента, но с большим моментом магнитоиндукционного успокоения. Если к зажимам веберметра присоединить измерительную катушку W_K и изменить магнитный поток, сцепляющийся с ее витками, то угол поворота $\Delta\alpha$ подвижной части веберметра будет пропорционален изменению потока $\Delta\Phi_X$: $\Delta l = \Delta\alpha L = W_K \cdot \Delta\Phi_X / C_\phi$, где Δl – перемещение указателя по шкале веберметра; L – длина шкалы; C_ϕ – постоянная веберметра. Шкала веберметра может быть градуирована в единицах магнитного потока.

Ценным качеством веберметра, в отличие от баллистического гальванометра, является независимость его показаний от скорости изменения измеряемого потока. Его можно использовать для регистрации изменений магнитных потоков во времени. Он прост и удобен в работе, его показания в широких пределах не зависят от сопротивления веберметра и времени изменения потокосцепления. Верхний предел измерений составляет от 500 до 10^4 мкВб. Основными недостатками прибора являются относительно низкая чувствительность и малая точность, а также необходимость установления указателя на нулевую отметку шкалы вручную (с помощью электрического корректора).

Фотогальванометрический веберметр обладает высокой чувствительностью, что позволяет измерять весьма малые магнитные потоки (порядка $2 \div 500$ мкВб). Благодаря действию отрицательной обратной связи входное сопротивление прибора увеличивается, что дает возможность использовать измерительные катушки с высоким сопротивлением (100 Ом и более).

В настоящее время находят применение также электронные аналоговые и цифровые веберметры. В аналоговом электронном веберметре интегрирующее звено выполняется в виде интегрирующего усилителя. Трудность создания веберметров такого типа заключается в том, что для нормального функционирования интегрирующего усилителя требуется усиление весьма малых ЭДС порядка $10 \div 100$ мкВ. Для этого часто используются специальные усилители как для датчиков ядерного магнитного резонанса [2]. Электронные веберметры также обладают высокой чувствительностью (предел измерений $25 \div 250$ мкВб), но погрешность их меньше, чем у предыдущих приборов (порядка 1 %). Значительное увеличение точности измерения магнитного потока (погрешность измерения $\pm 0,05$ %) может обеспечить цифровой веберметр, основанный на преобразовании выходного сигнала измерительной катушки с помощью цифровых вольтметров [2].

В ряде случаев в цифровом веберметре измерение магнитного потока осуществляется путем измерения времени разряда интегрирующего конденсатора (по аналогии с электрометрами), который заряжается током измерительной катушки.

В настоящее время для производственного контроля магнитных величин разработаны: компактный переносной интегрирующий флюксметр (ФК-4) с цифровым отсчетом, который с успехом может заменить баллистический гальванометр, и более точный цифровой микровеберметр (Ф5050) с автоматической установкой нуля и порогом малой чувствительности ($\sim 10^{-8}$ Вб).

8. Средства электрических измерений неэлектрических величин. Общие сведения

В настоящее время все большее распространение для измерения неэлектрических величин имеют электрические средства измерений. В первую очередь – это первичные измерительные преобразователи (ПИП)

неэлектрических величин, преобразующие неэлектрические измерения величины в электрические выходные сигналы.

Эти ПИП входят составной частью в датчики или средства измерений неэлектрических величин.

Как известно, датчики по определению состоят из одного или нескольких измерительных преобразователей, включая первичный, и оформлены в единое конструктивное целое для установки в объекты измерений, поскольку структурно они состоят, как правило, из ряда измерительных преобразователей. Современные датчики, как правило, включают на выходе из ПИП измерительные преобразователи, предназначенные для преобразования выходных сигналов ПИП в стандартные выходные измерительные сигналы. Эти стандартные сигналы, аналоговые или цифровые, позволяют подключать датчики к контроллерам, компьютерам, устройствам автоматизации через один из стандартных интерфейсов. Причем любой из них представляет собой совокупность:

- правил обмена информацией (протокол обмена);
- стандартов на параметры информационных и служебных сигналов;
- стандартов на конструкции соединительных и вспомогательных устройств.

Такое объединение современных датчиков с микроэлектронными компьютерными устройствами позволяет не только улучшить их метрологические характеристики, но и обеспечить их сервисное обслуживание. В результате применения в этих СИ информационных технологий датчики относятся к интеллектуальным устройствам. В них предусматриваются и автоматически выполняются такие метрологические операции как:

- 1) градуировка;
- 2) калибровка;
- 3) оценка и изменение погрешностей при метрологической аттестации;
- 4) аппроксимация функции преобразования.

Конструктивное устройство современных датчиков неэлектрических величин чрезвычайно разнообразно и подчинено нуждам измерения технических или иных физических величин в различных технических и научных задачах и объектах. Однако общей тенденцией является микроминиатюризация датчиков при увеличении в их структуре вычислительных мощностей.

Метрологические характеристики датчиков неэлектрических величин, оцениваются по таким же правилам, что и большинство СИ [4, 8].

Можно выделить следующие группы датчиков:

- 1) линейной функции преобразования входной измеряемой величины X в выходной измерительной сигнал U ;
- 2) с незначительной нелинейностью;
- 3) с существенной нелинейностью.

Для первой группы датчиков приводятся стандартные метрологические характеристики, определяющие возможность оценки результатов преобразования X в U и основных и дополнительных погрешностей этого преобразования.

Для второй группы датчиков отдельно указывается погрешность, а в качестве динамической погрешности – ее частная составляющая: время установления показаний.

Для третьей группы датчиков указываются либо коэффициенты кусочно-линейной аппроксимации функции преобразования, либо аналитическое выражение для характеристики функции преобразования.

В обоих последних случаях информационные технологии позволяют автоматически определять градуировочную характеристику преобразования входной величины X в выходную U . При этом основная погрешность нормируется в приведенной форме для каждого участка функциональной зави-

симости. В качестве динамической погрешности приводится, как правило, частная динамическая характеристика: время установления показаний.

Метрологические свойства датчиков, в основном, зависят от совершенства ПИП, так как они осуществляют, во-первых, селекцию измеряемой величины в объекте измерения, так называемый информативный параметр, по модели измерения и, во-вторых, первичное преобразование этой физической величины в другой род физической величины – электрический сигнал в реальных условиях объекта. Поэтому далее будут рассмотрены устройство и характеристики наиболее востребованных первичных измерительных преобразователей для измерения неэлектрических величин.

Первичные измерительные преобразователи неэлектрических величин, в зависимости от вида выходного сигнала, подразделяются на параметрические и генераторные. Выходными сигналами параметрических преобразователей являются параметры электрических цепей (R , L , C , M). Выходными сигналами генераторных преобразователей являются ЭДС, напряжение, ток и электрический заряд. К генераторным ПИП относятся термоэлектрические, пьезоэлектрические, индукционные и некоторые из электрохимических датчиков. Остальные преобразователи являются параметрическими.

По принципу действия выделяют следующие основные типы ПИП:

- 1) резистивные – измеряемая величина преобразуется в изменение сопротивления ПИП (реостатные, тензорезистивные – тензорезисторы, термомочувствительные – терморезисторы, электрохимические, резистивные);
- 2) индуктивные – измеряемая величина преобразуется в изменение индуктивности;
- 3) емкостные – измеряемая величина преобразуется в изменение емкости;

- 4) индукционные – измеряемая величина, связанная со скоростью изменения потокосцепления, преобразуется в изменение ЭДС;
- 5) термоэлектрические – измеряемая величина преобразуется в термоЭДС сплава разнородных электродов;
- 6) пьезоэлектрические – динамическая сила преобразуется в электрический заряд.

