



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

**Ю.С. Артамонов**  
**В.В. Гребенникова**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебно-методического пособия*

Магнитогорск  
2012

УДК 621.3.038(075)

**Рецензенты:**

Старший преподаватель АНО «Корпоративный центр подготовки кадров «Персонал»  
**Г.Ф. Обухов**

Кандидат технических наук,  
доцент кафедры электроники и микроэлектроники,  
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический  
университет им. Г.И. Носова»  
**Р.С. Пишнограев**

**Артамонов Ю.С., Гребенникова В.В.**

**Электрические измерения** [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие / Юрий Спиридонович Артамонов, Вера Владимировна Гребенникова ; ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – Электрон. текстовые дан. (1,13 Мб). – Магнитогорск : ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2012. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования : IBM PC, любой, более 1 GHz ; 512 Мб RAM ; 10 Мб HDD ; MS Windows XP и выше ; Adobe Reader 8.0 и выше ; CD/DVD-ROM дисковод ; мышь. – Загл. с титул. экрана.

Пособие написано в соответствии с учебной программой дисциплины «Электрические измерения» и требованиями к обязательному минимуму содержания основной образовательной программы по направлению подготовки дипломированного специалиста. Рекомендуется при изучении учебных дисциплин, выполнении курсовых проектов по дисциплинам, связанным с вопросами автоматического управления технологическими процессами, непосредственно для студентов, обучающихся по направлению 220400 «Управление в технических системах» и для других специальностей.

Пособии излагаются основные методы электрических измерений электрических, магнитных и неэлектрических величин и принципы построения измерительной аппаратуры. Рассмотрены вопросы правильного выбора и применения измерительных приборов. Пособие содержит девять глав, которые охватывают следующие темы: метрологические основы измерений и оценки погрешностей измерений; системы основных технических измерительных приборов для прямого измерения тока и напряжения; измерения переменных токов с преобразованием; измерения мостами постоянного и переменного тока; измерения магнитных величин и характеристик магнитопроводов; измерение температуры термопреобразователями и малых перемещений; подробно разработанный лабораторный практикум, охватывающий эти темы.

В пособии содержится необходимый объем теоретических сведений для подготовки, выполнения лабораторных работ и обработки результатов, позволяющий выполнить все предусмотренные расчёты без привлечения дополнительной литературы и произвести количественную оценку полученных результатов.

УДК 621.3.038(075)

© Артамонов Ю.С., Гребенникова В.В., 2012  
© ФГБОУ ВПО «Магнитогорский  
государственный технический  
университет им. Г.И. Носова», 2012

## Содержание

Принятые обозначения.....	5
Предисловие.....	6
1. Метрологические основы измерений.....	7
1.1. Основные понятия.....	7
1.2. Средства измерений.....	7
1.3. Основные сведения о погрешностях средств измерений.....	8
1.4. Элементарные статистические оценки результатов измерений.....	9
2. Электротехнические измерительные приборы.....	13
2.1. Магнитоэлектрический измерительный механизм.....	13
2.2. Электромагнитный измерительный механизм.....	14
2.3. Электродинамический измерительный механизм.....	15
2.4. Ферродинамический измерительный механизм.....	18
3. Измерение переменных токов с преобразованием.....	19
3.1. Общие замечания.....	19
3.2. Значения измеряемых напряжений.....	19
3.3. Приборы выпрямительной системы для измерения амплитудного, средневыпрямленного и эффективного значений.....	23
3.4. Фазочувствительные измерительные схемы.....	26
3.5. Термоэлектрические приборы.....	27
3.6. Влияние формы кривой измеряемого напряжения на показания вольтметров в зависимости от их конструкции.....	28
4. Измерение и регистрация мгновенных значений изменяющихся во времени величин.....	30
4.1. Общие сведения и принцип действия осциллографа.....	30
4.2. Развёртка изображения.....	30
4.3. Калибраторы.....	31
5. Мостовые измерительные схемы.....	32
5.1. Общие замечания о мостовых схемах.....	32
5.2. Мост Вина.....	33
5.3. Мост Максвелла – Вина.....	35
5.4. Мост Грютцмахера.....	35
6. Измерения магнитных величин.....	37
6.1. Основные магнитные величины.....	37
6.2. Метрологические основы магнитных измерений.....	38
6.3. Измерения магнитной индукции, магнитного потока и напряжённости магнитного поля.....	38
6.3.1. Использование явления электромагнитной индукции.....	38
6.3.2. Использование гальваномагнитных явлений.....	41
6.4. Измерение характеристик магнитных материалов.....	43
6.4.1. Статические и динамические характеристики.....	43
6.4.2. Кривые намагничивания.....	43
6.4.3. Петля гистерезиса.....	44
6.4.4. Практическое получение кривых намагничивания.....	45
6.4.5. Динамические характеристики магнитных материалов.....	46
6.4.6. Параметры статической характеристики.....	49
7. Измерение неэлектрических величин.....	51
7.1. Преобразователи механических величин.....	51
7.1.1. Преобразователи перемещения в активное сопротивление.....	52
7.1.2. Преобразователи перемещения в ёмкость.....	54
7.1.3. Преобразователи перемещения в индуктивность.....	54
7.2. Термоэлектрические преобразователи температуры.....	55
7.3. Терморезистивные преобразователи температуры.....	57
8. Методические рекомендации для выполнения лабораторных работ.....	59
8.1. Общие правила при выполнении экспериментальной части работы.....	59
8.2. Правила успешной постановки эксперимента.....	59
8.3. Общие требования к оформлению отчётов.....	59
8.4. Техника безопасности при проведении лабораторных работ.....	60
9. Лабораторный практикум.....	61
9.1. Лабораторная работа №1 Измерение напряжения переменного тока выпрямительными приборами.....	61
9.2. Лабораторная работа №2 Измерение частоты с помощью электронного осциллографа.....	67
9.3. Лабораторная работа №3 Измерение фазового сдвига.....	70
9.4. Лабораторная работа №4 Исследование моста постоянного тока.....	76
9.5. Лабораторная работа №5 Экспериментальное получение основной кривой намагничивания.....	81

9.6. Лабораторная работа №6 Измерение магнитной индукции постоянного магнитного поля с помощью измерительной катушки.....	84
9.7. Лабораторная работа №7 Измерение магнитного поля преобразователем Холла.....	88
9.8. Лабораторная работа №8. Экспериментальное определение функции преобразования дифференциально-трансформаторного преобразователя перемещения.....	91
9.9. Лабораторная работа №9 Измерение Деформаций с помощью наклеиваемых тензорезисторов.....	96
9.10. Лабораторная работа №10 Измерение коэффициента тензочувствительности проволочного тензорезистора, наклеенного на деталь конструкции.....	103
9.11. Лабораторная работа №11. Расчёт сопротивлений резисторов измерительной схемы автоматического потенциометра. Градуировка потенциометра.....	109
Предметный указатель.....	116
Рекомендуемая литература.....	117

## ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $\dot{B}, B$  – магнитная индукция, вектор и скалярная величина.  
 $B_r$  – остаточная магнитная индукция в материале (в магнитопроводе).  
 $B_s$  – магнитная индукция насыщения материала (магнитопровода).  
 $b$  – вариация показаний измерительного прибора.  
 $\dot{F}$  – сила (вектор).  
 $\dot{H}, H$  – напряжённость магнитного поля.  
 $H_c$  – коэрцитивная сила.  
 $H_s$  – напряжённость магнитного поля, соответствующая  $B_s$ .  
 $I$  – постоянный ток или эффективное значение переменного тока.  
 $I_{cp.}$  – среднее значение тока.  
 $I_{cp.в.}$  – среднев्यпрямленное значение тока.  
 $i$  – мгновенное значение тока.  
 $\dot{J}$  – намагниченность.  
 $K_a$  – коэффициент амплитуды.  
 $K_f$  – коэффициент формы.  
 $L$  – индуктивность.  
 $M_{вр.}$  – вращающий момент.  
 $\dot{M}_m$  – магнитный момент тела.  
 $M_{1,2}$  – взаимная индуктивность двух катушек.  
 $R_H$  – постоянная Холла.  
 $r$  – средняя арифиметическая ошибка.  
 $s$  – средняя квадратичная ошибка.  
 $t_q$  – q-процентная точка распределения Стьюдента.  
 $U$  – напряжение постоянного тока или эффективное напряжение переменного тока.  
 $U_m$  – максимальное значение напряжения за период или за время наблюдения.  
 $U_{cp.}$  – среднее значение напряжения.  
 $U_{cp.в.}$  – среднев्यпрямленное значение напряжения.  
 $u$  – мгновенное значение напряжения.  
 $U_{20}$  – э.д.с. на холловских электродах.  
 $\dot{v}$  – скорость (вектор).  
 $W_{маг.}$  – энергия магнитного поля.  
 $w$  – число витков катушки.  
 $w_t$  – функция зависимости сопротивления терморезистора от температуры.  
 $X$  – измеряемая физическая величина.  
 $\bar{x}$  – среднее арифиметическое отдельных измерений.  
 $\dot{Z}$  – комплексное сопротивление.  
 $\gamma$  – приведённая погрешность.  
 $\varepsilon$  – относительная погрешность измерения.  
 $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость.  
 $\zeta$  – абсолютная погрешность измерения.  
 $\mu$  – подвижность носителей заряда.  
 $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость.  
 $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума (магнитная постоянная).  
 $\rho$  – удельное сопротивление материала.  
 $\Phi$  – магнитный поток.  
 $\varphi$  – фазовый сдвиг.  
 $\Psi$  – полный магнитный поток (потокосцепление).  
 $\omega$  – круговая частота.  
 $\omega t$  – угловое смещение в электрических градусах.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

«Наука начинается с тех пор, как начинают измерять» – эти слова Д.И. Менделеева подчёркивают фундаментальную роль измерения в создании науки.

Измерения выполняют три главные функции:

- измерения для контроля и регулирования технологических процессов и для обеспечения их нормального функционирования;
- измерения физических величин, проводимые при научных исследованиях, испытаниях и контроле продукции;
- учёт продукции.

Больше всего измерений приходится на так называемые неэлектрические величины. Однако для измерения, передачи, преобразования наиболее удобны электрические величины: ток, напряжение, частота. В электрические сигналы можно преобразовать любые физические величины, лишь бы было такое явление, которое позволит однозначно связать изменение физической величины с изменением электрических характеристик соответствующего преобразователя. Наиболее часто измерения неэлектрических величин удаётся свести к измерению температуры, механического перемещения, магнитных явлений. В общем случае процесс измерения состоит из трёх этапов или звеньев: преобразователя, устройства сравнения и устройства отображения результата. Второе звено передаёт сигнал, а иногда обрабатывает его – усиливает, отделяет от помех. Третье звено производит окончательный анализ сигнала и отображает его на стрелочном или цифровом индикаторе, на печатающем устройстве, в виде графиков, виде кривых на экране осциллографа, сигнал может быть преобразован в ряд импульсов, вводимых непосредственно в цифровое вычислительное устройство.

Какими же достоинствами обладают электрические методы измерения?

Во-первых, это высокая чувствительность и возможность измерения в широком диапазоне изменения значений измеряемой величины. Благодаря этому можно измерять очень малые величины, например, перемещения зонда на 0,2 ... 0,3 нм в туннельном растровом электронном микроскопе или в микроскопе атомных сил.

Во-вторых, незначительная инерционность электрической аппаратуры позволяет измерять и медленные, и быстро меняющиеся во времени величины.

В-третьих, это возможность дистанционных измерений и передачи результатов на большие расстояния и удобство использования в системах управления.

«Искусство измерения является могущественным оружием, созданным человеческим разумом для проникновения в законы природы и подчинения её сил нашему господству» – писал полтора века назад известный русский учёный Б.С.Якоби. Производство измерений требует знания методов измерений и свойств измерительных приборов, их устройства, области применения, умения выбрать подходящий к случаю метод измерения и соответствующую измерительную аппаратуру, собрать измерительную схему, произвести наблюдения и записи, обработать полученные данные. Теоретическая часть курса «Электрические измерения» даёт обучающимся необходимые знания о методах измерений и измерительных приборах. Но чтобы в результате обучения не получился бы «инженер-теоретик», польза от которого сомнительна, имеется лабораторный практикум, при выполнении которого учащийся приобретает необходимые навыки в производстве измерений и знакомится с измерительной и вспомогательной аппаратурой.

Публикуемое пособие состоит из двух разделов. В гл. 1...8 вкратце даны теоретические основы методов измерений электрических величин и неэлектрических величин, преобразуемых в электрическую форму, конструкции важнейших измерительных приборов и преобразователей, а также метрологические основы измерений и способы обработки и представления полученных результатов. Для понимания материала этого раздела требуется знание основ электротехники, теории переменных токов и элементов высшей математики.

В собственно лабораторном практикуме (гл.9) даны описания одиннадцати лабораторных работ, охватывающих случаи измерения электрических, магнитных и механических величин, очень часто встречающихся в инженерной практике. За рамками практикума остались термоизмерения несмотря на то, что по разным оценкам термоизмерения охватывают 60 ... 80% всех измерений в промышленности. Вопросы термоизмерений вынесены в курс «Технические измерения и приборы».

# 1. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ

## 1.1. Основные понятия

*Измерение* – определение значения физической величины опытным путём с применением определённых технических средств. В результате измерения получают величину

$$X = Ax,$$

где  $X$  – измеряемая физическая величина;

$A$  – её числовое значение;

$x$  – единица измерения данной физической величины.

Измерения бывают механические, тепловые, электрические и другие.

*Электрическими* называют измерения электрических величин, параметров цепей, магнитных величин и неэлектрических величин, преобразуемых в электрические величины.

Измерения классифицируют как прямые, косвенные, совместные и совокупные.

*Прямыми* называют измерения, при которых результат о значении величины находят прямо из опыта. Пример – измерение напряжения вольтметром.

*Косвенными* называют измерения, при которых значение величины получают на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, полученными в результате прямых измерений. Пример – вычисление сопротивления по закону Ома по результатам прямых измерений падения напряжения и силы тока.

*Совокупные* измерения – проводимые одновременно измерения нескольких одноимённых величин, из которых искомую величину находят путём решения системы уравнений.

*Совместными* называют одновременные измерения нескольких неоднородных величин для нахождения зависимости между ними. Пример – нахождение уравнения температурной зависимости коэффициента тензочувствительности полупроводникового тензопреобразователя.

Для однозначного проведения измерений принята система единиц физических величин.

*Единица* физической величины – физическая величина, которой присвоено числовое значение, равное единице.

В соответствии с ГОСТ 9867 – 61 «Международная система единиц» во всех областях науки и техники принята система единиц измерения физических величин, сокращённо обозначается латинскими буквами SI или русскими буквами СИ («Система интернациональная»).

## 1.2. Средства измерений

*Средство измерений* – техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические свойства.

Виды средств измерений: мера, измерительный преобразователь, измерительный прибор, измерительная установка, измерительная информационная система, измерительный комплекс.

*Мера* – средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

*Измерительный преобразователь* – средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для дальнейшего преобразования, передачи, обработки или хранения, но не доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Примеры – измерительный трансформатор, делитель напряжения, тензометр.

*Измерительный прибор* – средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Пример – вольтметр.

Измерительные приборы бывают: аналоговые и цифровые; электромеханические и электронные; показывающие и регистрирующие; прямого действия и приборы сравнения; амперметры, вольтметры, фазометры и пр.

*Измерительная установка* – совокупность функционально объединённых средств измерений и вспомогательных устройств, предназначенная для выработки измерительной информации в форме, удобной для восприятия наблюдателем, и размещённая в одном месте. Пример – установка для испытания магнитопроводов.

*Измерительная информационная система* – совокупность средств измерений как в измерительной установке, но объединённых между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и использования в автоматических системах управления.

*Измерительные комплексы* служат для получения и обработки измерительной информации от сложного объекта.

По метрологическому назначению средства измерений делятся на эталоны, образцовые и рабочие. Среди последних выделяют более точные средства измерений (лабораторные) и менее точные (технические), служащие для непосредственно практических измерений.

### 1.3. Основные сведения о погрешностях средств измерений

Погрешность средства измерений связана с отклонением реальной градуировочной характеристики от номинальной главным образом из-за проявления эффекта так называемых влияющих величин. Последние определяются как не измеряемые, но оказывающие влияние на результат измерения. Пример – влияние напряжения питающей сети на показания электронного прибора.

Погрешность средства измерения при нормальных условиях его применения называется основной погрешностью.

Погрешности средств измерения подразделяются на абсолютные, относительные и приведённые. *Абсолютная погрешность*  $\zeta$  определяется формулой

$$\zeta = \tilde{A} - A,$$

где  $\tilde{A}$  - результат измерения;

$A$  – истинное значение измеряемой величины.

Поскольку истинное значение измеряемой величины принципиально неизвестно, вместо неё используют действительное значение измеряемой величины, под которым понимается значение, полученное по образцовому средству измерения  $A_0$ , которое может быть принято в данном измерении в качестве истинного.

*Относительная погрешность*  $\varepsilon$  определяется формулой:

$$\varepsilon = \frac{\zeta}{A} = \frac{\tilde{A} - A}{A} \approx \frac{\tilde{A} - A_0}{A_0}.$$

Как правило, относительную погрешность выражают в процентах.

*Приведённая погрешность* выражается как отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению  $A_n$ :

$$\gamma = \frac{\tilde{A} - A_0}{A_n},$$

её также обычно выражают в процентах.

Согласно «Публикации 51 Международной электротехнической комиссии» (МЭК) и «Рекомендации 34, «Классы точности измерений» Международной организации законодательной метрологии (МОЗМ) нормирующее значение принимается равным:

конечному значению шкалы, если нулевая отметка находится на краю или вне шкалы;

сумме конечных значений (без учёта знаков), если нулевая отметка находится внутри шкалы;

длине шкалы, если шкала имеет резко сужающиеся деления;

для средств измерения со шкалой, градуированной в единицах величины, для которой принята шкала с условным нулём (например, в °С), нормирующее значение принимается равным разности конечного и начального значений шкалы (диапазону измерений).

*Класс точности* – обобщённая характеристика средства измерений, определяемая пределами допустимых основной и дополнительной погрешности и другими свойствами, влияющими на точность, значение которой устанавливается стандартами на отдельные виды измерений.

Условные обозначения классов точности зависят от способа выбора нормирующего значения и сведены в нижеприведённую таблицу.

*Вариация*  $b$  показаний прибора определяется как разность показаний прибора при одном и том же значении измеряемой величины при плавном подходе к поверяемой отметке шкалы от начальной и от конечной отметок шкалы:

$$b = \zeta_6 - \zeta_M,$$

где  $\zeta_6$  и  $\zeta_M$  - абсолютные погрешности в данной точке диапазона при подходе к ней со стороны больших и меньших значений.

Для большинства средств измерения вариация не должна превышать значение основной погрешности.

Различают также статические и динамические погрешности.



Обозначения классов точности

Форма выражения погрешности	Предел допустимой погрешности (пример)	Обозначение класса точности
Приведённая погрешность, если нормирующее значение выражено в единицах измеряемой величины	$\gamma = \pm 1,5 \%$	1,5
Приведённая погрешность, если нормирующее значение принято равным длине шкалы	$\gamma = \pm 0,5 \%$	$\nabla 0,5$
Относительная погрешность постоянная	$\delta = \pm 0,5 \%$	$\odot 0,5$
Относительная погрешность, возрастающая с уменьшением измеряемой величины	$\delta = [0,02+0,01(x_k/x-1)]$	0,02/0,01
<p><i>Примечание.</i> В таблице приняты обозначения:  <math>\delta</math> - предел допускаемой относительной погрешности <math>\epsilon</math>;  <math>x_k</math> - конечное значение диапазона измерений или сигнала на входе преобразователя;  <math>x</math> - текущее значение.</p>		

#### 1.4. Элементарные статистические оценки результатов измерений

Большинство измерений, проводимых в лабораторном практикуме, относятся к так называемым прямым измерениям, при которых средство измерений приводят во взаимодействие с объектом измерения и по показаниям средства измерения отсчитывают значение измеряемой величины. Выполненные таким путём измерения неизбежно содержат ошибки.

*Первая ситуация.* В большинстве лабораторных работ проводят измерения с предварительным оцениванием погрешностей, когда регламентированы типы применяемых средств измерения, условия измерения и заранее вычислены погрешности. Например, в условиях лаборатории измерений измеряется постоянный ток срабатывания реле амперметром переносным М45М класса точности 1,0, предназначенным для работы при температуре окружающей среды от  $-40$  до  $+60$  °С и относительной влажности до  $95\% \pm 3\%$ , т.е. при условиях более широких, чем имеются в лаборатории. Выбранная длина шкалы прибора 15 мА. Показания прибора 5,6 мА. Результат измерения должен быть записан в виде

$$I_{cp} = (5,6 \pm 0,15) \text{ мА.}$$

*Вторая ситуация.* При измерениях могут появиться случайные погрешности, которые могут быть выявлены и оценены статистическими методами путём проведения многократных измерений. Типичный пример – измерение взаимной индуктивности первичной и вторичных обмоток при изменении положения плунжера дифференциально-трансформаторного преобразователя перемещения. Лабораторная установка для этих опытов содержит источник питания переменного тока 50 Гц 12 В, подключённый к сети 220 В, и фазочувствительный выпрямитель. При многократном измерении взаимной индуктивности при установке плунжера в положение, например, 1 мм при многократных измерениях будут получены разные данные, что обусловлено различными причинами:

неодинаковой установкой плунжера в заданное положение при разных измерениях;

неконтролируемым изменением напряжения питающей сети;

изменением параметров фазочувствительного выпрямителя во времени, а также под воздействием внешних факторов, главным из которых является нагрев элементов схемы, и др.

В рассматриваемом случае за окончательный результат всех измерений следует взять среднее арифметическое  $\bar{x}$  всех  $n$  отдельных измерений и вычислить среднюю арифметическую  $r$  или среднюю квадратичную ошибки  $s$  по формулам:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_1^n x_i}{n};$$

$$r = \frac{|\bar{x} - x_1| + |\bar{x} - x_2| + \dots + |\bar{x} - x_n|}{n} = \frac{\sum_1^n |\bar{x} - x_i|}{n};$$

$$s = \sqrt{\frac{(\bar{x} - x_1)^2 + (\bar{x} - x_2)^2 + \dots + (\bar{x} - x_n)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}},$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – результаты отдельных измерений.

Обозначение  $|\bar{x} - x_i|$  означает, что при подсчёте все разности считаются положительными без учёта их действительного знака.

При небольшом числе наблюдений следует пользоваться величиной  $s$ . При достаточно большом числе наблюдений (практически при  $n \geq 30$ ) неважно, какую величину вычислять, потому что между  $s$  и  $r$  существуют простые соотношения:

$$s = 1,25r \text{ или } r = 0,8s.$$

В большинстве случаев целесообразно пользоваться величиной  $s$ , а не  $r$ , потому что пользуясь ошибкой  $s$  легко определить доверительные вероятности, так как для этого есть специальные таблицы. Но вычислять среднюю арифметическую ошибку  $r$  проще, хотя теперь это несущественно, потому что никто не делает вычисления вручную, а только с помощью техники.

*Правило: для нахождения случайной ошибки нужно определить два числа – величину ошибки и доверительную вероятность. Средней квадратичной ошибке величиной  $1s$  соответствует доверительная вероятность 0,68, удвоенной средней квадратичной ошибке  $2s$  – доверительная вероятность 0,95, утроенной  $3s$  – доверительная вероятность 0,997.*

Сказанное означает, например, что  $i$ -й результат измерений в 68 % из 100 % случаев окажется в интервале  $\bar{x} \pm 1s$  и т.д.

При малом числе  $n$  среднюю арифметическую ошибку правильнее вычислять по следующей формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{x} - x_i|}{\sqrt{n(n-1)}},$$

при большом числе  $n$  различие между обеими формулами невелико.

*Третья ситуация.* Часто на этом обработку результатов измерений можно закончить. Однако, проводя повторные измерения той же величины, скорее всего получим другие значения  $\bar{x}$ ,  $r$ ,  $s$ . Если это необходимо, следует выяснить, насколько результаты могут изменяться при повторных измерениях. Для этого надо построить *доверительные интервалы для истинного значения измеряемой величины*. Как известно, доверительным интервалом называется интервал, который с заданной доверительной вероятностью покрывает истинное значение измеряемой величины.

Обычно доверительные интервалы строят, основываясь на распределении Стьюдента, которым называют распределение случайной величины  $t$ , вычисленной в предположении нормального распределения,

$$t = \frac{\bar{x} - A}{S_{\bar{x}}},$$

где  $A$  – истинное значение измеряемой величины;

$S_{\bar{x}}$  – оценка среднего квадратичного отклонения среднего арифметического  $\bar{x}$  результатов наблюдений.

Доверительный интервал  $[\bar{x} - t_q S_{\bar{x}}, \bar{x} + t_q S_{\bar{x}}]$  отвечает доверительной вероятности

$$\{|\bar{x} - A| \leq t_q S_{\bar{x}}\} = \alpha,$$

где  $t_q$  –  $q$ -процентная точка распределения Стьюдента; значение  $t_q$  находят в таблице, приводимой в книгах по статистике, по числу степеней свободы  $k = n - 1$  и уровню значимости  $q = 1 - \alpha$ ;

$n$  – число наблюдений.

Обычно при измерениях доверительную вероятность принимают равной 0,95 или 0,99 и лишь иногда 0,90.

На практике доверительные интервалы строят на основе распределения Стьюдента часто без проверки допустимости этого, поскольку реальные распределения – это обычно более «узкие» распределения, чем нормальное.

В применении к рассматриваемым задачам построения зависимости одной величины от другой следует найти доверительные интервалы для истинного значения вычисленной по результатам опытов величины.

Рассмотрим для примера типичный случай экспериментального изучения зависимости некоторой величины  $x$  от параметра  $z$ . Для этого измеряют  $x_1$  при некотором значении  $z_1$ , затем  $x_2$  при  $z_2$  и так далее до  $x_m$  при  $z_m$ . Затем повторяют эти измерения несколько раз, получая  $n$  серий измерений. Для дальнейшей статистической обработки находят средние арифметические  $\bar{x}_j$  из  $n$  измерений  $x_i$  при значении параметра  $z_j$ , оценку среднего квадратичного отклонения  $S_{\bar{x}_j}$ , среднего арифметического  $\bar{x}_j$  результатов наблюдений и доверительный интервал для каждого от 1 до  $m$  из этих средних арифметических.

Вот свод формул для расчётов, обозначения, справочные данные:

$n$  – число отсчётов (число серий измерений);

$x_i$  – значение каждого  $i$ -го измерения;  $i=1,2,\dots,n$ ;

$k = n - 1$  – число степеней свободы;

$\alpha$  – доверительная вероятность;

$q = 1 - \alpha$  – уровень значимости;

$A$  – истинное значение измеряемой величины;

$t_q$  –  $q$ -процентная точка распределения Стьюдента при заданных  $k$  и  $q$ ;

при значении параметра  $z_j$  по всем  $x_{ij}$  находят

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}; \quad S_{\bar{x}_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_j - x_{ij})^2}{n(n-1)}};$$

$\pm t_q S_{\bar{x}_j}$  – доверительный интервал такой, что при заданной вероятности  $\alpha$   $|\bar{x}_j - A| \leq t_q S_{\bar{x}_j}$ .

Примем  $\alpha=0,95$ , следовательно,  $q=0,05$ . Выписка из таблицы квантилей распределения Стьюдента приведена в таблице 1.

Таблица 1

Значения  $q$ -процентных точек распределения Стьюдента при  $q=0,05$

Число степеней свободы $k$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Значения $q$ -процентных точек	12,71	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,36	2,31	2,26

Результаты статистической обработки удобно представить так, как показано в таблице 2.

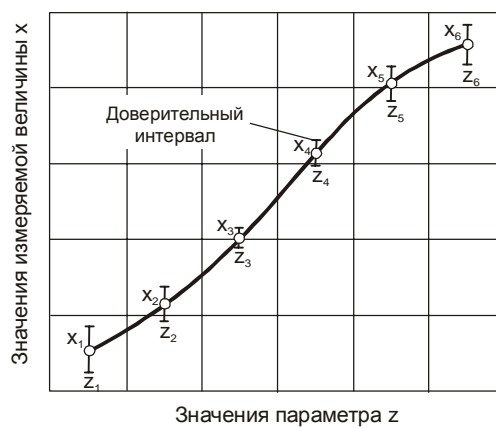
Таблица 2

Сводная таблица результатов статистической обработки измерений

Параметр $z_j$	$z_1$	$z_2$	...	$z_{m-1}$	$z_m$
Среднее арифметическое $\bar{x}_j$ результатов измерения			...		
Оценка $S_{\bar{x}_j}$ среднего квадратичного отклонения среднего арифметического результатов измерения			...		
Доверительный интервал	$\pm$	$\pm$	...	$\pm$	$\pm$

По результатам таблицы 2 можно построить график изменения  $x$  в зависимости от величины  $z$ , на котором можно изобразить доверительные интервалы. Обычно доверительные интервалы изображают

отрезками прямых длиной  $2t_q S_{\bar{x}_j}$ , параллельных оси  $x$ , середины которых совпадают с  $\bar{x}_j$  при данном значении  $z_j$ . На рисунке изображена некоторая зависимость измеряемой величины  $x$  от параметра  $z$  с нанесёнными доверительными интервалами.



Рисунок, иллюстрирующий изображение доверительных интервалов

## 2. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

### 2.1. Магнитоэлектрический измерительный механизм

Применение: в качестве амперметров, вольтметров и гальванометров для наиболее точных измерений постоянного тока, а также с различными преобразователями переменного тока в постоянный для измерения в цепях переменного тока.

Принцип действия магнитоэлектрического измерительного механизма основан на том, что обтекаемый ток проводник испытывает отклонение в постоянном магнитном поле неизменного направления.

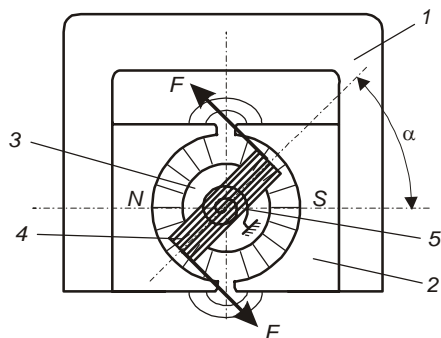


Рис. 2.1. Поворотная катушка в радиальном магнитном поле:

1 - постоянный магнит; 2- полюсный наконечник; 3- центральный ферромагнитный цилиндр кругового сечения; 4 - катушка; 5- спиральная пружинка

Измерительный механизм (рис.2.1) состоит из двух главных частей: постоянного магнита и обтекаемой постоянным током катушки, способной вращаться. Механическое противодействие движению оказывают две пружинки, закреплённые с торцов катушки (на рисунке показана только одна), стремящиеся вернуть подвижную систему в определённое нулевое положение.

Для уменьшения магнитного сопротивления воздушного промежутка между полюсными наконечниками магнита концентрически располагается железный сердечник, механически соединённый с неподвижными частями прибора деталями из немагнитных материалов (латуни и пр.), так что вращающаяся катушка с её действующими проводниками движется в узком межцилиндрическом пространстве между наконечниками и цилиндрическим сердечником. При такой конструкции магнитные силовые линии оказываются перпендикулярными к поверхности сердечника и равномерно распределёнными по межцилиндрическому пространству.

При протекании тока по обмотке катушки возникают силы  $F$ , стремящиеся повернуть катушку так, чтобы её плоскость стала перпендикулярной к направлению магнитных силовых линий. При равенстве вращающего и противодействующего моментов движение катушки прекращается.

Общее выражение для вращающего момента для электромеханических приборов, вытекающее из уравнений Лагранжа второго рода, записывается так:

$$M_{\text{вп}} = \frac{dW_{\text{маг}}}{d\alpha},$$

где  $W_{\text{маг}}$  - энергия электромагнитного поля, сосредоточенная в измерительном механизме;  
 $\alpha$  - угол поворота подвижной части.

Энергия электромагнитного поля

$$W_{\text{маг}} = \Phi I,$$

где  $\Phi$  - поток, сцепляющийся с обмоткой катушки;  
 $I$  - ток в обмотке катушки.

Поток  $\Phi$  найдём так:

$$\Phi = B \cdot 2rlw\alpha = Bsw\alpha,$$

где  $B$  - магнитная индукция в межцилиндрическом пространстве;  
 $r$  - радиус катушки;  
 $l$  - длина проводников катушки в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа на рис.2.1;  
 $s$  - площадь катушки;  
 $w$  - число витков катушки;  
 $\alpha$  - угол поворота катушки.

Проводники катушки, находящиеся в плоскости чертежа, в создании вращающего момента не участвуют, так как не пересекают магнитные силовые линии, и с учётом этого получаем

$$M_{\text{вп}} = \frac{d(Bsw\alpha l)}{d\alpha} = Bswl.$$

В состоянии равновесия этот момент уравнивается моментом закручивания пружинок. Если пружинки достаточно длинные, а это всегда имеет место, то момент закручивания пропорционален углу поворота катушки  $\alpha$ , поэтому

$$Bswl = c\alpha,$$

где  $c$  – жёсткость пружинок.

Отсюда имеем

$$\alpha = \frac{Bsw}{c} I.$$

При изменении направления тока меняется и направление угла  $\alpha$ , т.е. **магнитоэлектрический измерительный механизм пригоден только для постоянного тока.**

Магнитоэлектрический измерительный механизм имеет равномерную шкалу, что уменьшает погрешности градуировки и отсчёта. Кроме того, благодаря сильному магнитному полю в межцилиндрическом пространстве (0,2...0,3 Тл) он малочувствителен к внешним магнитным полям. Это позволяет изготавливать приборы на основе этого механизма класса точности до 0,1...0,2%. Класс точности щитовых технических приборов обычно 1,0...1,5%. Достоинством этих механизмов является малое собственное потребление мощности. Известны микроамперметры с током полного отклонения 1 мкА и даже 0,1 мкА.

Вследствие применения сильного постоянного магнита число ампервитков, необходимое для полного поворота катушки, составляет 0,4...0,7 и меньше. Поэтому магнитоэлектрический измерительный механизм легко изготовить с малым сопротивлением катушки и непосредственно использовать его в качестве амперметра. Максимальный ток обычно не превышает 1 А, что ограничено нагревом токоподводящих пружинок. Для расширения пределов измерения применяют шунты. Для применения механизма в качестве вольтметра последовательно с катушкой включают добавочное сопротивление.

Магнитоэлектрический измерительный механизм может быть выполнен в виде логометра (от греч.  $\lambda\omicron\gamma\omicron\sigma$  = отношение). В этом случае противодействующий момент создаётся не с помощью пружинок, а электрически. В магнитоэлектрическом логометре (рис. 2.2) подвижная часть выполняется в виде двух жёстко скреплённых между собой катушек, по обмоткам которых протекают токи  $I_1$  и  $I_2$ , а ток к обмоткам подводится с помощью безмоментных токоподводов из тонких неупругих проводников. Катушки включают так, чтобы моменты  $M_1$  и  $M_2$ , создаваемые катушками, были направлены навстречу друг другу. Любой из этих моментов может считаться вращающим, соответственно другой – противодействующим. Чтобы уравновесить моменты, при данных токах они должны зависеть от угла поворота  $\alpha$  катушек. Наиболее просто это осуществляется путём создания неравномерности радиального зазора между сердечником и полюсными наконечниками за счёт придания сердечнику эллиптического поперечного сечения. При вращении катушек одна из них попадает в область большего зазора и, следовательно, меньшей магнитной индукции, а другая – в область меньшего зазора и большей индукции. В результате при разных токах  $I_1$  и  $I_2$  устанавливается равновесие моментов при угле поворота катушек

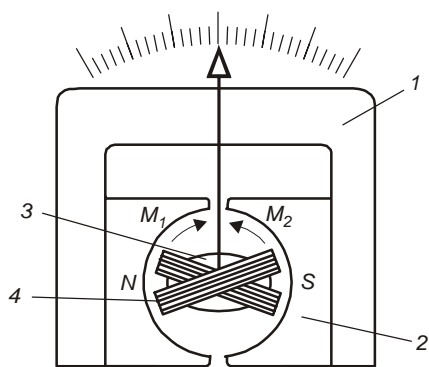


Рис. 2.2. Устройство логометра магнитоэлектрической системы: 1- постоянный магнит; 2 - полюсный наконечник; 3 - центральный цилиндр эллиптического сечения; 4 - катушка

катушек одна из них попадает в область большего зазора и, следовательно, меньшей магнитной индукции, а другая – в область меньшего зазора и большей индукции. В результате при разных токах  $I_1$  и  $I_2$  устанавливается равновесие моментов при угле поворота катушек

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right),$$

где  $F$  – функция, выражающая закон измерения магнитной индукции в зазоре.

Таким образом, угол поворота  $\alpha$  зависит от отношения токов в обмотках.

Наиболее часто измерительный механизм магнитоэлектрических логометров используют в омметрах.

## 2.2. Электромагнитный измерительный механизм

Применение: в качестве амперметров и вольтметров как для постоянного, так и для переменного тока.

Принцип действия электромагнитного измерительного механизма состоит в следующем: один или несколько сердечников из магнитомягкого железа подвергается воздействию электромагнитного поля, причём либо а) железный сердечник втягивается в катушку, по которой проходит ток, либо б) способный

вращаться в катушке железный сердечник притягивается либо отталкивается одним или несколькими неподвижными сердечниками, когда по катушке проходит ток.

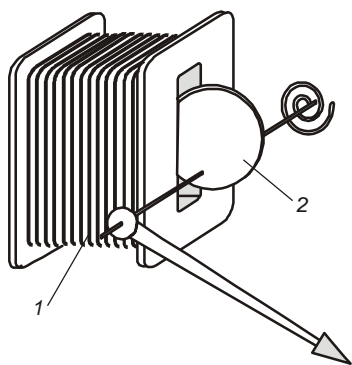


Рис. 2.3. Конструкция электромагнитного измерительного механизма с плоской катушкой (1) и плоским сердечником (2)

На рис.2.3 схематически показана одна из конструкций электромагнитного измерительного механизма с вращающимся сердечником.

Вращающий момент может быть определён на основании закона электромагнитной силы через первую производную от изменения энергии магнитного поля  $W_{маг}$  по углу поворота  $\alpha$  сердечника

$$M_{ер} = \frac{\partial W_{маг}}{\partial \alpha}.$$

Энергия магнитного поля

$$W_{маг} = \frac{LI^2}{2},$$

где  $I$  – ток, определяемый измеряемой цепью и не зависящий от положения сердечника;

$L$  – индуктивность катушки, зависящая от положения сердечника.

В результате получаем

$$M_{ер} = \frac{I^2}{2} \cdot \frac{\partial L}{\partial \alpha}.$$

Если бы индуктивность изменялась прямо пропорционально углу поворота  $\alpha$ , то шкала была бы чисто «квадратичной», сжатой вначале и растянутой в конце. Путём применения специальных конструктивных решений изготовителям приборов удаётся получить равномерную шкалу, начиная с 10...25% от номинального тока.

Так как в выражении для вращающего момента содержится квадрат измеряемой величины, этот измерительный механизм пригоден и для измерения переменного тока. При переменном токе поворот подвижной системы будет пропорционален квадрату эффективного значения тока.

Показания прибора на постоянном токе будут различными в зависимости от того, возрастает ли сила тока или убывает, тут проявляется действие петли гистерезиса. Поэтому во многих случаях при постоянном токе строят две кривые градуирования: одну для возрастающего, другую для убывающего тока; средние величины наносят на шкалу постоянного тока.

На переменном токе отклонения хорошего электромагнитного прибора на 1...2% меньше, чем при постоянном токе; разность расходуеться при переменном токе на работу перемагничивания.

Электромагнитный измерительный механизм чувствителен к влиянию внешних магнитных полей. Среднее значение магнитной индукции в катушке при номинальном токе обычно не превышает 0,015...0,04 Тл, т.е. относительно малую величину. В приборах с плоской катушкой вследствие более короткого пути магнитного потока это влияние менее заметно, чем с круглой. Для уменьшения внешних магнитных влияний применяют магнитное экранирование либо строят астатические измерительные системы с двумя одинаковыми измерительными элементами, собственные магнитные поля которых имеют противоположное направление.

Влияние частоты проявляется главным образом в вольтметрах, если реактивное сопротивление катушки составляет значительную часть кажущегося сопротивления вольтметра. Поэтому частотный диапазон обычно не простирается далее 400 Гц.

Требуемое число ампервитков для полного отклонения составляет примерно 200...250 у механизмов с плоской катушкой и 300...400 у механизмов с круглой катушкой. Поэтому номинальный ток вольтметра нормальной конструкции имеет величину порядка 20...50 мА.

### 2.3. Электродинамический измерительный механизм

Применение: для точных измерений переменных токов, напряжений и мощности переменных токов.

В электродинамическом измерительном механизме вращающий момент возникает в результате взаимодействия магнитных полей неподвижной и подвижной катушек с токами. На рис.2.4 схематически показано устройство электродинамического измерительного механизма.

Неподвижная катушка состоит из двух частей (аналог катушки Гельмгольца), её обмотки соединяются последовательно. Внутри неё располагается на оси подвижная катушка, подвод тока к которой осуществляется через пружинки или растяжки, как у магнитоэлектрических измерительных механизмов.

Обычно в исходном состоянии (при отсутствии тока) плоскости подвижной и неподвижной катушек, расположены под углом  $45^\circ$ , а максимальный угол поворота подвижной катушки составляет  $\alpha = 90^\circ$ .

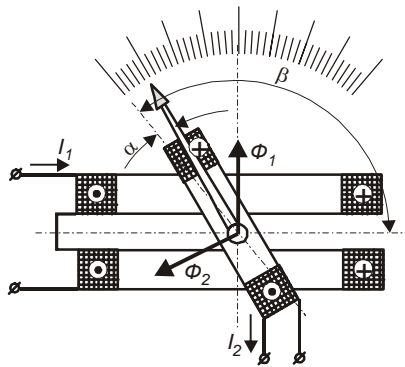


Рис. 2.4. Схематическое устройство (в разрезе) электродинамического измерительного механизма

При протекании токов по обмоткам катушек измерительного механизма возникают силы, стремящиеся так повернуть подвижную катушку, чтобы магнитные потоки подвижной и неподвижной катушек совпали. Противодействующий момент создается пружинами или растяжками, не показанными на рис.2.4. В электродинамическом измерительном механизме не используются ферромагнитные материалы, каркасы неподвижной и подвижной катушек выполняются из пластмассы или вообще их делают бескаркасными. Это исключает появление погрешностей, связанных с гистерезисом, с вихревыми токами и пр., поэтому электродинамические приборы могут быть сделаны самыми точными среди применяемых систем для переменного тока.

Вращающий момент  $M_{\text{вп}}$  электродинамического измерительного механизма можно выразить через первую производную от изменения электромагнитной энергии результирующего магнитного поля  $W_{\text{маг}}$  катушек по углу поворота  $\alpha$  подвижной катушки.

Электромагнитная энергия  $W_{\text{маг}}$  двух контуров с токами подсчитывается по выражению:

$$W_{\text{маг}} = \frac{L_1 I_1^2}{2} + \frac{L_2 I_2^2}{2} + M_{1,2} I_1 I_2,$$

где  $L_1$  и  $L_2$  – индуктивности неподвижной и подвижной катушек;  
 $M_{1,2}$  – взаимная индуктивность между ними.

Индуктивности  $L_1$  и  $L_2$  не зависят от угла поворота, поэтому

$$M_{\text{вп}} = \frac{dW_{\text{маг}}}{d\alpha} = I_1 I_2 \frac{\partial M_{1,2}}{\partial \alpha}.$$

В это выражение входит произведение токов, следовательно, измерительный механизм пригоден и для переменного тока, так как при изменении знака обоих токов направление вращающего момента не изменяется.

