



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Промышленная электроника»

## **ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ**

### **ПРАКТИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО**

**по выполнению лабораторных работ  
по курсу «Материалы и компоненты  
электронной техники»**

**для студентов специальности 1-36 04 02  
«Промышленная электроника»  
дневной и заочной форм обучения**

**Гомель 2006**

УДК 621.315.61(075.8)

ББК 31.23я73  
ИЗ2

*Рекомендовано научно-методическим советом  
факультета автоматизированных и информационных систем  
ГГТУ им. П. О. Сухого*

Авторы-составители: *С. Н. Кухаренко*

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Электропривод» ГГТУ  
им. П. О. Сухого *В. И. Луковников*

**Изучение** свойств материалов : практ. рук. по выполнению лаб. работ по курсу «Материалы и компоненты электронной техники» для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» днев. и заоч. форм обучения / авт.-сост. С. Н. Кухаренко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2006. – 26 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экрана.

В настоящем практическом руководстве содержится описание четырех лабораторных работ, составленных в соответствии с программами дисциплины «Материалы и компоненты электроники» для специальности 1-36 04 02.

Выполнение описанных лабораторных работ знакомит студентов с методами измерения параметров материалов электронной техники, позволяет приобрести навыки расчета и измерения, закрепляя тем самым теоретические сведения, полученные при изучении курса лекций.

Для студентов специальности «Промышленная электроника».

УДК 621.315.61(075.8)  
ББК 31.23я73

© Учреждение образования  
«Гомельский государственный  
технический университет имени  
П. О. Сухого», 2006

## ВВЕДЕНИЕ.

Цикл лабораторных работ «Материалы и компоненты электроники» представлен в двух частях: первая – материалы электроники, вторая – компоненты электроники. Первая часть предназначена ознакомить студентов специальности 36 04 02 «Промышленная электроника» с существующими классами материалов электронной техники и их основными свойствами. Раскрыть характеристики материалов, при электромагнитных воздействиях на них.

Целью выполнения лабораторных работ является закрепление теоретических сведений, полученных при изучении курса лекций, а также подготовка студентов к изучению второй части курса «Компоненты электроники». В процессе подготовки и выполнения работ студенты знакомятся с названиями, внешним видом и электрофизическими свойствами материалов, изучают методы измерения и определения характеристик материалов, приобретают навыки работы с измерительным оборудованием.

### 1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ.

Выполнение лабораторной работы включает в себя несколько этапов: самостоятельная подготовка во внеурочное время, допуск к работе, выполнение измерений и обработка результатов, оформление отчета.

При самостоятельной подготовке студент должен изучить методику измерения, усвоить цель работы и порядок ее выполнения, подготовить отчет.

Для получения допуска к выполнению работы на стенде необходимо представить отчет о предыдущей работе и подготовленный отчет к очередной работе, ответить на вопросы преподавателя.

При выполнении лабораторных работ необходимо учитывать следующее:

1. измерения, выполняемые цифровыми приборами должны содержать не менее трех значащих цифр (необходимо выбирать предел измерения таким, чтоб на индикаторе было не менее трех цифр) измерения, выполненные аналоговыми приборами и осциллографом должны содержать не менее двух цифр.
2. при подключении генераторов, осциллографов и вольтметров необходимо соединять общий провод прибора с общим проводом стенда.

3. отключение стенда от электрической сети и разборка схемы производятся после предоставления результатов измерения преподавателю и с разрешения преподавателя.

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее:

1. цель работы.
2. схему эксперимента.
3. методику обработки результатов.
4. таблицы с результатами измерений и вычислений.
5. графики исследованных функциональных зависимостей выполненных на координатной бумаге или в программе MathCAD.
6. выводы о выполненной работе, в которых указано сопоставление между полученными результатами измерения, а также сравнение результатов со справочными данными.

## 2. ЛАБОРТОРНАЯ РАБОТА №1

### МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПРОВОДНИКИ.

Цель работы: Изучение электрических свойств металлических проводящих материалов и сплавов. Определение удельных параметров проводимости и температурных изменений проводимости, изучение методики измерения относительных приращений сопротивлений. Изучение характеристик термоЭДС термопар.

#### 2.1 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.

В общем случае в качестве проводников могут использоваться твердые тела, жидкости и газы в ионизированном состоянии. К первой группе в основном относятся металлические проводники. Электрический ток в них формируется за счет значительного числа коллективизированных электронов, которые составляют вполне определенное для данного металла количество свободных носителей заряда, не принадлежащих ни одному атому в отдельности. Атомы, находящиеся в узлах кристаллической решетки, не являются нейтральными, а представляют собой положительно заряженные ионы, образовавшиеся в результате перехода валентных электронов в свободное состояние. Количество свободных электронов, а также характер взаимодействия свободных электронов с ионами кристаллической решетки

ки определяют основные свойства проводникового материала, к которым относятся:

1. Удельная проводимость -  $\sigma$  или удельное электрическое сопротивление -  $\rho$ . Величина  $\sigma$ , в общем случае для любого материала, определяется из закона Ома в дифференциальной форме:  $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ , где  $\vec{j}$  - вектор плотности электрического тока;  $\vec{E}$  - вектор напряженности электрического поля. Величина, обратная  $\sigma$  называется удельным сопротивлением -  $\rho$  и определяемая следующим образом:

$$\rho = R \frac{S}{l}, \quad (2.1)$$

где  $R$  – сопротивление проводника,  $S$  – площадь поперечного сечения,  $l$  – длина. ГОСТ предусматривает представление величины удельного сопротивления в следующей форме: [Ом·м] или [Ом·мм<sup>2</sup>/м].

2. Температурный коэффициент удельного сопротивления -  $\alpha_\rho$ , характеризующий изменение удельного сопротивления при изменении температуры на один градус. Эта величина является мерой чувствительности сопротивления к температуре, или, напротив, мерой его термической стабильности. Для металлов данная величина всегда положительна и может быть определена:

$$\alpha_\rho = \frac{\rho(t_2) - \rho(t_1)}{\rho(t_1) \cdot \Delta t}, \quad (2.2)$$

где  $\rho(t_1), \rho(t_2)$  - удельная проводимость при двух различных температурах исследуемого образца, причем  $t_1 < t_2$ ,  $\Delta t$  – модуль разности температур. Так определяют среднее значение  $\alpha_\rho$ .