9. Параметрические резистивные измерительные преобразователи

Реостатные преобразователи. Принцип действия таких ПИП основан на изменении активного сопротивления проводника под влиянием входной величины – перемещения тела. Преобразователь представляет собой реостат, щетка (подвижный контакт) которого перемещается под воздействием измеряемой величины. Следовательно, приборы на основе реостатных преобразователей используются для измерения неэлектрических величин, которые могут быть механически связаны с подвижным контактом.

На рис 9.1. схематично представлены примеры типовых конструкций реостатных преобразователей. Элементами преобразователя являются обмотка 1, нанесенная на каркас, и щетка 2. Габаритные размеры преобразователя определяются величиной измеряемого перемещения, сопротивлением обмотки и мощностью, выделяемой в обмотке. При необходимости получения нелинейной функции преобразования используют, как правило, каркасы различного профиля. Достоинствами реостатных преобразователей являются: высокая точность, возможность получения значительного по уровню выходного сигнала и сравнительная простота конструкции.

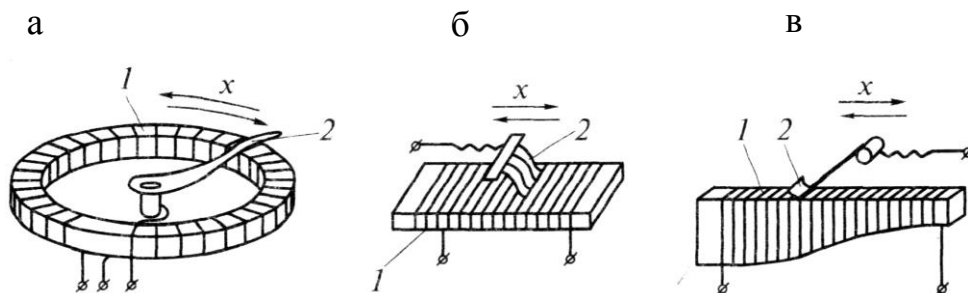


Рис. 9.1. Примеры реостатных первичных измерительных преобразователей

К недостаткам преобразователей относятся скользящие контакты, необходимость относительно больших перемещений движка, наличие в некоторых случаях значительного усилия для его перемещения. На точность преобразования может оказывать влияние и температура за счет изменения удельного сопротивления провода обмотки при изменении температуры окружающей среды. Однако использование потенциметрической схемы включения датчика позволяет скомпенсировать это влияние температуры.

Примеры использования реостатных преобразователей: реостатный уровнемер, который применяется в бензобаках для определения количества топлива (движок преобразователя связан с поплавком в баке); пружинный акселерометр – датчик ускорения, использующийся для измерения виброускорений и виброперемещений.

Тензорезистивные преобразователи (тензорезисторы). Принцип их действия основан на тензоэффекте, заключающемся в изменении активного сопротивления проводников или полупроводников при их механической деформации. Изменение сопротивления проводника R при механическом воздействии объясняется изменением на ΔL его длины L , площади поперечного сечения S и удельного сопротивления ρ , поскольку

$$R = \frac{\rho L}{S}.$$

Характеристикой тензоэффекта материала является коэффициент тензочувствительности (коэффициент относительной чувствительности) K , который определяется как $K = \mathcal{E}_R / \mathcal{E}_l$, где $\mathcal{E}_R$ – относительное изменение сопротивления проводника $\mathcal{E}_R = \Delta R / R$; $\mathcal{E}_l$ – относительная деформация проводника $\mathcal{E}_l = \Delta L / L$.

На рис. 9.2. показана схема тензочувствительного проволочного преобразователя.

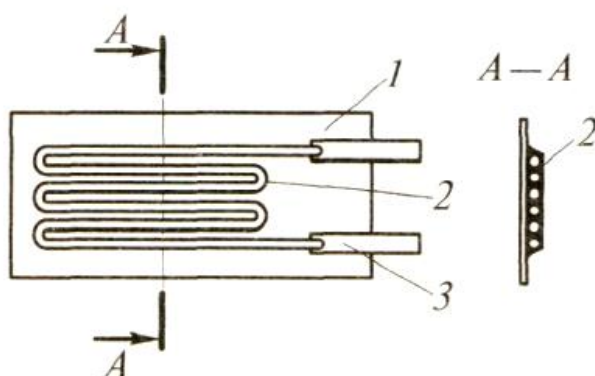


Рис. 9.2. Схема тензочувствительных проволочных преобразователей

Для изготовления преобразователей используют проволоку из следующих материалов: константан, нихром, манганин, никель, хромель, висмут, титаноалюминиевый сплав и полупроводники, изготовленную в форме меандра. Основным требованием к материалу является малое значение температурного коэффициента электрического сопротивления, поскольку, как правило, изменение сопротивления преобразователей при исследовании деформации деталей соизмеримо с изменением сопротивления преобразователей при изменении температуры [4].

Размер преобразователя определяется его назначением. Чаще всего используют преобразователи с длиной продольной оси от 5 до 50 мм с сопротивлением от 30 до 500 Ом. В качестве подложки используют тонкую

(0,03...0,05 мм) бумагу, пленку лака или клея, а при высоких температурах – слой специального жаростойкого цемента. Используют также фольговые преобразователи, в которых чувствительный элемент изготавливается из фольги, и пленочные тензорезисторы, у которых решетка получается возгонкой тензочувствительного материала с последующим осаждением его на подложку.

Наряду с проводниковыми используются и полупроводниковые тензодатчики. Коэффициент тензочувствительности таких преобразователей, выполненных из полосок полупроводникового материала, достигает нескольких сотен. Однако постоянство коэффициента K в диапазоне измерений, т.е. линейность характеристики преобразования, достигается лишь в узком диапазоне измеряемых значений механической напряженности. К тому же полупроводниковые тензодатчики обладают плохой воспроизводимостью характеристик. В настоящее время выпускаются интегральные полупроводниковые тензорезисторы, образующие мост или полумост с использованием элементов термокомпенсации. Если для металлов коэффициент тензочувствительности определяется в основном изменением геометрических размеров ПИП, то для полупроводников – пьезорезистивным эффектом.

Достоинства тензопреобразователей заключаются в линейности статической характеристики преобразования, простоте конструкции, малых габаритных размерах и массе. Недостатками таких преобразователей являются малая чувствительность и заметная температурная зависимость выходного сигнала, а также низкая нагрузочная способность, обусловленная толщиной проводника и ограничениями, накладываемыми на величину тока ПИП в целях снижения эффекта самонагрева.

Влияние температуры удастся в значительной мере снизить с помощью применения схем температурной компенсации, например, использованием

дифференциальной схемы включения ПИП. В соседнее с измерительным плечом моста включается такой же ПИП, наклеенный на тот же материал и помещенный в те же температурные условия. Если удастся разместить на исследуемой детали два ПИП, испытывающих равную деформацию разного знака (сжатии и растяжение), то их включение в соседние плечи моста приводит к удвоению чувствительности с одновременной температурной компенсацией.

В качестве измерительных цепей тензодатчиков используются мосты, работающие в равновесном и неравновесном режимах. Датчики на основе тензочувствительных ПИП позволяют измерять механические деформации, давление, усилия крутящего момента и т.п.

Термочувствительные преобразователи (терморезисторы). Принцип действия терморезисторов основан на зависимости электрического сопротивления проводников и полупроводников от температуры. Таким образом, они могут быть использованы для измерения неэлектрических величин, характеризующих температуру среды. При разработке преобразователя конструкцию его стараются сделать такой, чтобы он был чувствителен только к измеряемой неэлектрической величине, т.е. чтобы теплообмен ПИП и среды определялся именно этим параметром.