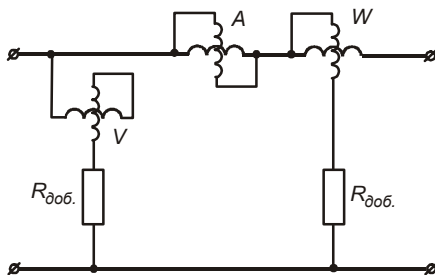


Рис. 2.5. Соединение неподвижной и подвижной катушек в электродинамических вольтметре, амперметре и ваттметре

На рис.2.5 показано включение электродинамического измерительного механизма как вольтметра  $V$ , амперметра  $A$  и ваттметра  $W$ .

В случае вольтметра  $V$  катушки соединены последовательно, токи катушки равны и пропорциональны измеряемому напряжению  $U$ :

$$I_1 = I_2 = \frac{U}{R_V},$$

где  $R_V$  – сопротивление всей цепи вольтметра, т.е. катушек плюс добавочное сопротивление  $R_{\text{доб}}$ .

Вращающий момент вольтметра будет

$$M_{\text{вп.V}} = \frac{U^2}{R_V^2} \cdot \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}.$$

Если связь между углом поворота рамки  $\alpha$  и противодействующим моментом пружин  $M_{\text{пр}}$  линейна, вольтметр будет иметь «квадратичную» шкалу, а при переменном токе он будет показывать **эффективное значение напряжения**. (С помощью подбора формы катушек и их начального положения изготовители обычно добиваются примерно равномерной шкалы, начиная с 25...30% от номинального перемещения стрелки, но шкала на начальном участке неизбежно будет сжатой).

В амперметре  $A$  токи неподвижной и подвижной катушек распределяются обратно пропорционально их сопротивлениям и вместе составляют полный измеряемый ток  $I$ :

$$I_1 = k_1 I; I_2 = k_2 I; k_1 + k_2 = 1; I = I_1 + I_2.$$



Вращающий момент амперметра будет

$$M_{\text{ep.A}} = k_1 k_2 I^2 \frac{\partial M_{1,2}}{\partial \alpha},$$

т.е. шкала амперметра также будет квадратичной, и амперметр тоже будет измерять **эффективное значение** переменного тока.

В ваттметре  $W$  через неподвижную катушку проходит измеряемый ток  $I_1 = I$ , а ток в подвижной катушке

$$I_2 = \frac{U}{R_W},$$

где  $R_W$  – сопротивление подвижной катушки плюс  $R_{\text{доб}}$ .

Следовательно, при постоянном токе вращающий момент ваттметра будет

$$M_{\text{ep.W}} = \frac{UI}{R_W} \cdot \frac{\partial M_{1,2}}{\partial \alpha} = \frac{P}{R_W} \cdot \frac{\partial M_{1,2}}{\partial \alpha},$$

и шкала его будет линейной.

На переменном токе подвижная катушка из-за своей инерционности не может следовать за мгновенными значениями момента, а её положение равновесия определяется средним значением момента. Если мгновенные значения токов обозначить  $i_1$  и  $i_2$ , то получим выражение для среднего значения момента:

$$M_{\text{ep.W}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{\partial M_{1,2}}{\partial \alpha} dt = \frac{\partial M_{1,2}}{\partial \alpha} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i_1 \cdot i_2 dt,$$

где  $T$  – период измеряемого тока.

Если выбрать активное сопротивление в цепи подвижной катушки достаточно большим, чтобы ток в этой цепи можно было считать практически пропорциональным напряжению  $U$  и совпадающим с ним по фазе, то получим:

$$i_2 = \frac{u}{R_W}.$$

Ток в неподвижной катушке является и током  $I$  нагрузки, мощность в которой измеряется, т.е.

$$i_1 = I.$$

Поэтому можно записать

$$M_{\text{ep.W}} = \frac{\partial M_{1,2}}{\partial \alpha} \cdot \frac{1}{R_W} \cdot \left( \frac{1}{T} \int_0^T u i dt \right).$$

Величина в скобках есть средняя мощность

$$P = UI \cos \varphi,$$

развиваемая током  $i$  при напряжении  $u$ , следовательно, вращающий момент ваттметра при переменном токе пропорционален **средней (активной) мощности** тока:

$$M_{\text{ep.W}} = \frac{P}{R_W} \cdot \frac{\partial M_{1,2}}{\partial \alpha} = \frac{UI \cos \alpha}{R_W} \cdot \frac{\partial M_{1,2}}{\partial \alpha},$$

и ваттметр будет иметь линейную шкалу.

Электродинамические приборы изготавливаются главным образом классов точности 0,1; 0,2 и 0,5. Их недостатками являются значительный ток полного отклонения, составляющий 30...40 мА, и чувствительность к внешним магнитным полям. Частотный диапазон простирается от постоянного тока до 3000 ... 20000 Гц. Приборы выполняются и в виде логометров, в этом случае они используются как фазометры, частотомеры и фарадометры.

## 2.4 Ферродинамический измерительный механизм

Применение: в самопишущих приборах и приборах, работающих в условиях вибраций, тряски и ударов, предназначенных для измерения постоянных и переменных токов, напряжения, мощности.

Схематически устройство одной из конструкций ферродинамического измерительного механизма показано на рис.2.6. Магнитопровод набирается из пластин электротехнических сталей или пермаллоя, для уменьшения погрешности от вихревых токов пластины изолируют друг от друга, а подвижная катушка часто выполняется бескаркасной. Наружная часть магнитопровода служит магнитным экраном, поэтому измерительный механизм защищён от влияния внешних магнитных полей.

Благодаря тому, что магнитный поток замыкается по железному сердечнику, в такой конструкции при той же затрате возбуждающих ампервитков, что в электродинамическом механизме, удаётся достигнуть двадцатикратного вращающего момента. Обычно магнитная индукция в магнитопроводе выбирается не более 0,15 Тл, поэтому погрешность измерения увеличивается не более чем на 0,3...0,5% от максимального значения шкалы.

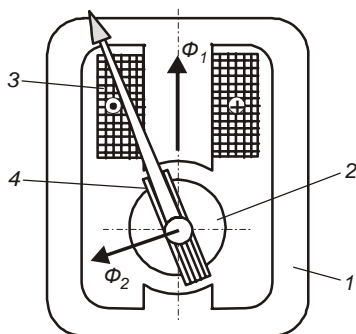


Рис. 2.6. Одна из конструкций ферродинамического измерительного механизма:

1 - магнитопровод; 2 - ферромагнитный круговой цилиндр; 3 - неподвижная катушка возбуждения; 4 - поворотная измерительная катушка

Вращающий момент  $M_{ep}$  возникает в результате взаимодействия подвижной катушки с током и потока неподвижной катушки. В конструкции, показанной на рис.2.6, плоскость подвижной катушки стремится занять положение, перпендикулярное магнитному потоку  $\Phi_1$ , вращаясь по часовой стрелке. Если магнитное поле в воздушном зазоре радиально, мгновенное значение вращающего момента подсчитывается по выражению

$$M_{ep,t} = B_t s_2 w_2 i_2,$$

где  $B_t$  – мгновенное значение магнитной индукции в воздушном зазоре;

$s_2, w_2, i_2$  – площадь, число витков и ток в подвижной катушке.

Среднее значение вращающего момента находим интегрированием:

$$M_{ep} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{ep,t} dt = B s_2 w_2 i_2 \cos(\angle B, i_2),$$

где  $B$  и  $i_2$  – эффективные значения индукции в воздушном зазоре и тока в подвижной катушке.

Если используется линейный участок кривой намагничивания материала сердечника, то

$$B = k_1 i_1,$$

где  $k_1$  – коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей измерительного механизма.

Если магнитопровод сделан из высококачественного материала, можно пренебречь углом потерь и считать,  $\angle B i_2 = \angle i_1, i_2$ . Полагая противодействующий момент пропорциональным углу поворота рамки  $\alpha$ , получим

$$k_1 s_2 w_2 i_1 i_2 \cos(\angle i_1, i_2) = c \alpha,$$

откуда

$$\alpha = k i_1 i_2 \cos(\angle i_1, i_2),$$

где  $c$  – жёсткость пружинок;

$k$  – коэффициент, зависящий от конструктивных параметров.

Следовательно, отклонение стрелки прибора пропорционально **эффективным значениям** токов  $i_1$  и  $i_2$ . Частотный диапазон приборов ферродинамической системы от постоянного тока до примерно 1500 Гц.

### 3. ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ

#### 3.1. Общие замечания

Для измерений переменного тока повышенной и высокой частоты приборы электромагнитной системы непригодны, выше частоты в несколько десятков килогерц непригодны также и приборы электродинамической системы. Задача этих измерений решается путём преобразования переменного тока в ток постоянный и измерения этого последнего приборами магнитоэлектрической системы. В качестве преобразователей используют полупроводниковые выпрямители, термопреобразователи и транзисторы.

Выпрямительные преобразователи имеют малые габариты, вес, малые собственные ёмкости и индуктивности, просты и надёжны в работе. Однако нелинейность характеристик полупроводниковых выпрямителей и сильное влияние на них температуры приводят к снижению точности выпрямительных преобразователей. Частотный диапазон их работы с приемлемой погрешностью ограничивается величиной до нескольких десятков мегагерц.

Термоэлектрические преобразователи обладают малыми индуктивностью и ёмкостью, но обладают повышенным потреблением мощности. Они применяются, главным образом, в качестве амперметров и миллиамперметров для высоких частот вплоть до сверхвысоких частот.

К числу достоинств транзисторных измерительных преобразователей следует отнести их высокую чувствительность за счёт использования внешних источников питания. Они применимы в диапазоне частот от постоянного тока до сотен мегагерц. Однако они имеют достаточно большую погрешность преобразования, достигающую до 30...50% в диапазоне сверхвысоких частот.

#### 3.2. Значения измеряемых напряжений.

Во времени переменный ток и переменное напряжение изменяются периодически и могут быть либо чисто синусоидальными, либо изменяться по другому закону. Периодические ток и напряжение с любой формой кривой характеризуются следующими величинами, для которых используют общепринятые обозначения, таблица 3.1.

Таблица 3.1

Обозначения величин, характеризующих переменные ток и напряжение

Наименование	Обозначение
Мгновенное значение	$i, u$
Максимальное значение	$I_m, U_m$
Эффективное (или действующее) значение	$I, U$
Среднее значение	$I_{cp}, U_{cp}$
Средневыпрямленное значение	$I_{cp,в}, U_{cp,в}$
Коэффициент амплитуды	$K_a$
Коэффициент формы	$K_f$
Продолжительность периода	$T$
Продолжительность импульса	$\tau$
Коэффициент заполнения периода импульсами	$K_z = \tau/T$
Сдвиг по фазе	$\varphi$

Для краткости изложения будем в дальнейшем рассматривать напряжения; для токов выражения аналогичны.

**Максимальное значение**  $U_m$  – наибольшее мгновенное значение за время наблюдения (или за период). При синусоидальном сигнале  $U_m$  называется «амплитудным значением», при симметричных или однополярных несинусоидальных сигналах  $U_m$  называется «пиковым значением», при несинусоидальных несимметричных относительно оси времени соответственно «пиковым отклонением вверх»  $U_{m,вв.}$  и «пиковым отклонением вниз»  $U_{m,вн.}$ . Сказанное иллюстрируется рис. 3.1.

Мгновенные значения  $u$  могут быть выражены через  $U_m$  путём умножения на известную функцию времени  $f(t)$

$$u = U_m \cdot f(t).$$

Для синусоидального сигнала обычно пишут

$$u = U_m \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) = U_m \sin \omega t.$$

Поэтому по оси времени можно откладывать не время  $t$ , а величину  $\omega t$  или угловое смещение в электрических градусах.

Выражая время  $t$  в долях  $T$ , легко определить мгновенное значение любой величины в каждый момент времени.

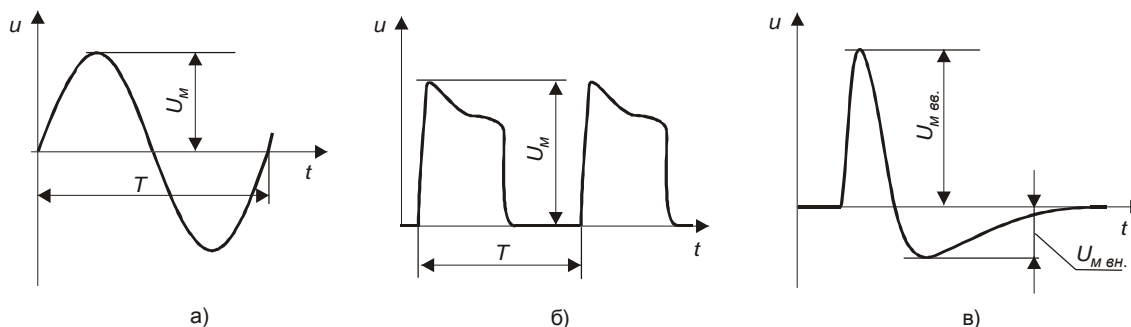


Рис. 3.1. Графики, иллюстрирующие понятие “максимальное значение напряжения”

При рассмотрении каждого из изменяющихся напряжений всегда можно выбрать начало отсчёта времени так, чтобы начало кривой мгновенных значений совпадало с началом координат. При совместном рассмотрении нескольких величин, связанных собой единым периодом колебаний, их изменения могут происходить с некоторым сдвигом во времени относительно друг друга. В таком случае говорят, что такие величины *сдвинуты по фазе* одна относительно другой.

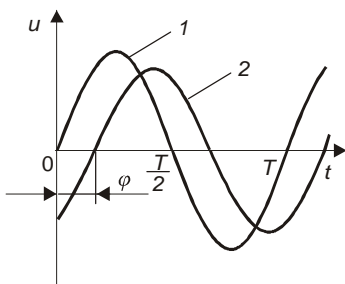


Рис. 3.2. График, иллюстрирующий фазовый сдвиг

Если выбрать начало отсчёта времени так, чтобы начало одной из величин совпадало с началом координаты времени  $t = 0$ , то другая величина в момент времени  $t = 0$  не будет иметь нулевого мгновенного значения, а будет иметь некоторую начальную фазу  $\pm\varphi$  - положительную, если при  $t = 0$  мгновенное её значение положительно, и отрицательную в противоположном случае. Начальную фазу выражают в радианах или в градусах. Величина с положительной начальной фазой *опережает по фазе*, а с отрицательной - *отстаёт по фазе*. На рисунке 3.2 величина 2 отстаёт по фазе от величины 1 на величину  $\varphi$ .

Найдём такое значение переменного тока, при котором в одном и том же сопротивлении выделилось бы такое же количество тепла, как при данном постоянном токе  $I$ . Такое значение называется действующим или эффективным значением переменного тока  $I_{эфф}$ .

Количество тепла, которое выделяется при постоянном токе  $I$  в сопротивлении  $R$  в течение одного периода времени  $T$ , будет:

$$Q_{=} = I^2 RT.$$

Количество тепла, выделившееся в том же сопротивлении  $R$  за период  $T$  при протекании через него переменного синусоидального тока, будет равно

$$Q_{\approx} = R \int_0^T i^2 dt = R \int_0^T I_M^2 \sin^2 \omega t dt = R I_M^2 \int_0^T \sin^2 \omega t dt = \frac{I_M^2 RT}{2}.$$

Приравнявая  $Q_{=}$  и  $Q_{\approx}$ , получим

$$I^2 RT = \frac{I_M^2}{2} RT,$$

откуда

$$I = \frac{I_M}{\sqrt{2}}.$$

Это значения переменного тока, меньшее в  $\sqrt{2}$  раз его максимального значения  $I_M$ , и будет эффективным (действующим) значением переменного тока  $I_{эфф}$ , т.е.

$$I_{\text{эфф}} = \frac{I_M}{\sqrt{2}}.$$

Аналогично может быть получено эффективное значение напряжения:

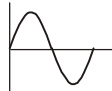
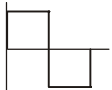

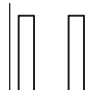
$$U_{\text{эфф}} = \frac{U_M}{\sqrt{2}}.$$

Отношение максимального значения к эффективному называется коэффициентом амплитуды и обозначается, как правило,  $k_a$ . Для синусоидальной величины  $k_a = \sqrt{2}$ . При другой форме кривой переменного тока значение  $k_a$  будет другим. В таблице 3.2 приведены параметры часто встречающихся переменных напряжений.

Эффективные значения тока и напряжения используются настолько часто, что обычно индекс «эфф» опускают, как это и принято в таблице 3.1 и 3.2. Мы иногда для понятности изложения этот индекс будем оставлять.

Таблица 3.2

Сводная таблица параметров часто встречающихся периодических напряжений

Форма кривой	Среднее значение $U_{\text{ср}}$	Средневыпрямленное значение $U_{\text{ср.в}}$	Эффективное значение $U$	Коэффициент амплитуды $k_a$	Коэффициент формы $k_{\text{ф}}$
	0	$\frac{2U_M}{\pi} = 0,636U_M$	$\frac{U_M}{\sqrt{2}} = 0,707U_M$	$\sqrt{2} = 1,41$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$
	0	$U_M$	$U_M$	1	1
	0	$0,5U_M$	$\frac{U_M}{\sqrt{3}} = 0,578U_M$	$\sqrt{3} = 1,73$	$\frac{2}{\sqrt{3}} = 1,16$
	$k_3 U_M$	$k_3 U_M$	$\sqrt{k_3} U_M$	$\frac{1}{\sqrt{k_3}}$	$\frac{1}{\sqrt{k_3}}$

При известном законе изменения мгновенного значения во времени  $u(t)$  общая формула для вычисления *эффективного значения* имеет вид:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}.$$

Заметим к тому же, что квадрат эффективного значения напряжения несинусоидальной формы равен сумме квадратов действующих значений всех гармонических составляющих этого напряжения

$$U^2 = U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots$$

*Среднее значение за период* – постоянная составляющая – есть арифметическое среднее, численно равное алгебраической сумме площадей между огибающей мгновенных значений и осью времени:

$$U_{\text{ср.}} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt.$$

Среднее значение синусоидального сигнала равно нулю. Если среднее значение отличается от нуля, говорят, что это *смешанный ток* или *смешанное напряжение* (таблица 3.2).

*Средневыпрямленное значение* – это среднее арифметическое из абсолютных мгновенных значений:

$$U_{\text{ср.в.}} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt.$$

Например, для синусоидального напряжения средневыврявленное значение будет (рис. 3.3)

$$U_{\text{ср.с.}} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} u(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_M \sin \omega t d\omega t = \frac{U_M}{\pi} |\cos \omega t|_0^{\pi} = \frac{2}{\pi} U_M = 0,636 U_M.$$

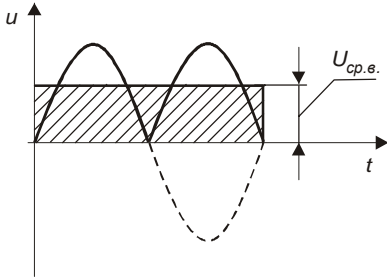


Рис. 3.3. К определению средневыврявленного значения

Если сопоставить средневыврявленное значение синусоидально изменяющейся величины напряжения и его эффективное значение, то получим:

$$\frac{U}{U_{\text{ср.с.}}} = \frac{U_M \pi}{\sqrt{2} \cdot 2 U_M} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11,$$

откуда

$$U = 1,11 \cdot U_{\text{ср.с.}}$$

Отношение эффективного значения к средневыврявленному называется коэффициентом формы кривой и обычно обозначается  $k_{\text{ф}}$ . Для синусоидальной величины  $k_{\text{ф}} = 1,11$ , для напряжения другой формы  $k_{\text{ф}}$  имеет другую величину (таблица 3.2).

На рис. 3.4 изображены мгновенные значения некоторых величин, изменяющихся не по синусоидальному закону. Вычислим, например, значения  $k_a$  и  $k_{\text{ф}}$  для пилообразного напряжения по рис. 3.4а. Мгновенное значение  $u(t)$  изменяется по такому закону:

$$u(t) = \frac{U_M}{T} \cdot t.$$

Эффективное значение

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_M^2}{T^2} \cdot t^2 dt} = \frac{U_M}{\sqrt{3}}.$$

Средневыврявленное значение проще всего получить из графика путём деления площади треугольника под кривой на период:

$$U_{\text{ср.с.}} = \frac{U_M}{2}.$$

По определениям получаем:

коэффициент амплитуды  $k_a = \sqrt{3} \approx 1,73$ ;

коэффициент формы  $k_{\text{ф}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \approx 1,16$ .

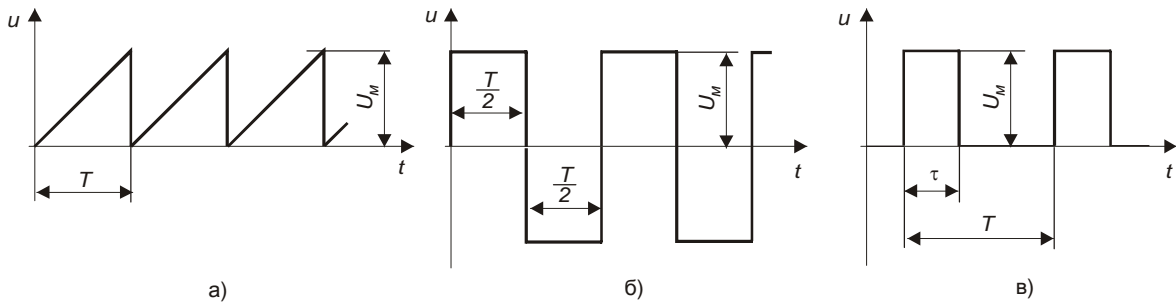


Рис. 3.4. Часто встречающиеся напряжения несинусоидальной формы

### 3.3. Приборы выпрямительной системы для измерения амплитудного, средневыпрямленного и эффективного значений

Ток приборами выпрямительной системы измеряется, как правило, по падению напряжения на известном сопротивлении, поэтому ограничимся рассмотрением схем для измерения напряжения. Для измерения амплитудного значения напряжения  $U_M$  обычно используется какая-либо из схем диодного амплитудного детектора. На рис. 3.5 в качестве примера приведена схема диодного амплитудного детектора с открытым входом. К зажимам 1 и 2 подключен источник переменного напряжения с амплитудой  $U_M$ , внутреннее сопротивление которого  $R_U$ . В положительные полупериоды конденсатор  $C$  через диод будет заряжаться почти до амплитудного значения (рис. 3.5б). Разряд конденсатора будет происходить только через индикатор с внутренним сопротивлением  $R$ , так как в отрицательные полупериоды диод  $VD$  заперт. Постоянная времени  $\tau = RC$  выбирается достаточно большой по сравнению с периодом  $T$  измеряемого напряжения:

$$\tau = RC \gg \frac{1}{f} = T,$$

где  $f$  – частота измеряемого напряжения.

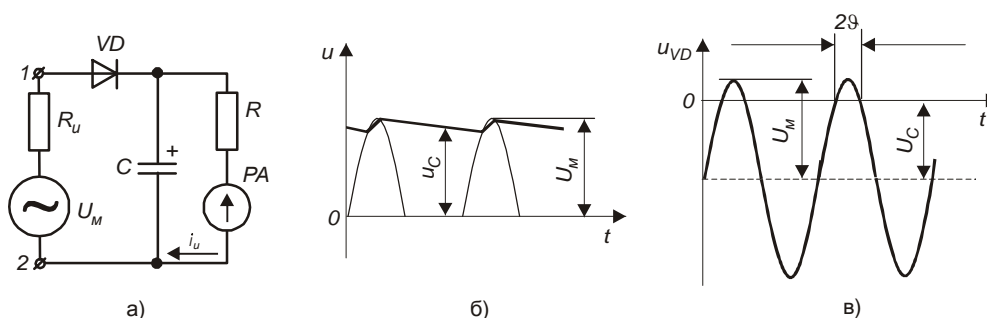


Рис. 3.5. Диодный амплитудный детектор: а) принципиальная схема; б) график напряжения на конденсаторе; в) график напряжения на диоде

При таком выборе  $\tau$  конденсатор за время отрицательного полупериода не может значительно разрядиться, поэтому среднее значение напряжения на конденсаторе  $U_C$  будет близким к амплитудному значению измеряемого напряжения  $U_M$ . При достаточно большой ёмкости  $C$  пульсации будут малы. Мгновенное значение напряжения на диоде  $U_D$  состоит из почти постоянного по времени напряжения  $U_C$  и входного переменного напряжения (рис. 3.5в). Ток через диод протекает только в течение отрезка времени, на протяжении которого напряжение на диоде положительно. Этот отрезок времени, выраженный в значении угла поворота вектора синусоидального напряжения, обозначен  $2\theta$ . Угол  $\theta$  называют углом отсечки тока диода. Из рис. 3.5 видно, что

$$U_C = U_M \cos \theta .$$

Среднее значение импульсов тока через диод

$$I_{cp.u} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{2}-\theta}^{\frac{\pi}{2}+\theta} \frac{U_M \sin \omega t - U_M \cos \theta}{R_i + R_U} d\omega t ,$$

где  $R_i$  – внутреннее сопротивление диода  $VD$ .

С другой стороны, среднее значение импульсов тока равно току, протекающему через индикатор:

$$I_{cp.u} = \frac{U_C}{R} = \frac{U_M}{R} \cos \theta .$$

Взяв интервал и приравняв два последних выражения, получаем:

$$\frac{R}{R_i + R_U} = \frac{\pi \cos \theta}{\sin \theta - \theta \cos \theta} .$$

Численные значения, характеризующие близость  $U_C$  к  $U_M$  такие:

при $R/(R_i + R_u) = 100$	$\cos \theta = 0,9$ ;
при $R/(R_i + R_u) = 300$	$\cos \theta = 0,95$ ;
при $R/(R_i + R_u) = 1000$	$\cos \theta = 0,98$ .

Таким образом, при выборе достаточно большой величины отношения  $\frac{R}{R_i + R_u}$  ток через индикатор пропорционален амплитудному значению измеряемого напряжения. Если в качестве индикатора используется прибор магнитоэлектрической системы, отклонение  $\alpha$  стрелки которого пропорционально току  $I_{cp.с}$ , его шкала может быть отградуирована в амплитудных значениях входного напряжения.

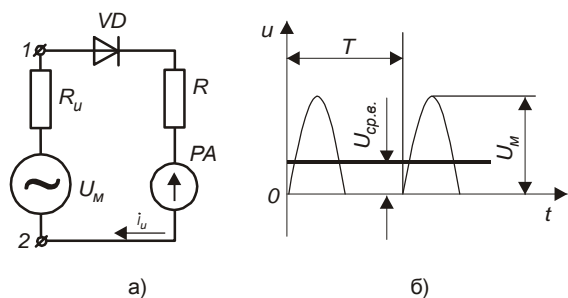


Рис. 3.6. Вольтметр средневыпрямленного значения:  
а) принципиальная схема; б) временная диаграмма

На рис. 3.6а изображена очень распространенная схема вольтметра для измерения средневыпрямленного значения  $U_{cp.с}$ . Индикатор магнитоэлектрической системы подключён к источнику переменного напряжения (зажимы 1 и 2) через диод  $D$  и добавочный резистор  $R$ . Для средневыпрямленного значения тока через прибор  $I_{cp.с}$ , учитывая, что выпрямление однополупериодное (рис. 3.6б), получаем следующее уравнение:

$$\int_0^{\frac{T}{2}} \frac{U_M \sin \omega t}{R_u + R_i + R} dt = I_{cp.с} T,$$

из которого следует, что отклонение стрелки прибора пропорционально средневыпрямленному значению  $U_{cp.с}$  входного напряжения:

$$\alpha \equiv I_{cp.с} = \frac{U_{cp.с}}{R_u + R_i + R} = \frac{1}{\pi(R_u + R_i + R)} U_M = \frac{0,318 U_M}{R_u + R_i + R}.$$

Схема по рис.3.6 из-за односторонней проводимости диода неприменима для измерения переменного тока. Для измерения переменного тока применяют схемы с однополупериодным и двухполупериодным выпрямлением (рис.3.7). В схеме, рис.3.7а через измерительный механизм проходит только одна полуволна переменного тока, обратная волна проходит через  $VD_2$ . Резистор  $r$ , имеющий сопротивление, равное сопротивлению миллиамперметра, служит для уравнивания сопротивлений измерительной цепи в обоих направлениях переменного тока.

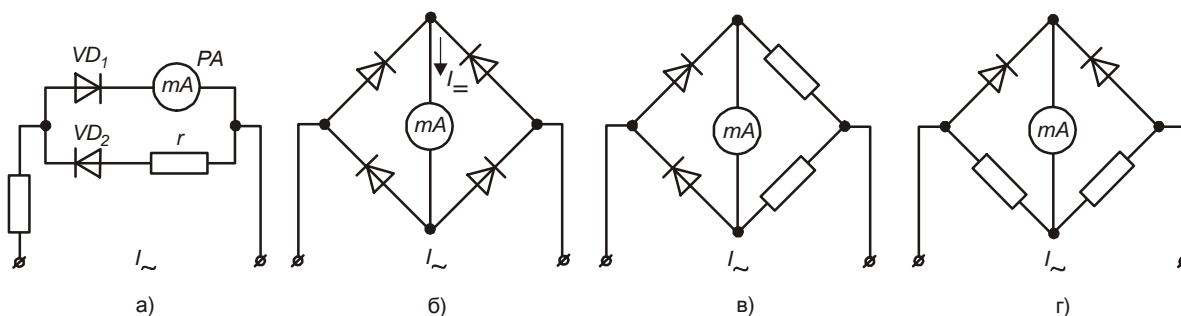


Рис. 3.7. Схемы включения миллиамперметра постоянного тока с выпрямителями: а) с однополупериодным; б) с двухполупериодным; в) и г) с двухполупериодным с заменой двух выпрямителей резисторами

В двухполупериодной схеме (рис.3.7б) ток через миллиамперметр проходит в оба полупериода, следовательно, чувствительность схемы увеличивается (теоретически) вдвое.

Для уменьшения влияния температуры иногда два диода заменяют резисторами, однако, поскольку в миллиамперметр ответвляется лишь часть тока, эти схемы имеют меньшую чувствительность. Для измерения небольших токов применяют схему по рис. 3.7в, для больших – схему по рис. 3.7г, так как в ней в каждый полупериод один из резисторов играет роль шунта.

При использовании добавочного резистора схемы по рис.3.7 могут служить вольтметрами.

В вольтметрах эффективного значения  $U_{эфф}$  должны иметься устройства для возведения в квадрат (квадратор) и извлечения квадратного корня. На практике, однако, в угоду простоте схемы обычно жертвуют устройством для извлечения квадратного корня, ограничиваясь применением квадратора, хо-



тя в этом случае прибор имеет нелинейную шкалу. Наиболее часто в вольтметре используют квадратичный детектор с кусочно-линейной аппроксимацией параболы второй степени и индикатор магнито-электрической системы (рис. 3.8).

Принцип действия схемы состоит в следующем. На входные зажимы 1 и 2 подаётся измеряемое напряжение. К резисторам  $R_4$  и  $R_5$  приложено постоянное запирающее напряжение  $E_0$ . Падениями напряжения на резисторах  $R_4$  и  $R_5$  запираются соответственно диоды  $VD_2$  и  $VD_3$ . В положительный полупериод, если максимальное мгновенное значение входного напряжения  $u$  не превышает величины  $E_1$  (рис.3.8б) ток протекает через диод  $VD_1$ , и на резисторе  $R_0$  возникает падение напряжения  $u_0$ , являющееся выходным напряжением схемы. Ток диода  $VD_1$  определяется сопротивлениями резисторов  $R_1$  и  $R_0$  и линейно зависит от входного напряжения.

По мере роста тока диода  $VD_1$  увеличивается падение напряжения на  $R_1$ . При мгновенном значении входного напряжения  $u = E_1$  напряжения на  $R_1$  и  $R_5$  компенсируются, и открывается диод  $VD_2$ . При этом ток протекает через резисторы  $R_1$  и  $R_2$ , и крутизна зависимости тока от входного напряжения при  $u > E_1$  увеличивается.

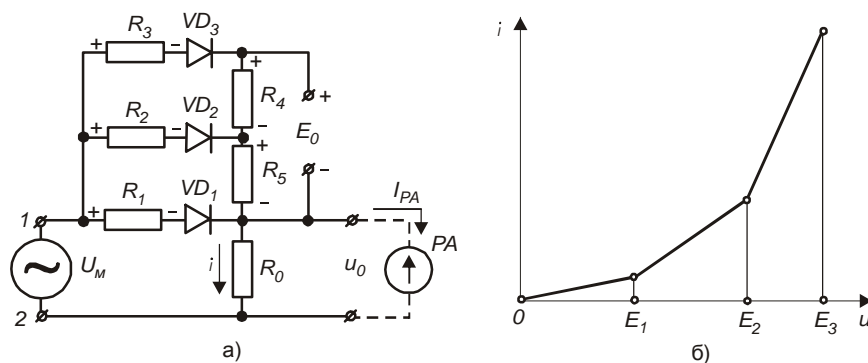


Рис. 3.8. Вольтметр эффективного значения с кусочно-линейной аппроксимацией параболической зависимости: а) принципиальная схема; б) кусочно-линейная аппроксимация параболы второй степени

При дальнейшем увеличении  $u$  при  $u = E_2$  компенсируются напряжения на резисторах  $R_2$  и  $R_4$ , открывается диод  $VD_3$  и ток  $i$  протекает через резисторы  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ , в результате чего крутизна зависимости тока  $i$  от входного напряжения ещё больше увеличивается. Подбирая параметры схемы, можно получить ломанную линию, отражающую зависимость  $i$  от  $u$ , близкую к квадратичной параболе; приближение тем лучше, чем большее число отрезков содержит ломанная линия. Средний ток через индикатор  $I_{PA}$  и отклонение стрелки индикатора пропорциональны составляющей  $I_{cp.в}$  пульсирующего тока  $i$  и вызываемому ею падению напряжения на резисторе  $R_0$ . Постоянная составляющая тока  $I_{cp.в}$ , в свою очередь, пропорциональна квадрату эффективного значения измеряемого напряжения при условии его симметричности в обоих полупериодах, так что имеем:

$$I_u = \frac{1}{2T} \int_0^T ku^2 dt = \frac{k}{2} U_{эфф}^2,$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Таким образом, шкала прибора может быть отградуирована в эффективных значениях измеряемого напряжения, хотя и будет нелинейной (сжатой в начале). При несимметричной форме кривой показания вольтметра зависят от варианта подключения его зажимов 1 и 2 к измеряемому напряжению. Если кривая измеряемого напряжения симметрична, показания могут быть считаны со шкалы сразу же. Если же кривая несимметрична, эффективное значение может найдено по результатам двух измерений при разных вариантах подключения зажимов

$$U_{эфф} = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2}{2}},$$

где  $U_1$  и  $U_2$  – отсчёты по шкале вольтметра в каждом из вариантов.

Выпрямительными приборами без специальной частотной компенсации можно измерять напряжения до частот 5...10 кГц, с частотной компенсацией – до примерно 100 кГц. Погрешность выпрямительных вольтметров и амперметров довольно велика, их класс точности составляет обычно 1,0...2,5.

### 3.4. Фазочувствительные измерительные схемы

Общими недостатками рассмотренных измерительных схем выпрямления являются следующие: эти выпрямители не реагируют на фазу выпрямленного напряжения, ток через РА всегда течёт в одном направлении;

они имеют низкую чувствительность и значительную нелинейность около нуля вследствие нелинейности вольтамперной характеристики диодов.

Эти недостатки устраняются в схемах так называемых фазочувствительных выпрямителей, которые обладают равномерной шкалой, начиная от нуля, и векторными свойствами. В отличие от рассмотренных схем в этих схемах обязательно наличие цепи вспомогательного управляющего напряжения, фаза которого фиксирует вектор коммутации выпрямительных диодов. Схемы эти бывают одно- и двухполупериодными и весьма разнообразны.

Для понимания сущности их действия на примере одной из однополупериодных схем рассмотрим два вопроса:

как получается линейная шкала при нелинейной характеристике самих диодов;

как осуществляется для векторности устройства коммутация измеряемого тока.

*Устранение нелинейности выпрямления.* Приведённая на рисунке 3.9 схема не имеет выпрямительных свойств, хотя содержит полупроводниковые диоды, а предназначена для иллюстрации принципа линеаризации. Два диода, включённые последовательно с батареей  $2E_0$  и резистором с сопротивлением  $2R$ , образуют замкнутый контур, по которому протекает постоянный ток  $I_0$ . Измеряемое переменное напряжение  $U$  с мгновенным значением  $u$  подключено к эквипотенциальным точкам  $a - b$ . Напряжение  $2E_0$  выбрано достаточно большим, вследствие чего ток  $I_0$  находится на линейной части вольтамперной характеристики полувзена  $a - b$  (рис. 3.10).

По отношению у внешней цепи схема ведёт себя как два включенных параллельно сопротивления с эквивалентной величиной  $R_{\text{экв}} = \frac{\Delta E_0}{\Delta I_0}$ . Так как схема не содержит ни индуктивностей, ни ёмкостей, ток через измеритель полностью повторяет кривую напряжения и равен

$$i = \frac{u}{r + \frac{R_{\text{экв}}}{2}},$$

где  $r$  – внутреннее сопротивление измерителя РА.

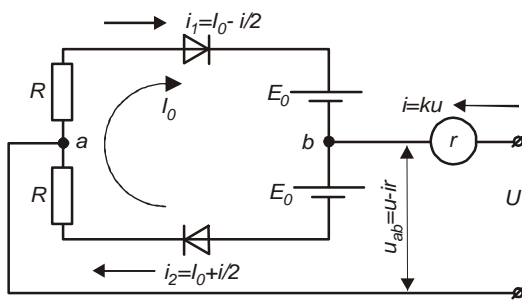


Рис. 3.9. Принцип получения линейной шкалы  $i=ku$

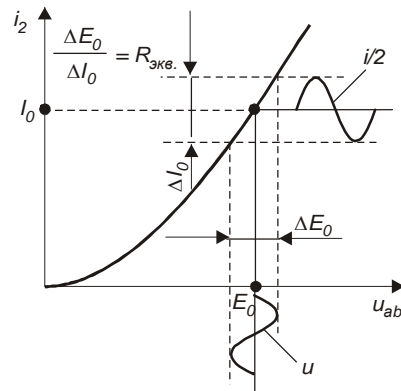


Рис. 3.10. Вольтамперная характеристика полувзена  $a - b$  и рабочая точка схемы

Если теперь воздействовать на диоды так, чтобы они оба в один полупериод пропускали ток, а в другой нет, то получим эффект, как если бы вместо них были установлены контактные переключатели, и ток через РА имел бы вид однополупериодно выпрямленного (рис. 3.11а). Если мгновенное значение изменяется синусоидально, постоянная составляющая тока через измеритель РА выразится так:

$$I_{\text{cp}} = \frac{1}{2k_{\phi}} \cdot \frac{U}{r + \frac{R_{\text{экв}}}{2}},$$

где  $U$  – эффективное значение измеряемого синусоидального напряжения.

На рис. 3.12 приведена простейшая схема однополупериодного фазочувствительного выпрямителя. Для её работы требуется наличие вспомогательного коммутирующего напряжения  $U_k$ , имеющего ту же частоту, что измеряемое напряжение  $U$ . Напряжение  $U_k$  должно быть много больше, чем напряжение  $U$ , с тем, чтобы рабочая точка диодов в проводящем направлении находилась на участке их линей-

ной характеристики, как показано на рисунке 3.10. Напряжение  $U_k$  снимается со вторичных строго симметричных обмоток трансформатора  $TV$ , для чего эти обмотки наматываются одновременно двумя перекрестными проводами и включаются последовательно (точки у обмоток на рис. 3.12 – начала обмоток). Поэтому точки  $a$  и  $b$  относительно этого напряжения являются эквипотенциальными.

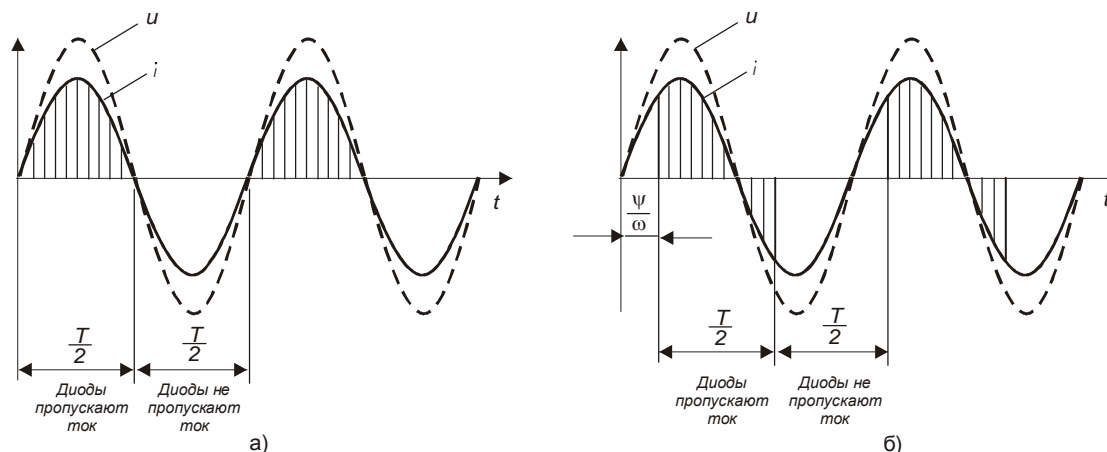


Рис. 3.11. Диаграммы коммутации: а) при синфазных коммутирующем и измеряемом напряжениях; б) при фазовом сдвиге между коммутирующим и измеряемым напряжениями  $\psi$

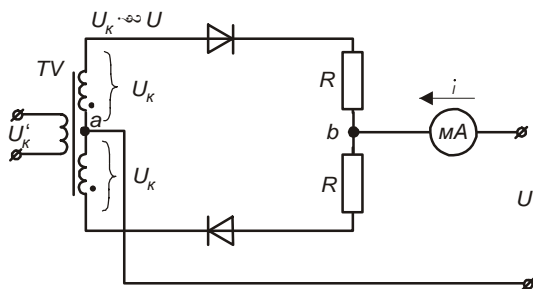


Рис. 3.12. Однополупериодная схема фазочувствительного выпрямителя для измерения напряжения

В течение одного полупериода напряжения  $U_k$  оно по отношению к диодам имеет обратное направление, и диоды запираются. В течение другого полупериода  $U_k$  оно включено в проводящем для диодов направлении, оба они проводят, их рабочая точка устанавливается в соответствии с рис. 3.10. Если фазовый сдвиг между напряжениями  $U$  и  $U_k$  равен нулю, в измерительной цепи течёт ток  $i$  как в схеме однополупериодного выпрямления (рис. 3.11а). Если имеется фазовый сдвиг  $\psi$ , средний выпрямленный ток  $i$  будет пропорционален разности заштрихованных на рисунке 3.11б площадей. При  $\psi = 90^\circ$  средний выпрямленный ток равен нулю. При  $\psi > 90^\circ$  средний выпрямленный ток меняет свой знак. Схема является,

таким образом, чувствительной к фазовому сдвигу между напряжениями  $U$  и  $U_k$ .

Напряжение на коммутирующем входе схемы  $U'_k$  должно выбираться с учётом параметров трансформатора  $TV$  с тем, чтобы выполнялось условие  $U_k \gg U$ .