Дифференциальное выражение для  $\alpha_\rho$  при температуре  $T$  имеет вид:

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho_T} \frac{d\rho}{dt}, \quad (2.3)$$

Значения, определяемые по выражениям (2.2) и (2.3) могут отличаться из – за различных значений  $\Delta t$ ,  $dt$ , а также абсолютных значений температуры, при которых проводились измерения ввиду нелинейности температурной зависимости сопротивления проводника. В лабораторной работе необходимо определить отклонение дифференциального значения  $\alpha_\rho$  от среднего:

$$\delta_{\rho} = \frac{\alpha_{\rho 10}}{\alpha_{\rho 90}} \cdot 100\%, \quad (2.4)$$

где  $\alpha_{\rho 10}$  – температурный коэффициент удельного сопротивления, определяемый на интервале температур – 10 градусов Цельсия,  $\alpha_{\rho 90}$  – для интервала температур 90 градусов.

3. Контактная разность потенциалов или термоЭДС это ЭДС, возникающая в месте контакта двух металлов, определяемая выражением

$$\Delta U_t = \frac{E_t}{t_1 - t_2}, \quad (2.5)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  - температуры противоположных концов контакта,  $E_t$  – термоЭДС контакта, зависящая от материала контактирующих проволок. Данное явление объясняется различной концентрацией и подвижностью электронов в различных металлах и имеет нелинейный характер в функции температуры. В практических целях контактная разность потенциалов используется при измерении температуры, а также в термоэлектрических преобразователях, эти устройства называют термопарами. Значения термоЭДС необходимо учитывать при выборе материалов для чувствительных измерительных устройств.

4. Удельная теплопроводность металлов пропорционально связана с их электропроводностью и характеризует количество тепловой энергии, проходящей через единицу площади при единичном градиенте температур за секунду.

Выбор того или иного проводникового материала должен производиться на основании комплексного учета требований, предъявляемых к его механическим, технологическим, химическим, тепловым и электрическим характеристикам.

## 2.2 Описание стенда.

Лабораторный стенд содержит переключатели исследуемых образцов, металлических проводников и термопар, позволяющие поочередно подключать исследуемый образцы к зажимам на внешней панели стенда. Термопары и катушки исследуемого материала находятся на платах, помещаемых в термостатируемый шкаф. Платы соединены со стендом гибким кабелем. Внутри стенда установлен источник стабильного тока – (I) и напряжения – ( $E_n$ ). Значение стабилизированного тока составляет 10 [mA]. Внутренняя схема стенда, для измере-

ния полного сопротивления  $R_x$  и  $\Delta R_x$  проводников представлена на рис 2.1.

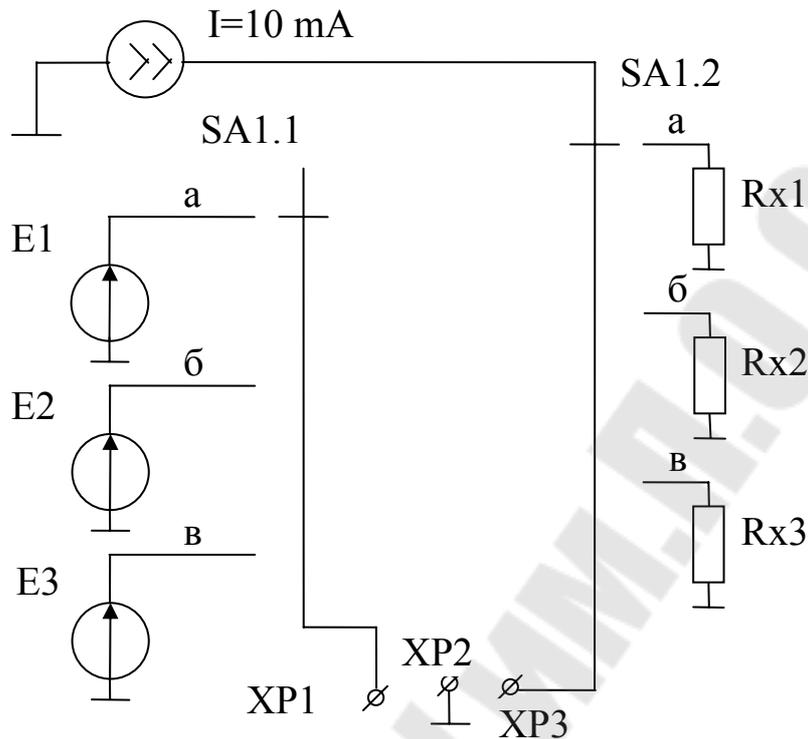


Рис.2.1 Схема измерения сопротивления –  $R_x$  и приращения сопротивления –  $\Delta R_x(t)$ .

В этой схеме напряжения компенсационных источников:  $E1$ ,  $E2$ ,  $E3$  имеют такие значения, что при температуре, исследуемых образцов, равной 20 градусов Цельсия, между клеммами XP1, XP3 (далее по тексту  $U_{1,3}$ ), стенда, устанавливается нулевое значение. Таким образом, изменение напряжения  $\Delta U_{1,3}$  соответствует изменению исследуемого сопротивления на величину:

$$\Delta R = \frac{\Delta U_{1,3}}{i}, \quad (2.6)$$

Определение полного сопротивления образца производится посредством измерения падения напряжения между клеммами XP2, XP3 и вычисления по формуле:

$$R = \frac{U_{2,3}}{i}, \quad (2.7)$$

В этих формулах:  $i$  – значение источника тока (10 [mA]).

В лабораторной работе исследуются сопротивления, выполненные из меди, никеля и константана (линейные размеры исследуемых проводников указаны на стенде).

Внутренняя схема стенда для измерения контактной разности потенциалов проводниковых материалов представлена на рис. 2.2.