Термометры сопротивления (ТС) представляют средство измерения температуры, состоящее из одного или нескольких термочувствительных элементов сопротивления и внутренних соединительных проводов, помещенных в герметический защитный корпус, внешних клемм или выводов, предназначенных для подключения к измерительному прибору или преобразователю*.

* В состав ТС могут входить конструктивно связанные с ним монтажные и коммуникационные (унифицирующие) средства.

Чувствительный элемент (ЧЭ) представляет собой резистор, выполненный из металлической проволоки с выводами для крепления соединительных проводов, имеющих известную зависимость электрического сопротивления от температуры, и предназначенный для использования в ТС. В качестве металлов используется платина (Pt), медь (Cu) и никель (Ni).

Номинальная статическая характеристика (НСХ), т.е. зависимость сопротивления ТС или ЧЭ от температуры приведена для платиновых и медных ТС или ЧЭ в табл. 9.1.

Так, для медных ТС для расчета НСХ в диапазоне от 0 °С до 200 °С используют формулу

$$R_t = R_0(1 + A \cdot t),$$

где R_t – сопротивление ТС при температуре t [Ом], R_0 – начальное сопротивление ТС при температуре $t = 0$ °С [Ом], $A = 4,28 \cdot 10^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ – температурный коэффициент медного электрического сопротивления – постоянная величина.

Температурный коэффициент электрического сопротивления термометров в диапазоне от 0 °С до 100 °С вычисляют по формуле

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \cdot 100}.$$

Начальное, номинальное сопротивление ТС рекомендуется выбирать в диапазоне (1 ÷ 2000) Ом из ряда 10; 50; 100; 500; 1000 Ом.

Таблица 9.1

НСХ платиновых и медных ТС и ЧЭ

Тип ТС и ЧЭ	α , °C ⁻¹	Диапазон измерений, °C	Формула для расчета НСХ	Значения постоянных А, В, С
плати- новые	0,00385	от –200 до 0	$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + C(t - 100^\circ\text{C})t^3)$	$A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ $B = -5,775 \cdot 10^{-7} \cdot ^\circ\text{C}^{-2}$
		от 0 до 850	$R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$	$C = -4,183 \cdot 10^{-12} \cdot ^\circ\text{C}^{-4}$
	0,00391	от –200 до 0	$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + C(t - 100^\circ\text{C})t^3)$	$A = 3,9690 \cdot 10^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ $B = -5,841 \cdot 10^{-7} \cdot ^\circ\text{C}^{-2}$
		от 0 до 850	$R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$	$C = -4,330 \cdot 10^{-12} \cdot ^\circ\text{C}^{-4}$
медные	0,00428	от –180 до 0	$R_t = R_0(1 + At + Bt(t + 6,7^\circ\text{C}) + Ct^3)$	$A = 4,28 \cdot 10^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ $B = -6,2032 \cdot 10^{-7} \cdot ^\circ\text{C}^{-2}$
		от 0 до 200	$R_t = R_0(1 + At)$	$C = -8,5154 \cdot 10^{-12} \cdot ^\circ\text{C}^{-3}$

Схема устройства ЧЭ, например, платинового, приведена на рис. 9.3. Платиновая неизолированная проволока 1 диаметром 0,05–0,07 мм намотана бифилярным способом на каркас 2, выполненный из термостойкого изоляционного материала (фарфор, слюда, кварц). К ее концам припаяны выводы из серебряной проволоки 3. Каркас с обмоткой обкладывают слюдяными прокладками 4 и размещают всю конструкцию в тонкостенную алюминиевую трубку или трубку из нержавеющей стали для защиты ЧЭ от механических и химических воздействий внешней среды. Выводы изолируют от арматуры фарфоровыми бусинами и подключают к зажимам специальной платы в головке арматуры.

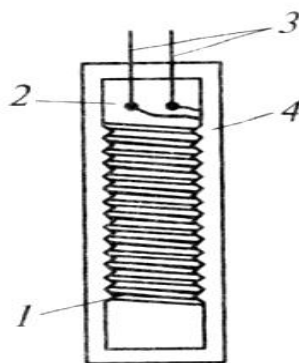


Рис. 9.3. Схема устройства чувствительного элемента

Основными источниками погрешностей ТС являются: технологический разброс значений начального сопротивления R_0 ; изменение температурных коэффициентов электрического сопротивления из-за различных примесей в платине, меди и никеле; тепловой гистерезис и самонагрев, вызванный нагревом ЧЭ измерительным током при определении значения R_t . Перечисленные источники неопределенности характеризуются допуском, который представляет максимальное допустимое отклонение значений НСХ от номинала, выраженное в градусах Цельсия. Допуск обозначается классом допуска, а его размеры и обозначения приведены в табл. 9.2.

Динамические свойства проводниковых ТС зависят от характеристик объекта измерения (его теплопроводности) и конкретного конструктивного исполнения ТС. Требования к времени термической реакции должны быть установлены техническими документами на ТС конкретных типов и на параметры среды, как правило, на воду и воздух.

В измерительный комплект с проводниковыми ТС входят вторичные преобразователи и приборы, предназначенные для измерения или преобразования активного электрического сопротивления в стандартный сигнал или показание, соответственно. Эти устройства могут быть прямого или уравнивающего преобразования.

Таблица 9.2

Классы допуска, его размеры для диапазонов измеряемых температур

Класс допуска	Допуск, °С	Диапазон измерений по ГОСТ Р 8.625-2006, °С		
		платиновые ТС и ЧЭ		медные ТС и ЧЭ
		проволочные	пленочные	
АА W 0.1 F 0.1	$\pm(0,1 + 0,0017 \cdot t)$	от –50 до 250	от –50 до 250	–
А W 0.15 F 0.15	$\pm(0,15 + 0,002 \cdot t)$	от –100 до 450	от –50 до 450	от –50 до 120
В W 0.3 F 0.3	$\pm(0,3 + 0,005 \cdot t)$	от –196 до 660	от –50 до 600	от –50 до 200
С W 0.6 F 0.6	$\pm(0,6 + 0,01 \cdot t)$	от –196 до 660	от –50 до 600	от –180 до 200

Примечание. $|t|$ – абсолютное значение температуры без учета знака, °С.

Полупроводниковые ТС имеют резко нелинейные НСХ. Их отличает высокая относительная чувствительность, превышающая относительную чувствительность проводниковых ТС в 8–10 раз.

Кроме того, полупроводниковые термисторы имеют большое начальное сопротивление, что определяет их высокую абсолютную чувствительность и независимость от сопротивления соединительных проводов и других элементов электрической измерительной цепи.

Для изготовления полупроводниковых термисторов применяют окислы металлов: магния, марганца, калия, железа, титана и др. Эти окислы спекают на керамических подкладках в специальных печах при $t = 800$ °С, с впаянными выводами и покрывают сверху эмалями. Форма и размеры терми-

сторы самые разнообразные: от круглой бусинки до плоских, сравнительно больших плиток. Наиболее часто применяются медно- и калиймарганцевые термисторы (типов ММТ и КМТ) [2]. Существенным недостатком, ограничивающим применение этих приборов для измерения температуры, является невоспроизводимость их характеристик. Разброс параметров термисторов доходит до $\pm 20 \%$, что исключает их взаимозаменяемость, т.е. требуется индивидуальная градуировка.