Схемы фазочувствительного выпрямления весьма разнообразны. Их основное применение там, где нужна высокая линейность выпрямления малых напряжений, например, в мостах переменного тока, а также в автоматических системах, работающих на переменном токе, в которых направление рассогласования двух величин в конце концов должно быть представлено в виде постоянного напряжения положительной или отрицательной полярности.

### 3.5. Термоэлектрические приборы

Термоэлектрические приборы состоят из термопреобразователя переменного тока в постоянный и магнитоэлектрического измерительного механизма.

Термопреобразователь представляет собой нагреватель и термопару. В контактном термопреобразователе (рис. 3.13) термопара  $cd$  имеет гальванический контакт (приварена) с нагревателем  $ab$ . В качестве нагревателя используется тонкая нихромовая или платиноиридиевая проволока, для термопар обычно используют пары хромель-копель ( $t_{\text{макс}} = 600^\circ\text{C}$ ,  $E_{\text{т.макс}} = 49 \text{ мВ}$ ), железо-константан ( $600^\circ\text{C}$ ,  $30 \text{ мВ}$ ) и нихром-константан ( $600^\circ\text{C}$ ,  $34 \text{ мВ}$ ) и другие. Так как к.п.д. термоэлемента очень мал (около 0,5%), то малы полезная мощность термопреобразователя и э.д.с. термопары, что заставляет применять совместно с термопреобразователем измерительные приборы, высокая чувствительность которых часто достигается за счёт ухудшения механических и электрических свойств.

В контактном термопреобразователе величина э.д.с. всегда несколько зависит от направления тока в нагревателе, главным образом вследствие эффекта Пельтье, поэтому его нельзя градуировать на постоянном токе, если в дальнейшем он будет применяться на переменном токе.

В контактном преобразователе нельзя применить батарею термопар. В случае измерения токов высокой частоты батарею термопар можно создать по схеме рисунка 3.14. Недостатком контактных

преобразователей являются соединении измеряемой цепи через нагреватель  $ab$  с прибором, что увеличивает ёмкость цепи относительно земли.

В бесконтактных преобразователях устраняется влияние эффекта Пельтье, появляется возможность их градуирования на постоянном токе. Термический контакт между нагревателем и термопарой создаётся с помощью керамической бусинки или трубочки (рисунок 3.15). Однако в такой конструкции ухудшается теплопередача, что приводит к уменьшению чувствительности, и возрастает тепловая инерция. Часто в бесконтактных преобразователях применяют батарею термопар (рисунок 3.16).

Достоинством бесконтактных преобразователей является маленькая ёмкость нагревателя по отношению к земле.

Термо-э.д.с., развиваемая термопреобразователем, пропорциональна количеству тепла, развиваемому нагревателем  $ab$ . Количество тепла пропорционально квадрату измеряемого тока. Величина тока  $I_{\sim}$  в цепи измерительного механизма может быть вычислена как

$$I_{\sim} = \frac{E_T}{r},$$

где  $E_T$  – термо – э.д.с.;

$r$  – полное сопротивление в цепи прибора.

Таким образом, отклонение стрелки прибора  $\alpha$  будет пропорционально квадрату эффективного значения измеряемого тока:

$$\alpha = kI_{\sim}^2,$$

где  $k$  – постоянный коэффициент, зависящий от свойств термопары и измерительного механизма и от конструкции термопреобразователя.

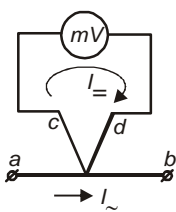


Рис. 3.13. Контактный термопреобразователь

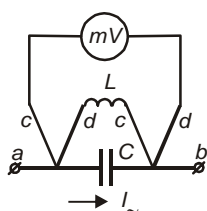


Рис. 3.14. Контактный преобразователь для токов повышенной частоты с последовательным соединением термоэлементов

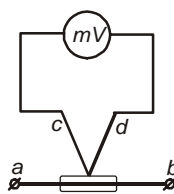


Рис. 3.15. Бесконтактный термопреобразователь

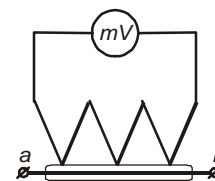


Рис. 3.16. Бесконтактный термопреобразователь с последовательным соединением элементов

Термоэлектрический прибор является, следовательно, **измерителем эффективного значения**.

Термоэлектрические приборы позволяют измерять переменные токи до высоких частот порядка сотен килгерц, хотя на частотах 2...3 МГц частотная погрешность может достигать 5...10%. На низких и средних частотах класс точности приборов обычно 1,5.

Для уменьшения теплотерь изготовляют вакуумные контактные и бесконтактные преобразователи из микропроволоки на токи полного отклонения  $I_{\sim} = 3...30$  мА.

При эксплуатации термопреобразователей следует помнить об их малой (2...3 раза) перегрузочной способности.

### 3.6. Влияние формы кривой измеряемого напряжения на показания вольтметров в зависимости от их конструкции

Шкалы вольтметров переменного напряжения градуируют в эффективных значениях синусоидального напряжения, хотя сами вольтметры по конструкции могут быть вольтметрами среднего, эффективного или амплитудного значения в соответствии со схемой преобразователя.

Шкалы импульсных вольтметров градуируют в пиковых значениях напряжения.

При измерении одного и того же несинусоидального напряжения вольтметры разных конструкций дадут разные показания. Чтобы выполнить задачу измерения – получить верный результат – в показания вольтметров надо внести поправки, зависящие от закона изменения мгновенного значения напряжения во времени. Закон изменения мгновенного значения можно установить по результатам осциллографирования измеряемого напряжения. В некоторых случаях этот закон известен заранее, тогда задача облегчается. В любом из этих вариантов должны быть получены коэффициент амплитуды и коэффициент формы для измеряемого напряжения.

Приведём последовательность вычислений для коррекции результата измерения несинусоидального напряжения, коэффициенты  $k_a$  и  $k_{\phi}$  для которого известны:

1) Измерение осуществляется *амплитудным вольтметром* со шкалой, градуированной в эффективных значениях. Результат измерения нужно умножить на  $\sqrt{2}$  – это будет величина амплитуды измеряемого напряжения. Поделив амплитуду на  $k_a$ , а затем на  $k_\phi$  получим эффективное и средневыпрямленное значения измеряемого напряжения.

2) Измерение осуществляется *вольтметром эффективных значений*, проградуированным в эффективных же значениях. Результат измерения – это непосредственно эффективное значение измеряемого несинусоидального напряжения. Умножив на  $k_a$  получим пиковое значение, поделив на  $k_\phi$  – средневыпрямленное значение.

3) Измерение осуществляется *вольтметром средневыпрямленных значений*, проградуированным в эффективных значениях. Разделив результат измерения на 1,11, получим средневыпрямленное значение измеряемого напряжения. Умножив его на  $k_\phi$  и еще раз на  $k_a$  получим эффективное и пиковое значение измеряемого напряжения.

4) Измерение осуществляется *пиковым вольтметром*, шкала которого проградуирована в пиковых значениях. Результат измерения – пиковое значение измеряемого несинусоидального напряжения. Поделив последовательно  $k_a$  и  $k_\phi$  на получим соответственно эффективное и средневыпрямленное значения измеряемого напряжения.

Пример. Пусть с помощью вольтметра средневыпрямленного значения (тестера) надо получить эффективные значения трёх напряжений:

симметричной прямоугольной формы (меандр),  $k_\phi = 1$ ,  $k_a = 1$ ;

треугольного напряжения,  $k_\phi = 1,16$ ,  $k_a = 1,73$ ;

однополярных импульсов с  $k_\phi = 0,1$ ,  $k_a = 3,16$ ,  $k_a = 3,16$ .

Пусть в каждом измерении показания вольтметра 100 В.

$$\text{Эффективное напряжение меандра } \frac{100 \text{ В}}{1,11} \cdot 1 = 90 \text{ В} .$$

$$\text{Эффективное напряжение треугольника } \frac{100 \text{ В}}{1,11} \cdot 1,16 = 104 \text{ В} .$$

$$\text{Эффективное напряжение импульсов } \frac{100 \text{ В}}{1,11} \cdot 3,16 = 284 \text{ В} .$$

## 4. ИЗМЕРЕНИЕ И РЕГИСТРАЦИЯ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ВО ВРЕМЕНИ ВЕЛИЧИН

### 4.1. Общие сведения и принцип действия осциллографа

Основным прибором для измерения мгновенных значений электрических величин является *электронный осциллограф*. Функциональная схема электронного осциллографа представлена на рис. 4.1.

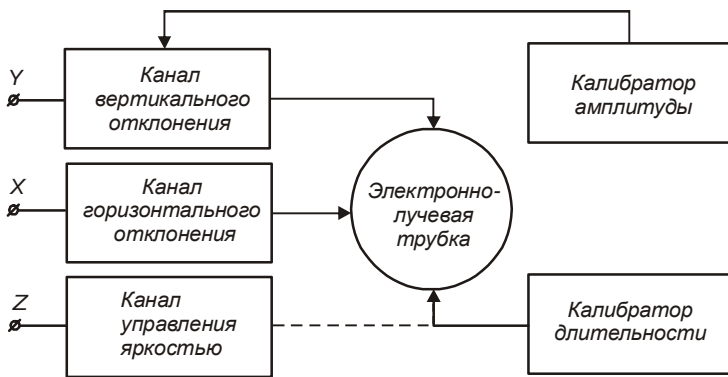


Рис. 4.1. Общая функциональная схема электронного осциллографа

В осциллографах используют главным образом электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) с электростатическим отклонением луча. Исследуемое напряжение с мгновенным значением  $u(t)$ , являющимся функцией времени, изображается на экране ЭЛТ в виде графика в прямоугольных, чаще всего линейных, координатах. Для этого на пластины, отклоняющие электронный луч в горизонтальном направлении, подается линейно-нарастающее пилообразное напряжение, которое заставляет луч отклоняться с постоянной скоростью на экране слева направо и быстро возвращаться обратно. Таким образом, расстояние, пройденное лучом на экране в горизонтальном направлении, пропорционально времени.

Одновременно исследуемое напряжение подается на вертикально-

отклоняющие пластины, следовательно, положение луча по вертикали прямо пропорционально мгновенному значению. При положительном относительно земли осциллографа мгновенном значении луч отклоняется вверх, при отрицательном – вниз, и за время действия пилообразного напряжения луч вычерчивает на экране кривую мгновенного значения во времени.

*Канал вертикального отклонения Y* (рис. 4.1) служит для преобразования сигнала с нужным масштабом для подачи его на пластины ЭЛТ вертикального отклонения. Для этого в канале имеются attenuator или делитель напряжения и усилитель. Величину коэффициента усиления обычно можно менять ступенчато и плавно.

*Канал горизонтального отклонения X* или канал развёртки и синхронизации вырабатывает пилообразное напряжение нужной частоты, которую можно регулировать ступенчато и плавно. Пилообразное напряжение можно синхронизировать во времени с исследуемым сигналом, для чего имеются органы синхронизации. В состав канала X входят генератор пилообразного напряжения, усилитель этого напряжения до уровня, достаточного для перемещения луча по горизонтали, и схема синхронизации. Довольно часто вход усилителя горизонтального отклонения выведен на внешние клеммы, что позволяет осуществлять горизонтальную развёртку луча не во времени, а в функции внешнего напряжения, подаваемого на этот вход.

*Канал управления яркостью* предназначен для передачи с внешнего входа Z сигнала, подаваемого на модулятор яркости луча ЭЛТ. В канале обычно имеется усилитель, позволяющий устанавливать желаемую яркость. В этот же канал подается сигнал калибровки горизонтального отклонения по времени от внутреннего калибратора времени осциллографа или от внешнего источника.

*Калибраторы амплитуды и длительности* чаще всего встраиваются в осциллограф. Калибратор амплитуды является амплитудным вольтметром, калибратор длительности – генератором прямоугольных импульсов с известным коэффициентом заполнения и периодом следования.

### 4.2. Развёртка изображения

След луча на экране под действием развёртывающего напряжения принято называть *развёрткой*.

Имеется несколько видов развёрток. Если развёртывающее напряжение подается на одну пару пластин ЭЛТ, обычно на горизонтально-развёртывающие пластины, то в зависимости от закона изменения этого напряжения во времени развёртку называют пилообразной (линейной), синусоидальной, экспоненциальной. Если развёртывающее напряжение подается на обе пары отклоняющих пластин ЭЛТ, её называют по форме траектории луча на экране ЭЛТ круговой, эллиптической или спиральной.

Если напряжение любой формы подается на одну пару пластин ЭЛТ, траектория луча на экране представляет собой прямую линию.

*Линейная развёртка* создается пилообразным напряжением, линейно изменяющимся во времени (рис.4.2). При минимальном развёртывающем напряжении (точка А) луч находится в крайнем левом положении горизонтальной прямой на экране. Луч перемещается слева направо с постоянной скоростью в течение времени *прямого хода*  $t_{пр}$ , в конце этого времени он достигает крайней правой точки прямой

(точка Б). В течение спада напряжения от точки Б в течение времени  $t_{обр}$  луч совершает *обратный ход* и возвращается на экране в точку А. На время обратного хода электронный луч, как правило, запирается (прерывается), так что на экране повторяется изображение при прямом ходе. Полный период колебаний развёртки  $T = t_{пр} + t_{обр} \approx t_{пр}$ , так как продолжительность обратного хода луча очень мала.

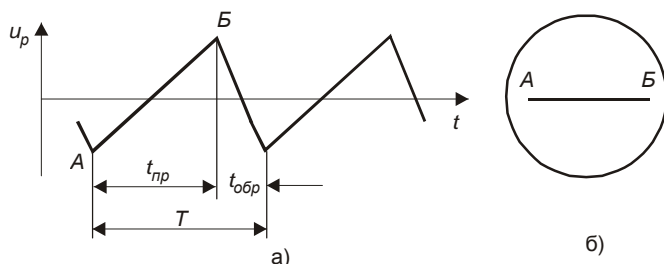


Рис. 4.2. Линейная развёртка: а) форма развёртывающего напряжения; б) линия развёртки на экране

Изображение периодического измеряемого сигнала, подаваемого на канал Y, будет неподвижным только тогда, когда период развёртывающего сигнала равен или кратен периоду измеряемого  $T_Y$ :

$$T = T_Y \text{ или } T = nT_Y,$$

где  $n$  – целое число.

Для синхронизации  $T_Y$  и  $T$  служит,

как уже указывалось, схема синхронизации.

Если  $T_Y = T$ , то, как ни мало было бы время обратного хода  $t_{обр}$ , часть кривой измеряемого напряжения придётся на время обратного хода и не изобразится на экране. Чтобы получить полное изображение одного периода измеряемого напряжения, нужно иметь на экране изображение почти двух его периодов, т.е. нужно установить период развёртки  $T = 2T_Y$ .

*Линейная ждущая развёртка* создаётся тем же генератором пилообразного напряжения, который в этом случае вырабатывает один «зубец» колебания, запускаемый либо внешним сигналом, либо от исследуемого напряжения. С помощью этого режима развёртки можно исследовать непериодические напряжения.

При круговой развёртке траектория движения луча на экране представляет собой окружность (рис.4.3а). Для её получения на обе пары пластин одновременно подают два синусоидальных напряжения одной частоты, сдвинутых на угол  $\varphi = 90^\circ$ .

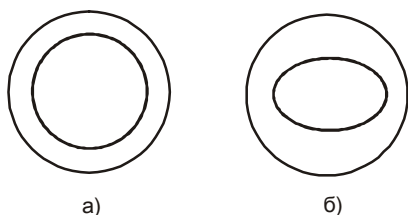


Рис. 4.3. Круговая (а) и эллиптическая (б) развёртки

$$u_X = U_{M1} \sin \omega t,$$

$$u_Y = U_{M2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = U_{M2} \cos \omega t,$$

где  $U_{M1}$  и  $U_{M2}$  - амплитуды колебаний.

Если чувствительности каналов X и Y одинаковы, а  $U_{M1} = U_{M2}$ , то на экране будет изображена окружность, если различны – эллипс (рис.4.3б).

Луч на экране совершает один оборот за время, равное периоду развёртывающего напряжения. Круговую (эллиптическую) развёртку используют для измерения временных интервалов, частоты следования импульсов и т.д., для чего соответствующие сигналы подают на вход Z или X или Y через смеситель сигналов.

### 4.3. Калибраторы

*Калибратор амплитуды* представляет собой генератор симметричных прямоугольных импульсов с частотой обычно 1 или 2 кГц и *точно известным размахом колебаний*. С высотой изображения этого напряжения сравнивается изображение измеряемого, и определяется масштаб напряжения по оси Y.

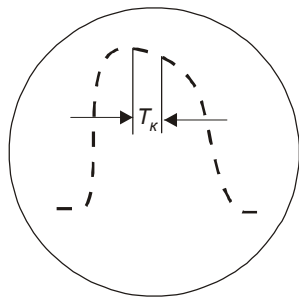


Рис. 4.4. Изображение импульса с калибровочными метками времени

*Калибратор длительности* представляет собой генератор прямоугольных импульсов с *точно известным периодом*. Его сигнал обычно подают на канал управления яркостью луча Z, в результате чего траектория луча изображается штриховой или пунктирной линией из чередующихся тёмных и светлых чёрточек (рис.4.4). Каждая пара чёрточек соответствует во времени периоду повторения калибровочных импульсов  $T_K$ .

При измерении с помощью осциллографа надо помнить, что *масштаб осциллограммы* по напряжению и по времени, указанный на шкалах переключателей масштабов по осям Y и X, *справедлив только в крайнем правом* (по часовой стрелке) *положении ручек плавной регулировки*. В противном случае масштаб должен быть установлен с помощью калибраторов.

Современный осциллограф – точный прибор. Однако при измерениях с его помощью довольно много визуальных сравнений, поэтому надо считаться с возможностью получения погрешности результатов порядка нескольких процентов.

## 5. МОСТОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ

### 5.1. Общие замечания о мостовых схемах

Мостовые измерительные схемы применяются для измерения электрических величин и электрических измерений неэлектрических величин. С помощью мостов с большой точностью измеряют активное сопротивление, индуктивность, ёмкость, угол диэлектрических потерь, частоту.

При измерениях используют два режима:

1) когда результат отсчитывается при равновесном состоянии моста; в этом случае мост называется уравновешенным или балансным, а метод измерения – нулевым;

2) когда результат измерения отсчитывается при неравновесном состоянии моста; в этом случае мост называется неуравновешенным или небалансным, а метод измерения – методом непосредственного отсчёта.

Нулевой метод может обеспечить погрешность измерения до 0,01%, метод непосредственного отсчёта, как правило, погрешность не менее 0,5%, что обычно достаточно для большинства технических измерений.

Ещё одна классификация мостов – мосты постоянного и переменного тока.

Схем измерительных мостов великое множество. Мы ограничимся здесь рассмотрением только четырёх из них, наиболее легко осуществимых в измерительной практике.

Классическим измерительным мостом является мост Уитстона.

На рис. 5.1 приведена принципиальная схема этого моста.

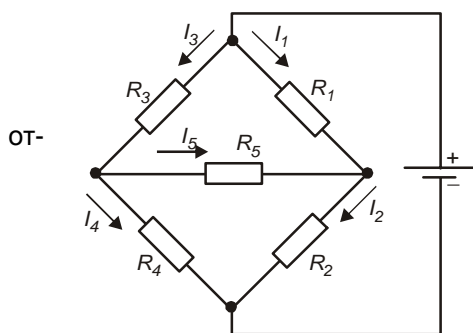


Рис. 5.1. Общая схема моста

Для верхней ветви моста можно написать

$$I_3 R_3 + I_5 R_5 - I_1 R_1 = 0,$$

куда получим ток в диагонали моста  $I_5$ :

$$I_5 = \frac{I_1 R_1 - I_3 R_3}{R_5}. \quad (5.1)$$

Аналогично для нижней ветви имеем

$$I_5 R_5 - I_4 R_4 + I_2 R_2 = 0,$$

куда

$$I_5 = \frac{I_4 R_4 - I_2 R_2}{R_5}. \quad (5.2)$$

Мост уравновешен, если мостовой ток  $I_5$  равен нулю, что реализуется, если

$$I_1 = I_2 \text{ и } I_3 = I_4.$$

Из (5.1) и (5.2) следует, что  $I_5$  будет равен нулю, если

$$\begin{aligned} I_3 R_3 &= I_1 R_1, \\ I_4 R_4 &= I_2 R_2. \end{aligned}$$

Из этих выражений следуют две формы записи условия равновесия моста:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}; \quad (5.3)$$

$$R_1 R_4 = R_2 R_3. \quad (5.4)$$

Этим уравнением описывается тот особый случай, когда все сопротивления активные. Подставив комплексные сопротивления плеч моста, получим

$$\dot{Z}_1 \dot{Z}_4 = \dot{Z}_2 \dot{Z}_3$$

или



$$|\dot{Z}_1| |\dot{Z}_4| e^{j(\varphi_1 + \varphi_4)} = |\dot{Z}_2| |\dot{Z}_3| e^{j(\varphi_2 + \varphi_3)}. \quad (5.5)$$

Отсюда следуют два условия равновесия для моста переменного тока с комплексными сопротивлениями плеч:

$$|\dot{Z}_1 \dot{Z}_4| = |\dot{Z}_2 \dot{Z}_3|; \quad (5.6)$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3. \quad (5.7)$$

Эти уравнения положены в основу уравновешивания всех мостов переменного тока.

## 5.2. Мост Вина

С помощью моста Вина можно определить неизвестную частоту, ёмкость и коэффициент потерь конденсатора.

*Измерение частоты.* Конфигурация моста Вина для измерения частоты изображена на рис.5.2. Мост уравнивается сдвоенным резистором  $R_1$  и  $R_2$ . Исходя из уравнения (5.5), получим следующее соотношение:

$$R_4 \frac{1}{\frac{1}{R_1} + j\omega C_1} = R_3 \left( R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right), \quad (5.8)$$

где  $\omega = 2\pi f_x$  - неизвестная частота.

Чтобы получить простые равенства, на практике полагают  $\frac{R_3}{R_4} = 1$  (в этой практической схеме моста

$$R_3 = R_4 = 2 \text{ кОм}).$$

Для сопряжённых комплексных величин получим:

$$\frac{R_1(1 - j\omega C_1 R_1)}{1 + (\omega C_1 R_1)^2} = R_2 - j \frac{1}{\omega C_2}.$$

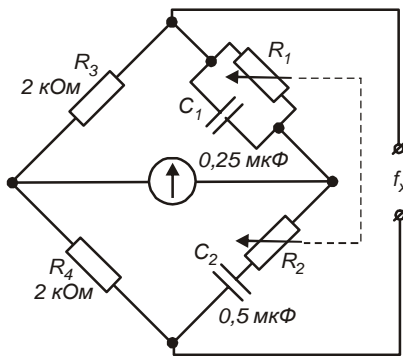


Рис. 5.2. Измерение частоты мостом Вина

Полагая при равновесии моста действительные и мнимые части попарно равными, получим:

$$\frac{R_1}{1 + (\omega C_1 R_1)^2} = R_2; \quad (5.9)$$

$$\frac{\omega C_1 R_1^2}{1 + (\omega C_1 R_1)^2} = \frac{1}{\omega C_2}. \quad (5.10)$$

Примем, что  $\omega C_1 R_1 = 1$ . Тогда из (5.10) получим

$$\frac{R_1}{2} = \frac{1}{\omega C_2} \text{ или } \omega = \frac{2}{R_1 C_2}.$$

Здесь далее есть два варианта выбора элементов моста.

1) Положим  $C_2 = 2C_1$ , тогда получим

$$\omega = \frac{1}{R_1 C_1}.$$

2) Положим  $R_1 = 2R_2$ , тогда получим

$$\omega = \frac{1}{C_2 R_2}.$$

Последний вариант положен в основу выбора элементов схемы моста, приведённого на рис.5.2, для которой опытные данные показаны на рис.5.3.

*Измерение ёмкости.* Если мост построен по рис.5.4, где переменными являются резистор  $R_1$  и конденсатор  $C_1$ , мостом возможно измерение ёмкости конденсатора  $C_x$ . Исходя из уравнения (5.10) можно записать:

$$C_2 = \frac{1 + (\omega C_1 R_1)^2}{\omega^2 C_1 R_1^2} = C_1 \frac{1 + (\omega C_1 R_1)^2}{(\omega C_1 R_1)^2}. \quad (5.11)$$

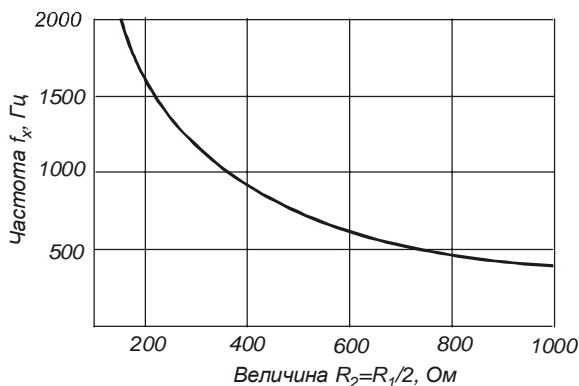


Рис. 5.3. Градуировочная кривая для измерения частоты мостом по рис. 5.2

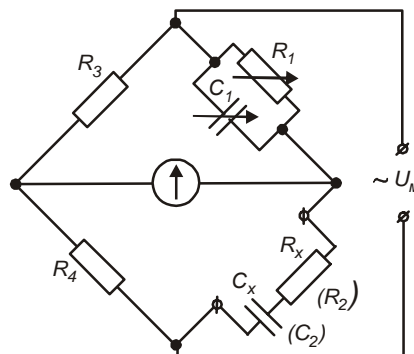


Рис. 5.4. Мост Вина в конфигурации для измерения ёмкости

При параллельном соединении  $R_1$  и  $C_1$  угол между векторами тока в конденсаторе и резисторе (угол диэлектрических потерь) определяется из соотношения:

$$\operatorname{tg} \delta_{C_1} = \frac{1}{\omega C_1 R_1} = \frac{1}{\omega C_1 R_1},$$

что удобнее записать так:

$$\omega C_1 R_1 = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_{C_1}}. \quad (5.12)$$

Тогда из (5.11) следует:

$$C_2 = C_1 (1 + \operatorname{tg}^2 \delta_{C_1}). \quad (5.13)$$

Чтобы получить возможно больший измерительный диапазон, отношение  $\frac{R_3}{R_4}$  делают изменяемым, например,

$$\frac{R_3}{R_4} = 1, 2, \dots, n.$$

В этом случае из (5.13) получаем:

$$C_2 = C_1 \frac{R_3}{R_4} (1 + \operatorname{tg}^2 \delta_{C_1}). \quad (5.14)$$

Так как в большинстве практических случаев углом диэлектрических потерь в образцовом конденсаторе  $C_1$  по сравнению с единицей можно пренебречь, выражение (5.14) можно записать в упрощённом виде:

$$C_x = C_2 \approx C_1 \frac{R_3}{R_4}. \quad (5.15)$$

### 5.3. Мост Максвелла – Вина

Быстро и просто измерить неизвестную индуктивность можно с помощью моста Максвелла – Вина (рис.5.5).

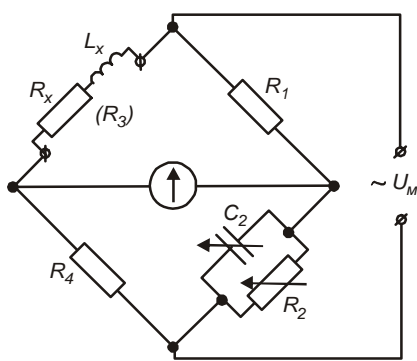
Для этой конфигурации моста имеем:

$$(R_x + j\omega L_x) \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_2} + j\omega C_2} = R_4 R_1 \quad (5.16)$$

или

$$R_x + j\omega L_x = \frac{R_4 R_1}{R_2} + j\omega C_2 R_4 R_1. \quad (5.17)$$

Приравняв порознь действительные и мнимые части уравнения (5.17), для неизвестных  $R_x$  и  $L_x$  получим уравнения:



$$R_x = \frac{R_4 R_1}{R_2}, \quad (5.18a)$$

$$L_x = R_4 R_1 C_2. \quad (5.18b)$$

Если использовать для  $R_1$  и  $R_4$  постоянные сопротивления, а переменными сделать  $C_2$  и  $R_2$ , как это показано на рис.5.5, легко определить индуктивность  $L_x$  и величину потерь  $R_x$ . Обычно для грубого уравнивания применяют  $R_1$  и  $R_4$ , изменяемые ступенчато. В качестве нуль - индикатора можно использовать телефонный капсюль, с помощью которого легко установить минимум.

Рис. 5.5. Мост Максвелла-Вина для измерения индуктивности

### 5.4. Мост Грютцмахера

Если не имеется ни образцовой индуктивности, ни образцовой ёмкости, для измерения кажущегося сопротивления неизвестных ёмкости и индуктивности можно применить мост Грютцмахера. Для измерения кажущегося сопротивления – его модуля и фазы – в этом мосте нужны только омические сопротивления. Особым преимуществом этого моста по сравнению с другими является возможность измерения этих параметров в рабочем режиме измеряемого элемента. Это необходимо, например, при измерении параметров дросселей, трансформаторов, снабжённых ферромагнитными сердечниками, индуктивность которых нелинейно зависит от рабочего тока.

*Измерение модуля.* Измерение модуля основывается на простом сравнении напряжений (рис.5.6).

Переменное напряжение питания моста  $\sim U_M$  прикладывается к мосту, и электронным вольтметром  $V$  измеряется падение напряжения на  $\dot{Z}_x$  и  $R_{обр}$ . Вольтметр последовательно переключают в позиции 1 и 2 и  $R_{обр}$  изменяют до тех пор, пока падения напряжения на  $\dot{Z}_x$  и  $R_{обр}$  не сравняются между собой. Тогда получим:

$$|\dot{Z}_x| = R_{обр}.$$

*Измерение фазового сдвига.* Схема измерения показана на рис.5.7, где величина  $R_{обр} = |\dot{Z}_x|$ , что получено из предыдущего измерения. Резистор  $R_3$  включён как делитель напряжения. Его изменяют до тех пор, пока напряжения между точками  $b$  и  $a$  сравняются с напряжениями между точками  $b$  и  $d$ , т.е.  $U_{ba} = U_{bd}$ . Для этого электронный вольтметр переключают то в положение 3, то в положение 4. Кроме того, должно быть выбрано

$$R_3 = R_2,$$

Следовательно,

$$U_{bf} = U_{eb}.$$

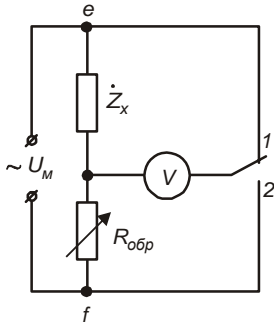


Рис. 5.6. Измерение модуля кажущегося сопротивления

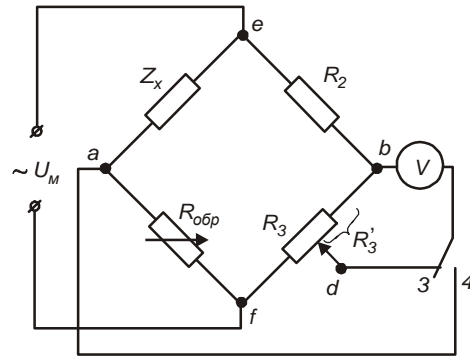


Рис. 5.7. Мост Грютцмахера для измерения угла фазового сдвига

Из векторной диаграммы, изображённой на рис.5.8, можно определить следующие соотношения.

Так как установлено  $R_{обр} = |\dot{Z}_x|$ ,

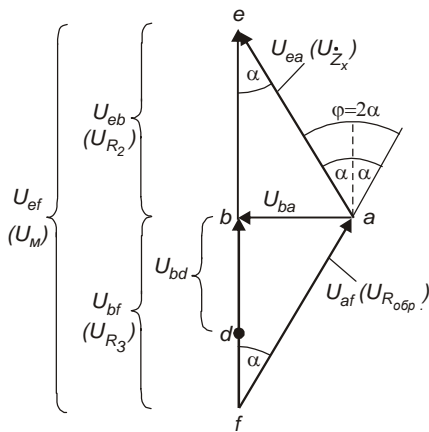


Рис. 5.8. Векторная диаграмма

$$U_{ea} = U_{af}.$$

В результате этого опыта будет получено

$$U_{ba} = U_{bd}.$$

Угол  $\varphi$  находим построением:

$$\varphi = 2\alpha.$$

Определим  $\operatorname{tg}\alpha$ :

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{U_{ba}}{U_{bf}} = \frac{U_{bd}}{U_{bf}} = \frac{U_{bd}}{U_{eb}} = \frac{R_3'}{R_2}.$$

Так как  $R_2$  – постоянный резистор, а изменяемый только  $R_3$ , его можно снабдить шкалой, отградуированной в величинах угла  $\varphi$ :

$$\varphi = 2\operatorname{arctg} \frac{R_3'}{R_2}. \quad (5.19)$$

Измерение не зависит от частоты. Индуктивность и ёмкость вычисляют по формулам:

$$L = \frac{|\dot{Z}_x| \sin \varphi}{\omega}; \quad (5.20)$$

$$C = \frac{1}{|\dot{Z}_x| \omega \sin \varphi}. \quad (5.21)$$

## 6. ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

К основным задачам измерений магнитных величин можно отнести следующие:

измерение магнитных величин (магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и пр.);

измерение характеристик магнитных материалов;

исследование электромагнитных механизмов;

изучение физико-химических свойств материалов (магнитный анализ);

определение дефектов в изделиях (магнитная дефектоскопия) и т.д.

Во многих способах измерения магнитных величин практически измеряют не магнитную, а электрическую величину, в которую в процессе измерений преобразуется магнитная величина, а магнитная величина определяется расчётным путём на основании известных зависимостей между магнитными и электрическими величинами.

### 6.1. Основные магнитные величины

Одной из основных характеристик магнитного поля является вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ , которой определяется силой  $\vec{F}$  взаимодействия магнитного поля с электрическим зарядом  $q$ , движущимся со скоростью  $\vec{v}$ :

$$\vec{F} = q(\vec{v} \cdot \vec{B}).$$

Магнитное поле характеризуется также магнитным потоком  $\Phi$ :

$$\Phi = \int_s \vec{B} ds,$$

где  $s$  – поверхность.

Ещё одна характеристика – вектор напряжённости магнитного поля  $\vec{H}$ , определяемый силой, с которой магнитное поле воздействует на движущийся заряд, с тем отличием, что вектор  $\vec{H}$  не зависит от свойств среды, в которой проявляется сила магнитного поля. Например, если магнитное поле создано контуром с током, то напряжённость поля определяется лишь геометрическими размерами контура и током в нём.

Связь между  $B$  и  $H$  определяется соотношениями:  
в вакууме

$$B = \mu_0 H;$$

в среде с относительной магнитной проницаемостью  $\mu_r$

$$B = \mu_r \mu_0 H,$$

где  $\mu_0$  - магнитная проницаемость вакуума (магнитная постоянная),

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} = 0,4\pi \cdot 10^{-4} \frac{\text{Тл} \cdot \text{см}}{\text{А}} = 0,4\pi \frac{\text{Гс} \cdot \text{см}}{\text{А}}.$$

Иногда для характеристики магнитного поля удобно пользоваться понятием «магнитный момент».

Магнитным моментом  $M_M$  контура с током называют вектор, модуль которого равен произведению площади контура и тока, а направление перпендикулярно площади контура.

Если магнитное поле создаётся намагничённым телом, то магнитный момент тела

$$\vec{M}_M = \sum \vec{M}_{Mi},$$

где  $\vec{M}_{Mi}$  - магнитный момент, создаваемый движением электронов в атоме.

Степень намагничённости определяется понятием «намагничённость»  $J$ , т.е. магнитным моментом единицы объёма тела

$$J = \frac{\vec{M}_M}{V},$$

где  $\vec{M}_M$  - магнитный момент тела;  
 $V$  - объём тела.

Для характеристики магнитного поля в среде используют три основных вектора: магнитную индукцию  $\vec{B}$ ; напряжённость магнитного поля  $\vec{H}$  и намагниченность  $\vec{J}$ . Эти три вектора связаны между собой соотношением

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J}).$$

## 6.2. Метрологические основы магнитных измерений

Магнитные измерения базируются на трёх первичных эталонах: магнитной индукции (напряжённости магнитного поля), магнитного потока, магнитного момента, и на соответствующих образцовых средствах измерений.

*Первичный эталон единицы магнитной индукции* представляет собой катушку Гельмгольца с однослойной обмоткой из голого медного провода, навитой на цилиндрический пустотелый кварцевый каркас (рис. 6.1а). Значение постоянной эталона, т.е. магнитная индукция (напряжённость поля) в центре катушки при токе её обмотки 1 А, установлено расчётным путём с погрешностью 0,001 %.

*Первичным эталоном единицы магнитного потока* являются катушки взаимной индуктивности по Кемпбеллу (рис. 6.1б). На кварцевый пустотелый цилиндрический каркас навита однослойная первичная обмотка, состоящая из двух половин, симметрично расположенных относительно центрального сечения и соединённых между собой последовательно. В центральной части укреплен кварцевый кольцевой каркас со вторичной многослойной обмоткой. Постоянная эталона, т.е. полный магнитный поток, сцепляющийся со вторичной обмоткой, при токе первичной обмотки, равном 1 А, установлена расчётным путём по измеренным геометрическим размерам катушек и числам витков обмоток с погрешностью 0,001 %.

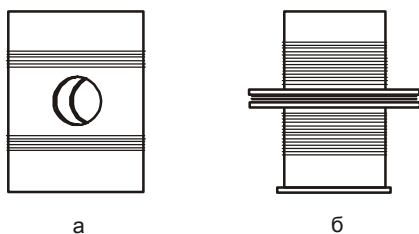


Рис. 6.1. Первичные эталоны единицы магнитной индукции (а) и магнитного потока (б) (1/5 натуральной величины)

*Первичный эталон магнитного момента* представляет собой группу из девяти штук магнитов эллипсоидальной формы. Значения магнитных моментов определены сравнением индукции поля, создаваемого магнитами, с индукцией поля от эталона единицы магнитной индукции (катушки Гельмгольца).

В качестве образцовых и рабочих мер магнитной индукции применяются, как правило, катушки различной формы с однослойными и многослойными обмотками, обтекаемыми заданными токами. Катушки без ферромагнитных сердечников по условиям теплового режима могут быть построены для создания поля с индукцией максимум 1 Тл. Для создания полей с более высокой индукцией применяют особые способы охлаждения.

## 6.3. Измерения магнитной индукции, магнитного потока и напряжённости магнитного поля

Приборы для измерения магнитных величин состоят из двух частей: измерительного преобразователя, назначение которого – преобразование магнитной величины в электрическую или механическую величину, и измерительного устройства для измерения этой электрической или механической величины. В преобразователях используют обычно следующие физические явления:

явление электромагнитной индукции;

силовое взаимодействие измеряемого магнитного поля с полем контура с током или постоянным магнитом;

внутриатомные явления.

Вторая часть прибора для измерения магнитных величин – обычно стандартный прибор для измерения электрической или механической величины.

### 6.3.1. Использование явления электромагнитной индукции

В приборах и способах, использующих явление электромагнитной индукции, измерительным преобразователем служит катушка, витки которой сцепляются с магнитным потоком – стационарная или перемещающаяся. В практике магнитных измерений такие катушки называются измерительными катушками (ИК).

ИК может иметь каркас из изоляционного материала или быть бескаркасной. Обмотка должна быть выполнена равномерной однослойной или многослойной. ИК должна иметь такую форму и размеры, чтобы с её витками сцеплялся лишь измеряемый магнитный поток. Если измерительная катушка предназначена для измерения магнитной индукции в образце, то её витки должны охватывать образец и плотно прилегать к его поверхности. Для измерения напряжённости магнитного поля на поверхности образца катушка должна быть плоской и плотно прилегать к поверхности образца. При проведении из-

мерений в однородных магнитных полях ИК может иметь большие размеры, в неоднородных магнитных полях размеры ИК должны быть минимальными для обеспечения измерений поля в данной точке.

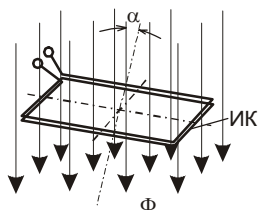


Рис. 6.2. Измерительная катушка в магнитном поле

С помощью ИК измеряют либо импульс э.д.с., либо импульс тока, которые возникают при изменении полного потока  $\Delta\psi$ , сцепляющегося с ИК, осуществляемого экспериментатором. В соответствии с этим метод называется индуктивно-импульсным, а применяемые приборы являются по существу интеграторами. По параметрам катушки и результатам измерения могут быть вычислены поток магнитной индукции  $\Phi$ , магнитная индукция  $B$  и напряжённость магнитного поля  $H$ .

Пусть однослойная ИК с поперечным сечением  $S$  и обмоткой, имеющей  $w$  витков, помещена в магнитное поле, и с ней сцепляется магнитный поток  $\Phi$  (рис. 6.2).

В общем случае для постоянного магнитного поля полный маг-

нитный поток

$$\psi = \Phi w \cdot \cos\alpha = BSw \cdot \cos\alpha = H\mu Sw \cdot \cos\alpha, \quad (6.1)$$

где  $B$  – магнитная индукция;

$H$  – напряжённость магнитного поля;

$\mu$  – абсолютная магнитная проницаемость среды, в которой действует магнитное поле;  $\mu = \mu_r \mu_0$ ;

$\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\mu_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-6}$  Гн/м;

$\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость среды;

$\alpha$  – угол между направлением вектора напряжённости магнитного поля и нормалью к плоскости катушки.

При этом предполагается, что поле однородное, и  $H$  и  $\mu$  во всех точках поверхности катушки имеют одно и то же значение.

При изменении потока  $\Phi$  в цепи контура ИК индуцируется э.д.с.:

$$e = -d\psi/dt = -w(d\Phi/dt)\cos\alpha. \quad (6.2)$$

Из выражения (6.1) следует, что изменение полного потока, сцепляющегося с контуром, можно осуществить несколькими путями, а именно, изменением: 1)  $\cos\alpha$ ; 2)  $H$  или  $S$ ; 3)  $\mu$ .

В рассматриваемом случае могут быть использованы первый и второй пути.

Возможны разные варианты изменения  $\cos\alpha$ :

скачкообразное, например, от значения  $\alpha=0$  до  $90^\circ$  или от  $\alpha=0$  до  $180^\circ$ ;

непрерывное вращение катушки со скоростью  $\omega=d\alpha/dt$ ;

периодические крутильные колебания от  $+\alpha$  до  $-\alpha$ .

Второй путь может быть реализован однократным или периодическим удалением катушки из поля или внесением её в поле при сохранении её ориентирования к направлению магнитного поля. Изменение поперечного сечения катушки  $S$  (изменение её размеров) используется исключительно редко.