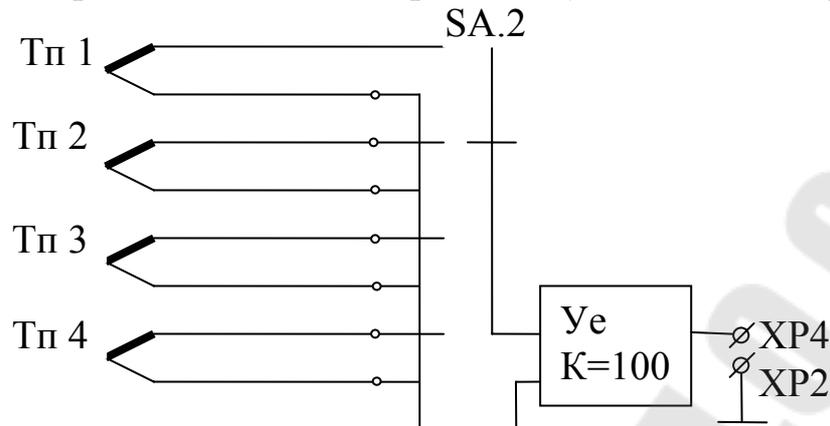


Рис. 2.2 Схема для измерения контактной разности потенциалов.

Название контактирующих проводников указаны на стенде. Поскольку изменение напряжения на выходе термопары составляет десятки микровольт на градус Цельсия, то для усиления сигнала, в стенде установлен усилитель напряжения -  $У_e$  с коэффициентом усиления  $K_u=100$ . Соответственно, истинное значение напряжение термопары определяется делением напряжения, измеренного между клеммами XP2, XP4, на 100.

### 2.3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

1. Определить значение  $R_{x1}, R_{x2}, R_{x3}$  при комнатной температуре, используя выражение (2.7).
2. Рассчитать и сравнить величины удельного электрического сопротивления  $\rho_{x1}, \rho_{x2}, \rho_{x3}$ , из выражения (2.1).
3. Произвести измерения  $\Delta R_{x1}, \Delta R_{x2}, \Delta R_{x3}$  по методике (2.6) в интервале температур 20 – 110 градусов Цельсия с интервалом в 10 градусов. Рассчитать значение  $\delta$  по методике (2.4).  
ПРИМЕЧАНИЕ: запись результатов измерения необходимо производить через 3 – 5 минут после установления заданной температуры в термостате. Результаты измерений занести в таблицу для каждого из измеряемых материалов

t	С°	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
$\Delta U_{1,3}$											
$\Delta R$	Ом										
$\rho(t)$	Ом·м										
$\alpha_p(t)$	О.е.										
$\delta(t)$	%										

4. Аналогичным образом, для интервала температур, 20 – 110 градусов Цельсия измерить контактную разность потенциалов. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу:

t	С	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
$E_t$	mV										
$\Delta U_t$	mV/С										

Примечание: значение  $E_t$  определить по выражению (2.5).

5. Построить графики зависимостей  $R(t)$ ,  $\alpha_p(t)$ ,  $E_t(t)$ ,  $\delta(t)$ .

## 2.4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Перечислить основные характеристики металлических проводниковых материалов.
2. Как экспериментально определяется значение удельной электропроводности металлов.
3. Почему различные методы измерения  $\alpha_p$  могут приводить к различным результатам. Определите различие между результатами измерений и справочными данными  $\alpha_p$ .
4. Сравнить результаты измерения  $\rho$  со справочными значениями, охарактеризуйте возможные причины различия этих значений.
5. Ориентировочно оценить, во сколько раз изменится КПД линии электропередачи, выполненной из медного провода, при изменении температуры окружающей среды от -20 до +30 градусов Цельсия. При ответе воспользоваться результатами измерений.
6. От чего зависит значение контактной разности потенциалов  $U_t$ .
7. Как практически используют явление контактной разности потенциалов.

## 3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

### ИЗУЧЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ.

Цель работы: изучение видов проводимости диэлектриков и методов их измерения. Приобретение навыков практического определения реальных параметров диэлектриков, удельной проводимости.

### 3.1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.

Все применяемые в технике диэлектрические материалы обладают электрическим сопротивлением. К классу диэлектриков относят материалы со значениями удельных сопротивлений: объемного  $\rho_v=10^8 - 10^{18}$  [Ом·м] и поверхностного  $\rho_s=10^6 - 10^{16}$  [Ом]. Необходимо различать поверхностное, объемное сопротивление и сопротивление изоляции, которое является суммой поверхностного и объемного сопротивлений.

При приложении к диэлектрику электрического поля по нему проходят токи:

1. Ток сквозной проводимости  $I_{ск}$ , обусловленный перемещением некоторого количества свободных заряженных частиц, наличие которых в диэлектрике связано в первую очередь с наличием примесей.
2. Ток смещения  $I_{см}$ , связанный с упругими видами поляризации, вызываемый смещением заряженных частиц от положения равновесия при поляризации.
3. Ток абсорбции  $I_{аб}$ , связанный с релаксационными видами поляризации, процессами ориентации диполей.

При постоянном напряжении по диэлектрику проходит ток сквозной проводимости, а поляризационные токи текут только некоторое время после установления постоянного поля. В переменном поле поляризационные токи текут непрерывно. Поэтому характеристики удельной проводимости, измеряемые при постоянном напряжении, записывают после некоторой выдержки, необходимой для установления поляризации. ГОСТ предусматривает измерение сопротивления через минуту после подключения напряжения.

Электрическое сопротивление диэлектриков в основном имеет нелинейный характер и зависит от многих дополнительных факторов, к которым обычно относят температуру, влажность, время и значение приложенного напряжения. Поэтому точное значение сопротивления диэлектрика можно определить только для оговоренных условий его состояния.

При измерении сопротивлений диэлектрика применяют специальные мероприятия, предотвращающие параллельное протекание поверхностного и объемного токов по измерительной цепи. Схема устройства для измерения составляющих сопротивления методом амперметра вольтметра представлена на рис. 3.1.