В настоящее время широко используются возможности преобразования выходного сигнала датчиков температуры, в частности терморезисторов, в цифровой сигнал для создания цифровых термометров. Такое преобразование осуществляется либо с применением нормирующего стандартного преобразователя с выходным сигналом по напряжению и цифрового вольтметра, либо с помощью аналого-цифровых преобразователей с выходными сигналами в виде цифрового кода, либо с применением аналого-частотных преобразователей на основе RC – генераторов, в которые включаются терморезисторы $R=f(t)$ в сочетании с цифровыми частотомерами. В последнем случае удобно использовать высокоомные полупроводниковые ТС.

К полупроводниковым термочувствительным ПИП относятся также термодиоды и термотранзисторы (рис. 9.4).

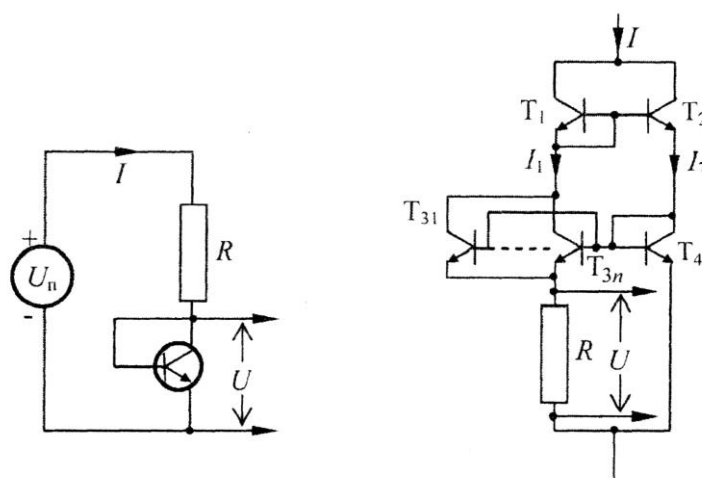


Рис. 9.4. Схемы включения термодиодов и термотранзисторов

Термодиоды и термотранзисторы, у которых изменяется сопротивление р–п – перехода и падение на этом переходе под действием температуры, используются для работы в диапазоне температур $(-80 \div + 150)^\circ\text{C}$. Чувствительность термотранзистора по напряжению – $(1,5 \div 2,0) \text{ мВ/К}$, что значительно превышает чувствительность стандартных термопар, рассматриваемых далее. К достоинствам термодиодов и термотранзисторов относятся высокая чувствительность, малая тепловая инерционность, малые размеры, высокая надежность и низкая стоимость; к недостаткам – плохая воспроизводимость статической характеристики и узкий диапазон измеряемых температур [9].

Электрохимические резистивные преобразователи основаны на зависимости электрического сопротивления растворов от их концентрации, их часто называют кондуктометрическими, или электролитическими.

Эти ПИП представляет собой два электрода, которые помещаются в резервуар с анализируемым раствором. В ряде случаев используется один электрод, а роль второго электрода исполняют металлические стенки сосуда. Сопротивление столба раствора электролитического преобразователя, имеющего высоту L и площадь сечения S , определяется выражением $R = L / (\rho \cdot S) = k / \rho$, где k – постоянная преобразователя, определяемая его геометрическими размерами; ρ – удельная электропроводность раствора.

Измерение сопротивления производится, как правило, на переменном токе $(700 \div 1000 \text{ Гц})$ для исключения явления электролиза при измерении на постоянном токе. Для снижения влияния емкостного сопротивления, возникающего вследствие емкости двойного слоя зарядов на границе электрод-раствор и перемещения этих зарядов относительно друг друга и относительно электродов, сопротивления ПИП выбирают из диапазона $500 \div 1000 \text{ Ом}$.

Как известно, электропроводность (ЭП) жидкостей существенно зависит от температуры

$$\kappa = A \times \exp - \frac{B}{T},$$

где A и B – постоянные; T – абсолютная температура; для слабых растворов можно пользоваться приближенной зависимостью

$$\kappa = \kappa_0 [1 + \beta_1 (t - t_0) + \beta_2 (t - t_0)^2]$$

или линейным приближением

$$\kappa = \kappa_0 [1 + \beta_1 (t - t_0)],$$

где β_1, β_2 – температурные коэффициенты изменения электропроводности.

В среднем увеличение температуры на 1 °С приводит к возрастанию электропроводности на (1–2,5) %. Поэтому для уменьшения температурной погрешности применяют различные способы автоматического введения коррекции температурного влияния с помощью металлических или полупроводниковых термометров сопротивления, биметаллических компенсаторов и других устройств.

В контактных концентромерах (рис. 9.5), например, часто применяют температурную компенсацию с помощью медного термометра сопротивления R_m , помещенного в исследуемый раствор и включенного последовательно с измерительными электродами. Электроды шунтированы манганиновым сопротивлением $R_{ш}$. Тогда температурный коэффициент приведенного сопротивления ячейки R_c и шунта $R_{ш}$ становится по абсолютной величине соизмеримым с температурным коэффициентом медного сопротивления

$$R_m (\alpha \approx 0,4 \% / ^\circ\text{C}),$$

а знаки этих температурных коэффициентов разные. Кроме того, наличие шунта обеспечивает снижение величины тока, протекающего через электролит.

Обычно величины $R_{и}$ и $R_{м}$ определяют из условий полной температурной компенсации для двух значений концентрации c_1 и c_2 при начальной t_0 и заданной t температурах, т. е. для диапазона температур $\Delta t = t - t_0$. Вне этого интервала концентраций: $\Delta c = c_1 - c_2$ погрешность может быть даже больше, чем без температурной компенсации, если не применять специальной методики расчета, позволяющей ограничивать погрешность во всем диапазоне шкалы. Поэтому необходимо правильно выбрать «рабочий» участок шкалы измерительного указателя (ИУ), для которого ведется расчет [8].

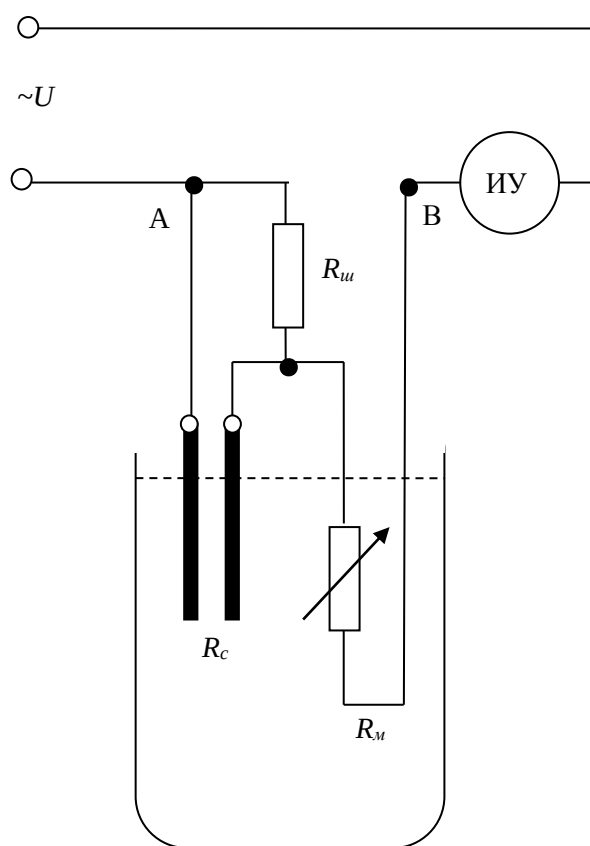


Рис. 9.5. Схема контактного концентратора

Индуктивные первичные измерительные преобразователи. Принцип действия таких ПИП основан на зависимости индуктивности или взаимной индуктивности обмоток на магнитопроводе от положения, геометрических размеров и магнитного состояния элементов магнитной цепи.