Если ИК находится в однородном магнитном поле, и плотность магнитного потока, т.е. магнитная индукция  $B$ , одинакова по всему сечению  $S$ , то выражение (6.2), учитывая (6.1), можно представить в виде

$$e = -wS(dB/dt)\cos\alpha. \quad (6.3)$$

Если магнитная проницаемость среды  $\mu$  во всех точках сечения  $S$  одинакова и является постоянной величиной, не зависящей от времени, то

$$e = -wS\mu(dH/dt)\cos\alpha. \quad (6.4)$$

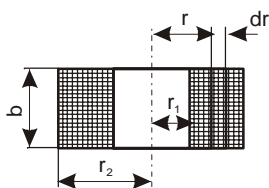


Рис. 6.3. К вычислению эффективного сечения измерительной катушки

В выражения (6.3) и (6.4) входит произведение числа витков  $w$  ИК и её сечения  $S$ . В общем случае ИК может быть многослойной, так что поперечные сечения витков такой катушки будут разные в разных слоях, и возникает вопрос, что понимать под площадью окна катушки  $S$ . Рассмотрим цилиндрическую катушку. Обозначим размеры катушки, как показано на рис. 6.3, и мысленно разделим катушку на бесконечно тонкие слои  $dr$ , параллельные её оси. Слой  $dr$ , находящийся от оси на расстоянии  $r$ , охватывает входящий в направлении оси катушки магнитный поток

$$\Phi = B \pi r^2.$$

Число витков, имеющих в этом слое, равно

$$\frac{w}{b(r_2 - r_1)} b dr = w \frac{dr}{r_2 - r_1}.$$

Следовательно, потокосцепление этого слоя

$$d\Psi = w \frac{dr}{r_2 - r_1} B \pi r^2,$$

и потокосцепление всей катушки

$$\Psi = \frac{w\pi B}{r_2 - r_1} \int_{r_1}^{r_2} r^2 dr = \frac{w\pi B}{r_2 - r_1} \cdot \frac{r_2^3 - r_1^3}{3}.$$

Сопоставив это выражение с формулой

$$\Psi = wBS,$$

находим, что эффективное сечение окна катушки

$$S = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{r_2^3 - r_1^3}{r_2 - r_1}. \quad (6.5)$$

Именно эту величину в случае многослойной катушки надо подставлять в формулы (6.3) и (6.4).

Из выражения (6.2) следует, что входной величиной ИК является магнитный поток, а при ограничениях, принятых при выводе выражений (6.3) и (6.4) – магнитная индукция или напряжённость магнитного поля.

В практике требуется измерять либо абсолютные значения  $\Phi$ ,  $B$  и  $H$ , либо их конечные изменения. В соответствии с этим и уравнения преобразования (6.2), (6.3), (6.4) необходимо представлять в таком виде, чтобы в них входили измеряемые величины.

ИК можно применять в постоянном и переменном магнитном поле. В постоянном магнитном поле при некотором конечном изменении потокосцепления  $\Delta\Psi$  за промежуток времени  $(t_2 - t_1)$ , измеряя и интегрируя э.д.с. ИК и основываясь на выражении (6.2), можно написать:

$$\Delta\Psi = w \Delta\Phi = \int_{t_1}^{t_2} e dt. \quad (6.6)$$

(Если ИК замкнута на измерительный прибор с конечным сопротивлением, и вся цепь имеет сопротивление  $R_u$ , получим

$$\Delta\Psi = R_u \int_{t_1}^{t_2} i dt = R_u Q, \quad (6.6')$$

где  $Q$  – количество электричества).

Таким образом, измеряя импульс э.д.с.  $\int_{t_1}^{t_2} e dt$  либо импульс тока  $\int_{t_1}^{t_2} i dt$ , можно определить изменение потока  $\Delta\Phi$ , а также, при отмеченных выше ограничениях, изменение магнитной индукции  $\Delta B$  или напряжённости поля  $\Delta H$ , пользуясь выражениями (6.3) и (6.4).

Для определения  $\Phi$ ,  $B$  или  $H$  необходимо, чтобы изменения этих величин были бы равны  $\Phi$ ,  $B$  и  $H$ , либо  $2\Phi$ ,  $2B$ ,  $2H$ . Очевидно, что  $\cos \alpha$  должен быть равен единице, т.е. ось катушки должна совпадать с направлением магнитной индукции и напряжённости магнитного поля. Например, при измерении магнитного потока наиболее просто реализовать два случая: 1) ИК, расположенная перпендикулярно магнитному полю, удаляется из поля, в этом случае магнитный поток изменяется от некоторого значения  $\Phi$  до нуля (естественно, ИК можно вносить в магнитное поле); 2) ИК с помощью специального устройства поворачивается на  $180^\circ$ , при этом магнитный поток изменяется от  $+\Phi$  до  $-\Phi$ . Для увеличения чувствительности можно увеличивать и  $S$ , и  $w$ . Возможность увеличения  $S$  ограничивается требованием сохранения постоянными значений  $B$  и  $H$  по сечению ИК.

Если ИК используется для измерения в периодическом переменном магнитном поле, то, основываясь на выражении (6.2), будем иметь при условии, что кривая магнитного потока симметрична и  $\Phi_{\min} = -\Phi_{\max}$ :



$$\Psi_{\text{макс}} = w\Phi_{\text{макс}} = E/(4k_{\text{ф}}f) = E_{\text{ср}}/(4f), \quad (6.7)$$

где  $\Psi_{\text{макс}}$  и  $\Phi_{\text{макс}}$  – амплитуды соответственно потокосцепления и потока;  
 $E$  – действующее значение э.д.с.;  
 $E_{\text{ср}}$  – среднее значение э.д.с.;  
 $f$  – частота;  
 $k_{\text{ф}}$  – коэффициент формы кривой.

Следовательно, измеряя действующее или среднее значение э.д.с., индуцируемой в ИК, а также частоту и коэффициент формы, можно определить амплитуды магнитной индукции и напряжённости магнитного поля, применив выражения (6.3) и (6.4).

### 6.3.2. Использование гальваномагнитных явлений

Во многих случаях для измерения постоянных и переменных магнитных полей используют преобразователь Холла. С помощью преобразователей Холла можно непрерывно измерять магнитные поля в пределах  $10^{-4} \dots 10$  Тл, а применяя магнитные концентраторы нижнюю границу можно опустить до  $10^{-6}$  Тл. Магнитные поля такого же порядка можно измерять и без магнитных концентраторов с помощью магниторезисторов.

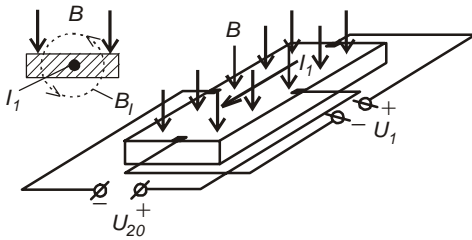


Рис. 6.4. Возникновение поперечной силы и принцип действия преобразователя Холла

Эффект Холла проявляется в том, что в проводнике или полупроводнике, выполненном в виде плоской пластинки и расположенной в магнитном поле с индукцией  $B$  перпендикулярно линиям индукции, в котором в продольном направлении течёт ток  $I_1$ , в поперечном направлении возникает э.д.с.  $U_{20}$  (рис.6.4).

Возникновение э.д.с.  $U_{20}$ , получившей название э.д.с. Холла, упрощённо можно объяснить так.

Магнитное поле, создаваемое движущимися носителями тока, складывается с приложенным внешним магнитным полем, образуя общее магнитное поле (рис.6.4 слева вверху), имеющее меньшую плотность справа от пути тока и большую слева. Это вызывает появление поперечной силы, которая искривляет пути движения носителей заряда.

Величину и направление этой силы (силы Лоренца) можно определить из векторного произведения

$$\vec{F} = e(\vec{v} \cdot \vec{B}),$$

где  $e$  – заряд носителя тока в А·с;  
 $\vec{v}$  – вектор скорости носителя тока, м/с;  
 $\vec{B}$  – вектор индукции магнитного поля, Тл.

Для определённости положим, что носителями тока являются электроны. Под действием силы Лоренца электроны отклоняются к одной из продольных граней пластинки, благодаря чему она заряжается отрицательно, а противоположная грань – положительно. Так возникает э.д.с. Холла. Процесс образования зарядов продолжается до тех пор, пока действие электрического поля э.д.с. Холла не уравновесит силу Лоренца. После этого направление движения электронов средних скоростей опять будет прямолинейным, как при отсутствии магнитного поля.

Э.д.с. холостого хода  $U_{20}$ , возникающая вследствие действия обеих управляющих величин ( $I_1$  и  $B$ ), определяется так:

$$U_{20} = \frac{R_H}{d} I_1 B = k_H I_1 B,$$

где  $R_H = \frac{1}{en}$  – постоянная Холла,  $\text{см}^3/(\text{А} \cdot \text{с})$ ;  
 $e$  – заряд электрона, А·с;  
 $n$  – концентрация носителей заряда,  $1/\text{см}^3$ ;  
 $d$  – толщина пластинки;  
 $k_H$  – константа преобразователя, мВ·м/А.

Если преобразователь Холла нагружен внешним активным сопротивлением  $R$ , то напряжение на холловских электродах определяется выражением

$$U_2 = U_{20} - I_2 R_2,$$

где  $I_2$  – ток нагрузки преобразователя;

$R_2$  – внутреннее сопротивление преобразователя между холловскими электродами.

Взаимосвязь между э.д.с. Холла и магнитным полем до магнитной индукции  $0,4 \dots 0,6$  Тл почти линейна, далее наблюдается отклонение от линейности. При  $B = 1$ Тл завал характеристики может достигать до 15%.

С преобразователя Холла, изготовленного из полупроводниковой пластинки из InAs толщиной  $0,1$  мм при управляющем токе  $I_1 = 1$ А и индукции магнитного поля  $B = 1$ Тл можно получить э.д.с. Холла  $U_{20} \approx 1$ В. Внутреннее сопротивление преобразователя составляет  $1$  Ом, снимаемая мощность сигнала около  $100$  мВт. С напылённого преобразователя Холла при номинальном управляющем токе в поле с индукцией  $B = 1$ Тл получают э.д.с. Холла от  $0,6$  В (InAs) до более  $2$  В (InSb). Внутреннее сопротивление со стороны управляющего тока лежит между  $30$  Ом (InAs) и  $1000$  Ом (InSb, напылённый на феррит).

При помещении плоской полупроводниковой пластинки с  $n$ -проводимостью в магнитное поле сопротивление пластинки возрастает. Это явление носит название эффекта магнитосопротивления (эффект Гауса), а резисторы, в которых эффект проявляется особенно сильно, носят название магниторезисторов.

Изменение сопротивления происходит вследствие того, что под влиянием силы Лоренца удлиняются пути, проходимые электронами под действием электрического поля, приложенного к пластинке. Как описано выше, сила Лоренца уравновешивается действием электрического поля Холла. Однако вследствие хаотического теплового движения электронов не все они имеют одинаковую скорость, поэтому поле Холла не может полностью скомпенсировать силу Лоренца, действующую на отдельные электроны, и траектории электронов отклоняются в ту или другую сторону от направления, параллельного боковым граням, их пути удлиняются, что эквивалентно возрастанию удельного сопротивления материала пластинки. Это изменение удельного сопротивления в магнитном поле носит название физического изменения сопротивления. Зависимость удельного сопротивления от магнитной индукции определяется выражением

$$\frac{\rho_B - \rho_0}{\rho_B} = A k_p (\mu B)^n,$$

где  $\rho_0$  – удельное сопротивление материала в отсутствие магнитного поля, Ом·м;

$\rho_B$  – то же в поле с индукцией  $B$ , Ом·м;

$k_p$  – коэффициент, зависящий от свойств полупроводникового материала; для InSb  $k_p = 0,38$ ;

$A$  – коэффициент, зависящий от формы пластинки преобразователя;

$\mu$  – подвижность носителей заряда, (м/с)/(В/м).

В слабых магнитных полях при  $\mu B \leq 1$  показатель степени  $n \approx 2$ , в сильных полях при  $\mu B \gg 1$  обычно  $1 \leq n \leq 2$ .

Если пластинку сделать такой, чтобы её длина была значительно меньше её ширины, то поле Холла оказывается ослабленным за счёт шунтирующего действия токовых электродов, благодаря чему сила Лоренца оказывается скомпенсированной неполностью, и изменение удельного сопротивления становится больше. Этот эффект добавляется к эффекту физического изменения сопротивления. Результирующее изменение сопротивления магниторезистора описывается тогда выражением

$$\frac{R_B}{R_0} = \frac{\rho_B}{\rho_0} k_r,$$

где  $k_r$  – величина, зависящая от геометрии пластинки и величины магнитной индукции.

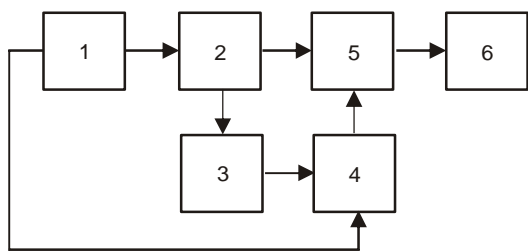


Рис. 6.5. Тесламер непосредственного измерения

Включив последовательно много таких коротких пластинок, можно получить  $k_r$  до  $10 \dots 15$ .

Зависимость сопротивления магниторезистора от магнитной индукции вначале до некоторого значения индукции квадратичная, а далее практически линейная. Сопротивление в отсутствие магнитного поля лежит в пределах  $10$  Ом ...  $10$  кОм. Температурный коэффициент сопротивления обычно лежит в пределах  $-4 \cdot 10^{-3} \dots -25 \cdot 10^{-3}$  1/°С и увеличивается с ростом магнитной индукции.

Структурная схема тесламера постоянного поля непосредственного измерения с усилением приведена на рис.6.5. Источник стабилизированного напряжения 1 питает генератор 2 стабильного по амплитуде переменного напряжения. Это напряжение подаётся на преобразователь Холла 3, выходное напряжение преобразователя усиливается усилителем 4 и после выпрямления демодулятором 5 управляет отсчётным устройством 6, градуированным в единицах измеряемого магнитного поля. Нижний предел из-

мерения тесламетров, построенных по такой схеме, составляет  $10^{-5}$  Тл на шкалу. При отсутствии термостабилизации преобразователя Холла погрешность доходит до  $\pm 2\%$ .

Для измерения магнитной индукции, особенно малых её значений, используют магниторезисторы обычно в мостовой схеме включения. На рис.6.6а изображена соответствующая мостовая схема. В этом случае используется свойство характеристики магниторезистора сохранять симметрию ветвей при изменении направления магнитного поля (рис.6.6б). Внешними смещающими магнитными полями  $+B_{CM}$  и  $-B_{CM}$  при  $B_x = 0$  сопротивлении магниторезисторов устанавливаются на линейных участках характеристики. При наложении измеряемого поля  $B_x$  сопротивление одного магниторезистора уменьшается, а другого увеличивается, что вызывает разбаланс моста. Схема применима и при постоянном, и при переменном магнитном поле  $B_x$ .

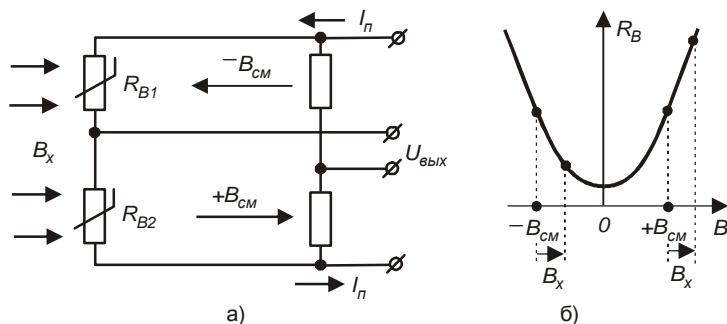


Рис. 6.6. Измерение магнитной индукции с помощью магниторезисторов

## 6.4. Измерение характеристик магнитных материалов

### 6.4.1. Статические и динамические характеристики.

Статические характеристики получают в постоянных или квазипостоянных магнитных полях. На них влияют магнитные свойства самого материала и технология изготовления изделия. Магнитный материал в отсутствие внешнего магнитного поля может иметь суммарный вектор намагниченности равным нулю, хотя отдельные его области могут быть намагничены до насыщения. Если же его поместить во внешнее магнитное поле, векторы намагниченности отдельных областей повернутся в направлении приложенного поля, и в целом материал станет источником дополнительного поля.

Динамические характеристики получают в переменных магнитных полях. Они зависят не только от свойств самого материала, но и от его формы, частоты и формы кривой переменного магнитного поля и т.д. Поэтому динамические характеристики являются характеристиками изделия, а не только материала. На эти характеристики влияют вихревые токи, магнитная вязкость, потери за счёт явлений гистерезиса, амплитуды намагничивающего поля и пр.

### 6.4.2. Кривые намагничивания.

Основными характеристиками магнитного материала являются зависимость  $J = f(H)$  или  $B = f(H)$ , получаемые экспериментально.

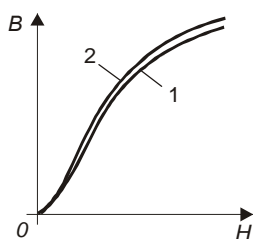


Рис. 6.7. Начальная 1 и основная 2 кривые намагничивания

Намагниченность магнитного материала зависит как от существующей в данный момент напряжённости магнитного поля  $H$ , так и от предшествующих её значений (как говорят, от «магнитной предыстории» материала). Для исключения многозначности зависимости  $J = f(H)$  эту зависимость относят к начальному состоянию материала, за которое принимают его полную размагниченность, т.е. когда  $H = 0$  и  $J = 0$ . Для достижения этого состояния материал должен быть нагрет до температуры выше точки Кюри, а затем охлаждён в отсутствие магнитного поля  $H$ .

Кривую намагничивания ферромагнитного материала можно получить разными способами.

Если рассматривать кривую намагничивания как кривую постепенного изменения состояния материала при плавном увеличении напряжённости намагничивающего поля, начиная от нуля, то получим кривую, называемую *нулевой кривой намагничивания* (иначе: характеристикой начального намагничивания или начальной кривой намагничивания).

Кривую намагничивания можно рассматривать как геометрическое место вершин гистерезисных циклов при постепенном увеличении напряжённости поля. Такая кривая намагничивания носит название *основной кривой намагничивания* (иначе: коммутационной кривой намагничивания).

Разницей между этими кривыми в большинстве случаев можно пренебречь (рис.6.7).

### 6.4.3. Петля гистерезиса

Процесс намагничивания материала, за исключением начальной и конечной областей изменения напряжённости магнитного поля  $H$ , является необратимым.

Если предварительно размагниченный образец намагничивать монотонно возрастающим магнитным полем  $H$ , то его состояние будет изменяться по кривой  $Oa$  (рис.6.8). При убывании поля от  $H_{\text{макс}}$  до нуля индукция в образце станет изменяться не по кривой  $Oa$ , а по кривой  $ab$ . Если в ту же сторону изменить  $H$  и увеличить напряжённость поля до  $-H_{\text{макс}}$ , то магнитное состояние образца будет изменяться по кривой  $бвz$ . При возрастании поля от  $-H_{\text{макс}}$  до  $+H_{\text{макс}}$  индукция в образце будет изменяться по кривой  $zdea_1$ . Кривая изменения магнитного состояния образца при изменении намагничивающего поля от  $+H_{\text{макс}}$  до  $-H_{\text{макс}}$  и обратно называется петлей гистерезиса, причём симметричной, так как  $|+H_{\text{макс}}| = |-H_{\text{макс}}|$ .

Петля гистерезиса на рис.6.8. является неустановившейся, незамкнутой. Лишь после многократного изменения намагничивающего поля (5 ... 10 раз) от  $-H_{\text{макс}}$  до  $+H_{\text{макс}}$  петля гистерезиса становится замкнутой. Каждому значению намагничивающего поля  $|H_{\text{макс}}|$  соответствует своя частная петля гистерезиса. Только после увеличения  $|H_{\text{макс}}|$  до индукции насыщения  $|B_s|$  ширина петли уже не изменится (рис.6.9), растут лишь её бесгистерезисные участки («усы»). Точки пересечения этой предельной петли гистерезиса с осями координат называются коэрцитивной силой  $H_c$  («с» от coercitio – удерживание) и остаточной индукцией  $B_r$  («r» от remanent – остаточный).

Ширина петли гистерезиса характеризует потери на перемагничивание материала. Величина  $B_r$  и  $H_c$  приводятся в справочниках по магнитным материалам.

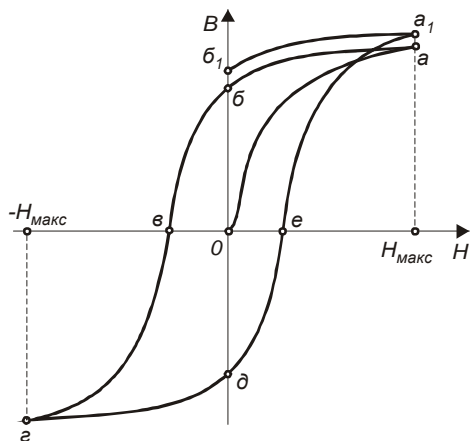


Рис. 6.8. Неустановившийся гистерезисный цикл

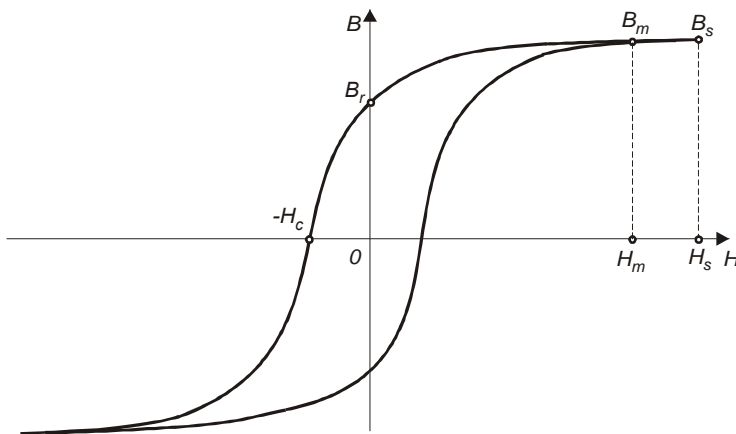


Рис. 6.9. Предельная петля гистерезиса

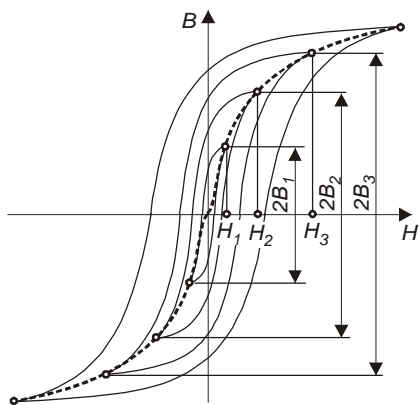


Рис. 6.10. Получение основной кривой намагничивания

*Основная (коммутационная) кривая намагничивания.* Как уже сказано, кривую намагничивания можно получить как геометрическое место вершин частных петель гистерезиса при постоянном увеличении  $|H_{\text{макс}}|$ . Практическая разница между начальной кривой намагничивания и основной кривой намагничивания невелика, однако получение основной кривой намагничивания проще, и результат меньше зависит от условий опыта, поэтому её используют чаще начальной кривой намагничивания.

Способ получения основной кривой намагничивания иллюстрируется на рис.6.10. Здесь нужно иметь в виду сказанное о рис.6.8, а именно, прежде чем при выбранном промежуточном значении  $|H_{\text{макс}}|$  отсчитать соответствующее вершине гистерезисного цикла значение максимальной магнитной индукции, необходимо провести магнитную подготовку, переключив несколько раз (5 ... 10 раз) напряжённость магнитного поля от  $+H_{\text{макс}}$  до  $-H_{\text{макс}}$  и обратно.

#### 6.4.4. Практическое получение кривых намагничивания.

Рассмотренные характеристики относятся к характеристикам материала, при их определении магнитная цепь должна быть замкнута, лучше всего если образец имеет форму кольца с эллипсообразным, круглым или прямоугольным поперечным сечением. Магнитопровод снабжается двумя обмотками (рис.6.11): намагничивающей обмоткой  $w_1$ , равномерно распределённой вдоль всего кольца, и однослойной измерительной обмоткой  $w_2$ , возможно более плотно положенной на сердечник, которая может быть как равномерно распределённой вдоль кольца, так и сосредоточенной. В таком кольцевом магнитопроводе напряжённость магнитного поля  $H$  одинакова вдоль всей окружности кольца

$$H = \frac{Iw_1}{\pi D}, \text{ A/м}$$

где  $D$  – средний логарифмический диаметр кольца,  $D = \frac{D_H - D_\epsilon}{\ln \frac{D_H}{D_\epsilon}}$ ;

$D_H, D_\epsilon$  – соответственно наружный и внутренний диаметры кольца.

В большинстве случаев в качестве  $D$  можно принять средний диаметр кольца  $D_{cp}$ :

$$D_{cp} = \frac{D_H + D_\epsilon}{2}.$$

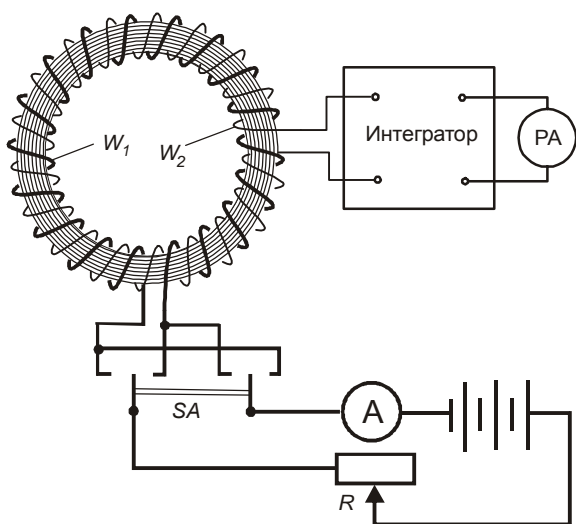


Рис.6.11 .Схема для испытания кольцевого образца

Разность наружного и внутреннего диаметров должна быть мала по сравнению со средним диаметром, чтобы разница в напряжённостях поля у наружного и внутреннего диаметров кольца была незначительной, и можно было приближённо считать индукцию  $B$  равномерной по сечению кольца. Но кольцо не должно быть и очень тонким, иначе будет существенным влияние механической обработки краёв кольца. При исследовании свойств материала при его производстве обычно средний диаметр кольца берётся раз в десять большим радиальной толщины кольца, а последняя берётся не менее 3 см.

Начальная кривая намагничивания может быть определена по способу последовательного изменения напряжённости магнитного поля (рис.6.12) путём увеличения тока в намагничивающей обмотке  $w_1$ . После размагничивания образца намагничивание увеличивается последовательными скачками тока от 0 до  $H_{\text{макс}}$ . ( $0 < H_1 < H_2 < \dots < H_{\text{макс}}$ ), и измеряются соответствующие приращения магнитной индукции в образце  $\Delta B$  и результирующее значение  $B$  на каждом шаге ( $0 < B_1 < B_2 < \dots < B_{\text{макс}}$ ).

Во время опытов нельзя ни прерывать ток в обмотке  $w_1$ , ни уменьшать его, так как после такого нарушения характера изменения  $H$  нельзя будет вернуться на начальную кривую намагничивания, и опыты придётся начинать сначала после полного размагничивания образца.

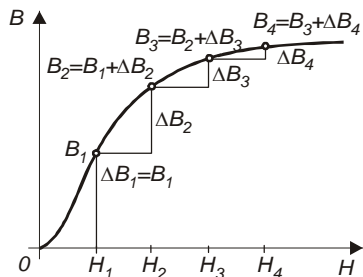


Рис. 6.12. Способ последовательного изменения напряжённости поля

После каждого изменения тока в обмотке  $w_1$  на величину  $\Delta I$  и соответствующего этому изменения напряжённости магнитного поля на величину  $\Delta H = \frac{w_1}{\pi D} \Delta I$  напряжение на выходе интегратора изменится на величину

$$\Delta U = \frac{1}{T_u} \int e dt ,$$

где  $T_u$  – постоянная времени интегратора, и приращение магнитной индукции составит

$$\Delta B = \frac{T_u}{w_2 S} \Delta U,$$

где  $\Delta B$  – приращение магнитной индукции, Тл;  
 $w_2$  – число витков измерительной обмотки;  
 $S$  – площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>.  
 $\Delta U$  – изменение напряжения на выходе интегратора, В.

Для увеличения точности измерений, чтобы полнее использовать шкалу прибора РА, целесообразно после каждого измерения индукции сбрасывать выходное напряжение интегратора на нуль, а значение индукции в каждой точке вычислять, как показано на рис.6.12.

Для определения основной кривой намагничивания вначале магнитопровод размагничивается. Затем устанавливается намагничивающий ток обмотки  $w_1$  для получения напряжённости поля  $H_1$  (рис.6.10). Для получения установившегося гистерезисного цикла производится магнитная подготовка, заключающаяся в том, что с помощью переключателя SA (рис.6.11) 5 ... 10 раз меняется направление тока. По окончании подготовки выход интегратора сбрасывается на нуль. Пусть переключатель SA при этом был в положении, соответствующем напряжённости поля  $H_1$ . Теперь переключателем меняется направление тока на противоположное, соответствующее напряжённости поля  $-H_1$ . Это соответствует изменению магнитной индукции  $\Delta B = 2B_1$ , что вызывает на выходе интегратора появление напряжения  $\Delta U$ . Индукция  $B_1$  в рассматриваемой точка вычисляется по формуле

$$B = \frac{T_u}{2w_2 S} \Delta U.$$

Для получения следующей точки нужно увеличить ток, устанавливающий напряжённость поля  $H_2$ , произвести магнитную подготовку, произвести переключение полярности  $H_2$  и вычислить  $B_2$  как указано выше.

Аналогичным способом можно получить точки, характеризующие петлю гистерезиса. Точки определяются путём ступенчатого уменьшения тока от максимального положительного, соответствующего  $+H_s$ , вначале до нуля, а затем до максимального отрицательного значения с отсчётами соответствующих изменений напряжения на выходе интегратора и расчёте изменений  $\Delta B$ . Так как петля гистерезиса симметрична относительно начала координат, вторую ветвь петли можно получить графически.

Как уже сказано, для размагничивания образца следует нагреть его выше точки Кюри, что не всегда возможно. В таких случаях производят размагничивание постоянным током в той же установке по рис.6.11. Для этого сначала через обмотку  $w_1$  пропускают ток такой величины, чтобы напряжённость поля с гарантией была больше  $H_c$ . Затем многократно переключают направление тока, постепенно уменьшая его вплоть до нуля. Для получения надёжного размагничивания перед каждым уменьшением тока производят магнитную подготовку при предыдущем значении тока.

Более простым способом является способ размагничивания переменным током с частотой 50 Гц, подаваемым в обмотку  $w_1$ , с постепенным уменьшением тока вплоть до нуля.

#### 6.4.5. Динамические характеристики магнитных материалов

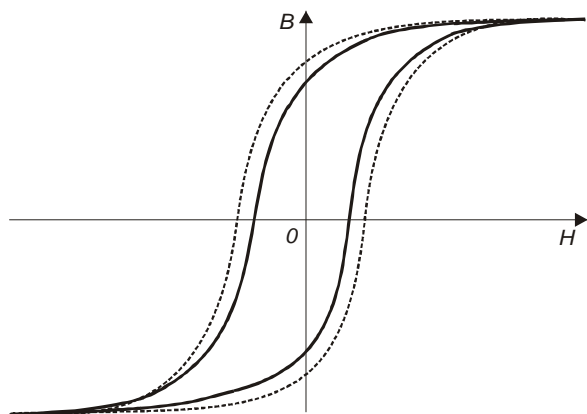


Рис. 6.13. Предельная петля гистерезиса (сплошные линии) и динамическая петля перемагничивания (штриховые линии)

В процессе перемагничивания магнитных материалов при быстром изменении напряжённости поля возникает петля перемагничивания, похожая на петлю гистерезиса, полученную в статическом магнитном поле, но шире последней (рис.6.13). В отличие от статической петли площадь петли динамического перемагничивания пропорциональна не только потерям на гистерезис, но и потерям от вихревых токов, а также потерям энергии вследствие наличия магнитной вязкости материала. Форма динамической петли зависит для данного материала от удельного сопротивления, от толщины листов в магнитопроводе, от величины индукции и от частоты. При высоких значениях индукции изменяется форма носика петли, он из острого постепенно превращается в закруглённый.

Для ферритов, электротехнических холоднокатаных текстурованных сталей и некоторых пермаллоев частота 50 Гц достаточно низка, чтобы считать динамическую петлю перемагничива-

ния близкой к статической петле гистерезиса и получать из неё основные параметры сердечников с точностью, достаточной для выполнения большинства инженерных расчётов.

Динамические параметры магнитопроводов проще всего получить с помощью амперметра эффективных значений и двух вольтметров – амплитудного и средневыпрямленного значения (рис.6.14). Благодаря включению в цепь намагничивающей обмотки  $w_1$  переменного резистора  $R$  динамические параметры можно снимать в двух режимах намагничивания магнитопровода.

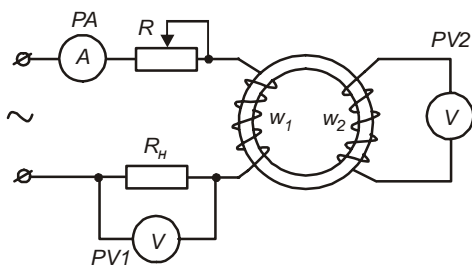


Рис. 6.14. Схема для определения динамических характеристик с помощью вольтметра и амперметра

При питании обмотки синусоидальным напряжением при большой величине сопротивления резистора  $R$  ток обмотки и напряжённость магнитного поля в магнитопроводе будут синусоидальны. Максимальное значение напряжённости поля  $H_m$  будет равно:

$$H_m = k_a I \frac{w_1}{\pi D}, \text{ А/м,}$$

где  $I$  – эффективное значение тока в обмотке  $w_1$ , А;

$k_a = \sqrt{2}$  – коэффициент амплитуды для синусоиды;

$D$  – средний логарифмический или средний диаметр кольца, м.

При сопротивлении  $R = 0$  синусоидальной будет индукция  $B$  в образце. Для определения  $H_m$  измеряют пиковое значение тока в обмотке вольтметром амплитудных значений  $PV1$  по падению напряжения на резисторе  $R_H$ , и  $H_m$  вычисляют по формуле

$$H_m = \frac{U_m}{R_H} \cdot \frac{w_1}{\pi D}, \text{ А/м,}$$

где  $U_m$  – пиковое значение падения напряжения на резисторе  $R_H$ .

Магнитная индукция  $B_m$  в обоих случаях определяется по средневыпрямленному значению э.д.с. на обмотке  $w_2$ , измеряемому вольтметром средневыпрямленных значений  $PV2$ :

$$B_m = \frac{E_{2cp.}}{4fw_2S} \approx \frac{U_{2cp.}}{4fw_2S}, \text{ Тл,}$$

где  $U_2$  – показания вольтметра, В;

$f$  – частота, Гц;

$S$  – площадь поперечного сечения магнитопровода, м<sup>2</sup>.

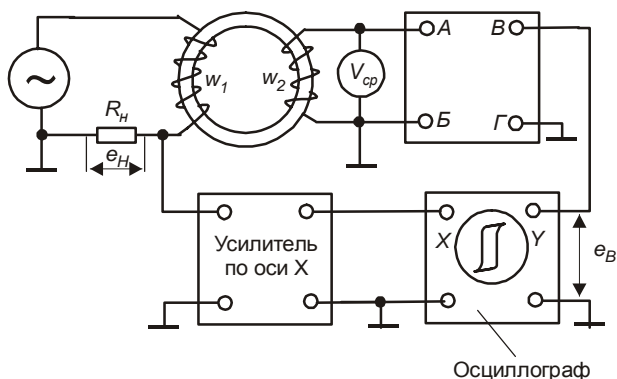


Рис. 6.15. Схема для получения динамической петли перемагничивания на экране осциллографа

Изменяя намагничивающий ток и соответствующие ему значения  $H_m$  и  $B_m$ , можно построить зависимость  $B_m = f(H_m)$ , аналогичную основной кривой намагничивания.

Более нагляден и прост в осуществлении осциллографический способ получения динамической петли перемагничивания. Для его осуществления на горизонтальные пластины осциллографа подают напряжение, пропорциональное мгновенному значению  $H_t$ , а на вертикальные – мгновенному значению  $B_t$  (рис.6.15). В этой схеме для получения мгновенного значения  $H_t$  в цепь обмотки  $w_1$  включено малое измерительное сопротивление  $R_H$ , так что изменение напряжённости поля в магнитопроводе будет несинусоидально, а индукция синусоидальна. Напряжение  $e_H$  определяется формулой

$$e_H = \frac{\pi D R_H}{w_1} \cdot H_t = K_1 H_t,$$

где  $H_t$  – мгновенное значение напряжённости магнитного поля, А/м;

$w_1$  – число витков намагничивающей обмотки.

Мгновенное значение напряжения  $e_B$ , пропорциональное мгновенному значению магнитной индукции  $B_t$ , подаваемого на вертикальные пластины, получается в результате интегрирования напряжения на измерительной обмотке  $w_2$  :

$$e_B = \frac{1}{T_u} \int e_{w_2} dt = -\frac{1}{T_u} \int w_2 S \frac{dB}{dt} = -\frac{w_2 S}{T_u} B_t = -K_2 B_t,$$

где  $T_u$  – постоянная времени интегратора, с;

$e_{w_2}$  – мгновенное значение напряжения на обмотке  $w_2$ , В;

$w_2$  – число витков измерительной обмотки;

$S$  – площадь поперечного сечения кольца, м<sup>2</sup>;

$B_t$  – мгновенное значение магнитной индукции, Тл.

Для расшифровки осциллограммы отклонения луча на экране осциллографа следует откалибровать из следующих соображений.

Подадим на вход усилителя горизонтального отклонения вместо напряжения  $e_H$  напряжение прямоугольной формы с размахом  $U_K$ . Пусть длина изображения этого напряжения по горизонтали на экране осциллографа составит  $L_K$ . Тогда масштаб напряжённости магнитного поля по горизонтали при данной регулировке чувствительности по  $X$  составит

$$m_H = \frac{U_K}{K_1 L_K} \frac{A/M}{MM}.$$

Ширина изображения петли перемагничивания по горизонтали от носика до носика  $L_H$  пропорциональна удвоенному значению максимальной напряжённости магнитного поля  $H$  в данном опыте, откуда получаем напряжённость поля, соответствующую носику:

$$H = m_H \cdot \frac{L_H}{2} = U_K \cdot \frac{w_1}{\pi D R_H} \cdot \frac{L_H}{2 L_K}, \text{ A/M.}$$

Максимальное значение магнитной индукции  $B$  в данном опыте определим по показаниям вольтметра средневыпрямленных значений  $V_{cp}$ :

$$B = \frac{U_{cp}}{4 f w_2 S}, \text{ Тл.}$$

Высота изображения петли перемагничивания по вертикали от носика до носика  $L_B$  пропорциональна удвоенному значению максимальной индукции в опыте, откуда при данной регулировке чувствительности осциллографа по  $Y$  получаем масштаб изображения индукции

$$m_B = \frac{2B}{L_B} = \frac{U_{cp}}{2 f w_2 S L_B}, \frac{\text{Тл}}{\text{мм}}.$$

Изменяя максимальное значение напряжённости поля, получаем ряд петель перемагничивания, по носикам которых можно построить зависимость  $B_m = f(H_m)$ , аналогичную показанной на рис.6.10.

На рис.6.16 приведена практическая схема интегратора, применяемого в описанных способах измерения параметров магнитопроводов.

Когда размер кольца магнитопровода достаточно велик, чтобы разместить на нём обмотку  $w_2$  с большим числом витков, и, следовательно, получить большое напряжение, можно использовать упрощённую измерительную схему, в которой интегрирование осуществляется простой RC-цепью (рис.6.17).

Если удовлетворено условие, что сопротивление конденсатора  $C_\phi$  пренебрежимо мало по сравнению с  $R_\phi$  на всех частотах сигнала, и сопротивление нагрузки очень велико, что имеет место на входе осциллографа, то напряжение на конденсаторе, приложенное к каналу вертикального отклонения,  $e_{C_\phi}$  равно:

$$e_{C_\phi} \approx \frac{1}{R_\phi C_\phi} \int e_{w_2} dt = -\frac{w_2 S}{R_\phi C_\phi} B_t,$$

т.е. пропорционально мгновенному значению индукции  $B_t$ , как и в схеме по рис.6.15.

Практика измерений показывает, что вполне удовлетворительные результаты получаются при выборе элементов согласно следующим условиям:



$$R_{\phi} C_{\phi} \geq \frac{100}{f} \quad \text{и} \quad R_{\phi} \geq \frac{100}{2\pi f C_{\phi}},$$

где  $f$  – частота напряжения источника питания.

Калибровка осей напряжённости и индукции на осциллограмме производится так же, как в схеме по рис.6.15, масштабы по осям вычисляются по тем же формулам.

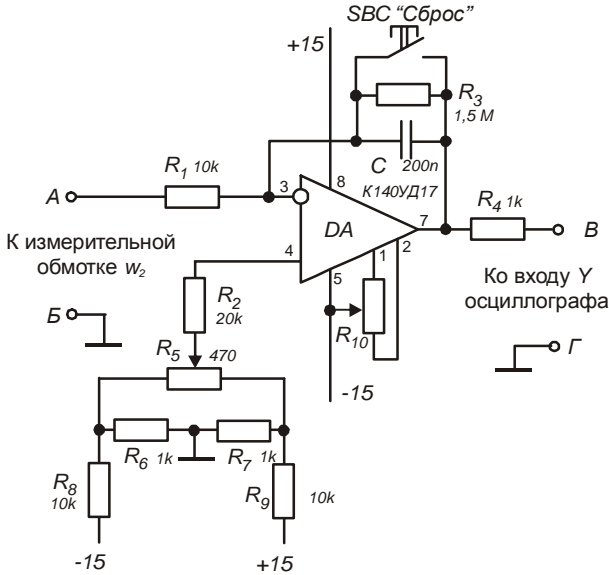


Рис. 6.16. Интегратор

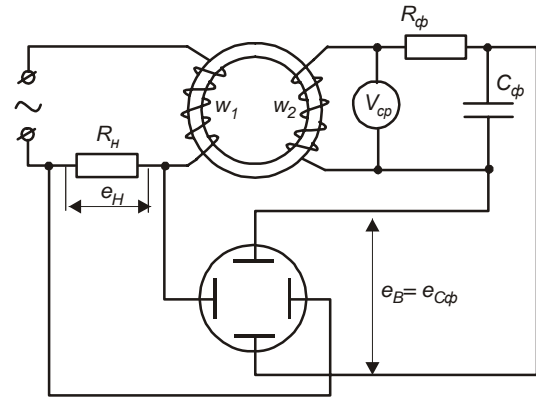


Рис. 6.17. Упрощённая схема установки для получения динамической петли перемагничивания на экране осциллографа

Считается, что осциллографическим способом можно получить динамические петли перемагничивания в частотном диапазоне до 100 кГц. Для уменьшения погрешности в определении  $H_t$  надо выполнять условие  $i_2 w_2 \ll i_1 w_1$ , т.е. иметь высокоомную нагрузку  $w_2$ . Для уменьшения погрешности в определении  $B_t$  надо обмотку  $w_1$  выполнять возможно тщательнее, равномерно распределяя обмотку по кольцу и добиваясь минимального зазора между обмоткой и магнитопроводом, чтобы уменьшить индуктивность рассеяния. Обмотку  $w_2$  лучше укладывать между витками обмотки  $w_1$  и тоже очень плотно на магнитопровод.

#### 6.4.6. Параметры статической характеристики

По кривым намагничивания можно найти статические параметры, характеризующие наклон разных участков её статической характеристики – магнитную проницаемость.

Для описания статических характеристик используют относительную магнитную проницаемость в данной точке  $\mu_{rA}$ , дифференциальную магнитную проницаемость  $\mu_{\partial}$ , начальную магнитную проницаемость  $\mu_{нач}$  и максимальную магнитную проницаемость  $\mu_{макс}$ .

На рис.6.18 сделаны все построения для определения перечисленных магнитных проницаемостей.

