

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра метрологии и стандартизации

В.Т. Ревин

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Учебное пособие
для студентов БГУИР специальности 54 01 01
«Метрология, стандартизация и сертификация»
всех форм обучения

В 5-ти частях

Часть 2

Минск 2003

УДК 621. 317.7 + 389.1 (075.8)

ББК 30. 10 я 73

Р 32

Рецензент:

науч. сотрудник ИМАФ НАН Беларуси, канд. физ.-мат. наук
А.В. Исаевич

Ревин В.Т.

Р 32 Преобразование и преобразователи измерительной информации: Учеб. пособие для студентов спец. 54 01 01 «Метрология, стандартизация и сертификация» всех форм обучения. В 5 ч. Ч. 2 / В.Т. Ревин. — Мн.: БГУИР, 2003. — 103 с.: ил.

ISBN 985-444-461-9 (ч. 2).

Во второй части учебного пособия рассматриваются параметрические измерительные преобразователи, используемые для преобразования неэлектрических величин в электрические сигналы измерительной информации. Рассмотрены также вопросы преобразования основных магнитных величин и характеристик магнитных материалов в электрические сигналы с помощью различных измерительных преобразователей, приводится их классификация, рассматриваются устройство и принцип действия и схемы включения в измерительные цепи. Приводятся основные характеристики измерительных преобразователей, определяющие область их применения, функции преобразования, чувствительность, и оценивается погрешность преобразования.

Первая часть настоящего пособия издана в БГУИР в 2002 г.

УДК 621. 317.7 + 389.1 (075.8)
ББК 30. 10 я 73

СОДЕРЖАНИЕ

Введение

1 Параметрические преобразователи неэлектрических величин в электрические

1.1 Резистивные преобразователи

1.1.1 Контактные преобразователи

1.1.2 Реостатные преобразователи

1.1.3 Тензорезистивные преобразователи

1.1.4 Терморезистивные преобразователи

1.1.5 Фоторезистивные преобразователи

1.2 Цифровые измерительные преобразователи

1.2.1 Абсолютные цифровые преобразователи

1.3 Емкостные измерительные преобразователи

1.4 Электромагнитные параметрические преобразователи

1.4.1 Индуктивные преобразователи

1.4.2 Трансформаторные (взаимоиндуктивные) преобразователи

1.4.3 Магнитоупругие преобразователи

2 Измерительные преобразователи магнитных величин

2.1 Основные магнитные величины и их меры

2.2 Основные характеристики магнитных материалов

2.2.1 Статические характеристики магнитных материалов

2.2.2 Динамические характеристики магнитных материалов

2.3 Физические основы преобразования магнитных величин

2.3.1 Классификация измерительных преобразователей

2.4 Индукционные магнитоизмерительные преобразователи

2.5 Ферроиндукционные измерительные преобразователи

2.6 Сверхпроводниковые преобразователи

2.7 Измерительные преобразователи, основанные на гальваномагнитных эффектах

2.7.1 Измерительные преобразователи Холла

2.7.2 Измерительные преобразователи Гаусса

2.8 Измерительные преобразователи, основанные на силовом воздействии магнитного поля

2.8.1 Квантовые измерительные преобразователи

2.9 Измерение основных характеристик магнитных материалов

2.9.1 Магнитные цепи, используемые при измерениях

2.9.2 Измерение статических характеристик магнитных материалов

2.9.3 Измерение динамических характеристик магнитных мате-

риалов

3 Основные тенденции в развитии техники измерительных преобразователей

Литература

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время возрастает роль измерений в научном эксперименте, на производстве при выпуске высококачественной продукции, в учебном процессе при подготовке специалистов радиотехнического профиля. Усложнение технологических процессов приводит к необходимости одновременного определения большого числа параметров и физических величин, возрастает роль динамических измерений. Автоматизация сложных производственных процессов неразрывно связана с применением большого числа измерительных преобразователей, обеспечивающих получение оперативной измерительной информации в должном объеме и эффективное управление течением технологического процесса.

Особое внимание в настоящее время уделяется проведению испытаний сложных устройств, требующих контроля большого количества параметров. Примером может служить испытательный стенд (рисунок 1) для проведения испытаний двигателей внутреннего сгорания.

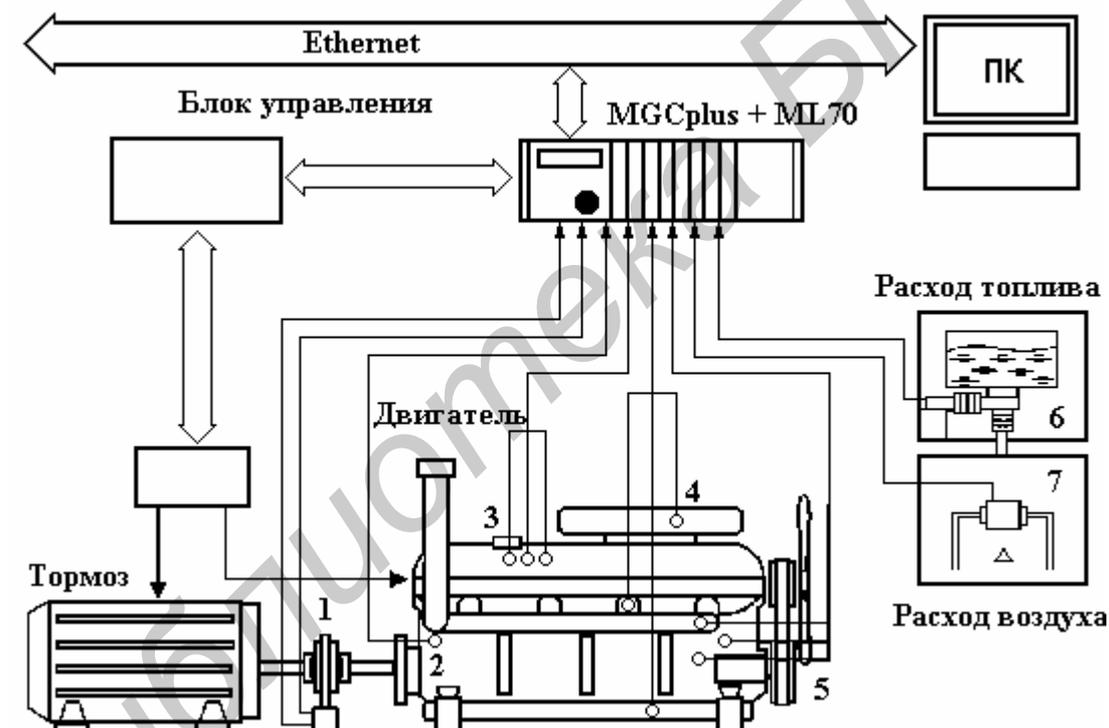


Рисунок 1 — Испытательный стенд контроля параметров двигателей внутреннего сгорания

При проведении испытаний одновременно контролируется большое количество параметров — температура, давление, ускорение, крутящий момент, расход топлива, расход воздуха и т.д. Наиболее целесообразно, с точки зрения решения поставленной задачи, преобразовать указанные неэлектрические величины в электрические сигналы измерительной информации. Для этой цели в состав испытательного стенда включены: 1 — преобразователь крутящего момента; 2 — акселерометр (преобразователь ускорения); 3 — преобразователи с цифровым интерфейсом; 4 — преобразователи давления; 5 — термопары; 6 — преобразователи расхода топлива; 7 — преобразователи расхода воздуха.

Кроме того, в состав испытательного стенда, при необходимости, могут быть включены следующие преобразователи и дополнительные устройства: тензорезисторы, термодпары, термометры сопротивления, источники напряжения и тока, индуктивные преобразователи, формирователи частотных и импульсных сигналов, переменные сопротивления, пьезорезистивные и пьезоэлектрические преобразователи.

В соответствии с классификацией, приведенной в части 1 учебного пособия «Преобразование и преобразователи измерительной информации», вышеперечисленные преобразователи подразделяются на генераторные и параметрические. Нами уже были рассмотрены основные виды генераторных измерительных преобразователей. Основной задачей настоящего учебного пособия является рассмотрение устройства и принципа действия параметрических измерительных преобразователей, их основных технических и метрологических характеристик, схем включения в измерительную цепь. Поскольку параметрические преобразователи являются пассивными элементами измерительной цепи, в данной части учебного пособия уделяется внимание источникам напряжения и тока.

В заключительной части пособия рассматривается большая группа преобразователей, предназначенных для преобразования магнитных величин и характеристик магнитных материалов в электрические сигналы измерительной информации.

Перечень использованных сокращений

| | | |
|------|---|---|
| ВИП | — | взаимоиндуктивный преобразователь |
| ЕП | — | емкостный преобразователь |
| ИНП | — | индуктивный преобразователь |
| ИП | — | измерительный преобразователь |
| ИУ | — | индикаторное устройство |
| ИЦ | — | измерительная цепь |
| КП | — | контактный преобразователь |
| МУП | — | магнитоупругий преобразователь |
| НЭВ | — | неэлектрическая величина |
| ОС | — | обратная связь |
| ПИП | — | первичный измерительный преобразователь |
| РП | — | реостатный преобразователь |
| СИ | — | средство измерений |
| СО | — | статистическая обработка |
| ТКС | — | температурный коэффициент сопротивления |
| ТМРП | — | терморезистивный преобразователь |
| ТРП | — | тензорезистивный преобразователь |
| ФП | — | функция преобразования |
| ФРП | — | фоторезистивный преобразователь |
| ЭДС | — | электродвижущая сила |

1 ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ

По виду выходной величины параметрические измерительные преобразователи (далее — ИП) подразделяются на резистивные, емкостные (электростатические), электромагнитные, электрохимические, ионизационные и ряд других. Их классифицируют также по виду естественной входной величины, по физическому явлению, положенному в основу их работы, и по другим признакам. Так как в пределах конкретной области техники применимость ИП по видам ограничена, рассмотрим лишь те из них, которые нашли наибольшее применение в области автоматики и радиоэлектроники.

1.1 Резистивные преобразователи

Принцип действия резистивных преобразователей основан на зависимости сопротивления постоянному току от измеряемой неэлектрической величины. Проводник длиной l с площадью поперечного сечения s и удельным сопротивлением ρ имеет сопротивление

$$R = \rho \frac{l}{s}. \quad (1.1)$$

При нормальных условиях и отсутствии мешающих факторов сопротивление резистивного ИП, определенное по формуле (1.1), называется *номинальным сопротивлением* и является его основным параметром.

При включении резистивного ИП в электрическую цепь на нем рассеивается мощность, определяемая протекающим током и падением напряжения на нем. При подаче на него большой мощности может произойти перегрев преобразователя и выход его из строя. Поэтому для резистивных преобразователей нормируется допустимая рассеиваемая мощность $P_{\text{доп}}$. Зная значение $P_{\text{доп}}$, можно определить допустимый рабочий ток (при максимальном сопротивлении) или допустимое рабочее падение напряжения (при минимальном сопротивлении). При небольших значениях собственного сопротивления преобразователей приходится учитывать сопротивление подводящих проводников и сопротивление утечки (изоляция), а при питании преобразователя переменным током - и паразитные реактивности. Поэтому для некоторых резистивных ИП нормируется допустимая рабочая частота или постоянная времени, что позволяет учесть паразитные параметры. Иногда приходится учитывать также собственные шумы и паразитные ЭДС.

В более общем случае на резистивный преобразователь воздействуют разнообразные по физической природе величины: электрические — $X_{\text{Э}}$, магнитные — $X_{\text{М}}$, тепловые — $X_{\text{Т}}$ и т.д. При этом изменение сопротивления ИП, обусловленное этими величинами, составит

$$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial X_{\text{Э}}} \Delta X_{\text{Э}} + \frac{\partial R}{\partial X_{\text{М}}} \Delta X_{\text{М}} + \dots + \frac{\partial R}{\partial X_{\text{Т}}} \Delta X_{\text{Т}} \dots \quad (1.2)$$

Частные производные в формуле (1.2) определяют чувствительность преобразователя к конкретному влияющему фактору, а функциональная зависимость

$$R = f(X_{\Theta}, X_M, X_T, \dots) \quad (1.3)$$

используется для построения разнообразных резистивных ИП. При этом другие величины считаются мешающими и служат источниками погрешности.

На практике широко используются резистивные ИП с проводящим элементом не только из металлов, но и из полупроводников и различных композиционных материалов. Рассмотрение резистивных преобразователей начнем с наиболее простых — контактных измерительных преобразователей.

1.1.1 Контактные преобразователи

Контактными (КП) называются преобразователи, в которых входная неэлектрическая величина преобразуется в замкнутое или разомкнутое состояние контактов, управляющих электрической цепью. Естественной входной величиной КП является механическое перемещение.

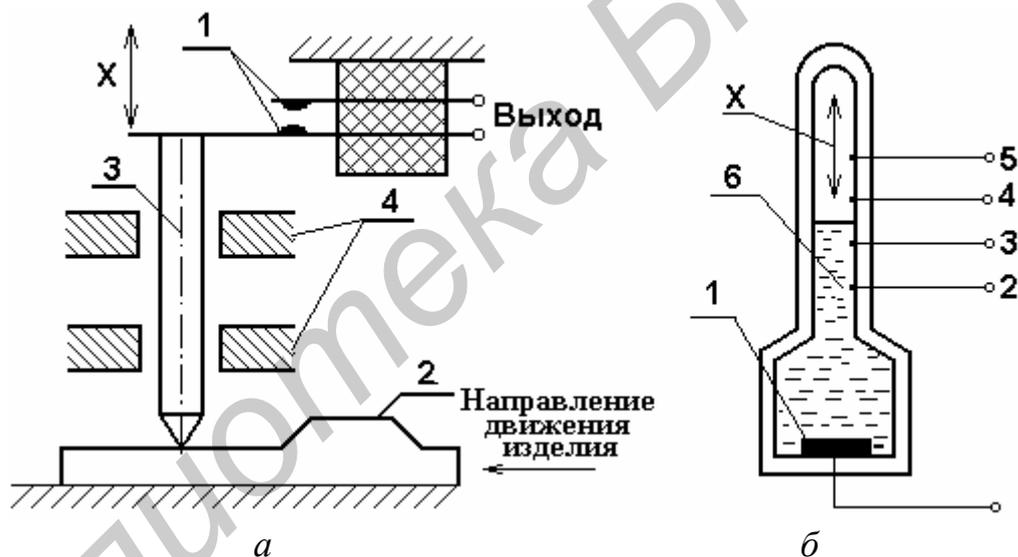


Рисунок 1.1 — Однопредельный (а) и многопредельный (б) контактные измерительные преобразователи

Различают одно- и многопредельные КП. На рисунке 1.1,а схематически показано устройство простейшего однопредельного КП. Замыкание или размыкание контактов 1 происходит в функции механического перемещения X , например, при изменении размера изделия 2. При этом изменяется положение штока 3, который передвигается в направляющих 4. Сопротивление между клеммами «Выход» изменяется в идеальном случае от нуля до бесконечности.

Примером многопредельного КП является ртутный термометр (рисунок 1.1,б), в котором изменение температуры окружающей среды преобразуется в пространственное изменение высоты столбика ртути 6. В результате контакт 1 последовательно соединяется с контактами 2–5, чем обеспечивается многопредельность преобразования.

Основными параметрами КП являются сопротивление между контактами

в замкнутом и разомкнутом состоянии и мощность управляемой ими цепи. Параметры КП определяются в первую очередь материалом контактных групп. Наиболее широко для этих целей применяют серебро, платину, вольфрам, сплавы платины с иридием и др. Основные *достоинства*: простота и низкая стоимость. *Недостатками* контактных преобразователей являются дискретность преобразования при малом количестве уровней и низкая надежность.

Область применения: допусковый контроль механических и теплотехнических параметров деталей и процессов. При коммутации цепей, потребляющих мощность до 50–100 мВт, контактные преобразователи можно включать непосредственно в измерительную цепь, при большей мощности - через усилители.

Источники погрешности: электрический и механический износ контактных групп и штока, а также риск возникновения электрической дуги (особенно в парах ртути). Погрешность срабатывания обычно не лучше 1–2 мкм.

1.1.2 Реостатные преобразователи

Реостатным преобразователем (РП) называется резистор переменного сопротивления (потенциометр, реостат, реохорд), движок которого перемещается по резистивному элементу в соответствии со значением измеряемой неэлектрической величины. Естественной входной величиной РП является угловое или линейное перемещение движка, а выходной — изменение активного сопротивления.

По типу проводящего элемента РП подразделяются на проволочные, пленочные, композиционные и т.д. В проволочных в качестве резистивного элемента используется проволочная обмотка из специальных сплавов, в пленочных - слой металлической или угольной пленки, в композиционных — слой из смеси проводящего компонента и связующего вещества. В технике измерений неэлектрических величин (НЭВ) наибольшее распространение получили проволочные РП.

Реостатный преобразователь — это прецизионный реостат, движок которого перемещается под действием измеряемой величины. Входной величиной преобразователя является угловое линейное перемещение движка, выходной - изменение его сопротивления.

На рисунке 1.2 схематически показано устройство проволочного РП с угловым перемещением движка. На каркас 1 из изоляционного материала намотана с равномерным шагом или виток к витку проволока 2. На верхней грани обмотки изоляция очищена, и по металлу проволоки скользит щетка 3. С ней жестко связана дополнительная щетка 5, которая, в свою очередь, скользит по токосъемному кольцу 4. Щётки 3, 5 изолированы от вала 6. Таким образом, в зависимости от углового перемещения вала токосъемное кольцо через щетки оказывается подключенным к той или иной части обмотки преобразователя.

В РП с линейным перемещением каркас не изогнут в виде цилиндра, и вместо кольца используется токосъемный стержень. В остальном их конструкции идентичны.

В реохордных РП проволока резистивного элемента линейно вытянута в

пространстве и каркас отсутствует.

Каркас реостатного преобразователя обычно изготавливается из текстолита, керамики, пластмасс и т.д. Высота каркаса по длине может быть как постоянной, так и переменной, что обеспечивает требуемую функциональную зависимость между пространственным перемещением движка и выходным сопротивлением. Толщина каркаса обычно в пределах 0,3...1,5 мм.

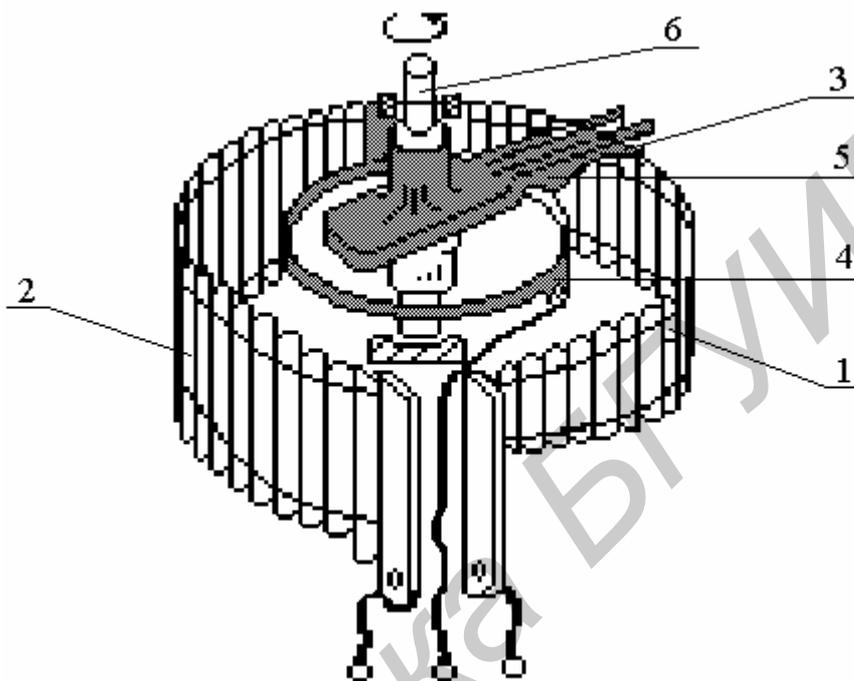


Рисунок 1.2 — Конструкция реостатного преобразователя с угловым перемещением движка

Для реостатных преобразователей применяют провод из специальных сплавов: манганина, константана, нихрома, фехралья, а в особо ответственных случаях — из сплава платины с иридием. Для изоляции витков обмотки провод покрывается изолирующим слоем эмали или окислов. Диаметр применяемых проводов 0,03...1 мм и выбирается в зависимости от допустимой плотности тока и рассеиваемой мощности.

Щетки (движок) выполняются в виде пластин или двух-трех проволочек из сплава платины с иридием или бериллием, из серебра или фосфористой бронзы. Материал щеток и контактного кольца (стержня) выбирается из условий минимума контактного сопротивления и контактного давления при высокой износо- и вибростойкости. Для обеспечения хорошего контакта движок должен прижиматься к обмотке с силой 10^{-3} – 10^{-4} Н. Сила создается благодаря упругости движка. При измерении переменных величин при переходе движка с одного витка на другой он «подскакивает», возникает пульсирующая сила, которая может нарушить контакт. По этой причине если преобразователь служит для измерения переменных величин или работает при вибрации, то сила прижатия должна быть увеличена. Большая сила нежелательна, поскольку при ее увеличении возрастает сила трения, препятствующая перемещению движка и увеличивающая износ обмотки и контактирующей поверхности движка.

В измерительной технике требуются реостатные преобразователи как с линейной, так и с нелинейной функцией преобразования. Одним из способов построения преобразователей с нелинейной функцией преобразования $R = f(X)$ является использование каркаса с переменной высотой (рисунок 1.3,а). При перемещении движка вдоль каркаса на шаг обмотки $\Delta X = \lambda$ сопротивление преобразователя изменяется на значение ΔR

$$\Delta R = \frac{dR}{dx} \lambda, \quad (1.4)$$

где dR/dx — производная требуемой функции преобразования $R = f(X)$ по перемещению движка X .

Функция преобразования (ФП) такого преобразователя показана на рисунке 1.3,б. При перемещении движка с одного витка на другой сопротивление изменяется на значение

$$\Delta R = \rho_1 \cdot l_{\text{пр}} = 2 \rho_1 (b+h), \quad (1.5)$$

где ρ_1 — сопротивление единицы длины провода; $l_{\text{пр}}$ — длина одного витка провода; h — высота каркаса; b — его толщина.

Из (1.4) и (1.5) можно определить зависимость высоты каркаса h от заданной функции преобразования

$$h = \frac{\lambda}{2\rho_1} \frac{dR}{dX} - b. \quad (1.6)$$

Если требуется линейная функция преобразования, то $dR/dx = \text{const}$ и высота каркаса h должна быть постоянной.

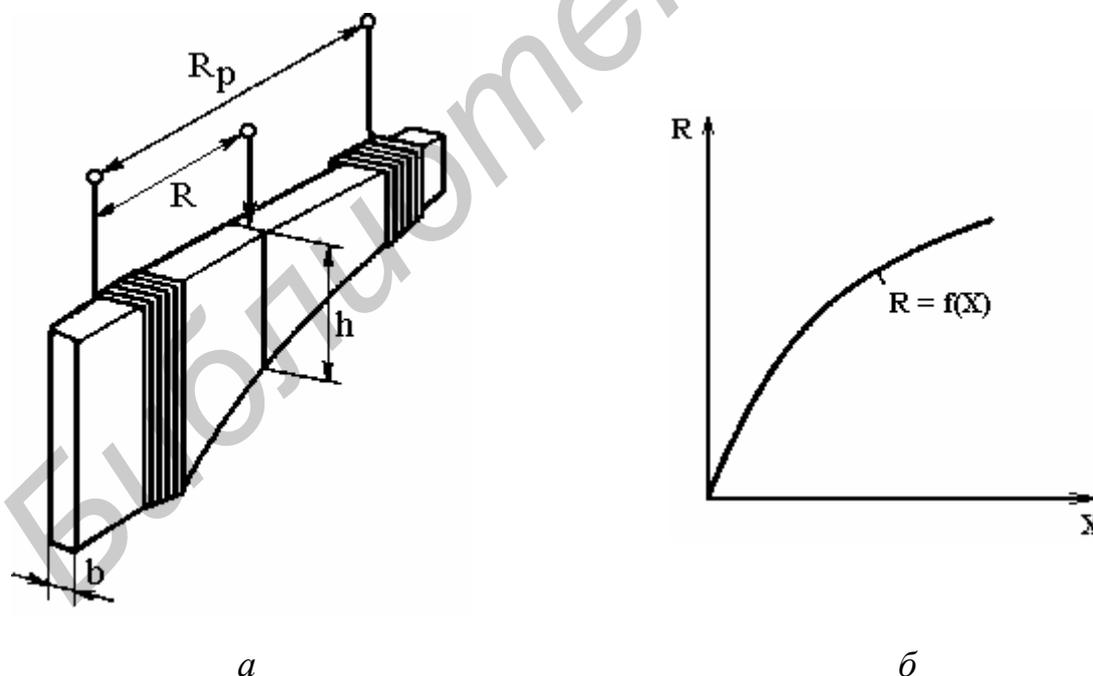


Рисунок 1.3 — Конструкция реостатного преобразователя с линейным перемещением движка (а) и его функция преобразования (б)

Изготовление каркаса с непрерывно изменяющейся высотой более сложно, чем изготовление каркаса с постоянной высотой. Для упрощения технологии прибегают к кусочно-линейной аппроксимации заданной нелинейной функции

преобразования (рисунок 1.4,а).

Для каждого интервала перемещения движка X , на котором аппроксимирующая функция линейна, высота каркаса постоянна. Каркас преобразователя получается ступенчатым, как показано на рисунке 1.4,б. Число ступеней равно числу интервалов кусочно-линейной аппроксимации.

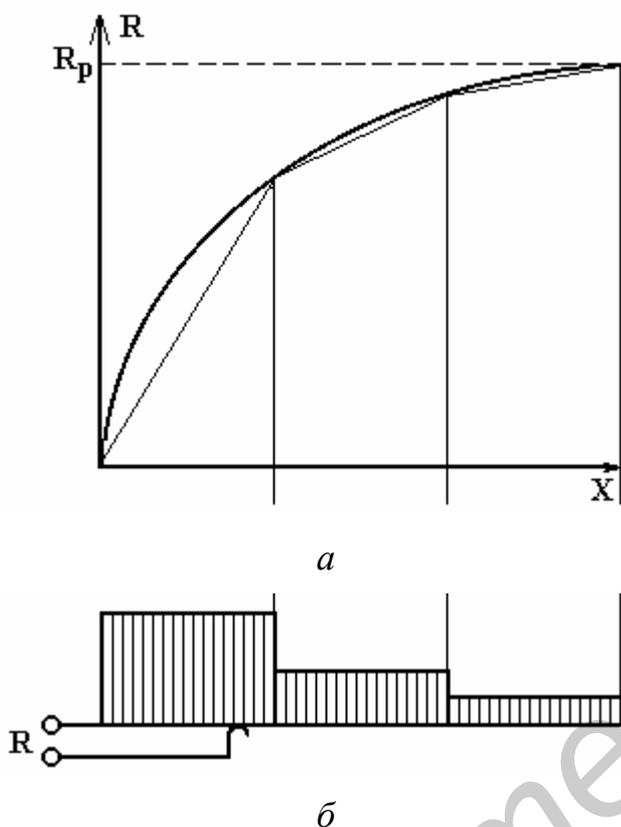


Рисунок 1.4 — Функция преобразования (а) и форма каркаса преобразователя (б) с линейно-кусочной аппроксимацией

РП включаются в основном в потенциметрические (делитель напряжения) и мостовые измерительные цепи. Питание осуществляется постоянным, а при необходимости переменным током. Напряжение питания обычно стабилизируют, а его значение выбирают из допустимой рассеиваемой мощности и номинального сопротивления. При включении РП в потенциметрическую цепь из-за ненулевого сопротивления источника и конечного сопротивления нагрузки возникает дополнительная погрешность нелинейности. Для ее уменьшения необходимо усложнить измерительную цепь (ИЦ).

Достоинства РП: высокая точность и возможность получения сложной функции преобразования. *Недостатки:* наличие механических подвижных частей, низкая износо- и вибростойкость, сложность конструкции.

Область применения: точное преобразование угловых и линейных перемещений в измерителях давления, веса, уровня и т.п., а также в следящих системах, генераторах функции и т.д.

Погрешности реостатных преобразователей. С изменением температуры изменяется сопротивление преобразователя. В основном это обуславливается

Индуктивное и емкостное сопротивление РП стремятся сделать минимальным для уменьшения погрешности преобразования на переменном токе.

При непрерывном движении щетки по обмотке происходит скачкообразное изменение выходного сопротивления на значение сопротивления одного витка. Следовательно, проводочные РП, так же как и КП, являются дискретными, т.е. имеют погрешность квантования. Эту погрешность можно уменьшить увеличением числа витков и уменьшением диаметра провода. От этого недостатка свободны непроводочные и реохордные РП.

Основные *параметры РП:* номинальное сопротивление, максимальная рассеиваемая на резистивном элементе мощность при номинальном сопротивлении, вид функциональной зависимости, чувствительность, погрешность преобразования.

температурным изменением удельного сопротивления провода. Сопротивление преобразователя определяется известной формулой

$$R_0 = R_0(1 + \alpha\theta). \quad (1.7)$$

Погрешность преобразования (изменение напряжения на нагрузке) можно рассчитать исходя из схемы включения, номинальных значений входящих в нее сопротивлений и их температурных коэффициентов. При включении преобразователя по потенциометрической схеме в режиме холостого хода изменение температуры не меняет распределения напряжений на элементах схемы и температурная погрешность отсутствует.

Реостатному преобразователю присуща также погрешность дискретности. Она обусловлена скачкообразным изменением сопротивления преобразователя ΔR при переходе движка с одного витка на другой. Если в качестве номинальной функции преобразования принять функцию, проходящую посередине "ступенек", то максимальное значение приведенной погрешности, обусловленное дискретностью,

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R}{2R_p}, \quad (1.8)$$

где R_p — полное сопротивление преобразователя.

Если преобразователь имеет пропорциональную функцию преобразования, то «скачки» сопротивления будут одинаковы по всему диапазону перемещения движка. В этом случае $R_p = n \cdot \Delta R$ и

$$\gamma_R = \pm \frac{1}{2}n, \quad (1.9)$$

где n — число витков в обмотке.

Трение в реостатном преобразователе вызывает случайные гистерезисные изменения силы и момента, необходимых для перемещения движка по обмотке. Это может привести к возникновению погрешности преобразователя, предшествующего реостатному.

Для уменьшения погрешности, обусловленной нелинейностью потенциометрической схемы включения преобразователя, следует уменьшать $\alpha = \frac{R_p}{R_H}$

(коэффициент нагрузки), т.е. увеличивать R_H . Однако практически значения сопротивления нагрузки часто невелики. В этом случае для уменьшения погрешности можно более рационально выбрать номинальную функцию преобразования.

Если в качестве номинальной функции преобразования принять зависимость, представленную прямой 1 на рисунке 1.5,а, то абсолютная погрешность вследствие нелинейности будет определяться выражением $\Delta U = U_H + U_X$. Для уменьшения погрешности следует уменьшать α , т.е. увеличивать R_H . Однако практически значения сопротивления нагрузки часто невелики. В этом случае для уменьшения погрешности можно более рационально выбрать номинальную функцию преобразования. Пусть действительной функцией преобразования является кривая 2 (рисунок 1.5,а). В качестве номинальной функции преобразо-

вания более целесообразно принять прямую 3. При этом, как видно из графика, на интервалах $0-a$, $a-b$, $b-c$ погрешность значительно уменьшена. Уменьшена она и на интервале $c-d$, хотя остается довольно большой. Для уменьшения погрешности преобразования диапазон изменения сопротивления преобразователя следует ограничить значением R'_p , а добавочное сопротивление $R_d = R_p - R'_p$ выполнить на отдельном резисторе и включить его последовательно с измерительным преобразователем (рисунок 1.5,б).

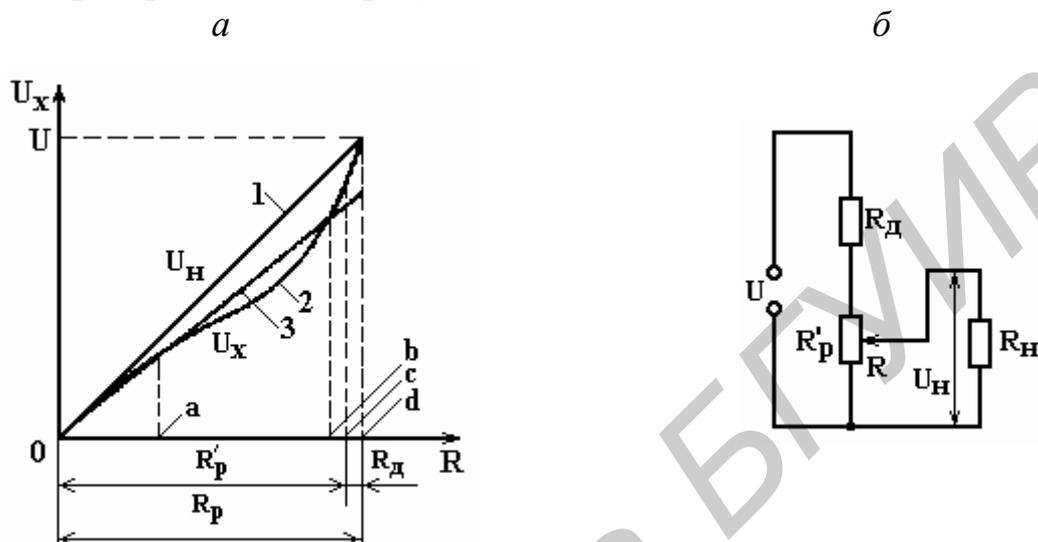


Рисунок 1.5 — Выбор функции преобразования (а) и схема включения реостатного преобразователя (б)

1.1.3 Тензорезистивные преобразователи

Знание механических напряжений, возникающих в конструкции при определенных условиях эксплуатации, является главным условием обеспечения надежности ее функционирования. Напряжения в материале вызывают его деформацию, а соотношения между этими двумя величинами — напряжениями и деформацией — определяются из теории сопротивления материалов.

Деформация ε — это отношение приращения Δl размера к первоначальному значению этого размера l , $\varepsilon = \Delta l/l$. Различают упругую деформацию — деформацию, которая исчезает после удаления вызывающей ее силы, и предел упругости — максимальное напряжение, не вызывающее остаточной деформации, большей 0,2 %. Порядок значения предела упругости, Н/мм²: для стали 200...800; для меди 30...120; для свинца 5...10.

Напряжение σ — сила на единицу площади сечения, $\sigma = F/s$.

Закон Гука. В области упругости деформация пропорциональна напряжению.

Модуль Юнга Y определяет деформацию в направлении действия силы:

$$\varepsilon_{\parallel} = \frac{1}{Y} \frac{F}{s} = \frac{1}{Y} \sigma. \quad (1.10)$$

Порядок значений модуля Юнга (Н/мм²): для стали 180...290; для меди 99...140; для свинца 5...18.

Коэффициент Пуассона k определяет деформацию, перпендикулярную на-

правлению действия силы:

$$\varepsilon_{\perp} = -k \cdot \varepsilon_{\parallel}. \quad (1.11)$$

В области упругости коэффициент Пуассона k обычно близок к 0,3.

Для преобразования деформации в электрический сигнал используются тензорезистивные преобразователи. Известно, что удельное сопротивление большинства металлов уменьшается с увеличением приложенного к ним давления. Действительно, сокращение объема и, следовательно, межатомных расстояний, вызванное давлением, приводит к уменьшению ρ . В самом деле, удельное сопротивление металла — это, в частности, диффузионный отток свободных электронов сквозь атомную решетку. Возможность диффузии тем выше, чем больше амплитуда колебаний атомов. С уменьшением атомной решетки при сближении атомов возрастают силы их взаимного притяжения и, следовательно, уменьшаются амплитуды атомных колебаний. При этом вероятность диффузии свободных электронов снижается; то же происходит и с удельным сопротивлением.

Принцип действия *тензорезистивных* преобразователей (ТРП) основан на явлении тензоэффекта, заключающегося в изменении активного сопротивления проводника или полупроводника при его механической деформации.

Тензорезистивный преобразователь (тензорезистор) представляет собой проводник, изменяющий свое сопротивление при деформации сжатия — растяжения. При деформации проводника изменяются его длина l и площадь поперечного сечения s . Деформация кристаллической решетки приводит к изменению удельного сопротивления ρ .

Естественной входной величиной такого преобразователя является механическая деформация, а выходной — активное сопротивление. Продифференцировав выражение (1.1), можно получить

$$dR = \frac{\rho}{s} dl - \frac{\rho l}{s^2} ds + \frac{l}{s} d\rho, \quad (1.12)$$

относительное изменение сопротивления проводника при этом

$$\varepsilon_R = \frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{ds}{s} + \frac{d\rho}{\rho} = \varepsilon_l + \varepsilon_{\rho} - \varepsilon_s, \quad (1.13)$$

где $\varepsilon_l, \varepsilon_s$ — относительное изменение длины и сечения (продольная и поперечная деформация); ε_{ρ} — относительное изменение удельного сопротивления.

На практике тензоэффект в материалах характеризуют коэффициентом относительной тензочувствительности (или тензочувствительностью)

$$K_T = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} = 1 + \frac{\varepsilon_{\rho}}{\varepsilon_l} - \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_l} = 1 + k + 2\mu, \quad (1.14)$$

где $\varepsilon_s/\varepsilon_l = -2\mu$ характеризует изменение поперечных размеров проводника при его удлинении; μ — коэффициент Пуассона; $\varepsilon_{\rho}/\varepsilon_l = k$ — относительное изменение удельного сопротивления материала при продольной деформации.

В зависимости от материала и конструкции различают следующие виды ТРП:

- металлические (проволочные, фольговые, пленочные);
- полупроводниковые;

— эластичные с жидким проводником (ртуть, электролиты) и изоэластичные;

— ТРП объемного сжатия.

Так как в жидких и текучих материалах (ртуть, электролиты в эластичной изоляционной оболочке, пластически деформируемые металлы) механические напряжения отсутствуют, то $\varepsilon_p = 0$. Следовательно, $k = 0$, $\mu = 0,5$ и $K_T = 2$. В твердых металлах ρ зависит от деформации и $k \neq 0$, а $\mu = 0,24 \dots 0,42$. Поэтому $k_T = 1,48 \dots 1,84$. Для полупроводников $1 + 2\mu \leq k$. Значит, $k_T = k$. При этом тензочувствительность может превышать 50...200 в зависимости от типа полупроводника и условий вырезания тензорезистора из монокристалла.