На рис. 9.6 представлены схемы устройств индуктивных преобразователей [2].

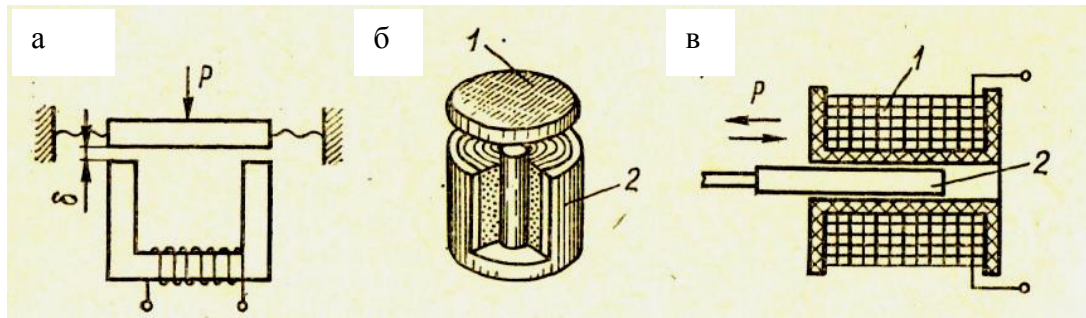


Рис. 9.6. Схемы устройств индуктивных измерительных преобразователей

Индуктивность катушки, намотанной медным проводом и содержащей W витков, в общем случае равна

$$L = \frac{W^2}{Z_m} = \frac{W^2}{R_m + jX_m},$$

где $Z_m = R_m + jX_m$ – комплексное магнитное сопротивление цепи, по которой замыкается поле катушки.

Магнитные цепи большинства индуктивных ПИП устроены таким образом, чтобы потери в этих цепях были минимальны. Кроме того, магнитные цепи этих ПИП состоят, в основном, из магнито-мягкого материала, имеющего высокую магнитную проницаемость μ , и одного или двух воздушных зазоров, магнитное сопротивление которых настолько велико, что оно, в основном, определяет магнитное сопротивление всей цепи. При зазоре, образованном двумя плоскими параллельными поверхностями, расстояние между которыми равно d , площадь равна S , его магнитное сопротивление, а по вышеуказанному, и магнитное сопротивление всей цепи

$$R_d = \frac{d}{\mu_0 S},$$

где μ_0 – магнитная проницаемость воздуха.

В результате начальная индуктивность реальных индуктивных датчиков с воздушными зазорами, равная L , выражается приближенной формулой

$$L = \frac{\mu_0 S^2}{d} W^2,$$

где W – число витков катушки.

Приближенный характер формулы вызван влиянием полей рассеяние на краях воздушного зазора.

По этой формуле видно, что на значение индуктивности катушки влияют только такие измеряемые величины, которые могут быть преобразованы в изменение магнитного сопротивления магнитной цепи преобразователя.

В сравнении с другими преобразователями перемещения индуктивные ПИП обладают значительным по мощности выходным сигналом, простотой изготовления и надежностью в работе. К недостаткам этих преобразователей можно отнести обратное влияние ПИП на исследуемый объект (воздействие электромагнита), влияние на результаты измерений колебаний напряжения и частоты питающего напряжения, инерционность.

На основе индуктивных ПИП выпускается большое количество измерительных средств, например, индуктивный микрометр, индуктивный толщиномер, индуктивный манометр и т. п. [2].

Емкостные первичные измерительные преобразователи. Принцип действия этих ПИП основан на зависимости электрической емкости конденсатора от диэлектрической проницаемости среды между обкладками конденсатора, размеров обкладок и расстояния между ними.

Для плоского конденсатора с двумя обкладками электрическая емкость определяется по формуле

$$C = \frac{\varepsilon_0 \times \varepsilon \times S}{d},$$

где ε_0 – электрическая постоянная; ε – относительная диэлектрическая проницаемость; S – активная площадь обкладок; d – расстояние между обкладками. Как видно по этому выражению, в основу работы преобразователей могут быть положены зависимости:

$$C = f_1(\varepsilon), C = f_2(S), C = f_3(d).$$

На рис. 9.7 показаны схемы различных емкостных ПИП [2].

Одна из конструкций ПИП уровня представляет собой цилиндрический конденсатор, электродами которого являются полый цилиндр и отделенный от него изолятором внутренний стержень длиной h (рис. 9.7а).

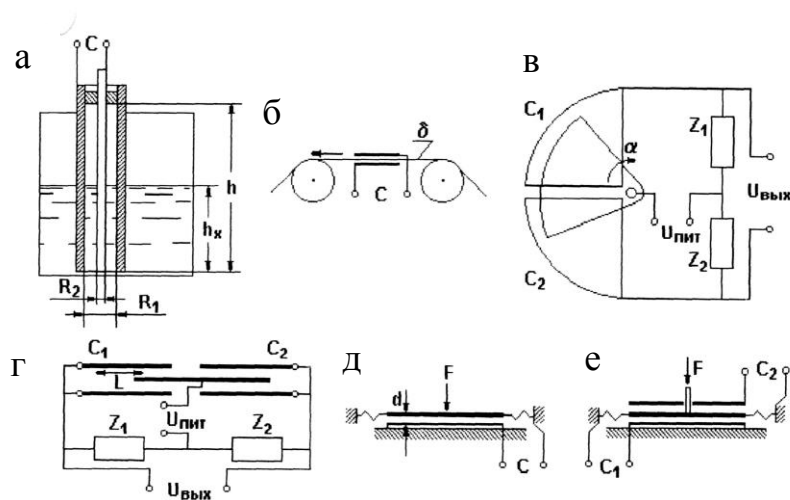


Рис. 9.7. Схемы емкостных измерительных преобразователей

При погружении в жидкость с диэлектрической проницаемостью ε на глубину h_x емкость получившегося конденсатора будет линейно зависеть от h_x :

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)} [h_x\varepsilon + (h - h_x)] = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)} [h + h_x(\varepsilon - 1)]$$

В подобных ПИП основная часть погрешности возникает из-за проводимости жидкости, вследствие чего при изменении уровня изменяются активные потери образованного таким образом конденсатора.

Принцип действия емкостного ПИП толщины ленты диэлектрического материала, в том числе, бумаги, в процессе изготовления показан на рис. 9.7б. Лента толщиной δ при изготовлении проходит между параллельными обкладками плоского конденсатора, расположенными на расстоянии d друг от друга. Относительная диэлектрическая проницаемость ленты равна ε , диэлектрическая проницаемость воздуха – ε_0 . Площадь обкладок конденсатора S . Тогда емкость конденсатора зависит от измеряемой толщины следующим образом:

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{(d - \delta) + \delta / \varepsilon} = \frac{\varepsilon_0 S}{d - \delta(1 - 1/\varepsilon)}.$$

Емкостные датчики с изменяющейся площадью S обкладок (электродов) применяются при измерении, например, угла поворота α (рис. 9.7в) или перемещений L в несколько десятков миллиметров (рис. 9.7г). Эти датчики удобно включить в мост переменного тока, как показано на рис. 9.7.

Наибольшее распространение получили емкостные ПИП, в которых измеряемая величина преобразуется в малое перемещение обкладок конденсатора по направлению друг к другу. Такие ПИП могут быть выполнены в двух вариантах, показанных на рис. 9.7д и 9.7е. Расстояние d между обкладками ПИП, выполненных в соответствии с обычной дискретной технологией, составляет от 10 мкм до нескольких десятых долей миллиметра. То же расстояние у емкостных ПИП, изготовленных способами полупроводниковых микротехнологий, может быть уменьшено до сотых долей миллиметра. Также малое расстояние между обкладками конденсатора способствует

увеличению емкости ПИП и тем самым – снижению влияния паразитных емкостей соединительных проводов, но при этом повышает чувствительность таких ПИП к температуре окружающей среды. Это происходит из-за того, что тепловое линейное расширение материалов, из которых они изготовлены, оказывается соизмеримым с величиной зазоров между обкладками. При разработке емкостных датчиков следует предусматривать конструктивные или иные меры усиления указанного крепления неподвижных и подвижных обкладок во избежание малейших люфтов.