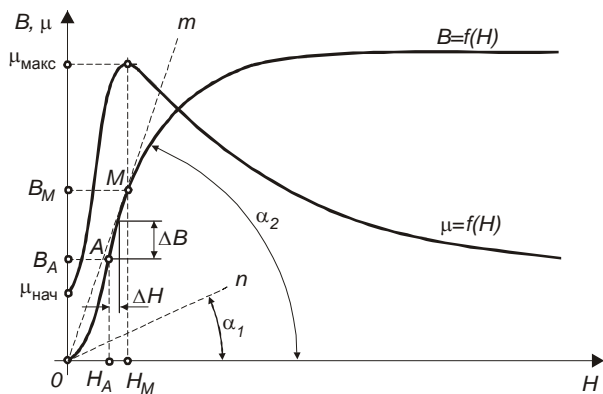


Рис. 6.18. Начальная кривая намагничивания  $B=f(H)$  и кривая магнитной проницаемости  $\mu=f(H)$

В точке А магнитная проницаемость  $\mu_{rA}$  определяется как тангенс угла наклона кривой  $B = f(H)$  к оси напряжённости поля  $H$ :

$$\mu_{rA} = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_A}{H_A},$$

а дифференциальная проницаемость в этой точке А при  $\Delta H \rightarrow 0$  как

$$\mu_{\partial A} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H}.$$

Начальная и максимальная проницаемости

определяются так:

начальная проницаемость в начальном участке кривой  $B = f(H)$

$$\mu_{нач.} = \frac{1}{\mu_0} \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H} = \frac{1}{\mu_0} \operatorname{tg} \alpha_1;$$

максимальная проницаемость в точке М перегиба кривой  $B = f(H)$

$$\mu_{макс.} = \frac{1}{\mu_0} \operatorname{tg} \alpha_{макс.} = \frac{1}{\mu_0} \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_M}{H_M}.$$

Наибольшую величину  $\mu_{д макс.}$  дифференциальной магнитной проницаемости определяют не по основной кривой намагничивания, а по ветви петли гистерезиса:

$$\mu_{д макс.} = \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{dB}{dH} \right)_{H=H_c} \cong \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\Delta B}{\Delta H} \right)_{H=H_c}.$$

Для материалов с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ) дополнительно определяют коэффициент прямоугольности  $\alpha_n$ :

$$\alpha_n = \frac{B_r}{B_m}.$$

Коэффициент прямоугольности обычно определяют при  $H_m = 5H_c$ .

К материалам с ППГ относят такие, у которых  $\alpha_n \geq 0,85$ .

При значениях  $H_m$ , в 5 ... 10 раз и более превышающих  $H_c$ , характеристики  $B = f(H)$  практически имеют линейный характер. Поэтому среднее значение дифференциальной магнитной проницаемости в зоне насыщения рассчитывают по формуле

$$\mu_{\Delta} = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_m - B_r}{H_m}.$$

Для того чтобы получить представление о порядке величин, характеризующих магнитные материалы, данные о некоторых материалах приведены в таблице.

Таблица  
Ориентировочные значения параметров некоторых магнитномягких материалов

Марка материала сердечника	Относительная магнитная проницаемость		Козрцитивная сила $H_c$ , А/м	Индукция насыщения $B_s$ , Тл
	$\mu_{нач.}$	$\mu_{макс.}$		
Э310	500...1000	15000...20000	16	2,0
65НП	500...1200	300000...400000	0,8	1,35
79НМ	20000...40000	80000...110000	1,6...2,4	0,75...0,83
1000НН	1000	3300	20	0,32
ГМ414	40000	700000	0,5	1,0

Для получения характеристик магнитных материалов применяют, естественно, стандартные приборы – пермеаметры, использующие в качестве интеграторов баллистический гальванометр или флюксметр, приборы для определения потерь на гистерезис и токи Фуко, индукционные приборы для определения зависимости  $B_{макс.} = f(I)$  и др.

## 7. ИЗМЕРЕНИЕ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

При электрических измерениях неэлектрических величин измеряемая неэлектрическая величина через специальный *преобразователь* (ранее был принят термин «датчик») воздействует на электрическую схему. В этой схеме изменяется какой-либо электрический параметр, измеряемый электрическим прибором, шкала которого градуируется в единицах неэлектрической величины. Пример – измерение температуры термопарой с милливольтметром в качестве указателя, шкала которого отградуирована не в милливольтгах, а в градусах Цельсия.

Следовательно, преобразователь преобразует измеряемую неэлектрическую величину  $X$  в электрическую выходную величину  $Y$ . Зависимость

$$Y = f(X)$$

называется *функцией преобразования* данного преобразователя.

Чувствительностью преобразователя называется величина

$$S = \frac{\partial Y}{\partial X}.$$

В зависимости от вида функции преобразования чувствительность может быть постоянной величиной (функция преобразования линейна), либо переменной по диапазону измерения  $X$ .

Преобразователь неэлектрической величины в электрическую воздействует как на электрическую схему по своему прямому назначению, так и на неэлектрическую систему, изменяя её режим по сравнению со случаем, когда система находилась бы без преобразователя. Пример – электрический тахометр, требуя определённый вращающий момент, изменит режим нагрузки маломощной механической системы.

При применении преобразователей существенными факторами являются погрешность и разрешающая способность. Допустимая погрешность преобразователей в процессах регулирования обычно составляет 1...2%, а в задачах контроля технологических процессов до 2...3%.

Разрешающая способность характеризует возможности и условия применения преобразователя. Она показывает, в каком диапазоне можно практически пользоваться функцией преобразования, и в каком режиме при этом должен работать преобразователь, чтобы погрешность преобразования оставалась в допустимых пределах.

Преобразователей неэлектрических величин в электрические существует огромное количество, рассмотреть их все не предоставляется возможным. Это и не нужно, так как большинство преобразователей представляет собой конструктивные разновидности, использующие хорошо известные принципы преобразования. Ниже будут рассмотрены только преобразователи механических величин и термоэлементы.

### 7.1. Преобразователи механических величин

Преобразователи в электрический сигнал механических величин наиболее часто используются для измерения в следующих случаях:

- измерение положения тела относительно других тел;
- измерение размеров;
- измерение усилия и давления;
- определение деформации;
- измерение веса, массы и плотности.

Преобразователи механических величин необычайно разнообразны, зачастую они конструируются именно под данную механическую систему. Однако их всё же можно классифицировать по принципу воздействия на электрическую схему. Можно различать их так:

- генераторные преобразователи;
- моторные преобразователи;
- контактные преобразователи;
- параметрические преобразователи.

*Генераторные преобразователи* – обычно небольшие электрические машины постоянного или переменного тока. Входная величина – число оборотов в минуту, выходная – напряжение, иногда ток. К генераторным преобразователям иногда причисляют термоэлектрические преобразователи (термопары).

*Моторные преобразователи* – любой электропривод. Измеряя электрические величины (ток, напряжение, сдвиг фаз), можно вычислить значения механических величин.

*Контактные преобразователи* – импульсные устройства, преобразующие линейное или угловое перемещение в состояние контактов. С помощью соответствующих логических устройств с их помощью можно измерять перемещение, частоту, время.

*Параметрические преобразователи* преобразуют входную механическую величину в изменение параметра электрической схемы – сопротивления, ёмкости, индуктивности, которые измеряются, в свою очередь, с помощью соответствующих измерительных схем. Такие преобразователи – наиболее распространённые из всех.

### 7.1.1. Преобразователи перемещения в активное сопротивление

Простейший преобразователь этого типа – реостат, движок которого механически связан с перемещающимся объектом. Если его включить последовательно с источником тока и амперметром, его функция преобразования будет нелинейной и, кроме того, не знакопеременной. При включении преобразователя в потенциометрическую схему функция преобразования будет аналогичной. Если преобразователь выполнить по схеме рис.7.1а, то с использованием одного источника тока можно получить смену знака выходного напряжения при смещении движков потенциометров со среднего положения (рис. 7.1б).

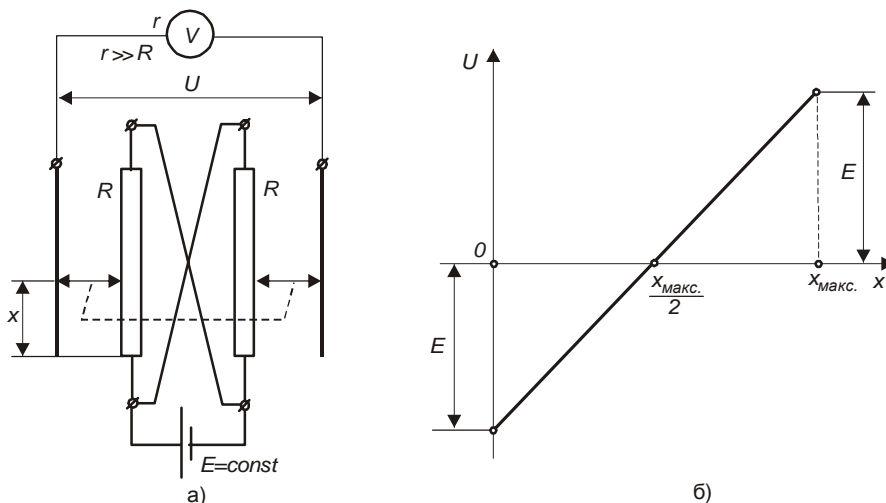


Рис. 7.1. Резистивный преобразователь перемещения (а) и его функция преобразования (б)

Устройства, применяемые для измерения удлинения, называются *тензомерами*, а соответствующие измерения – *тензометрией*. Для этих целей служат различные преобразователи удлинения в какую-либо легко измеряемую величину, например, в перемещение стрелки-указателя, в изменение ёмкости или индуктивности, в изменение активного сопротивления.

Устройство для преобразования удлинения – *тензопреобразователь* – в изменение активного сопротивления называется *тензорезистором*. В основе работы тензорезистора лежит явление тензоэффекта, заключающееся в изменении активного сопротивления проводника при его механической деформации.

Характеристикой тензоэффекта материала является *коэффициент относительной тензочувствительности*  $S_M$  (сокращённо – коэффициент тензочувствительности материала), определяемый как частное от деления относительного изменения сопротивления на относительное изменение длины проводника:

$$S_M = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l},$$

где  $\varepsilon_R = \Delta R / R$  – относительное изменение сопротивления проводника;

$\varepsilon_l = \Delta l / l$  – относительное изменение длины проводника.

При деформации проводника происходит изменение его длины и площади поперечного сечения, а также изменение его электрических свойств, в частности, удельного сопротивления, разное для разных металлов и полупроводников. Полученные в опытах значения коэффициента тензочувствительности металлических и полупроводниковых материалов колеблются в широких пределах:

0,47...0,50 – манганин;	-100 (до -150) – <i>n</i> -германий;
1,9...2,1 – константан;	-100 – <i>n</i> -кремний;
2,1...2,3 – нихром;	+110 (до 170) – <i>p</i> -кремний;
-12 – никель.	

В технике измерений тензорезисторы используют по двум направлениям.

*Первое направление* – использование тензоэффекта проводника, находящегося в состоянии всестороннего сжатия, когда естественной входной величиной преобразователя является давление окру-

жающего проводник газа или жидкости. На этом принципе строятся манометры для измерения высоких давлений.

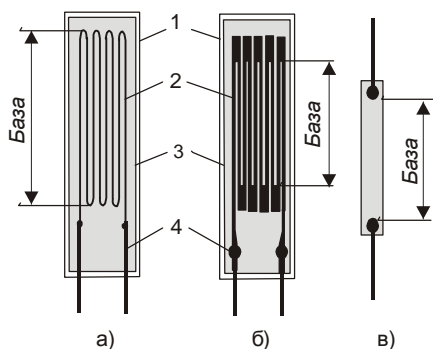


Рис. 7.2. Приклеиваемые тензорезисторы: а) проволочный; б) фольговый; в) полупроводниковый

*Второе направление* – использование тензоэффекта растягиваемого или сжимаемого тензочувствительного проводника, приклеенного или напыленного на поверхность исследуемого элемента. Устройство приклеиваемых проводниковых и полупроводниковых тензорезисторов показано на рис. 7.2. На подложку из полоски тонкой бумаги или лаковой плёнки 1 наклеивается так называемая решётка из зигзагообразно уложенной тонкой проволоки 2 диаметром 0,02...0,04 мм (рис. 7.2а). К концам проволоки присоединяют пайкой или сваркой выводные медные проводники 4. Сверху решётку покрывают тонкой бумагой или лаком 3. Такой тензопреобразователь, приклеенный к исследуемому элементу, воспринимает деформацию его поверхностного слоя.

Измерительной базой тензорезистора является длина поверхности элемента, равная длине проволочной решётки. Промышленность выпускает тензорезисторы с длиной базы от 1 до 400 мм. С помощью тензорезистора измеряется *средняя деформация поверхности элемента на длине базы*.

При деформации поверхности элемента тензорезистор воспринимает не только продольную деформацию (вдоль базы), но и поперечную, воспринимаемую закруглёнными концами проволочной решётки. Поперечная чувствительность к деформации в значительной степени устранена в конструкции фольгового тензорезистора (рис. 7.2б). Фольговый тензорезистор представляет собой тонкую ленту из металлической фольги толщиной 0,004...0,012 мм, приклеенную к подложке, из которой часть металла травлением выбрана так, что оставшаяся часть образует решётку. Концы петель решётки для уменьшения доли сопротивления, приходящегося на них в общем сопротивлении тензорезистора и, следовательно, для уменьшения поперечной чувствительности к деформации, делают значительно шире проводников продольной части. В качестве подложки в фольговых тензорезисторах используют лаковую плёнку, покровным элементом решётки также является лаковая плёнка.

Покровный элемент 3 в обеих конструкциях тензорезистора зачастую отсутствует, что увеличивает податливость тензорезистора и способствует более полной передаче деформации от поверхности исследуемого элемента к решётке.

Для изготовления тензорезисторов помимо металлических материалов используют ряд полупроводниковых материалов на основе германия и кремния в виде поликристаллических плёнок или тонких срезов по определённым кристаллографическим направлениям монокристаллов (рис. 7.2в). Тензорезисторы такой конструкции, как правило, не имеют подложки, а наклеиваются на элемент через промежуточный изолирующий слой высушенного клея.

При изготовлении тензорезисторов и для приклеивания их к объекту измерения применяют различные клеящие составы (клеи или цементы) в зависимости от условий работы (температура, влажность, характеристики среды).

Из-за влияния клея и неравномерного распределения деформаций и напряжений по слоям между поверхностью детали и проводником тензорезистора на проводник передаётся только часть деформации с поверхности детали. Так что *тензочувствительность тензорезистора S* получается меньше, чем тензочувствительность материала проводника  $S_m$ . Она вычисляется по аналогичной формуле

$$S = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l},$$

где  $\varepsilon_R$  – относительное изменение сопротивления тензорезистора;

$\varepsilon_l$  – относительная деформация поверхности детали.

Часто в литературе вместо  $S$  применяют обозначение  $k$ .

Если измерить тензорезистором деформацию элемента с известными геометрическими размерами и модулем упругости его материала, можно определить усилие, воздействующее на элемент, т.е. использовать элемент в качестве *измерительного преобразователя усилия* в электрическое сопротивление.

Ограничимся рассмотрением лишь некоторых конструкций *упругих элементов* для измерения сосредоточенной силы. На рис. 7.3 схематически изображены наиболее употребительные упругие преобразователи.

Для восприятия больших усилий используют сплошные или полые стержни (рис. 7.3а,б), для небольших – плоские пружины (рис. 7.3 в,г) или балки на двух опорах (рис. 7.3д).

Для сплошного или полого стержня размеры рассчитывают, исходя из формул:

$$\sigma = \frac{P}{F}, \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{P}{FE}, \quad \varepsilon_1 = -\mu\varepsilon.$$

где  $\sigma$  – нормальное напряжение;

$P$  – сила;

$F$  – площадь поперечного сечения;

$E$  – модуль упругости материала преобразователя;

$\varepsilon$  – относительная продольная деформация;

$\varepsilon_1$  – относительная поперечная деформация;

$\mu$  – коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона).

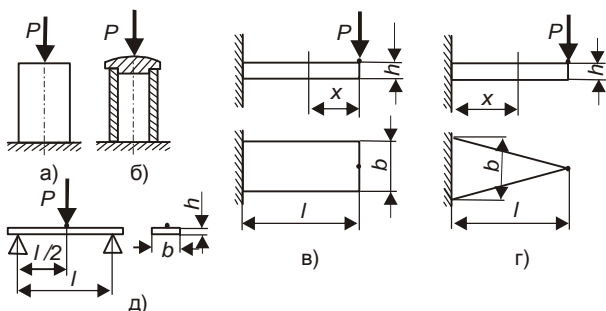


Рис. 7.3. Наиболее употребительные упругие преобразователи сосредоточенной силы

Чтобы преобразователь работал без остаточных деформаций, напряжение  $\sigma$  при максимально возможном усилии должно быть выбрано меньше предела пропорциональности  $\sigma_n$  (с учётом необходимого запаса).

Рабочие тензорезисторы размещают на боковой поверхности вдоль оси стержня. Для увеличения чувствительности и обеспечения температурной компенсации терморезисторы можно разместить на том же стержне поперёк его оси; при растяжении стержня они будут испытывать деформацию сжатия.

Для углеродистой стали У8, например, по справочным данным принимают  $\sigma_n = 350 \text{ МПа} = 35,6 \text{ кг/мм}^2$ ,  $E = 210 \text{ ГПа} = 2,14 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2$ .

### 7.1.2. Преобразователи перемещения в ёмкость

Ёмкостный преобразователь представляет собой конденсатор. Для плоского однослойного конденсатора функция преобразования будет такой:

$$C = \varepsilon \frac{F}{d},$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды между обкладками, Ф/м;

$F$  – площадь обкладок, м<sup>2</sup>;

$d$  – расстояние между обкладками, м.

Для изменения ёмкости  $C$  можно воздействовать на  $\varepsilon$ ,  $F$ ,  $d$ . Для измерения перемещения изменяют, как правило,  $d$ .

Ёмкость конденсатора измеряют обычно с помощью мостовых схем. Если диапазон изменения ёмкости мал, приращение ёмкости  $\Delta C$  измеряют в резонансных схемах. Измерительные схемы работают на частотах от звуковых до десятков мегагерц.

### 7.1.3. Преобразователи перемещения в индуктивность

В индуктивных преобразователях вследствие перемещения меняется какой-либо параметр магнитной цепи. Так как конструктивных исполнений индуктивных преобразователей очень много, невозможно привести общую формулу функции преобразования. Приведём несколько примеров типичных конструкций преобразователей.

На рис.7.4 изображён преобразователь со стальным сердечником для измерения больших перемещений и графически представлены его функции преобразования, т.е. зависимости  $L$ ,  $Z$  и  $R$  от перемещения сердечника.

Обычно такой преобразователь выполняется с двумя катушками с общим сердечником (рис.7.5), так что при увеличении полного сопротивления  $Z$  одной из катушек  $Z$  другой катушки уменьшается. Преобразователь включается в мостовую схему. Измерительный диапазон перемещения располагают на линейной части кривой.

На рис.7.6 изображено устройство для измерения малых перемещений, например, в профилометрах для измерения шероховатости поверхностей изделий. Обмотки двух преобразователей на Ш-образных сердечниках включаются в мостовую или дифференциальную схему. Часто преобразователь такой конструкции работает на фазочувствительный выпрямитель, нагруженный измерительным прибором, шкала которого градуируется в единицах перемещений (рис.7.6).

Частота питающего напряжения измерительных схем обычно лежит в звуковом диапазоне, начиная с промышленной частоты 50 Гц. Так как  $Z$  зависит от частоты, частота должна быть стабильной.

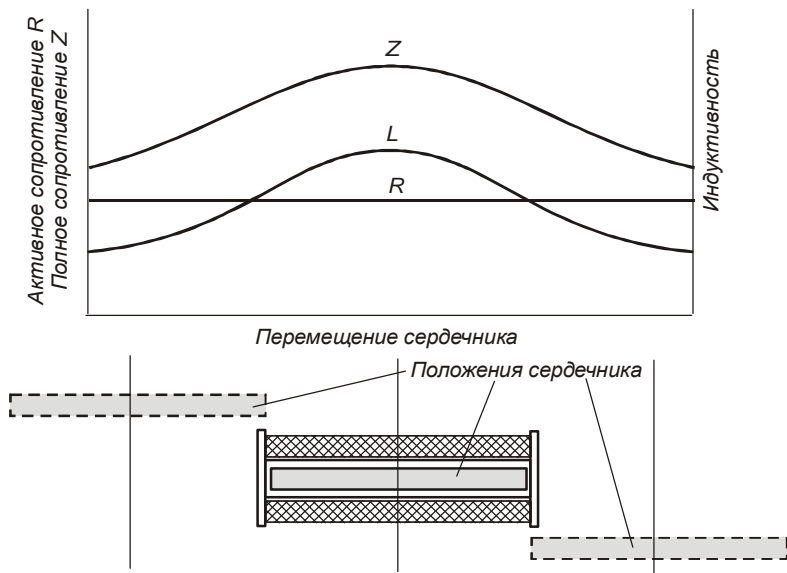


Рис. 7.4. Индуктивный преобразователь перемещения со стальным сердечником

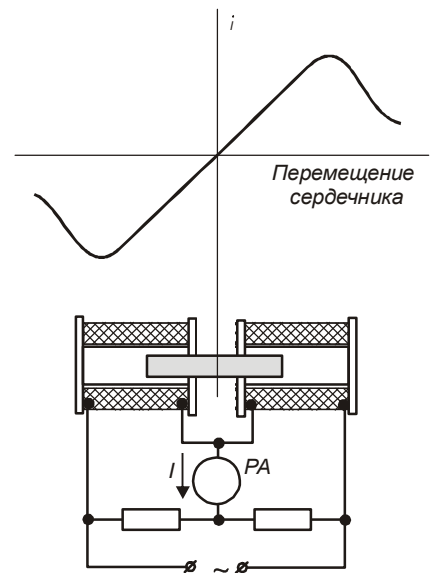


Рис. 7.5. Включение индуктивного преобразователя в мостовую схему

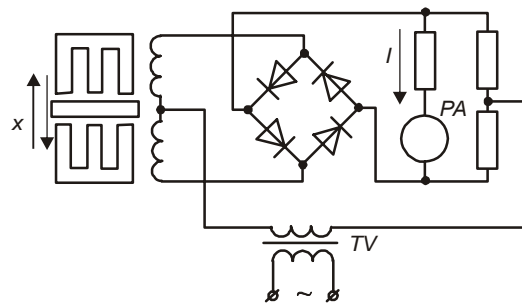


Рис. 7.6. Включение дифференциального индуктивного преобразователя в схему двухполупериодного фазочувствительного выпрямителя

Разновидностью индуктивных преобразователей являются преобразователи перемещения во взаимную индуктивность двух магнитно связанных контуров. В них коэффициент связи зависит от воздействующей на преобразователь механической величины. Зачастую они выполняются в виде дифференциальных преобразователей (см.9.8) или в конструкциях, аналогичных ферродинамическому измерительному преобразователю.

## 7.2. Термоэлектрические преобразователи температуры

Два соединённых между собой проводника А и Б из разных материалов представляют в общем случае термоэлектрический преобразователь (или термопару). Если места соединений имеют разную температуру, то в цепи возникает термоэлектродвижущая сила (термо-э.д.с.), являющаяся функцией только материала термоэлектродов и температур спаев  $t$  и  $t_0$  (рис.7.7). Если температуру одного спая  $t_0$  поддерживать постоянной, то термо-э.д.с. определяется только температурой  $t$  другого спая. Таким образом, термопара является преобразователем температуры в э.д.с. с функцией преобразования

$$E = f(t, t_0).$$

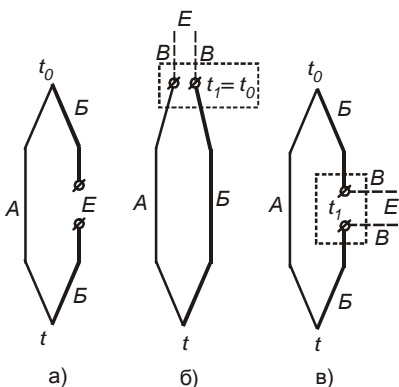


Рис. 7.7. Простейшая цепь термопары (а) и введение третьего проводника в спай (б) и в рассечку (в)

Положительным направлением термо-э.д.с. принято считать направление у спая с температурой  $t$  от проводника, указанного в названии термопары первым.

В общем случае для целей подключения измерительной цепи

в цепь простейшей термопары может быть введён третий проводник из материала *B*. В этом случае, если температура обоих соединений третьего проводника с термопарой будет одинаковой и равной  $t_1$ , термо-э.д.с. термопары *E* будет определяться прежней функцией преобразования, т.е. не будет зависеть от  $t_1$ . Поддержание неизменным двух температур  $t_0$  и  $t_1$  доставляет значительные неудобства. Поэтому, когда удлиняют провода термопары для подключения к измерительной схеме, применяют в качестве удлинительных проводов провода из так называемых термоидентичных материалов, не дающих соответственно с проводниками А и Б термо-э.д.с. (обычно в пределах 0 ... 100 °С). Хотя практически любые два разнородных металлических проводника могут быть использованы как термопара, в практике промышленных измерений принято использовать готовые термопары (с паспортной градуировкой, с удлинительными проводами, с арматурой и т.п.), гарантирующие неизменность и воспроизводимость характеристик – стандартные термопары. Стандартных термопар несколько. Мы приведём здесь номинальные статические характеристики (НСХ) наиболее используемых термопар.

Наиболее распространённой для низкотемпературных измерений является *медь-копелевая* термопара. Номинальная статическая характеристика термопары стандартизована в диапазоне – 200 ... +100°С (тип МК(М)). Зависимость термо-э.д.с. от температуры  $t$  в градусах Цельсия описывается уравнением

$$E(t,0) = 42,63t + 5,03 \cdot 10^{-2}t^2 - 4,5 \cdot 10^{-5}t^3, \text{ мкВ.}$$

Из всех промышленных термопар *хромель-копелевая* (тип ХК (L)) имеет самую большую термо-э.д.с. и отличается высокой линейностью. В соответствии с ГОСТ 3044-84 зависимость термо-э.д.с. термопары в диапазоне – 200...+800 °С описывается интерполяционным уравнением

$$E(t,0) = \sum_{i=0}^8 A_i t^i, \text{ мВ,}$$

где  $A_0 = 0;$   $A_1 = 6,32175 \cdot 10^{-2};$   $A_2 = 5,89073 \cdot 10^{-5};$   
 $A_3 = - 8,03773 \cdot 10^{-8};$   $A_4 = 1,1955 \cdot 10^{-10};$   $A_5 = - 2,46058 \cdot 10^{-14};$   
 $A_6 = - 4,83261 \cdot 10^{-16};$   $A_7 = 8,23504 \cdot 10^{-19};$   $A_8 = - 4,02693 \cdot 10^{-22}.$

*Хромель-алюмелевая* термопара называется также никель-хром/никель-алюминиевая (тип ХА(К)), является наиболее высокотемпературной (1300 °С) и жаростойкой среди серийных термопар из неблагородных металлов. Её НСХ во всех странах одинакова (ГОСТ 3014 – 84 и стандарт МЭК 584 – 1 – 1977). Аппроксимирующий полином

в диапазоне – 200 ... 0 °С

$$E(t,0) = \sum_{i=0}^{10} A_i t^i, \text{ мВ,}$$

где  $A_0 = 0;$   $A_1 = 3,9475433 \cdot 10^{-2};$   $A_2 = 2,7465251 \cdot 10^{-5};$   
 $A_3 = - 1,6565407 \cdot 10^{-7};$   $A_4 = - 1,5190912 \cdot 10^{-9};$   $A_5 = - 2,4881671 \cdot 10^{-11};$   
 $A_6 = - 2,4757918 \cdot 10^{-13};$   $A_7 = - 1,5585276 \cdot 10^{-15};$   $A_8 = - 5,9729921 \cdot 10^{-18};$   
 $A_9 = - 1,2688801 \cdot 10^{-20};$   $A_{10} = - 1,1382797 \cdot 10^{-23}.$

в диапазоне 0 ... 1300 °С

$$E(t,0) = \sum_{i=0}^8 A_i t^i + 0,125 \exp \left[ - \frac{1}{2} \left( \frac{t-127}{65} \right)^2 \right], \text{ мВ,}$$

где  $A_0 = - 1,8533063 \cdot 10^{-2};$   $A_1 = 3,8918345 \cdot 10^{-4};$   $A_2 = 1,6645154 \cdot 10^{-5};$   
 $A_3 = - 7,8702374 \cdot 10^{-8};$   $A_4 = 2,2835786 \cdot 10^{-10};$   $A_5 = - 3,5700231 \cdot 10^{-13};$   
 $A_6 = 2,9932909 \cdot 10^{-16};$   $A_7 = 1,2849849 \cdot 10^{-19};$   $A_8 = 2,2239974 \cdot 10^{-23}.$

*Платинородий-платиновая* термопара ПР10/0 более точная, чем другие термопары, она почти всегда применяется как образцовая термопара. Условное обозначение термопары ПР10/0 – ПП(С). Значения термо-э.д.с. по всем стандартам одинаковы. Интерполяционное уравнение имеет следующий вид:

в диапазоне 0 – 630,755 °С

$$E(t,0) = \sum_{i=0}^6 A_i t^i, \text{ мВ,}$$

где  $A_0 = 0;$   $A_1 = 5,39957823 \cdot 10^{-3};$   
 $A_2 = - 1,25197700 \cdot 10^{-5};$   $A_3 = - 2,24482180 \cdot 10^{-8};$   
 $A_4 = 2,84521649 \cdot 10^{-11};$   $A_5 = - 2,24405845 \cdot 10^{-14};$   $A_6 = 8,50541669 \cdot 10^{-18};$



в диапазоне 630,755 ... 1064,43 °С

$$E(t,0) = \sum_{i=0}^2 A_i t^i, \text{ мВ,}$$

где  $A_0 = -2,98244816 \cdot 10^{-1}$ ;  
 $A_1 = 8,23755282 \cdot 10^{-3}$ ;  
 $A_2 = 1,64539099 \cdot 10^{-6}$ ;

в диапазоне 1064,43 ... 1600 °С

$$E(t,0) = \sum_{i=0}^3 A_i \left( \frac{t - 1365}{300} \right)^i, \text{ мВ,}$$

где  $A_0 = 1,39434387 \cdot 10^1$ ;  $A_1 = 3,63986866$ ;  
 $A_2 = -5,02812061 \cdot 10^{-3}$ ;  $A_3 = -4,24505464 \cdot 10^{-2}$ .

Номинальные статические характеристики (НСХ) преобразования термомпар по стандартам МЭК 584 – 1 – 1977 и ГОСТ 3044 – 84 приведены в таблице.

Таблица

Номинальные статические характеристики (НСХ) преобразования термомпар по стандартам МЭК 584-1-1977 и ГОСТ 3044-84

Температура рабочего спая, °С	Термо-э.д.с. термомпары, мВ			
	МК(М) ГОСТ	ХК(Л) ГОСТ	ХА(К) ГОСТ, МЭК	ПП(С) ГОСТ, МЭК
-200	-6,153	-9,488	-5,892	-
-100	-3,715	-5,641	-3,553	-
0	0,000	0,000	0,000	0,000
100	4,721	6,842	4,095	0,645
200	-	14,519	8,137	1,440
300	-	22,806	12,207	2,323
400	-	31,482	16,395	3,260
500	-	40,299	20,640	4,234
600	-	49,094	24,902	5,327
700	-	57,857	29,128	6,274
800	-	66,469	33,277	7,345
900	-	-	37,325	8,448
1000	-	-	41,269	9,585
1100	-	-	-	10,754
1200	-	-	-	11,947
1300	-	-	-	13,155

Измерительные схемы для работы с термоэлектрическими преобразователями разделяются на два вида:

с потенциометрами, измеряющими непосредственно термо-э.д.с.;

с милливольтметрами, измеряющими термо-э.д.с. за вычетом падения напряжения в термомпаре и соединительных проводах.

Шкалы этих приборов градуируются в единицах температуры. Шкалы действительны, если температура холодного спая неизменна и равна градуировочной температуре  $t_0$ , в противном случае, требуется коррекция показаний, как следует по НСХ, нелинейно зависящая от отклонения действительной температуры холодного спая от  $t_0$  (подробнее, см.9.11).

### 7.3. Терморезистивные преобразователи температуры

Терморезистивные преобразователи температуры являются параметрическими преобразователями.

Принцип работы терморезистивного преобразователя основан на зависимости омического сопротивления проводника от температуры. Эта зависимость проявляется в проводниках и полупроводниках. Поскольку в процессе производства крайне затруднительно получить идентичные параметры у полупроводниковых терморезисторов, для целей измерения температуры их используют редко. Стандартными терморезисторами являются проводниковые (металлические) резисторы, изготовленные из металлической проволоки с заданными свойствами. Термометрическими материалами терморезисторов являются платина, медь и никель. Международным документом, регламентирующим технические и метрологические параметры промышленных терморезисторов, является Публикация 751-83 МЭК, распространяющаяся только на платиновые терморезисторы. ГОСТ 6651-84 предусматривает кроме платиновых также медные терморезисторы.

Функция преобразования этих терморезисторов имеет вид:

$$R_t = w_t R_0,$$

где  $R_t$  – сопротивление терморезистора при температуре  $t$  в °C;  
 $R_0$  – сопротивление терморезистора при температуре  $t = 0^\circ\text{C}$ ;  
 $w_t$  – функция, описывающая зависимость изменения сопротивления от температуры.

Характеристикой применяемого материала является  $w_{100}$ :

$$w_{100} = R_{100^\circ\text{C}} / R_{0^\circ\text{C}}.$$

Для платиновых терморезисторов с  $w_{100} = 1,385$ :

для диапазона температур – 200 ... 0 °C

$$w_t = 1 + 3,90802 \cdot 10^{-3} t - 5,802 \cdot 10^{-7} t^2 - 4,2735 \cdot 10^{-12} (t - 100) \cdot t^3;$$

для диапазонов температур 0...850 °C эту формулу следует использовать без последнего члена.  
 Для медных терморезисторов с  $w_{100} = 1,428$ :

для диапазона температур – 200 ... +185°C

$$w_t = 1 + 4,11 \cdot 10^{-3} (t - 13,7);$$

для диапазона температур – 10 ... +200°C

$$w_t = 1 + 4,28 \cdot 10^{-3} t.$$

Величины сопротивлений терморезисторов при 0°C  $R_0$  стандартизированы и составляют:  
 у платиновых терморезисторов 1; 10; 50; 100 и 500 Ом,  
 у медных терморезисторов 10; 50 и 100 Ом.

Средствами измерения сопротивления терморезисторов являются мостовые, потенциметрические и логометрические цепи. При этом измерительный ток не должен вызывать изменение сопротивления при 0 °C, превышающее  $0,001 R_0$ ; при этом номинальное значение тока следует выбирать из ряда: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0; 10,0; 15,0; 20,0; 50,0. Выбираемая величина тока зависит от условий теплообмена терморезистора с измеряемой средой.

На рис.7.8 показаны примеры измерительных схем.

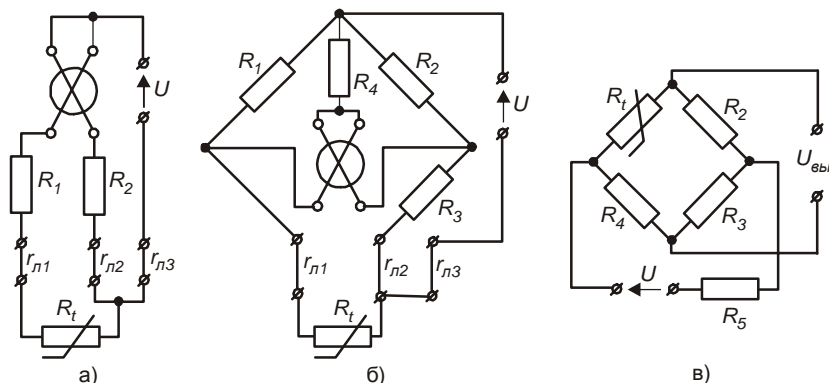


Рис. 7.8. Схемы измерения температуры с использованием терморезистора:  
 а) потенциметрическая; б) логометрическая; в) мостовая

## 8. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Каждая лабораторная работа представляют собой, по сути дела, небольшую самостоятельную исследовательскую работу экспериментального характера. Выполнение каждой работы начинается с подготовки, в ходе которой изучается теоретический материал, задачи исследования, лабораторная установка и порядок проведения опытов. На этом этапе рекомендуется также начать составление будущего отчёта по работе, в который следует включить конспект наиболее важных положений работы и заготовки таблиц экспериментальных данных и графиков.

Теоретического материала, изложенного в данном пособии, достаточно для подготовки к постановке опытов и обработки результатов. Однако для углублённого изучения материала следует пользоваться литературой, приведённой в библиографических списках инструкций к каждой лабораторной работе, поскольку эффективное усвоение изучаемого материала возможно только тогда, когда ясна цель эксперимента и имеется представление об ожидаемых результатах.

### 8.1. Общие правила при выполнении экспериментальной части работы

В лаборатории перед выполнением работы на лабораторном стенде необходимо обратить внимание на следующее.

Во-первых, нужно внимательно ознакомиться с измерительными приборами, понять назначение их органов управления, изучить градуировки шкал и лимбов, т.е. понять, в каких единицах будет выражен результат измерения и как определить его величину.

Во-вторых, надо изучить лабораторный стенд, на переднюю панель которого выведены контактные гнезда элементов и узлов исследуемых схем, и спроектировать способ соединения этих гнезд между собой и с измерительными приборами для получения заданной конфигурации исследуемой схемы.

При сборке цепей следует пользоваться специальными соединительными проводами, подбирая их без избыточной длины. Соединительные провода к вольтметрам, амперметрам, генераторам и осциллографам надо подсоединять в последнюю очередь. При этом следует помнить, что у электронных приборов один вывод соединён, как правило, с корпусом, а у двухлучевых осциллографов этот провод является к тому же общим для обоих измерительных каналов.

### 8.2 Правила успешной постановки эксперимента

Вначале следует обдумать, какова цель эксперимента и какие должны быть получены результаты, предварительное представление о величинах которых можно составить из теоретического рассмотрения вопроса. Очень важно оценить, какие искажения результатов могут быть получены при подключении к схеме измерительных приборов. Применяемые вольтметры должны иметь высокое входное сопротивление, не ниже  $10 \dots 20 \text{ кОм}$  на вольт шкалы, а применяемые миллиамперметры предельно низкое внутреннее сопротивление. В обоих случаях, зная внутреннее сопротивление приборов, можно вычислить поправку к результатам и тем уменьшить методическую погрешность. Особенно внимательно надо быть, применяя многопредельные приборы. На каждом предделе надо точно установить цену деления по паспортным данным или инструкции. При использовании осциллографа надо помнить, что масштаб осциллограммы, указанной на шкалах ручек управления по осям  $X$  и  $Y$ , действителен только в крайнем правом (по часовой стрелке) положении ручек плавной регулировки. В противном случае масштаб должен быть установлен с помощью предварительной калибровки отклонения.

Перед измерениями следует определить диапазоны измеряемых величин, число измерений и значения, которые будет принимать независимая переменная. Число этих значений зависит от вида определяемых зависимостей. Для плавных монотонных зависимостей достаточно иметь 5 ... 6 значений независимой переменной, равномерно распределённых по всему диапазону её изменения. При исследовании зависимостей, имеющих существенно неравномерный ход, число измерений в области большой крутизны кривых должно быть увеличено. В большинстве случаев, если в этом нет необходимости, не производится статистическая обработка результатов измерений, а через экспериментальные точки на глаз наиболее близко к ним проводятся плавные кривые, не выходящие за пределы исследуемого диапазона. Исключения составляют *кривые градуировок шкал*, которые проводятся *плавно через все экспериментальные точки*.

Все измерения, относящиеся к одной исследуемой схеме, должны производиться за короткий промежуток времени без перерыва во избежание появления дополнительной неконтролируемой погрешности в измерениях, обусловленной различными внешними факторами, например, нагревом измерительных и регулирующих приборов, изменением температуры в помещении, колебаниями напряжения питающей сети и т.п.

### 8.3. Общие требования к оформлению отчётов

Отчёты пишутся каждым студентом самостоятельно и подписываются им. Отчёты по всем лабораторным работам сводятся в единую тетрадь, титульный лист которой должен быть оформлен в соответствии с образцом, данным в инструкции по выполнению отчётов по лабораторным работам.

Схемы и графики следует вычерчивать карандашом с применением чертёжных инструментов. Все элементы схем должны быть выполнены с соблюдением стандартов на графические изображения. Значения аргумента на графиках надо откладывать по горизонтальной оси, значения функции – по вертикальной. На осях координат должны быть приведены названия аргумента и функции и их размерности. Каждый рисунок должен иметь содержательный заголовок, все рисунки должны быть пронумерованы. При изображении на одном графике нескольких кривых их также следует пронумеровать, расшифровку дать в экспликации к рисунку; для большей наглядности кривые дополнительно допускается изображать различными линиями (сплошными, штриховыми, штрихпунктирными).

Таблицы должны быть чёткими по содержанию и удобочитаемыми. Каждая таблица должна иметь порядковый номер и название. Все графы головки и боковик должны иметь заголовки, сокращения слов в них не допускаются. В заголовках граф (в головке) названия первого яруса надо начинать с прописных букв, названия второго и последующих со строчных. Размерности цифровых данных, приводимых в таблицах, выносятся в текст боковика, головки или заголовка таблицы в сокращённом условном обозначении, принятом в СИ. В местах пропусков в графах таблицы за отсутствием данных ставится знак тире. При повторении в последующих строках графы текста предыдущей строки в первой из них ставится «То же», а в остальных – кавычки.

Содержание текстовой части отчёта приводится в инструкциях к каждой лабораторной работе.

#### **8.4. Техника безопасности при проведении лабораторных работ**

На лабораторных установках имеются разьёмы, клеммы, гнёзда, электронные измерительные приборы и другие элементы и цепи, которые при включённых установках находятся под напряжением. Поскольку согласно «Правилам техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителем» такие установки считаются действующими электроустановками, для их эксплуатации необходимо знать и строго соблюдать следующие правила техники безопасности.

1. Лабораторную работу можно выполнять только на исправной установке.
2. Перед началом работы необходимо убедиться, что все выключатели установки находятся в положении «Выключено».
3. При сборке электрических цепей особое внимание следует обратить на исправность изоляции соединительных проводов, наличие изолированных держателей на оконцевателях проводов. Об обнаруженных неисправностях необходимо сообщить учебному мастеру.
4. Категорически запрещается включать установку без разрешения преподавателя или учебного мастера.
5. При проведении опытов на включённой установке все переключения, регулировки, включение и выключение тумблеров и другие подобные операции должны производиться одним человеком и только одной рукой. Вторая должна быть свободной и не должна касаться аппаратуры установки. Нельзя касаться лишённых изоляции элементов цепей, находящихся под напряжением.
6. На установке, находящейся под напряжением, запрещается производить какие-либо переключения с помощью соединительных проводов. Перед любым изменением исследуемой схемы установка должна быть обесточена. Для этого соответствующие выключатели должны быть поставлены в положение «Выключено».
7. При проведении опытов с использованием электронных приборов (генераторов, осциллографов, электронных вольтметров и т.п.) необходимо остерегаться одновременного касания руками, карандашами и другими предметами установки, находящейся под напряжением, и корпуса прибора. При одновременном использовании нескольких электронных приборов их корпуса должны быть соединены между собой с помощью клемм «Земля».
8. При обнаружении любых повреждений или неисправностей электрического оборудования установки, при появлении дыма, искрения, специфического запаха перегретой изоляции нужно немедленно обесточить установку и сообщить об этом преподавателю или учебному мастеру.
9. В случае поражения человека электрическим током следует немедленно обесточить установку, выключив её питание. Если отключение не может быть проведено быстро, нужно принять меры к отделению пострадавшего от частей оборудования, находящихся под напряжением. Для этого надо воспользоваться резиновыми перчатками, резиновым ковриком, а при их отсутствии можно применить такие подручные средства, как сухая одежда, сухие доски, палки и другие изоляторы.
10. При потере сознания и дыхания необходимо освободить пострадавшего от стесняющей одежды и делать искусственное дыхание до прибытия врача.