К материалам, используемым для изготовления ТРП, предъявляются следующие основные требования: высокая тензочувствительность, малый температурный коэффициент (ТКС), большая механическая прочность и воспроизводимость свойств (повторяемость).

Для изготовления металлических тензорезистивных преобразователей обычно используются сплавы на основе никеля. В таблице 1.1 приведены наиболее часто используемые составы и соответствующие коэффициенты преобразования.

Таблица 1.1 — Характеристики сплавов для металлических тензорезистивных преобразователей

| Сплав | Состав | Коэффициент преобразования |
|------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| Константан | 45 % Ni, 55 % Cu | 2,1 |
| Изоэластик | 52 % Fe, 36 % Ni, 8 % Cr, 4 5 (MnMo) | 3,5 |
| Карма | 74 % Ni, 20 % Cr, 3 % Cu, 3 % Fe | 2,1 |
| Нихром V | 80 % Ni, 20 % Cr | 2,5 |
| Платина-вольфрам | 92 % Pt, 8 % W | 4,1 |

Проволочные тензорезистивные преобразователи (рисунок 1.6) представляют собой обмотку из тонкой проволоки 3 (диаметр 0,02–0,05 мм), зигзагообразно уложенную и наклеенную на изолирующее основание 2 из тонкой бумаги или лаковой пленки. Сверху обмотка покрывается слоем лака 1, а к концам ее припаиваются или привариваются медные проводники 4. Полученная таким образом обмотка называется решеткой, а ее длина λ — базой тензорезистора. Преобразователь наклеивается на поверхность исследуемой детали с помощью специального клея и воспринимает ее поверхностную деформацию. Причём витки решетки должны быть параллельны вектору измеряемой деформации. При удлинении проводника происходит изменение его сопротивления.

Если при растяжении объем остается неизменным, то в соответствии с предпоследним выражением $\mu = 0,5$. Для многих материалов $\mu \approx 0,3$. Удельное сопротивление большинства металлов не зависит от растяжения; константа s очень мала. Следовательно, для большинства металлов эта чувствительность приблизительно равна 2, например, у нихрома 2,1–2,3, у константана 2,0–2,1, у хромеля 2,5 (правда, у манганина 0,5, а у никеля — 12).

Для большинства металлов можно предположить, что объем проводника и

удельное сопротивление не изменяются при наличии растягивающих или сжимающих усилий (отсутствует пьезорезистивный эффект). Поэтому для металлических тензорезистивных преобразователей получаем:

$$\frac{dR}{R} = S_1^R \frac{dl}{l} = 2 \frac{dl}{l}, \quad (1.15)$$

где S_1^R — чувствительность тензорезистивного преобразователя.

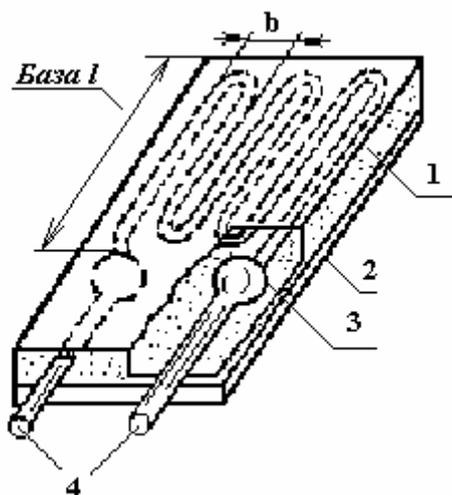


Рисунок 1.6 — Проволочный тензорезистивный преобразователь

Недостатками проволочных ТРП являются малый рабочий ток (рассеиваемая мощность), невысокая надежность работы из-за небольшой поверхности крепления чувствительного элемента. На практике используются проволочные ТРП с базой 5–20 мм и номинальным сопротивлением 300–500 Ом.

Фольговые тензорезистивные преобразователи изготавливаются методом травления тонкой фольги (толщина 1...12 мкм) из тензочувствительного материала, которая предварительно наносится на изоляционную основу из лаковой пленки. Характерные типы фольговых тензорезистивных преобразователей показаны на рисунке 1.7.

ТРП (рисунок 1.7,а), аналогично проволочным, предназначен для измерения линейных деформаций. На рисунке 1.7,б изображен преобразователь, состоящий из четырех тензорезисторов, составляющих плечи моста. При этом центральная часть испытывает растяжение, а периферийная — сжатие. К выводам 4 подключается дополнительный резистор R , подбором которого уравнивается измерительный мост. ТРП (рисунок 1.7,в) состоит из трех тензорезисторов и применяется в тех случаях, когда неизвестно направление действия механических напряжений. Тензорезистивный преобразователь (рисунок 1.7,г) состоит из двух тензорезисторов и используется для измерения деформации валов при скручивании.

Фольговые ТРП обладают в сравнении с проволочными рядом *достоинств*, обусловленных технологией изготовления. Это прежде всего высокая степень повторяемости параметров практически при любой форме и размерах решетки, значительно меньшие габариты (может быть получен размер базы до 0,6 мм), меньшая поперечная чувствительность за счет более широких попе-

Полупроводниковые материалы обычно имеют значение величины S_1^R много больше 2. Это связано с тем фактом, что больше не выполняется условие $\frac{dp}{dl} \approx 0$. В этих материалах доминирует пьезорезистивный эффект.

Под действием деформации в поперечном направлении сопротивление ТРП хотя и незначительно, но изменяется из-за наличия в решетке поперечных участков длиной b (см. рисунок 1.6). Отношение поперечной и продольной чувствительности определяется отношением b/λ и является одним из параметров.

речных участков решетки. Допустимая плотность тока у них выше вследствие большей площади теплового контакта плоской решетки с поверхностью исследуемой детали, а следовательно, лучшей теплоотдачи. По этой причине крепление фольговых ТРП к детали более надежно.

Пленочные ТРП имеют те же свойства, что и фольговые, и отличаются прежде всего технологией их изготовления. Они изготавливаются путем вакуумного напыления пленки из тензочувствительного материала на изоляционную основу через маску. Толщина тензорезистивного слоя меньше 1 мкм.

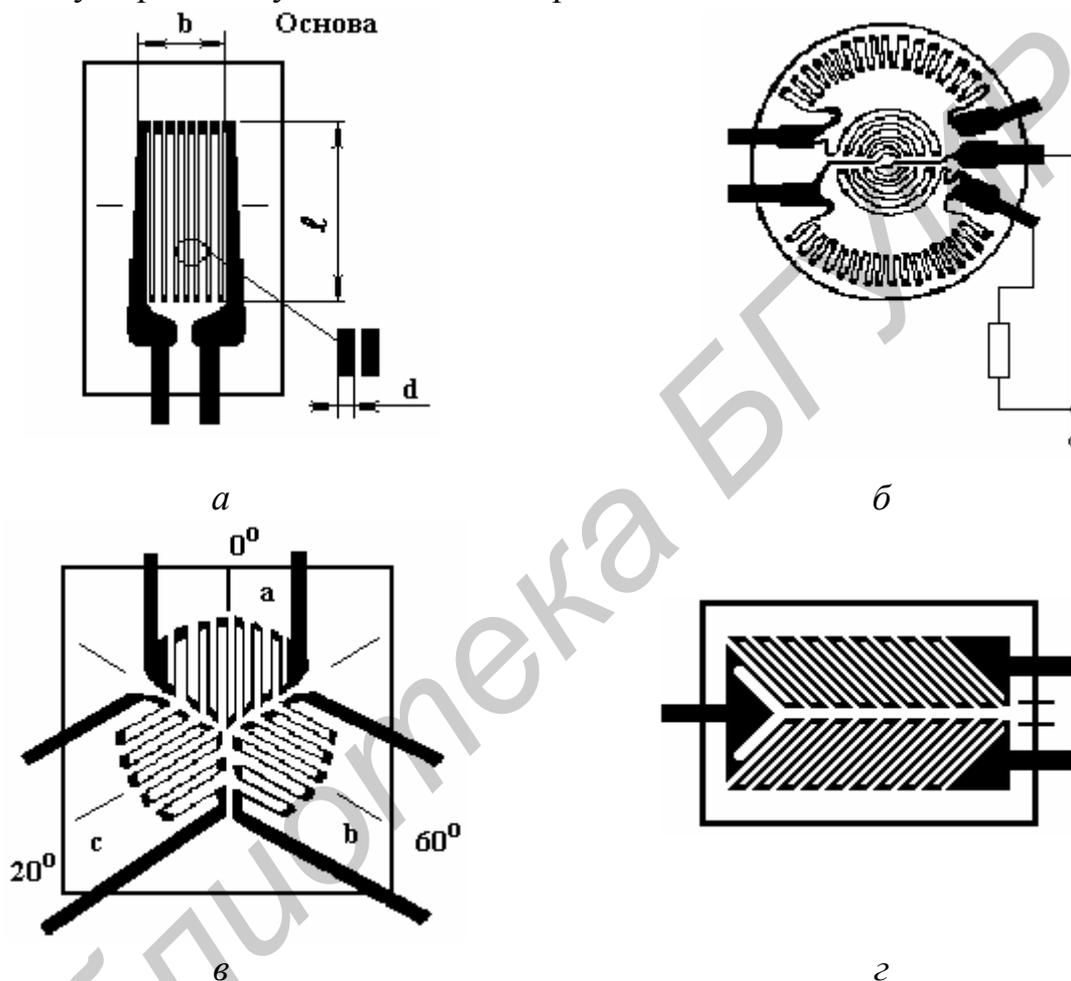


Рисунок 1.7 — Характерные типы фольговых тензорезистивных преобразователей

Как показано на рисунке 1.7,б, в тензорезистивном преобразователе полоски металлической фольги, выполненные в виде меандра, сделаны значительно шире в местах поворота для того, чтобы уменьшить чувствительность этого преобразователя к деформации, направленной перпендикулярно к рабочей оси. Если кроме значения деформации мы хотим также измерить направление деформации, то применяется комбинация тензорезистивных преобразователей, образующих определенную геометрическую структуру, например, три тензорезистивных преобразователя, ориентированные под углом 120° один по отношению к другому. Эта конструкция известна под названием розеточный тензорезистивный преобразователь.

Общим для всех металлических ТРП является одноразовое использование (будучи наклеенными на объект исследования, они не могут использоваться вторично). Поэтому градуировка ТРП осуществляется на нерабочих образцах и требования к воспроизводимости их параметров весьма жесткие. В последнее время разработаны специальные термопластичные цементы, способные размягчаться при нагревании. Применение таких цементов позволяет отклеивать тензорезисторы и использовать повторно.

Полупроводниковые ТРП дискретного типа (рисунок 1.8) представляют собой тонкую пластину полупроводникового материала 1, вырезанную из монокристалла в направлении одной из полуосей. На концах пластины расположены контактные площадки длиной 0,25–0,6 мм, к которым привариваются выводы 2. Пластина приклеивается на подложку 3 клеевым или лаковым слоем 4. Полупроводниковые ТРП имеют длину 2–30 мм, ширину 0,15–3 мм. Начальные сопротивления лежат в пределах от 50 Ом до 10 кОм, тензочувствительность 50–200.

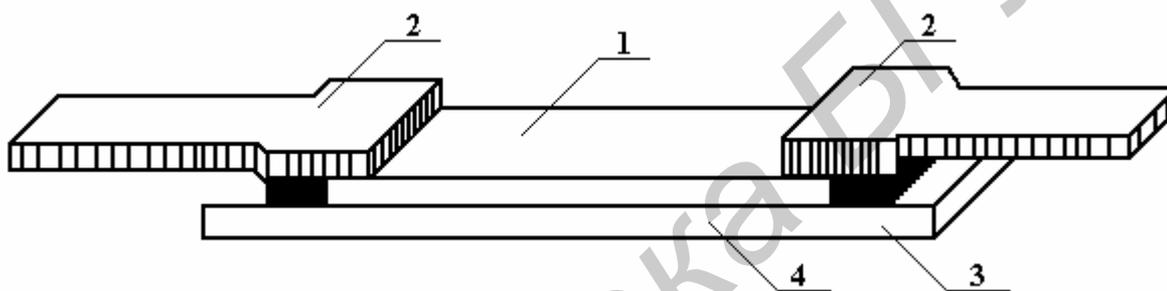


Рисунок 1.8 — Полупроводниковый тензорезистивный преобразователь

Для полупроводника с примесями типа p справедливо следующее соотношение: $\rho = \frac{1}{nqu}$, где n — концентрация примеси; q — заряд; u — подвижность

носителей заряда. Так как $u = \frac{q\tau}{m}$, находим, что $\rho = \frac{m}{nq^2\tau}$, где m — эффективная

масса, а τ — среднее время жизни носителей заряда. Эффективная масса определяется из взаимодействия между носителями заряда и кристаллической решеткой. Когда материал подвергается механическому воздействию, взаимодействие, а поэтому и эффективная масса, изменяются. Кремниевый тензорезистивный преобразователь при благоприятной ориентации кристалла может иметь настолько сильный пьезорезистивный эффект, что коэффициент чувствительности будет превосходить 200.

Достоинствами дискретных полупроводниковых ТРП являются высокая тензочувствительность, возможность изготовления преобразователей с малой базой (по сравнению с проволочными), функционирование в широком диапазоне температур. *Недостатки*: значительная температурная зависимость параметров, малая механическая прочность, трудность воспроизводимости параметров от образца к образцу, нелинейность характеристик.

Вследствие очень больших температурных погрешностей дискретные по-

полупроводниковые ТРП находят применение только для измерения малых динамических деформаций, когда решающим фактором становится высокая тензочувствительность.

В последние годы совершенствование планарной технологии позволило создавать ТРП путем выращивания полупроводниковых тензорезисторов непосредственно на упругом элементе из кремния или сапфира. В соответствии с этим различают два вида *интегральных* ТРП: с КНК-структурой (кремний на кремнии) и КНС-структурой (кремний на сапфире). У ТРП с КНК-структурой электрическая изоляция осуществляется за счет р-n-перехода, что обуславливает его недостаточно высокую надежность. Второй вид интегральных ТРП обладает лучшей стабильностью характеристик и надежностью.

Интегральные ТРП в сравнении с дискретными обладают следующими *достоинствами*: их упругие кристаллы имеют свойства, близкие к идеальным, поэтому погрешности гистерезиса и линейности незначительны, особенно в сравнении с металлическими ТРП. Интегральные тензорезисторы удерживаются на упругом элементе за счет внутримолекулярных сил, что исключает погрешности, связанные с передачей деформации от упругого элемента к тензорезистору. Технология позволяет на одном упругом элементе выращивать структуры в виде моста или полумоста с термокомпенсирующими элементами. Этим обеспечивается более высокая идентичность параметров, а благодаря малым геометрическим размерам обеспечивается большая идентичность внешних условий, что ведет к снижению погрешностей нуля и температурных.

Хотя полупроводниковые ТРП обладают очень высокой чувствительностью, они, кроме того, характеризуются большой нелинейностью и значительным температурным коэффициентом. Возьмем, к примеру, тензорезистивный преобразователь из металлической фольги: материал — константан; коэффициент чувствительности $k = 2,00 \pm 1 \%$; сопротивление $120 \text{ Ом} \pm 1 \%$; диапазон измерения $10^{-6} \leq \Delta l \leq 10^{-2}$; нелинейность 10^{-3} при $\Delta l/l < 10^{-3}$; температурный коэффициент $2 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$; коэффициент теплового расширения $1,4 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$; термоэлектрический потенциал контакта константана с медью 43 мкВ/К . Сравним этот тензорезистивный преобразователь с полупроводниковым, имеющим следующие параметры: $S_1^R \approx 50\text{--}200$; нелинейность 10^{-2} для диапазона измерения $\Delta l/l \leq 10^{-3}$; температурный коэффициент k приблизительно равен 10^{-3} К^{-1} .

Металлические и полупроводниковые ТРП позволяют измерять незначительные деформации (до десятых долей процента). Для измерения больших деформаций (30–50 %) используют *эластичные* (жидкостные) тензорезистивные преобразователи. Они представляют собой тонкие (диаметр 0,1–1,5 мм) резиновые капилляры, заполненные ртутью или электролитом. При деформации изменяется диаметр жидкого проводника при неизменном объеме, а следовательно, и его сопротивление.

Достоинства эластичных ТРП: большой допустимый ток и значительный диапазон измеряемых деформаций. *Недостатки*: малое значение номинального сопротивления и ограниченные температурный и частотный диапазоны.

Общими *достоинствами* ТРП в сравнении с другими ИП являются малые

габариты и вес, простота изготовления и низкая стоимость, сравнительно высокая линейность преобразования, возможность измерений с их помощью как статических, так и динамических нагрузок в широком частотном диапазоне деформаций, а также на криволинейных поверхностях и по заданным направлениям. *Недостатки*: малая мощность полезного сигнала и сравнительно невысокая точность (погрешность преобразования около 1 %).

Комплекс основных параметров ТРП включает номинальное сопротивление, коэффициент тензочувствительности, предельно допустимую деформацию решетки, длину базы, ширину решетки, погрешность преобразования и предельно допустимый ток (рассеиваемую мощность).

При всем многообразии задач, решаемых с помощью ТРП, можно выделить две основные области их применения: исследования физических свойств материалов, деформаций и напряжений в деталях и конструкциях; измерения механических величин, преобразуемых в деформацию упругого элемента (давление, вес и т.п.). Для первой области применения характерно большое количество точек тензометрирования, широкие диапазоны изменений параметров среды и невозможность градуировки измерительных каналов.

Для измерения линейной деформации в механической конструкции ТРП приклеивают к этой конструкции в направлении ожидаемого воздействия. Характеристики отвердевшего клея и основы преобразователя вызывают эффекты ползучести. Если деформация долговременна, то металлическая фольга или проволока будут медленно возвращаться к первоначальному ненапряженному состоянию (релаксация напряжений). При более высоких температурах этот эффект выражен особенно сильно. Кроме того, клей и основа преобразователя могут привести к появлению гистерезиса. После снятия воздействия металлическая фольга или проволока не сразу возвращаются к своему первоначальному состоянию, и будет казаться, будто все еще имеется небольшое остаточное воздействие. Для того чтобы ослабить эффекты ползучести и гистерезиса, клей и основа преобразователя должны быть тонкими, твердыми и иметь большие модули Юнга.

Металлический проводник ТРП, его основа и материал конструкции, к которой прикреплен преобразователь, должны иметь один и тот же коэффициент теплового расширения. Если соответствующие коэффициенты не равны, то вследствие изменения температуры будет наблюдаться кажущаяся деформация. Кроме того, дополнительно появится кажущаяся деформация, вызванная отличным от нуля температурным коэффициентом сопротивления используемого материала проводника. Поэтому часто применяют второй тензорезистивный преобразователь, компенсирующий эти эффекты.

Второй преобразователь расположен так, чтобы подвергаться тем же самым (например тепловым) возмущениям, но не испытывать никаких усилий в направлении деформации (так называемый пассивный, или фиктивный, тензорезистивный преобразователь, представленный на рисунке 1.9). Преобразователи включены в измерительный мост в местах расположения резисторов R1 и R4 (рисунок 1.12).

Таким образом, влияние большинст-

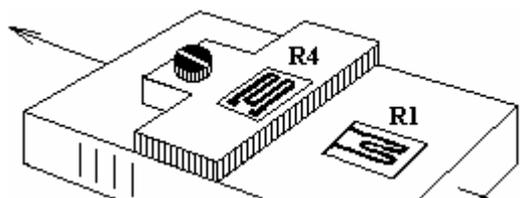


Рисунок 1.9 — Компенсация при измерении линейной деформации

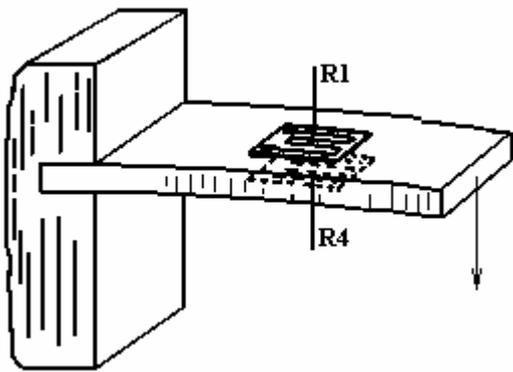


Рисунок 1.10 — Измерение деформации изгиба, компенсация при измерении изгиба

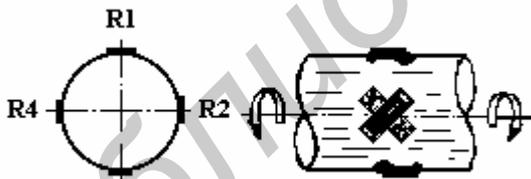


Рисунок 1.11 — Схема расположения преобразователей при измерении крутящего момента

На рисунке 1.12 представлена схема измерительного моста для компенсации мешающих воздействий. Если тензорезистивные преобразователи R1, R2, R3 и R4 соединены так, как показано на рисунке 1.12, то измерение линейной деформации будет нечувствительно к температуре, измерение изгиба - к растяжению и температуре, а измерение скручивания — даже к растяжению, изгибу, температуре и температурному градиенту вдоль вала. В случаях, проиллюстрированных рисунками 1.9 и 1.10, резисторы моста R2 и R3 являются постоянными

ва мешающих воздействий может быть значительно уменьшено. Рисунок 1.10 иллюстрирует метод измерения изгиба консольной балки. Рисунок 1.11 показывает способ измерения скручивания вала с помощью четырех тензорезистивных преобразователей, прикрепленных к валу под углом 45° к оси скручивания.

При измерениях ТПР включаются как в потенциометрические, так и в мостовые измерительные цепи. Потенциометрические из-за низкой чувствительности на практике используются редко, мостовые — значительно чаще, так как позволяют достичь более высокой чувствительности и добиться компенсации температурного дрейфа.

Так, при дифференциальном включении тензорезисторов в соседние плечи моста достигается снижение температурной погрешности нуля в 10–20 раз в сравнении с погрешностью собственно ТРП. Повышения чувствительности в 10 раз можно достичь питанием моста импульсным напряжением.

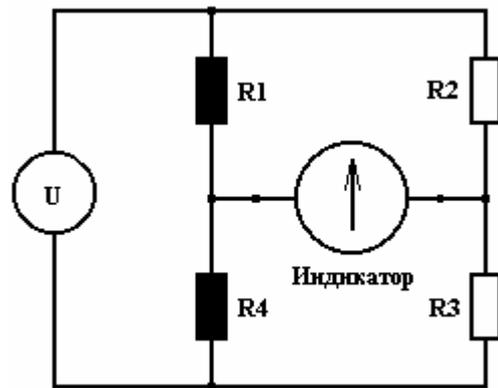


Рисунок 1.12 — Измерительный мост

ми резисторами, сопротивление которых выбирается из соображений максимальной чувствительности моста.

Погрешность тензорезистивных преобразователей. Тензорезисторы могут использоваться либо для измерения механических напряжений и деформаций, либо для измерения других механических величин: сил, давлений, ускорений и т.п., когда деформация является промежуточной величиной преобразования.

В первом случае для градуировки тензорезисторов из партии отбирают несколько штук и они наклеиваются на образцовую балку. С помощью гирь в балке создают определенные деформации. По значениям деформаций и соответствующим им сопротивлениям рассчитывается чувствительность наклеенных тензорезисторов. Это значение принимается в качестве номинального для всей партии. Чувствительность других тензорезисторов той же партии может отличаться от номинальной на 2–10 %.

Во втором случае тензорезисторы являются постоянными преобразователями. Отклонение их чувствительности от номинального значения учитывается при градуировке прибора, и результирующая погрешность прибора значительно меньше, чем в первом случае, и находится в пределах 0,2–0,5 %.

Наиболее существенным источником *погрешности* ТРП является температурная зависимость сопротивления и коэффициента линейного температурного расширения, который обычно не равен коэффициенту линейного расширения исследуемой детали. В результате возникают дополнительные деформации решетки, служащие источником погрешности. Погрешность может возникнуть и вследствие температурных изменений сопротивления преобразователя. При изменении температуры оно изменяется как вследствие изменения удельного сопротивления материала, так и вследствие изменения натяжения из-за различных температурных коэффициентов удлинения тензорезистора β_T и детали β_D , на которую он наклеен. Полное изменение сопротивления

$$\Delta R_t = R_0 [\alpha + S(\beta_D - \beta_T)] \Delta \theta, \quad (1.16)$$

где R_0 — сопротивление тензорезистора при нормальной температуре; S — его чувствительность; α — температурный коэффициент сопротивления; $\Delta \theta$ — изменение температуры.

Температурный коэффициент сопротивления константана можно изменять, изменяя его термообработку. Благодаря этому тензорезисторы можно изготавливать так, чтобы при наклеивке на определенный материал его сопротивление не зависело от температуры. Такие тензорезисторы называются термокомпенсированными.

Температурная погрешность проводниковых тензорезисторов в основном имеет аддитивный характер. Для ее компенсации используются дифференциальные схемы. При измерении механических напряжений применяют схему первого типа с двумя или четырьмя тензорезисторами. Рабочие тензорезисторы наклеивают на исследуемую деталь вдоль ожидаемой деформации, а компенсационные — поперек нее. При измерении других величин, например силы, используется дифференциальная схема второго типа. При этом на силоизмерительную пружину

ну с разных сторон наклеивают два тензорезистора. При изгибе пружины под действием прикладываемой силы один из них растягивается, другой — сжимается. В обоих случаях температурные условия и температурные изменения сопротивлений тензорезисторов одинаковы. Тензорезисторы включаются в смежные плечи моста, и это компенсирует температурную погрешность. Для увеличения чувствительности на силоизмерительную пружину можно наклеить четыре тензорезистора, причем преобразователи, воспринимающие деформации одного знака, должны включаться в противоположные плечи моста.

К другим источникам следует отнести «ползучесть» характеристики вследствие остаточных деформаций решетки, гистерезисные явления, изменение характеристик вследствие старения, снижение чувствительности с ростом частоты измеряемых деформаций.

В тензорезистивных приборах высокой точности и для получения преобразователей с унифицированными характеристиками, чтобы обеспечить их взаимозаменяемость, применяются мостовые схемы с нормирующими резисторами (рисунок 1.13,а).

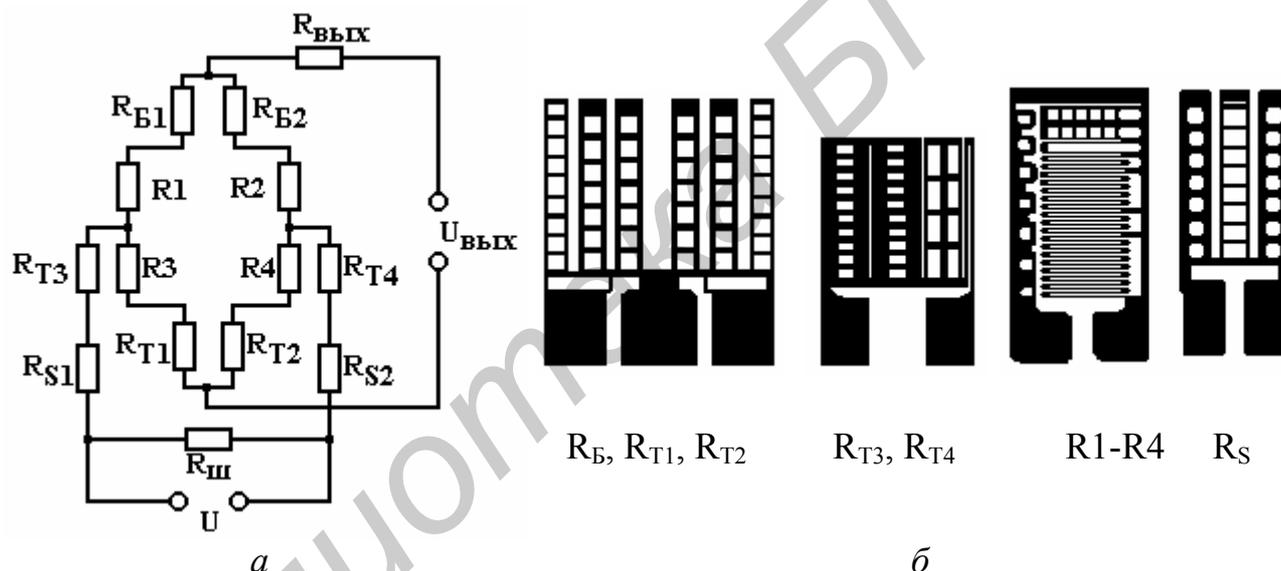


Рисунок 1.13 — Измерительный мост с нормирующими резисторами (а) и примеры используемых в нем тензорезистивных преобразователей (б)

На приведенной схеме R_1 – R_4 — тензорезисторы; R_{B1} и R_{B2} — резисторы, служащие для балансировки моста; R_{T1} и R_{T2} — термозависимые резисторы для компенсации аддитивной температурной погрешности; R_{S1} и R_{S2} — резисторы, изменяя сопротивления которых, можно регулировать чувствительность преобразователя; R_{T3} и R_{T4} — термозависимые резисторы, с помощью которых компенсируется температурное изменение чувствительности; R_{III} и $R_{ВЫХ}$ — резисторы, служащие для регулирования входного и выходного сопротивлений моста.

Фольговые нормирующие резисторы показаны на рисунке 1.13,б. Они выполнены таким образом, что, обрывая ту или иную перемычку на фольговой решетке, можно изменять значение сопротивления и тем самым регулировать параметры и характеристики измерительного моста и прибора в целом. Резисторы R_B и R_S изготовлены из константановой фольги, R_{T1} и R_{T2} — из медной,

R_{T3} и R_{T4} — из никелевой. При использовании мостовых схем с нормирующими резисторами погрешность преобразования с фольговыми тензорезисторами снижается до 0,03–0,05 %, а у преобразователей с полупроводниковыми тензорезисторами — до 0,1 %.

1.1.4 Терморезистивные преобразователи

Электрическое сопротивление любого материала в той или иной степени зависит от температуры. Если эта зависимость точно известна и достаточно воспроизводима, то ею можно воспользоваться, переходя от измерения температуры к измерению сопротивления.

Сопротивление чистых металлов можно записать в виде степенного ряда

$$R(\theta) = R(\theta_0) [1 + \alpha(\theta - \theta_0) + \beta(\theta - \theta_0)^2 + \gamma(\theta - \theta_0)^3 + \dots], \quad (1.17)$$

где $R(\theta)$ — сопротивление преобразователя при температуре θ , а $R(\theta_0)$ — его сопротивление при определенной эталонной температуре θ_0 .

Если температурный диапазон не очень велик, то достаточно оставить первые два члена ряда и преобразователь можно считать почти линейным.

Сопротивление чистого металла, кристаллическая решетка которого не имеет примесей или нарушений, имеет положительный температурный коэффициент α . Сопротивление обусловлено взаимодействием свободных электронов проводимости с колеблющимися атомами кристаллической решетки. С повышением температуры увеличивается амплитуда колебаний кристаллической решетки, что приводит к увеличению средней длины свободного пробега электронов и сокращению среднего времени τ (времени релаксации) между столкновениями. Можно показать, что время релаксации τ обратно пропорционально абсолютной температуре и поэтому сопротивление пропорционально абсолютной температуре.

В полупроводниках, как чистых, так и с примесями, этот эффект скрыт другим, более сильным эффектом: число свободных носителей заряда зависит от абсолютной температуры. Чем выше температура, тем большее число электронов из валентной зоны преодолевает запрещенную зону и попадает в зону проводимости (в случае чистых полупроводников) или возрастает число активированных донорных или акцепторных атомов (в случае примесных полупроводников). Число свободных носителей заряда увеличивается согласно следующему соотношению:

$$n = n_0 e^{-\frac{E_g}{2k\theta}}, \quad (1.18)$$

где E_g — энергия, необходимая для преодоления запрещенной зоны; k — постоянная Больцмана.

Таким образом, сопротивление полупроводника уменьшается при повышении температуры. Полупроводники имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления (отрицательный ТКС).

Принцип действия терморезистивных преобразователей (ТМРП) основан на зависимости активного сопротивления проводников и полупроводников от

температуры. Следовательно, их естественной входной величиной является температура, а выходной — изменение электрического сопротивления.

Величиной, численно характеризующей степень влияния температуры на сопротивление резистивного элемента, как известно, является температурный коэффициент сопротивления (ТКС):

$$\alpha_{\theta} = \frac{\Delta R}{R \cdot \Delta \theta}, \quad (1.19)$$

где ΔR — абсолютное изменение сопротивления при изменении температуры на θ° по Цельсию или Кельвину; R — сопротивление при начальной температуре θ_0 (обычно при нормальных условиях или при температуре 0°C).

ТКС может быть положителен (для чистых металлов), отрицателен (для полупроводников), практически независимым либо иметь линейную, квадратичную или более сложную зависимость от температуры для других материалов. К материалам, из которых изготавливаются ТМРП, предъявляются требования высокой стабильности ТКС и возможно большего его значения, линейной зависимости сопротивления от температуры, хорошей воспроизводимости свойств и инертности к воздействию окружающей среды.

К материалам, наиболее удовлетворяющим этим требованиям, относятся медь, платина, вольфрам, никель; полупроводники на основе окислов переходных металлов титана, кобальта, никеля и такие полупроводники, как титанат бария, двуокись ванадия и т.п. Металлические ТМРП принято называть *терморезисторами*, а полупроводниковые — *термисторами*.

Терморезисторы изготавливаются обычно в виде проволочных резисторов (рисунок 1.14) с бифилярной обмоткой 1, расположенной на изоляционном каркасе 2. К обмотке привариваются выводы 3. Для защиты от агрессивной среды вся конструкция покрывается слоем стекла 4. Каркас, обычно цилиндрической или прямоугольной формы, изготавливается из материала с малым температурным коэффициентом линейного расширения: слюды, стекла, керамики. Выводы — из меди или серебра. Основное требование к выводам — значительно меньшее их сопротивление в сравнении с обмоткой. В противном случае погрешность из-за сопротивления выводов станет чрезмерно большой.

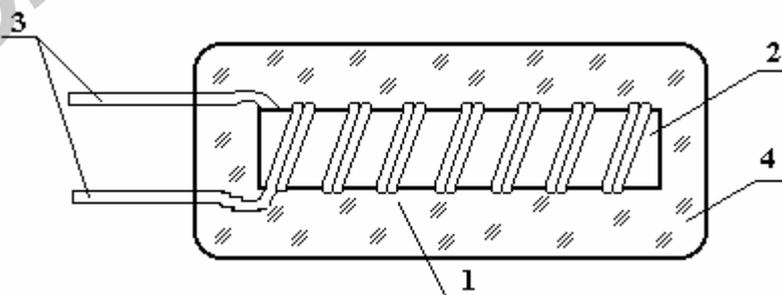


Рисунок 1.14 — Конструкция терморезистивного преобразователя

Благодаря своей дешевизне и линейной зависимости сопротивления от температуры, широкое применение получили медные ТМРП. Как известно, для меди

$$R_{\theta} = R_0(1 + \alpha_{RM} \times \theta), \quad (1.20)$$

где $\alpha_{RM} = 4,26 \cdot 10^{-3}$ 1/град — ТКС меди; R_0 — сопротивление при 0°C .

При известном сопротивлении R_{θ_1} при температуре θ_1 сопротивление ТМРП при температуре θ_2 можно определить как

$$R_{\theta_2} = R_{\theta_1} \frac{1 + \alpha_R \times \theta_2}{1 + \alpha_R \times \theta_1}. \quad (1.21)$$

Обмотка медных терморезисторов изготавливается из изолированного провода диаметром до 0,1 мм.

Область применения — измерение температуры в химически инертной среде при отсутствии влаги. Верхний предел преобразования температуры медных терморезисторов — плюс 200°C (при более высокой температуре медь быстро окисляется), нижний — минус 200°C , а при индивидуальной градуировке — до минус 260°C . К числу недостатков медных ТМРП относится малое удельное сопротивление проводящего материала. Промышленностью выпускаются медные ТМРП марки ТСМ.

Очень широкое распространение получили платиновые ТМРП. Их сопротивление в области температур от 0 до $+650^\circ \text{C}$ выражается соотношением

$$R_t = R_0(1 + A\theta + B\theta^2), \quad (1.22)$$

в области температур от минус 200 до 0°C — соотношением

$$R_\theta = R_0[1 + A\theta + B\theta^2 + C(\theta - 100) \times \theta^3], \quad (1.23)$$

где A, B, C — постоянные величины, принимающие для платины значения:

$$A = 3,908 \cdot 10^{-3} (1/^\circ \text{C});$$

$$B = 5,9784 \cdot 10^{-7} (1/^\circ \text{C})^2;$$

$$C = 4,482 \cdot 10^{-12} (1/^\circ \text{C})^4.$$

Обмотки платиновых терморезисторов выполняются из провода диаметром 0,02 мм. Область применения платиновых ТМРП находится в диапазоне температур от -260 до $+1100^\circ \text{C}$. Благодаря химической инертности платины, допускается использование их в химически агрессивных средах, за исключением восстановительной среды с углеродом, парами кремния, калия и т.д. Промышленностью выпускаются миниатюрные платиновые терморезисторы, применяемые для измерения температурного градиента. Несмотря на достаточно высокую точность аппроксимации уравнениями (1.22), (1.23) температурной зависимости платиновых ТМРП, для них требуется индивидуальная градуировка. Это является их основным недостатком. Серийные, платиновые ТМРП имеют марку ТСП.

На практике, хотя и значительно реже, используются также вольфрамовые и никелевые ТМРП.

Термисторы отличаются меньшими габаритами, весом, большими значениями ТКС и более сложной (экспоненциальной) зависимостью сопротивления от температуры:

$$R_\theta = A \cdot \exp\left(-\frac{B}{\theta}\right), \quad (1.24)$$

где A, B — коэффициенты с размерностями сопротивления и температуры, определяемые конкретным типом термистора; θ — температура по Кельвину.