Кроме того, нежелательным свойством одинарных емкостных датчиков (рис. 9.7д) с малым зазором является возникновение силы притяжения между пластинами конденсатора. В дифференциальном ПИП, представленном на рис. 9.7е, эта сила может быть снижена вплоть до нуля.

Отрицательное влияние на емкостные ПИП с малым зазором оказывает даже малейшее увлажнение и засорение обкладок. Поэтому их необходимо тщательно обрабатывать и герметизировать [7, 9].

Начальная емкость емкостных ПИП с малым зазором $C_0 = (10 - 300)$ пФ.

На основе подобных емкостных преобразователей могут быть созданы датчики силы, ускорения и давления с первичным преобразованием этих величин в малое перемещение.

10. Генераторные измерительные преобразователи

Индукционные преобразователи основаны на использовании явления электромагнитной индукции. Согласно закону электромагнитной индукции, ЭДС в контуре определяется формулой

$$e = d\Psi/dt,$$

где Ψ – потокосцепление с контуром.

Таким образом, выходной величиной индукционного преобразователя является ЭДС, а входной – скорость изменения потокоцепления.

В общем случае индукционный преобразователь представляет собой катушку с сердечником, которая характеризуется некоторым обобщенным параметром Y и ЭДС в которой может индуцироваться как в результате изменения во времени внешнего магнитного поля, так и в результате изменения во времени параметра Y преобразователя. Если преобразователь находится в однородном магнитном поле с индукцией B , то в обмотке, имеющей ω витков, наводится ЭДС

$$e = \frac{d\Psi}{dt} = \omega \frac{d\Phi}{dt} = \omega \left(Y \frac{dB}{dt} + B \frac{dY}{dt} \right).$$

Обобщенный параметр преобразователя является функцией четырех частных параметров α , S , μ' и N , где α – угол между магнитной осью преобразователя, совпадающей с нормалью к плоскости обмотки, и вектором магнитной индукции; S – площадь поперечного сечения катушки; μ' – магнитная проницаемость среды в единицах μ_0 ; N – коэффициент размагничивания сердечника, определяемый формой и соотношением размеров сердечника.

Для катушек без сердечников уравнения преобразования существенно упрощаются и для основных видов преобразователей сводятся к следующим:

– для неподвижной катушки в переменном магнитном поле ($B = B_m \cos \omega t$, $\alpha = 0$)

$$e = \omega \cdot w \cdot S \cdot B_m \cdot \sin \omega t;$$

– для катушки, вращающейся с частотой Ω в постоянном магнитном поле с индукцией B_0 ,

$$e = \Omega \cdot w \cdot S \cdot B_0 \cdot \sin \omega t;$$

– для контура, отдельные участки которого линейно перемещаются в магнитном поле, изменяя площадь потокосцепления с контуром,

$$e = \int V \cdot B \cdot dl;$$

– для отрезка длиной l , движущегося в однородном магнитном поле со скоростью V так, что направления векторов B и V взаимно перпендикулярны,

$$e = V \cdot B \cdot l.$$

Индукционные преобразователи широко применяются для измерения параметров магнитных полей, частоты вращения, параметров вибрации и сейсмических колебаний, расхода жидких веществ.

Примеры схем индукционных ПИП для измерения частоты вращения и расхода электропроводных веществ изображены на рис. 10.1а, б и 10.2а, б, соответственно.

Для измерения частоты вращения в индукционных ПИП используют:

– либо постоянные магниты N и S , создающие магнитное поле с постоянной индукцией, т.е. тахогенератор, а вращение подвижных индукционных элементов осуществляется объектом, частота вращения которого измеряется (рис. 10.1а);

– либо к постоянному магниту с током I добавляется катушка, содержащая две полуобмотки, и при вращении ротора в катушке индуцируется ЭДС $e_{вых}$, частота которой определяется частотой вращения объекта ω и числом зубцов ротора (рис. 10.1б).

В последнем случае при вращении ротора происходит перераспределение магнитного потока постоянного магнита: увеличивается поток через полюс магнитопровода, под которым проходит зубец ротора, и уменьшается поток через полюс, под которым проходит паз ротора. Поток постоянного магнита остается при этом неизменным, так как полное магнитное сопротивление для суммарного потока остается почти постоянным. Таким образом, в части магнитопровода, образованной полюсами 1 и 2 и ротором, за

счет изменения размагничивания полюсов при вращении ротора появляется переменная составляющая магнитного потока, и в катушке индуцируется ЭДС, частота которой определяется частотой вращения и числом зубцов ротора.

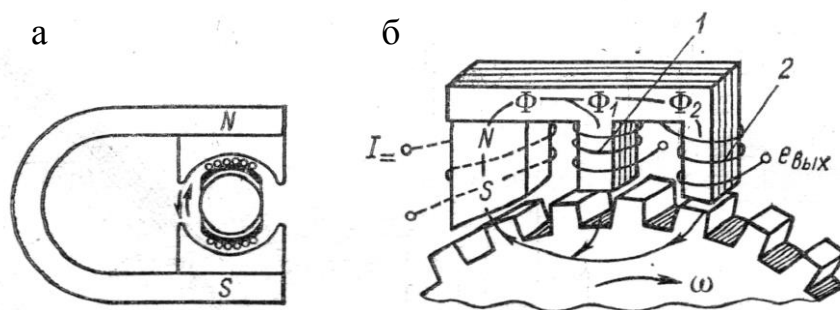


Рис. 10.1. Схемы устройства индукционных измерительных преобразователей для измерения частоты вращения:
а – тахогенератора, б – преобразователя частоты

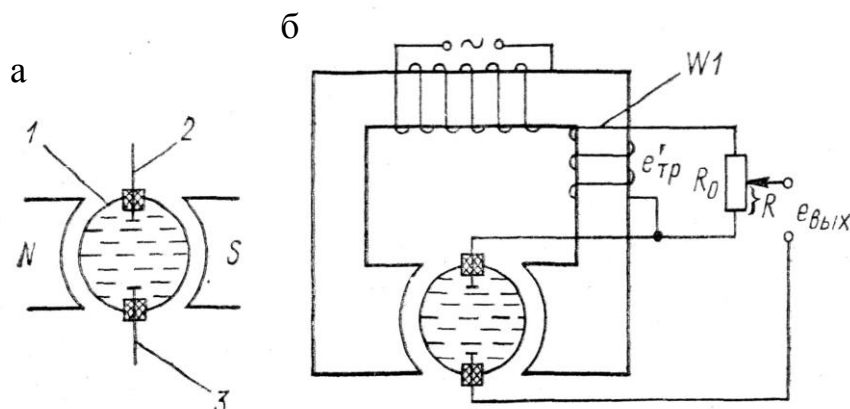


Рис. 10.2. Схемы устройства индукционных измерительных преобразователей для измерения расхода электропроводных жидкостей:
а – преобразователь скорости потока в ЭДС постоянного тока;
б – преобразователь скорости потока в ЭДС переменного тока

На рис. 10.2а представлена схема индукционного преобразователя скорости потока (расходомера) с постоянным магнитом $N S$, где 1 – диаметр трубопровода из немагнитного материала; 2 и 3 – электроды, с которых снимается ЭДС. На рис. 10.2б изображена структура индукционного преобразователя скорости потока в ЭДС переменного тока $e_{вых}$. Обмотка W_1 с ЭДС $e'_{тр}$ предназначена наряду с делителем напряжения R/R_0 для уменьше-

ния трансформаторной ЭДС, создающей помехи полезному сигналу. Трансформаторная ЭДС трансформируется в контуре электродов при питании магнитопровода переменным током.