## 9. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

### 9.1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

#### ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫМИ ПРИБОРАМИ

*Цели работы:*

- 1) изучить материал глав 2 и 3 о величинах переменного тока и измерительных приборах;
- 2) изучить схемы приборов выпрямительной системы для их измерения;
- 3) рассчитать квадривирующую цепочку вольтметра эффективного значения;
- 4) сравнить результаты измерения напряжения с различной формой кривой вольтметрами амплитудного, эффективного и среднего значений и рассчитать погрешности.

*Приборы и материалы:* лабораторный стенд, образцовый вольтметр постоянного тока, осциллограф, омметр, набор соединительных проводов.

#### 1. Лабораторный стенд

В лабораторном стенде смонтированы четыре регулируемых независимых источника напряжений: постоянного тока  $U_{п}$ ; синусоидального тока  $U_{с}$ ; двуполярного симметричного трапецеидального тока, близкого к меандру,  $U_{м}$ ; двуполярных симметричных трапецеидальных импульсов  $U_{и}$  с коэффициентом заполнения  $k_3$ , равным примерно 0,5. Частота всех источников переменного тока равна 50 Гц. Внутреннее сопротивление источников одинаково и равно 500 Ом.

В лабораторном стенде имеются три вольтметра: амплитудный  $V_{м}$ , средневывпрямленного  $V_{ср.в.}$  и эффективного  $V$  значений, в которых в качестве индикаторов использованы милливольтметры с током номинального отклонения  $i_{РАном.} = 1 \text{ мА}$ .

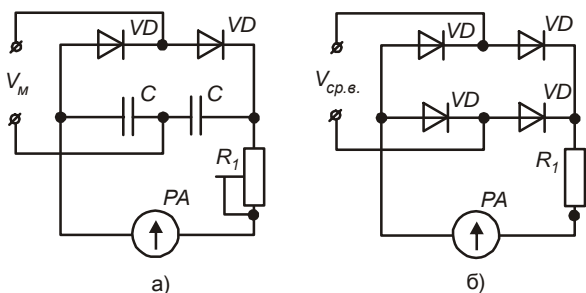


Рис. 9.1.1. Вольтметры лабораторного стенда: а) с диодным амплитудным детектором; б) средневывпрямленного значения с двухполупериодным выпрямителем

Амплитудный вольтметр собран по схеме диодного амплитудного двухполупериодного детектора с удвоением напряжения (рис.9.1.1а). Благодаря большой постоянной времени цепи разряда  $\tau = \frac{R_1 C}{2} = 0,85 \text{ с}$  и отношению  $\frac{R_1}{R_i} = 500$  ( $\cos \theta = 0,97$ )

напряжение  $U_{с}$  лишь на 3% меньше  $U_{м}$ . С помощью подстроечного резистора  $R_1$  чувствительность схемы регулируется так, чтобы амплитуде  $U_{м} = 5 \text{ В}$  соответствовала последняя отметка шкалы милливольтметра 1,0.

Вольтметр средневывпрямленного значения  $V_{ср.в.}$  (рис.9.1.1б) собран по схеме двухполупериодного выпрямителя, в связи с чем его чувствительность вдвое больше чувствительности вольтметра по схе-

ме рис.3.6а, а именно:

$$\alpha \equiv I_{ср.в.} = \frac{U_{ср.в.}}{R_{РА} + R_1 + R_i} = \frac{2}{\pi(R_{РА} + R_1 + R_i)} U_{м} = \frac{0,636 U_{м}}{R_{РА} + R_1 + R_i}$$

С помощью подстроечного резистора  $R_1$  вольтметр регулируется так, чтобы при синусоидальном входном напряжении с амплитудой  $U_{м} = 5 \text{ В}$  стрелка измерительного прибора показывала 0,636.

Вольтметр эффективных значений собран по схеме с кусочно-линейной аппроксимацией квадратичной параболы на основе уже рассмотренной схемы вольтметра средневывпрямленного значения (рис.9.1.2). С помощью внешних штеккерных соединений квадривирующей цепочки парабола может быть аппроксимирована ломанной линией, содержащей до семи участков. При номинальном напряжении вольтметра  $U_{эфф.ном} = 5 \text{ В}$  парабола может быть аппроксимирована до напряжения 10,5 В, что позволяет мерить импульсные напряжения. Резисторы  $R_1, R_2', R_2'', \dots, R_7', R_7''$  выполнены регулируемые, и их сопротивление может быть измерено омметром, входящим в комплект установки.

В схеме вольтметра, в отличие от схемы на рис.3.7, использовано двухполупериодное выпрямление измеряемого напряжения, поэтому её чувствительность вдвое больше. Для номинального тока через индикатор  $I_{РА.ном.}$ , соответствующего отметке 1,0 на шкале, можем записать:

$$I_{РАном.} = \frac{1}{T} \int_0^T k u^2 dt = k U_{эфф.ном}^2$$

откуда получаем значение  $k$ :

$$k = \frac{I_{PA\text{ном}}}{U_{\text{эфф.ном}}^2} = \frac{10^{-3}}{5^2} = 4 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{\text{А}}{\text{В}^2} \right].$$

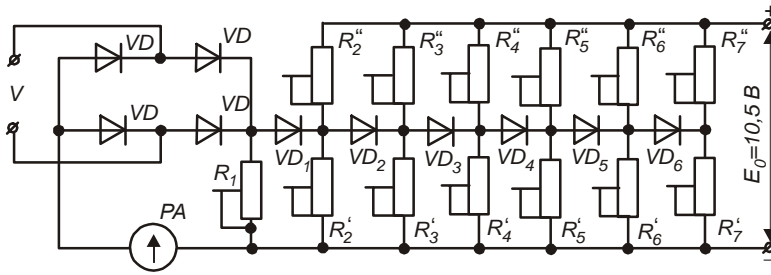


Рис. 9.1.2. Вольтметр эффективных значений с кусочно-линейной аппроксимацией квадратичной параболы

## 2. Расчёт схемы кусочно-линейной аппроксимации

Число участков аппроксимации параболы зависит от заданной погрешности аппроксимации  $\delta$ . Погрешность аппроксимации представляет собой или приведённую, или относительную погрешность. Приведённая погрешность аппроксимации выражается в процентах или долях от  $U_{\text{эфф.ном}}$ , относительная погрешность выражается в процентах или долях от текущего значения эффективного напряжения. В тех случаях, когда не требуется высокая точность аппроксимации, число участков и их границы могут быть найдены графически.

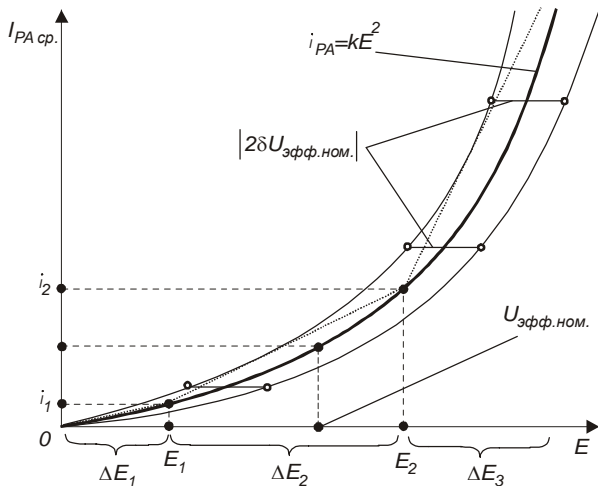


Рис. 9.1.3. Аппроксимация квадратичной параболы ломаной линией

Пусть, например, задана приведённая погрешность аппроксимации  $\delta$ . По формуле  $I_{PA,ср.} = kU_{\text{эфф}}^2$  в координатах напряжение – ток строится парабола  $kE^2$  (рис.9.1.3). Около этой параболы строится «коридор» допуска на погрешность аппроксимации постоянной ширины  $|2\delta U_{\text{эфф.ном}}|$ , считая по горизонтали. (Если задана относительная погрешность аппроксимации, ширина «коридора» допуска прямо пропорциональна текущему значению  $U_{\text{эфф}}$ ). Внутри этого «коридора», строя из начала координат, располагают ломанную линию так, чтобы ни одна её точка не вышла за пределы допуска. Обычно для упрощения расчётов предпочитают иметь отклонения только одного знака, располагая все отрезки ломанной с одной стороны параболы – слева, а все вершины ломанной – на параболе. При этом первый участок ломанной, считая от нуля, проводят максимальной длины, т.е. в направлении касательной в точке 0 к границе «коридора». Очевидно, что чем меньше должна быть погрешность аппроксимации, тем большее число участков должна иметь ломаная линия.

По окончании построения определяют координаты границ участков  $E_1, E_2, \dots, E_j, \dots$ , а также длины участков по оси напряжений  $\Delta E_1, \Delta E_2, \dots, \Delta E_j, \dots$ .

Напряжения  $E_1, E_2, \dots, E_j, \dots$  представляют собой обратные смещения, которые надо приложить к диодам  $VD_1, VD_2, \dots, VD_j, \dots$ , установив их с помощью делителей напряжения  $R_2' - R_2'', R_3' - R_3'', R_j' - R_j''$ , ... . Можно записать

$$E_j = E_0 \frac{R_j'}{R_j' + R_j''}. \quad (9.1.1)$$

Однако выбор величин сопротивлений плеч делителей напряжения не произволен.

На первом участке от 0 до  $E_1$  ток через индикатор определяется сопротивлением резистора  $R_1$ . На втором участке от  $E_1$  до  $E_2$  приращение тока определяется величиной параллельно соединённых (через источник напряжения  $E_0$ ) сопротивлений  $R_2'$  и  $R_2''$ . То же можно написать для остальных участков.

Если ввести обозначение

$$R_j = R_j' \parallel R_j'' = \frac{R_j' R_j''}{R_j' + R_j''}, \quad (9.1.2)$$

то с использованием (9.1.2) и (9.1.1) следует:

$$\left. \begin{aligned} R_j' &= R_j \frac{E_0}{E_0 - E_j}; \\ R_j'' &= R_j \frac{E_0}{E_j}. \end{aligned} \right\} \quad (9.1.3)$$

Сопротивления  $R_j$  определяются следующим образом. Для токов, соответствующих границам участков, можно записать:

$$i_1 = kE_1^2 = \frac{E_1}{R_1}; \quad (9.1.4)$$

$$i_2 = kE_2^2 = \frac{E_2}{R_1} + \frac{E_2 - E_1}{R_2}; \quad (9.1.5)$$

$$i_3 = kE_3^2 = \frac{E_3}{R_1} + \frac{E_3 - E_1}{R_2} + \frac{E_3 - E_2}{R_3}. \quad (9.1.6)$$

После вычитания из (9.1.5) выражения (9.1.4), а из (9.1.6) выражения (9.1.5) и т.д., а также повторной записи для общности (9.1.4) получается:

$$kE_1 = \frac{1}{R_1}; \quad (9.1.7)$$

$$k(E_2 + E_1) = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}; \quad (9.1.8)$$

$$k(E_3 + E_2) = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}. \quad (9.1.9)$$

Вновь вычитая из (9.1.8) выражение (9.1.7), а из (9.1.9) выражение (9.1.8), получаем:

$$kE_2 = \frac{1}{R_2}; \quad (9.1.10)$$

$$k(E_3 - E_1) = \frac{1}{R_3}. \quad (9.1.11)$$

С учётом того, что  $E_1 = \Delta E_1$ ,  $E_2 = \Delta E_1 + \Delta E_2$ ,  $E_3 = \Delta E_1 + \Delta E_2 + \Delta E_3$ , ... , из (9.1.7), (9.1.10), (9.1.11) находим:

$$R_1 = \frac{1}{k\Delta E_1};$$

$$R_2 = \frac{1}{k(\Delta E_1 + \Delta E_2)};$$

$$R_3 = \frac{1}{k(\Delta E_2 + \Delta E_3)},$$

или в общем случае

$$R_j = \frac{1}{k(\Delta E_{j-1} + \Delta E_j)}. \quad (9.1.12)$$

После подстановки найденного значения  $R_j$  в обе формулы (9.1.3) рассчитываются величины сопротивлений обоих резисторов делителей.

*Примечание.* В данном расчёте не участвуют внутренние сопротивления источника измеряемого напряжения, диодов и стрелочного индикатора. В схеме вольтметра их суммарная величина мала по сравнению с  $R_j$ , поэтому ими можно пренебречь. Если бы рассчитывался амперметр эффективного значения, пренебречь ими было бы нельзя.

### 3. Выполнение работы

1. Изучить, что собой представляют и как определяются величины переменного тока. Научиться, зная форму кривой переменного тока и тип прибора (измеритель амплитудного, среднего или эффективного значения), применяемого для измерения, определять погрешность измерения данным прибором.

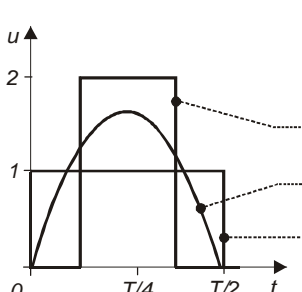
Для трёх переменных токов с одним и тем же средним значением (с одинаковой площадью, ограничиваемой кривой и осью времени), но разной формой кривой, а именно:

- синусоидального напряжения;
- идеального меандра;
- идеальных прямоугольных импульсов с  $k_3 = 0,5$ ,

полагая для меандра  $U_M = 1$ , рассчитать величины переменного тока и погрешность измерения приборами разных типов и заполнить табл.9.1.1.

Таблица 9.1.1

Погрешность отсчёта по шкалам приборов в процентах со знаком



Прибор поверен на постоянном токе и отградуирован в средних значениях			Прибор поверен на синусоидальном переменном токе и отградуирован в эффективных значениях		
По конструкции прибор является измерителем значения					
среднего	эффективного	амплитудного	среднего	эффективного	амплитудного
			0	0	0
0	0	0			

2. Рассчитать квадривирующую цепочку для вольтметра эффективного значения, аппроксимировав параболу до напряжения 10 В с приведённой погрешностью аппроксимации  $\delta$ , не превышающей 5%. Разобрав штеккерные соединения квадривирующей цепочки, с помощью омметра отрегулировать величины сопротивлений цепочки  $R_1, R_j', R_j''$ , а затем собрать схему вольтметра с нужным числом ячеек цепочки.

3. Отградуировать вольтметры, описать формы кривых переменного тока от источников, имеющих в стенде, найти погрешности измерений напряжений различной формы вольтметрами  $V_M, V_{cp.с.}, V$ . Для этого выполнить следующие операции.

1) С помощью внешнего образцового вольтметра отградуировать на постоянном токе от источника  $U_{пл}$  вольтметр  $V_{cp.с.}$  в средних значениях. Затем, используя в качестве образцового теперь уже вольтметр  $V_{cp.с.}$ , отградуировать в средневыпрямленных значениях вольтметры  $V_M$  и  $V$  на переменном синусоидальном токе от источника  $U_C$ . Построить градуировочные характеристики для всех вольтметров.

2) Включить параллельно все три вольтметра и осциллограф и поочередно подключать их к источникам  $U_C, U_M, V_{и.}$ . На каждом источнике по вольтметру средневыпрямленного значения  $V_{cp.с.}$  как образцовому устанавливать одинаковые выходные напряжения, равные  $U_{cp.с.} = 2,5 В$ , и записывать показания других вольтметров. Одновременно к этим расшифровать и измерить напряжения и времена на осциллограммах напряжений  $U_M$  и  $U_{и.}$ , которые имеют вид, показанный на рис.9.1.4, и следующие законы изменения мгновенных напряжений:

$$u_M = \begin{cases} U_M \frac{t}{t_1} & \text{при } 0 \leq t < t_1; \\ U_M & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2; \\ U_M \left( 1 - \frac{t - t_2}{(T/2) - t_2} \right) & \text{при } t_2 < t \leq \frac{T}{2}; \end{cases} \quad (9.1.13)$$



$$u_{II} = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq t < t_1; \\ U_M \frac{t-t_1}{t_2-t_1} & \text{при } t_1 \leq t < t_2; \\ U_M & \text{при } t_2 \leq t \leq t_3; \\ U_M \left(1 - \frac{t-t_3}{t_4-t_3}\right) & \text{при } t_3 < t \leq t_4; \\ 0 & \text{при } t_4 < t \leq T/2. \end{cases} \quad (9.1.14)$$

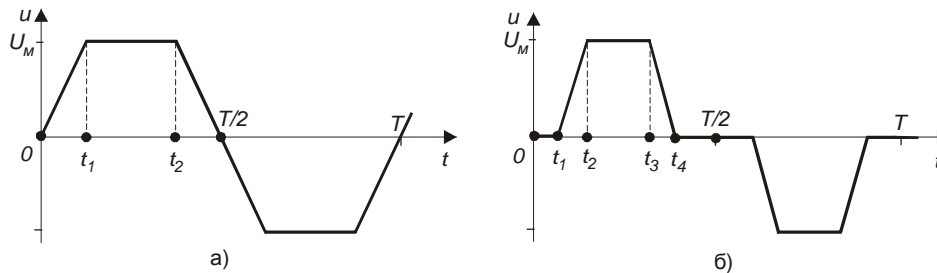


Рис. 9.1.4. Формы кривых мгновенных напряжений источников лабораторного стенда:  
а) форма трапецеидальных колебаний; б) форма разнополярных импульсов

Для получения сравнимых результатов вычислить  $U_M$  в обоих случаях по известному значению  $U_{cp.в.} = 2,5 \text{ В}$  и площади под кривой (по интегралу).

Для напряжений  $U_M$  и  $U_{II}$  с использованием зависимостей (9.1.13) и (9.1.14) и вычисленных значений  $U_M$  рассчитать коэффициенты амплитуды  $k_a$  и формы  $k_{\phi}$ , а также значения напряжений (в средних значениях), которые должны были показать вольтметры в поставленных опытах.

Результаты экспериментов и расчётов внести в табл.9.1.2: в каждой клетке таблицы представить результат в виде дроби, в числителе которой записать полученное непосредственно из опыта, а в знаменателе – рассчитанное значение напряжения. Объяснить результаты.

3) Расчётным путём переградуировать шкалу вольтметра  $V_{cp.в.}$  (построить новую градуировочную характеристику) для измерения эффективного значения синусоидального напряжения ( $k_{\phi} = 1,11$ ).

Включить параллельно все три вольтметра и подключить их к источнику  $U_C$ . Используя  $V_{cp.в.}$  как образцовый (с новой градуировкой), переградуировать вольтметры  $V$  и  $V_M$  в эффективных значениях во всём диапазоне измеряемых напряжений.

Поочерёдно подключить все три параллельно соединённых вольтметра к источникам  $U_M$  и  $U_{II}$  и, используя как образцовый вольтметр эффективных значений, установить по нему выходные напряжения источников  $U_{эфф} = 2,5 \text{ В}$ . Записать показания других вольтметров (в эффективных значениях) и занести в табл.9.1.2. Рассчитать значения напряжений, которые должны были показать вольтметры в этом опыте, результаты также внести в табл.9.1.2.

Объяснить полученные результаты.

Таблица 9.1.2

Опытные данные, показания вольтметров в вольтах

Тип источника напряжения	Прибор поверен на постоянном токе и отградуирован в средневыпрямленных значениях напряжения			Прибор поверен на синусоидальном переменном токе и отградуирован в эффективных значениях напряжения		
	Показания вольтметров в вольтах					
	$V_{cp.в.}$	$V$	$V_M$	$V_{cp.в.}$	$V$	$V_M$
$U_{II}$						
$U_C$						
$U_M$						

#### 4. Оформление отчёта

Отчёт должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) формулы для расчёта среднего, средневыпрямленного, эффективного и амплитудного значений напряжения и тока;
- 3) определения и таблицу значений коэффициентов амплитуды и формы для напряжений разной формы (см. табл.3.2);
- 4) схемы вольтметров  $V_{ср.в.}$ ,  $V$ ,  $V_M$  лабораторного стенда и описание их работы;
- 5) расчёт схемы quadriрующей цепочки вольтметра  $V$ ;
- 6) табл.9.1.1 и требующиеся для неё расчёты;
- 7) описание опытов для заполнения табл.9.1.2, градуировочные характеристики и поясняющие расчёты;
- 8) выводы по этапам работы и по работе в целом.

#### Вопросы для самопроверки

1. Что такое мгновенное значение, как определить и измерить мгновенное значение тока и напряжения?
2. Что такое среднее значение? Как, зная закон изменения мгновенного значения, вычислить среднее значение напряжения или тока?
3. Чем отличается среднее значение от средневыпрямленного значения?
4. Как вычисляются эффективные значения  $I_{эфф}$ ,  $U_{эфф}$ ?
5. Что такое коэффициенты амплитуды и формы сигналов? Как по величине этих коэффициентов составить представление о форме кривой сигнала по сравнению, например, с синусоидой?
6. Чему равны коэффициенты амплитуды и формы синусоидального сигнала, треугольного сигнала, однополярных, а также разнополярных симметричных прямоугольных импульсов с известным коэффициентом заполнения?
7. Как, зная градуировку прибора известной измерительной системы на синусоидальном токе, определить погрешность измерения им напряжения с другой, также известной, формой кривой?

#### Библиографический список

1. Ермуратский П.В., Лычкина Г.П., Минкин Ю.Б. Электротехника и электроника. –М.: Из-во "ДМК Пресс", 2011. - 417 с.
2. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. - М.: Из-во "Лань", 2009. - 592 с
3. Электрические измерения. Средства и методы измерений. (Общий курс): Учеб пособие / под ред. Е.Г. Шрамкова. – М.: Высш.шк., 1972 – 520с.

## 9.2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

### ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

*Цели работы:*

- 1) изучить материалы глав 3,4 и 8;
- 2) ознакомиться со способами и схемами осциллографического сравнения частот, а именно, с круговой разверткой, с модуляцией яркости луча, по фигурам Лиссажу.

*Приборы и материалы:* лабораторный стенд, частотомер-калибратор Ч1-5, частотомер Ф433/3, звуковой генератор, генератор импульсов Г4-5.

#### 1. Обзор схем осциллографического способа

Частоту можно измерять методами сравнения, резонансным и дискретного счета.

Для измерения неизвестной частоты  $f_x$  методом сравнения необходимо иметь образцовую частоту  $f_0$  и индикатор, с помощью которого можно определить равенство или кратность  $f_x$  и  $f_0$ . Если в качестве индикатора используется осциллограф, способ называется осциллографическим. Метод сравнения принципиально пригоден для измерения низких и высоких частот, прост и довольно точен.

Резонансный метод основан на явлении электрического резонанса, возникающего в колебательном контуре. Метод применяется на высоких и сверхвысоких частотах.

Принцип метода дискретного счета заключается в подсчете числа периодов измеряемой частоты за известный высокостабильный интервал времени.

Осциллографический способ измерения частоты можно применять при линейной, синусоидальной и круговой развертке.

#### 1.1. Схема измерения при линейной развёртке

При линейной развертке в качестве образцовой частоты  $f_0$  используется частота генератора развертки данного осциллографа. Напряжение неизвестной частоты  $f_x$  подают на вход канала вертикального отклонения осциллографа, а частоту генератора развертки  $f_0$  (обязательно при выведенной ручке напряжения синхронизации) изменяют до получения стабильного изображения одного периода. При этом  $f_x$  равна установленной частоте развертки. Если на экране получить изображение  $n$  периодов, то  $f_x = nf_0$ . Практически  $n$  не должно быть больше 5...6.

В современных осциллографах частота развертки, по большей части, калибрована, и погрешность измерения соответствует погрешности калибровки.

Диапазон частот определяется полосой пропускания канала вертикального отклонения.

#### 1.2. Сравнение частот по фигурам Лиссажу

При синусоидальной развертке напряжение неизвестной частоты  $f_x$  подается на вход канала вертикального отклонения, а напряжение образцовой частоты  $f_0$  – на вход канала горизонтального отклонения (рис.9.2.1). Генератор развертки осциллографа отключается.

Изменяя  $f_0$ , добиваются получения неподвижной или медленно движущейся фигуры Лиссажу. Если она имеет вид прямой, эллипса или окружности, то частоты равны:  $f_0 = f_x$ . Если неподвижная осциллограмма имеет более сложную форму, это свидетельствует о кратности неизвестной и образцовой частот, которую можно определить следующим образом.

Полученную фигуру нужно мысленно пересечь вертикальной и горизонтальной линиями (рис.9.2.2) и сосчитать число пересечений ветвей фигуры по горизонтали  $n_e$  и по вертикали  $n_v$ . Отношение этих чисел обратно отношению частот, поданных на вертикальный и горизонтальный каналы.

В рассматриваемом случае имеем

$$\frac{n_e}{n_v} = \frac{f_x}{f_0},$$

откуда получаем

$$f_x = \frac{n_e}{n_v} f_0.$$

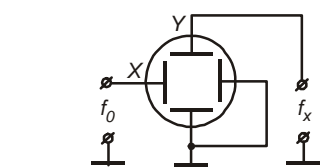


Рис. 9.2.1. Сравнение частот при синусоидальной развёртке

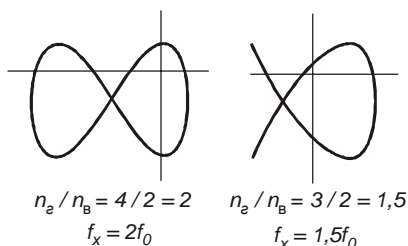


Рис. 9.2.2. К определению кратности частот при синусоидальной развёртке

Синусоидальная развертка применяется до кратности частот, меньшей 10, так как большее число пересечений трудно сосчитать.

Верхний предел измеряемой частоты определяется полосой пропускания усилителей в каналах осциллографа. Если напряжения сравниваемых частот достаточно велики, их можно подавать непосредственно на пластины электроннолучевой трубки. При этом верхний предел измерения частоты достигает 100 МГц и более. Погрешность измерения определяется погрешностью установки образцовой частоты и нестабильностью обеих частот.

### 1.3. Сравнение частот при круговой развертке

Круговая развертка получается при подаче на обе пары пластин (непосредственно или через усилители каналов) синусоидальных напряжений одной частоты, сдвинутых по фазе между собой на  $90^\circ$ :

$$u_Y = U_Y \sin \omega t \text{ и } u_X = U_X \sin(\omega t + \pi / 2).$$

Если этот угол отличается от  $90^\circ$ , на экране получается изображение эллипса. Если  $f_x > f_0$ , круговую развертку получают с помощью напряжения образцовой частоты  $f_0$ . На экране линия развертки вращается с частотой  $f_0$ , т.е. время одного оборота равно длительности периода. Сдвиг напряжений легко получается с помощью простой RC-цепочки (рис. 9.2.3). Напряжение неизвестной частоты  $f_x$  подают на модулятор трубки, и оно изменяет яркость луча один раз за период частоты  $f_x$ , так что при положительном полупериоде яркость возрастает, а при отрицательном – уменьшается. Можно отрегулировать начальную яркость так, что при отрицательных полупериодах луч гаснет, и осциллограмма будет иметь вид окружности, состоящей из светлых и темных штрихов.

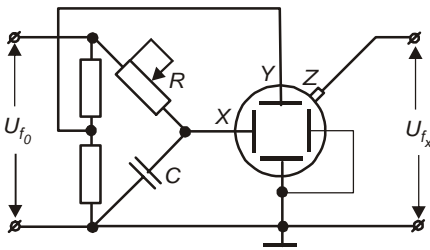


Рис. 9.2.3. Измерение частоты с круговой развёрткой и модуляцией яркости луча

Если частоты  $f_0$  и  $f_x$  равны, половина окружности будет светлой, а половина темной. Если  $f_x > f_0$ , число светлых (или темных) штрихов  $n$  равно кратности  $f_x$  и  $f_0$ :

$$f_x = n f_0.$$

Напряжение с неизвестной частотой  $f_x$  может быть и несинусоидальным; в этом случае при  $f_x \geq f_0$  длины штрихов будут различными. При  $f_x < f_0$  картина развертки становится отличной от окружности и измерение затруднено. Если частоты не кратны, осциллограмма вращается, и измерение зачастую вообще невозможно.

Если напряжение с частотой  $f_x$  – импульсы с небольшим коэффициентом заполнения, удобно применять схему, изображенную на рис. 9.2.4а. Напряжение с частотой  $f_0$  расщепляется RC-цепочкой на два напряжения, сдвинутые по фазе на некоторый угол, в результате чего на экране получается изображение эллипса. Исследуемые импульсы с частотой следования  $f_x$  подают на канал вертикального отклонения через смеситель на резисторах  $R_1$  и  $R_2$ . При кратности частот один, два, три и т.д. получают соответственно изображения, как на рис.9.2.4 б–г и им аналогичные.

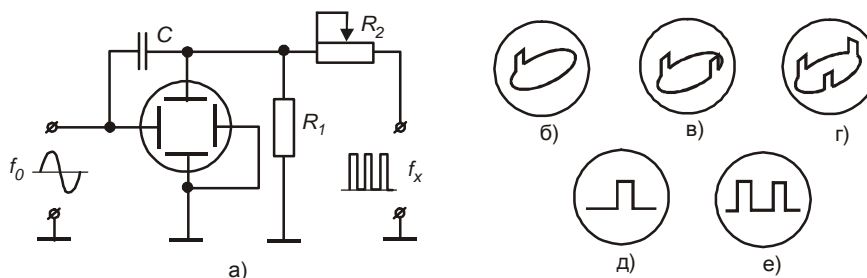


Рис. 9.2.4. Измерение частоты следования импульсов с эллиптической развёрткой: а) схема установки; б)  $f_x = 1f_0$ ; в)  $f_x = 2f_0$ ; г)  $f_x = 3f_0$ ; д)  $f_x = 1f_0$ ; е)  $f_x = 2f_0$

Такое же измерение можно выполнить и без фазосдвигающей схемы. Для этого на канал горизонтального отклонения подают напряжение образцовой частоты, а на канал вертикального – неизвестной частоты. При равенстве частот на экране будет один импульс (рис.9.2.4д), при  $f_x = 2f_0$  – два (рис.9.2.4е). Однако при такой развертке импульсы могут оказаться совмещенными в один импульс (при соответствующем сдвиге фаз между напряжениями), что приведет к ошибке измерения. Чтобы избежать ошибки, измерение надо провести на нескольких кратных образцовых частотах.

## 2. Лабораторная установка

Лабораторная установка представляет собой стенд со штеккерным наборным полем, в котором размещены генератор импульсов частоты  $f_x$  с источником питания, две фазосдвигающие RC-цепочки, частотомер Ч1–5 с кварцевым калибратором, генератором образцовой частоты  $f_0$ , встроенным осциллографом и звуковым генератором (ЗГ), генератор импульсов Г5-4 и частотомер Ф433/3. Генератор образцовой частоты, осциллограф, генератор звуковой частоты и частотомер соединяются со стендом проводами, входящими в комплект установки. Каждая из схем собирается на стенде с помощью проводов, снабженных штеккерами.

## 3. Выполнение работы

1. Собрать по рис.9.2.1 установку для калибровки шкал генератора звуковой частоты  $f_x$  по фигурам Лиссажу. Для каждого из диапазонов генератора звуковой частоты (по указанию преподавателя) составить таблицу по приведённой ниже форме и построить график в координатах «Отметка на шкале, деления» – «Образцовая частота  $f_0$ , Гц», соединив точки плавной линией. Для контроля правильности расшифровки фигур следует пользоваться частотомером Ф433/3.

2. Собрать схему по рис.9.2.3 и отградуировать шкалу генератора импульсов с частотой следования импульсов  $f_x$ , подавая напряжение с частотой  $f_x$  на канал Z. Результаты также представить таблицей и графиком.

3. Собрать схему по рис.9.2.4 и убедиться в применимости этой схемы как для измерения импульсного напряжения (от генератора импульсов лабораторного стенда или Г5–4), так и синусоидально-го (от звукового генератора частотомера–калибратора Ч1–5).

Таблица

Градуировка звукового генератора

Образцовая частота или её гармоника $f_0$ , Гц	Градуируемый диапазон генератора	Положение указателя на шкале звукового генератора, деления

## 4. Оформление отчета

Отчёт по работе должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) краткое описание схем осциллографического способа сравнения частот и сами схемы;
- 3) таблицы экспериментальных данных и графики;
- 4) выводы по этапам работы и по работе в целом.

### Вопросы для самопроверки

1. Изложить суть основных методов измерения частоты.
2. Нарисовать схему измерения частоты осциллографическим методом линейной развёртки.
3. Изложить методику подсчёта неизвестной частоты при сравнении частот по фигурам Лиссажу.
4. Нарисовать схему для сравнения частот при круговой развёртке и методику определения неизвестной частоты.

### Библиографический список

1. Ермуратский П.В., Лычкина Г.П., Минкин Ю.Б. Электротехника и электроника. –М.: Из-во "ДМК Пресс", 2011. - 417 с.
2. Измерения в электронике: Справочник / В.А.Кузнецов, В.А.Долгов, В.М.Коневских и др.; Под ред. В.А.Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.: ил.
3. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин. – М.: Высшая школа, 1982.

### 9.3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

#### ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА

*Цель работы:*

- 1) изучить материал глав 3,4 и 8;
- 2) ознакомиться с основными методами измерения фазового сдвига;
- 3) отградуировать фазовращатель;
- 4) изучить конструкцию и отградуировать стрелочный фазометр лабораторного стенда.

*Приборы и материалы:* лабораторный стенд, осциллограф, фазометр.

#### 1. Основные сведения о методах измерения

Гармонический сигнал  $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$  характеризуется амплитудой, частотой и фазой. Текущая фаза  $\omega t$  определяет сигнал в данный момент времени; начальная фаза  $\varphi_1$  постоянна и определяет момент перехода сигнала через принятую точку отсчета. Два гармонических сигнала одной частоты с разными начальными фазами дополнительно характеризуются фазовым сдвигом между ними

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Практически начальную фазу одного из сигналов принимают равной нулю, например,  $\varphi_2 = 0$ , и тогда фазовый сдвиг оказывается равным начальной фазе другого сигнала, в данном случае  $\varphi = \varphi_1$ .

Фазовый сдвиг измеряется в радианах или градусах, фазовый сдвиг появляется в том случае, если гармонический сигнал проходит по электрической цепи, в которой он задерживается или в которой имеются транзисторные каскады, поворачивающие фазу на  $180^\circ$ , трансформаторы, фильтры и другие четырехполюсники. Имеются приборы – фазовращатели – специально предназначенные для создания в цепи известного фазового сдвига.

Основными методами измерения фазового сдвига являются осциллографический, компенсационный, метод преобразования фазового сдвига в импульсы тока, фазового детектора и дискретного счета.

#### 1.1. Осциллографический метод

Осциллографический метод реализуется двумя способами: линейной развертки с двухлучевым осциллографом и синусоидальной развертки с однолучевым осциллографом.

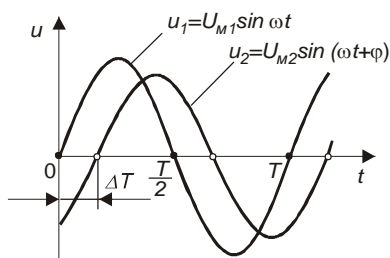


Рис. 9.3.1. Определение фазового сдвига при линейной развёртке

По способу линейной развертки с двухлучевым осциллографом на осциллограмме (рис.9.3.1) измеряют отрезки  $\Delta T$  и  $T$  и фазовый сдвиг вычисляют по формуле

$$\varphi = 360 \frac{\Delta T}{T} [\text{град.}] .$$

Для повышения точности измерения оси времени обоих сигналов обычно совмещают друг с другом.

По способу синусоидальной развертки на осциллограмме (рис.9.3.2), представляющей собой эллипс, измеряют отрезки  $A$  и  $B$  и вычисляют фазовый сдвиг по формуле

$$\varphi = \arcsin \frac{B}{A},$$

где  $A$  и  $B$  – отрезки, образующиеся пересечением эллипса с вертикальной линией, проходящей через его центр.

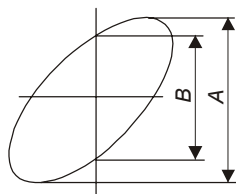


Рис. 9.3.2. Определение фазового сдвига при синусоидальной развёртке

Осциллографическому методу присуща погрешность вследствие конечности диаметра луча, ограниченной точности отсчёта длин отрезков, измеряемых с помощью масштабной сетки, нелинейных искажений усилителей, генераторов развёртки и трубки.

Другим источником погрешности является наличие фазового сдвига между входным и выходным напряжениями в усилителях каналов осциллографа. Для обнаружения этой погрешности каналы проверяют, подавая одно и то же напряжение данной частоты на

оба входа ( $Y$  и  $X$ ) одновременно: при отсутствии фазового сдвига на экране имеется изображение прямой линии, при наличии фазового сдвига – изображение эллипса. Измерив значение собственного фазового сдвига каналов, его надо исключить из результата измерения фазового сдвига между двумя напряжениями.

При измерении фазового сдвига по способу синусоидальной развертки получают одинаковые осциллограммы при углах  $+\varphi$  и  $-\varphi$ , т.е. нельзя сказать, какое из напряжений  $u_1$  или  $u_2$  является опережающим.

Для устранения этой неопределенности в одно из напряжений вводят дополнительный небольшой фазовый сдвиг в известном направлении, и по изменению вида осциллограммы определяют действительный знак фазового сдвига. Дополнительный фазовый сдвиг в сторону опережения может быть создан включением последовательно с одним из напряжений конденсатора, а в сторону отставания – индуктивности.

Пусть, например, на экране имеется изображение наклонного эллипса, расположенного в первом и третьем квадрантах. Если последовательно с одним из напряжений включить конденсатор, и эксцентриситет эллипса увеличится, а его большая ось повернется по часовой стрелке, это напряжение отстает по фазе от другого; если эксцентриситет уменьшится, а большая ось эллипса повернется против часовой стрелки и останется в тех же квадрантах или даже переместится во второй и четвертый квадранты – напряжение опережает по фазе другое.

При включении последовательно с одним из напряжений индуктивности рассуждения аналогичны.

Погрешность измерения осциллографическими методами составляет 2...5 градусов.

*Замечание.* Приведенная выше формула и рассуждения, касающиеся способа синусоидальной развертки, справедливы лишь в том случае, если при подаче положительного напряжения на входы Y и X луч смещается соответственно вверх и вправо. Однако имеются осциллографы, у которых луч по оси X смещается влево, и тогда изображение на экране будет расположено в других квадрантах, что нужно учесть при расшифровке.

## 1.2. Компенсационный метод

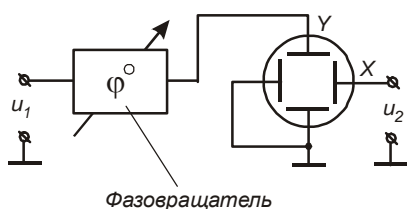


Рис. 9.3.3. Принцип компенсационного метода измерения фазового сдвига

Метод состоит в том, что в одно из исследуемых напряжений вводится известный фазовый сдвиг, равный по значению и обратный по знаку фазовому сдвигу между измеряемыми напряжениями  $u_1$  и  $u_2$ . Для этого последовательно включается градуированный фазовращатель, и путем его регулирования устанавливают результируемый фазовый сдвиг, равный  $0^\circ$  или  $180^\circ$ . При этом на экране будет изображение наклонной прямой линии. Схема измерения приведена на рис. 9.3.3.

Погрешность измерения компенсационным методом определяется только погрешностью градуировки фазовращателя.

## 1.3. Метод преобразования фазового сдвига в импульсы тока

В этом методе *фазовый сдвиг* в каждом периоде измеряемых напряжений преобразуется в прямоугольный импульс, длительность которого пропорциональна фазовому сдвигу, а амплитуда неизменна. В результате образуется последовательность однополярных импульсов тока, среднее значение которой пропорционально фазовому сдвигу. На основе этого метода построены прямопоказывающие приборы – фазометры, стрелочный индикатор которых отградуирован непосредственно в градусах.

Структурная схема фазометра представлена на рис. 9.3.4 а. Фазометр состоит из двух одинаковых каналов, в которых исследуемые напряжения усиливаются, ограничиваются по амплитуде и однополупериодно выпрямляются, а получившиеся в результате положительные прямоугольные импульсы

$u_1$  и  $u_2$  дифференцируются цепями ДЦ. На выходе каждого из каналов образуются короткие положительные и отрицательные импульсы, положение которых на оси времени совпадает с моментами перехода через нулевые значения входных сигналов. Полученный в результате дифференцирования короткий импульс  $u_{\partial 1}$ , совпадающий по времени с фронтом прямоугольного импульса первого канала, устанавливает триггер в единицу. Короткий импульс  $u_{\partial 2}$ , совпадающий с фронтом импульса второго канала, сбрасывает триггер в нуль. Интервал времени между этими импульсами  $\Delta T$  пропорционален фазовому сдвигу между исследуемыми напряжениями, этому же времени равна продолжительность импульса на выходе триггера. В цепь выхода триггера включен магнитоэлектрический микроамперметр РА, показания которого пропорциональны среднему току за период, т.е. фазовому сдвигу  $\varphi = 360 \frac{\Delta T}{T}$ , град. Это

позволяет проградуировать шкалу микроамперметра непосредственно в градусах, шкала прибора получается линейной, что уменьшает погрешности, связанные с градуировкой.

Диапазон частот стрелочного фазометра достигает сотен килогерц, на высоких частотах погрешность растет вследствие влияния паразитной индуктивности и емкости схемы. Погрешность измерения – 1 ... 2,5°.

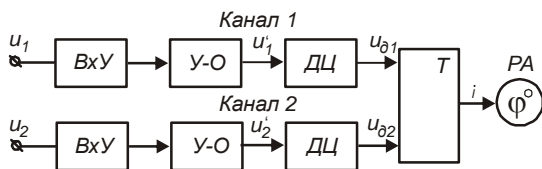
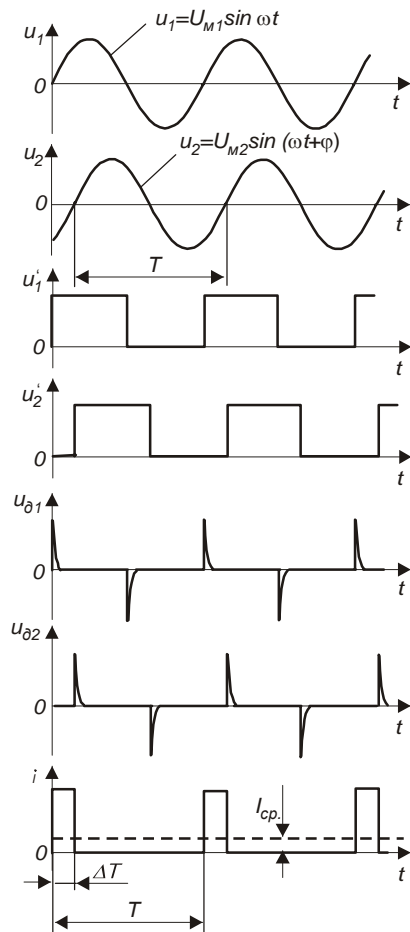


Рис. 9.3.4. Стрелочный фазометр:  
 а) структурная схема;  
 б) графики напряжений и тока в отдельных характерных точках схемы

Принятые обозначения:  
 ВхУ - входное устройство;  
 У-О - усилитель-ограничитель;  
 ДЦ - дифференцирующая цепь;  
 Т - триггер;  
 РА - стрелочный индикатор;  
 $I_{cp}$  - среднее значение тока через индикатор



#### 1.4. Метод фазового детектора

Известно, что если на вход фазового детектора подать два напряжения с одинаковой амплитудой  $U_1 = U_2 = U_m$ , напряжение на его выходе зависит от фазового сдвига  $\varphi$

$$U = 2U_m \left[ \left| \cos \frac{\varphi}{2} \right| - \left| \sin \frac{\varphi}{2} \right| \right].$$

Эта зависимость почти линейна, и шкалу измеряющего напряжение  $U$  прибора можно проградуировать в значениях  $\varphi$ .