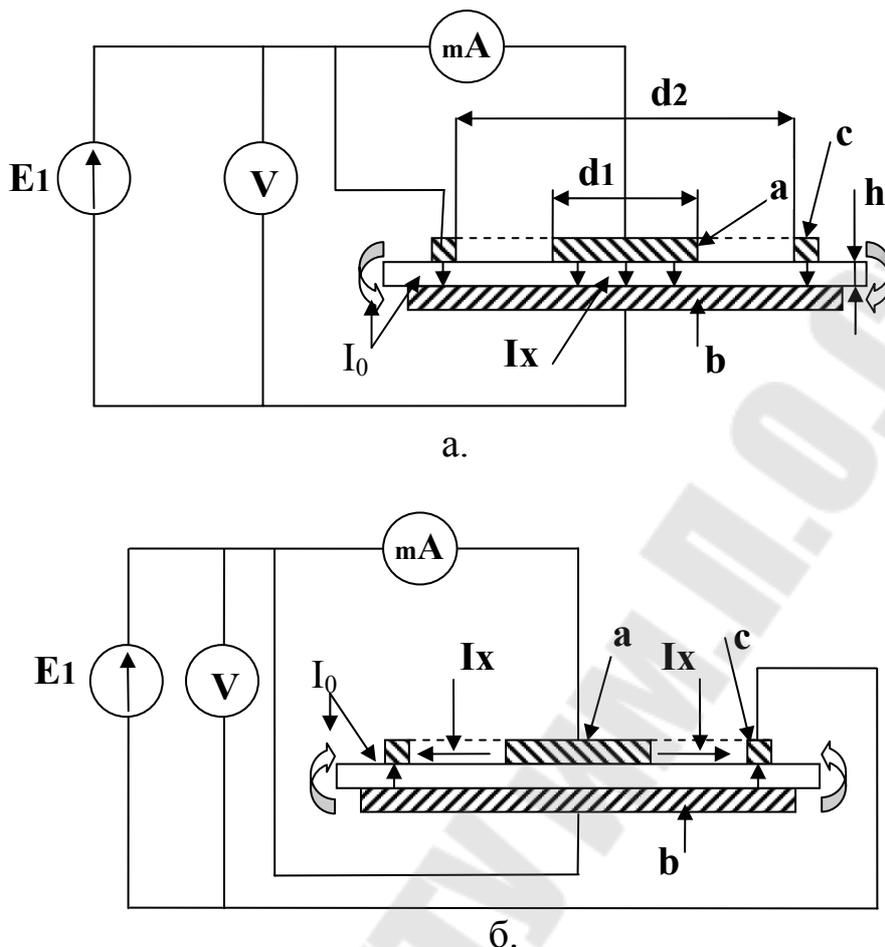


Рис.3.1. Схема измерения составляющих сопротивления изоляции: а – объемного, б – поверхностного.

В приведенной схеме приняты следующие обозначения:

а – измерительный электрод с внешним диаметром  $d_1$ .

в – общий электрод.

с – «охранное кольцо» - электрод, выравнивающий потенциал и позволяющий разделить составляющие объемного и поверхностного токов. Его внутренний диаметр  $d_2$ .

$I_x$  – измеряемый ток.

$I_0$  – ток охранного кольца, не присутствующий в измерениях.

В лабораторной работе измерение сопротивления производится тессераомметром Е6 – 13А, который функционально пригоден для выполнения таких измерений. Электродная система рис.3.1 и переключатель, позволяющий оперативно переключать схему, находится внутри экранированного корпуса.

В практических целях используют удельные значения сопротивлений, отнесенных к объему и площади поверхности соответственно. В существующем стенде объемная удельное сопротивление определяется

$$\rho_v = \frac{S}{h} = \frac{R_v \pi d_1^2}{4h}, \quad (3.1)$$

где  $R_v$  – показания терраомметра,  $h$  – толщина исследуемого диэлектрика (указана на исследуемом образце),  $d_1$  – диаметр электрода (указан на стенде).

Удельное поверхностное сопротивление определяется по формуле

$$\rho_s = \frac{R_s \pi (d_1 + d_2)}{d_2 - d_1}, \quad (3.2)$$

где  $R_s$  - показания терраомметра,  $d_2$  – внутренний диаметр «охранного кольца» (указан на стенде).

### 3.2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

1. Ознакомиться с инструкцией по эксплуатации терраомметра Е6 13А.
2. Произвести измерение сопротивления резистора вмонтированного в стенд.
3. Поместить исследуемый образец материала в электродную систему. Произвести измерения объемного  $R_v$  и поверхностного сопротивления  $R_s$ .
4. Выполнить измерения сопротивлений для сухой и увлажненной бумаги. Рекомендуется вначале измерять сухую бумагу, а затем увлажнить ее, подержав между ладоней в течение одной минуты.
5. Рассчитать удельные сопротивления  $\rho_v$  и  $\rho_s$  по методике (3.1, 3.2).
6. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу:

№	Название материала	S	h	$R_v$	$R_s$	$\rho_v$	$\rho_s$
		[м <sup>2</sup> ]	[м]	[Ом]	[Ом]	[Ом·м]	[Ом]
1							

7. Провести измерения для других предоставленных образцов.

### 3.3 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Перечислить измеряемые и контролируемые виды сопротивлений в диэлектриках.
2. Перечислить и дать пояснения физических процессов, приводящих к протеканию тока в диэлектрике.
3. Почему измерения следует проводить по прошествии некоторого времени после включения.
4. Возможно ли протекание тока смещения в вакууме.
5. Какие дополнительные факторы влияют на сопротивление диэлектриков.
6. Пояснить метод разделения составляющих тока, протекающего через диэлектрик, на поверхностный и объемный.

## 4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ НА ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ.

Цель работы: изучение методики измерения диэлектрической проницаемости диэлектриков и удельных объемных диэлектрических потерь. Приобретение практических навыков измерения и ознакомление с типовыми значениями материалов электронной техники.

#### 4.1 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.

При работе на высоких частотах диэлектрическая проницаемость –  $\epsilon$  и тангенс угла диэлектрических потерь –  $tg\delta$  являются важнейшими электрическими характеристиками электроизоляционных материалов. Поэтому исследование этих свойств в диапазоне частот имеет существенное научное и техническое значение.

Резонансные методы измерения этих характеристик, обеспечивая достаточно высокую точность получаемых результатов, нашли широкое применение в различных диапазонах частот. Эти методы основаны на определении параметров колебательного контура до и после внесения в него образца исследуемого диэлектрика. Диапазон частот, в котором используется резонансный метод измерения параметров компонентов, находится в пределах от нескольких десятков килогерц до 200 МГц.