Для измерения расхода электропроводных веществ используют индукционный ПИП, в котором по закону возникновения электромагнитной индукции создается ЭДС E между электродами в немагнитном участке трубопровода диаметром D , пропорциональная скорости потока V и значению магнитной индукции B

$$E = B \cdot D \cdot V.$$

Как следует из приведенного уравнения, создаваемая E не зависит от свойств жидкости, поэтому такие ПИП могут применяться для самого широкого класса веществ: от жидких металлов до двойных дистиллятов. В их характеристиках указываются минимальные электропроводности веществ, для измерения расходов которых они могут использоваться.

Термоэлектрические первичные измерительные преобразователи.

Принцип действия термоэлектрических ПИП основан на термоэлектрическом эффекте, открытом немецким физиком Т. Зеебеком, согласно которому в цепи, составленной из двух разнородных проводников А и Б, концы соединения которых находятся при разных температурах T_1 и T_2 , возникает электрический ток, пропорциональный термоЭДС. Последняя является алгебраической суммой ЭДС, возникающих в спаях разнородных металлов вследствие разной работы выхода электронов в разных металлах при разной температуре. Если один конец (так называемый свободный, холодный) поддерживается при постоянной температуре T_1 , то ЭДС оказывается функцией температуры другого (так называемого рабочего, горячего) конца. Электроды образуют термопару, у которой зависимость $E = f(T_2)$ при $T_1 = \text{const}$ определяется экспериментально и называется номинальной статической характеристикой (НСХ) преобразования.

Она приводится для различных термопар в ГОСТ Р 8.585-2001 в виде табличных значений, аппроксимирующих полиномов, также сообщаются пределы допускаемых отклонений термоЭДС от НСХ в различных диапазонах измеряемых температур.

В табл. 10.1 приведены основные данные по термопарам, используемым в промышленности для измерения температур [5].

Пьезоэлектрические первичные измерительные преобразователи представляют собой генераторные преобразователи: их входной величиной является сила (давление, ускорение), а выходной – количество электричества. Под воздействием давления в пьезоэлектрических материалах (кварце, титанате бария, сегнетовой соли, турмалине и др.) появляются электрические заряды G . Пьезоэлемент, схема которого представлена на рис. 10.3, представляет собой конденсатор, обладающий емкостью C . В таком случае на электродах появляется выходное напряжение $U_{\text{вых}} = G/C$, где G пропорционально зависит от силы (при прямом пьезоэффекте). Явление пьезоэффекта достаточно полно освещено в литературе [2, 3, 9].

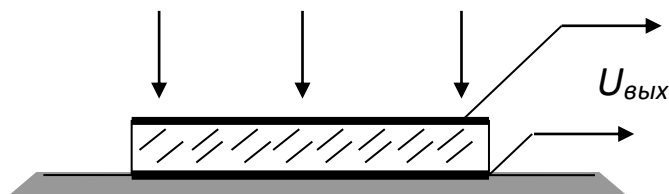


Рис. 10.3. Схема пьезоэлемента

Заряд, возникающий на гранях пьезоэлемента под действием внешних сил, сохраняется лишь при отсутствии утечки, т.е. при бесконечно большом входном сопротивлении измерительной цепи. Так как это условие практически невыполнимо, для статических измерений сил и давлений пьезоэлектрические преобразователи не используют.

При действии переменных сил количество электричества восполняется, и становится возможным потребление некоторого тока измерительной цепью. Поэтому эти преобразователи применяются исключительно для измерения переменных значений давления в частотном диапазоне от 7 до 10000 Гц.

Таблица 10.1

Данные по термоэлектрическим ПИП

Тип	Обозначение термопреобразователя		Материал термоэлектродов		Диапазон измерения, °С	Термо-ЭДС, мВ
			положительный	отрицательный		
R	ТПП	Pt +13%Rh/Pt	ПР-13 (87%Pt+13%Rh)	ПлТ (Pt)	-50 ÷ 1768	-0,226 ÷ 21,101
S	ТПП	Pt +10%Rh/Pt	ПР-10 (90%Pt+10%Rh)	ПлТ (Pt)	-50 ÷ 1768	-0,236 ÷ 18,693
B	ТПР	Pt +30%Rh/Pt+6%Rh	ПР-30 (70%Pt+30%Rh)	ПР-6 (94%Pt+6%Rh)	0 ÷ 1820	0 ÷ 13,820
J	ТЖК	[Fe/Cu+Ni] (железо/константан)	Fe	55%Cu+45%Ni,Mn,Fe	-210 ÷ 1200	-8,095 ÷ 69,553
T	ТМК	[Cu/Cu+Ni] (медь/константан)	M1 (Cu)	55%Cu+45%Ni,Mn,Fe	-270 ÷ 400	-6,258 ÷ 20,872
E	ТХКн	[Ni+Cr/Cu+Ni] (хромель/константан)	ТНХ 9,5 (90,5%Ni+9,5%Cr)	55%Cu+45%Ni,Mn,Fe	-270 ÷ 1000	-9,835 ÷ 76,373
K	ТХА	[Ni+Cr/Ni+Al] (хромель/алюмель)	ТНХ 9,5 (90,5%Ni+9,5%Cr)	НМЦ АК2-2-1 94,5%Ni+5,5%Al,Si,Mn	-270 ÷ 1372	-6,458 ÷ 54,886
N	ТНН	[Ni+Cr+Si/Ni+Si] (нихросил/нисил)	84,2%Ni+14,2%Cr+1,5%Si	95%Ni+4,5%Si	-270 ÷ 1300	-4,345 ÷ 47,513
L	ТХК	[Ni+Cr/Cu-Ni] (хромель/копель)	ТНХ 9,5 (90,5%Ni+9,5%Cr)	МНМЦ43-05 56%Cu+44%Ni	-200 ÷ 800	-9,488 ÷ 66,466
M	ТМК	[Cu/Cu+Ni] (медь/копель)	M1 (Cu)	МНМЦ 43-05 56%Cu+44%Ni	-200 ÷ 100	-6,154 ÷ 4,722
A (A-1, A-2, A-3)	ТВР	[W+Re/W+Re]	ВР-5 (95%W+5%Re)	ВР-20 80%W+20%Re	A-1: 0 ÷ 2500 A-2: 0 ÷ 1800 A-3: 0 ÷ 1800	0 ÷ 33,015 0 ÷ 27,232 0 ÷ 26,773

Преимущественное применение в пьезоэлектрических манометрах получили кварцевые преобразователи. Они отличаются большой механической прочностью, удовлетворительными пьезоэлектрическими и высокими

изоляционными свойствами, а также стабильностью пьезоэлектрической характеристики при изменении температуры в широких пределах и во времени.