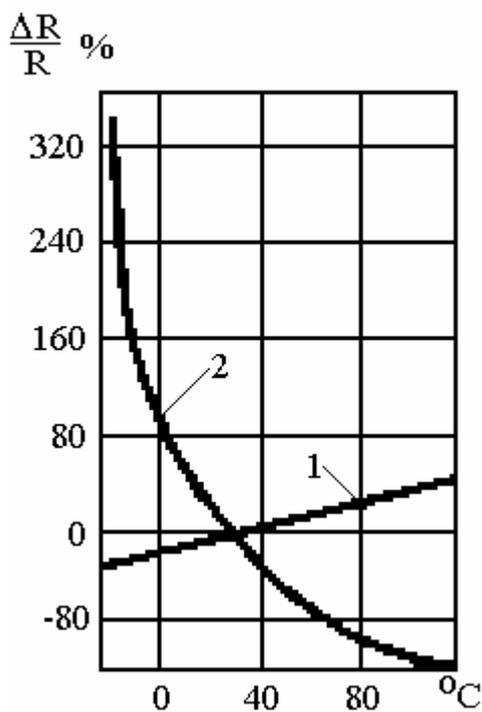


Рисунок 1.15 — Зависимости сопротивления от температуры терморезистора (1) и термистора (2)

Конструктивно термисторы имеют разнообразную форму. На рисунке 1.16 показаны в качестве примера некоторые разновидности серийных полупроводниковых ТМРП. ММТ-1 и КМТ-1 изготовлены в виде полупроводникового цилиндрического стержня с контактными колпачками и выводами, с эмалевым защитным покрытием. Предназначены для работы в сравнительно узком диапазоне температур в сухой инертной среде.

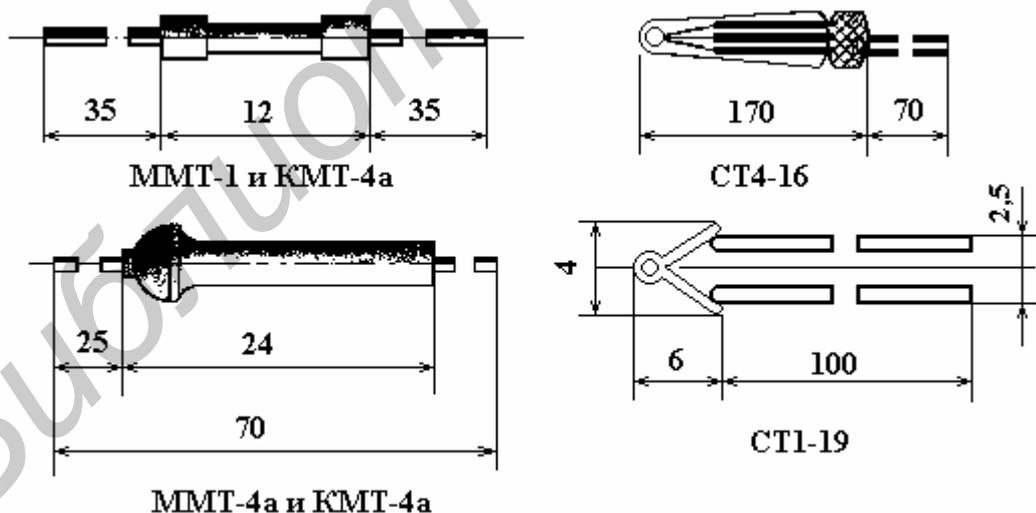


Рисунок 1.16 — Примеры терморезистивных преобразователей

Термисторы ММТ-4 и КМТ-4а помещены в металлический герметизированный корпус, и их можно использовать в более суровых условиях, в том числе в жидкостях, химически инертных к материалу корпуса.

Термисторы СТ1-19 — каплевидной формы в миниатюрном исполнении. Чувствительный элемент оплавлен стеклом. В СТ4-16 термочувствительный элемент бусинкового типа также оплавлен стеклом. Обладает повышенной ста-

На рисунке 1.15 показаны для сравнения температурные зависимости медного терморезистора 1 и полупроводникового термистора 2, приведенные к температуре 20 °С. Из зависимости 2 (см. рисунок 1.15) видно, что ТКС для полупроводника отрицателен и обратно пропорционален квадрату температуры. При неизвестных А и В, но известных сопротивлениях R_{θ_1} , R_{θ_2} при температурах θ_1 , θ_2 для любой температуры θ_0 можно определить:

$$R_{\theta} = R_{\theta_1} \cdot \exp \frac{B}{\frac{1}{\theta_0} - \frac{1}{\theta_1}}, \quad (1.25)$$

$$\text{где } B = \frac{\theta_2 \cdot \theta_1}{\theta_2 - \theta_1} \cdot \ln \frac{R_{\theta_1}}{R_{\theta_2}}.$$

Конструктивно термисторы имеют разнообразную форму. На рисунке 1.16 показаны в качестве примера некоторые разновидности серийных полупроводниковых ТМРП. ММТ-1 и КМТ-1 изготовлены в виде полупроводникового цилиндрического стержня с контактными колпачками и выводами, с эмалевым защитным покрытием. Предназначены для работы в сравнительно узком диапазоне температур в сухой инертной среде.

бильностью и хорошей повторяемостью параметров (не хуже 5 %).

Недостатками термисторов являются нелинейность функции преобразования, значительный разброс параметров от образца к образцу, сравнительно небольшой диапазон рабочих температур.

В таблице 1.2 приведены характеристики для некоторых типов терморезистивных преобразователей, взятые из соответствующих стандартов. В столбце «Номинальное сопротивление» приведены крайние значения рядов номинальных сопротивлений.

Таблица 1.2 — Характеристики терморезистивных преобразователей

| Тип преобразователя | Номинальное сопротивление при 20° С, кОм | Постоянная В, 10 ² К | Диапазон рабочих температур | Мощность рассеяния | | | ТКС при 20° С, К ⁻¹ | Постоянная времени, с |
|---------------------|--|---------------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|--|-----------------------|
| | | | | P _{min} , мВт | P _{max} , Вт | P _{доп} , мВт | | |
| КМТ-1 | 22–1000 | 36–72 | –60...+180 | 1,0 | 1,0 | 0,3 | –0,043... | 85 |
| КМТ-8 | 0,1–10 | | | 3,0 | 0,8 | 1,0 | ...–0,084 | 115 |
| ММТ-1 | 1–220 | 2,06–43 | –60...+125 | 1,3 | 0,6 | 0,4 | –0,024... ...–0,05 | 85 |
| ММТ-8 | 0,001–0,047 | 20,6–27,5 | –45...+70 | 10 | 0,6 | 2,0 | –0,024... ...–0,032 | — |
| | 0,056–0,100 | 22,3–29,2 | | | | | –0,024... ...–0,034 | |
| | 0,120–1,000 | 22,3–34,3 | | | | | –0,026... ...–0,04 | |
| ММТ-9 | 0,01–4,7 | 20,6–43 | –60...+125 | 10 | — | 2,0 | –0,024... ...–0,05 | — |
| СТЗ-23 | 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7 Ом | 26–32 | –60...+125 | | | | –0,0305... ...–0,0375 | |
| СТЗ-17 | 0,023–0,330 | 25,8–38,6 | –60...+100 | 0,8 | — | 0,2 | –0,03... ...–0,045 –0,042... ...–0,07 | 30 |
| СТ1-17 | 0,330–22 | 36–80 | | 0,5 | | | | |

В последнее время появился еще один тип ТМРП на основе композиционных смесей, стабильно работающий при высоких (600–700 °С) температурах, а также ТМРП с положительным ТКС на основе титанатбариевой керамики, которые получили название *позисторы*.

Недостатками ТМРП является низкая повторяемость параметров даже в пределах одной технологической партии, малая мощность полезного сигнала, нелинейность ФП. *Достоинства*: малые габариты и вес, простота конструкции, надежность, возможность использования в любой среде. В настоящее время практически все виды ТМРП стандартизованы. Все более широкое применение находят терморезисторы с косвенным подогревом, а также терморезистивные преобразователи на основе диодных и транзисторных структур.

Кроме измерения температур ТМРП применяются для измерений скорости и плотности потока вещества, для анализа состава газов, в автоматических регуляторах температуры.

С ТМРП применяют преимущественно *мостовые* ИЦ. Основное отличие их от мостов, используемых с другими резистивными ИП, обусловлено необходимостью учета сопротивления подводящих проводов. Поэтому терморезисто-

ры, особенно металлические, включаются в мост по трех- и четырехпроводной схеме. Иногда кроме ТМРП в ИЦ включается ещё ряд резисторов, позволяющих линеаризовать результирующую функцию преобразования. С развитием микроэлектроники ТМРП часто стали включать в ИЦ с операционными усилителями, как для линеаризации ФП, так и для преобразования сопротивления в напряжение. Особенно часто это делают в цифровых измерителях и регуляторах. В частности, применяя такие цепи, удается уменьшить погрешность нелинейности платинового терморезистора до 0,1...0,2 в диапазоне температур от 0 до +400° С.

Погрешности терморезистивных преобразователей. Погрешности преобразования ТМРП обусловлены нестабильностью во времени начального сопротивления и ТКС, сопротивлением проводов, соединявших преобразователь с измерительным устройством (ИУ), нелинейностью функции преобразования, тепловой инерционностью, нагревом преобразователя измерительным током.

Наиболее существенной погрешностью терморезистивных преобразователей является погрешность, обусловленная изменением сопротивления линии передачи вследствие колебаний температуры окружающей среды. Сопротивление линии передачи при больших расстояниях (до нескольких сотен метров) от преобразователя до измерительного прибора может достигать 5 Ом, тогда как начальное сопротивление самого преобразователя составляет 46 Ом. В этом случае при использовании медной линии передачи погрешность преобразования может составить +3,26° С.

Для уменьшения погрешности от изменения сопротивления линии передачи при колебании температуры окружающей среды применяют так называемые многопроводные линии передачи, когда к преобразователю подводится более двух проводов.

Кроме погрешности от колебаний температуры линии передачи следует учитывать также погрешность, обусловленную нагревом преобразователя протекающим по нему током. Для уменьшения этой погрешности значение тока, протекающего через преобразователь, следует снижать до минимума. С другой стороны, желательно допустить возможно большее значение рабочего тока, поскольку при этом повышается чувствительность измерительной цепи и оказывается возможным использовать менее чувствительный измерительный прибор.

В технических характеристиках терморезистивных преобразователей кроме допустимой мощности рассеяния приводится коэффициент рассеяния — мощность рассеяния, при которой нагрев преобразователя изменяется на 1 градус. Таким образом, считая температуру нагрева прямо пропорциональной мощности рассеяния, можно при известном значении термосопротивления найти приемлемое значение рабочего тока для допустимого значения погрешности преобразования. Обычно в проводниковых преобразователях значение тока не превышает 1–15 мА.

При помещении терморезистивного преобразователя в рабочую среду, температура которой подлежит измерению, необходимо учитывать, что температура его термочувствительного элемента будет отличаться от температуры рабочей среды вследствие потерь тепла на излучение и на защитных элементах

преобразователя (защитные трубы, эмали, оболочки). Это неизбежно приведет к возникновению погрешности преобразования. Поскольку конструктивно терморезистивные и термоэлектрические преобразователи аналогичны, то для определения погрешности преобразования, обусловленной тепловыми потерями, можно воспользоваться выводами части 1 настоящего учебного пособия, сделанными для термопар. Там же приведены соображения по установке термопар при измерении температуры различных сред, которые полностью применимы и к терморезистивным преобразователям.

1.1.5 Фоторезистивные преобразователи

Сопротивление фоторезистора, являющегося резистивным преобразователем, испытывает воздействие потока излучения с определенным распределением энергии по спектру. Соединенный с соответствующей схемой формирования сигнала фоторезистор является одним из самых чувствительных оптических преобразователей. Физическое явление, на котором основано действие преобразователя, — фотопроводимость — представляет собой внутренний фотоэффект, т.е. освобождение в материале преобразователя электрических зарядов под действием света и обусловленное этим увеличение проводимости.

Таким образом, *принцип действия* фоторезистивных преобразователей (ФРП) основан на явлении внутреннего фотоэффекта, присущем только полупроводникам и некоторым диэлектрикам и заключающемся в уменьшении сопротивления постоянному току при освещении источником света.

Значение темнового сопротивления ФРП зависит от формы, размеров, температуры и физико-химической природы фоточувствительного слоя фоторезистора. Очень высоким темновым сопротивлением (от 10^4 до 10^9 Ом при 25°C) обладают полупроводники: PbS — сернистый свинец (фоторезисторы типа ФС-А), CdSe — селенид кадмия (фоторезисторы типа ФС-Д), поликристаллический (фоторезисторы типа ФС-К) и монокристаллический (фоторезисторы типа ФС-КМ) CdS — сернистый кадмий и др. Небольшое (от 10 до 10^3 Ом при 25°C) темновое сопротивление у InSb, InAs, CdHgTe. С увеличением освещенности темновое сопротивление быстро падает.

Свойства фоторезистора можно описать эквивалентной электрической схемой, в которой темновое сопротивление R_T включено параллельно сопротивлению R_C , определяемому фотоэлектрическим действием падающего светового потока:

$$R_C = \alpha\Phi^{-\gamma}, \quad (1.26)$$

где α зависит от конкретного материала, температуры и от спектра падающего излучения, а γ обычно имеет значение от 0,5 до 1.

При этих условиях сопротивление фоторезистора R_Φ определяется в соответствии с формулой

$$R_\Phi = \frac{R_T R_C}{R_T + R_C} = \frac{R_T \alpha \Phi^{-\gamma}}{R_T + \alpha \Phi^{-\gamma}} \quad (1.27)$$

и в обычных случаях, когда $R_C \ll R_T$, имеем $R_\Phi = \alpha\Phi^{-\gamma}$.

Конструктивно ФРП представляют собой однородную полупроводниковую пластину с контактами, помещенную в корпус с жесткими или гибкими

выводами (рисунок 1.17). Фоторезисторы изготавливаются в виде дифференциальных преобразователей, позиционно-чувствительных бесконтактных реохордов или потенциометров, управляемых перемещением светового пятна.

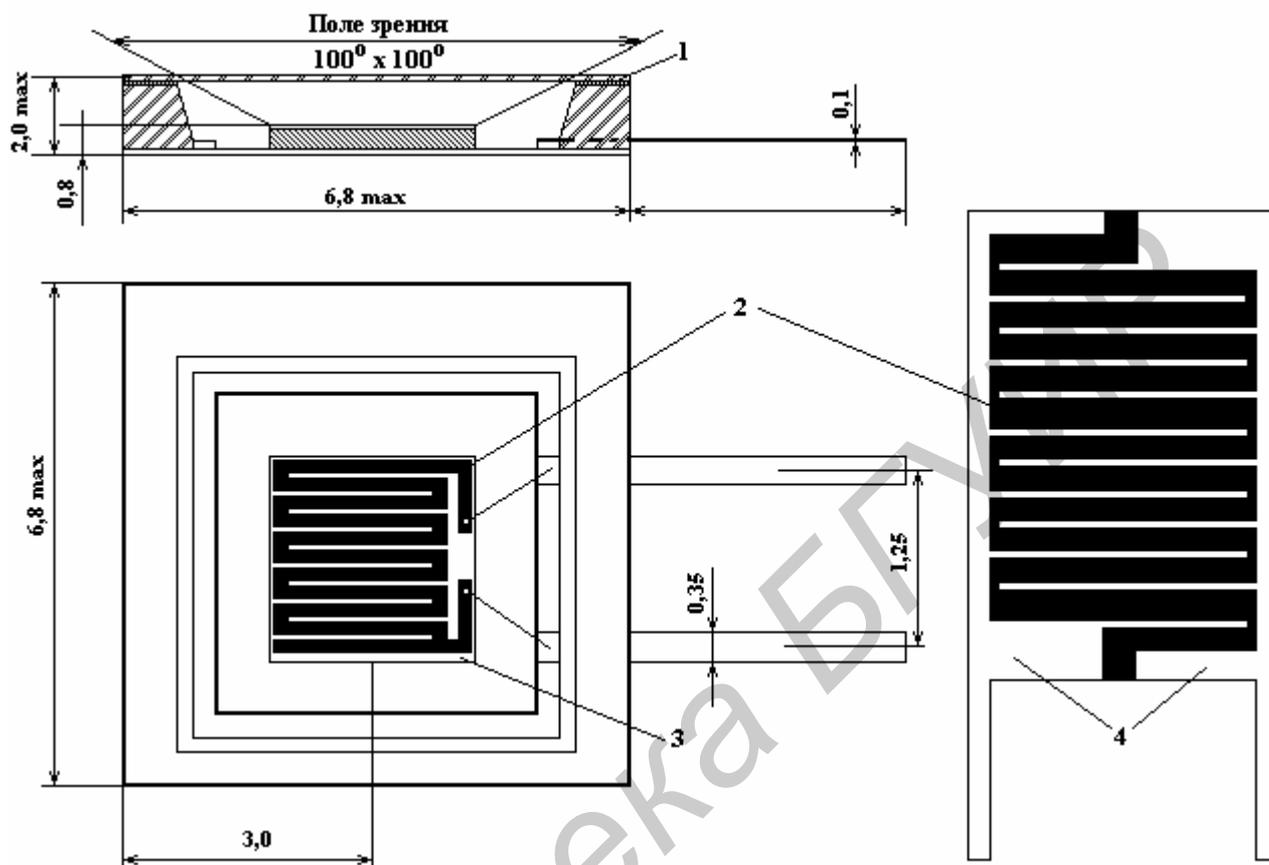


Рисунок 1.17 — Примеры конструкции фоторезисторов

1 — сапфировое стекло толщиной 0,12 — 1,18 мкм; 2 — фотопроводящий слой; 3 — чувствительная поверхность; 4 — электроды

Сопротивление фоторезистивного преобразователя нелинейно зависит от падающего потока (рисунок 1.18), однако эту функцию можно линеаризовать в ограниченном диапазоне с помощью постоянного сопротивления, включаемого параллельно с фоторезистором (шунтирование фоторезистора).

Сопротивление РС освещенного фоторезистора зависит от температуры, однако чувствительность к температуре с ростом освещенности ослабевает.

Значение сопротивления может испытывать медленный дрейф в экстремальных условиях применения — при больших значениях тока и приложенного напряжения. Заметим, что эффект старения более ярко выражен у материалов с высоким температурным коэффициентом.

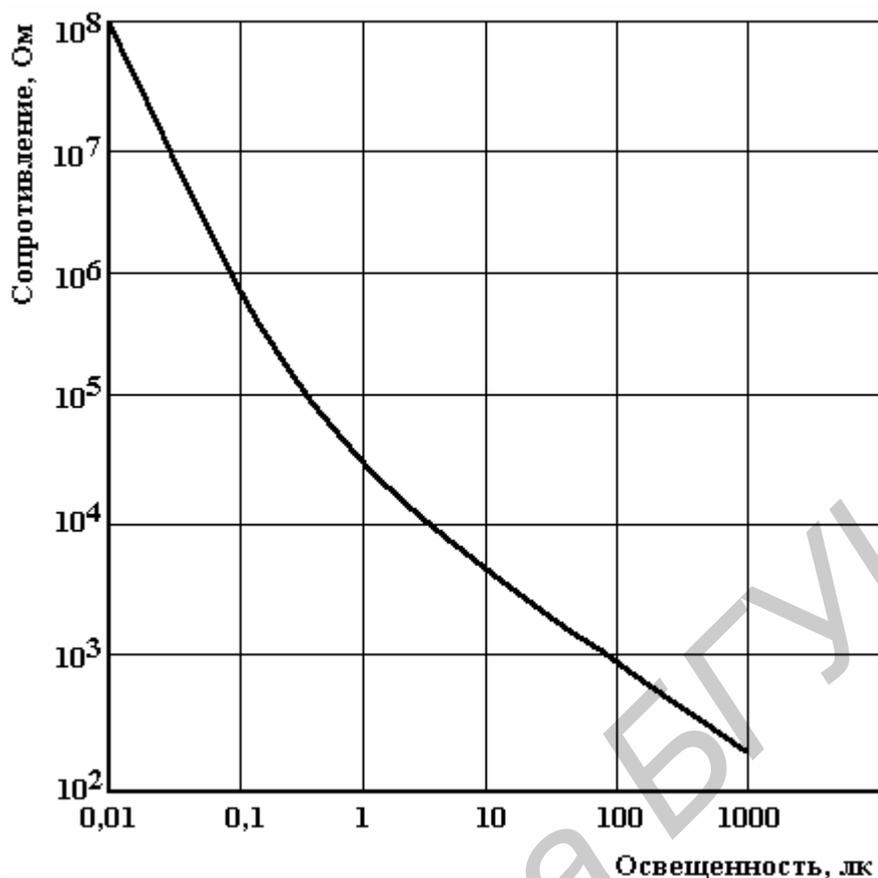


Рисунок 1.18 — Пример зависимости сопротивления фоторезистора от его освещенности

Фоточувствительность ФРП зависит от длины волны светового излучения и определяется материалом, из которого изготавливается преобразователь. Например, монокристаллы сернистого кадмия имеют максимальную чувствительность к свету с длиной волны около 0,5 мкм, селенид кадмия — около 0,75 мкм, сернистый свинец — 2,0 мкм.

Вольт-амперные характеристики ФРП линейны в пределах допустимых рассеиваемых мощностей, световые характеристики могут считаться линейными только при малых уровнях светового потока (освещенность до 200–300 лк).

Основными параметрами фоторезисторов являются темновое сопротивление (от десятков кОм до единиц МОм), кратность изменения сопротивления под действием света (отношение темнового сопротивления к сопротивлению ФРП при освещенности 200 лк лежит в пределах от 1,2 до 10), удельная чувствительность, рабочее напряжение и допустимая мощность рассеивания, верхняя граничная частота, рабочая длина волны и некоторые другие. Порог чувствительности ФРП определяется дрейфом темнового сопротивления и собственными шумами. Для ФРП характерна сильная зависимость параметров от температуры. Диапазон рабочих температур лежит в пределах от минус 60 до плюс 60° С.

Применение фоторезисторов. Достоинства фоторезисторов заключаются прежде всего в высоких значениях статического коэффициента преобразования (функции преобразования) и чувствительности, что позволяет использовать

простые схемы (например, непосредственное управление с помощью реле).

Основные недостатки фоторезисторов следующие:

- нелинейность энергетической характеристики (зависимости ток — поток);
- значительное время запаздывания и ограниченная полоса пропускания;
- нестабильность характеристики (старение);
- зависимость характеристики от температуры;
- необходимость охлаждения для некоторых типов преобразователей.

Фоторезисторы находят применение в таких исследованиях, когда не требуется прецизионных измерений, а делается оценка уровня принимаемого потока (регистрируется, например, ситуация свет — темнота или наличие светового импульса). Однако возможно использование фоторезисторов и в фотометрии при условии, что их характеристики стабилизированы и определены с высокой степенью точности.

Измерение сопротивления фоторезисторов или обнаружение изменения его значения осуществляется с помощью различного типа схем формирования сигналов, соединенных с резистивными преобразователями: потенциометрической схемы, питаемой постоянным током, мостом Уитстона, операционного усилителя и RC-генератора.

При использовании фоторезисторов для управления, например, поток излучения, превышающий определенный порог, вызывает достаточное для возникновения тока уменьшение сопротивления, а этот ток либо непосредственно, либо после усиления осуществляет переключение устройства с двумя устойчивыми состояниями: включение и выключение реле, блокировка или открытие тиристора и т.п.

При использовании фоторезистора в качестве приемника оптических сигналов фоторезистор и его электрическая схема преобразуют в форму электрических импульсов оптические импульсы, которые получают, когда световой пучок попеременно прерывается или пропускается в ритме, несущем требуемую информацию (счет предметов, измерение скорости вращения диска). Импульсы напряжения, получаемые на выходе электрической схемы, из-за сравнительно большой постоянной времени фоторезистора часто приходится предварительно преобразовывать с помощью триггера Шмитта для последующей обработки. Кроме того, максимальная частота световых импульсов должна быть меньше граничной частоты фоторезистора.

Кроме рассмотренных типов резистивных ИП, в практике применяются *магниторезисторы*, принцип действия которых основан на эффекте Гаусса, заключающемся в зависимости удельного сопротивления проводника или полупроводника от напряженности внешнего магнитного поля. Эти преобразователи широко используются в магнитных измерениях и рассматриваются в следующем разделе настоящего пособия.

1.2 Цифровые измерительные преобразователи

Измерительную информацию, получаемую в аналоговом виде, можно обрабатывать с помощью цифровых схем, что создает дополнительные удобства при получении, преобразовании и передаче измерительной информации. При обработке электрических сигналов это становится возможным, как мы увидим в

последующих частях данного учебного пособия, при использовании аналого-цифровых преобразователей (АЦП).

В случае же измерения линейных и угловых перемещений объекта измерения можно создать преобразователь, преобразовывающий его положение (линейное или угловое) в пространстве в цифровой код и выдающий результат преобразования в цифровой форме. Как и во всех приборах с цифровым преобразованием, информация оказывается квантованной, и, следовательно, разрешение будет всегда конечно.

1.2.1 Абсолютные цифровые преобразователи

Абсолютные цифровые преобразователи — это рейки для линейных перемещений или диски для угловых перемещений, разделенные на N равновеликих площадок (полос в случае рейки, секторов в случае диска), на которых записаны бинарные слова, соответствующие определяемому положению рейки или диска согласно цифровому коду и конкретной технологии. Число площадок N определяет разрешение следующим образом: L/N см для рейки длиной L см и $360^\circ/N$ для диска.

Все n бит, образующие каждое из слов, материализуются на n параллельных (для рейки) или концентрических (для диска) дорожках. Их схематическое изображение приведено на рисунках 1.19 и 1.20. Для определения логических значений



могут быть использованы различные физические состояния носителей измерительной информации:

- немагнитизируемая или ферромагнитная поверхность (магнитное считывание);
- изолирующая или проводящая поверхность (электрическое считывание);
- непрозрачная и просвечивающая поверхность (оптическое считывание).

В настоящее время оптическое считывание применяется наиболее часто; для каждой дорожки имеется источник — светодиодный преобразователь и приемник-фототранзистор (рисунок 1.21).

Кодирование. Прямой двоичный код можно использовать с помощью такого обрабатывающего прибора, как вычислитель. Существует минимальное число бит для представления каждого числа. Тем не менее, бывает очень неудобно выразить изменение числа на одну единицу одновременным изменением многих бит (см. рисунок 1.19), например:

$$15|_{10} - 011111|_2 \rightarrow 16|_{10} - 100000|_2.$$

При неправильной настройке считывающего устройства изменения каждого бита будут считываться неодновременно. В этом случае существует риск возникновения ошибки (погрешности преобразования), когда считывание происходит во время пересечения границы двух соседних значений или когда носитель кода останавливается в граничном положении.

Опасности ошибочного считывания, которая существует также и для кода BCD, можно избежать, либо используя код, в котором при каждом элементар-

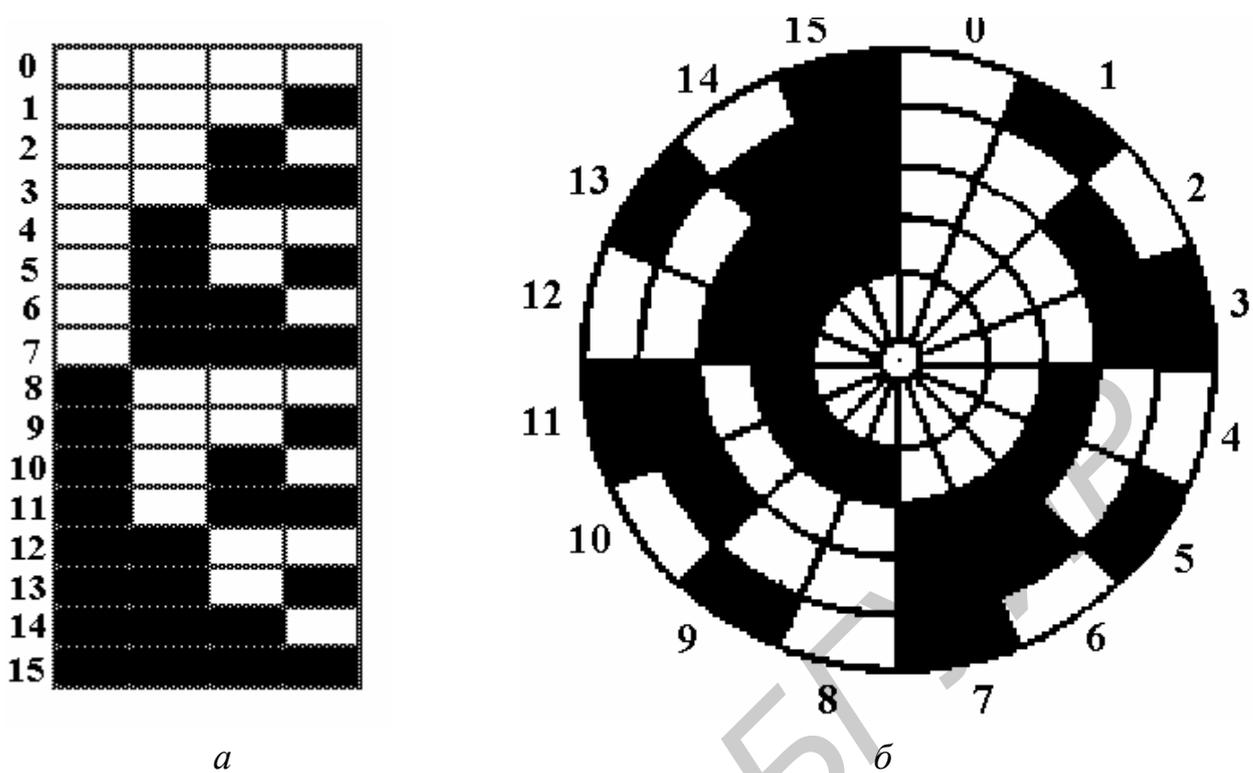


Рисунок 1.19 — Преобразователи линейных (а) и угловых (б) перемещений, использующие натуральный двоичный код

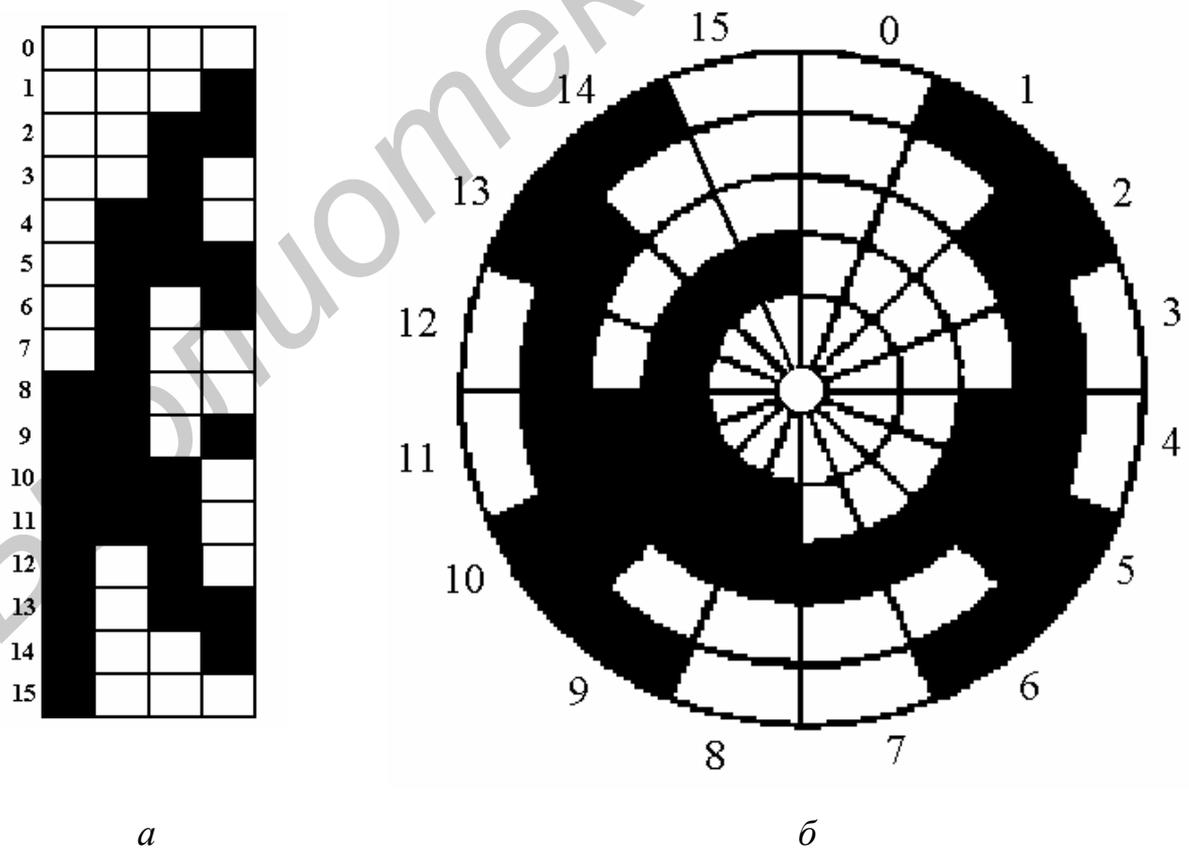


Рисунок 1.20 — Преобразователи линейных (а) и угловых (б) перемещений, использующие код Грея

— предельное значение допускаемой основной абсолютной погрешности преобразователя — максимальное значение разности результата измерения угла Nq и действительного значения угла φ .

Неметрологические характеристики — габариты, вес, момент инерции, максимальная скорость вращения — задаются в паспорте преобразователя.

В качестве примера приведем характеристики для цифрового измерительного преобразователя параметров ветра типа АД-1.

Преобразователь обеспечивает:

- измерение направления ветра в диапазоне $0-360^\circ$;
- предел основной допускаемой погрешности $\pm 10^\circ$;
- выходной код — шестизначный код Грея.

Преобразователь АД-1 эксплуатируется в открытой атмосфере в диапазоне температур от минус 50 до плюс 50 $^\circ\text{C}$ и относительной влажности до 98 %.

Преобразователь устанавливается на штырь метеорологической мачты и ориентируется на месте эксплуатации относительно сторон света с помощью специального ориентира, прикрепленного к корпусу преобразователя.

Квантование по уровню для преобразователя «угол — код». Преобразователь «угол — код» реализует метод считывания при преобразовании аналоговой величины в код, при котором текущее значение угла сравнивается с квантованной шкалой значений угла. При квантовании угла (замене значения угла квантованным значением) возможны два способа отождествления:

- с ближайшим меньшим квантованным значением;
- с ближайшим квантованным значением.

При первом способе отождествления начала квантованной шкалы и шкалы значений угла совпадают.

Второй способ отождествления реализуется смещением начала квантованной шкалы на половину кванта относительно шкалы значений угла, для чего кодирующий диск повернут на угол $q/2$ относительно нулевого значения угла.

Характеристики погрешности квантования. Если N — выходной код измерительного преобразователя, а q — квант по уровню, то измеренное значение угла равно $\varphi_{\text{и}} = Nq$. Текущее значение абсолютной погрешности квантования угла равно $\Delta\varphi_{\text{кв}} = \varphi_{\text{и}} - \varphi = Nq - \varphi$.

В общем случае погрешность квантования можно рассматривать как случайную равномерно распределенную величину, при этом для первого способа квантования значения $\Delta\varphi_{\text{кв}}$ лежат в интервале $[-q; 0]$, для второго способа квантования значения погрешности лежат в интервале $[-q/2; +q/2]$. В качестве характеристик погрешности применяются следующие:

- предельные значения погрешности (границы, в которых может находиться погрешность), задаваемой нижними и верхними границами;
- вероятностные характеристики погрешности в виде плотности вероятности или числовых характеристик погрешности: математического ожидания, дисперсии, среднеквадратичного отклонения погрешности (корень квадратный из дисперсии), доверительных интервала и вероятности для погрешности.

Для первого способа квантования нижнее предельное значение погрешно-

сти равно $-q$, верхнее — 0 , а вероятностные числовые характеристики погрешности квантования — математическое ожидание $m_{\text{кв}} = -q/2$; дисперсия $D_{\text{кв}} = q^2/12$; среднее квадратическое отклонение $\sigma = q/2\sqrt{3}$. Наличие математического ожидания погрешности для первого способа квантования по уровню свидетельствует о наличии систематической составляющей погрешности измерения.

Для второго способа квантования предельные значения погрешности квантования равны $\pm q/2$, а вероятностные числовые характеристики погрешности квантования те же, что и у первого способа, за исключением математического ожидания, равного нулю.

1.3 Емкостные измерительные преобразователи

Емкость C является функцией расстояния δ между электродами преобразователя, площади электродов s и диэлектрической проницаемости ϵ диэлектрика между электродами:

$$C = F(\delta, s, \epsilon). \quad (1.28)$$

Очевидно, что имеются три метода реализации емкостного измерительного преобразователя: можно изменять δ , s или ϵ . Эти три метода проиллюстрированы на рисунке 1.22.

Если выбрать конденсатор с плоскими параллельными пластинами, разнесенными на расстояние X , и пренебречь всеми краевыми эффектами, то емкость такого преобразователя с параллельными пластинами равна

$$C(X) = \frac{\epsilon_0 s}{X}. \quad (1.29)$$

Однако этот преобразователь нелинеен и имеет гиперболическую передаточную характеристику, как показано на рисунке 1.22, *а*. Этот тип преобразователя часто применяют для измерения малых приращений смещения без контакта с измеряемым объектом. Характеристика преобразователя обычно линейаризируется путем применения балансной схемы.