В этом методе образец для исследования изготавливается в виде плоского конденсатора, между обкладками которого находится испы-

туемый диэлектрик. Измерив величину емкости конденсатора  $C_x$  можно определить величину диэлектрической проницаемости исследуемого материала:

$$\varepsilon = \frac{C_x \cdot h}{\varepsilon_0 \cdot S}, \quad (4.1)$$

где  $C_x$  – измеренная емкость конденсатора.

$h$  – толщина диэлектрика (указана на исследуемом образце).

$S$  – площадь обкладки конденсатора (указана на стенде).

$\varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  [Ф/м].

Диэлектрическими потерями называют мощность, затрачиваемую на нагрев диэлектрика, находящегося в электрическом поле. Для твердых различают два основных механизма потерь:

1. Потери, обусловленные электропроводностью материала.

2. Потери, обусловленные замедленными видами поляризации.

Диэлектрические потери принято характеризовать тангенсом угла диэлектрических потерь -  $tg\delta$ . Углом  $\delta$  называют угол, дополняющий до  $90^\circ$  сдвиг фаз между током и напряжением в цепи конденсатора. Если испытуемый конденсатор представить в виде параллельной схемы замещения с параметрами  $C_x$  и  $R_x$  и для нее построить векторную диаграмму, то легко убедиться, что:

$$tg\delta = \frac{1}{\omega C_x R_x}, \quad (4.2)$$

В общем случае значение  $tg\delta$  может существенно изменяться при изменении температуры, частоты и напряженности поля. Фактически,  $tg\delta$  является величиной, обратной добротности колебательной системы:

$$tg\delta = \frac{\cos \delta}{\sin \delta} = \frac{ui \cdot \cos \varphi}{ui \cdot \sin \varphi} = \frac{1}{Q}, \quad (4.3)$$

Принцип работы измерения добротности (куметра) основан на измерении свойств последовательного контура, состоящего из индуктивности  $L$ , активного сопротивления, эквивалентного потерям в ней, и емкости  $C$ , настроенного в резонанс. Принимая во внимание, что в последовательном колебательном контуре при резонансе отношение напряжения на индуктивности или емкости к напряжению, приложенному к цепи, называют добротностью контура:

$$Q = \frac{U_c}{U_0}, \text{ или } Q = \frac{\omega L}{R}, \quad (4.4)$$

Электрическая схема для измерения добротности приведена на рис. 4.1.

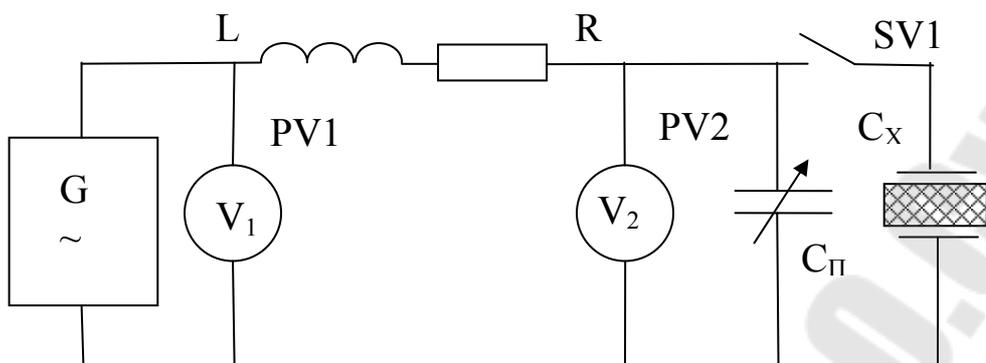


Рис.4.1. Принципиальная схема измерительного контура.

где  $G$  – генератор синусоидального сигнала переменной частоты.

$PV1$ ,  $PV2$  – высокочастотные ламповые вольтметры для измерения соответственно  $U_0$  и  $U_c$ .

$C_n$  – конденсатор переменной емкости с отсчетным устройством для определения значения емкости.

$L$  – индуктивность колебательного контура.  $R_k$  – общее, активное сопротивление контура.

$SV1$  – ключ для подключения испытуемого конденсатора с исследуемой емкостью.

$C_x$  – электродная система с исследуемым диэлектрическим материалом.

Таким образом, при настройке контура без образца в резонанс, когда показания вольтметра  $PV1$  будут максимальными, необходимо зафиксировать это значение и определить добротность контура  $Q_1$  (без образца), а также емкость измерительного конденсатора  $C_{n1}$ .

Затем, параллельно конденсатору  $C_n$  подключить испытуемый образец  $C_x$  (конденсатор с исследуемым диэлектриком) и при том же значении частоты и индуктивности контура изменяя значение  $C_n$  добиться максимальных показаний вольтметра  $PV1$ . Зафиксировать значение напряжения и емкости  $C_{n2}$ .

При резонансе контура с образцом, емкость контура равна  $C_{n1} + C_x$ , справедливо соотношение:

$$\omega L = \frac{1}{\omega(C_{n1} + C_x)}, \quad (4.5)$$

Так как  $\omega$  и  $L$  при настройке в резонанс контура с образцом те же, что и в случае контура без образца, то из этого следует, что:

$$C_x = C_{n1} - C_{n2}, \quad (4.6)$$

Для определения  $tg\delta$  исследуемого материала необходимо рассмотреть схему измерительного контура в момент резонанса, а исследуемый конденсатор в виде параллельной схемы замещения с параметрами  $C_x$  и  $R_3$ . Выражение для полного сопротивления, такого контура, имеет вид:

$$\bar{Z} = j\omega L + R + \frac{1}{j\omega(C_{n2} + C_x) + \frac{1}{R_3}}, \quad (4.7)$$

Активное сопротивление контура с образцом в момент резонанса определяется:

$$R_a = \frac{\omega L}{Q_1} + \frac{C_x tg\delta}{C_{n1}^2}, \quad (4.8)$$

Значение  $R_a$  больше активного сопротивления контура без образца, так как к собственному сопротивлению контура  $R$  здесь добавляется сопротивление измеряемого диэлектрика  $R_3$ :

$$R_a = R + R_3, \quad (4.9)$$

Воспользовавшись выражением (3.4) с учетом того что  $\frac{1}{\omega C_{n1}} = \omega L$  выражение (4.9) можно записать так:

$$\frac{\omega L}{Q_2} = \frac{\omega L}{Q_1} + \frac{\omega L C_x tg\delta}{C_{n1}}, \quad (4.10)$$

Сокращая обе части уравнения на  $\omega L$ , получим уравнение для определения  $tg\delta$ :

$$tg\delta = \frac{C_{n1}}{C_x} \cdot \left( \frac{1}{Q_2} - \frac{1}{Q_1} \right), \quad (4.11)$$

При выполнении измерений по данной методике, необходимо тщательно производить настройку измерительного контура в резонанс, а также поддерживать напряжение на входе схемы (показания вольтметра PV1) постоянным.