Один из вариантов конструктивного исполнения преобразователя пьезоэлектрического манометра на основе кристалла кварца показан на рис. 10.4. Измеряемое давление в полости, ограниченной корпусом 1 и гайкой 2, действует на плоскую мембрану 3, деформация которой через металлическую шайбу 4 передается нижней кварцевой пластине 5. Другая кварцевая пластина расположена сверху плитки 6 и поджимается к последней через металлическую шайбу 7 и шарик 8 гайкой 9, представляющей собой крышку. К плитке 6 припаян проводник, выводимый через втулку 10. Кварцевые пластины расположены таким образом, чтобы грани с положительным зарядом имели контакт с шайбами 4 и 7, а с отрицательным зарядом – с плиткой 6. Измерительным прибором может служить, например, ламповый вольтметр постоянного тока в сочетании с электронным осциллографом. Основная приведенная погрешность измерения пьезоэлектрическими манометрами составляет $\gamma = \pm 2 \%$.

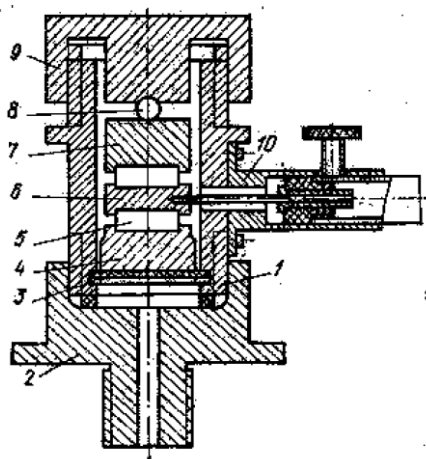


Рис. 10.4. Устройство пьезоэлектрического манометра

Главными составляющими погрешности пьезоэлектрических преобразователей являются: погрешность вследствие неправильной (по отношению

к градуировочной) установки пластин пьезоэлемента; погрешность, вызванная изменением параметров измерительной цепи (в первую очередь, входной емкости); погрешность, связанная с чувствительностью пьезоэлемента к силам, действующим поперек измеряемой; температурная погрешность от изменения под действием температуры пьезоэлектрической постоянной; частотная погрешность, появляющаяся за счет дифференцирующих свойств пьезоэлектрических преобразователей.

Пьезоэлектрические датчики давления имеют основную приведенную погрешность $(0,1 \div 1) \%$, собственную частоту $50 \text{ кГц} \div 1 \text{ МГц}$, максимальный выходной сигнал – $(5 \div 100) \text{ мВ}$. К их достоинствам относятся малые размеры и отсутствие внешнего питания (если датчик не содержит встроенного усилителя, однако, в этом случае необходимо использование специального соединительного кабеля) [8].

В связи с тем, что выходное (внутреннее) сопротивление пьезоэлектрического преобразователя велико, а развиваемая им мощность чрезвычайно мала, выходное напряжение преобразователя требует усиления. Поэтому в качестве вторичного измерительного преобразователя (измерительной цепи) используют усилители с общим входным сопротивлением $(10^8 \div 10^{14}) \text{ Ом}$.

Контрольные вопросы

1. Какие структурные схемы используются для анализа и синтеза средств измерения?
2. Что представляют собой измерительные сигналы?
3. Какие структурные элементы используются в структурных схемах информационно-измерительных систем?
4. Особенности структурных схем измерительных комплексов нижнего уровня.
5. Перечислите назначение и области применения информационно-измерительных систем.
6. Какие погрешности появляются при измерении токов с помощью амперметров?
7. С чем связаны погрешности измерения напряжения при помощи вольтметров?
8. Каково устройство и характеристики магнитоэлектрических приборов.
9. Перечислите достоинства магнитоэлектрических приборов.
10. Перечислите названия аналоговых СИ для измерения электрических величин.
11. Перечислите названия цифровых СИ для измерения электрических величин.
12. Какие информативные параметры по напряжению измеряются в цепях переменного тока?
13. Изобразите структурную схему электронного вольтметра постоянного тока.
14. Какова структурная схема электронного вольтметра переменного тока?
15. Особенности принципиальной схемы ручного потенциометра постоянного тока.
16. Перечислите состав и порядок значений погрешностей ручного потенциометра постоянного тока.
17. Приведите структурную схему автоматического потенциометра постоянного тока.
18. Какова структурная схема цифрового вольтметра с генератором линейно изменяющегося напряжения?

19. Перечислите принципы действия средств измерения, измеряющих мощности в цепях постоянного и переменного тока.
20. Какие информационные параметры измеряются при определении частоты и времени электрических сигналов?
21. Приведите структурные схемы цифровых частотомеров.
22. Приведите структурные схемы цифровых периодометров.
23. Как превратить частотомер в счетчик импульсов?
24. Какие параметры измеряются при определении магнитных величин?
25. Перечислите наиболее широко известные первичные магнитоизмерительные преобразователи.
26. Принцип действия преобразователей Холла.
27. Каково устройство датчиков Холла?
28. Перечислите основные характеристики датчиков Холла.
29. В каких СИ используются датчики Холла?
30. Приведите схемы СИ магнитной индукции (тесламетров).
31. Перечислите принципы действия СИ магнитных потоков (флюксометров).
32. Какие области применения имеют резистивные первичные измерительные преобразователи?
33. Какие характеристики используются для тензорезисторов?
34. Назначения, устройство и характеристики проводниковых терморезисторов.
35. Особенности характеристик и области применения полупроводниковых терморезисторов.
36. Устройство и область применения электрохимических резистивных преобразователей.
37. Применение и схемы индуктивных первичных измерительных преобразователей.
38. Схемы и области применения емкостных первичных измерительных преобразователей.
39. Устройство и области применения индукционных первичных измерительных преобразователей.
40. Физические закономерности и характеристики термоэлектрических первичных измерительных преобразователей.
41. Пьезоэлектрики: устройство, характеристики и области применения.

Библиографический список

1. Кнорринг В.Г., Марамзина М.Г. Метрология, стандартизация и сертификация: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2006. -240 с.
2. Солопченко Г.Н. Измерительные информационные системы: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2010. -200 с.
3. Раннев Г.Г. Измерительные информационные системы: учебное пособие. – М.: Изд.центр «Академия», 2010. -330 с.
4. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник / под ред. В.В. Алексеева. – М.: Изд.центр «Академия», 2007. -384 с.
5. Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами: учебное пособие. – СПб.: Профессия, 2009. -590 с.
6. Электрические измерения: учебное пособие / под ред. Е.Г.Шрамкова. – М.: Высшая школа, 1972. -520 с.
7. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин: учебное пособие. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. -320 с.
8. Кондрашкова Г.А. Технологические измерения и приборы в целлюлозно-бумажной промышленности: учебник. – М.: Лесная промышленность, 1981. -375 с.
9. Мазин В.Д. Метрология и теплотехнические измерения: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2010. -124 с.

Оглавление

Введение	3
1. Структурные схемы средств измерений.	4
2. Средства измерений силы тока и напряжения.	13
3. Средства измерений мощности и энергии.	25
4. Средства измерений частоты и временных интервалов.	27
5. Средства измерений магнитных величин – магнитоизмерительные преобразователи.	30
6. Средства измерений магнитной индукции.	40
7. Средства измерений магнитного потока.	45
8. Средства электрических измерений неэлектрических величин. Общие сведения.	48
9. Параметрические резистивные измерительные преобразователи . . .	52
10. Генераторные измерительные преобразователи.	69
Контрольные вопросы	78
Библиографический список	80

Учебное издание

Галина Анатольевна Кондрашкова
Ирина Владимировна Бондаренкова
Анна Владимировна Черникова

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Учебное пособие

Редактор и корректор Н.П. Новикова

Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2013 г., поз. 73

Подп. к печати 27.11.2013 г.

Формат 60х84/16. Бумага тип. № 1.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 5,25. 5,25 уч.-изд. л. Тираж 100 экз. Изд. №. 73.

Цена «С». Заказ

Ризограф Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров, 198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.