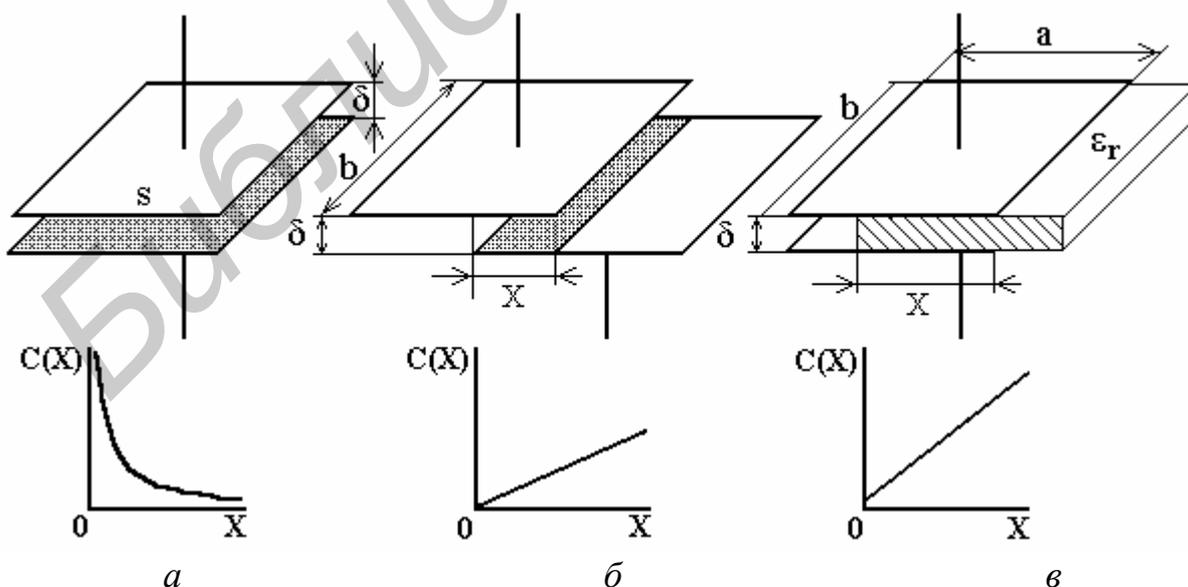


Рисунок 1.22 — Емкостные измерительные преобразователи: *а* — с изменяемым расстоянием между электродами; *б* — с изменяемой площадью перекрытия электродов; *в* — с изменяемым диэлектриком

Если у плоского конденсатора изменяется площадь электродов, то получаем:

$$C(X) = \frac{\varepsilon \cdot b \cdot X}{\delta}. \quad (1.30)$$

Теперь преобразователь имеет линейную зависимость от X . Обычно этот тип преобразователя реализуется в виде поворотного конденсатора для измерения угловых смещений, а не в виде варианта со сдвигом, приведенного на рисунке 1.22,б. Конструкция с поворотным конденсатором применяется также в качестве выходного преобразователя для измерения электрических напряжений (емкостный вольтметр).

Для плоского конденсатора изменение положения диэлектрика приводит к следующему результату:

$$C(X) = C_0 \left\{ 1 + \frac{X}{a} (\varepsilon_r - 1) \right\}, \quad (1.31)$$

где $C_0 = C(0) = \frac{\varepsilon_0 \cdot a \cdot b}{\delta}$.

Этот преобразователь (рисунок 1.22,в) также линеен. Он реализуется главным образом в форме двух concentрических цилиндров и используется для измерения уровня жидкости в резервуаре. Непроводящая жидкость играет роль диэлектрика.

Таким образом, принцип действия емкостных преобразователей (ЕП) основан на изменении ёмкости между двумя или более телами под воздействием преобразуемой неэлектрической величины (линейного или углового перемещения, влажности и т.д.).

Дифференциальный вариант аналогичных типов емкостных преобразователей приведен на рисунке 1.23. Под воздействием преобразуемой величины X смещается подвижная пластина или диэлектрическая прокладка 1, в результате чего изменяется емкость между неподвижными пластинами 2 и подвижной.

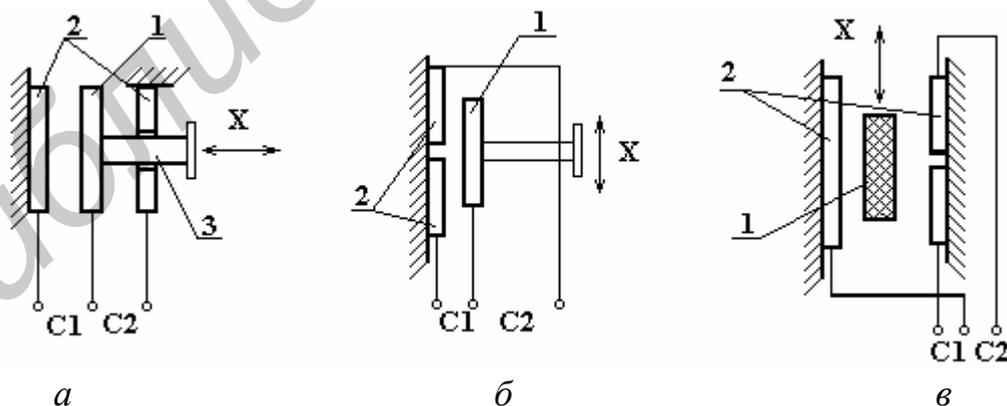


Рисунок 1.23 — Дифференциальные емкостные преобразователи:

а — с изменяемым расстоянием между электродами; *б* — с изменяемой площадью перекрытия электродов; *в* — с изменяемым диэлектриком

Такие ЕП, благодаря высокой чувствительности, используются для измерения малых (менее 1,0 мм) механических перемещений. Если подвижную пластину закрепить на пружинных опорах или соединить через шток 3 с мембра-

ной, то ЕП можно использовать, например, для измерения давления газов или жидкостей. *Достоинствами* преобразователей с переменным зазором являются высокая чувствительность (до 500 В/мм), линейная зависимость емкостного сопротивления от зазора, малые погрешности, простота конструкции.

К числу *недостатков* относится сравнительно большая сила электростатического притяжения пластин. Сила, которую измеряемый объект должен приложить к емкостному преобразователю, чтобы переместить электроды, очень мала. Будем полагать эту силу $F(X)$ положительной, когда она имеет направление, при котором X увеличивается. Если пренебречь всеми потерями (из-за трения, сопротивления и т.д.), то отдаваемая измеряемым объектом механическая энергия dE_m , при бесконечно малом перемещении dX , плюс электрическая энергия dE_e , подводимая подключенным к преобразователю источником питания с напряжением U , должны быть равны увеличению энергии электрического поля dE_f между электродами конденсатора. Баланс энергии может быть записан как

$$dE_m + dE_e = dE_f, \quad (1.32)$$

где $dE_m = F(X) dX$, $dE_e = d(qU) = qdU + Udq$,

$$dE_f = d\left(\frac{1}{2}qU\right) = \frac{1}{2}qdU + \frac{1}{2}Udq.$$

Поскольку напряжение источника питания U , приложенное к конденсатору, поддерживается постоянным, $dU = 0$. Так как $q = U \cdot C(X)$, то сила Кулона равна

$$F(X) = -\frac{1}{2}U^2 \frac{dC(X)}{dX}. \quad (1.33)$$

Следовательно, для преобразователя, приведенного на рисунке 1.22,*а*, сила положительна, а для преобразователей на рисунке 1.22,*б,в* — отрицательна. Таким образом, если подвижный электрод имел полную свободу перемещения, то он займет положение, при котором емкость максимальна. Если емкость C является линейной функцией X , то сила F не зависит от X .

Силы Кулона чрезвычайно малы. Линейный емкостный преобразователь смещения с емкостью 100 пФ, имеющий диапазон измерения 1 см, при напряжении питания 10 В требует усилия всего лишь 0,5 мкН.

При вычислении емкости $C(X)$ для трех случаев построения емкостных преобразователей, приведенных на рисунках 1.22 и 1.23, не учитывались краевые (или концевые) эффекты в конденсаторах. Эти краевые эффекты можно подавить, используя экранирующий электрод, как показано на рисунке 1.24,*а*. Емкостный преобразователь C снабжен заземленным экранирующим электродом, расположенным так, что электрическое поле внутри конденсатора однородно на указанных участках (на краях). Если бы мы измеряли только емкость между подвижным и неподвижным электродами и при этом не учитывали емкость электродов относительно экрана, то преобразователь был бы свободен от возмущающих краевых эффектов. В схеме, приведенной на рисунке 1.24,*б*, это достигается путем соединения экрана со средней точкой трансформатора, входящего в состав моста. Напряжение, приложенное к индикатору, может быть сделано равным нулю путем балансировки

моста переменным конденсатором C_3 . В этом случае экран имеет потенциал земли. Поскольку емкость между незаземленным электродом конденсатора C и экраном включена параллельно верхней половине вторичной обмотки n_1 трансформатора измерительного моста, то она не влияет на условие баланса моста и, следовательно, $C = C_3$.

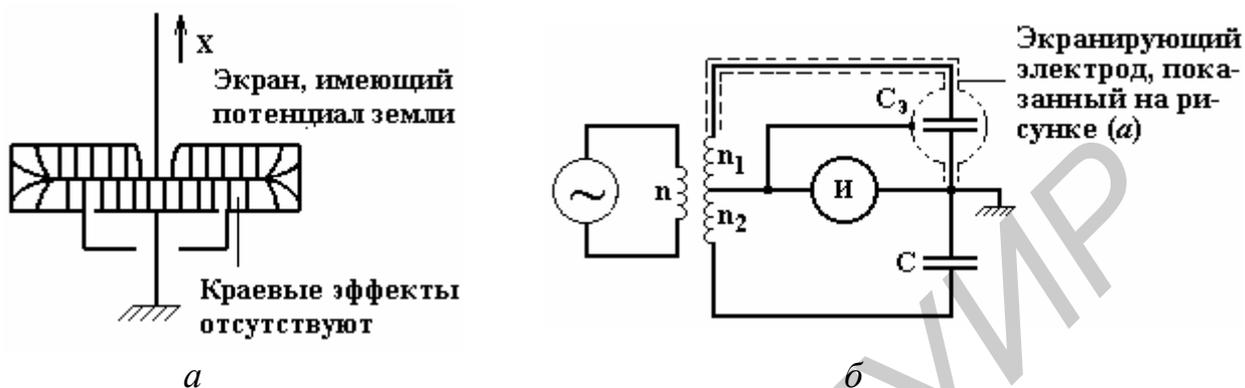


Рисунок 1.24 — Конструкция экранирующего электрода для подавления краевых эффектов в емкостном преобразователе

Часто емкостный преобразователь уже включен в мостовую схему, предназначенную для измерения емкости и, следовательно, для измерения перемещения. Другая возможность состоит в использовании конденсатора в качестве элемента, определяющего частоту колебаний генератора. Тогда значение частоты является мерой перемещения. Емкостные преобразователи надежны и дешевы. Примером акустического измерительного преобразователя является конденсаторный микрофон, который благодаря своей высокой чувствительности, большому динамическому диапазону, широкой полосе частот и плоской частотной характеристике (30 кГц по уровню 1 дБ) часто используется при измерениях уровня звуковых колебаний.

Емкостные преобразователи с переменной площадью пластин (см. рисунки 1.22,б и 1.23,б) используются для измерения больших (более 1,0 мм) линейных, а также угловых механических перемещений. При их реализации появляется возможность обеспечения как линейной, так и другой желаемой функции преобразования путем выбора соответствующей конфигурации пластин. Это основное *достоинство* емкостных преобразователей с переменной площадью пластин. На рисунке 1.25,а схематически показана конструкция дифференциального емкостного преобразователя угловых перемещений с линейной зависимостью емкости от угла поворота. Такие преобразователи изготавливаются в виде наборов подвижных 1 и неподвижных 2 пластин. При повороте оси в пределах $0-180^\circ$ емкость одной секции возрастает, а второй — уменьшается от минимального (максимального) до максимального (минимального) значения пропорционально углу поворота (чувствительность такого преобразователя можно повысить увеличением количества пластин в секции).

Для цилиндрического емкостного преобразователя (рисунок 1.25,б) также характерна линейная зависимость изменения емкости от линейного перемещения X . В соответствии с выражением для емкости цилиндрического конденса-

тора для дифференциального емкостного преобразователя (см. рисунок 1.25,б) можно получить:

$$C1 = \frac{\varepsilon_a \cdot l_1}{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)} \quad \text{и} \quad C2 = \frac{\varepsilon_a \cdot l_2}{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)}. \quad (1.34)$$

При смещении внутреннего цилиндра слева направо емкость $C1$ уменьшается, $C2$ — увеличивается. Основным достоинством цилиндрического ЕП в сравнении с плоским является большая емкость при меньших габаритах, что позволяет достичь более высокой чувствительности и уменьшить погрешность из-за влияния паразитных емкостей.

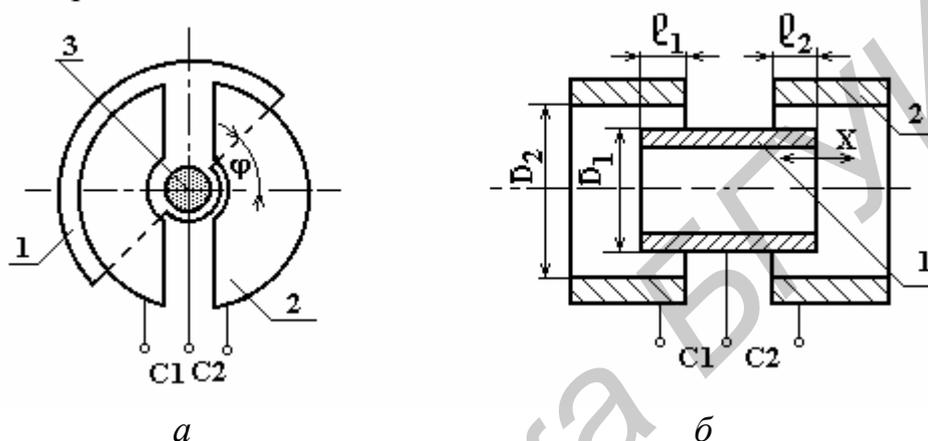


Рисунок 1.25 — Дифференциальные емкостные преобразователи с переменной площадью пластин

Емкостные преобразователи с переменной диэлектрической проницаемостью (см. рисунки 1.22,в и 1.23,в) могут использоваться как для измерения линейных перемещений, так и для измерения уровней жидкостей, влажности газов, толщины пластин и других свойств материалов.

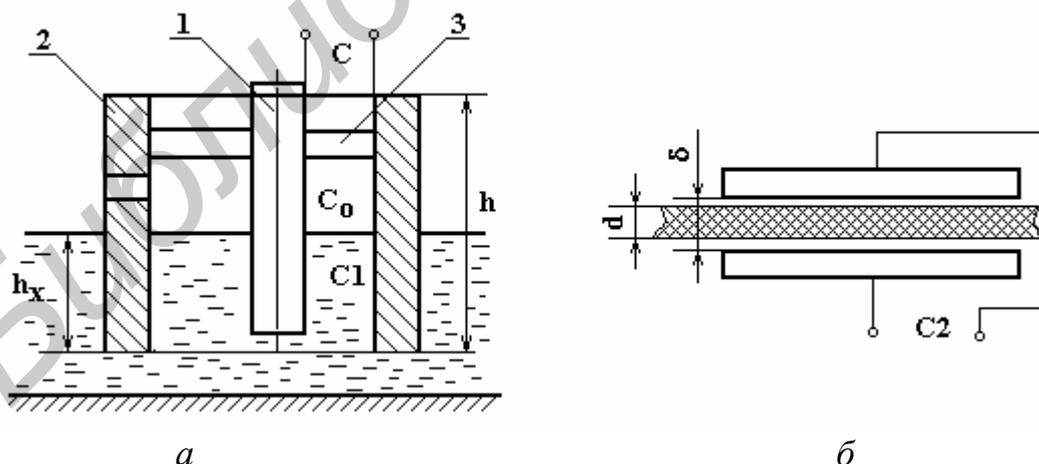


Рисунок 1.26 — Емкостные преобразователи с переменной диэлектрической проницаемостью: *а* — для измерения уровня жидкости, *б* — для измерения толщины неметаллического листа

На рисунке 1.26,а схематически показана конструкция цилиндрического преобразователя для измерения уровня жидкости, состоящего из полого метал-

лического цилиндра 2, являющегося внешним электродом, и металлического стержня 1, являющегося вторым электродом.

Благодаря отверстию в полном цилиндре жидкость проникает внутрь и заполняет его на высоту h_x , равную уровню жидкости в резервуаре. Изоляционная шайба 3 фиксирует взаимное расположение электродов. Суммарная емкость C состоит как бы из двух параллельно соединенных емкостей C_0 и C_1 с различной диэлектрической проницаемостью. Таким образом, C является функцией уровня жидкости:

$$C = C_0 + C_1 = \frac{\epsilon_0(h-h_x) + h_x \cdot \epsilon_{ж}}{\ln \frac{D_2}{D_1}}, \quad (1.35)$$

где ϵ_0 , $\epsilon_{ж}$ — диэлектрическая проницаемость воздуха и жидкости; h — полная длина преобразователя.

Аналогично может быть выполнен преобразователь уровня жидкости на основе плоского конденсатора.

Еще одним примером ЕП с переменной диэлектрической проницаемостью является преобразователь толщины неметаллического листа (рисунок 1.26, б) толщиной d и проницаемостью ϵ_L . В этом случае емкость будет определяться выражением

$$C = \frac{s}{\frac{\delta - d}{\epsilon_0} + \frac{d}{\epsilon_L}}. \quad (1.36)$$

Этот же преобразователь позволяет определить толщину металлического листа

$$C = C_0 \frac{1}{1 - \frac{d}{\delta}}, \quad (1.37)$$

где C_0 — емкость преобразователя без листа.

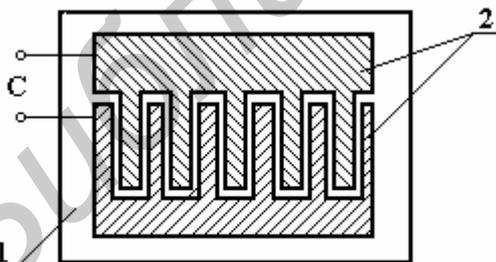


Рисунок 1.27 — Емкостный преобразователь для измерения влажности сыпучих и волокнистых материалов

На рисунке 1.27 изображена конструкция ЕП для измерения поверхностной влажности сыпучих и волокнистых материалов. На изоляционную пластину 1 нанесены фольговые электроды 2. При контакте с влажной поверхностью диэлектрическая проницаемость среды около электродов (а значит, и емкость) резко изменяется.

Основными параметрами ЕП являются начальная и конечная емкости, рабочее и пробивное напряжения. Значения емкости обычно не превышают нескольких тысяч пикофарад, поэтому для питания ЕП используют только переменные напряжения, чаще всего высокой частоты.

Источниками погрешности являются колебания температуры среды, влияющие как на линейные размеры, так и на диэлектрическую проницаемость, влияние паразитных реактивностей, неточность изготовления, особенно электродов сложной формы.

Достоинства ЕП: высокая чувствительность, простота конструкции, малые габариты и вес, высокое быстродействие, незначительное влияние на объект измерения, возможность реализации весьма сложных функциональных зависимостей. *Недостатки*: большое внутреннее сопротивление, питание от высокочастотных источников, незначительная выходная мощность, необходимость в тщательном экранировании.

Наиболее часто с ЕП применяют *мостовые* ИЦ (особенно с дифференциальными). Конденсаторы обычно включаются в соседние плечи моста, а в два других — низкоомные резисторы или связанные индуктивности. При этом ИЦ тщательно экранируется и часто содержит элементы для уменьшения паразитных реактивностей подводящих кабелей (см. рисунок 1.23,б). С одинарными ЕП также широко используются контурные ИЦ. При этом преобразователь включается в параллельный колебательный контур, питаемый от генератора стабильной частоты ω_0 (рисунок 1.28). В этом случае в качестве выходной величины используется напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$. Такие схемы применяют, если требования к линейности характеристики ИУ невысокие. Рабочим выбирается наиболее линейный участок на резонансной кривой. В цифровых приборах широко используют включение ЕП в частотоподающие цепи генераторов. В этом случае выходной величиной является частота генератора, и тогда достижимые точность и разрешающая способность приборов могут быть весьма высокими.

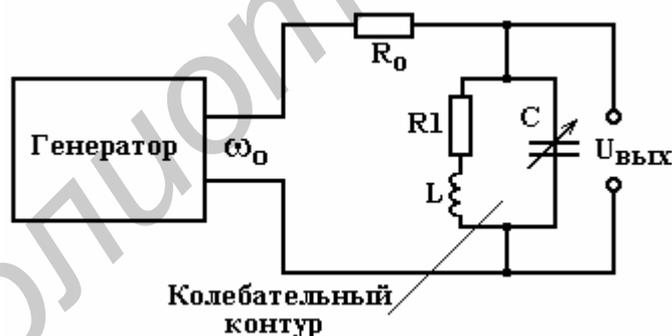


Рисунок 1.28 — Контурная измерительная цепь для включения емкостных измерительных преобразователей

Емкостные преобразователи применяются для измерения, кроме перечисленных ранее неэлектрических величин, больших и малых давлений, для преобразования вибраций, биений, ударов, для счета изделий и т.д.

Погрешности емкостных преобразователей. Электроды емкостного преобразователя монтируются на изоляционных деталях или разделяются ими. Разнородные конструктивные детали преобразователя имеют различные коэффициенты линейного расширения. При изменении температуры это приводит к изменению расстояния между электродами. Хотя это изменение мало, но может быть соизмеримо с расстоянием между электродами и приводит к температур-

ной погрешности, имеющей аддитивную и мультипликативную составляющие. Первая может быть уменьшена применением дифференциальных преобразователей. Вторая составляющая может быть исключена только на этапе обработки результатов преобразования путем накопления измерительной информации и ее усреднения.

Номинальная емкость емкостных преобразователей обычно лежит в пределах от единиц до сотен пикофарад. На частоте 50 Гц внутреннее сопротивление преобразователя достигает значений более 10^7 Ом. При столь высоком сопротивлении возможны погрешности, обусловленные паразитными токами утечки, причем на результат измерения влияет непостоянство сопротивления изоляции. Для уменьшения сопротивления преобразователя частота напряжения питания увеличивается до нескольких килогерц и выше, вплоть до нескольких мегагерц.

Поскольку полная емкость преобразователя изменяется в присутствии посторонних металлических предметов, преобразователь, а также идущие к нему провода и элементы измерительной цепи необходимо экранировать. Однако емкость экрана может изменяться под влиянием изменения влажности воздуха, вибрации и по другим причинам. Экранированные провода могут изменять свою емкость при их изгибах, когда токоведущий провод меняет свое положение относительно экрана. Эти изменения приводят к погрешности.

Особенности применения емкостных преобразователей. Емкостные преобразователи имеют ряд специфических достоинств и недостатков, определяющих область их применения. Конструкция емкостного датчика проста, он имеет малую массу и размеры. Его подвижные электроды могут быть достаточно жесткими, с высокой собственной частотой, что дает возможность измерять быстропеременные величины. Емкостные преобразователи можно выполнять с заданной (линейной или нелинейной) функцией преобразования. Для получения требуемой функции преобразования часто достаточно изменить форму электродов. Отличительной особенностью является малая сила притяжения электродов.

Основными недостатками емкостных преобразователей являются их малая емкость и высокое сопротивление переменному току. Для уменьшения последнего преобразователи питаются напряжением высокой частоты. Однако это обуславливает другой недостаток — сложность вторичных преобразователей. Недостатком является и то, что результат измерения зависит от изменения параметров кабеля, используемого для подключения измерительного преобразователя к измерительной цепи. В этом случае для уменьшения погрешности измерительную цепь располагают вблизи преобразователя, что позволяет использовать короткий соединительный кабель.

1.4 Электромагнитные параметрические преобразователи

Электромагнитные преобразователи — весьма обширный класс ИП, основанных на различных физических принципах и имеющих в качестве входных и выходных как неэлектрические, так и электрические величины. В соответствии с классификацией их можно разделить на следующие группы:

— преобразователи масштаба тока и напряжения (измерительные трансформаторы и индуктивные делители);

— преобразователи тока в механическое перемещение (измерительные механизмы магнитоэлектрических, электродинамических, электромагнитных и других преобразователей);

— индукционные, основанные на законе электромагнитной индукции (генераторные преобразователи для магнитных измерений и скорости);

— магнитомодуляционные, основанные на нелинейных свойствах магнитных цепей;

— преобразователи на основе эффекта Баркгаузена;

— индуктивные и трансформаторные преобразователи неэлектрических величин;

— магнитоупругие преобразователи.

Из всех групп к параметрическим относятся только две последние, которые и будут рассматриваться в рамках данного пособия.

1.4.1 Индуктивные преобразователи

Принцип действия индуктивных преобразователей (ИНП) основан на зависимости индуктивности катушки с сердечником от преобразуемой неэлектрической величины путем воздействия на параметры или пространственное положение магнитопровода.

Известно, что индуктивность катушки с числом витков w , расположенной на магнитопроводе с модулем полного магнитного сопротивления Z_M , может быть определена по формуле

$$L = \frac{w^2}{Z_M}. \quad (1.38)$$

Активная составляющая R_M полного сопротивления определяется сопротивлением магнитной цепи R_m и магнитным сопротивлением зазора R_3 :

$$R_M = R_m + R_3 = \frac{l_m}{\mu_m \cdot s_m} + \frac{\delta_3}{\mu_3 \cdot s_3}, \quad (1.39)$$

где l_m , δ_3 — длины магнитных цепей; μ_m , μ_3 — абсолютные магнитные проницаемости; s_m , s_3 — площади поперечных сечений магнитопровода и зазора соответственно.

Реактивная составляющая X_M определяется потерями в магнитопроводе на гистерезис и вихревые токи P и значением магнитного потока Φ :

$$X_M = \frac{P}{(\omega\Phi)^2}, \quad (1.40)$$

где ω — угловая частота.

Из выражений (1.38) — (1.40) следует, что из всех величин, влияющих на индуктивность, наиболее просто изменять параметры зазора, оставляя при этом постоянными ω , R_M , X_M . Представив (1.38) в виде

$$L = \frac{w^2}{\sqrt{\left[R_m + \frac{\delta_3}{(\mu_3 \cdot s_3)} \right]^2 + X_m^2}}, \quad (1.41)$$

получим, что возможно создание ИНП с замкнутым магнитопроводом трех ос-

новых типов: с переменным зазором $l = f_1(\delta_3)$ с переменной площадью зазора $l = f_2(s_3)$ и переменной магнитной проницаемостью $l = f_3(\mu_3)$ зазора. Кроме того, из выражения (1.41) видно, что все три зависимости будут нелинейны.

Все три способа реализации индуктивных преобразователей с замкнутой магнитной цепью схематически показаны на рисунке 1.29.

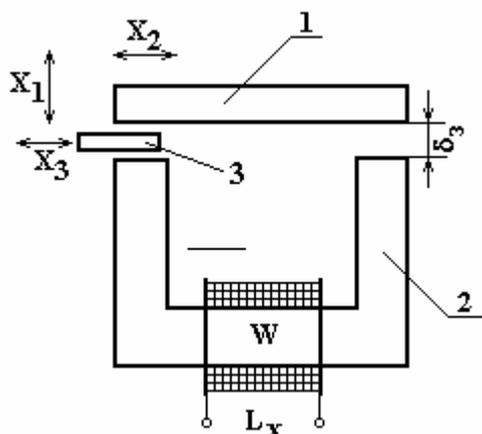


Рисунок 1.29 — Индуктивный измерительный преобразователь

Во втором случае якорь сместится в направлении X_2 . При этом изменится активная площадь зазора и реализуется второй тип зависимости. Индуктивные измерительные преобразователи этого типа используют для измерения сравнительно больших (до 10 мм) перемещений.

Третий способ основан на перемещении X_3 в зазоре прокладки 3 из немагнитного материала. На практике этот вид зависимости для измерения линейных перемещений используют весьма редко, так как он не обладает какими-либо существенными преимуществами в сравнении с двумя первыми. Однако его можно использовать для измерения угловых перемещений. При этом, применяя профилированный диск, получают желаемую зависимость индуктивности от угла поворота.

Для измерения больших перемещений (до 100 мм) широко используют ИНП с разомкнутой магнитопроводом. Такой преобразователь (рисунок 1.30) представляет собой соленоид 1, внутри которого перемещается сердечник 2 из магнитного материала.

Существенными недостатками рассмотренных ИНП являются значительная начальная индуктивность, большая температурная погрешность, большое электромагнитное притяжение и нелинейность ФП.

Первый способ предполагает перемещение X_1 подвижного якоря 1 относительно неподвижного магнитопровода 2 с катушкой w. Очевидно, что при этом будет изменяться зазор, а сечение и проницаемость останутся постоянными. ИНП этого типа имеют высокую чувствительность и используются при измерении небольших (от 0,01 до 1,0 мм) перемещений. При дальнейшем увеличении зазора зависимость становится существенно нелинейной.

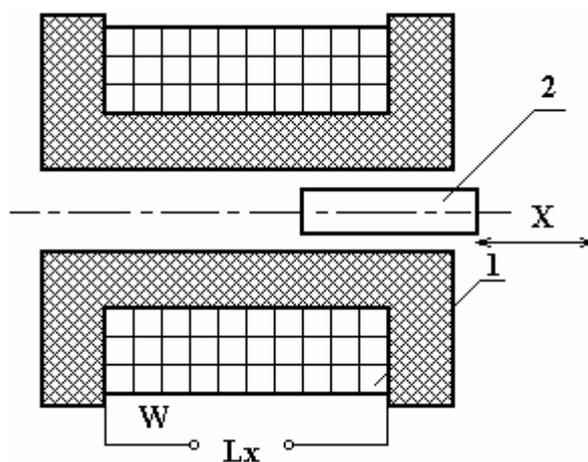


Рисунок 1.30 — Индуктивный преобразователь с разомкнутой магнитной цепью

Значительно лучшими параметрами обладают *дифференциальные* индуктивные преобразователи (меньше погрешность, большая длина линейного участка). Поэтому на практике дифференциальные ИНП получили преимущественное распространение. На рисунке 1.31 схематически изображены примеры конструктивного исполнения дифференциальных преобразователей с переменным зазором и разомкнутой магнитной цепью. Якорь 1 (рисунок 1.31,*а*) располагается симметрично относительно обоих сердечников 2, и поэтому магнитные сопротивления для потоков, создаваемых катушками, исходно равны. Под воздействием неэлектрической величины X происходит изменение комплексных сопротивлений катушек, а следовательно, и их индуктивностей с противоположным знаком. Аналогичные процессы происходят в преобразователе (рисунок 1.31,*б*). Подобным образом строятся ИНП других разновидностей.

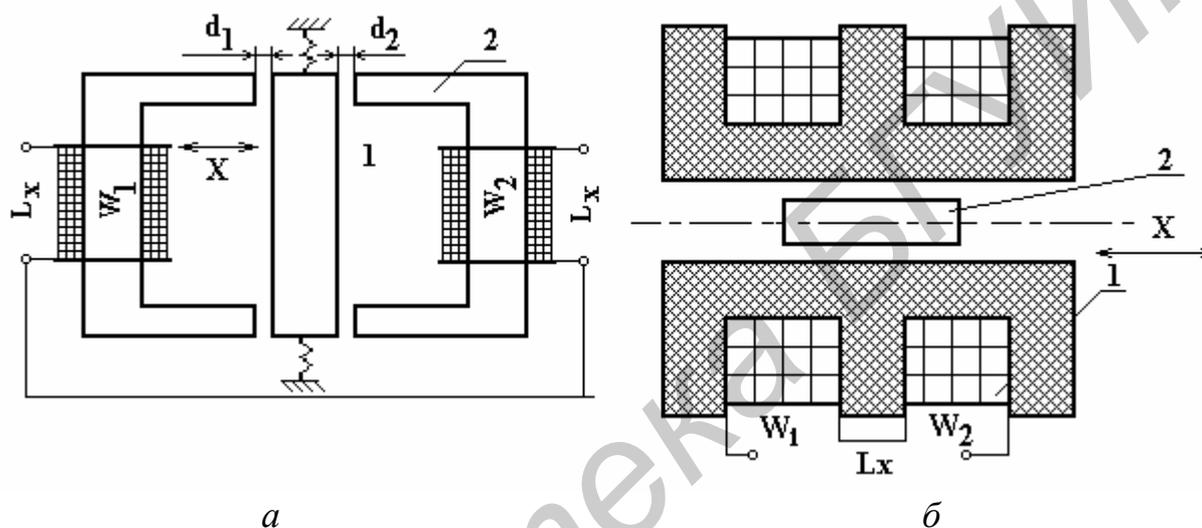


Рисунок 1.31 — Дифференциальные индуктивные измерительные преобразователи:

а — с замкнутой магнитной цепью; *б* — с разомкнутой магнитной цепью

Катушки ИНП представляют собой каркас из изоляционного материала (текстолит, гетинакс, различные пластмассы и т.д.) с обмоткой из медного провода диаметром 0,05...0,2 мм. Материал сердечника выбирается в зависимости от рабочей частоты: для частот 100...500 Гц — электротехнические стали различных марок; 1...10 кГц — пермаллой; 10...100 кГц и выше — ферриты. Следует отметить, что ИНП с ферритовыми магнитопроводами имеют значительные температурные погрешности.

Основным *достоинством* ИНП является большая (до 5 В·А) выходная мощность, что позволяет во многих случаях обходиться без усилителей и лишь при малогабаритном исполнении преобразователей прибегать к усилению выходного сигнала. Область *применения* ИНП ограничивается измерением механических линейных и угловых перемещений.

Преимущественное применение с ИНП получили неравновесные *мостовые* ИЦ. Дифференциальный преобразователь, например, с переменным зазором, включается в соседние плечи моста. Наибольшая линейность ФП обеспечивается при питании моста от источника переменного напряжения и выборе в

качестве выходной величины — проводимости ИНП. Частота и напряжение питания моста выбираются из условия отсутствия нелинейных процессов и существенных потерь в магнитопроводе. В противном случае появляются значительные погрешности преобразования.

Погрешности индуктивных преобразователей. Температурная погрешность индуктивных преобразователей в основном обусловлена изменением активной составляющей их сопротивления. Эта погрешность аддитивна и уменьшается в случае применения мостовых схем. Кроме того, при изменении температуры изменяется магнитная проницаемость стали, что приводит к некоторому дополнительному изменению аддитивной и мультипликативной погрешностей.

При изменении напряжения питания меняется магнитная проницаемость магнитопровода преобразователя, а следовательно, его сопротивление и чувствительность. Изменяется также чувствительность мостовой измерительной цепи. Изменение сопротивления приводит к аддитивной погрешности и компенсируется мостовой цепью. Изменение чувствительности создает мультипликативную погрешность. Для ее уменьшения либо стабилизируют напряжение источника питания моста, либо применяют компенсационные схемы измерения.

Изменение частоты питающего напряжения приводит к изменению сопротивления резисторов, включенных в мост, и меняет чувствительность. Малую погрешность имеют мостовые схемы, у которых чувствительность в режиме холостого хода не зависит от параметров цепи. У других схем для уменьшения погрешности нужно стабилизировать частоту питающего напряжения.

При перемещении якоря преобразователя изменяется выходное напряжение моста. При среднем положении якоря должно быть $U_{\text{вых}} = 0$. Однако практически имеется небольшое напряжение, что приводит к аддитивной погрешности измерительного моста. Для балансировки мостов переменного тока необходима отдельная регулировка действительной и мнимой составляющих его выходного напряжения. В мостах с индуктивными преобразователями одна составляющая регулируется перемещением якоря преобразователя, другая — путем регулировки других сопротивлений мостовой измерительной цепи. Если регулировка сделана недостаточно тщательно, то изменением положения якоря нельзя полностью сбалансировать схему. Другая причина погрешности моста заключается в том, что в питающем напряжении помимо напряжения с основной частотой имеются составляющие с кратными частотами и с частотой промышленной сети. Реальный мост переменного тока, питающийся таким напряжением, полностью сбалансировать трудно вследствие наличия несбалансированных составляющих с частотами, отличными от основной.

Для уменьшения погрешности, обусловленной остаточным разбалансом моста, используется фазочувствительный выпрямитель. Его средний выходной ток $I = k \cdot U \cos \varphi$, где U — подаваемое на вход напряжение; φ — фазовый сдвиг между измеряемым и управляющим напряжением; k — коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров выпрямителя.

Измерительная цепь проектируется так, чтобы напряжение разбаланса моста, вызванное перемещением якоря преобразователя, было в фазе с управ-

ляющим напряжением, а напряжение, вызванное плохим подбором сопротивлений, было сдвинуто на угол $\varphi = \pi/2$. При этом выходной ток выпрямителя будет определяться только перемещением якоря индуктивного преобразователя.

Фазочувствительный выпрямитель выпрямляет напряжение, имеющее ту же частоту, что и управляющее напряжение, и частоту его нечетных гармоник. Это значительно уменьшает аддитивную погрешность, вызванную наличием высших гармоник в напряжении питания моста.

1.4.2 Трансформаторные (взаимоиндуктивные) преобразователи

Принцип действия трансформаторных (взаимоиндуктивных) преобразователей (ВИП) основан на изменении взаимной индуктивности катушек под воздействием механических перемещений. При этом может перемещаться как сердечник или его часть, так и одна из катушек индуктивности.

Известно, что взаимная индуктивность двух катушек с числом витков w_1 и w_2 , расположенных на общем магнитопроводе, определяется как

$$M = \frac{w_1 \cdot w_2}{Z_m} \quad (1.42)$$

Сравнивая формулы (1.38) и (1.42), можно сделать вывод, что в основу работы ВИП и ИНП положены общие физические принципы. Поэтому в их конструкции много общего.

Основные разновидности трансформаторных преобразователей изображены на рисунке 1.32. Преобразователь, показанный на рисунке 1.32,а, конструктивно аналогичен ИНП (см. рисунок 1.29), однако имеет две обмотки — w_1 и w_2 . Обмотка w_1 питается от источника переменного тока, и при постоянном токе I_1 ЭДС, наведенная в обмотке w_2 , является функцией зазора δ , т.е. незлектрической величины X . Такой преобразователь применяется для измерения малых линейных перемещений.