## 4.2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

1. Перевести тумблер SV1 в положение «Выкл», установить, заданную преподавателем, частоту генератора. На этой частоте выполнить настройку измерительного контура в резонанс.

- нанс изменением емкости  $C_n$ . Значения емкости  $C_{n1}$  и напряжения  $U_c$  и  $U_0$ , при резонансе, записать в таблицу.
2. Воспользоваться выражением (4.4) для определения собственной добротности контура –  $Q_1$ .
  3. Поместить испытуемый образец диэлектрика между испытательных пластин стенда и включить тумблер SV1.
  4. Не изменяя частоту и напряжение генератора, настроить контур в резонанс изменением емкости  $C_n$ . Записать в таблицу значение емкости  $C_{n2}$  и напряжения  $U_c$  в таблицу. Значение напряжения  $U_0$  необходимо поддерживать таким как в опыте без образца.
  5. Произвести расчет добротности колебательного контура с исследуемым образцом –  $Q_2$  по формуле (4.4).
  6. Определить емкость исследуемого конденсатора -  $C_x$ , воспользовавшись выражением (4.6).
  7. Используя выражение (4.1) определить диэлектрическую проницаемость образца –  $\epsilon$ .
  8. По методике, предложенной в (4.11), определить значение тангенса угла диэлектрических потерь образцов –  $tg\delta$ .
  9. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу следующего содержания:

№	Название диэлектрика	$U_0$	$U_c$	$C_{n1}$	$C_{n2}$	$Q_1$	$Q_2$	$C_x$	$\epsilon$	$tg\delta$
1										

10. Произвести измерения для других образцов.

#### 4.3 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Сформулировать определения  $tg\delta$  и  $\epsilon$ .
2. Объяснить сущность резонансного метода определения  $\epsilon$  и  $tg\delta$ . Объяснить назначение элементов измерительной цепи.
3. Какие материалы, исследуемые в лабораторной работе, можно отнести к высокочастотным диэлектрикам и почему?
4. Начертить эквивалентную схему диэлектрика с потерями, как определить мощность потерь и  $tg\delta$  из эквивалентной схемы замещения.

## 5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

### ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ.

Цель работы: изучение методики измерения основных характеристик магнитных материалов и приобретение навыков их измерения. Ознакомление с основными свойствами ферромагнитных материалов электронной техники, сравнение магнитных материалов различных групп.

#### 5.1 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.

Магнитными веществами или магнетиками называются вещества, обладающие магнитными свойствами. Под магнитными свойствами понимается способность вещества приобретать магнитный момент, то есть намагничиваться при воздействии на него магнитного поля.

Магнитные свойства материалов определяются следующими основными характеристиками:

Намагниченность [А/м] – это отношение магнитного момента тела к его объему

$$M = \frac{m}{V}; \quad (5.1)$$

Где:  $V$  – объем тела [м<sup>3</sup>],  $m$  – магнитный момент тела.

Магнитная восприимчивость  $\chi_m$  (безразмерная величина) определяется как отношение намагниченности к напряженности магнитного поля

$$\chi_m = \frac{M}{H}; \quad (5.2)$$

Где:  $H$  – напряженность магнитного поля для кольцевого проводника:  $H = wI / \pi d_{cp}$  где  $w$  – число витков,  $I$  – ток проводника,  $d_{cp}$  – средний диаметр кольцевого проводника (образца). Магнитная восприимчивость характеризует способность вещества изменять свой магнитный момент под действием внешнего магнитного поля. В вакууме  $\chi_m = 0$ .

Магнитную индукцию  $B$  [Тл] нужно рассматривать как сумму двух составляющих: внешней  $H$  и внутренней  $M$

$$B = \mu_0(H + M); \quad (5.3)$$

где:  $\mu_0$  – магнитная постоянная или проницаемость вакуума  $\mu_0=4\pi\cdot 10^{-7}$  [Гн/м].

Магнитная проницаемость является характеристикой среды, в которой возникает магнитное поле.

Абсолютная магнитная проницаемость  $\mu_a$  [Гн/м] или [Тл/м] определяется формулой:

$$\mu_a = B/H; \quad (5.4)$$

Относительная магнитная проницаемость (безразмерная величина) является свойством среды и определяется формулой:

$$\mu = \mu_a/\mu_0 = B/\mu_0 H; \quad (5.5)$$

Магнитная проницаемость связана с магнитной восприимчивостью:  $\mu = 1 + \chi_m$ .

По поведению в магнитном поле все материалы делятся на следующие группы: 1) диамагнетики ( $\chi_m < 0$ ,  $\mu < 1$ ); 2) парамагнетики ( $\chi_m > 0$ ,  $\mu > 1$ ); 3) ферромагнетики ( $\mu \gg 1$ ); 4) ферримагнетики ( $\mu \gg 1$ ).

Принадлежность к той или иной группе определяется строением электронных оболочек атомов. Каждый атом можно рассматривать как элементарный магнитик (домен). От их взаимного расположения в отсутствие магнитного поля и зависит их поведение в магнитном поле.

В электронной технике, в качестве магнитных материалов применяются ферро- и ферримагнетики, имеющие высокую магнитную проницаемость.

К ферромагнетикам относят чистые металлы: железо, кобальт, никель, и их сплавы с неферромагнитными веществами, а также редкоземельные металлы при низких температурах.

Ферримагнетики (ферриты) представляют собой сложные оксиды металлов. Они широко применяются в электронной технике, благодаря большому разнообразию свойств.