Диапазон частот, в котором применяется фазовый детектор, достигает сотен мегагерц, погрешность составляет 2...3°.

#### 1.5 Метод дискретного счёта

Фазовый сдвиг можно измерить методом дискретного счёта, если интервал  $\Delta T$  и период  $T$  (см. рис.9.3.4 б) заполнить прямоугольными импульсами напряжения с известной стабильной частотой следования, сосчитать их количество соответственно  $m$  и  $n$  и вычислить фазовый сдвиг по формуле

$$\varphi = 360 \frac{m}{n}, \text{ град.}$$

Диапазон частот подобных измерителей достигает десятков мегагерц, погрешность – 1 ... 2°.

### 2. Лабораторная установка

Лабораторная установка состоит из лабораторного стенда и расположенных отдельно одно- или двухлучевого осциллографа, своими каналами Y и X подключаемого к стенду с помощью соединительных проводов, и электронного фазометра, используемого в качестве образцового.

Лабораторный стенд содержит источник питания, фазовращатель, градуируемый стрелочный фазометр и двухканальный электронный коммутатор для однолучевого осциллографа. Источник питания обеспечивает постоянными напряжениями фазометр и электронный коммутатор и переменным напря-



жением 10 В с частотой сети (50 Гц) фазовращатель. Источник питания включается тумблером на панели стенда. В других пояснениях работа с источником питания не нуждается. Остальные приборы стенда рассмотрены ниже.

## 2.1. Фазовращатель

Фазовращатель дает на выходе переменные напряжения, фазовый сдвиг между которыми известен и регулируется плавно. Фазовращатель (рис.9.3.5 а) представляет собой устройство, состоящее из двух одинаковых по величине безындуктивных резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , параллельно которым подключены последовательно соединенные между собой конденсатор  $C$  и резистор с переменным сопротивлением  $R$ . Как следует из векторной диаграммы (рис.9.3.5 б), напряжения на резисторах  $R_1$  и  $R_2$ , являющиеся выходными напряжениями  $u_1$  и  $u_2$  фазовращателя, сдвинуты друг относительно друга на угол  $\varphi_1$ , который изменяется в пределах  $0 \dots 90^\circ$  при изменении сопротивления резистора  $R$  от  $0$  до  $\infty$ .

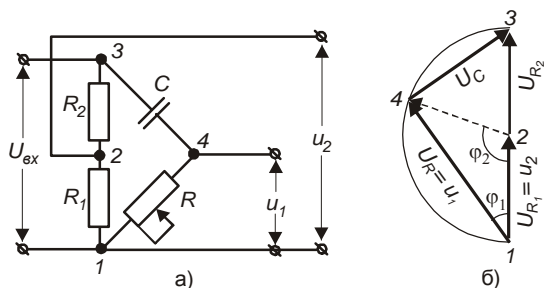


Рис. 9.3.5. Фазовращатель: а) принципиальная схема; б) векторная диаграмма

Если в качестве общей взять точку 2, и выходные напряжения  $u_{2-4}$  и  $u_{2-1}$  снимать с точек 2–4 (показано на рис. 9.3.5 б штриховой линией) и 2–1, фазовый сдвиг между этими напряжениями  $\varphi_2$  при изменении сопротивления резистора  $R$  в тех же пределах можно регулировать от  $0$  до  $180^\circ$ . Фазовый сдвиг между напряжениями  $u_{4-3}$  (точки 4–3) и  $u_{4-1}$  (точки 4–1) постоянен и равен  $90^\circ$ .

Фазовращатель градуируется на определённой частоте, с изменением частоты нарушается градуировка. В лабораторном стенде используется частота сети  $50 \text{ Гц} \pm 2 \%$ , что, с учетом погрешности градуировки, дает возможную точность установки угла фазового сдвига не лучше чем  $5^\circ$ . Погрешность возрастает к концам шкалы.

Регулируемый резистор  $R$  выведен на переднюю панель стенда и снабжён шкалой, условно разбитой на 50 делений.

## 2.2. Двухканальный электронный коммутатор

Двухканальный электронный коммутатор для однолучевого электронного осциллографа служит для одновременного наблюдения на экране осциллографа двух напряжений.

Коммутатор имеет два входа  $Vx.1$  и  $Vx.2$ , на которые относительно шины  $Общ.$  подаются исследуемые напряжения, и один выход, подключаемый ко входу  $Y$  осциллографа. Чувствительность по входам регулируется переменными резисторами, расположенными на передней панели стенда. Введением последовательно с входными сигналами регулируемой постоянной составляющей напряжения осциллограммы на экране можно смещать по вертикали относительно друг друга; орган управления смещением выведен на переднюю панель.

## 2.3. Стрелочный фазометр

Стрелочный фазометр стенда построен по структурной схеме, приведенной на рис.9.3.4, но имеет несколько отличий. Его принципиальная схема изображена на рис. 9.3.6.

Каскады усилителя-ограничителя У-О выполнены с трансформаторными входами, благодаря чему возможно измерять фазовый сдвиг между напряжениями в цепях, не имеющих общих точек. Трансформаторы включены так, что при подаче на входы фазометра синфазных напряжений (угол фазового сдвига  $\varphi = 0$ ) на входах транзисторных каскадов усилителей-ограничителей напряжения противофазны, и сигнал на выходе триггера  $T$  представляет собой симметричные однополярные прямоугольные импульсы напряжения, т.е. половину периода на выходе триггера имеется логическая 1, а вторую половину – логический 0. Среднее значение этого напряжения равно половине напряжения питания. Показывающий прибор со шкалой с нулём, расположенным посередине, подключён к выходу триггера по мостовой схеме, и реостатом «Установка нуля» при синфазном входном сигнале его стрелка устанавливается на нуль. При подаче на входы фазометра противофазных сигналов среднее напряжение на выходе триггера равно нулю, а стрелка показывающего прибора может быть установлена на начало шкалы реостатом «Конец шкалы».

## 2.4. Устройство для создания дополнительного фазового сдвига в сторону опережения в цепи одного из напряжений

Это устройство состоит из конденсатора  $C_1$ , замкнутого замыкающими контактами кнопки  $S_2$ , установленной на передней панели стенда. Эта цепь включается последовательно с одним из исследуемых напряжений, подаваемых в каналы осциллографа.

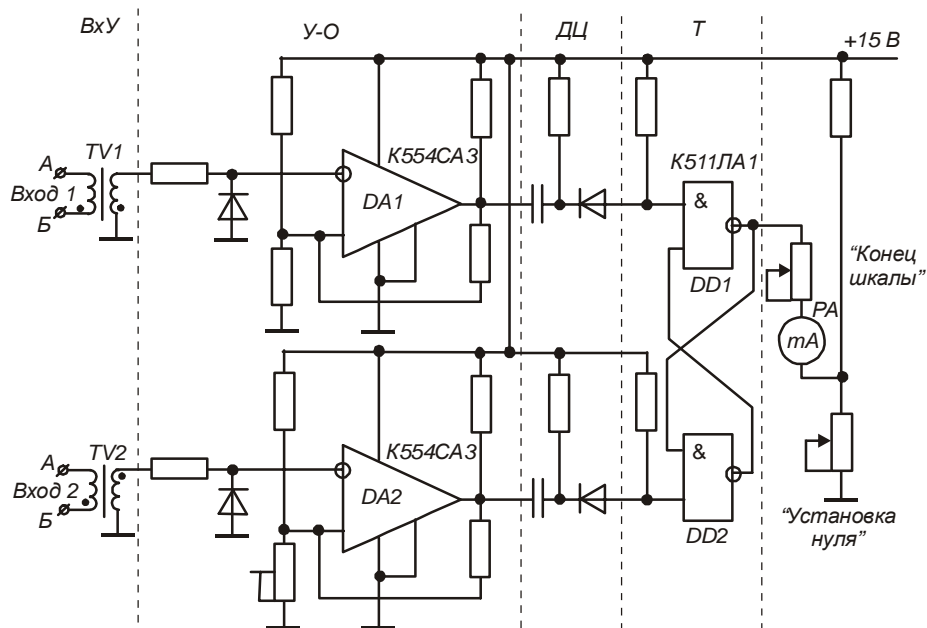


Рис. 9.3.6. Принципиальная схема стрелочного фазометра лабораторного стенда

### 3. Выполнение работы

1. Тумблером  $S_1$  включить питание стенда.

2. С помощью образцового фазометра, входящего в комплект лабораторной установки, отградуировать фазовращатель.

Для этого на входы фазометра следует подать напряжения  $u_1$  и  $u_2$ , снимаемые с точек 1 – 4 и 1 – 2. Устанавливая указатель на движке регулируемого резистора фазовращателя на каждое пятое деление, измерить и занести в заранее подготовленную таблицу результаты фазовый сдвиг. По этим данным построить градуировочную характеристику фазовращателя на графике с осями: по горизонтали – деления на шкале фазовращателя от 0 до 50; по вертикали – фазовый сдвиг, который в этом опыте может изменяться в пределах от 0 до 90 градусов.

3. Используя однолучевой осциллограф с электронным коммутатором или двухлучевой осциллограф, вновь отградуировать фазовращатель по выходам  $u_1$  и  $u_2$  способом линейной развёртки.

Если используется однолучевой осциллограф, на входы коммутатора с фазовращателя подать напряжения  $u_1$  и  $u_2$  (общая точка напряжений – точка 1). Отрегулировать развертку осциллографа так, чтобы получить один период исследуемых напряжений. Манипулируя ручками управления коммутатором, отрегулировать размер изображения и совместить оси времени обоих напряжений.

Как и ранее, устанавливать стрелку на движке регулируемого резистора фазовращателя на каждое пятое деление, измерить и занести в ту же таблицу фазовый сдвиг. По этим данным построить на том же графике вторую градуировочную характеристику. Если обе градуировочные характеристики не совпадают между собой, проверить в обоих случаях чистоту опыта, повторить, если нужно, опыты, найти причину расхождения и оценить величину погрешности по всему диапазону измерения фазового сдвига способом линейной развёртки, считая действительными значениями значения по градуировочной характеристике, полученной с помощью фазометра.

4. Используя способ синусоидальной развёртки, отградуировать фазовращатель по выходам  $u_{2-4}$  и  $u_{2-3}$ .

На вход  $Y$  подать напряжение  $u_{2-4}$ , на вход  $X$  – напряжение  $u_{2-3}$  (общая точка напряжений – точка 2). Через каждые 5 делений по шкале резистора  $R$  вычислить фазовый сдвиг и занести в другую таблицу опытных данных. Поменяв местами точки подключения каналов  $Y$  и  $X$ , убедиться, что при данном угле фазового сдвига расположение эллипса на экране осциллографа не меняется. С помощью устройства  $C_1 - S_2$  определить, какое из напряжений является опережающим по фазе, что также следует отразить в таблице.

По результатам построить градуировочный график.

То же проделать для напряжений  $u_{2-4}$  и  $u_{2-1}$  (общая точка – 2).

Определить, какое из напряжений является опережающим. Результаты занести в третью таблицу опытных данных и построить градуировочный график.

Для контроля правильности полученных результатов проверить некоторые точки градуировочных графиков измерением угла фазового сдвига с помощью образцового фазометра.

5. Выставить желаемые пределы измерения  $\varphi = \pm 180^\circ$  и отградуировать стрелочный фазометр. Для этого проделать следующее.

1) Подать на Вх.1 и Вх.2 фазометра синфазные напряжения, другими словами, соединить эти входы параллельно и подать на них одно и то же напряжение. Манипулируя ручкой управления «Установка нуля», установить стрелку на середину шкалы.

2) Подать на входы стрелочного фазометра противофазные напряжения, т.е. соединить их перекрёстно и подать на них одно и то же напряжение, и, манипулируя ручкой управления «Конец шкалы», установить стрелку на конец шкалы.

3) Повторяя описанные операции, найти такие положения ручек «Установка нуля» и «Конец шкалы», при которых отметки  $\varphi = 0^\circ$  и  $\varphi = 180^\circ$  находятся в середине и в конце шкалы соответственно.

4) Подать на входы Вх.1 и Вх.2 стрелочного фазометра напряжения  $u_{2-4}$  и  $u_{2-3}$ . Меняя угол фазового сдвига между ними через  $10^\circ$ , отградуировать половину шкалы фазометра, результаты занести в таблицу градуировки стрелочного фазометра и построить градуировочную характеристику в осях:

по горизонтали – деления по шкале прибора  $-180^\circ \dots 0 \dots +180^\circ$ ;

по вертикали – фазовый сдвиг с пределами  $-180^\circ \dots 0 \dots +180^\circ$ .

5) На Вх.1 оставить прежнее напряжение  $u_{2-4}$ , на Вх.2 подать напряжение  $u_{2-1}$ , (общая точка – 2). Поступая, как в предыдущем пункте, отградуировать вторую половину шкалы, занеся результаты в ту же таблицу и построив градуировочную характеристику.

#### 4. Оформление отчёта

Отчет по работе должен содержать:

- 1) краткую характеристику методов измерения фазового сдвига с необходимыми иллюстрациями;
- 2) принципиальную схему фазометра лабораторного стенда и графики напряжений в отдельных точках схемы, подобные графикам рис.9.3.4 б, построенные на основании анализа его схемы;
- 3) схему фазовращателя и его векторную диаграмму;
- 4) блок-схемы соединения приборов при выполнении лабораторной работы;
- 5) таблицы экспериментальных данных и градуировочные характеристики с пояснительными надписями;
- 6) выводы по работе.

#### Вопросы для самопроверки

1. Перечислить и охарактеризовать основные методы измерения фазового сдвига.
2. Нарисовать структурную схему, осциллограммы напряжений в характерных точках и объяснить принцип действия стрелочного фазометра.
3. Нарисовать принципиальную схему фазовращателя и объяснить его работу.

#### Библиографический список

1. Муханин Л.Г. Схемотехника измерительных устройств. Учебное пособие. - М.: Изд-во "Лань", 2009. - 288 с.
2. Электрические измерения / Под ред. Е. Г. Шрамкова. – М.: Высшая школа, 1972.
3. Кушнир Ф.В. Радиотехнические измерения. – М.: Связь, 1980.
4. Измерения в электронике: Справочник / В.А.Кузнецов, В.А.Долгов, В.М.Коневских и др.; Под ред. В.А.Кузнецова.– М.: Энергоатомиздат, 1987.– 512 с.: ил.

## 9.4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

### ИССЛЕДОВАНИЕ МОСТА ПОСТОЯННОГО ТОКА

*Цели работы:*

- 1) исследование чувствительности ненагруженного моста с указателем напряжения;
- 2) исследование чувствительности нагруженного моста с указателем тока в зависимости от соотношения сопротивлений ветвей моста и нагрузки.

*Приборы и материалы:* лабораторный стенд, вольтметры.

#### 1. Основные сведения

##### 1.1. Общий вид моста

Несмотря на большое конструктивное разнообразие мостов, любой из них после соответствующего преобразования можно изобразить в таком виде, как это показано на рис.9.4.1, где

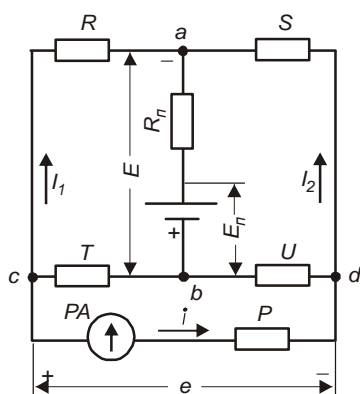


Рис. 9.4.1. Общий вид моста постоянного тока

- $R, S, T, U$  – сопротивления отдельных ветвей собственно моста;
- $R_n$  – внутреннее сопротивление источника питания;
- $P$  – сопротивление индикаторного устройства  $PA$ , включенного в измерительную диагональ моста;
- $E_n$  – напряжение источника питания;
- $E$  – напряжение на зажимах моста  $a - b$ , называемое мостовым напряжением;
- $e$  – напряжение между точками  $c - d$  (на зажимах указателя  $PA$ );
- $I_1$  – ток в ветви  $R$ ;
- $I_2$  – ток в ветви  $S$ ;
- $i$  – ток в диагонали моста  $c - d$ .

В дальнейших рассуждениях с целью упрощения предполагается, что напряжение  $E$  не зависит от изменений сопротивления моста, т.е. что внутреннее сопротивление источника питания  $R_n$  ничтожно мало по сравнению с этим сопротивлением и его можно считать равным нулю.

##### 1.2. Пассивный мост

Если в качестве индикаторного устройства используется электронный вольтметр, его входное сопротивление  $P$ , как правило, гораздо больше сопротивления любой ветви моста, поэтому можно записать:

$$P \rightarrow \infty; i \rightarrow 0.$$

Следовательно, мост имеет характер пассивного источника напряжения.

Если  $e = 0$ , мост будет находиться в абсолютном (полном) равновесии. Это наступит, если выполнится так называемое условие абсолютного равновесия

$$\frac{R}{R+T} = \frac{S}{S+U};$$

или, после преобразования,

$$RU = TS. \quad (9.4.1)$$

Если ветви моста получают приращения  $\Delta R, \Delta S, \Delta T, \Delta U$ , выходное напряжение моста станет равным  $e'$ , т.е. изменится на

$$\Delta e = e' - e; \quad (9.4.2)$$

$$\Delta e = E \left[ \left( \frac{\Delta R}{R} - \frac{\Delta T}{T} \right) \frac{RT}{(R+T)^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R + \Delta T}{R+T}} - \left( \frac{\Delta S}{S} - \frac{\Delta U}{U} \right) \frac{SU}{(S+U)^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta S + \Delta U}{S+U}} \right],$$

где  $e$  – любое начальное диагональное напряжение, имевшееся до появления приращений  $\Delta R, \Delta S, \Delta T, \Delta U$ .

Как следует из формулы (9.4.2),  $\Delta e$  зависит от приращений сопротивлений плеч нелинейно.

### 1.3. Нагруженный мост

Если сопротивление индикаторного устройства соизмеримо с сопротивлением отдельных ветвей моста, тогда мост (согласно теореме Тевенина) можно рассматривать как источник напряжения  $e$  с внутренним сопротивлением  $Z_i = R \parallel T + S \parallel U$ , включённым на сопротивление нагрузки моста  $P$ . Условие абсолютного равновесия в этом случае наступает при  $i = 0$  и имеет тот же вид (9.4.1), что у пассивного моста.

Выходной ток моста изменится на  $\Delta i$  в результате приращений сопротивлений  $\Delta R, \Delta S, \Delta T, \Delta U$  :

$$\Delta i = i' - i,$$

где  $i$  – любой начальный диагональный ток, имевшийся до появления приращений  $\Delta R, \Delta S, \Delta T, \Delta U$ .

Предполагая, что  $P = const$ , и введя обозначение

$$Z = \frac{RT}{R+T} + \frac{SU}{S+U} + P, \quad (9.4.3)$$

можно записать:

$$\Delta i = \frac{\Delta e}{Z} \left( 1 - \frac{\Delta Z}{Z + \Delta Z} \right) - i \frac{\Delta Z}{Z + \Delta Z}, \quad (9.4.4)$$

где  $\Delta e$  определено формулой (9.4.2), а  $\Delta Z$  и  $Z + \Delta Z$  получаем подстановкой в (9.4.3)  $R + \Delta R, S + \Delta S, T + \Delta T, U + \Delta U$ .

Если в исходном состоянии выполнено условие абсолютного равновесия (1), тогда  $i = 0$  и выражение (9.4.4) упрощается:

$$\Delta i = \frac{\Delta e}{Z} \left( 1 - \frac{\Delta Z}{Z + \Delta Z} \right). \quad (9.4.5)$$

В случае пассивного моста приращение тока в индикаторном устройстве зависит от приращения сопротивлений плеч нелинейно.

### 1.4. Определение чувствительности

Чувствительность моста  $\sigma$  определяется как отношение отклонения указателя  $d\alpha$  к относительно изменению сопротивления ветви  $R$ :

$$\sigma = \frac{d\alpha}{\frac{dR}{R}}. \quad (9.4.6)$$

Для упрощения исследования чувствительности предположим, что в начальном состоянии выполнено условие абсолютного равновесия (9.4.1), т.е. можно пользоваться выражением (9.4.5). Положим также, что  $I_i = I_R = const$ , т.е. мостовое напряжение определяется соотношением

$$E = I_R(R+T),$$

а остальные ветви моста способны рассеять мощность, определяемую напряжением  $E$  и их сопротивлениями  $S, T, U$ .

### 1.5. Чувствительность пассивного моста

Если внутреннее сопротивление индикаторного устройства  $P$  намного больше сопротивления моста на зажимах  $c - d$ , т.е.

$$\frac{RT}{R+T} + \frac{SU}{S+U} \ll P,$$

индикатор  $PA$  представляет собой устройство, "чувствительное к напряжению", т.е. его отклонение  $\alpha$  пропорционально напряжению  $e$  в диагонали моста

$$\alpha \equiv e.$$

Таковыми свойствами обладает, например, электронный вольтметр. Чувствительность можно определить подстановкой

$$\left. \begin{aligned} dS = dT = dU = 0, \\ T = \frac{R}{n}, \\ E = I_R(T + R) \end{aligned} \right\}$$

в выражение (9.4.2), а затем в (9.4.6):

$$\sigma_n = \frac{\frac{d\alpha}{dR}}{\frac{R}{R}} = \frac{de}{dR} = I_R R \frac{1}{1+n}. \quad (9.4.7)$$

Если  $I_R R = const$ , то чувствительность зависит от отношения  $n = \frac{R}{T}$ , которое можно произвольно (теоретически) изменять. При  $n \rightarrow 0$  ( $T \rightarrow \infty$ ) чувствительность была бы максимальная

$$\sigma_{n, макс} = I_R R,$$

но напряжение моста  $E$  имело бы бесконечно большую величину. Следовательно, на практике надо идти на компромисс между чувствительностью и напряжением моста  $E$ .

### 1.6. Чувствительность нагруженного моста с указателем тока

Указатель тока – измерительное устройство, у которого отклонение индикатора пропорционально протекающему току  $i$ :

$$\alpha \equiv i.$$

Такое устройство должно было бы иметь нулевое внутреннее сопротивление  $P$  или, по крайней мере, значительно меньшее, чем сопротивление моста на зажимах  $c - d$ :

$$\frac{RT}{R+T} + \frac{SU}{S+U} \gg P.$$

Это условие выполняется редко, на практике сопротивление  $P$  соизмеримо с сопротивлением отдельных ветвей. Если сопротивление  $P$  задано, полное сопротивление моста можно найти подстановкой

$$\left. \begin{aligned} T = \frac{R}{n}, \\ S = mR, \\ U = \frac{m}{n}R \end{aligned} \right\}$$

в выражение (9.4.3):

$$Z = R \frac{m+1}{n+1} + P = Z_i + P. \quad (9.4.8)$$

Используя (9.4.8), (9.4.2), (9.4.6), получаем:

$$\sigma_H = \frac{\frac{d\alpha}{dR}}{\frac{R}{R}} = \frac{di}{dR} = \frac{\frac{de}{Z}}{\frac{R}{R}} = \frac{R I_R}{(1+m)R + (1+n)P}. \quad (9.4.9)$$

Если  $I_R R = const$ , чувствительность моста с указателем тока зависит от  $n = \frac{R}{T}$ ,  $m = \frac{S}{R}$ ,  $p = \frac{P}{R}$ . При  $n = 0$ ,  $m = 0$ ,  $p = 0$  чувствительность была бы максимальной и равной

$$\sigma_{H, макс} = \frac{I_R R}{R},$$

но мостовое напряжение  $E$  и ток, потребляемый от источника питания, должны были бы иметь бесконечно большую величину, что на практике не осуществимо.

## 2. Лабораторная установка

Схема лабораторной установки изображена на рис.9.4.2. Ветви моста выполнены регулируемые по сопротивлению ступенчато.

Сопротивление ветви  $S$  неизменно и равно 1350 Ом. Сопротивление ветви  $R$  с помощью переключателя  $SA1$  ступенчато уменьшается через 135 Ом. Падение напряжения  $I_R R$  ветви  $R$  измеряется вольтметром  $PA1$ . Сопротивления ветвей  $T$  и  $U$  с помощью двоянного переключателя  $SA2a - SA2b$  изменяются синхронно через 270 Ом, так что в любом положении переключателя баланс моста нарушаться не будет.

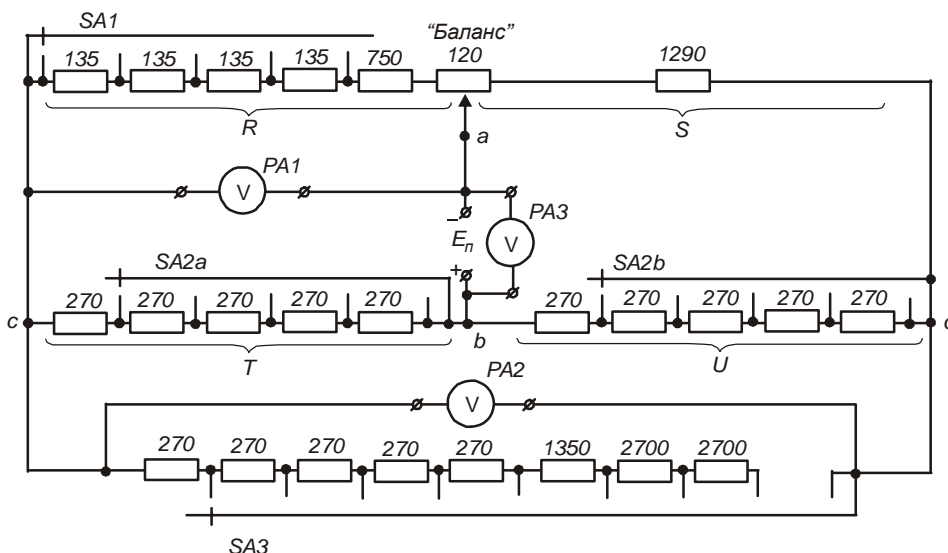


Рис. 9.4.2. Принципиальная схема моста постоянного тока лабораторной установки

К измерительной диагонали моста  $c - d$  подключен электронный вольтметр  $PA2$ , входное сопротивление которого для данных условий применения можно считать бесконечным. Переключение моста из режима "пассивный мост" в режим "нагруженный мост" осуществляется переключателем  $SA3$ , подключающим к диагонали  $c - d$  нагрузочное сопротивление  $P$  регулируемой величины. Крайнее правое положение  $SA3$  соответствует режиму "пассивный мост", остальные – режиму "нагруженный мост".

Источником питания моста является батарея аккумуляторов, внутреннее сопротивление которой  $R_n$  можно считать равным нулю; мостовое напряжение  $E$  измеряется вольтметром  $PA3$ .

Вольтметры и источник питания подключаются к лабораторному стенду проводами, снабженными штеккерами.

## 3. Выполнение работы

1. На одном графике построить зависимости

$$\sigma_n^* = \frac{\sigma_n}{I_R R}; \quad \sigma_H^* = \frac{K \sigma_H}{I_R R},$$

в функции  $n = \frac{R}{T}$  для  $n = 0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1; 2; 4; 6; 8; 10$ ,

где  $\sigma_n$  – рассчитывается по формуле (9.4.7);

$\sigma_H$  – рассчитывается по формуле (9.4.9) при  $m = p = 1$ ;

$K$  – коэффициент, имеющий размерность сопротивления, такой, что при  $n = m = p = 1$   $\sigma_H^* = \sigma_n^*$ .

По графику оценить область выгодного значения коэффициента  $n$  с точки зрения получения достаточной чувствительности при умеренном мостовом напряжении (обычно 6...24В).

2. Для пассивного моста ( $SA3$  в положении  $P = \infty$ )

1) при  $SA1$  в положении  $R = 1350$  Ом сбалансировать мост;

2) при некотором значении  $R'$ , отличающемся от 1350 Ом на  $\Delta R$  (по заданию преподавателя), для всех значений  $n$  (выбирается переключателем  $SA2a - SA2b$ ) получить экспериментальные значения  $I_R$  и  $\Delta e$ , рассчитать чувствительность моста по формуле

$$\sigma_n^* = \frac{1}{R' I_R} \frac{de}{dR} \approx \frac{1}{R' I_R} \frac{\Delta e}{R}$$

и данные нанести на график с теоретическими значениями  $\sigma_n^*$ ; объяснить расхождение (указание: обратить внимание на формулу (9.4.2)).

3. Для нагруженного моста

1) при  $SA1$  в положении  $R=1350$  Ом сбалансировать мост;

2) при том же уже выбранном значении  $R'$  и при  $n=1$  ( $R=T$ ) для всех значений  $p$  получить

экспериментальные значения  $I_R$  и  $\Delta i = \frac{\Delta e}{P}$ , рассчитать чувствительность моста по формуле

$$\sigma_n^* = \frac{K}{I_R R'} \frac{di}{dR} \approx \frac{K}{I_R R'} \frac{\Delta i}{\Delta R},$$

данные нанести на график с координатами  $\sigma_n^* - p$ , на котором обозначить также точку с теоретически рассчитанным значением  $\sigma_n^*$  при  $n = m = p = 1$ .

#### 4. Оформление отчета

Отчет должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) схему моста и схему лабораторной установки;
- 3) объяснение различий между пассивным и нагруженным мостами;
- 4) основные формулы, используемые в расчетах при выполнении работы;
- 5) таблицы экспериментальных данных с результатами расчётов, внесенными в них;
- 6) графики;
- 7) выводы по каждому разделу «Выполнение работы»;
- 8) выводы по работе в целом.

#### Вопросы для самопроверки

1. В чём различие между пассивным и нагруженным мостами?
2. Что называется чувствительностью моста?
3. От чего зависит чувствительность пассивного моста?
4. Как определить чувствительность нагруженного моста?
5. Пусть заданы сопротивление плеча  $R$  и его изменение  $\Delta R$ , внутреннее сопротивление и ток полного отклонения указателя  $PA$ . Остальные плечи моста можно выбирать произвольно. Какими они должны быть, чтобы при данном значении  $\Delta R$  и неизменном напряжении источника питания получить наибольшее отклонение стрелки указателя  $PA$ ?

#### Библиографический список

1. Ермуратский П.В., Лычкина Г.П., Минкин Ю.Б. Электротехника и электроника. – М.: Из-во "ДМК Пресс", 2011. - 417 с.
2. Электрические измерения. Средства и методы измерений (общий курс) / Под ред. Е.Г.Шрамкова. Учеб. пособие для вузов. –М.: Высшая школа, 1972. 520 с. с илл.
3. О.Хорна. Тензометрические мосты. –М.:Государственное энергетическое издательство, 1962. 276 с.
4. Электрические измерения: Учеб. пособие для вузов/ В.Н.Малиновский, Р.М.Демидова-Панфёрова, Ю.Н.Евланов и др.; Под ред. д-ра техн. наук В.Н.Малиновского. – М.: Энергоатомиздат, 1985.– 416 с., ил.



## 9.5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОЛУЧЕНИЕ ОСНОВНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Цели работы:

- 1) изучить материал 6.4;
- 2) ознакомиться с принципами определения статической и динамической петель перемагничивания;
- 3) изучить построение основной кривой намагничивания;
- 4) научиться вычислять магнитную проницаемость.

Приборы и материалы: лабораторный стенд, вольтметр средних значений, осциллограф, калибратор напряжений.

#### 1. Лабораторная установка

Схема лабораторной установки изображена на рис.9.5.1.

Лабораторная установка включает в себя: смонтированные на едином щите источник питания с регулируемым от 0 до 23 В напряжением частотой 50 Гц, пять кольцевых магнитопроводов из ферромагнитных материалов с уложенными на них намагничивающей  $w_1$  и измерительной  $w_2$  обмотками, измерительное сопротивление  $R_H$  в виде набора из трех резисторов 1, 10 и 100 Ом, усилитель по оси X, интегратор, а также вольтметр средних значений, калибратор напряжений и осциллограф.

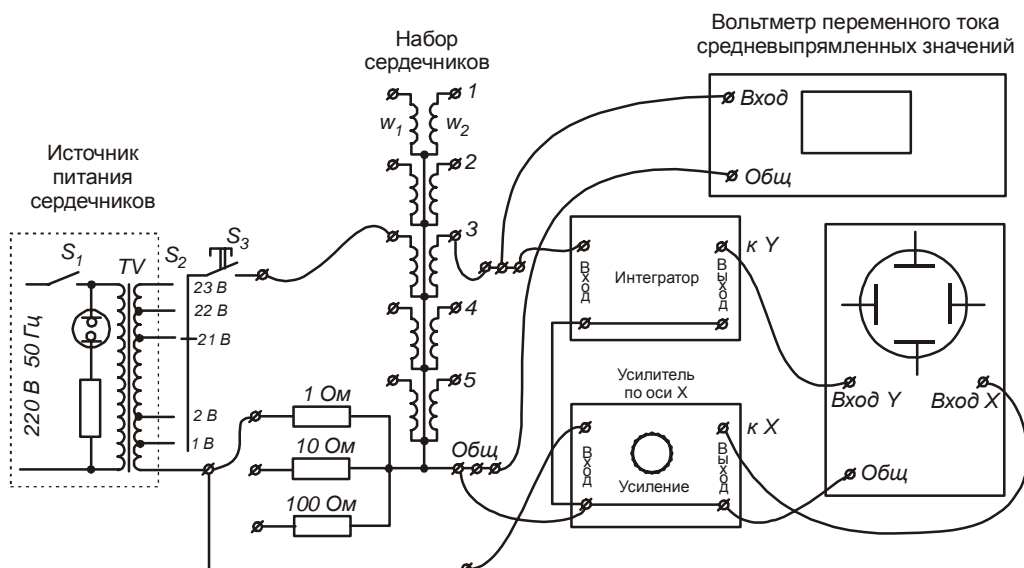


Рис. 9.5.1. Схема лабораторной установки для снятия динамических петель перемагничивания на частоте 50 Гц

Выбор одного из резисторов  $R_H$  и желаемого сердечника осуществляется с помощью внешних соединений на наборном поле. Для того чтобы исключить искажение результатов из-за нагрева сердечников при прохождении по обмоткам тока ток включается только на время отсчета кнопкой  $S_3$ . Нужное значение тока устанавливается переключателем  $S_2$ .

Материал,моточные данные и геометрические размеры сердечников приведены в табл.9.5.1. Поскольку ферромагнитные материалы с высокой магнитной проницаемостью чувствительны к механическим напряжениям, ленточные сердечники из пермаллоя и Э310 намотаны не очень плотно. Поэтому при подсчете площади поперечного сечения магнитопровода надо учитывать коэффициент заполнения сечения материалом  $K_c$ , который также приведен в таблице 9.5.1.

Таблица 9.5.1

Размеры,моточные данные и материал сердечников

Номер сердечника	Диаметр, мм		Высота, мм	Число витков		Коэффициент заполнения $K_c$	Материал
	наружный	внутренний		$w_1$	$w_2$		
1	98,5	59	15	174	174	1	Феррит
2	35	27	6,7	140	140	0,85	Э310
3	17	8	5	82	82	1	Феррит
4	28	22	6	250	250	0,9	79НМ
5	33,4	30	5	195	195	0,9	65НП

## 2. Выполнение работы

1. Изучить теоретический материал и устройство лабораторной установки. Собрать лабораторную установку и включить осциллограф за 20...30 минут до начала работы для прогрева, а стенд и вольтметр непосредственно перед работой.

2. Для каждого из сердечников получить и построить основную кривую намагничивания. Основная кривая намагничивания строится как геометрическое место точек, соответствующих правой вершине (носику) симметричных увеличивающихся петель перемагничивания, получаемых при ступенчатом подъеме напряжения источника питания (8...10 ступеней) вплоть до достижения петель предельного по площади значения, такого, что дальнейший ее рост происходит только за счёт удлинения носика.

3. По предельной петле найти значения  $H_m, B_m, H_c, B_r$ .

Масштаб осциллограммы по оси индукции  $m_B$  находится по результату измерения напряжения на обмотке  $w_2$  вольтметром средневыпрямленных значений при предельной петле перемагничивания и расчёте по нему  $B_m$ , как это объяснено в 6.4.5. Если шкала вольтметра средневыпрямленных значений отградуирована в эффективных значениях напряжения, показания вольтметра следует разделить на коэффициент формы синусоиды  $k_\phi = 1,11$ .

Для определения масштаба  $m_H$  осциллограммы по горизонтальной оси напряжённости магнитного поля  $H$  при данных положениях ручек горизонтального усиления следует собрать установку по рис. 9.5.2, измерить размер осциллограммы по горизонтали  $L_k$  желательного при напряжении калибратора  $U_k$ , дающем изображение по горизонтали, близкое к ширине экрана, и вычислить  $m_H$ , как это изложено в 6.4.5.

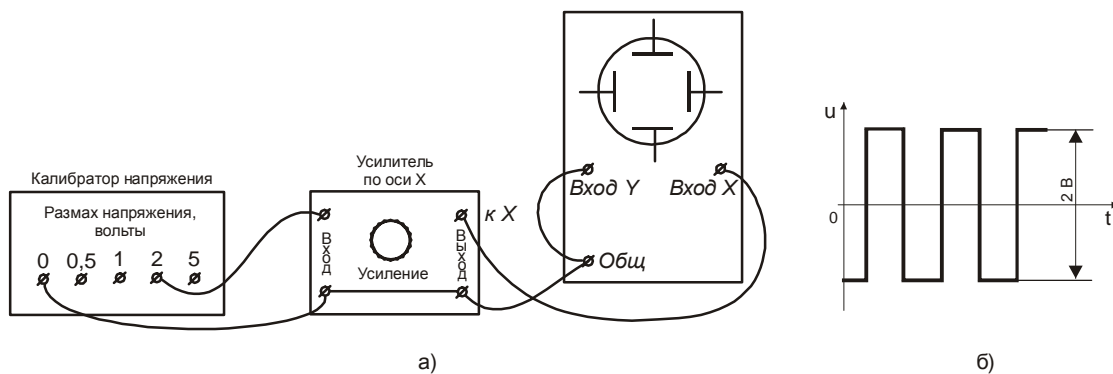


Рис. 9.5.2. Схема соединений при калибровке оси X (а); форма и величина напряжения на выходе калибратора (б)

4. Для точек основной кривой намагничивания, соответствующих серединам участков, определить значения относительной магнитной проницаемости  $\mu_r$ . Результаты нанести на график с координатами  $H - \mu$ . Экстраполируя, найти начальную магнитную проницаемость  $\mu_{нач}$ . По графику  $\mu_r$  найти максимальную магнитную проницаемость  $\mu_{макс}$  как  $\mu_r$  для точки, через которую проходит касательная к кривой намагничивания, одновременно проходящая через начало координат и образующая наибольший угол с осью напряжённости магнитного поля  $H$ .

5. Для участка насыщения основной кривой намагничивания определить дифференциальную магнитную проницаемость  $\mu_\Delta$ .

6. Вычислить статический коэффициент прямоугольности  $\alpha_n$ .

7. Вычисленные значения напряжённости магнитного поля, магнитной индукции, магнитной проницаемости и коэффициента прямоугольности  $\alpha_n$  занести в табл.9.5.2.

Таблица 9.5.2

Сводная таблица экспериментальных данных

Номер сердечника	$H_m$ , А/м	$B_m$ , Тл	$H_s$ , А/м	$B_s$ , Тл	$H_c$ , А/м	$B_r$ , Тл	$\mu_{нач}$	$\mu_{макс}$	$\mu_\Delta$	$\alpha_n$
1										
2										
3										
4										
5										

### 3. Оформление отчета

Отчет должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) копии рис. 6.9, 6.10 и 6.15, принципиальные схемы по рис. 9.5.1 и 9.5.2 с пояснениями;
- 3) расчетные формулы для определения  $H_m$ ,  $B_m$ ,  $m_n$ ,  $m_e$ ;
- 4) экспериментальные данные для построения основной кривой намагничивания;
- 5) осциллограммы динамических петель перемагничивания с указанием около характерных точек численных значений напряжённости магнитного поля и магнитной индукции;
- 6) графики результатов, таблицу результатов;
- 7) выводы по работе с обсуждением результатов.

#### Вопросы для самопроверки

1. Что называется обратимой магнитной проницаемостью?
2. Что такое дифференциальная магнитная проницаемость?
3. Как найти максимальную магнитную проницаемость?
4. Как вычислить абсолютную магнитную проницаемость?
5. Чем отличается динамическая петля перемагничивания от статической петли гистерезиса?
6. Какие материалы относятся к материалам с ППГ?
7. Для чего служит интегрирующее устройство в схеме лабораторной установки?
8. Нарисовать схему для снятия кривой намагничивания на переменном токе и помощью амплитудного вольтметра и вольтметра средних значений.

#### Библиографический список

1. Стародубцев Ю.Н. Теория и расчёт трансформаторов малой мощности. – М.:ИП РадиоСофт, 2005. – 320с.
2. Б.Ю.Семёнов. Силовая электроника: от простого к сложному. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 416с.
3. Грабовски Б. Справочник по электронике. - М.: Из-во "ДМК Пресс", 2009. – 416 с

## 9.6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

### ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ КАТУШКИ

*Цели работы:*

- 1) изучить материал, изложенный в 6.1 ...6.3 в части, касающейся измерения магнитного поля с помощью измерительной катушки;
- 2) измерить параметры постоянного магнитного поля катушки Гельмгольца;
- 3) вычислить магнитную индукцию и напряжённость магнитного поля и их распределение по поперечному сечению рабочего объёма катушки Гельмгольца;
- 4) провести статистическую обработку результатов измерения и оценить погрешность результатов.

*Приборы и материалы:* катушка Гельмгольца, измерительная катушка, амперметр, вольтметр.

#### 1. Лабораторная установка

Лабораторная установка включает в себя катушку Гельмгольца, измерительную катушку ИК, интегратор, амперметр и вольтметр, соединённые согласно рис. 9.6.1.

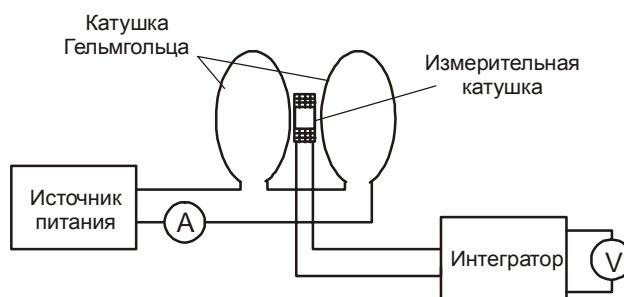


Рис. 9.6.1. Функционально-принципиальная схема установки

*Катушка Гельмгольца* – в идеальном случае это устройство представляет собой два одиночных кольцевых витка, соединённых между собой последовательно и расположенных друг от друга на расстоянии радиуса витка. Реально катушка Гельмгольца состоит из двух многослойных катушек, на которых намотано некоторое число витков, причём толщина и ширина катушек должны быть много меньше их радиуса. Напряжённость магнитного поля в центре катушки Гельмгольца может быть вычислена по формуле

$$H = K \frac{wI}{R} \left[ \frac{A}{M} \right], \quad (9.6.1)$$

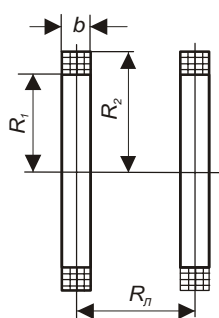


Рис. 9.6.2. Конструкция катушки Гельмгольца

где  $w$  – число витков катушки Гельмгольца;

$I$  – ток в катушках, А;

$R$  – эффективный радиус катушек, м;

$K$  – безразмерный коэффициент пропорциональности.