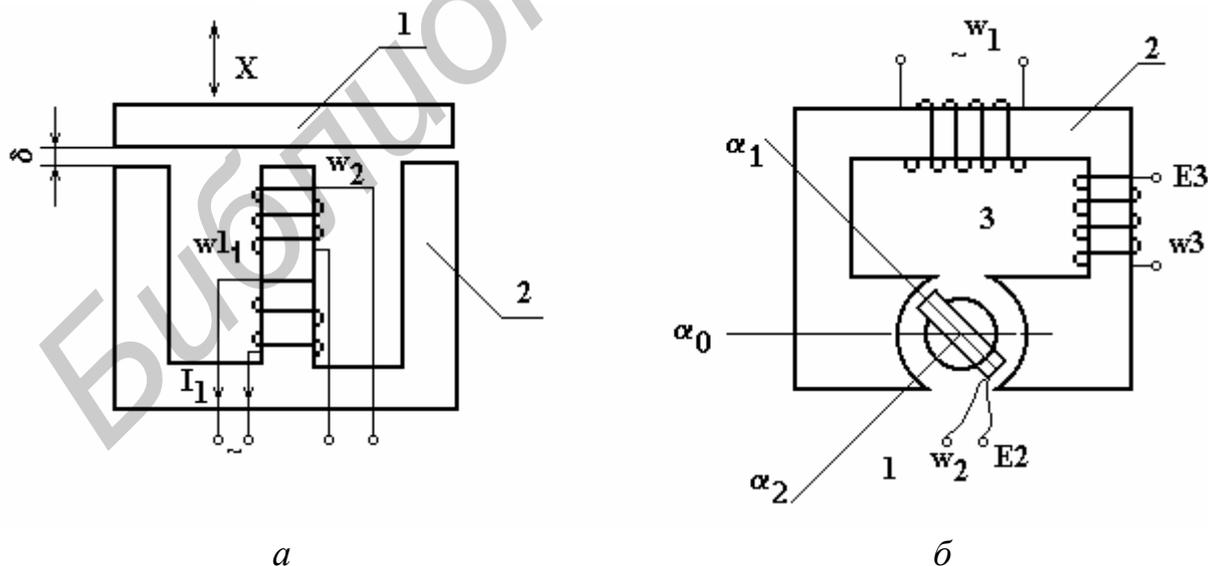


Рисунок 1.32 — Трансформаторные измерительные преобразователи:
 а — для измерения линейных перемещений; б — для измерения угловых перемещений

В преобразователе, показанном на рисунке 1.32,б, обмотка w_2 выполнена подвижной и может свободно поворачиваться в кольцевом зазоре, образованном магнитопроводом 2 и магнитным сердечником 1. ВИП питается переменным током, подаваемым в обмотку w_1 . При угловых положениях рамки α_1 и α_2

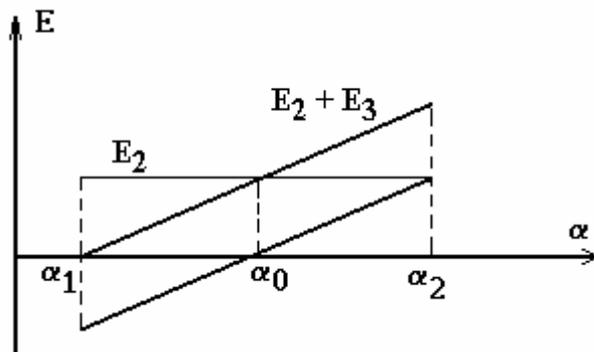


Рисунок 1.33 — Графики зависимостей результирующей ЭДС преобразователя от угла поворота

наведенная в ней ЭДС E_2 максимальна, в положении α_0 уменьшается до нуля, а при переходе через это положение ее фаза изменяется на 180° . Если нужно получить изменение E_2 от нуля до максимума (положение α_1 и α_2 соответственно), то используется вспомогательная обмотка w_3 , соединяемая с w_2 последовательно. В этом случае результирующая ЭДС зависит от угла поворота, как показано на рисунке 1.33. Преобразователи подобного типа используются для измерения больших угловых перемещений.

Для измерения больших линейных перемещений применяют взаимоиндуктивные преобразователи с распределенными магнитными параметрами (рисунок 1.34). Такой преобразователь состоит из магнитопровода 1 с рабочей частью в виде параллельных полос, возбуждающей обмотки w_1 и подвижной катушки 2. При ее перемещении от положения А до положения В ЭДС, возбуждаемая в катушке 2, возрастает практически линейно. Если магнитное сопротивление участка А-В мало по сравнению с магнитным сопротивлением зазора, то обеспечивается линейность функции преобразования. Преобразователи такого типа широко используются для получения заданной ФП путем применения магнитопровода сложной формы.

Взаимоиндуктивные преобразователи, так же как и ИНП, часто выполняются в дифференциальном варианте. Их основные свойства и измерительные цепи аналогичны. Для точного измерения угла поворота используется еще одна разновидность ВИП — индуктосины.

В Государственной системе приборов (ГСП) нормируется изменение коэффициента взаимоиндуктивности трансформаторных преобразователей. При изменении измеряемой величины в номинальном диапазоне он должен изменяться в пределах 0–10, 0–20 или 10–0–10 мГн. Последние значения получают при изменении фазы напряжения, что происходит, например, при изменении

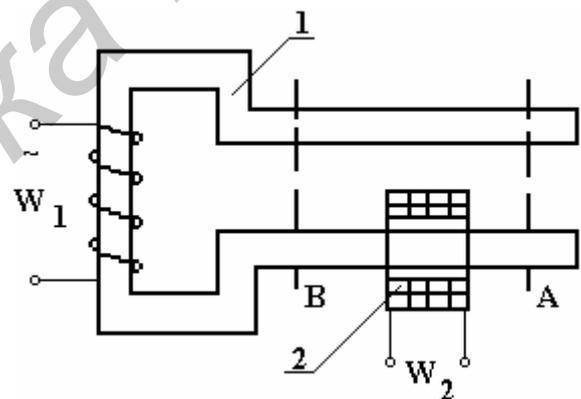


Рисунок 1.34 — Взаимоиндуктивный измерительный преобразователь с распределенными параметрами

Взаимоиндуктивные преобразователи, так же как и ИНП, часто выполняются в дифференциальном варианте. Их основные свойства и измерительные цепи аналогичны. Для точного измерения угла поворота используется еще одна разновидность ВИП — индуктосины.

В Государственной системе приборов (ГСП) нормируется изменение коэффициента взаимоиндуктивности трансформаторных преобразователей. При изменении измеряемой величины в номинальном диапазоне он должен изменяться в пределах 0–10, 0–20 или 10–0–10 мГн. Последние значения получают при изменении фазы напряжения, что происходит, например, при изменении

воздушного зазора от $\delta_1 = \delta_0 + \Delta\delta_{\text{НОМ}}$ до $\delta_2 = \delta_0 - \Delta\delta_{\text{НОМ}}$.

Погрешности трансформаторных преобразователей. Причины погрешностей трансформаторных преобразователей с изменяющимся магнитным сопротивлением аналогичны причинам погрешностей индуктивных преобразователей. Аналогичны также методы их уменьшения. Аддитивные погрешности значительно уменьшаются при использовании дифференциальных преобразователей.

Все трансформаторные преобразователи имеют также специфические причины погрешности, обусловленные протеканием тока во вторичных обмотках и изменением их сопротивления. Это мультипликативные погрешности, уменьшающиеся с уменьшением тока, потребляемого вторичным преобразователем. Погрешность отсутствует при измерении ЭДС первичного преобразователя компенсационным методом с помощью автоматического компенсатора.

Изменение температуры преобразователя вызывает изменение ЭДС. При увеличении температуры возрастает активное сопротивление первичных обмоток и полное их сопротивление. Это уменьшает первичный ток и ЭДС.

1.4.3 Магнитоупругие преобразователи

Принцип действия магнитоупругих преобразователей (МУП) основан на изменении магнитной проницаемости ферромагнитных тел под действием приложенных к ним механических сил или напряжений. В свою очередь, изменение μ приводит к изменению индуктивности или взаимной индуктивности катушек. Относительное изменение магнитной проницаемости $\Delta\mu/\mu$ для различных материалов составляет 0,5...3,0 % при изменении механического напряжения на 1 МПа.

Виды МУП можно разделить на две группы. Для первой характерно изменение μ в одном направлении, магнитный поток направлен вдоль направления воздействия усилия P , в результате изменяется индуктивность катушки преобразователя (рисунок 1.35,а) или взаимная индуктивность двух катушек (рисунок 1.35,б). Для второй группы МУП характерно использование явления магнитной анизотропии чувствительного элемента (рисунок 1.36), и изменение μ в них происходит одновременно в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

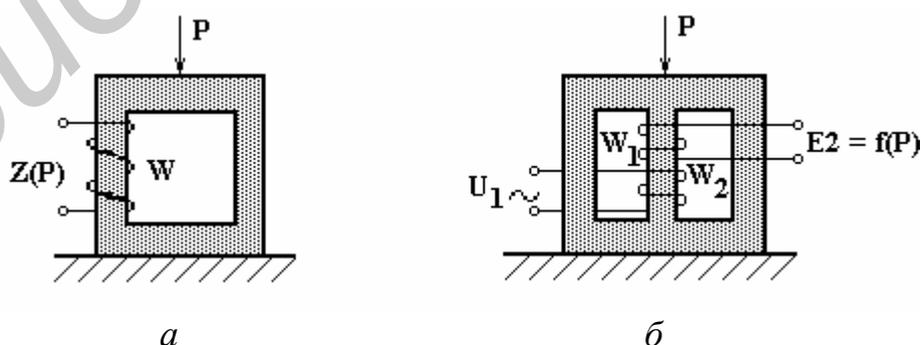


Рисунок 1.35 — Магнитоупругие преобразователи, основанные на изменении магнитной проницаемости материала

В этих преобразователях магнитный поток направлен под углом 45° к ли-

нии действия усилия. Питаются такие преобразователи постоянным током. В ненагруженном состоянии силовые линии первичной обмотки располагаются симметрично и не сцепляются со вторичной обмоткой. При приложении усилия изменяется μ , магнитные силовые линии «вытягиваются» в направлении большей проницаемости и «сжимаются» в направлении меньшей. В результате они сцепляются со вторичной обмоткой и индуцируют в ней ЭДС $e_2 = f(f)$ пропорционально приложенному усилию. Магнитоанізотропные свойства материалов проявляются и при скручивании ферромагнитных тел (эффект Видемана).

Конструктивно МУП выполняются на основе сердечников различной формы, обычно из листовых материалов. Наиболее часто используемыми материалами являются электротехнические стали и пермаллой. Для повышения чувствительности их делают многосекционными.

Основные достоинства: большая выходная мощность, отсутствие подвижных механических частей (более высокая надежность), что позволяет измерять как статические, так и динамические величины (до 10 кГц).

Область применения магнитоупругих преобразователей: измерение сил, давлений, крутящих моментов.

Схемы включения. Магнитоупругие индукционные преобразователи включаются в мостовые измерительные цепи. В плечо, смежное с измерительным преобразователем, включается такой же преобразователь для компенсации аддитивных погрешностей. Он обычно не нагружается — прибор строится по дифференциальной схеме первого типа. Питание моста производится от феррорезонансного стабилизатора.

Схема включения трансформаторного магнитоанізотропного преобразователя приведена на рисунке 1.37. Первичная обмотка 1 питается от феррорезонансного стабилизатора 2. На выходе у ненагруженного преобразователя имеется некоторое остаточное напряжение. Для его компенсации в цепь включен резистор R1, на который подается напряжение с первичной обмотки трансформатора TP1 через фазосдвигающую цепочку 3. Напряжение питания выбирается таким, чтобы режим работы преобразователя был близок к режиму насыщения магнитной цепи. При этом на выходе преобразователя имеется напряжение верхних гармоник значительной величины. Для защиты от гармоник схема содержит фильтр верхних частот 4. Напряжение выпрямляется двухполупериодным выпрямителем 5 и подается на магнитоэлектрический измерительный механизм 6. Фильтр нижних частот 7 служит для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения. При измерении быстропеременных процессов в качестве измерительного механизма включается гальванометр светолучевого осциллографа.

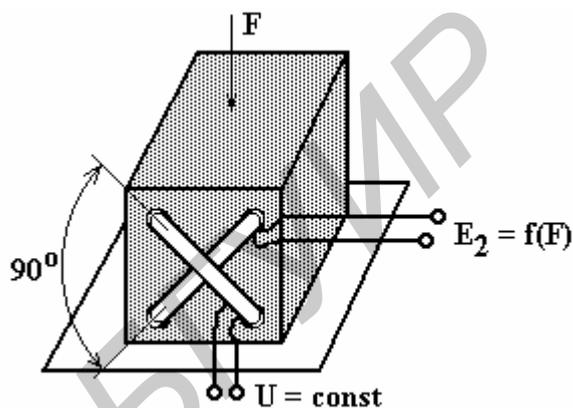


Рисунок 1.36 — Магнитоупругий преобразователь, использующий явление магнитной анизотропии

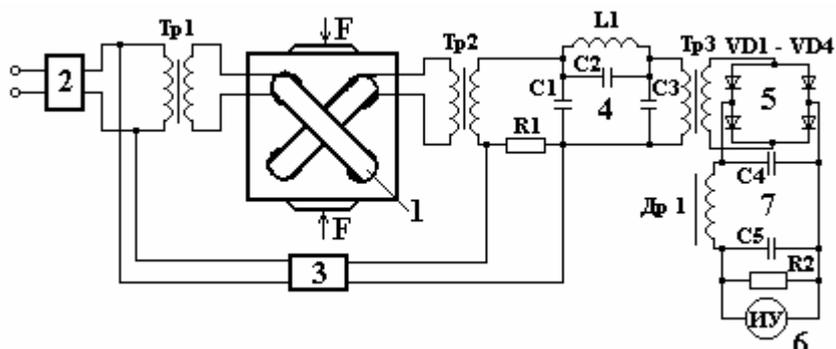


Рисунок 1.37 — Схема включения магнитоупругого преобразователя в измерительную цепь

Магнитоупругие трансформаторные преобразователи могут работать также с автоматическими потенциометрами переменного тока.

Погрешность магнитоупругих преобразователей складывается из следующих источников:

- начальная анизотропия, обуславливающая появление выходной ЭДС в отсутствие нагрузки;
- гистерезис магнитного состояния при нагрузке, обусловленный неидеальностью упругих свойств сердечника;
- погрешность, обусловленная нелинейностью функции преобразования;
- нестабильность магнитоупругой чувствительности, обусловленная изменением параметров материала сердечника в процессе старения;
- флуктуации начальной магнитной проницаемости и чувствительности преобразователя, обусловленные нестабильностью питающих напряжений.

Начальную анизотропию уменьшают конструктивным путем — соответствующим выбором отверстий для обмоток и угла между ними, введением дополнительной компенсирующей обмотки или магнитного шунта. В сердечниках из листового материала чередуют листы с взаимно перпендикулярными направлениями проката.

Функция преобразования при увеличении нагрузки магнитоупругих преобразователей отличается от функции преобразования при уменьшении нагрузки. Это отличие имеет гистерезисный характер и обусловлено магнитным и механическим гистерезисом. При статических измерениях гистерезис преобразователя больше, чем при динамических. Для уменьшения погрешности, вызванной гистерезисом, рекомендуется изготавливать преобразователи из материалов, имеющих возможно больший предел упругости и возможно меньшую петлю магнитного гистерезиса. Максимальные механические напряжения в магнитоупругом материале должны быть в 6–7 раз меньше его предела упругости. Погрешность, обусловленная гистерезисом, уменьшается после тренировки преобразователя. Тренировка производится при 5–10-кратном нагружении силой, соответствующей пределу изменения преобразователя.

Для уменьшения погрешности гистерезиса сердечник должен удовлетворять требованиям, предъявляемым к упругим элементам: монолитность, высокий предел упругости, удаленность рабочей части от точек приложения сил. С

этой точки зрения сердечник следует делать монолитным, однако при этом снижается магнитная анизотропия, а значит, и чувствительность. Поэтому необходим конструктивный компромисс.

Приведенную погрешность, обусловленную гистерезисом функции преобразования, можно снизить до 0,5–1 %.

ФП магнитоупругих преобразователей, как правило, нелинейна. Имеется ряд методов уменьшения нелинейности функции преобразования. Нелинейность уменьшается при сокращении диапазона изменения значений преобразуемой величины, если наряду с преобразуемым усилием преобразователь нагружается некоторой дополнительной постоянной силой; при соответствующем выборе режима магнитного преобразователя; при применении магнитоанизотропных материалов, имеющих различную магнитную проницаемость в различных направлениях. Такие материалы получают в результате определенной технологической обработки —ковки, протяжки, прокатки и т.д. Применение этих мер позволяет уменьшить погрешность, обусловленную нелинейностью функции преобразования, до 1,5–2 %.

Магнитоупругому преобразователю свойственно старение. При этом изменяются как магнитная проницаемость, так и внутреннее напряжение в материале преобразователя. Старение приводит к изменению электрических параметров (L , M) и к изменению чувствительности. Изменение характеристик уменьшается после естественного (в течение нескольких месяцев) или ускоренного искусственного старения. Характеристики стабилизируются путем термообработки магнитопровода. Погрешность, обусловленную изменением параметров преобразователя, можно уменьшить применением дифференциальных преобразователей и дифференциальных схем включения. Для стабилизации параметров материала применяют искусственное старение с помощью термо- и механической тренировки. Таким образом, погрешность, обусловленную старением материала преобразователя, можно уменьшить до 0,5 %.

Погрешности, обусловленные нестабильностью источника питающего напряжения, уменьшают как путем его стабилизации, так и применением дифференциальных измерительных преобразователей. Однако разработка дифференциальных магнитоупругих преобразователей связана с рядом технических трудностей, основная из которых — необходимость создания таких идентичных по параметрам преобразователей, чтобы под воздействием одной и той же неэлектрической величины один из них испытывал деформацию сжатия, а второй — растяжения.

2 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Магнитные измерения в наши дни широко применяются в науке и технике для решения большого количества разнообразных задач, основными из которых являются:

преобразование магнитных величин в свободном пространстве и в магнитных материалах;

определение характеристик магнитных материалов (прежде всего ферромагнитных);

неразрушающий контроль качества материалов и изделий методами магнитного, структурного анализа и магнитной дефектоскопии;

исследование электромагнитных механизмов приборов и устройств, а также их отдельных узлов;

физические исследования атомов, ядерных и элементарных частиц;

исследование магнитного поля Земли, космического пространства и других планет;

геологические исследования земной коры;

медицинские исследования.

2.1 Основные магнитные величины и их меры

Магнитное поле по аналогии с другими существующими в природе полями (электрическое, гравитационное и т.п.) может быть охарактеризовано с помощью магнитного потока Φ , который отличается от потоков других полей тем, что он всегда замкнут, т.е. магнитное поле является вихревым и не имеет источника и стока. Магнитный поток, однако, является скалярной величиной и не характеризует магнитное поле в каждой точке. Поэтому одной из основных характеристик магнитного поля в каждой его точке является магнитная индукция \vec{B} — интенсивность магнитного потока Φ , связанная с ним соотношением

$$\Phi = \int_s \vec{B} d\vec{s}, \quad (2.1)$$

где s — поверхность, пронизываемая потоком.

Для магнитных полей, однородных в пространстве, выражение (2.1) может быть записано в виде

$$\Phi = B \cdot s. \quad (2.2)$$

Вектор магнитной индукции \vec{B} определяется силой \vec{F} взаимодействия магнитного поля с движущимся электрическим зарядом q :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \cdot \vec{B}, \quad (2.3)$$

где \vec{v} — скорость движения заряда.

Следующей важной величиной, характеризующей силовое воздействие магнитного поля на движущийся заряд независимо от свойств среды, в которой оно действует, является напряженность магнитного поля \vec{H} . Напряженность \vec{H} в вакууме связана с магнитной индукцией \vec{B}_0 соотношением

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}, \quad (2.4)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная, или проницаемость вакуума.

Среды, способные намагничиваться, в магнитном поле сами становятся источниками внутреннего магнитного поля с индукцией \vec{B}_i . Такие среды характеризуются вектором намагниченности \vec{J} (интенсивностью намагничивания среды). Тогда по аналогии с (2.4) индукция внутреннего магнитного поля для изотропной среды может быть выражена соотношением

$$\vec{B}_i = \mu_0 \vec{J}. \quad (2.5)$$

Полная индукция магнитного поля в намагниченной среде \vec{B} в соответствии с (2.4) и (2.5) определится выражением

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_i = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}) = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H}, \quad (2.6)$$

где μ_r , μ — соответственно относительная и абсолютная магнитные проницаемости, характеризующие магнитные свойства среды.

Для изотропных магнитных сред магнитная проницаемость является скалярной величиной и векторы \vec{B} и \vec{H} коллинеарны, для анизотропных сред магнитная проницаемость представляет собой тензор и зависимость между \vec{B} и \vec{H} становится более сложной.

Из соотношений (2.4), (2.5) и (2.6) можно получить выражение для магнитной проницаемости μ_r :

$$\mu_r = 1 + \frac{\vec{J}}{\vec{H}}. \quad (2.7)$$

Второе слагаемое в правой части выражения (2.7) называют магнитной восприимчивостью среды и выражают формулой

$$\chi = \frac{\vec{J}}{\vec{H}}. \quad (2.8)$$

Тогда намагниченность среды \vec{J} может быть выражена через напряженность внешнего магнитного поля:

$$\vec{J} = \chi \vec{H}. \quad (2.9)$$

Магнитная восприимчивость, так же как и магнитная проницаемость среды, может быть скалярной или тензорной величинами в зависимости от магнитных свойств среды.

Для характеристики источников магнитного поля широко используют понятие магнитного момента. Как известно из курса физики, источниками магнитного поля являются электрические токи и намагниченные тела. Под магнитным моментом \vec{M} электрического тока I , протекающего по некоторому элементарному контуру с площадью ds , понимают вектор, равный по модулю произведению площади контура и тока и направленный перпендикулярно площади контура. В намагниченных телах, согласно квантовой теории, магнитное поле, создаваемое спиновыми моментами частиц, аналогично полю движущихся электрических зарядов и может рассматриваться как поле элементарных электрических токов. В связи с этим момент намагниченного тела определяется пу-

тем векторного сложения элементарных магнитных моментов $d\vec{M}$, которые связаны с интенсивностью намагничивания \vec{J} выражением

$$d\vec{M} = \vec{J}dv, \quad (2.10)$$

где dv — элемент объема тела.

Магнитный момент \vec{M} всего тела при известном распределении намагниченности \vec{J} по его объему V определится формулой

$$\vec{M} = \int_V \vec{J}dv. \quad (2.11)$$

Рассмотренные магнитные величины достаточно полно описывают магнитные поля в различных средах и поэтому решение вышеприведенных задач сводится к измерению одной или нескольких из них. Наименования, условные обозначения, единицы измерения в системе SI и размерность основных магнитных величин приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 — Основные магнитные величины

| Наименование | Условное обозначение | Единица измерения | |
|--|----------------------|---|-----------------------|
| | | Наименование (обозначение) | Размерность |
| Магнитный поток (поток вектора магнитной индукции) | Φ | Вебер (Вб) | $L^2MT^{-2}I^{-1}$ |
| Магнитная индукция | \vec{B} | Тесла (Тл) | $MT^{-2}I^{-1}$ |
| Напряженность магнитного поля | \vec{H} | Ампер на метр (А/м) | $L^{-1}I$ |
| Магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума) | μ_0 | Генри на метр (Гн/м) | $LMT^{-2}I^{-2}$ |
| Намагниченность (интенсивность намагничивания) | \vec{J} | Ампер на метр (А/м) | $L^{-1}I$ |
| Магнитная проницаемость относительная | μ_r | Не имеет | Безразмерная величина |
| Магнитная восприимчивость | χ | Не имеет | Безразмерная величина |
| Магнитный момент | \vec{M} | Ампер-квадратный метр (А·м ²) | L^2I |

2.2 Основные характеристики магнитных материалов

Магнитными материалами называют материалы, обладающие ферромагнитными или ферримагнитными свойствами. Свойства эти обусловлены тем, что магнитные моменты атомов или ионов в таких материалах находятся в состоянии самопроизвольного магнитного упорядочения. Все магнитные мате-

риалы в зависимости от их свойств можно подразделить на магнитомягкие и магнитотвердые.

Магнитные свойства веществ и материалов характеризуются целым рядом характеристик, которые целесообразно классифицировать на статические и динамические.

Статические характеристики определяются экспериментально при помещении магнитного материала в постоянное или квазипостоянное (медленно изменяющееся) магнитное поле. Они зависят только от свойств материала и технологии его обработки.

Динамические характеристики также определяются экспериментально, но при перемагничивании образцов магнитных материалов в переменных магнитных полях. Однако, в отличие от статических характеристик, они зависят не только от свойств материала, но также от частоты переменного магнитного поля, формы кривой изменения во времени индукции и напряженности магнитного поля, размеров и формы образца.

2.2.1 Статические характеристики магнитных материалов

Наиболее полно свойства магнитных веществ и материалов характеризуют зависимость магнитной индукции \vec{B} от напряженности магнитного поля \vec{H} . Поэтому основными характеристиками магнитных материалов являются *основная и начальная кривые намагничивания и предельная петля магнитного гистерезиса*. По этим характеристикам определяются другие статические характеристики и параметры магнитных материалов: магнитная проницаемость (начальная, максимальная и др.), остаточная магнитная индукция, коэрцитивная сила и др.

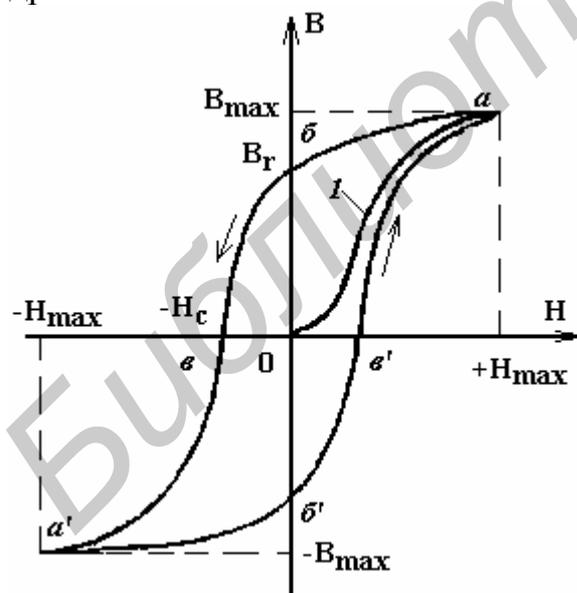


Рисунок 2.1 — Начальная петля намагничивания и петля магнитного гистерезиса

Если полностью размагниченный образец поместить в медленно нарастающее от нулевого значения магнитное поле, то образец будет намагничиваться. Его магнитное состояние будет изменяться в соответствии с кривой намагничивания (кривая 1 на рисунке 2.1). Если намагниченный таким образом образец начать перемагничивать, медленно изменяя напряженность магнитного поля от плюс H_{\max} до минус H_{\max} и обратно, то индукция в образце будет изменяться по кривой, получившей название петли магнитного гистерезиса. При многократном циклическом перемагничивании образца петля будет замкнутой и симметричной относительно начала координат. Петля, максимальное значение намагниченности образца для которой соответствует намагниченности технического насыщения материала и

форма и размеры которой не изменяются при дальнейшем увеличении H_{\max} , называется предельной петлей магнитного гистерезиса. Индукция B_r , сохраняющаяся в магнитном материале после намагничивания его до насыщения и уменьшения напряженности магнитного поля до нуля, называется остаточной индукцией (точка «б» на рисунке 2.1).

Значение напряженности магнитного поля H_c , необходимое для изменения магнитной индукции в материале от B_r до нуля, называют коэрцитивной силой (точка «в» на рисунке 2.1).

При периодическом перемагничивании магнитного материала полями с различными значениями H_{\max} , каждому значению H_{\max} соответствует своя петля магнитного гистерезиса. Вершины симметричных петель гистерезиса, получаемых при последовательно возрастающих H_{\max} , имеют своим геометрическим местом кривую, называемую основной кривой намагничивания (рисунок 2.2,а). Основная кривая намагничивания практически мало чем отличается от начальной кривой намагничивания, а поскольку ее можно сравнительно просто измерить с более высокой точностью, то на практике чаще пользуются основной кривой намагничивания.

Из основной кривой намагничивания в соответствии с (2.4) можно определить магнитную проницаемость материала μ_r для различных значений H по формуле

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}. \quad (2.12)$$

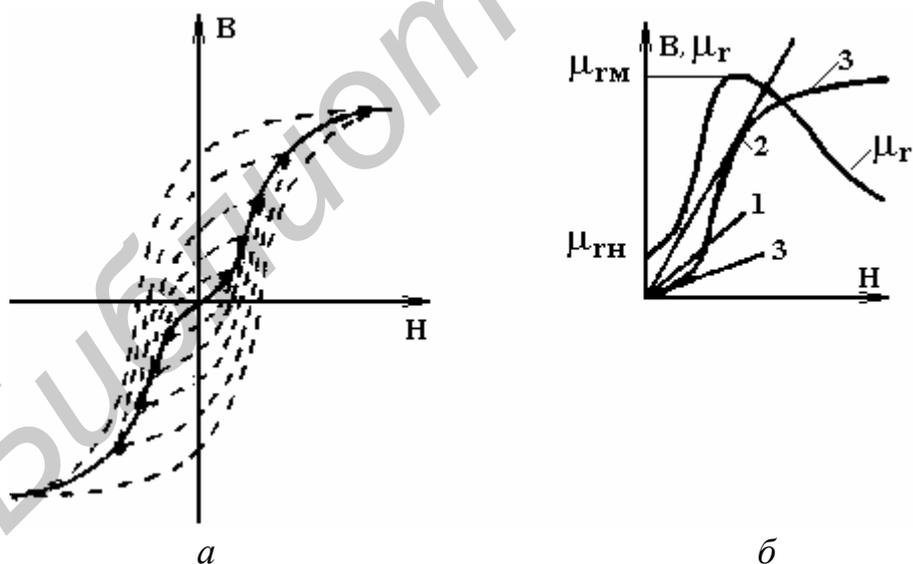


Рисунок 2.2 — Основная кривая намагничивания (а) и зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля (б)

Магнитная проницаемость, определяемая выражением (2.12), представляет собой тангенс угла наклона прямой линии, соединяющей начало основной кривой намагничивания и точку на ней, для которой определяется значение магнитной проницаемости (линии 1, 2 на рисунке 2.2,б). На рисунке 2.2,б показаны

основная кривая намагничивания и зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля H , построенная для кривой намагничивания в соответствии с выражением (2.12). На графике $\mu_r = f(H)$ обозначены важнейшие значения магнитной проницаемости: начальная магнитная проницаемость μ_{rH} и максимальная магнитная проницаемость μ_{rM} . Начальная магнитная проницаемость определяется по формуле

$$\mu_{rH} = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 H} \quad (2.13)$$

и представляет собой тангенс угла наклона линии 3 на рисунке 2.2,б. Она характеризует свойства магнитных материалов, работающих в условиях слабого намагничивания. Максимальная магнитная проницаемость определяется тангенсом угла наклона линии 2 на рисунке 2.2,б и характеризует свойства материалов при более сильном их намагничивании.

Магнитная проницаемость, определяемая выражением (2.12), имеет смысл лишь в тех случаях, когда магнитное состояние материала характеризуется точками на основной кривой намагничивания. Если же магнитное состояние материала соответствует точкам на петле гистерезиса, то определять магнитную проницаемость с помощью формулы (2.12) не имеет смысла, так как она может принимать все значения от $+\infty$ до $-\infty$. В этих случаях пользуются понятиями обратимой и дифференциальной проницаемости.

Из других статических характеристик следует назвать магнитные потери, характеризующие мощность, поглощаемую магнитным материалом при воздействии на него меняющегося во времени магнитного поля. Магнитные потери пропорциональны площади петли магнитного гистерезиса.

2.2.2 Динамические характеристики магнитных материалов

Динамическими характеристиками магнитных материалов называют характеристики, получаемые в переменных магнитных полях, когда время установления напряженности поля становится соизмеримым с временем перемагничивания исследуемого материала. При перемагничивании образцов магнитных материалов переменными магнитными полями в образцах возникают вихревые токи, создающие свои магнитные поля, которые направлены противоположно вызвавшему их полю. В результате напряженность намагничивающего поля в образце уменьшится. Наряду с этим, вследствие магнитного поверхностного эффекта, в сечениях образца, перпендикулярных направлению вектора напряженности намагничивающего поля, распределение магнитной индукции и напряженности поля будет неравномерным. Поэтому при измерении динамических характеристик приходится говорить об усредненных по сечению образца значениях магнитной индукции и напряженности поля. Так как вихревые токи зависят от размеров и формы образца, его электрического сопротивления, а также частоты и закона изменения во времени намагничивающего поля, то и динамические характеристики, определенные для данного образца, будут зависеть не только от свойств магнитного материала, но и от указанных факторов. Кроме того, при перемагничивании образца переменными магнитными полями в нем наблюдается зависимость реакции магнитного материала на приложенное

магнитное поле от длительности его воздействия — магнитная вязкость и некоторые другие эффекты. Таким образом, динамические характеристики являются характеристиками конкретного образца из данного магнитного материала при конкретных условиях намагничивания (перемагничивания).

Свойства образцов магнитных материалов, перемагничиваемых переменными магнитными полями, характеризуются набором динамических характеристик и параметров, аналогичным статическим характеристикам. Однако сами динамические характеристики существенно отличаются от статических.

Изменение индукции внутри магнитного образца при намагничивании его переменным магнитным полем происходит в соответствии с кривой, которая называется *динамической петлей* (кривые 2, 3 на рисунке 2.3). Так как при намагничивании образца переменным магнитным полем энергия этого поля расходуется не только на преодоление потерь, связанных с магнитным гистерезисом, но также и на потери, обусловленные влиянием возникающих в образце вихревых токов, то энергия, необходимая для перемагничивания образца в переменном поле, будет больше энергии, необходимой для его перемагничивания в постоянном (квазипостоянном) поле.

Поскольку энергия, затрачиваемая на перемагничивание, пропорциональна произведению магнитной индукции B на напряженность магнитного поля H , то увеличение затрат энергии внешнего поля, обусловленное возникающими в образце вихревыми токами, проявится в расширении динамических петель по сравнению со статической петлей магнитного гистерезиса (кривые 3 и 1 на рисунке 2.3 соответственно).

Напряженность магнитного поля H и магнитная индукция B в магнитном материале являются функциями времени, однако вследствие нелинейной зависимости между ними в магнитном материале они не могут быть одновременно синусоидальными. С другой стороны, динамические петли на достаточно высоких частотах близки по форме к эллипсу.

Поэтому если заменить реальную динамическую петлю эквивалентным, равновеликим ей по площади эллипсом, то параметрическое уравнение петли можно записать следующим образом:

$$H = H_m \sin \omega t; B = B_m \sin (\omega t - \delta), \quad (2.14)$$

где δ — угол сдвига фаз между B и H .

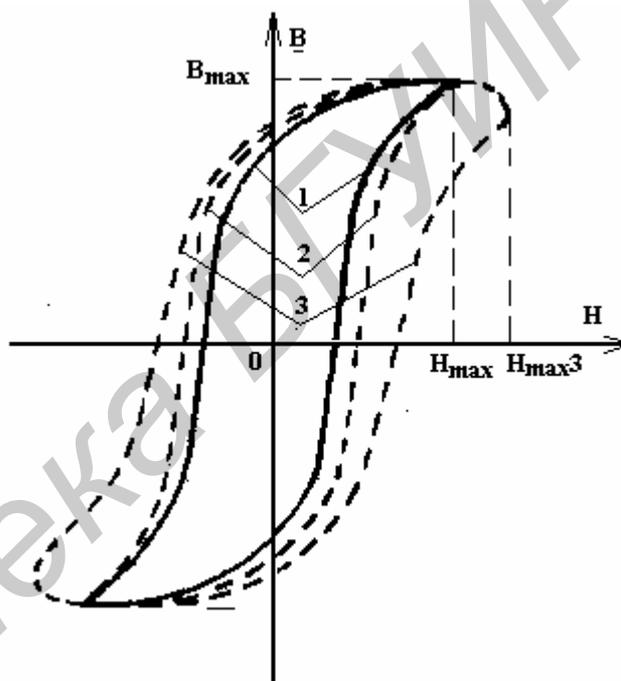


Рисунок 2.3 — Изменение индукции внутри образца магнитного материала

Для эквивалентной петли H и B являются синусоидальными функциями, и поэтому здесь можно ввести понятие комплексной проницаемости μ_r :

$$\mu_r = \frac{\dot{B}}{\mu_0 \dot{H}} = \frac{B_m e^{j\omega t} \sum \cdot e^{-j\delta}}{H_m e^{j\omega t} \cdot \mu_0} = \mu_{ra} \cdot e^{-j\delta} = \mu_{r1} - j\mu_{r2}, \quad (2.15)$$

где μ_{ra} — амплитудная магнитная проницаемость, равная модулю комплексной проницаемости и определяемая отношением амплитуд эквивалентных синусоид индукции и напряженности:

$$\mu_{ka} = \frac{B_m}{\mu_0 H_m}. \quad (2.16)$$

Здесь μ_{r1} — действующая, или упругая, составляющая магнитной проницаемости, характеризующая обратимые процессы при перемагничивании; μ_{r2} — мнимая, или «вязкая», составляющая, характеризующая необратимые потери в материале при перемагничивании.

Физический смысл амплитудной магнитной проницаемости аналогичен физическому смыслу магнитной проницаемости при постоянных намагничивающих полях.

Угол δ сдвига фаз между B и H называют углом магнитных потерь и определяют его из соотношения

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}}. \quad (2.17)$$

Одной из важнейших динамических характеристик являются уже упоминавшиеся потери энергии в материале при его перемагничивании переменным магнитным полем. Потери в магнитных материалах содержат в общем случае три основные составляющие: потери на гистерезис, потери на вихревые токи и дополнительные потери, связанные с магнитной вязкостью и другими явлениями. На практике чаще всего определяют полные магнитные потери P как функцию максимального значения B_m . Однако измерение потерь проводят на различных частотах, что позволяет определить также отдельные составляющие потерь. В стандарте на магнитные материалы установлено понятие «удельных магнитных потерь», под которыми понимаются потери при перемагничивании единицы массы магнитного материала. Для характеристики потерь в магнитных материалах на повышенных и высоких частотах широко используется тангенс угла магнитных потерь, определяемый в соответствии с выражением (1.17).

Магнитные свойства материалов, перемагничиваемых переменными магнитными полями, могут характеризоваться также другими динамическими характеристиками, среди которых можно выделить характеристики магнитных материалов в режиме импульсного перемагничивания.

2.3 Физические основы преобразования магнитных величин

2.3.1 Классификация измерительных преобразователей

Для преобразования магнитных величин в электрические используются различные проявления магнитного поля — электрическое, механическое, оптическое и др. При создании магнитных измерительных преобразователей наиболее широко используются следующие проявления магнитного поля: явление электромагнитной индукции, силовое взаимодействие поля с телами и частицами, обладающими магнитными моментами, и гальваномагнитные эффекты.

Классифицировать магнитоизмерительные преобразователи можно по различным классификационным признакам, наиболее широкое распространение среди которых нашли следующие:

- по принципу используемого физического явления или эффекта;
- по назначению;
- по виду физической величины, в которую преобразуется измеряемая магнитная величина.

Классификационная схема наиболее широко используемых магнитоизмерительных преобразователей, дифференцированных на группы и виды по типу используемого в них физического явления или эффекта, представлена на рисунке 2.4.