Основной классификационный параметр ферромагнитных материалов, это его зависимость намагниченности  $M$  от напряженности внешнего магнитного поля  $H$ . Эта зависимость сильно зависит от внешних воздействующих факторов (температура, давление, механические напряжения) и различных кристаллографических направлений приложенного поля. Кривая зависимости индукции первоначально размагниченного образца от напряженности внешнего поля носит название первичной, или основной, кривой намагничивания. Зависи-

мость намагниченности, или индукции, от напряженности поля обычно имеет вид, представленный на рис. 5.1. В полях относительно малой напряженности намагничивание происходит в основном за счет роста доменов, имеющих вектор намагниченности, близкий к направлению внешнего поля. В этом случае процесс протекает обратимо. Дальнейшее увеличение внешнего поля приводит к росту границ доменов. Движение границ, в основном, не обратимое. Процесс смещения продолжается до тех пор, пока не исчезнут все домены. Дальнейший рост индукции возможен за счет вращения вектора намагниченности доменов параллельно внешнему полю. После того, как процесс вращения закончился, материал оказывается намагниченным до состояния технического насыщения, отмеченного точкой  $B_s$ .

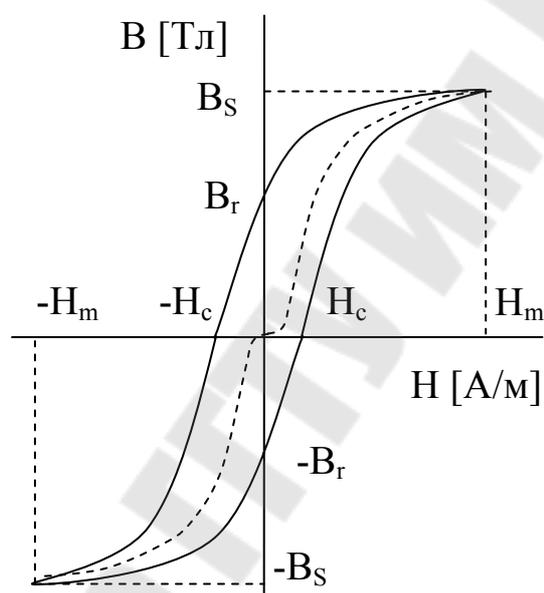


Рис. 5.1. Петля гистерезиса и основная кривая намагничивания (пунктир).

Если после достижения магнитного насыщения уменьшить напряженность магнитного поля до нуля, то вектор намагниченности будет поворачиваться в направлении оси легкого намагничивания до совпадения с ней. Индукция при размагничивании, соответствующая нулевому полю, называется остаточной индукцией и обозначается  $B_r$ , рис. 5.1.

При приложении поля противоположного знака возникают домены с векторами намагниченности, направление которых близко к направлению этого поля. Рост границ этих доменов приводит к тому, что при некотором значении внешнего поля индукция обращается в нуль. Напряженность внешнего поля, которое необходимо приложить для размагничивания, называется коэрцитивной силой. Ее принято обозначать  $-H_c$ . Все процессы намагничивания и размагничивания

описывают кривую перемагничивания, называемую петлей гистерезиса. Площадь этой петли пропорциональна работе, затраченной внешним полем на перемагничивание за один цикл. Эта работа идет на нагревание материала и называется потерями на гистерезис.

В большинстве случаев, на магнитные материалы действуют переменные магнитные поля. При этом к потерям на гистерезис, пропорциональным площади петли гистерезиса и частоте, добавляются потери, связанные с возникновением вихревых токов. Потери на вихревые токи пропорциональны квадрату частоты и квадрату площади поперечного сечения токопроводящего контура, а также обратно пропорциональны проводимости материала.

При намагничивании переменным магнитным полем наблюдается отставание по фазе индукции от напряженности магнитного поля. Угол отставания принято называть углом потерь  $\delta$ , а потери в сердечниках тангенсом угла магнитных потерь –  $tg\delta$ .

Для изготовления электромагнитных элементов электронной аппаратуры используются магнитомягкие магнитные материалы, которые по принципу электропроводности разделяют на три группы: проводниковые (электротехнические стали и сплавы), полупроводниковые (ферриты), диэлектрические (магнитодиэлектрики).

В зависимости от конкретных условий применения к магнитным материалам предъявляются различные требования, но есть и общие.

1. Магнитный материал должен легко намагничиваться и размагничиваться, обладать узкой петлей гистерезиса, малой коэрцитивной силой, большими значениями  $\mu$ .

2. Магнитный материал должен обладать большой индукцией насыщения, тем самым обеспечивать прохождение максимального магнитного потока через заданную площадь поперечного сечения магнитопровода (при этом снижаются габариты устройства).

3. Магнитный материал должен иметь, возможно, меньшую мощность потерь. В некоторых случаях, например в дросселях фильтров, рационально использовать материалы с большими потерями. При этом затухание высоких частот будет вызвано не только действием самого фильтра, но и потерями в магнитопроводе.

4. Предпочтительно использовать материалы, имеющие высокую технологичность.

5. Желательно, чтобы материал обладал стабильностью параметров при воздействии дестабилизирующих факторов (температура, вибрация, механические напряжения и др.).

## 5.2 Описание стенда.

В лабораторной работе измерение параметров петли гистерезиса выполняется осциллографическим методом, схема стенда приведена на рис 5.2. Суть метода заключается в том, что на вход горизонтальной развертки подают сигнал воздействия (пропорциональный напряженности поля), а на вход вертикальной развертки подают сигнал реакции (пропорциональный индукции в сердечнике). При этом на экране осциллографа можно наблюдать изображение петли гистерезиса, аналогичной рис. 5.1.

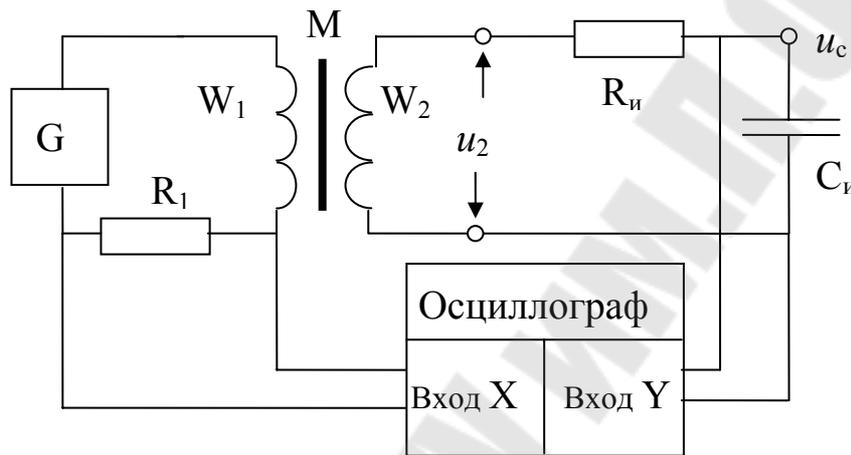


рис. 5.2 Принципиальная схема стенда для измерения параметров ферромагнитных сердечников.