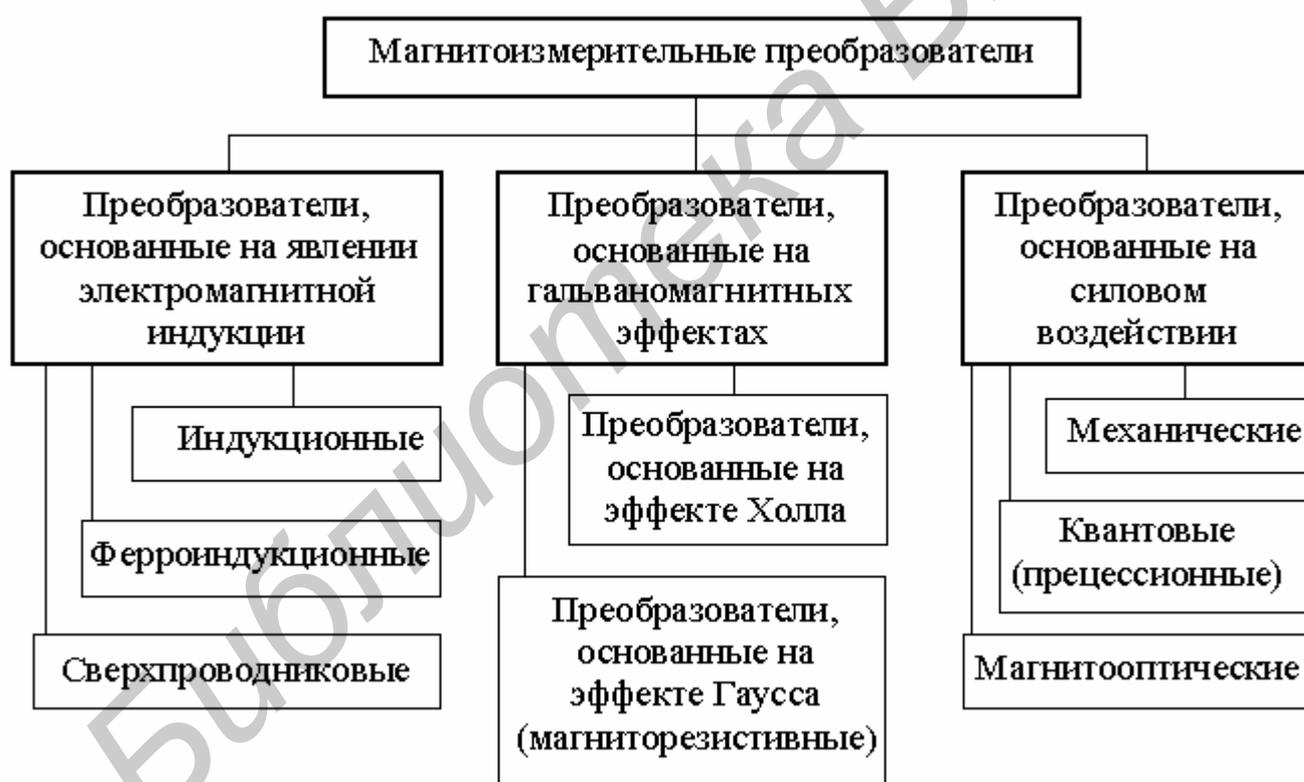


Рисунок 2.4 — Классификационная схема магнитоизмерительных преобразователей

Согласно этой схеме все преобразователи объединены в три большие группы. Общим для преобразователей, образующих первую группу, является то, что процессы, протекающие в них, так или иначе подчиняются закону электромагнитной индукции. Вторую группу составляют преобразователи, принцип действия которых основан на использовании физических явлений, возникаю-

щих при воздействии магнитного поля на движущиеся носители электрических зарядов и получивших название гальваномагнитных. В третью группу объединены преобразователи, принцип действия которых основан на силовом воздействии магнитного поля с намагниченными телами или обладающими магнитным моментом микрочастицами.

Схема (см. рисунок 2.4) учитывает далеко не все существующие магнитоизмерительные преобразователи. Не представлены здесь, как не находящие широкого применения в современных условиях из-за невысоких метрологических, технических и эксплуатационных характеристик, пьезострикционные, электрострикционные, электрокинетические, магнитоэлектрические, а также магнитотепловые и фотомагнитные преобразователи.

Далее будут рассмотрены принцип действия, важнейшие свойства и характеристики наиболее широко применяемых магнитоизмерительных преобразователей, осуществляющих преобразование магнитных величин в электрические.

2.4 Индукционные магнитоизмерительные преобразователи

Индукционные магнитоизмерительные преобразователи получили наиболее широкое применение при измерении различных магнитных величин. Наиболее характерным представителем данного вида преобразователей являются измерительные катушки (ИК), витки которых сцепляются с преобразуемым магнитным потоком Φ .

Если ИК содержит w_k витков, то при изменении потока Φ в катушке возникает ЭДС, описываемая формулой

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -w_k \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.18)$$

где $\Psi = w_k \Phi$ — потокосцепление магнитного поля с ИК.

Для магнитного поля, однородного в пределах охватываемого катушкой пространства и ориентированного вдоль оси ИКУ, выражение (2.18) с учетом (2.2) и (2.4) может быть приведено к виду

$$e = -w_k s_k \frac{dB}{dt} = -\mu w_k s_k \frac{dH}{dt}, \quad (2.19)$$

где s_k — площадь каждого из витков измерительной катушки.

Таким образом, из (2.18) и (2.19) следует, что измерительная катушка является измерительным преобразователем, посредством которого магнитные величины Φ , B , H могут быть преобразованы в электрическую величину — ЭДС.

Если ИК ориентирована в пространстве так, что ее ось составляет с направлением вектора $\vec{H}(\vec{B})$ угол α , то выражение (2.19) может быть приведено к виду

$$e = -w_k s_k \frac{d}{dt}(H \cdot \mu \cdot \cos \alpha), \quad (2.20)$$

из которого следует, что индукционные магнитоизмерительные преобразователи в виде ИК могут выполнены в виде трех основных разновидностей:

— преобразователи, у которых изменение магнитного потока Φ , сцепляющегося с ИК, осуществляется за счет изменения H ;

— преобразователи, у которых изменение магнитного потока Φ осуществляется за счет изменения $\cos \alpha$;

— преобразователи, у которых изменение магнитного потока Φ осуществляется за счет изменения магнитной проницаемости среды μ , в которой действует магнитное поле.

Преобразователи первого вида применяются для измерения магнитных величин в постоянных и переменных магнитных полях. При этом во втором случае преобразователь остается неподвижным, а при измерениях в постоянных магнитных полях изменение Φ за счет изменения H осуществляют удалением катушки из поля или внесением ее в поле при неизменной ориентации катушки относительно направления \vec{H} .

Преобразователи второго вида применяются для измерений магнитных величин в постоянных полях и представляют собой катушки, поворачиваемые скачкообразно, например, от $\alpha = 0$ до 90° или от $\alpha = 0$ до 180° , поворачиваемые периодически, например, от $+\alpha$ до $-\alpha$, или же непрерывно вращающиеся с угловой скоростью $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$.

Преобразователи третьего вида получили название ферроиндукционных и рассмотрены отдельно.

Размеры, форма и конструкция измерительных катушек определяются их назначением. Так, при измерениях магнитных величин в воздушных средах обычно применяют цилиндрические или плоские прямоугольного сечения катушки, размеры которых тем меньше, чем больше неоднородность исследуемого поля. Измерение напряженности поля у поверхности постоянных магнитов и намагниченных тел лучше проводить с помощью миниатюрных плоских катушек прямоугольного сечения, а у поверхности листовых ферромагнитных материалов — с помощью длинных плоских катушек, выполненных на очень тонком (узком) каркасе, чтобы обеспечить возможность измерения у поверхности образца. При измерениях магнитного потока или индукции внутри ферромагнитных материалов измерительные катушки (стационарные) наматываются непосредственно на исследуемый образец. Конструктивно измерительные катушки могут выполняться путем намотки на каркас из диэлектрика либо могут быть бескаркасными.

Важнейшей характеристикой ИК является ее постоянная K_{sw} , которая согласно определению находится как сумма площадей поперечных сечений S_k всех витков катушки:

$$K_{sw} = \sum_1^{w_k} S_k, \quad (2.21)$$

или

$$K_{sw} = w_k S_k \quad (2.22)$$

при равенстве s_k для всех витков катушки.

Определение K_{sw} расчетным путем по геометрическим размерам не всегда обеспечивает необходимую точность, поэтому часто ее определяют экспериментально в известном магнитном поле.

Наиболее широкое применение при измерениях параметров постоянных магнитных полей нашли следующие индукционные преобразователи:

— в виде измерительных катушек, вносимых в поле или удаляемых из поля при неизменной ориентации относительно направления H (преобразователи первого вида);

— в виде вращающихся или колеблющихся измерительных катушек (преобразователи второго вида).

Выходную ЭДС, возникающую в измерительной катушке при ее внесении в поле или удалении из него, можно записать с помощью выражения (2.18), которое можно привести к виду

$$\Delta\Phi = \frac{1}{w_k} \int_0^{\infty} e \cdot dt = \frac{1}{w_k} \int_0^{\infty} i \cdot r \cdot dt, \quad (2.23)$$

где r — сопротивление цепи измерительной катушки; i — ток, протекающий в цепи ИК при условии, что она замкнута.

Из соотношения (2.23) видно, что для преобразования магнитного потока $\Delta\Phi$, сцепляющегося с ИК, необходимо включить на выходе катушки электроизмерительные устройства, интегрирующие индуктируемую в катушке ЭДС или импульсы тока. При быстром удалении измерительной катушки из измеряемого поля или внесении её в поле выполняется равенство $\Delta\Phi = \Phi$.

Вращающиеся с постоянной скоростью в измеряемом магнитном поле измерительные катушки используются в качестве первичных преобразователей в магнитоизмерительных приборах, называемых измерительными генераторами. Катушки в них выполняются чаще всего прямоугольными, круглыми или в виде многополюсного ротора диаметром от единиц до нескольких десятков миллиметров. Из (2.20) можно получить выражение для амплитуды ЭДС E_m , возникающей на выходе таких преобразователей:

$$E_m = A \cdot K_{sw} \cdot B \cdot \omega, \quad (2.24)$$

где A — постоянный коэффициент; $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$ — угловая скорость вращения ИК.

Из уравнения преобразования (2.24) можно выразить измеряемую индукцию B через выходную ЭДС преобразователя.

Диапазон преобразования для вращающихся измерительных катушек составляет 10^{-4} – 10 Т. Основным источником погрешности преобразования для них является нестабильность скорости вращения ω . Для уменьшения этой погрешности применяют компенсационный метод преобразования, в соответствии с которым две катушки с постоянными K_{sw1} и K_{sw2} , вращающиеся синхронно от одного двигателя, помещаются: первая в измеряемое поле B , а вторая — в образцовое поле B_0 . Если включить катушки встречно и путем из-

менения B_0 осуществить полную компенсацию ЭДС на выходах катушек, то измеряемую индукцию B можно определить из условия компенсации

$$e_1 = e_2; \quad K_{sw1}B = K_{sw2}B_0. \quad (2.25)$$

Образцовое поле может создаваться с помощью образцовых мер магнитной индукции (катушки Гельмгольца, электро- или постоянные магниты).

Погрешность преобразования индукционных измерительных преобразователей в виде вращающихся или колеблющихся катушек составляет единицы процентов (у компенсационных — доли процента). Они обладают достаточно линейной функцией преобразования, широким диапазоном значений преобразуемых величин и практически постоянной чувствительностью. Эти их достоинства обуславливают широкое применение указанных преобразователей.

При измерениях в переменных магнитных полях применяются неподвижные ИК. Возникающая в катушке ЭДС пропорциональна скорости изменения магнитной индукции и в соответствии с (2.18) может быть определена выражением

$$e = -K_{sw} \cos \alpha \frac{dB}{dt}. \quad (2.26)$$

Для исключения зависимости выходной ЭДС преобразователя от частоты измеряемого поля в ряде случаев используются интегрирующие цепи, включаемые на выходе ИК. Такие преобразователи для повышения их чувствительности выполняют с большим числом витков w . В ряде случаев в них применяются усилители, представляющие собой магнитопровод из ферромагнитного материала.

Индукционные магнитоизмерительные приборы представляют собой сочетание индукционного преобразователя той или иной разновидности и электроизмерительного устройства, осуществляющего измерение выходной ЭДС преобразователя.

Для измерений в постоянных магнитных полях наиболее широкое распространение нашли, как уже указывалось, преобразователи в виде вносимых в поле или удаляемых из него измерительных катушек, а также измерительных генераторов на основе вращающихся измерительных катушек.

В первом случае магнитоизмерительный прибор в соответствии с выражением (2.23) должен состоять из преобразователя и интегрирующего электроизмерительного устройства. Такие приборы применяются для измерений магнитного потока и называются веберметрами. В качестве интегрирующего устройства в них могут быть использованы баллистический гальванометр, магнитоэлектрический веберметр и веберметры с усилителями постоянного тока (фотогальванометрическими, модуляцией и демодуляцией входного сигнала).

Баллистический гальванометр представляет собой одну из разновидностей магнитоэлектрических гальванометров, отличающуюся большой инерционностью, а значит и большим периодом собственных колебаний подвижной части. Вследствие указанных отличий движение подвижной части прибора начинается лишь тогда, когда через ее рамку протечет импульс тока, поданный на прибор с выхода первичного преобразователя.

Схема веберметра с баллистическим гальванометром Γ показана на рисунке 2.5. Первичным преобразователем является ИК, с которой сцепляется магнитный поток Φ . Изменение магнитного потока $\Delta\Phi$, осуществляемое внесением катушки в магнитное поле или удалением ее из поля, преобразуется катушкой в соответствии с выражением (2.23) в импульс тока i , проходящий по замкнутой цепи ИК. Отклонение указателя баллистического гальванометра α_m , как следует из его теории, пропорционально количеству электричества Q , прошедшего через его рамку:

$$\alpha_m = \frac{Q}{C_b}, \quad (2.27)$$

где C_b — баллистическая постоянная гальванометра.

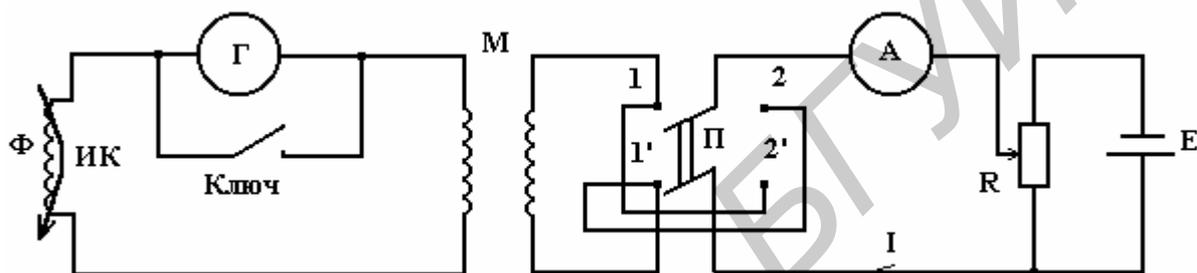


Рисунок 2.5 — Схема включения измерительной катушки в веберметр с баллистическим гальванометром

В данном случае количество электричества Q выразится соотношением

$$Q = \int_0^{\infty} i dt, \quad (2.28)$$

а с учетом (2.23) запишется в виде

$$Q = \frac{w_k \Delta\Phi}{r}. \quad (2.29)$$

Окончательное выражение для $\Delta\Phi$ через показание гальванометра α_m получим из (2.27) и (2.29):

$$\Delta\Phi = \frac{C_b r}{w_k} \alpha_m = \frac{C_\Phi}{w_k} \alpha_m \quad (2.30)$$

где $C_\Phi = C_b \cdot r$ — постоянная баллистического гальванометра по магнитному потоку, Вб/дел.

Постоянная C_Φ , как следует из определяющего ее выражения, зависит от сопротивления r цепи измерительной катушки. Для определения значения C_Φ в схему прибора, изображенную на рисунке 2.4, включают образцовую меру магнитного потока в виде образцовой катушки взаимной индуктивности M , переключатель Π — для изменения направления поля, создаваемого катушкой M , амперметр A — для измерения тока I , протекающего по первичной обмотке катушки M , и источник питания E с потенциометром R , служащим для регули-

ровки тока I .

Значение C_Φ определяется экспериментально следующим образом. С помощью потенциометра R и амперметра A устанавливается определенное значение тока I . Изменением с помощью переключателя Π направления протекания тока I по первичной обмотке катушки M осуществляется изменение возникающего в катушке магнитного потока

$$\Delta\Phi_0 = M \Delta I, \tag{2.31}$$

где M — коэффициент взаимной индуктивности катушки; $\Delta I = 2I$ — изменение тока в первичной обмотке катушки при коммутации переключателем Π направления его протекания на обратное.

Под воздействием $\Delta\Phi_0$ указатель гальванометра отклонится на значение β_t . Поскольку значения M и ΔI известны, то постоянная баллистического гальванометра по магнитному потоку может быть определена по формуле

$$C_\Phi = \frac{M \cdot \Delta I}{\beta_m} = \frac{2M \cdot I}{\beta_m}. \tag{2.32}$$

Для того чтобы найденное значение C_Φ не изменялось, измерения с помощью схемы (см. рисунок 2.5) проводят, не меняя сопротивления r цепи измерительной катушки, т.е. не отключая вторичной обмотки катушки M . Определенные значения C_Φ проводят перед каждым измерением.

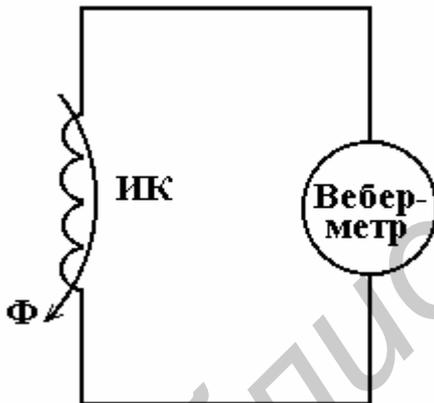


Рисунок 2.6 — Схема включения измерительной катушки в цепь магнитоэлектрического веберметра

Минимальная погрешность измерения магнитного потока с помощью индукционного преобразователя и баллистического гальванометра может быть снижена до десятых долей процента. Однако баллистические гальванометры требуют предварительной градуировки, процесс измерения с их помощью достаточно трудоемок, и поэтому в последнее время они заменяются магнитоэлектрическими веберметрами.

Веберметр (Вб) подключается к измерительной катушке (ИК) (рисунок 2.6). Под воздействием изменяющегося магнитного потока Φ в ИК наводится ЭДС e в соответствии с выражением (2.18).

Отклонение α подвижной части веберметра пропорционально изменению $\Delta\Phi$. С учетом (2.23) можно записать

$$\alpha = S_{Вб} \int_0^\infty e dt = S_{Вб} w_k \Delta\Phi, \tag{2.33}$$

где $S_{Вб}$ — чувствительность веберметра, связанная с ценой деления $C_{Вб}$ прибора соотношением $S_{Вб} = \frac{1}{C_{Вб}}$.

Отсюда измеренное изменение магнитного потока выразится формулой

$$\Delta\Phi = \frac{\alpha}{S_{вб} w_k} = \frac{C_{вб} \cdot \alpha}{w_k}. \quad (2.34)$$

Магнитоэлектрические веберметры представляют собой высокочувствительные магнитоэлектрические приборы, у которых противодействующий момент подвижной части пренебрежимо мал по сравнению с моментом успокоения вследствие электромагнитного и воздушного торможения.

Вследствие малости противодействующего момента прибора его подвижная часть, отклонившись на угол α , остановится в этом положении, а затем начнет с малой скоростью перемещаться в положение, соответствующее нулю противодействующего момента. Это явление называют «сползанием» указателя, а скорость сползания указывается в технических данных прибора.

Веберметр выгодно отличается от баллистического гальванометра тем, что его показания практически не зависят от времени изменения измеряемого потока и от сопротивления измерительной катушки, если это сопротивление не превосходит определенного значения (для большинства отечественных веберметров равного 8–30 Ом) и электромагнитное торможение превышает успокоение из-за сопротивления воздуха. С ростом сопротивления измерительной катушки увеличивается скорость сползания указателя прибора.

Подвижная часть магнитоэлектрического веберметра может находиться в равновесии в любом положении, и для приведения указателя прибора на нулевую отметку шкалы имеется специальный корректор. Веберметры имеют градуированную шкалу.

Основным недостатком магнитоэлектрических веберметров является их невысокая чувствительность, которая для лучших отечественных приборов составляет 2–10 дел/Вб.

2.5 Ферроиндукционные измерительные преобразователи

Принцип действия ферроиндукционных преобразователей (называемых также ферромодуляционными) основан на изменении под воздействием измеряемого магнитного поля B_x магнитного состояния (магнитной проницаемости μ) ферромагнитного сердечника, возбуждаемого переменным магнитным полем с постоянной напряженностью H_0 .

При отсутствии измеряемого поля сердечник будет перемагничиваться под воздействием возбуждающего поля напряженностью H_0 и его магнитное состояние будет изменяться по симметричным динамическим магнитным петлям. Кривая изменения индукции B_0 внутри сердечника будет несинусоидальной, но симметричной относительно оси времени (подраздел 2.3).

При одновременном воздействии на сердечник возбуждающего поля напряженностью H_0 и измеряемого поля напряженностью H_x изменение магнитного состояния будет происходить по несимметричным динамическим петлям и кривая изменения переменной составляющей индукции B_0 станет несимметричной относительно оси времени. Это будет означать, что в составе кривой индукции B_0 наряду с нечетными гармоническими составляющими появляются также четные гармоники. Оказывается, что степень асимметрии, т.е. амплитуды

четных гармоник в индукции B_{\sim} , пропорциональна в определенных пределах интенсивности измеряемого магнитного поля. Таким образом, по значению амплитуд четных гармоник, в частности второй гармоники, можно определить напряженность или индукцию измеряемого поля.

Ферроиндукционные преобразователи могут различаться способом возбуждения, формой сердечника и т.д. Наиболее широкое практическое применение находят ферроиндукционные преобразователи в виде так называемых дифференциальных феррозондов с продольным намагничиванием. На рисунке 2.7 показаны конструкции дифференциальных феррозондов: *a* — двухстержневого; *б*, *в* — с замкнутым магнитопроводом кольцевой и прямоугольной формы соответственно, а также схема включения обмоток — *г*.

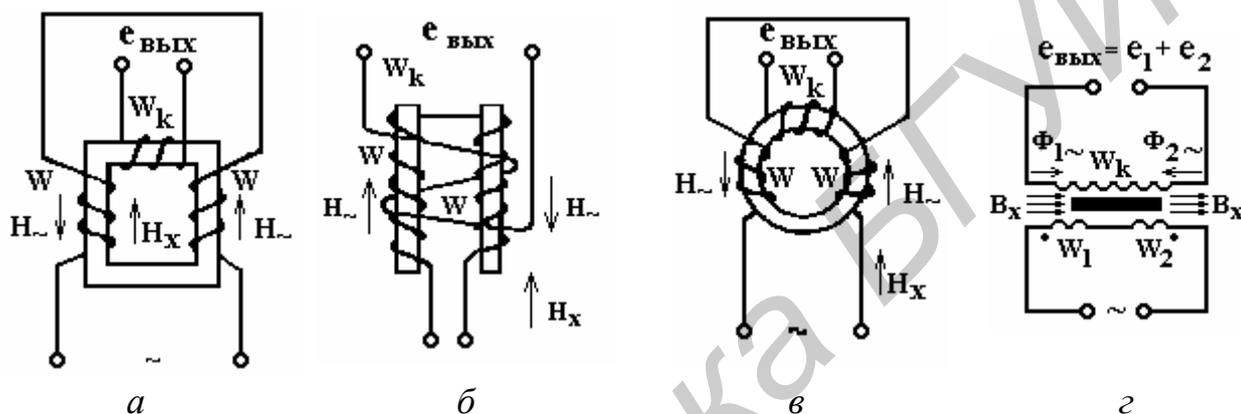


Рисунок 2.7 — Различные типы ферроиндукционных преобразователей (*a*, *б*, *в*) и схема включения их обмоток в измерительную цепь (*г*)

Сердечники ферроиндукционных преобразователей выполняются из магнетномягкого материала — пермаллоя и для преобразователей первого типа представляют собой два идентичных по размерам и свойствам стержня, для второго и третьего видов — замкнутые кольца и стержни соответственно. Обмотки возбуждения w идентичны и включены последовательно — встречно. При этом переменные возбуждающие поля направлены противоположно. При отсутствии измеряемого поля в измерительной обмотке w_k возникают две противофазные ЭДС e_1 и e_2 и сигнал на выходе обмотки w_k $e_{\text{ВЫХ}} = e_1 + e_2$ равен нулю.

При одновременном воздействии на преобразователь возбуждающего поля напряженностью H_{\sim} и измеряемого постоянного поля напряженностью H_x , совпадающего по направлению с осью преобразователя, напряженность результирующего поля в части сердечника, охваченной одной возбуждающей катушкой, будет равна сумме напряженностей $H_{\sim} + H_x$, а в части сердечника, охваченной другой катушкой — разности напряженностей $H_{\sim} - H_x$. Эти результирующие напряженности направлены противоположно друг другу и при этом перемагничивание сердечника будет ими осуществляться по несимметричным динамическим циклам. В результате в измерительной обмотке возникнет сигнал $e_{\text{ВЫХ}}$, содержащий четные гармоники, амплитуда которых пропорциональна измеряемому полю, а фаза будет изменяться на 180° при изменении направле-

ния H_x на обратное. Если выделить из $e_{\text{ВЫХ}}$ вторую гармонику, то ее амплитуду E_{2m} можно выразить через напряженность H_x или индукцию B_x измеряемого поля:

$$E_{2m} = k_1 H_x; E_{2m} = k_2 B_x, \quad (2.35)$$

где k_1 и k_2 — чувствительность преобразователя по напряженности и магнитной индукции, зависящая от параметров преобразователя, частоты и интенсивности возбуждающего поля.

Аналогичные выражения можно получить и для случая, когда измеряемое поле будет переменным. Необходимым требованием в этом случае является отличие частот возбуждающего и измеряемого полей. К основным достоинствам ферроиндукционных преобразователей следует отнести их высокую чувствительность, простоту, небольшие габариты и высокую надежность. Современные преобразователи обеспечивают значение чувствительности порядка десятков милливольт на 1 А/м, а пределы преобразования для них составляют:

- по напряженности магнитного поля примерно от 10^{-2} до 10^4 А/м;
- по магнитной индукции примерно от 10^{-9} до 10^{-2} Тл.

Основная погрешность преобразования для ферроиндукционных преобразователей не может быть сделана меньше 1–2 %.

Ферроиндукционные магнитоизмерительные преобразователи применяются для измерений напряженности и магнитной индукции магнитного поля Земли при геофизических исследованиях, при аэромагнитных исследованиях земной коры, в магнитной дефектоскопии, а в последнее время — для исследования магнитных полей космического пространства и планет солнечной системы. Кроме измерения параметров постоянных магнитных полей, они успешно применяются и при измерениях переменных полей, а также для измерений неоднородности магнитного поля.

Типовая схема включения ферромагнитного преобразователя в измерительную цепь приведена на рисунке 2.8.

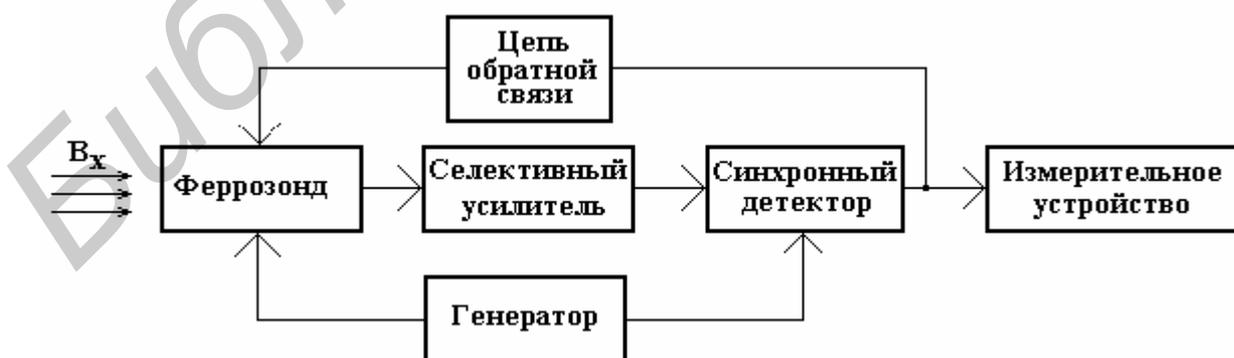


Рисунок 2.8 — Структурная схема феррозондового магнитометра

Феррозонд помещается в измеряемое магнитное поле с индукцией B_x . Возбуждающее поле в феррозонде создается током, поступающим в обмотку возбуждения от генератора синусоидального тока. Выделение второй гармони-

ки из выходного сигнала феррозонда осуществляется селективным усилителем. Выходной сигнал усилителя детектируется синхронным детектором и подается на измерительное устройство, которое может быть проградуировано в единицах магнитной индукции. Синхронное детектирование в данной схеме используется для определения изменения фазы $\epsilon_{\text{ВЫХ}}$ на 180° при изменении направления магнитного поля на обратное. В этом случае выходное напряжение синхронного детектора будет изменять знак. Для улучшения технических и метрологических характеристик схема охвачена глубокой отрицательной обратной связью, которая вводится с помощью цепи обратной связи.

2.6 Сверхпроводниковые преобразователи

Сверхпроводниковые магнитоизмерительные преобразователи используются для преобразования параметров постоянных и переменных полей в электрический ток или напряжение, частота которых пропорциональна изменению измеряемой магнитной величины — Φ или B .

При исследовании сверхпроводимости было установлено, что внутри сверхпроводящего кольца происходит квантование магнитного потока, заключающееся в том, что магнитный поток может принимать значения, кратные кванту магнитного потока

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2,1 \cdot 10^{-5}, \text{ Вб}, \quad (2.36)$$

где h — постоянная Планка, e — заряд электрона.

Два сверхпроводника, разделенные тонким слоем диэлектрика, получили название джозефсоновского перехода, через который может протекать ток I без падения напряжения на диэлектрике. Если же ток, протекающий через переход, превысит некоторое критическое значение I_C , то на переходе возникнет падение напряжения U и в переходе потечет ток с частотой

$$f = U \frac{2e}{h} = \frac{U}{\Phi_0}. \quad (2.37)$$

Сверхпроводниковые магнитоизмерительные преобразователи представляют собой сверхпроводящее кольцо с одним или двумя джозефсоновскими переходами, называемое сверхпроводящим квантовым интерферометром — СКВИД. Суммарный критический ток $I_{C\Sigma}$ через переходы СКВИД сильно зависит от внешнего магнитного поля. Он является периодической функцией внешнего магнитного потока Φ , пронизывающего площадь кольца. Период изменения тока $I_{C\Sigma}$ равен кванту магнитного потока Φ_0 , и выражение для $I_{C\Sigma}$ можно записать:

$$I_{C\Sigma} = 2 \cdot I_C \cos \pi \left| \frac{\Phi}{\Phi_0} \right|. \quad (2.38)$$

Падение напряжения U на переходе также является периодической функцией внешнего потока Φ .

СКВИД является преобразователем изменений магнитного потока или индукции в количество периодических изменений напряжения U , снимаемого с преобразователя. Такие преобразователи обладают чувствительностью, мно-

го превышающей чувствительность других известных магнитоизмерительных преобразователей, и способны преобразовывать, например, магнитную индукцию поля, создаваемого сердцем человека.

Сверхпроводниковые преобразователи используются для преобразования малых изменений постоянных и переменных магнитных полей в электрический сигнал. Для этого они включаются в измерительные цепи непосредственной оценки и сравнения. В первом случае (рисунок 2.9,а) вторичным преобразователем сверхпроводникового преобразователя является счетчик, определяющий число периодических изменений выходного напряжения U сверхпроводникового преобразователя (рисунок 2.9,б). Показания счетчика оказываются прямо пропорциональными значению магнитного потока Φ , воздействующего на преобразователь.



Рисунок 2.9 — Измерение магнитного потока с помощью СКВИ методом непосредственной оценки

Упрощенная структурная схема тесламетра со сверхпроводниковым преобразователем, реализующего нулевой метод сравнения, представлена на рисунке 2.10. Сверхпроводниковый преобразователь, как и в первом случае, представляющий собой СКВИД с двумя переходами Джозефсона, помещается в измеряемом магнитном поле, вектор индукции \vec{B} которого должен быть направлен перпендикулярно плоскости СКВИД (вдоль его оси). Через преобразователь протекает ток от источника тока, значение которого равно или несколько превосходит критическое значение тока I_{CS} , определяемое выражением (2.38). Одновременно на преобразователь воздействует синусоидальное модулирующее магнитное поле с частотой $f_{\text{мод}}$, создаваемое компенсирующей катушкой K , намотанной на преобразователь (модулирующее поле при этом совпадает по направлению с измеряемым).

Выходное напряжение СКВИД через трансформатор Tr поступает на усилитель, а затем на синхронный детектор (СД), где детектируется на частоте $f_{\text{мод}}$. Модулирующий генератор (МГ) осуществляет питание катушки K и подает управляющее напряжение на СД. Выходной сигнал СД подается на интегрирующий усилитель постоянного тока ИУПТ, интегрируется и через сопротивление обратной связи R_{OC} подается на компенсирующую катушку K . Катушка компенсирует изменение индукции измеряемого поля относительно рабочей точки, которая обычно выбирается на склоне кривой $U = f(\Phi)$. По значению тока I_K и постоянной катушки K можно определить значение индукции, создаваемой K и необходимой для компенсации изменений измеряемого поля. Информация об изменении измеряемого магнитного поля может быть поэтому полу-

чена путем измерения падения напряжения, создаваемого на R_{OC} током I_K , протекающим через R_{OC} и K . Измерительное устройство ИУ, измеряющее $U_{R_{OC}}$, может представлять собой аналоговый или цифровой вольтметр, проградуированный в единицах магнитной индукции.

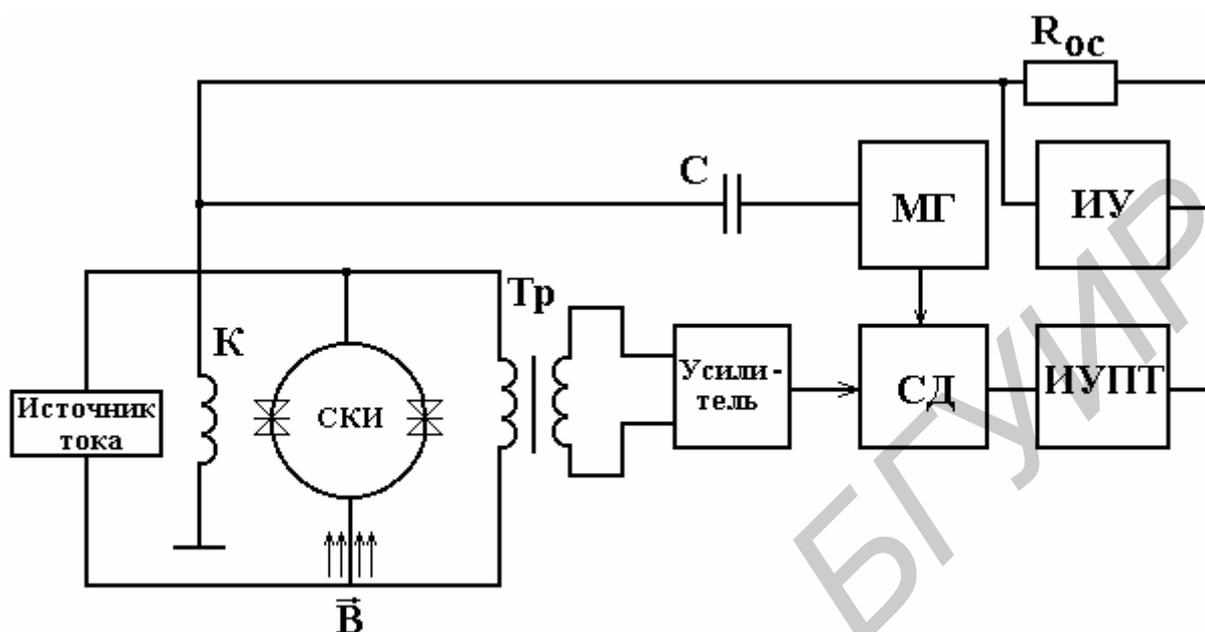


Рисунок 2.10 — Измерение магнитного потока с помощью СКИ методом сравнения

В настоящее время сверхпроводниковые магнитоизмерительные приборы интенсивно развиваются в направлении улучшения их метрологических и технических характеристик и повышения надежности.

2.7 Измерительные преобразователи, основанные на гальваномагнитных эффектах

Гальваномагнитные преобразователи основаны на физических эффектах, возникающих в находящихся в магнитном поле твердых телах при движении в них заряженных частиц. В качестве измерительных преобразователей практическое применение получили главным образом полупроводниковые преобразователи, основанные на использовании эффектов Холла и Гаусса.

Эффект Холла заключается в возникновении поперечной разности потенциалов (ЭДС Холла) на боковых гранях полупроводниковой пластины при помещении ее в магнитное поле и пропускании через нее электрического тока, а эффект Гаусса, или магниторезистивный эффект, проявляется в изменении электрического сопротивления пластины. Оба эффекта обусловлены изменением траектории движения заряженных частиц в магнитном поле, возникают одновременно и связаны между собой так, что каждый из них приводит к ослаблению другого. Выбирая определенную конструкцию и состав материала преобразователя, можно усилить один из эффектов и ослабить другой, создавая таким образом преобразователи Холла или магниторезистивные преобразователи.

2.7.1 Измерительные преобразователи Холла

Преобразователь Холла представляет собой четырехполюсник, выполненный в виде тонкой пластинки или пленки из полупроводникового материала. Токовые электроды 1 и 2 (рисунок 2.11) выполняются по всей ширине поперечных граней, что обеспечивает равномерное распределение входного тока по всей сечению преобразователя. Потенциальные (холловые) электроды 3 и 4 расположены в центральной части продольных граней.

В магнитном поле носители заряда под действием силы Лоренца $F = evB$ изменяют свою траекторию, вследствие чего на одной из боковых граней концентрация зарядов одного знака увеличивается, в то время как на противоположной грани — уменьшается. Возникающая при этом разность потенциалов (ЭДС Холла) определяется выражением

$$E_{\text{ХЛ}} = R_{\text{ХЛ}} \varphi(K_{\text{Геом}}, \theta) I B \cos \alpha / d, \quad (2.39)$$

где $R_{\text{ХЛ}}$ — постоянная Холла, зависящая от свойств материала преобразователя; $\varphi(K_{\text{Геом}}, \theta)$ — функция, зависящая от геометрии преобразователя и так называемого угла Холла между векторами плотности тока и напряженности вызывающего его электрического поля, определяемого подвижностью носителей зарядов и значением магнитной индукции (при $\frac{l}{d} = 2$ и $\frac{\alpha}{l} \leq 0,1$ функция $\varphi \approx 1$);

α — угол между вектором магнитной индукции и магнитной осью преобразователя, совпадающей в первом приближении с нормалью к плоскости преобразователя.

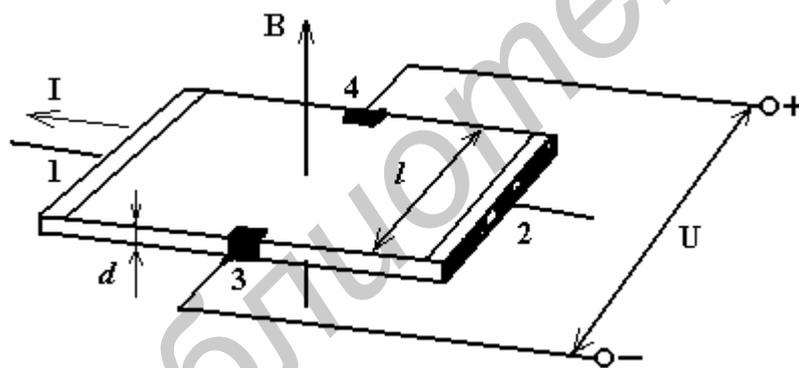


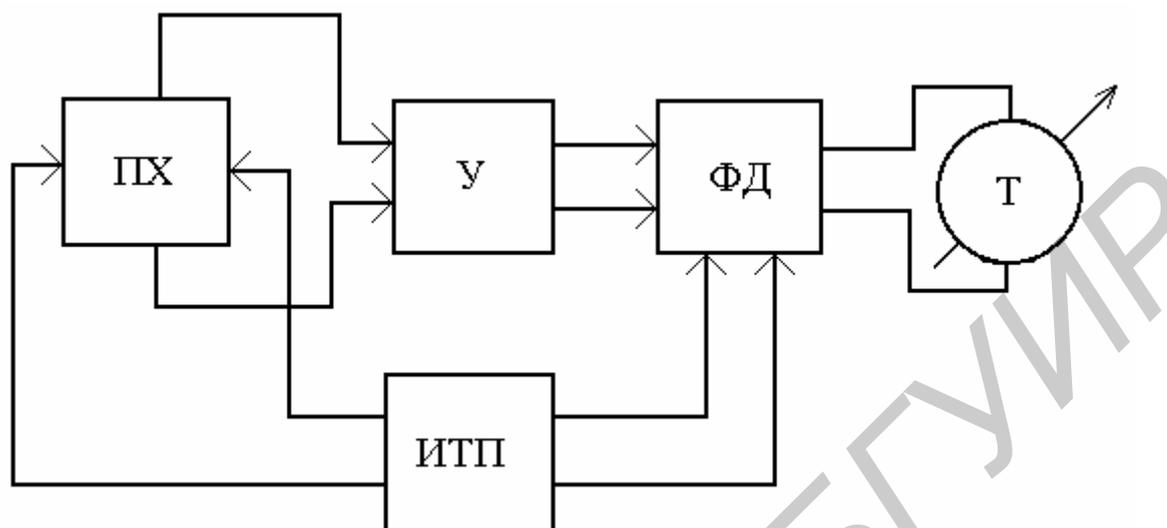
Рисунок 2.11 — Магнитоизмерительный преобразователь Холла

Особенно сильно эффект Холла проявляется в германии (Ge), кремнии (Si) и в полупроводниках, состоящих из элементов III и V групп периодической системы. Постоянные Холла для полупроводниковых материалов имеют порядок $10^{-2} \dots 10^{-4} \text{ м}^3/(\text{А с})$, в то время как для чистых металлов, например для меди, $R_{\text{ХЛ}} = 6 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{А с})$.

Кристаллические преобразователи Холла выполняются в виде тонких пластинок ($d = 0,01-0,2 \text{ мм}$), которые вырезаются из монокристаллов и шлифовкой доводятся до необходимой толщины. Выводы укрепляются на боковых гранях путем пайки или сварки. Пластины наклеиваются на подложки из радиотехнической слюды, ультрафарфора или ситалла.

Измерительные цепи преобразователей Холла имеют простую принципиальную схему и находят широкое применение для измерений магнитной индукции постоянных и переменных полей. Типовая схема тесламетра с ПК представлена на рисунке 2.12.

Преобразователь питается от источника тока питания ИТП (постоянного или переменного, в зависимости от назначения прибора). Выходной сигнал преобразователя E_x усиливается усилителем У, детектируется фазовым детектором ФД и подается на измерительное устройство, проградуированное непо-



средственно в единицах магнитной индукции (Тл). Для более точного преобразования применяется метод сравнения.

Рисунок 2.12 — Схема включения преобразователя Холла в измерительную цепь

Технические данные современных отечественных тесламетров с преобразователями Холла приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 — Технические данные тесламетров с преобразователями Холла

| Наименование и тип прибора | Пределы измерения, мТл | Диапазон рабочих частот, Гц | Погрешность измерения, % |
|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Миллитесламетр Ф4355 | 10, 50, 100, 500, 1000, 1500 | | ±2,5 |
| Миллитесламетр Т-2 | 0–0,25; ...; 0–25 | | ±2,0 |
| Тесламетр Т-1 | 0–10; ...; 0–2000 | | ±1,5 |
| Миллитесламетр Ф4356 | 0–0,1; ...; 0–100 | 20–20000 | ±4,0 |

2.7.2 Измерительные преобразователи Гаусса

Магнитоизмерительные преобразователи Гаусса, называемые магниторезисторами, основаны на использовании эффекта Гаусса, заключающегося в изменении внутреннего сопротивления некоторых материалов в магнитном поле вследствие изменения подвижности носителей электрических зарядов.

Под действием магнитного поля траектории носителей искривляются, вследствие чего скорость их движения в направлении электрического поля уменьшается. Уравнение преобразования магниторезистора имеет вид

$$R_B = R_{B=0} [1 + A|uB|^m], \quad (2.40)$$

где u — подвижность носителей заряда; $R_{B=0}$ — сопротивление преобразователя при $B = 0$; A — магниторезистивный коэффициент, зависящий от свойств материала и формы преобразователя; m — показатель степени, равный 2 в слабых магнитных полях ($B \leq 0,2 \dots 0,5$ Тл), для которых $uB \leq 1$, и равный 1 в сильных магнитных полях, для которых $uB \geq 1$.

Конструктивно преобразователи Гаусса выполняются в виде дисков Корбино, прямоугольных пластин и плоских преобразователей в виде меандра, спирали и т.п., как показано на рисунке 2.13.

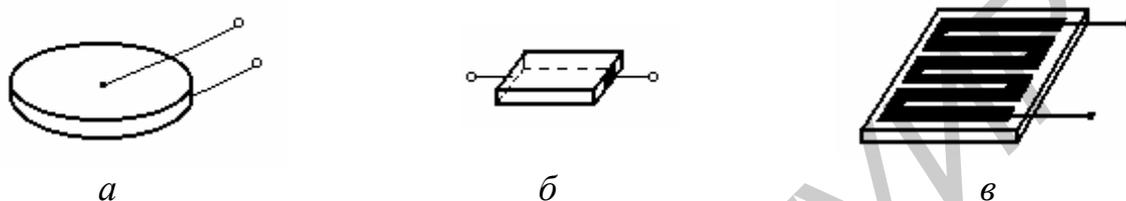


Рисунок 2.13 — Магнитоизмерительные преобразователи Гаусса

Наивысшей чувствительностью обладают преобразователи в виде диска Корбино (рисунок 2.13,а), так как при протекании тока через диск в радиальном направлении в нем практически отсутствует эффект Холла, который компенсирует силу Лоренца и уменьшает эффект магнитосопротивления. Магниторезистивный коэффициент A зависит от формы магниторезистора. Чем меньше отношение длины резистора к площади его сечения, тем больше коэффициент A . В этом отношении оптимальна конструкция в виде диска Корбино, у которой один электрод укреплен в центре, а другой — в виде обода на окружности. У такого преобразователя нет граней для концентрации носителей заряда, вследствие чего уменьшается влияние эффекта Холла. Недостатком магниторезисторов в виде дисков Корбино и коротких прямоугольных пластинок является их малое начальное сопротивление. Для увеличения этого сопротивления магниторезисторы выполняются в виде ряда коротких полупроводниковых резисторов, соединенных последовательно токопроводящими слоями (растрами). Это позволяет создать магниторезисторы с сопротивлением несколько килоом при сохранении большого значения магниторезистивного коэффициента.

У преобразователей в виде пластины и у плоских преобразователей (рисунок 2.13,б,в) больше проявляется эффект Холла и их чувствительность ниже. Для современных преобразователей Гаусса, выполненных из сурьмянистого индия в форме дисков Корбино, значение $\Delta R/R$ может достигать 5,5 при изменении индукции от 0 до 1 Тл. Чувствительность преобразователей Гаусса в значительной мере зависит от температуры.

Магниторезисторы выполняют из эвтектического сплава, в котором методом направленной кристаллизации образуются тонкие ($d = 1$ мкм) иглы из антимонида никеля (NiSb), которые равномерно располагаются параллельно друг другу на расстоянии 200–400 мкм в толще полупроводника. Поскольку удельная проводимость NiSb на 2–3 порядка больше, чем у InSb, то эти иглы выполняют роль проводящих растров высокоомных магниторезисторов.

Основными метрологическими характеристиками магниторезисторов являются начальное сопротивление R_0 , которое лежит в пределах от долей ома до

десятков килоом, и магниторезистивная чувствительность $S_B = \frac{dR}{dB}$. Обычно для характеристики магниторезистивных преобразователей используются зависимости $\frac{\Delta R}{R_0} = F(B)$, где $\Delta R_0 = R_B - R_0$.

Кроме рассмотренных преобразователей Гаусса при измерениях магнитных величин применяются и другие гальваномагнитные преобразователи, основанные на изменении внутреннего сопротивления под действием магнитного поля — гальваномагниторекомбинационные преобразователи и магнитодиоды.

Преобразователи Гаусса используются в приборах для измерений индукции в постоянных и переменных магнитных полях. Особенно эффективно их применение при измерениях в сильных (до 10 Тл) полях, так как функция преобразования в этом диапазоне для них достаточно линейная.

Магнитоизмерительные приборы с преобразователями Гаусса применяются в виде тесламетров постоянного и переменного магнитных полей. Простейший прибор может представлять собой неуравновешенный измерительный мост, в одно из плеч которого включен преобразователь Гаусса. При изменении сопротивления преобразователя в результате воздействия на него измеряемого магнитного поля в индикаторной диагонали моста возникает напряжение, или ток разбаланса, которые измеряются измерительным устройством, проградуированным в единицах магнитной индукции. Для повышения точности измерений, особенно в переменных магнитных полях, используют компенсационный метод (разновидность метода сравнения) и тесламетры с преобразователями Гаусса выполняют в виде компараторов, сравнивающих действующее значение магнитной индукции переменного поля с магнитной индукцией постоянного поля.

Следует отметить, что на основе использования гальваномагнитных преобразователей возможно создание тесламетров с очень широким диапазоном измерения. Для этого целесообразно использовать в них одну и ту же полупроводниковую пластину в качестве преобразователя Холла — при измерении магнитной индукции средних полей и в качестве преобразователя Гаусса — при измерении магнитной индукции сильных полей.

Магниторезистивные преобразователи находят применение в качестве бесконтактных переменных резисторов и делителей напряжения с плавно регулируемым коэффициентом деления, модуляторов малых постоянных токов и напряжений, используются для создания тесламетров при сверхнизких температурах и преобразователей для измерения ряда неэлектрических величин, легко преобразуемых в измерение магнитной индукции, и бесконтактного измерения токов.

Магнитодиоды представляют собой диоды с несимметричным р-п-переходом, в котором под действием магнитного поля уменьшаются подвижность и концентрация носителей заряда, вследствие чего увеличивается прямое

сопротивление перехода и при заданном токе увеличивается падение напряжения на p-n-переходе.

2.8 Измерительные преобразователи, основанные на силовом воздействии магнитного поля

2.8.1 Квантовые измерительные преобразователи

Квантовые магнитоизмерительные преобразователи относятся согласно классификации, приведенной в подразделе 2.1, к третьей группе. Квантовыми называют преобразователи, принцип действия которых основан на силовом взаимодействии внешнего магнитного поля с магнитным полем микрочастиц (ядер, электронов, атомов, молекул), обладающих магнитным моментом m и моментом количества движения (спином) p . В результате такого взаимодействия микрочастицы, при помещении их во внешнее магнитное поле с индукцией B , начинают прецессировать вокруг направления вектора p . Прецессией называют движение, при котором ось собственного вращения тела перемещается вокруг некоторого направления (в данном случае — направления вектора B) с угловой частотой ω_0 , образуя при этом коническую поверхность (рисунок 2.15) аналогично движению «волчка» в поле тяготения Земли. Частота прецессии ω_0 микрочастиц вокруг направления вектора индукции B внешнего магнитного поля будет линейной функцией значения индукции B , т.е.

$$\omega = \gamma B, \quad (2.41)$$

где γ — гиромагнитное отношение, равное отношению магнитного момента частицы к моменту количества движения частицы и характеризующее ее магнитные механические свойства независимо от внешних условий (температура, влажность и т.д.).

Измерив частоту прецессии микрочастиц ω_0 , из выражения (2.41) можно определить индукцию B внешнего магнитного поля. Измерение ω_0 можно проводить различными методами, наибольшее распространение среди которых получил метод магнитного резонанса. Суть его заключается в том, что путем наложения на измеряемое поле с индукцией B перпендикулярного ему переменного поля с индукцией B_{\sim} и плавного изменения частоты ω_{\sim} последнего можно добиться

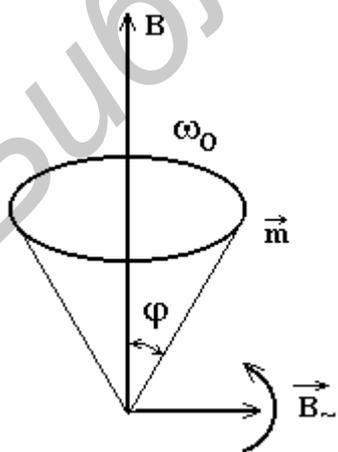


Рисунок 2.14 — Прецессионное движение микрочастиц, обладающих магнитным моментом, под действием внешнего поля

при условии $\omega_0 > \omega_{\sim}$ резкого увеличения амплитуды прецессии до ее максимального значения (при $\varphi = 90^\circ$ на рисунке 2.14). Это явление и получило название магнитного резонанса. Возрастание амплитуды прецессии происходит за счет поглощения микрочастицами энергии переменного магнитного поля. Следовательно, момент резонанса может быть зафиксирован по уменьшению амплитуды переменного тока или напряжения, создающего это поле. Частота прецессии определяется путем измерения частоты ω_{\sim} переменного возбуж-

дающего поля. В зависимости от типа микрочастиц, взаимодействующих с измеряемым магнитным полем, говорят о ядерном магнитном резонансе (ЯМР), электронном парамагнитном резонансе (ЭПР), ферромагнитном резонансе (ФМР) и др. Соответственно различают ядерные, электронные, атомные и другие квантовые магнитоизмерительные преобразователи.

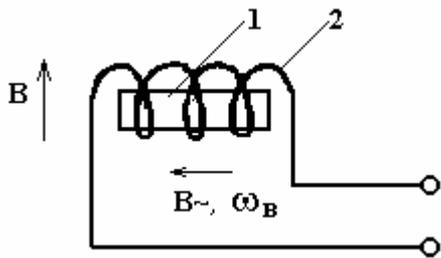


Рисунок 2.15 — Ядерный квантовый преобразователь

Рассмотрим подробнее ядерный квантовый преобразователь, схема которого представлена на рисунке 2.15. Он в общем случае представляет собой стеклянную ампулу 1 с веществом, атомы которого обладают магнитным моментом (например, ядра водорода, лития, дейтерия в таких веществах, как вода, водный раствор LiCl, тяжелая вода), помещенную в измерительную катушку 2. Измерительная катушка запитывается переменным напряжением, в результате чего создается возбуждающее магнитное поле. Преобразователь вносится в измеряемое магнитное поле таким образом, чтобы направления вектора индукции B измеряемого поля и вектора индукции B_{\sim} переменного поля были перпендикулярны (см. рисунок 2.15). Диапазон преобразования таких измерительных преобразователей составляет примерно $5 \cdot 10^{-2} \dots 10$ Тл. Они могут использоваться для измерений только в однородных полях, что является их недостатком. Преобразователи на основе ЭПР по своему принципу аналогичны преобразователям на основе ЯМР.

Магнитоизмерительные приборы на основе ядерных квантовых преобразователей можно представить упрощенной структурной схемой, изображенной на рисунке 2.16. Переменное поле B_{\sim} создается напряжением, подаваемым на зажимы измерительной катушки ядерного квантового преобразователя (ЯКП) от перестраиваемого генератора гармонических сигналов (Г) и с помощью электронно-счетного частотомера (Ч) измеряется значение ω_1 , равное ω_0 . Затем в соответствии с выражением (2.36) вычисляется значение измеряемой индукции B .

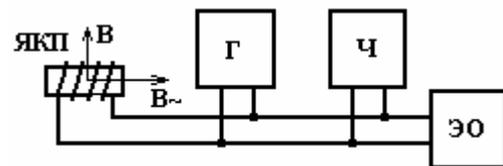


Рисунок 2.16 — Схема включения преобразователя в измерительную цепь

Ядерный магнитный резонанс фиксируется по уменьшению амплитуда напряжения на катушке ЯКП с помощью электронного осциллографа (ЭО) и с помощью электронно-счетного частотомера (Ч) измеряется значение ω_1 , равное ω_0 . Затем в соответствии с выражением (2.36) вычисляется значение измеряемой индукции B .

Преобразование измеряемой индукция магнитного поля в частоту электрического сигнала, которая в настоящее время может измеряться с наивысшей точностью, обуславливает возможность создания тесламетров с преобразователями, основанными на вынужденной прецессии протонов, самых точных приборами для измерений в области средних и сильных магнитных полей.

В настоящее время серийно выпускается ряд тесламетров с ядерными квантовыми преобразователями. Их технические характеристики приведены в

В настоящее время серийно выпускается ряд тесламетров с ядерными квантовыми преобразователями. Их технические характеристики приведены в

таблице 2.3.

Таблица 2.3 — Технические характеристики тесламетров с ядерными квантовыми преобразователями

| Наименование и тип прибора | Пределы измерения | Погрешность измерения, % |
|--|------------------------------------|--------------------------|
| Тесламетр Ш1-1 | 0,025–2,5 Тл | 0,01–0,1 |
| Ядерный магнитометр ЯМ-1 | 0,05–2,5 Тл | 0,01 |
| Магнитометр М-20 | 35–70 мкТл | 0,005–0,01 |
| Ядерный магнитометр ПМ-1 | 35–55 мкТл | 0,001 |
| Ядерный магнитометр | 0,05–1,6 Тл | 0,003 |
| Ядерный измеритель напряженности магнитного поля ИМП-3 | 0,05–1,5 Тл (градуирован в А/м) | 0,004–0,3 |

2.9 Измерение основных характеристик магнитных материалов

Процесс измерения магнитных характеристик в общем случае состоит из следующих основных этапов:

- подготовка средств измерений и образцов магнитных материалов;
- перемагничивание образца, измерение и регистрация магнитных величин, характеризующих магнитное состояние исследуемого материала;
- обработка результатов измерений с целью получения необходимых магнитных характеристик и параметров.

Для того чтобы обеспечить возможность определения магнитных характеристик с требуемой точностью и с минимальными затратами времени, очень важным является правильный выбор магнитной цепи для исследования того или иного магнитного материала.

2.9.1 Магнитные цепи, используемые при измерениях

Магнитной цепью называют совокупность намагничивающего устройства, создающего магнитное поле соответствующей напряженности, и образца из исследуемого магнитного материала. Основным требованием, предъявляемым к магнитной цепи, является обеспечение однородного намагничивания образца, так как это условие определяет точность проводимых измерений.

Исследуемый магнитный образец может представлять собой либо часть магнитной цепи, состоящей из материала образца и другого ферромагнитного материала, либо магнитная цепь может образовываться целиком из исследуемого материала. Такие магнитные цепи называют замкнутыми. Разомкнутыми магнитными цепями называют цепи, состоящие только из исследуемого образца, при намагничивании которого магнитный поток замыкается по воздуху. Выбор вида магнитной цепи, формы и размеров магнитного образца определяется требуемой точностью, свойствами магнитного материала и измеряемой характеристикой, а также требованиями к трудоемкости процесса измерения.

Наиболее однородное намагничивание образца обеспечивается в магнитной цепи, состоящей только из исследуемого материала в форме кольца. Намагничивающая обмотка при этом равномерно распределяется по периметру

образца. Измерительная обмотка может быть также распределенной по периметру или сосредоточенной в некоторой части образца. Для того чтобы различия внутреннего D_B и наружного D_H диаметров кольцевого образца не приводили к существенной неравномерности намагничивания материала по сечению образца, отношение D_B/D_H не должно превышать 1,3.

Измерительная обмотка в соответствии с выражением (2.19) осуществляет преобразование изменения магнитной индукции B в образце при его перемагничивании в ЭДС. Напряженность H намагничивающего поля обычно определяется по значению тока I , протекающего через намагничивающую обмотку с числом витков w_H , т.е.

$$H = \frac{2w_H I}{\pi(D_B + D_H)}. \quad (2.42)$$

При измерениях в слабых магнитных полях вместо распределенной намагничивающей обмотки часто используется длинный одиночный провод, проходящий через центр кольца перпендикулярно его плоскости. При этом в формулу (2.37) подставляют $w_H = 1$.

Однако изготовление кольцевых образцов и накладывание на них намагничивающей и измерительной обмоток являются достаточно сложными и трудоемкими операциями, особенно при необходимости измерений в сильных магнитных полях. Поэтому в ряде случаев образцы выполняют в виде полос или стержней круглого и прямоугольного сечения. Испытания таких образцов также могут проводиться в замкнутой магнитной цепи. При этом используется специальное намагничивающее устройство — пермеаметр.

Схематическое устройство одного из видов пермеаметров показано на рисунке 2.17. Он состоит из массивного яра 1 и полюсов-вкладышей 2, выполненных из магнитомягкого материала, а также последовательно соединенных намагничивающих катушек 3.

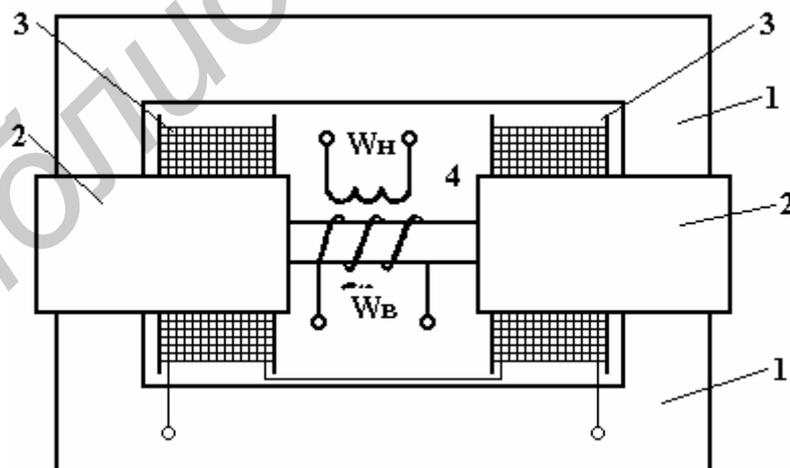


Рисунок 2.17 — Схема включения магнитного образца в замкнутую магнитную цепь

Между полюсами помещается исследуемый образец 4, образуя таким образом замкнутую магнитную цепь. На образец наматывается измерительная обмотка, преобразующая изменение индукции внутри образца в ЭДС. Так как в

данном случае невозможно определить напряженность намагничивающего поля H по току, протекающему через катушки 3, то значение H в образце определяют путем измерения тангенциальной составляющей поля у поверхности образца (тангенциальная составляющая H на границе раздела двух сред не меняется). Для этой цели у поверхности образца размещают манитоизмерительный преобразователь: индукционный или гальваномагнитный (на рисунке 2.17 показан индукционный преобразователь в виде измерительной катушки $w_{и}$). Применение пермеаметров для испытаний магнитных материалов в переменных полях затруднено из-за сильного искажающего влияния ярма. Не применяются они по той же причине и для испытаний магнитомягких материалов с малой коэрцитивной силой и высокой магнитной проницаемостью. Образцы таких материалов могут изготавливаться в виде колец (для испытаний в замкнутых магнитных цепях) или в виде стержней или прутков прямоугольного и круглого сечения (при испытаниях в разомкнутой магнитной цепи).

Испытания магнитных материалов в разомкнутой цепи (рисунок 2.18) проводят на образцах в виде стержней или прутков 1, помещаемых в однородное магнитное поле, которое создается, например, с помощью длинного соленоида 2. Магнитная индукция внутри образца определяется с помощью измерительной обмотки $w_{в}$ и одного из приборов, рассмотренных в пункте 2.2.1.

Напряженность H_i магнитного поля в образце данной формы не будет равна напряженности внешнего намагничивающего поля H (определяемой по намагничивающему току) вследствие того, что намагниченный образец обладает собственным полем, вектор напряженности которого H_0 направлен противоположно вектору H , т.е.

$$H = H - H_0 = H - N \cdot J, \quad (2.43)$$

где N — коэффициент размагничивания образца, зависящий от его формы и размеров; J — намагниченность образца.

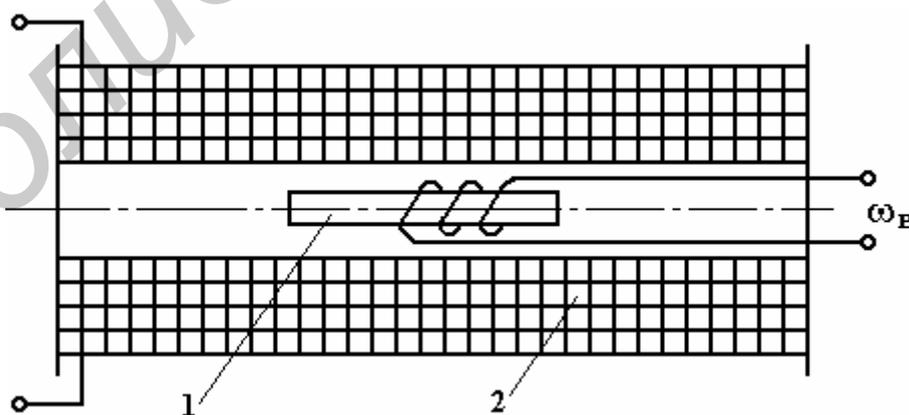


Рисунок 2.18 — Схема включения магнитного образца в разомкнутую магнитную цепь

Значения N могут быть точно определены лишь для образцов, имеющих форму эллипсоида вращения (для шара $N = 1/3$). Для остальных случаев коэффициент N определяется экспериментально или рассчитывается приближенно.

Испытания магнитных образцов в разомкнутой магнитной цепи проводятся при определении коэрцитивной силы магнитомягких материалов.

2.9.2 Измерение статических характеристик магнитных материалов

Методы измерения статических магнитных характеристик можно классифицировать по различным признакам, основными из которых следует считать вид используемого магнитоизмерительного устройства (индукционный, магнитоэлектрический и др. методы) и режим перемагничивания образца (при скачкообразном изменении внешнего поля и при непрерывном медленном изменении внешнего поля). Основным методом измерений статических характеристик магнитных материалов являются индукционный метод при перемагничивании образца постоянным, импульсным или плавно меняющимся магнитным полем. Поэтому мы ограничимся рассмотрением данного метода применительно к измерениям характеристик магнитомягких и магнитотвердых материалов, а также измерений, реализующих указанный метод.

Наиболее распространенным при определении статических характеристик магнитных материалов является индукционно-импульсный метод.

Схема установки для испытания магнитных материалов индукционно-импульсным методом приведена на рисунке 2.19.

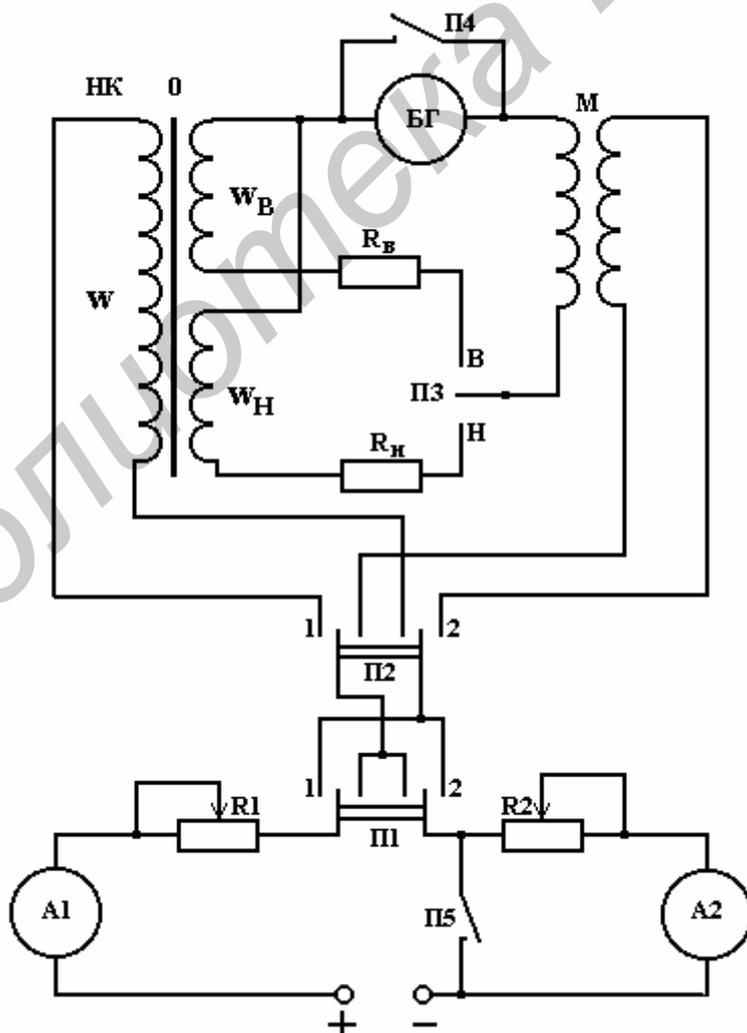


Рисунок 2.19 — Схема индукционно-импульсной установки

для определения характеристик магнитных материалов

Измерительная часть схемы состоит из двух измерительных катушек: для измерения магнитной индукции — W_B и для измерения напряженности поля — W_H , баллистического гальванометра БГ, двух магазинов сопротивлений R_B и R_H (для изменения чувствительности установки), вторичной обмотки катушки М.

Баллистический гальванометр можно заменить веберметром, что значительно упростит эксперимент, но приведет к увеличению погрешности измерения.

Порядок работы на установке следующий.

1 Подбор чувствительности схемы (раздельно для цепей измерения В и Н) состоит в подборе значения сопротивлений R_B и R_H , при которых изменение напряженности намагничивающего поля от $+H_m$ до $-H_m$, путем соответствующего изменения намагничивающего тока, вызовет максимальное отклонение указателя гальванометра на всю длину шкалы.

Чувствительность схемы подбирают следующим образом. Переключатель П2 ставят в положение 1, в обмотку w катушки НК подают ток, соответствующий максимальному значению напряженности магнитного поля H_m ; переключатель П3 устанавливают в положение В и изменяют направление поля путем изменения с помощью переключателя П1 направления протекания тока в обмотке катушки НК. При этом наблюдают отклонение указателя гальванометра. Оно должно находиться в пределах шкалы и у ее конца. При необходимости добиваются требуемого результата регулировкой сопротивления магазина R_B . Аналогично поступают и при подборе чувствительности в цепи измерения Н.

2 Определение постоянной баллистического гальванометра по магнитному потоку проводят отдельно для цепей измерения В и Н при трех значениях силы тока в первичной обмотке катушки М, обеспечивающих при изменении направления протекания тока отклонения указателя гальванометра приблизительно на 0,4; 0,6 и 0,8 длины шкалы. За действительное значение постоянной принимается среднее арифметическое полученных значений. Методика определения постоянной баллистического гальванометра по магнитному потоку (C_Φ) описана выше; значение постоянной определяется по формуле (2.32).

3 Размагничивание образца 0 производится путем уменьшения значения намагничивающего тока от максимального значения до нуля при одновременном непрерывном изменении его направления.

Для проведения размагничивания образца переключатель П2 устанавливают в положение 1, увеличивают ток до значения, соответствующего $H \geq H_m$, и плавно снижают значение тока, одновременно изменяя направление его протекания с помощью переключателя П1. Гальванометр при этом должен быть отключен (переключатель П3 должен находиться в нейтральном положении). Размагничивание может быть проведено и переменным полем с изменяющейся от максимального значения до нуля амплитудой. Для этой цели применяются специальные размагничивающие устройства.

4 Определение точек основной кривой намагничивания начинают с малых

значений напряженности магнитного поля. Переключатель П2 устанавливают в положение 1, т.е. подключают цепь питания к катушке НК. В намагничивающей катушке с помощью реостата R1 устанавливают силу тока I_1 , соответствующую напряженности поля H_1 .

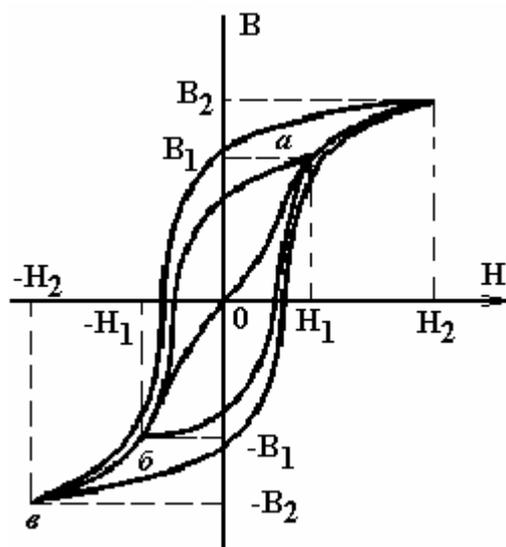


Рисунок 2.20 — Определение точек основной кривой намагничивания

Для получения установившейся (замкнутой) петли гистерезиса производят магнитную подготовку, которая состоит в многократном (5–10 раз) изменении направления намагничивающего поля. После магнитной подготовки (переключатель П1 находится в положении 1, цепь катушки НК замкнута) магнитное состояние образца характеризуется точкой a на основной кривой намагничивания (рисунок 2.20).

Для определения магнитной индукции B_1 необходимо замкнуть цепь гальванометра, установив переключатель П3 в положение В, и изменить направление намагничивающего поля, переключив П1 из положения 1 в положение 2 (см. рисунок 2.19). При этом необходимо отметить первое наибольшее отклонение указателя гальванометра α_{1m} .

Магнитное состояние образца будет характеризоваться теперь точкой b , так как напряженность поля изменилась от $+H_1$ до $-H_1$.

Для измерения напряженности поля H_1 следует установить переключатель П3 в положение Н и, изменив направление тока в катушке НК переключателем П1, отметить первое наибольшее отклонение указателя гальванометра α_{1m} .

Значения B_1 и H_1 определяют формулами:

$$B_1 = \frac{C_{ФВ} \alpha_{1m}}{2w_B s_{обр}}; \quad H_1 = \frac{C_{ФН} \alpha_{1m}}{2\mu_0 (ws)_Н}, \quad (2.44)$$

где $s_{обр}$ — площадь сечения образца; $(ws)_Н$ — постоянная измерительной катушки поля.

Напряженность поля можно также найти по значению силы тока в обмотке намагничивающей катушки, числу ее витков и параметрам образца (или постоянной пермеаметра).

Для определения последующих точек основной кривой намагничивания увеличивают ток в намагничивающей катушке, производят магнитную подготовку, находя B_2 и H_2 таким же образом, как B_1 и H_1 , и т.д.

При определении точек основной кривой и петли гистерезиса (см. ниже) следует помнить о том, что магнитное состояние образца должно изменяться по той кривой, точки которой подлежат определению.

Так, например, при определении точек основной кривой намагничивания значение намагничивающего тока должно только возрастать от 0 до I_m ; умень-

шение значения протекающего по катушке НК тока приведет к появлению данных, не соответствующих определяемой характеристике.

5 Определение точек петли гистерезиса осуществляют одним из наиболее распространенных методов, который основан на измерении изменения индукции ΔB_K при изменении напряженности намагничивающего поля от максимальной $+H_m$ до некоторого значения H_K , соответствующего интересующей нас точке петли (см. рисунок 2.20). Искомая индукция B_K определяется как разность между индукцией B_m , соответствующей напряженности поля H_m (точка *a* на петле), и измеренным значением ΔB_K , т.е. $B_K = B_m - \Delta B_K$.