Напряженность поля в любой точке петли определяется выражением

$$H = \frac{u_x W_1}{R_1 l_m}, \quad (5.6)$$

где  $u_x$  – напряжение, снимаемое с шунтового резистора  $R_1$ ,  $W_1$  – число витков первичной обмотки,  $l_m$  – средняя длина магнитной линии сердечника (значения этих величин указаны на лабораторном стенде).

По закону электромагнитной индукции, ЭДС наводимая во вторичной обмотке  $W_2$  пропорциональна скорости изменения индукции, определяется

$$u_2(t) = S_m W_2 \frac{dB}{dt}, \quad (5.7)$$

где  $W_2$  – количество витков вторичной обмотки,  $S_m$  – площадь поперечного сечения сердечника.

Для того, чтобы получить сигнал, пропорциональный индукции, необходимо интегрировать наводимую ЭДС

$$B = \frac{1}{S_m W_2} \int_0^T u_2(t) dt, \quad (5.8)$$

Функцию интегрирования в стенде выполняет цепь  $R_u C_u$ . Напряжение на конденсаторе  $u_c$  пропорционально изменению индукции в сердечнике. Интегрирующая цепь имеет частотно-зависимый коэффициент передачи –  $k$

$$\dot{k} = \frac{\dot{u}_c}{\dot{u}_2} = \frac{1}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_u}}, \quad (5.9)$$

Для определения модуля коэффициента передачи можно воспользоваться результатами измерения напряжений  $u_2$  и  $u_c$ , выполненных вольтметром.

Решая совместно уравнения (4.8) и (4.9), можно показать соответствие текущих значений напряжения  $u_c$  и индукции сердечника  $B$

$$B = \frac{u_c}{\pi k S W f}, \quad (5.10)$$

где  $f$  – частота, на которой производится измерение,  $k$  – модуль коэффициента передачи интегрирующего звена.

### 5.3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

1. Установить испытуемый образец в стенд и подключить измерительные приборы.
2. Генератор синусоидального сигнала необходимо подключать к исследуемой схеме с минимальным выходным напряжением (ручка уровня напряжения в крайнем левом положении).
3. Установить частоту генератора, равную рекомендуемой для исследуемого образца (значение частоты и геометрические размеры образца указаны на стенде).
4. Плавно повышая напряжение генератора, контролировать форму петли гистерезиса, не допуская значительного насыщения (значение напряжения на резисторе  $R_I$  не должно превышать 0,5 Вольта).
5. Снизить напряжение генератора до уровня 0,5 – 0,7 от уровня насыщения и произвести измерение коэффициента передачи интегрирующей цепи по методике (5.9), а также определить значение магнитной проницаемости по методике (5.5).

6. Напряжением генератора установить режим насыщения и определить значения петли гистерезиса в характерных точках  $B_r$ ,  $B_s$ ,  $H_m$ ,  $H_c$ . Расчеты выполнять по формулам (5.6) (5.10) соответственно.
7. Выполнить измерения для всех предоставленных образцов по пунктам 1 – 6, результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

#### 5.4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Какие вещества называют магнитными?
2. Перечислить основные характеристики магнитных материалов.
3. Как связана индукция в магнитном материале с напряженностью внешнего магнитного поля?
4. Перечислить основные группы материалов по отношению к магнитному полю.
5. Привести изображение петли гистерезиса, описать физическое состояние ферромагнетика в характерных точках.
6. Перечислить виды потерь в ферромагнетиках, возникающих в переменных магнитных полях. Объяснить их связь с частотой внешнего поля.
7. Какие требования предъявляются к магнитомягким материалам применяемым в электронной технике.
8. Привести схему измерения магнитной индукции, объяснить назначение элементов схемы.

## 6 ЛИТЕРАТУРА

1. УДК 621.38 М34 Материалы для производства изделий электронной техники. Учебное пособие Г.Н. Кадыкова и др. М. Высшая школа 1987. 247с.
2. . Ферриты и магнитодиэлектрики. Справочник под общей редакцией Н.Д. Горбунова М. ,изд. Советское радио 1968.
3. УДК 621.315. С71 Справочник по электротехническим материалам В 3т Под редакцией Ю.В. Корицкого и др. Издание 3-е переработанное. М. «Энергия» 1988г.
4. УДК.621.315. Б74 Богородский Н.П. Электротехнические материалы. Издание шестое переработанное. Л «Энергия» 1977.
5. УДК.621.317.(075.8) Г.А. Ремез «Курс основных радиотехнических измерений» Издание 3-е переработанное. М. Издательство «Связь» 1966г.

## Содержание

Введение	3
1. Общие указания	3
2. Лабораторная работа №1 «Металлические проводники»	4
3. Лабораторная работа №2 «Изучение проводимости диэлектриков».	9
4. Лабораторная работа №3 «Определение диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь на высоких частотах»	13
5. Лабораторная работа №4 «Измерение магнитной проницаемости и магнитной индукции ферромагнитных материалов».	18
6. Литература.	25

# **ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ**

**Практическое руководство  
по выполнению лабораторных работ  
по курсу «Материалы и компоненты  
электронной техники»  
для студентов специальности 1-36 04 02  
«Промышленная электроника»  
дневной и заочной форм обучения**

Автор-составитель: **Кухаренко** Сергей Николаевич

Подписано в печать 29.03.06.  
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,63. Уч. - изд. л. 1,67.  
Заказ № /14.

Издательский центр Учреждения образования  
«Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого».  
ЛИ № 02330/0133207 от 30.04.2004 г.  
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.,  
E-mail: ic@gstu.gomel.by  
<http://www.gstu.gomel.by>

Отпечатано на МФУ XEROX WorkCentre 35 DADF  
с макета оригинала авторского для внутреннего использования.  
Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П.О. Сухого».  
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48, т. 47-71-64.