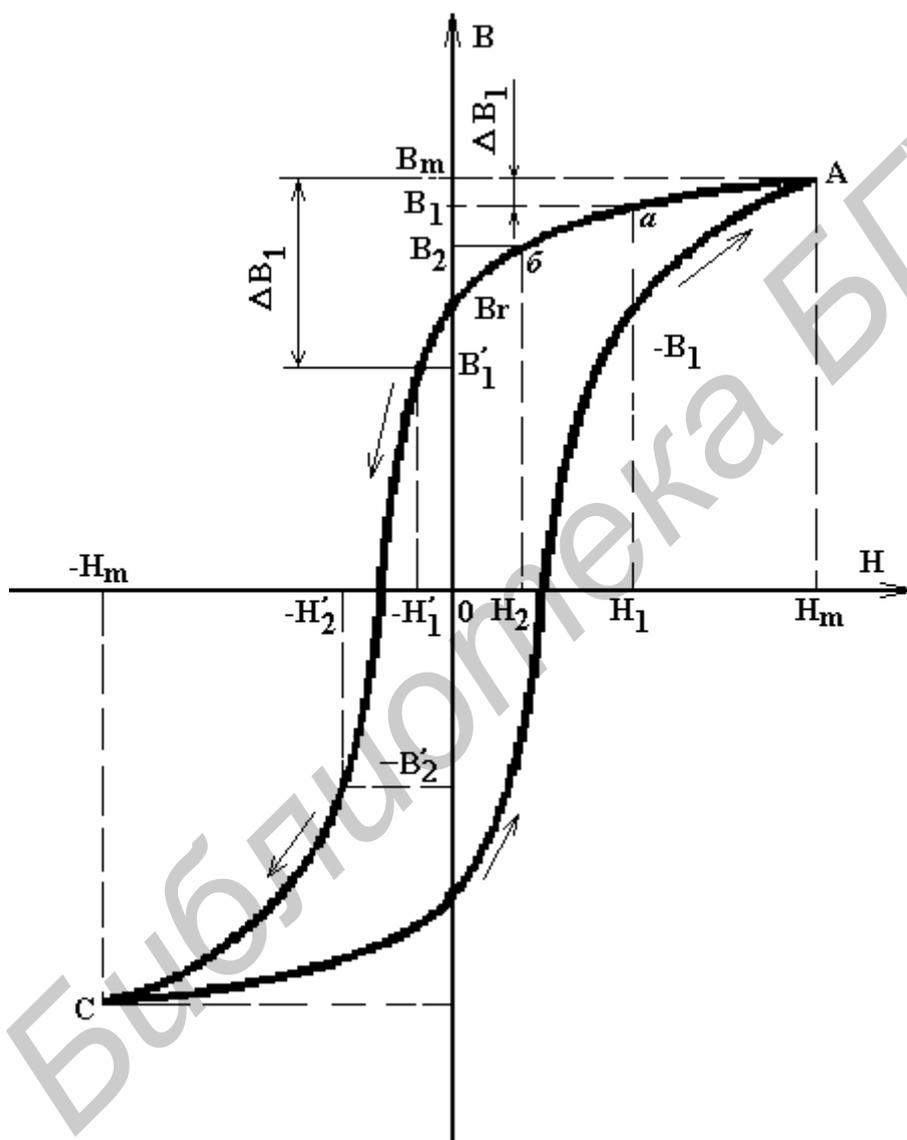


Рисунок 2.21 — Определение точек петли магнитного гистерезиса

Точки петли гистерезиса на участке от $+B_m$ до B_1 , определяются следующим образом. Проводят магнитную подготовку при максимальной напряженности намагничивающего поля H_m и находят описанным выше способом B_m и H_m . Затем размыкают ключ П5 (см. рисунок 2.19) и с помощью реостата R2 устанавливают некоторый ток $I_1 < I_m$, соответствующий напряженности поля H_1 . При этом магнитное состояние материала будет характеризоваться точкой *a* на петле гистерезиса (рисунок 2.21). Для того чтобы найти изменение индукции $\Delta B_1 = B_m - B_1$, необходимо снова «попасть» в точку *a*, что

можно сделать путем «обхода» петли гистерезиса в направлении, указанном стрелками. Для этого переключатель П1 устанавливают в нейтральное положение (см. рисунок 2.19), замыкают ключ П5, а затем переключатель П1 устанавливают в положение 2; магнитное состояние будет определяться точкой С. Пе-

реключатель П1 переводят в положение 1, магнитное состояние образца определяется точкой А. Проводят магнитную подготовку, после которой переключатель П1 должен остаться в положении 1. Переключатель П3 устанавливают в положение В и, размыкая ключ П5, наблюдают первое отклонение указателя гальванометра $I_{В1}$, соответствующее изменению индукции $\Delta B = B_m - B_1$.

Аналогично можно определить значение напряженности намагничивающего поля H_1 , используя для этого измерительную катушку W_H (переключатель П3 устанавливают в положение Н).

Значения индукции и напряженности поля, например, для точки a , определяют по формулам:

$$B_1 = \frac{C_{ФВ}(\alpha_{Вм} - \alpha_{В1})}{W_B S_{обр}},$$
$$H_1 = \frac{C_{ФН}(\alpha_{Нм} - \alpha_{Н1})}{\mu(ws)_H},$$

где $\alpha_{Вм}$ и $\alpha_{Нм}$ — отклонения указателя гальванометра при измерении, соответственно, B_m и H_m ; $\alpha_{В1}$ и $\alpha_{Н1}$ — то же при измерении B_1 и H_1 .

Точки петли гистерезиса во втором и третьем квадрантах определяют так же, как в первом, только при размыкании ключа П5 одновременно изменяют направление намагничивающего поля, переключая П1 из положения 1 в положение 2.

При массовых испытаниях листовых магнитных материалов для определения точек основной кривой намагничивания широко применяется дифференциальный метод, основанный на сравнении испытуемого образца с нормальным, характеристики которого известны и близки к характеристикам испытуемого образца.

2.9.3 Измерение динамических характеристик магнитных материалов

Основными способами испытаний магнитных материалов в переменных магнитных полях являются индукционный и параметрический.

Ввиду особенностей динамических характеристик сведения о значении следует дополнять данными об условиях проведения эксперимента, средствах и методах измерений.

Рассмотрим некоторые наиболее распространенные способы определения динамических характеристик магнитных материалов.

Способ амперметра, вольтметра и ваттметра. Это простейший способ испытания магнитных материалов в переменных полях. Схема приведена на рисунке 2.22. С помощью этой схемы можно определить динамическую кривую намагничивания — зависимость амплитуды магнитной индукции от амплитуды напряженности поля: $B_m = f(H_m)$, амплитудную магнитную проницаемость и потери на перемагничивание (для измерения частоты в этом случае в схеме предусмотрен частотомер). Если испытания проводятся при синусоидальной индукции в образце (а так обычно и бывает), то для определения амплитуды напряженности намагничивающего поля используют образцовый резистор R и вольтметр амплитудных значений V_1 . Значение напряженности определяют по

формуле

$$H_m = \frac{U_m w}{R \cdot L_{cp}}, \quad (2.45)$$

где U_m — амплитудное значение падения напряжения на резисторе R ; w — число витков намагничивающей обмотки; L_{cp} — средняя длина силовой линии.

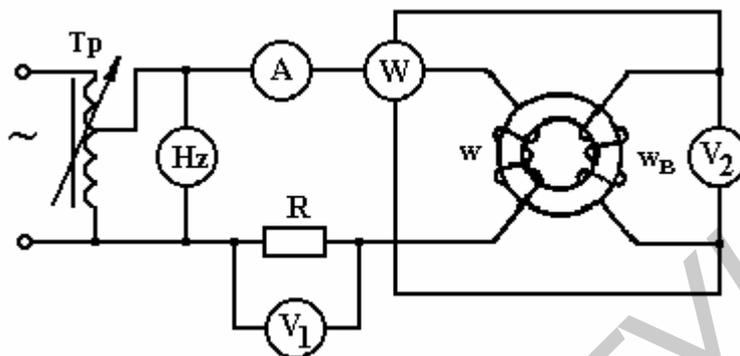


Рисунок 2.22 — Схема для определения динамических характеристик способом амперметра, вольтметра и ваттметра

Если испытания проводятся при синусоидальной напряженности намагничивающего поля в образце (при большом активном сопротивлении намагничивающей цепи), то для определения амплитуды напряженности поля измеряют действующее значение намагничивающего тока I . И тогда $H_m = \sqrt{2} I \cdot w / L_{cp}$. Индукцию в материале определяют с помощью вольтметра средних значений V_2 по индуцированной в измерительной обмотке w_B ЭДС:

$$B_m = \frac{E_{2cp}}{4fw_B S_{об}} \frac{U_{2cp}}{4fw_B S_{об}}, \quad (2.46)$$

где U_{2cp} — показание вольтметра V_2 ($U_{2cp} \approx U_{2cp}$); $S_{об}$ — площадь сечения образца.

По полученным значениям индукции B_m и напряженности H_m можно построить зависимость $B_m = f(H_m)$ и рассчитать амплитудную магнитную проницаемость

$$\mu_{II} = \frac{B_m}{\mu_0 H_m}.$$

Погрешность измерения H_m , B_m и μ_{II} при использовании этого способа составляет обычно 8–10 %.

Для определения потерь на перемагничивание служит ваттметр, последовательная обмотка которого включается в цепь намагничивающей катушки w , параллельная — в цепь измерительной обмотки w_B .

Амперметр и частотомер включены для контроля тока и частоты.

Определение потерь на перемагничивание проводят при синусоидальной индукции в образце. В этом случае показания ваттметра $P_w = U \cdot I_1 \cos \varphi$, где U — среднеквадратическое значение напряжения на обмотке w_B ($U \approx E$); I_1 —

среднеквадратическое значение первой гармоники намагничивающего тока; φ — угол фазового сдвига между U и I . Так как угол φ обычно близок к 90° , то при определении потерь необходимо использовать ваттметр, для которого номинальное значение $\cos \varphi = 0,1-0,2$.

Мощность, измеренная ваттметром, включает в себя, кроме потерь на перемагничивание, потери в вольтметре, параллельной обмотке ваттметра и самой обмотке w_B (последними, ввиду их малости, пренебрегают).

Потери на перемагничивание определяются по формуле

$$P = \frac{P_{Ww}}{w_B} - \frac{U^2(R_V + R_W)}{R_V R_W}, \quad (2.47)$$

где U_2 — среднеквадратическое значение напряжения на обмотке w_B ($U_2 = 1,11 \cdot U_{2CP}$); R_V — сопротивление вольтметра; R_W — сопротивление параллельной обмотки ваттметра.

Необходимое при определении потерь значение индукции в материале устанавливают в соответствии с формулой (2.46) по показаниям вольтметра U_2 . Таким образом можно определить потери в материале для различных значений индукции и частоты. Погрешность измерения потерь составляет $5,0-7,0\%$.

При массовых испытаниях магнитных материалов для определения потерь на перемагничивание применяется дифференциальный ваттметровый метод, основанный на сравнении потерь испытуемого образца с потерями нормального образца.

Способ вольтметра с управляемым выпрямителем. На рисунке 2.23 приведена схема установки, с помощью которой можно определить практически все динамические характеристики магнитомягкого материала. Основными элементами схемы являются: испытуемый образец с намагничивающей w и измерительной w_B обмотками; фазочувствительные вольтметры среднего значения V_1 и V_2 ; источник управляющего напряжения U_Y ; фазовращатель ΦB ; катушка взаимной индуктивности M , выполняющая роль дифференцирующего устройства.

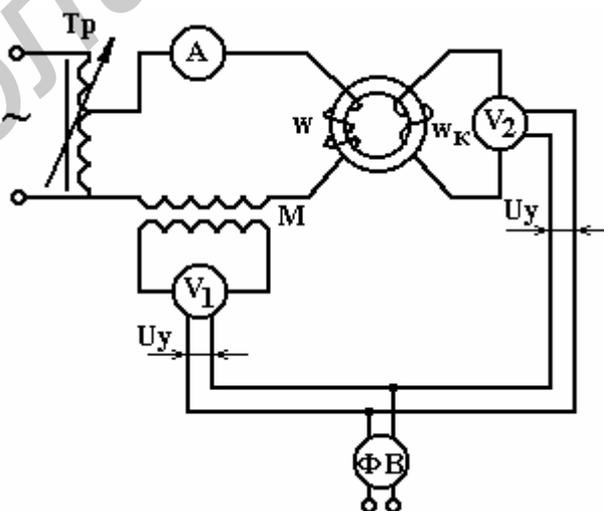


Рисунок 2.23 — Схема для определения динамических характеристик способом вольтметра с управляемым выпрямителем

Мгновенные значения индукции и напряженности магнитного поля определяют по показаниям фазочувствительных вольтметров V_1 и V_2 . При этом необходимо, чтобы кривые индукции и напряженности магнитного поля не содержали четных гармоник (любые два значения индукции и напряженности магнитного поля, сдвинутые на половину периода, должны быть равны по величине и обратны по знаку).

Показания вольтметра V_1 (при однополупериодном выпрямлении) определяются соотношениями:

$$U_{1CP} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T/2} u_1 dt; \quad u_1 = \frac{e_1 R_{V1}}{R1}; \quad e_1 = -M \frac{di}{dt}; \quad (2.48)$$

$$U_{1CP} = \frac{M \cdot R_{V1}}{R1 \cdot T} \int_{t_1}^{t_1+T/2} di; \quad di = -\frac{MR_{V1}}{R1T(i_{t_1+T/2} - i_{t_1})}, \quad (2.49)$$

где e_1 — ЭДС на зажимах вторичной обмотки катушки M ; $R1$ — сопротивление цепи, в которую включен вольтметр V_1 ; R_{V1} — сопротивление вольтметра V_1 ; i — ток в намагничивающей обмотке; $f = 1/T$ — частота; M — коэффициент взаимной индуктивности катушки; L_{CP} — средняя длина силовой линии; H_{t1} — мгновенное значение напряженности магнитного поля.

Следовательно, среднее значение напряжения (показания вольтметра V_1) пропорционально мгновенному значению напряженности намагничивающего поля.

Показания вольтметра V_2 определяются такими соотношениями:

$$U_{2CP} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T/2} u_2 dt; \quad u_2 = \frac{e_2 R_{V2}}{R2}; \quad e_2 = -w_B \frac{d\Phi}{dt}; \quad (2.50)$$

$$U_{2CP} = \frac{w_B \cdot R_{V2}}{R2 \cdot T} \int_{t_1}^{t_1+T/2} d\Phi; \quad d\Phi = -\frac{w_B R_{V2}}{R2T} (\Phi_{t_1+T/2} - \Phi_{t_1}). \quad (2.51)$$

Так как $\Phi_{t_1} = -\Phi_{t_1+T/2}$, то

$$U_{2CP} = \frac{2R_{V2} w_B s_{обр} f \cdot B_{t1}}{R2}, \quad (2.52)$$

где e_2 — ЭДС на зажимах измерительной обмотки w_B ; $R2$ — сопротивление цепи, в которую включен вольтметр V_2 ; R_{V2} — сопротивление вольтметра V_2 ; $s_{обр}$ — площадь поперечного сечения образца; B_{t1} — мгновенное значение магнитной индукции.

Следовательно, среднее значение напряжения (показание вольтметра V_2) пропорционально мгновенному значению индукции в материале.

Изменяя угол фазового сдвига между управляющим и измеряемым напряжениями, можно определить значения B_t и H_t в любой момент периода, т.е. снять динамическую петлю гистерезиса — зависимость $B_t = f(H_t)$.

Для определения динамической кривой индукции $B_m = f(H_m)$ как вершин динамических петель необходимо при каждом значении намагничивающего тока плавно изменять фазу управляющего напряжения до получения наибольших показаний вольтметров.

Осциллографический способ. Этот способ испытания магнитных материалов нагляден и прост. Он дает возможность визуально наблюдать и фотографировать динамические кривые в весьма широком диапазоне частот. Кроме того, он позволяет наблюдать характер влияния различных факторов (например, подмагничивания постоянным полем) и изменений режима намагничивания на форму и размеры динамической петли. Недостатком этого способа является низкая точность — погрешность измерения значений B и H достигает 10 %.

На рисунке 2.24 приведена схема для определения динамических характеристик с помощью электронного осциллографа. На входы X и Y осциллографа подается два напряжения U_R и U_C , соответственно пропорциональные мгновенным значениям напряженности намагничивающего поля H и магнитной индукции в материале B .

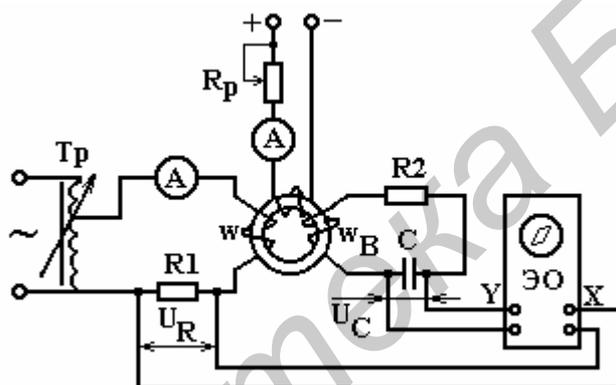


Рисунок 2.24 — Схема для определения динамических характеристик осциллографическим способом

Напряжение на входе X

$$U_R = i \cdot R1 = \frac{R1 \cdot L_{CP} H_t}{w}, \quad (2.53)$$

где $L_{CP} = n \cdot d_{CP}$; w — число витков намагничивающей обмотки; H_t — мгновенное значение намагничивающего поля; d_{CP} — средний диаметр образца (кольца); $R1$ — сопротивление резистора.

Напряжение на входе Y

$$U_C = \frac{1}{C} \int \frac{e}{R2} dt = - \frac{w_B S_{обр} B_t}{R2 \cdot C}, \quad (2.54)$$

где $e = w_B \frac{d\Phi}{dt}$ — ЭДС измерительной катушки w_B ; $R2$ и C — параметры интегрирующей RC -цепочки, $R2 \gg 1/\omega C$; $S_{обр}$ — площадь сечения образца.

Таким образом в результате приложения к осциллографу напряжений U_R и U_C на его экране появляется изображение динамической петли.

Для определения значений В и Н по изображению на экране необходимо произвести градуировку осциллографа. Один из способов градуировки сводится к градуировке осциллографа в единицах напряжения. Для этого на входы осциллографа подаются известные напряжения и подсчитываются масштабы:

$$m_X = \frac{2\sqrt{2}U_X}{n_X}; \quad m_Y = \frac{2\sqrt{2}U_Y}{n_Y}, \quad (2.55)$$

где U_X и U_Y — среднеквадратические значения напряжений, поданных на входы осциллографа; n_X и n_Y — длины световых полосок по горизонтали и по вертикали, соответствующие двойным амплитудам приложенных напряжений.

Значения напряженности магнитного поля и индукции рассчитывают по формулам:

$$H_t = M_H \alpha_H; \quad B_t = M_B \alpha_B, \quad (2.56)$$

где $M_H = m_X \frac{W}{R1 \cdot L_{CP}}$ — масштаб ЭО горизонтальной оси, $A \cdot m^{-1}/дел.$; α_H — значение отклонения луча по горизонтали, дел.; $M_B = m_Y \frac{R2 \cdot C}{W_B S_{обр}}$ — масштаб ЭО

по вертикальной оси, $Тл/дел.$; α_B — значение отклонения луча по вертикальной оси, дел.

По изображению петли можно рассчитать удельные потери в магнитном материале:

$$p = \frac{s_{\Pi} M_H M_B f}{\gamma}, \quad (2.57)$$

где s_{Π} — площадь динамической петли; γ — плотность материала; f — частота.

3 ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ ТЕХНИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В части 1 настоящего пособия приведена общая классификация преобразователей по физическому явлению, положенному в основу работы, и типу входной величины. Дальнейшей классификацией можно считать подразделение преобразователей по двум признакам: *по измеряемым физическим величинам* (преобразователи температуры, давления, расхода, влажности и т. п.) и *по физическим эффектам* (преобразователи пьезоэлектрические, тензорезистивные, гальваномагнитные, фоторезисторные и т.п.).

В таблице 3.1 приведены основные сведения о наиболее распространенных преобразователях, преобразующих входную физическую величину в электрический сигнал. В некоторых преобразователях фактически происходит двойное преобразование. Например, в болометре, являющемся разновидностью терморезистивных преобразователей, излучение сначала преобразуется в теплоту; в результате повышения температуры изменяется сопротивление болометра электрическому току, которое и регистрируется индикаторным устройством.

Стремление обеспечить массовый выпуск дешевых преобразователей с

применением отлаженных технологических процессов послужило основанием для появления новых видов преобразователей и классификации их *по конструкторско-технологическому признаку*, учитывающему конструктивные особенности исполнения изделий и технологию их изготовления. Так появились преобразователи: кремниевые, гибридные, интегральные, волоконно-оптические, керамические, фольговые, пленочные.

Таблица 3.1 — Основные сведения о преобразователях неэлектрических величин в электрические

| Преобразователь | Используемый физический эффект | Преобразуемая физическая величина | Диапазон электрических сигналов, В |
|-------------------------|--|--|------------------------------------|
| Терморезистивный | Изменение электрического сопротивления от температуры | Температура, интенсивность излучения | $10^{-3}-1$ |
| Термоэлектрический | Появление термоЭДС в электрической цепи из разных материалов и с разной температурой контактов (спаев) | Температура | $10^{-6}-10^{-3}$ |
| Пироэлектрический | Возникновение электрических зарядов на поверхности некоторых диэлектриков при их нагревании (или охлаждении) | Температура, интенсивность излучения | $10^{-6}-10^{-2}$ |
| Фоторезистивный | Изменение электрического сопротивления от освещенности | Интенсивность излучения | $10^{-5}-10^{-2}$ |
| Пьезоэлектрический | Возникновение электрических зарядов на поверхности некоторых диэлектриков при их механической деформации | Сила, давление, ускорение, масса | $10^{-5}-10^{-1}$ |
| Тензорезистивный | Изменение электрического сопротивления при деформации | Сила, давление, ускорение, параметры механической деформации | $10^{-5}-10^{-2}$ |
| Гальваномагнитный | Появление ЭДС или изменение сопротивления под действием магнитного поля | Напряженность магнитного поля, магнитная индукция | $10^{-6}-10^{-3}$ |
| СКВИД | Квантование магнитного потока в сверхпроводящем кольце | Напряженность магнитного поля, магнитная индукция | $10^{-12}-10^{-5}$ |
| Емкостный и индуктивный | Преобразование механических перемещения (линейного или углового) и усилия в изменение параметра электрической цепи | Линейное и угловое перемещение, сила, давление, ускорение, масса, уровень жидкости, толщина диэлектрических материалов | $10^{-6}-10^{-1}$ |

И, наконец, *по характеру взаимодействия с внешней средой* преобразователи могут быть точечными и распределенными. Если измеряемая физическая величина изменяется в пространстве пренебрежимо мало на расстояниях, рав-

ных характерному размеру чувствительного элемента преобразователя, то такие преобразователи считаются точечными. В свою очередь распределенные преобразователи могут характеризоваться как непрерывным распределением, так и дискретным. В последнем случае распределенный преобразователь представляет собой фактически конечную сумму точечных преобразователей.

Отметим, что указанными признаками классификация преобразователей не исчерпывается. Например, различают преобразователи контактные и бесконтактные, активные и пассивные и другие менее существенные в нашем случае классы.

На фоне постоянно расширяющейся номенклатуры преобразователей все большую популярность приобретают *кремниевые*. Кремний обладает рядом привлекательных свойств для использования в качестве чувствительных элементов: стабильностью электрофизических характеристик, чувствительностью к внешним воздействиям, отсутствием механического гистерезиса. Высокая прочность кремния позволяет преобразователям сохранять свою работоспособность при ускорениях вплоть до 10^5 g. Но решающую роль в развитии кремниевых преобразователей сыграл мощный потенциал планарной технологии. Начав с техники измерений давлений, кремниевые преобразователи распространились на области измерений температуры, интенсивности излучения, ускорения, расхода, позиционирования (в робототехнике), силы, влажности, анализа состава газов и др.

В отличие от технологии электронных интегральных схем, где требуются полупроводники со специальными электрофизическими свойствами, технология преобразователей не критична к этим свойствам. Поэтому при производстве преобразователей можно применять материалы, забракованные в традиционной электронной технологии. Таким образом, производство преобразователей удачно дополняет производство электронных интегральных схем и обеспечивает комплексную безотходную технологию.

В основе большинства кремниевых преобразователей для измерения механических величин (силы, давления, ускорения) лежит пьезорезистивный эффект — преобразование механического усилия в изменение электрического сопротивления. Пьезорезистивность полупроводниковых тензорезисторов почти в 100 раз превышает соответствующий параметр проволочных тензометров. Чувствительный элемент таких преобразователей представляет собой либо кремниевую мембрану, либо кремниевый консольно закрепленный стержень (при измерении ускорений), в которые диффундированы пьезорезисторы. Деформация чувствительного элемента под воздействием механического усилия вызывает изменение сопротивления пьезорезистора, которое обычно регистрируется мостовой схемой. Температурная компенсация обеспечивается дополнительными резисторами, которые вместе с измерительным резистором включают в мостик Уитстона. Кремниевые преобразователи давления характеризуются высокой линейностью и хорошей повторяемостью при измерении давлений до 70 МПа. Погрешность преобразователей 0,2–1 %.

Около половины всех измерений в промышленности — это измерения температуры. В полупроводниках плотность и подвижность носителей зарядов

зависят от температуры, поэтому о их значениях можно судить по электрическому сопротивлению полупроводникового образца. Кремниевые преобразователи температуры имеют удачную комбинацию свойств: линейность, стабильность коэффициента преобразования, высокую точность, простоту и дешевизну. Конструктивно преобразователи температуры часто оформляют как полупроводниковые диоды или транзисторы, у которых при постоянном токе коллектора напряжение база — эмиттер зависит от температуры. Преобразователи имеют чувствительность примерно 2 мВ/К. Линейность преобразователей достигает 0,1 К в диапазоне температур 220–400 К и 1 К в диапазоне 220–530 К. Градуировка преобразователя при трех значениях температуры позволяет учесть его нелинейность и реализовать погрешность преобразования до 0,01 К. Такая возможность сравнительно легко реализуется при работе преобразователя с компьютерно-измерительной системой, в памяти которой содержатся данные его градуировки.

Кремний используется в чувствительных элементах преобразователей излучения — от γ -излучения до СВЧ-диапазона. Принципы действия кремниевых преобразователей излучения могут быть различными. Для измерения мощности оптического излучения иногда применяется болометрический метод — нагрев чувствительного элемента при поглощении энергии излучения. Другой способ регистрации оптического излучения основан на фотоэффекте: в полупроводнике под действием излучения возникают электронно-дырочные пары, вызывающие изменение проводимости материала. При измерении ионизирующего излучения кремниевые детекторы обладают большей чувствительностью по сравнению с ионизационной камерой, наполненной газом. Большая плотность полупроводникового материала по сравнению с газом обеспечивает большую долю количества энергии, поглощенной в единице объема (примерно в 10 раз), и позволяет получить больший электрический сигнал на выходе детектора.

Для реализации возможностей кремниевых детекторов излучения их необходимо охлаждать (например, до температуры жидкого азота 77 К), а для регистрации и обработки электрических сигналов следует применять малошумящие электронные устройства.

Хорошие показатели для целей медицинской рентгеновской интроскопии имеют кремниевые фотоприемники на основе высокоомных эпитаксиальных структур с мелким р-п-переходом (глубина залегания 0,5 мкм) и просветляющим покрытием. Эти фотоприемники в комбинации со сцинтилляторами имеют хорошую спектральную характеристику в диапазоне длин волн 500–1000 нм, высокую линейность сигнала в динамическом диапазоне до 30 дБ и постоянство коэффициента преобразования в пределах 1–2 %.

Преимущества кремниевой технологии проявляются при создании преобразователей для вычислительной рентгеновской томографии. Каждый томограф должен иметь сотни преобразователей с идентичными характеристиками, что практически невозможно обеспечить при индивидуальном производстве.

Электрофизические свойства полупроводников чувствительны по отношению к различным включениям и загрязнениям. Это качество используется для

анализа химического состава контролируемых сред. Детекторы на основе монокристаллического кремния обладают невысокой чувствительностью, так как на поверхности полупроводника образуется окисная пленка, защищающая чувствительный элемент и снижающая его химическую активность.

Поэтому на поверхность чувствительного элемента предварительно наносят некоторый материал. Активирование поверхности путем нанесения на нее монослоя лития или атомов другого щелочного металла повышает чувствительность преобразователя к концентрации газов. Например, 110-секундная экспозиция позволяет измерить давление молекулярного кислорода на уровне 10^{-6} Па с точностью 5 %. Малые размеры преобразователя обеспечивают регистрацию наличия различных газов в микрополостях.

Другой способ повышения чувствительности кремниевых преобразователей по отношению к концентрации газов — нанесение на поверхность кремния полимеров, у которых диэлектрическая постоянная и удельное сопротивление изменяются при воздействии газов. Разработаны преобразователи, чувствительные к CO, CO₂, CH₄, SO₂, NH₄ и другим газам. На этом же принципе создают кремниевые преобразователи влажности.

Эффект Холла и явление магниторезистивности в полупроводниках позволяют регистрировать магнитные поля с помощью полупроводниковых преобразователей. Напряжение Холла зависит от тока, протекающего через образец, и магнитной индукции. Характерная чувствительность кремниевых преобразователей Холла 100 мВ/мТл.

Особую группу преобразователей образуют органы очувствления роботов: преобразователи *положения (позиционирования), линейных перемещений, касания, проскальзывания, близости, силы*. В основе методов регистрации положения объекта лежит преобразование позиции этого объекта в электрический сигнал, например, с помощью светового луча, зеркала и фотодетектора. Другой способ измерения положения или перемещения в пространстве основан на магнитной технике. Зеркало заменяется магнитом, а фотодетектор заменяется преобразователем, чувствительным к магнитному полю. Преобразователи позиционирования позволяют регистрировать положение контролируемого объекта в пространстве с погрешностью 2–10 мкм.

Разработчики такого комплексного оборудования, как роботы, нуждаются в многофункциональных преобразователях, т.е. преобразователях для измерения нескольких физических величин. Разработаны *однокристалльные преобразователи давления и температуры*. Сущность таких преобразователей заключается в разном характере воздействий механических напряжений и температуры на элементы тензора электропроводности анизотропного полупроводникового материала. Измерения сопротивления чувствительного элемента в двух разных направлениях (как правило, перпендикулярных) дают необходимую информацию об измеряемых физических величинах. Однокристалльный преобразователь давления и температуры типа IS 2002 фирмы Transensory Devices Inc. (США) имеет погрешность 0,1 К при измерении температуры и погрешность 60 Па при измерении давления.

В полной мере возможности полупроводниковой технологии в измери-

тельной технике проявляются в *гибридных преобразователях*, объединяющих конструктивно чувствительные элементы со средствами обработки измерительной информации. Первым шагом в этом направлении явились сравнительно простые электронные схемы, совмещенные с чувствительными элементами и выполняющие следующие функции: усиление, линеаризацию, температурную компенсацию, преобразование аналогового сигнала в частоту колебаний.

Совмещение преобразователей с микропроцессорами явилось естественным результатом дальнейшего развития техники гибридных преобразователей. Повысились их точность, помехоустойчивость, появилась возможность обмена информацией между преобразователями и цифровой системой управления. Несмотря на достоинства гибридных преобразователей, дальнейший процесс интеграции происходит умеренными темпами. Во-первых, себестоимость микропроцессорных преобразователей еще не позволяет им успешно конкурировать с хорошо отработанными преобразователями аналогового типа. Во-вторых, надежность микропроцессорных преобразователей заметно уступает обычным. Если аналоговый преобразователь может восстанавливаться после превышения установленных норм его работы, то микропроцессорные преобразователи чаще всего восстановлению не подлежат после выхода их из строя. Кроме того, помехи сбивают работу микропроцессоров, в то время как аналоговый преобразователь под воздействием помех сохраняет работоспособность с некоторым ухудшением своих характеристик. Поэтому технологические возможности создания монолитных твердотельных измерительных преобразователей продолжают оставаться в значительной мере не использованными.

В ряде случаев преобразователи должны выдерживать воздействие высокого давления, химически активных агентов, высокой или низкой температуры, сильных магнитных полей, повышенной радиации. Можно выделить два способа обеспечения работоспособности преобразователей в экстремальных условиях. Во-первых, преобразователь и соединительные провода можно *защитить минеральной изоляцией, кремнийорганической резиной, тугоплавкими металлами, ферромагнитными материалами*. Трудности механической обработки этих и других специальных материалов, необходимость согласования их коэффициентов температурного расширения делают такие способы защиты дорогостоящими. Вторым, самым радикальным способом преобразования физических величин в экстремальных внешних условиях является применение *волоконно-оптических преобразователей* и линий связи, способных работать в этих условиях без каких-либо защитных мер.

Подобные устройства находятся вне конкуренции при измерениях в сильных электрических и магнитных полях, где крайне нежелательно применение электропроводящих элементов, способных вызвать образование дуги и пробой изоляции. Кроме того, переменные поля наводят вихревые токи в металлических деталях, что приводит к местным перегревам, образованию паразитных термоЭДС и искажению выходных сигналов преобразователя. Применение волоконно-оптической техники для задач преобразования измерительной информации находится в начальной стадии. Принцип действия волоконно-оптических преобразователей основан на изменении условий распространения электромаг-

нитных волн в диэлектрическом волноводе под действием измеряемого физического явления. Схема измерения включает в себя, как минимум, источник света, детектор и световод. Способ измерения может быть «на проход» (трансмиссионный) или «на отражение». В первом случае измеряемое действие (чаще всего давление) изменяет константу распространения волны в световоде, что и регистрируется детектором. Во втором случае действие (давление, температура, положение объекта) изменяет граничные условия на конце световода, меняя тем самым отраженную волну и интерференционную картину в световоде. О значении преобразуемой величины судят по изменению интенсивности отраженного излучения. Отражатель часто выполняют в виде мембраны, трубки Бурдона, сильфона, в зависимости от конкретных условий измерений и измеряемой физической величины.

Перспективы волоконно-оптических преобразователей определяются в первую очередь темпами развития интегральной оптики. Более широкое использование когерентных колебаний, применение световодов с двукратным лучепреломлением, избирательных по поляризации компонент, одномодовых волноводов позволяет создать новое семейство высокочувствительных, малогабаритных преобразователей сравнительно невысокой стоимости. Для этого интегральная оптика должна пройти примерно такой же путь, что и полупроводниковая планарная технология. Темпы роста волоконно-оптической техники измерений весьма высоки (примерно 30 % ежегодно). Изобретательская активность в этой области возрастает примерно в 5 раз за 5 лет.

В заключение этого раздела приведем несколько примеров защиты слабых выходных сигналов преобразователей (обычно единицы милливольт) от влияния помех:

- применение экранированных кабелей или витых пар проводов, связывающих первичные преобразователи с вторичными;
- преобразование ЭДС на выходе преобразователя в токовый сигнал;
- уменьшение сопротивления нагрузки преобразователя;
- преобразование выходного сигнала преобразователя в частоту колебаний;
- усиление выходного сигнала преобразователя;
- фильтрация напряжения питания преобразователя;
- применение фильтров в измерительной цепи;
- уменьшение до необходимого минимума числа спаев в измерительной цепи (например термопары);
- применение специальных компенсационных термоэлектродов.

Радикальным способом защиты выходных сигналов преобразователей от помех является их аналого-цифровое преобразование в непосредственной близости от преобразователя. В этом случае измерительный преобразователь и АЦП выполняются конструктивно как единое целое. Выходным сигналом такого преобразователя является уже цифровой код, который в значительной степени защищен от помех по сравнению с аналоговым сигналом.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин. — М.: Высш. шк., 1982. — 223 с.: ил.
- 2 Ацюковский В.А. Емкостные преобразователи перемещения. — Л.: Энергия, 1966. — 278 с.: ил.
- 3 Аш Ж. и др. Датчики измерительных систем: В 2 кн. / Пер. с фр. — М.: Мир, 1992. — 480 с.: ил.
- 4 Беркутов А.М. и др. Методы и средства измерения неэлектрических величин: Учеб. пособие / Под ред. В.И. Петухова. — Рязань: РРТИ, 1973. — 156 с.
- 5 Зайцев Ю.В. и др. Полупроводниковые термоэлектрические преобразователи. — М.: Радио и связь, 1985. — 120 с.
- 6 Измерение электрических и неэлектрических величин: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Н.Н. Евтихиева. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 352 с.: ил.
- 7 Клаассен К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике — М.: Постмаркет, 2000. — 352 с.: ил.
- 8 Куликовский В.А. Индуктивные измерители перемещений. — М.: Госэнергоиздат, 1960. — 280 с.
- 9 Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений: Учеб. пособие для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 448 с.: ил.
- 10 Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи: Учеб. пособие для вузов. — Л.: Энергоатомиздат, 1983.- 328 с.
- 11 Малышев В.М., Механников А.И. Гибкие измерительные системы в метрологии. — М.: Изд-во стандартов, 1988. — 176 с.: ил.
- 12 Основы метрологии и электрические измерения: Учеб. для вузов / Под ред. Е.М. Душина. — 6-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. — 480 с.: ил.
- 13 Резисторы: Справ. / Ю.Н. Андреев и др./ Под ред. И.И. Четверткова. — М.: Энергоиздат, 1981. — 352 с.
- 14 Реуцкий В.С. Метрология и измерения: Метод. разработка для индивидуальной работы студентов. Ч. 1. — Мн.: МРТИ, 1990. — 54 с.
- 15 Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC: Пер. с англ. /Под ред. У. Томпкинса, Дж. Уэбстера. — М.: Мир, 1992. — 259 с.: ил.
- 16 Туричин А.М. Электрические измерения неэлектрических величин. — М.: Энергия, 1966. — 698 с.: ил.
- 17 Цапенко М.П. Измерительные информационные системы. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 440 с.: ил.
- 18 Шпак И.И. Электрические измерения. Ч. 2: Магнитные измерения. — Мн.: МРТИ, 1983. — 74 с.: ил.
- 19 Электрические измерения: Учеб. для вузов / Под ред. А.В. Фремке и Е.М. Душина. — Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1980. — 392 с.: ил.
- 20 Электрические измерения неэлектрических величин / Под ред. П.В. Новицкого. — 5-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергия, 1975. — 576 с.: ил.

ISBN 985-444-461-9 (ч.2)
ISBN 985-444-372-8

© В.Т. Ревин, 2003
© БГУИР, 2003
Св. план 2003, поз. 96

Учебное издание

Ревин Валерий Тихонович

**ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Учебное пособие
для студентов БГУИР специальности 54 01 01
«Метрология, стандартизация и сертификация»
всех форм обучения
В 5-ти частях

Часть 2

Редактор Т.А. Лейко
Корректор Е.Н. Батурчик
Компьютерная верстка Т.В. Шестакова

Подписано в печать

Бумага офсетная.

Уч.-изд. л. 6,0.

Печать ризографическая.

Тираж 100 экз.

Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л.

Заказ 628.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Лицензия ЛП № 156 от 30.12.2002.
Лицензия ЛП № 509 от 03.08.2001.
220013, г. Минск, П. Бровки, 6.

Библиотека БГУИР