Напряжённость магнитного поля в центре катушки Гельмгольца с одинаковыми кольцевыми витками отличается от поля, создаваемого на расстоянии  $\frac{1}{2}$  радиуса от центра, примерно на 0,5%. В реальных многослойных катушках Гельмгольца поле менее равномерно. В лабораторной установке использованы две катушки (рис. 9.6.2) с размерами  $R_1 = 75$  мм,  $R_2 = 98$  мм,  $b = 15$  мм, имеющие по  $w = 340$  витков каждая. Катушки расположены друг от друга на расстоянии  $R_n$ , равном их среднему логарифмическому радиусу, рассчитываемому по формуле

$$R_n = \frac{R_2 - R_1}{\ln \frac{R_2}{R_1}}.$$

Коэффициент  $K$  может быть вычислен аналитически по параметрам катушек, однако в данной лабораторной работе его следует определить по результатам измерения с помощью ИК.

В комплект лабораторной установки входят две измерительные катушки ИК – большая «Б» и малая «М». Конструкции катушек соответствуют рис. 6.3. Их параметры приведены в табл. 9.6.1. Катушки помещены в держателе, который может перемещаться в направляющих, расположенных по центру катушки Гельмгольца перпендикулярно оси магнитного потока. Направляющие снабжены отсчётным устройством, позволяющим определить положение центра ИК. ИК соединяются с интегрирующим устройством гибким кабелем.

Таблица 9.6.1

Параметры измерительных катушек

Измерительная катушка	$r_2$ , мм	$r_1$ , мм	Число витков $w$	Диаметр провода, мм
Большая «Б»	10,5	4	3500	0,08
Малая «М»	5	2,3	4256	0,035

Интегратор (рис. 9.6.3) собран на прецизионных операционных усилителях. Перед собственно интегратором на микросхеме DA2 включён предварительный усилитель на микросхеме DA1 с коэффициентом усиления  $K_y = 4$ . Выходное напряжение интегратора

$$|U| = \frac{1}{RC} \int e dt, \quad (9.6.3)$$

где  $e$  – мгновенное значение напряжения на ИК, определяемое по выражениям (6.2), (6.3) или (6.4) в зависимости от того, какая из величин магнитного поля подлежит измерению.

Пусть измеряемая величина – магнитная индукция  $B$ . Тогда согласно преобразованному выраже-

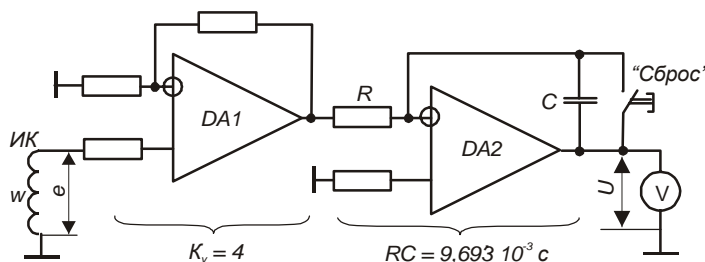


Рис. 9.6.3. Интегрирующее устройство лабораторной установки

нию (6.3), в котором надо учесть наличие предварительного усилителя, действующего так, как будто бы число витков ИК увеличено в  $K_y$  раз, имеем:

$$K_y w S B = \int e dt.$$

Учитывая (9.6.3), можно записать:

$$K_y w S B = |U| RC,$$

откуда, опуская знак напряжения,

$$B = \frac{1}{wS} \cdot \frac{RC}{K_y} U = K_K K_I U, \quad (9.6.4)$$

где  $K_K = \frac{1}{wS}$  – так называемая постоянная ИК;

$K_I = \frac{RC}{K_y}$  – постоянная интегрирующего устройства.

Для измерительной катушки «М» получаем

$$B[\text{Тл}] = K_M U[V],$$

для измерительной катушки «Б» имеем

$$B[\text{Тл}] = K_B U[V],$$

где  $K_B$  и  $K_M$  – имеющие размерность коэффициенты пропорциональности между напряжением на выходе интегратора в вольтах и индукцией магнитного поля в теслах.

Значение выходного напряжения интегратора может быть сделано равным нулю с помощью кнопки «Сброс» как при внесённой в поле ИК, так и при удалённой.

Источник питания катушки Гельмгольца представляет собой источник постоянного тока. Ток с помощью переключателя может быть установлен равным 1, 2 или 3 А, а также плавно в диапазоне 0...3 А. Ток измеряется амперметром А.

## 2. Программа работы и её выполнение

Задачей исследования является овладение методом измерения параметров постоянного магнитного поля с помощью поступательно перемещающейся измерительной катушки ИК, определение постоянных ИК  $K_K$  и интегрирующего устройства  $K_I$  и экспериментальное изучение радиального распределения магнитной индукции в центральном поперечном сечении катушки Гельмгольца. Для этого следует выполнить следующие этапы.

1) Изучить принцип действия ИК и способы определения с её помощью магнитной индукции  $B$  и напряжённости  $H$  постоянного магнитного поля. По данным табл. 9.6.1 подсчитать эффективные сечения малой «М» и большой «Б» измерительных катушек и соответствующие постоянные  $K_K$ , а по данным, приведённым на рис. 9.6.3 – постоянную интегрирующего устройства  $K_I$ . По полученным числовым значениям вычислить значения коэффициента  $K_K K_I$  в формуле (9.6.4).

2) Изучить конструкции катушки Гельмгольца и устройства для перемещения ИК. Пользуясь ручками управления источником питания, научиться задавать и измерять намагничивающий ток катушки Гельмгольца. Совместить ИК с центром катушки Гельмгольца и отработать движения руки при удалении ИК из магнитного поля такие, чтобы время, требуемое на удаление, составило 1...1,5 с.

3) Научиться балансировать схему интегрирующего устройства. Для этого надо подключить ИК, включить питание интегрирующего устройства, дать прогреться схеме 3...5 мин и с помощью кнопки «Сброс» установить выходное напряжение  $U$  равным нулю. Из-за влияния изменения окружающей температуры, нестабильности питающих напряжений и других причин выходное напряжение может медленно «сползть» с нуля. Пользуясь ручками «Грубо» и «Точно» и кнопкой «Сброс», найти такое положение ручек, при котором выходное напряжение будет оставаться на нулевом уровне длительное время.

4) Поместить ИК в центр катушки Гельмгольца и кнопкой «Сброс» установить выходное напряжение интегратора равным нулю. Вывести ИК из катушки Гельмгольца и сразу измерить установившееся значение выходного напряжения интегратора. Это будет напряжение, которое надо подставить в формулу (9.6.4), чтобы вычислить значение магнитной индукции в данной точке внутри катушки Гельмгольца. По вычисленному значению  $B$  рассчитать напряжённость магнитного поля  $H$ , учитывая формулу (6.1) и полагая магнитную проницаемость воздуха  $\mu_r = 1$  (точное значение  $\mu_r = 1 + 0,4 \cdot 10^{-6}$ ).

Эти измерения надо произвести при токах питания катушки Гельмгольца 1, 2 и 3 А в различных точках поперечного сечения катушки Гельмгольца, а именно: на оси, на расстоянии от оси 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 и 80 мм, считая по радиусу. Каждое измерение провести семь раз (серия опытов), корректируя, если необходимо, перед каждым измерением баланс нуля. Вычислить средние значения и средние квадратичные отклонения измеряемого напряжения  $U$ , магнитной индукции  $B$  и напряжённости магнитного поля  $H$  в каждой серии опытов. Результаты расчётов занести в таблицы, предлагаемый вид которых показан в табл. 9.6.2. В каждой клетке таблицы записать среднее значение параметра плюс/минус его среднее квадратичное отклонение.

5) Для точки, находящейся на оси сечения, по полученным данным вычислить безразмерный коэффициент пропорциональности для формулы (9.6.1) и его среднее квадратичное отклонение.

6) Построить семейство характеристик зависимости напряжённости магнитного поля  $H$  в центральном поперечном сечении вдоль радиуса катушки Гельмгольца в координатах «Расстояние от оси, мм – Напряжённость магнитного поля, А/м». Параметр семейства – ток, протекающий в катушке Гельмгольца.

7) Сделать выводы по работе, в которых следует отразить: значение коэффициента в формуле (9.6.1), характеристику распределения напряжённости поля в катушке Гельмгольца в её центральном поперечном сечении, погрешность полученных результатов, трудоёмкость опытов.

Результаты измерения магнитного поля катушки Гельмгольца при токе 1 А

Измеряемый параметр	Положение ИК, считая от оси катушки Гельмгольца, мм					
	0	10	20	30	40	50
Напряжение интегратора U, В						
Магнитная индукция B, Тл						
Напряжённость магнитного поля H, А/м						

### 3. Оформление отчёта по работе

Отчёт должен быть оформлен в соответствии с правилами, изложенными в инструкции «Оформление отчётов по лабораторным работам» [2].

Отчёт должен содержать:

- 1) краткое описание первичных эталонов магнитных измерений;
- 2) принципиальные вопросы измерения  $\Phi$ ,  $B$  и  $H$  с помощью ИК в постоянном и переменном магнитных полях;
- 3) важнейшие параметры ИК, их конструкции, параметры использованных ИК;
- 4) схему лабораторной установки, поясняющие рисунки к расчётам;
- 5) подробное описание проведения опытов, что, как и в какой последовательности делалось;
- 6) результаты экспериментов, их статистическая обработка с расчётами и таблицами;
- 7) графическое представление результатов исследования поля в катушке Гельмгольца;
- 8) выводы по отдельным этапам работы и по работе в целом.

#### Контрольные вопросы

1. Нарисовать эскизы первичных эталонов магнитной индукции и магнитного потока.
2. Вывести формулу э.д.с., индуцируемой в ИК при её внесении в магнитное поле.
3. Определить ожидаемую полярность э.д.с. ИК при её внесении в магнитное поле.
4. Написать формулу для определения напряжённости магнитного поля с помощью ИК.
5. Вывести формулу для определения эффективного сечения ИК.
6. Вывести формулу для определения чувствительности ИК к изменению магнитного потока.
7. Вывести формулу для измерения магнитного потока в синусоидальном магнитном поле.
8. Написать формулу для определения напряжённости магнитного поля в центре катушки Гельмгольца.
9. Сформулировать условия увеличения чувствительности к изменению индукции схемы с ИК и интегратором напряжения.
10. Сформулировать условия увеличения чувствительности к изменению индукции схемы с ИК и интегратором тока.

#### Библиографический список

1. Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника: Учебное пособие/ К.К. Ким, Г.Н. Анисимов, В.Ю. Барбарович, Б.Я. Литвинов. – СПб.: Питер, 2006. – 368 с.: ил.
2. Оформление отчётов по лабораторным работам: Инструкция по оформлению отчётов для студентов специальности 210100 дневной и заочной форм обучения. Магнитогорск: МГТУ, 2005. 10 с.
3. Б.Ю. Семёнов. Силовая электроника: от простого к сложному. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 416с.

## 9.7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

### ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ХОЛЛА

*Цели работы:*

- 1) изучить материал, изложенный в 6.1...6.3 в части, касающейся измерений магнитного поля с помощью преобразователя Холла;
- 2) изучить свойства преобразователя Холла;
- 3) экспериментально получить зависимость напряжения преобразователя Холла от величины управляющего тока и магнитной индукции;
- 4) вычислить значение постоянной Холла.

*Приборы и материалы:* специализированная лабораторная установка, преобразователи Холла типов 5J и ОРН.

#### 1. Дополнительные сведения о преобразователе Холла

На рис.9.7.1 приведена принципиальная схема измерения с помощью преобразователя Холла индукции магнитного поля между полюсами электромагнита.

Электронная теория объясняет явление Холла как следствие действия на носители тока силы Лоренца

$$F_1 = evB, \quad (9.7.1)$$

где  $e$  – заряд электрона;

$v$  – средняя скорость дрейфа носителей заряда.

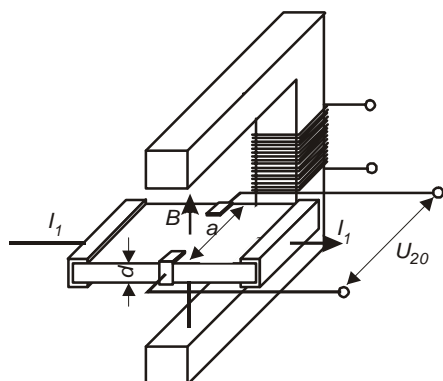


Рис. 9.7.1. Устройство преобразователя Холла:  
 $d$  - толщина пластинки;  $a$  - ширина пластинки;  
 $B$  - управляющее магнитное поле

Сила  $F_1$ , отклоняя движущиеся носители заряда в направлении, поперечном их движению, обуславливает возникновение электрического поля с напряжённостью  $E_2$ . Это электрическое поле будет создавать силу  $F_2 = -eE_2$ , действующую на носители заряда и уравновешивающую силу  $F_1$ . Таким образом,  $|F_2| = |F_1|$  или  $eE_2 = evB$ , откуда

$$E_2 = vB. \quad (9.7.2)$$

Зная ширину пластинки  $a$ , можно найти э.д.с. холостого хода  $U_{20}$ :

$$U_{20} = E_2 a = Bav \quad (9.7.3)$$

Скорость  $v$  можно определить по известной плотности тока  $j$  в пластинке

$$j = I_1 / (ad) = env, \quad (9.7.4)$$

откуда получаем:

$$v = I_1 / (enad), \quad (9.7.5)$$

где  $n$  – концентрация носителей заряда, т.е. число электронов проводимости в единице объёма.

Окончательно для  $U_{20}$  получаем:

$$U_{20} = \frac{1}{en} \frac{I_1}{d} B = R_H \frac{I_1}{d} B, \quad (9.7.6)$$

где через  $R_H = \frac{1}{en}$  – обозначена постоянная Холла – величина, обратная объёмной плотности свободного электрического заряда.



Согласно выражению (9.7.3) э.д.с. Холла  $U_{20}$  тем больше, чем больше скорость дрейфа  $v$ . Отношение скорости дрейфа  $v$  к напряжённости электрического поля  $E$  называют подвижностью носителей заряда

$$b = v/E. \quad (9.7.7)$$

Для преобразователя Холла поэтому следует выбирать материал с высоким значением подвижности  $b$ .

Подвижность зарядов  $b$  в проводниках очень мала. У меди она составляет  $42 \frac{\text{см/с}}{\text{В/см}} = 42 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ , поэтому э.д.с. Холла измеряется единицами милливольт. У полупроводников она существенно больше. Очень большая подвижность электронов  $b_n$  наблюдается у антимонида индия (InSb), у которого

$$b_n \approx 80000 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}.$$

Сходными значениями подвижности характеризуются арсенид индия (InAs), арсенид-фосфид индия (InAsP), селенид ртути (HgSe). Именно эти материалы используют для изготовления преобразователей Холла. При этом можно получить э.д.с. Холла порядка 1 В при внутреннем сопротивлении преобразователя менее 1 Ом, так что с него можно снимать мощность 2 Вт и больше.

На рис. 9.7.2 изображена схема замещения преобразователя Холла. Номинальный управляющий ток  $I_{1н}$  обычно выбирается таким, чтобы при работе преобразователя Холла в спокойном воздухе температура перегрева преобразователя составляла  $20^\circ\text{C}$ . Диапазон управляющего магнитного поля простирается от  $B = 0$  до номинального значения  $B = B_n$ , при достижении которого преобразователь не повреждается. Э.д.с. холостого хода при номинальных значениях  $I_{1н}$  и  $B_n$  обозначают  $U_{20}$  и измеряют при  $R_3 = \infty$ .

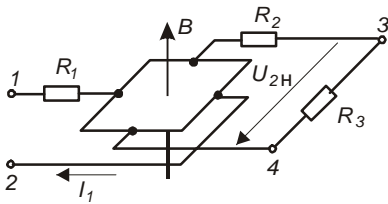


Рис. 9.7.2. Схема замещения преобразователя Холла:  $R_1$  - внутреннее сопротивление со стороны управления;  $R_2$  - внутреннее сопротивление со стороны выхода;  $I_1$  - управляющий ток;  $U_{2H}$  - напряжение Холла на нагрузке;  $R_3$  - нагрузочное сопротивление

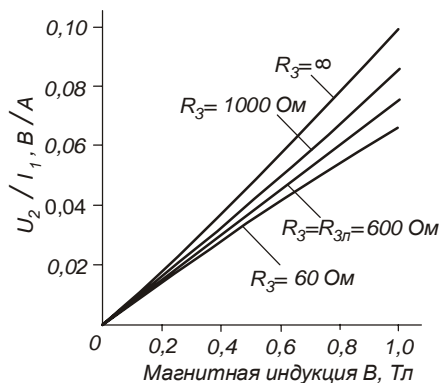


Рис. 9.7.3. Влияние нагрузки  $R_3$  на нормированное напряжение Холла

Внутреннее сопротивление  $R_1$  со стороны управляющего тока представляет собой сопротивление между зажимами 1 и 2, измеренное при  $R_3 = \infty$ . Оно указывается в паспорте преобразователя Холла при  $B = 0$ .

Внутреннее сопротивление  $R_2$  со стороны напряжения Холла измеряют при разорванной цепи управляющего тока. В паспорте преобразователя оно даётся при  $B = 0$ .  $R_2$  существенно зависит от величины управляющего поля.

На рис. 9.7.3 показана зависимость напряжения Холла от управляющего поля при различной величине нагрузочного сопротивления  $R_3$ . По оси ординат отложено не само напряжение Холла, а его величина, отнесённая к величине управляющего тока (нормированное напряжение Холла). Хорошая линейность между нормированным напряжением Холла и управляющим магнитным полем достигается лишь при определённом значении сопротивления нагрузки  $R_{3н}$ , которое также указывается в паспортных данных.

## 2. Лабораторная установка

Эскиз панели лабораторной установки изображён на рис. 9.7.4. В лабораторную установку входят следующие узлы.

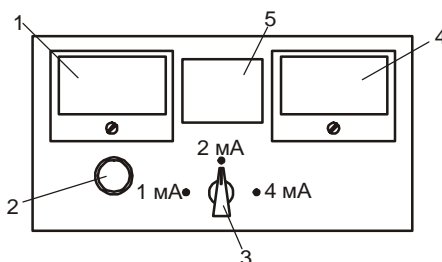


Рис. 9.7.4. Лабораторная установка: 1 - амперметр в цепи катушки электромагнита с пределами 0...1000 мА; 2 - регулятор тока электромагнита; 3 - переключатель величины управляющего тока; 4 - вольтметр для измерения напряжения Холла с пределами 0...1000 мВ; 5 - окно для установки преобразователя Холла в электромагнит

1) Электромагнит, в зазоре магнитопровода которого устанавливается преобразователь Холла; доступ к магнитопроводу возможен через окно (поз. 5). Магнитопровод навит из ленты ХВП ЭЗ30 толщиной 0,05 мм и имеет воздушный зазор длиной 2 мм для установки преобразователя Холла. Сечение магнитопровода  $12 \times 25 \text{ мм}^2$ . Току 1000 мА соответствует магнитная индукция в зазоре магнитопровода 0,25 Тл, зависимость индукции от тока линейная. Преобразователь Холла ( $2,5 \times 1,5 \times 1 \text{ мм}^3$ ) размещают посередине полюсов магнитопровода.

2) Регулируемый стабилизированный источник постоянного тока, подаваемого в обмотку электромагнита, с пределами регулирования 0...1000 мА; ток измеряется амперметром (поз. 1), ручка управления регулятором тока расположена под амперметром (поз. 2).

3) Регулируемый стабилизированный источник постоянного управляющего тока  $I_1$ . Ток задаётся переключателем (поз. 3) в трёх ступенях: 1 мА, 2 мА и 4 мА.

4) Вольтметр для измерения напряжения  $U_{20}$  с входным сопротивлением 10 кОм (поз. 4).

### 3. Выполнение работы

Закрепить преобразователь Холла в зазоре электромагнита посередине полюсов.

Установить управляющий ток  $I_1 = 1 \text{ мА}$ .

Плавное повышение тока электромагнита для получения значений магнитной индукции  $B = 0,05; 0,10; 0,15; 0,20$  и  $0,25 \text{ Тл}$ , измерить напряжение Холла  $U_{20}$ .

Плавное понижение тока электромагнита, измерить  $U_{20}$  при тех же значениях магнитной индукции.

Провести этот опыт пятикратно, получив по 10 значений напряжения Холла  $U_{20}$  при каждой дискретной величине магнитной индукции  $B$ . Результаты каждого из опытов занести в рабочую таблицу и отобразить на графике в координатах «Магнитная индукция  $B$ , Тл» – «Напряжение Холла  $U_{20}$ , мВ».

Провести те же измерения при токах управления  $I_1$  2 и 4 мА.

Для результатов каждого опыта найти нормированное напряжение Холла  $U_{20} / I_1$ , мВ/мА, результаты отобразить в таблице и на графиках в координатах «Магнитная индукция  $B$ , Тл» – «Нормированное напряжение Холла  $U_{20} / I_1$ , мВ/мА».

Для полученных значений нормированного напряжения Холла провести статистическую обработку результатов и найти доверительные интервалы. Результаты статистической обработки представить в таблице.

Сделать выводы по работе, в которых сравнить полученные результаты с ожидаемыми из теоретического рассмотрения вопроса; обсудить причины и величину полученной погрешности измерений.

### 4. Оформление отчёта

Отчёт должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) краткое изложение теоретического изучения параметров преобразователя Холла;
- 3) схему лабораторной установки, составленную по её описанию и изучению в процессе работы с ней;
- 4) описание проведённых опытов;
- 5) результаты, представленные в виде таблиц и графиков;
- 6) выводы по работе.

### Вопросы для самопроверки

1. Объяснить, в чём состоит эффект Холла.
2. Как определить полярность напряжения Холла?
3. Почему для преобразователей Холла применяют полупроводниковые материалы?
4. Какие примерно можно получить напряжения Холла?
5. Как с помощью преобразователя Холла измерить величину магнитной индукции между полюсами постоянного магнита, электромагнита или электрической машины?
6. Объяснить, как зависит линейность получаемого напряжения Холла от величины нагрузочного сопротивления преобразователя Холла?
7. Как с помощью преобразователя Холла определить, какой из полюсов постоянного магнита является северным, а какой южным?
8. Как с использованием преобразователя Холла найти произведение двух электрических величин?
9. Для чего служат доверительные интервалы?
10. Как вычислить доверительные интервалы для измеренной случайной величины?

### Библиографический список

1. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005. – 528 с.
2. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. – Л.: Энергия. 1978. – 262 с., ил.

## 9.8. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ТРАНСФОРМАТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

*Цель работы:*

- 1) изучить материал глав 3 и 7;
- 2) экспериментально исследовать параметры унифицированного дифференциально-трансформаторного преобразователя перемещения ПД – 4;
- 3) оценить погрешности его работы.

*Приборы и материалы:* специализированный лабораторный стенд, образец унифицированного дифференциально-трансформаторного преобразователя.

#### 1. Конструкция преобразователя и его работа

Конструкция дифференциально-трансформаторного преобразователя (в дальнейшем ДТП) изображена на рис. 9.8.1а, а его электрическая схема на рис. 9.8.1б. Преобразователь состоит из намотанных на цилиндрическом каркасе двух секций обмотки возбуждения  $w_1$  (первичная обмотка), включённых согласно (точки у выводов на рис. 9.8.1б обозначают начала обмоток), и двух секций  $w_{2-1}$  и  $w_{2-2}$  вторичной (выходной) обмотки, включённых встречно.

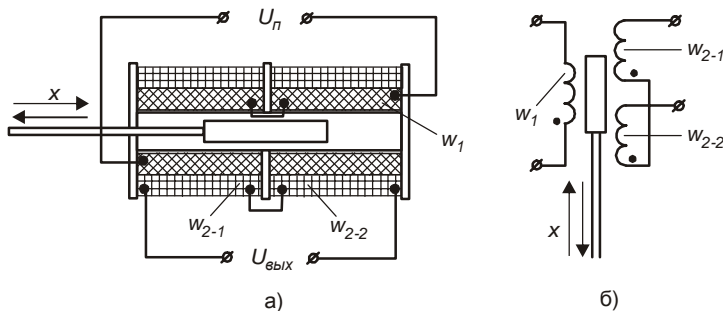


Рис. 9.8.1. Конструкция дифференциально-трансформаторного преобразователя (а) и его принципиальная схема (б)

Внутри каркаса катушки расположен цилиндрический плунжер (сердечник) из ферромагнитного материала, имеющий возможность перемещения внутри катушки вдоль её оси на величину  $x$ . Обмотка возбуждения подключена к источнику питания переменного тока. *ДТП является параметрическим преобразователем, в котором перемещение плунжера преобразуется в параметр – взаимную индуктивность между первичной и вторичной обмотками. Выходным сигналом является напряжение, снимаемое со вторичной обмотки.*

Магнитный поток обмотки возбуждения индуцирует в секциях вторичной обмотки э.д.с., значения которых являются функцией тока питания первичной обмотки  $I$ , частоты тока  $\omega$  и взаимной индуктивности  $M_{2-1}$  и  $M_{2-2}$  между секциями вторичной обмотки и первичной обмоткой. Благодаря тому, что обмотки обеих половин вторичной обмотки идентичны, что достигается их тщательным изготовлением, взаимные индуктивности  $M_{2-1}$  и  $M_{2-2}$  равны между собой при среднем положении плунжера внутри катушки преобразователя. При перемещении плунжера вверх (рис. 9.8.1б) из среднего положения взаимная индуктивность  $M_{2-1}$  увеличивается, а  $M_{2-2}$  уменьшается. Соответственно, если плунжер смещается из среднего положения вниз,  $M_{2-1}$  уменьшается, а  $M_{2-2}$  увеличивается. Так как секции  $w_{2-1}$  и  $w_{2-2}$  включены встречно, то взаимная индуктивность  $M = M_{2-1} - M_{2-2}$  между выходной обмоткой и обмоткой возбуждения в зависимости от положения плунжера (функция преобразования) определяется по выражению

$$M = M_H \frac{x}{x_H} e^{-j\varphi},$$

где  $M_H$  – номинальное значение взаимной индуктивности, соответствующее номинальному рабочему ходу плунжера из среднего положения  $x_H$ ;

$x$  – текущее отклонение плунжера от среднего положения;

$\varphi$  – значение угла фазового сдвига сигнала напряжения переменного тока по отношению к току питания, определяемое конструкцией преобразователя и качеством его изготовления; идеальное значение  $\varphi = 0$ .

Выходная э.д.с. преобразователя (эффективное значение) может быть подсчитана по формуле

$$E = \omega I M_H \frac{x}{x_H} e^{-j\varphi},$$

при расчёте по которой выходное значение э.д.с. получается в вольтах, если подставить

$$\omega = 2 \pi f,$$

где  $f$  – частота тока питания в герцах;

$I$  – ток обмотки возбуждения в амперах;

$M_n$  – номинальное значение взаимной индуктивности в генри;

$\varphi$  – в радианах.

При смещении плунжера из среднего положения на одну и ту же величину, но в разные стороны, величина выходного напряжения будет одинаковой, однако при этом меняется угол фазового сдвига этого напряжения по отношению к напряжению, приложенному к первичной обмотке. На рис. 9.8.2 показаны графики изменения во времени мгновенных значений напряжения для этих двух случаев.

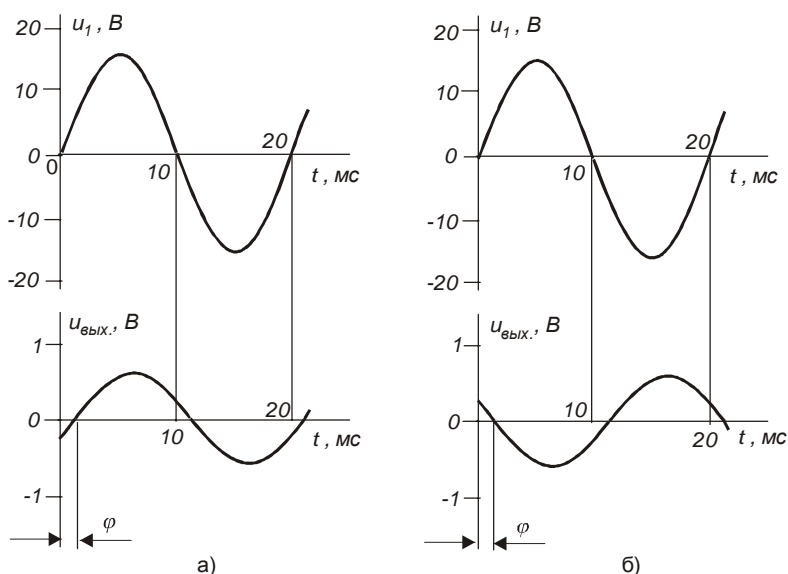


Рис. 9.8.2. Осциллограммы мгновенных значений напряжения возбуждения  $u_1$  и выходного  $u_{\text{вых}}$  при смещении плунжера на одинаковую величину: а) в одну сторону; б) в противоположную сторону

На рис. 9.8.2а угол фазового сдвига выходного напряжения близок к  $0^\circ$  ( $\varphi$  – определённый выше угол сдвига величиной около  $7...8^\circ$ ), на рис. 9.8.2б угол фазового сдвига близок к  $180^\circ$ , а по величине мгновенные значения э.д.с. в соответствующие моменты времени совпадают. Поэтому для определения не только величины, но и направления смещения плунжера обычный вольтметр эффективного значения непригоден, и измерения надо производить фазочувствительным вольтметром (ФЧВ).

Имеются следующие модификации преобразователей.

*Унифицированные взаимозаменяемые преобразователи ДТП-1, ДТП-2, ДТП-3* имеют номинальный рабочий ход из среднего положения  $\pm 1,6; \pm 2,5; \pm 4$  мм соответственно. Допустимое отклонение рабочего хода плунжера этих преобразователей не превышает  $\pm 25\%$  от номинального значения.

Плунжер изготовлен из сталей марок Э8, Э10, Э12. Для его защиты от коррозии он заключён в оболочку из нержавеющей немагнитной стали 36НХТЮ, а также дополнительно он может быть помещён в разделительную немагнитную трубку, предохраняющую катушку и прибор от влияния внешней среды.

Для унифицирования статической характеристики к выходу преобразователя подключён делитель напряжения, состоящий из переменного резистора сопротивлением 330 Ом и включённого последовательно с ним проволочного резистора из манганина сопротивлением  $(980 \pm 2)$  Ом.

Номинальное значение взаимной индуктивности для всех модификаций преобразователей составляет  $M_n = (10 \pm 0,09)$  мГ.

Угол сдвига  $\varphi = 0,1222$  рад. или  $7^\circ$  при  $f = 50$  Гц.

Номинальное напряжение питания цепи возбуждения равно 12 В, номинальное значение выходного напряжения 400 мВ.

Паспортное значение нелинейности зависимости  $M = f(x/x_n)$  не более 0,5% от  $M_n$ . Предел допустимой основной погрешности не более 1% от  $M_n$ .

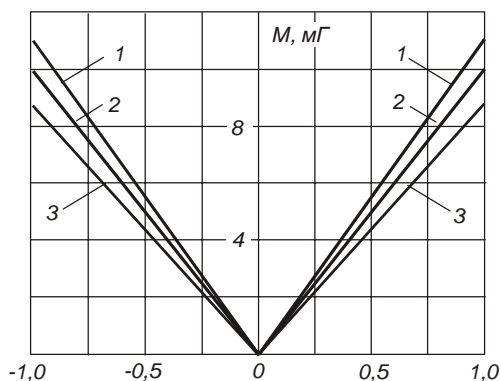


Рис. 9.8.3. Характеристики взаимной индуктивности передающего преобразователя типа ПД при различных токах питания с частотой 50 Гц: 1 - при номинальном токе; 2- большем номинального на 10 %; 3- меньшем номинального на 10 %

Унифицированные преобразователи ПД-3, ПД-4, ПД-5 с номинальным рабочим ходом плунжера от среднего положения  $\pm 1,5$ ;  $\pm 2$ ;  $\pm 4$  мм соответственно имеют аналогичную конструкцию, но катушка этих преобразователей заключена во внешний электромагнитный экран.

Для унификации характеристик к выходу преобразователя подключён переменный резистор сопротивлением 2,2 кОм. При номинальном токе питания 320 мА (напряжение 12 В) номинальное значение взаимной индуктивности 10 мГ (рис.9.8.3) с отклонением не более 0,5%, т.е. такое же, как у ДТП-1, ДТП-2, ДТП-3. При этом значении  $M_n$  изменение выходной э.д.с. составляет 1 В.

Угол сдвига  $\varphi = (0,131 \pm 0,026)$  рад. или  $(7,5 \pm 1,5)^\circ$  при частоте 50 Гц и  $(8 \pm 1,5)^\circ$  при 60 Гц.

Дифференциально-трансформаторные преобразователи этого типа используются только в первичных приборах, например, в мембранных дифференциальных манометрах, ротаметрах и т.п.

## 2. Лабораторная установка

Лабораторная установка представляет собой автономный стенд, в котором размещены исследуемый ДТП типа ПД-4, устройство для перемещения его плунжера на  $\pm 2$  мм, считая от среднего положения, ФЧВ эффективного значения со шкалой на 1 В и источник питания установки, подключаемый к сети 220 В 50 Гц. Лицевая панель стенда изображена на рис. 9.8.4а, а функционально-принципиальная схема на рис. 9.8.4б.

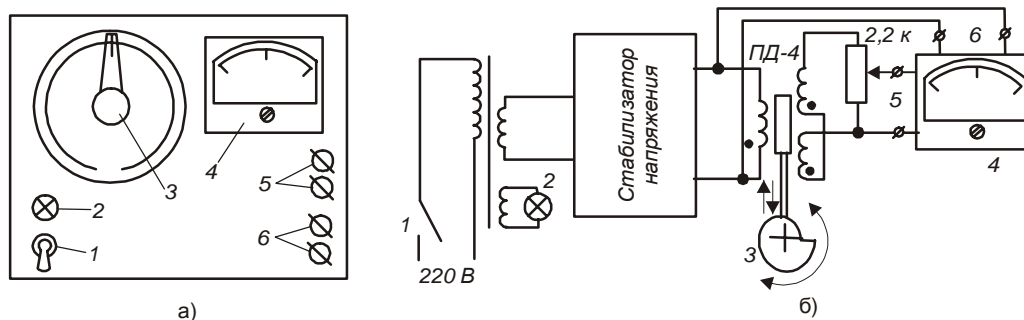


Рис. 9.8.4. Лабораторный стенд (а) и его функционально-принципиальная схема (б): 1 - выключатель питания; 2 - сигнальная лампочка включения питания; 3 - устройство для перемещения плунжера со шкалой; 4 - фазочувствительный вольтметр; 5 - гнезда, подключённые к выходу ДТП; 6 - гнезда, подключённые к обмотке возбуждения

Устройство для перемещения плунжера ПД-4 представляет собой кулачок с образующей, выполненной по спирали Архимеда, радиус которой увеличивается пропорционально углу поворота, в который через рычаг упирается шток плунжера. Ручка кулачка снабжена стрелкой со шкалой, отградуированной в миллиметрах перемещения. Ручку этого устройства можно перемещать от положения  $- 2$  мм до положения  $+2$  мм и обратно только в направлениях, включающих прохождение отметки 0 мм.

Шкала ФЧВ имеет отметку 0 В посередине. Отклонение стрелки вправо соответствует совпадению фаз напряжения выходной обмотки и обмотки возбуждения, отклонение влево – фазовому сдвигу этих напряжений на  $180^\circ$  с точностью до  $\varphi$  (см. рис. 9.8.2).

Для наблюдения мгновенных значений напряжений на экране выход ДТП и его обмотка возбуждения подключены к гнездам 5 и 6.

## 3. Выполнение работы

Ознакомьтесь с конструкцией и изучите теоретические основы работы унифицированного ДТП. Образец преобразователя входит в комплект лабораторной установки и выдаётся учебным мастером.

Устанавливая стрелку устройства для перемещения плунжера ДТП на оцифрованные точки шкалы, измерить ФЧВ выходные напряжения с учётом угла фазового сдвига  $0^\circ$  или  $180^\circ$  относительно напряжения на обмотке возбуждения. Все необходимые для этого соединения ФЧВ с измеряемыми цепями уже произведены внутри стенда.

Каждый цикл измерений при перемещении плунжера от  $-2$  мм до  $+2$  мм проделать 10 раз ( $n = 10$ ). Результаты занести в таблицу экспериментальных и расчётных данных. Рассчитать среднее арифметическое  $\bar{U}_{\text{вых.}i}$  измеренных величин в каждой из девяти точек ( $i = 1, 2, \dots, 9$ ), абсолютную погрешность  $\Delta U_{\text{вых.}}$ , относительную погрешность  $\Delta U_{\text{вых.отн.}}$  и величину средней квадратичной ошибки единичного результата  $\Delta U_{\text{вых.с.к.}}$ . Рассчитанные значения внести в ту же таблицу. Формулы для статистических расчётов приведены ниже.

Опытные данные и результаты статистической обработки

Параметр $U_{\text{вых.}i}$ $B$	Положение плунжера в точках $i=1, 2, 3, \dots, 9$ , мм								
	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2
$U_{\text{вых.}1}$									
$U_{\text{вых.}2}$									
⋮									
$U_{\text{вых.}10}$									
$\bar{U}_{\text{вых.}i}$									
$\Delta U_{\text{вых.}}$									
$\Delta U_{\text{вых.отн.}}$									
$\Delta U_{\text{вых.с.к.}}$									

Используя средние значения  $\bar{U}_{\text{вых.}i}$ , построить график зависимости выходного напряжения преобразователя  $U_{\text{вых.}}$  от положения плунжера, условно откладывая выходное напряжение, совпадающее по фазе с напряжением возбуждения, вверх, а противоположное по фазе вниз от точки  $U_{\text{вых.}} = 0$ . Оценить отклонение средних значений от линейной зависимости.

Вычислить номинальные значения взаимной индуктивности между первичной и вторичными обмотками для данного экземпляра преобразователя по формуле

$$M_H = \frac{U_{\text{вых.}H}}{2\pi f I},$$

где  $U_{\text{вых.}H}$  – выходное напряжение преобразователя (среднее арифметическое значение) в положениях плунжера  $+2$  мм и  $-2$  мм;  $B$ ;

$f$  – частота тока питания обмотки возбуждения;  $f = 50$  Гц;

$I$  – ток питания обмотки возбуждения преобразователя;  $I = 0,32$  А.

Вывести формулу функции преобразования в виде  $M = f(x)$ .

#### 4. Формулы для расчётов

Среднее арифметическое  $\bar{x}$  величин  $x_1, x_2, \dots, x_n$  в каждой из девяти оцифрованных точек на шкале

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n).$$

Абсолютная погрешность в каждой из этих девяти точек

$$\Delta x_i = \bar{x} - x_i.$$

Относительная погрешность

$$\Delta x_{\text{отн.}} = \frac{\Delta x_i}{\bar{x}}.$$

Средняя квадратичная ошибка единичного результата при  $n$  измерениях

$$\pm s_n = \sqrt{\frac{(\bar{x} - x_1)^2 + (\bar{x} - x_2)^2 + \dots + (\bar{x} - x_n)^2}{n-1}}$$

О точности вычислений.

Ошибка, полученная в результате вычислений, должна быть примерно на порядок (т.е. в 10 раз) меньшей суммарной ошибки измерений. Так как погрешности измерения напряжения ФЧВ и градуировки шкалы устройства для перемещения плунжера не превышают 1%, погрешность измерения в каждой точке будет несколько больше, но не хуже, чем 2%. Поэтому *число значащих цифр в промежуточных вычислениях должно быть три, а в окончательном результате два.*

## 5. Оформление отчёта

Отчёт должен содержать:

- 1) электрическую схему преобразователя и краткое описание его работы;
- 2) функционально-принципиальную схему лабораторной установки;
- 3) результаты опытов в виде таблицы и графиков;
- 4) выводы по работе, в которых следует отразить близость полученных результатов к ожидаемым для данного преобразователя.

### Вопросы для самопроверки

1. Описать конструкцию унифицированного ДТП.
2. Нарисовать типовую электрическую схему включения унифицированного ДТП.
3. Назвать номинальный рабочий ход преобразователей ДТП-1, ДТП-2, ДТП-3, ПД-3, ПД-4, ПД-5.
4. Объяснить, какой электрический параметр является выходной величиной унифицированного преобразователя и привести его номинальное значение.
5. Привести формулу, по которой рассчитывается эффективное значение выходной э.д.с. преобразователя в зависимости от хода его плунжера.
6. Объяснить, в чём состоит унификация преобразователей, что в них унифицировано и как это сделано.
7. Привести номинальные значения параметров питания цепи обмотки возбуждения и величину выходного напряжения преобразователей обоих изучаемых типов.
8. Указать области применения ДТП.

### Библиографический список

1. Ключев А.С. Автоматическое регулирование: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2000. – 350 с.
2. Наладка приборов и устройств технологического контроля. Справочное пособие. Под общ. ред. А.С. Ключева. – М.: Энергия, 1996. – 416 с.

## 9.9. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9

### ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ С ПОМОЩЬЮ НАКЛЕИВАЕМЫХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

*Цель работы:*

- 1) изучить материал главы 7;
- 2) ознакомиться с методом измерения деформаций с помощью наклеиваемых тензорезисторов и научиться рассчитывать напряжения в материале элемента конструкции, к поверхности которого приклеен тензорезистор;
- 3) по величине напряжений в элементе научиться рассчитывать усилия, приложенные к элементу.

*Приборы и материалы:* лабораторный стенд, пружинный динамометр, вольтметр.

#### 1. Силы, деформации и напряжения

Силы бывают сосредоточенные и распределённые.

*Сосредоточенной силой* называется давление, передающееся на элемент конструкции через площадь, размеры которой очень малы по сравнению с размерами всего элемента. Обычно считают сосредоточенной силу, приложенную в точке.

*Распределённой нагрузкой* называются силы, приложенные на протяжении некоторой длины или площади конструкции.

Сосредоточенные силы измеряются в единицах силы (ньютоны, килограммы, тонны); распределённые по площади нагрузки измеряются в единицах силы, отнесённых к единице площади ( $\text{Н/м}^2$ ,  $\text{кг/м}^2$  и т.п.); распределённые по длине элемента – в единицах силы, отнесённых к единице длины ( $\text{Н/м}$ ,  $\text{кг/м}$ ).

Элемент конструкции при действии внешних сил в большей или в меньшей степени изменяет свои размеры и форму. Это изменение носит общее название – *деформация*.

Деформации разделяют на *упругие* и *остаточные*.

*Упругими* деформациями называют такие изменения формы и размеров элемента, которые исчезают после удаления вызвавших их сил. Опыт показывает, что упругие деформации наблюдаются, пока величина внешних сил не превзошла известного предела.

Если внешние силы превзошли этот предел, то после их удаления размеры и форма элемента не восстанавливаются в первоначальном виде; остаточные разности размеров называются *остаточными* деформациями.

Под действием внешних сил в элементе *возникают дополнительные внутренние силы, сопровождающие деформацию материала*. Эти внутренние силы сопротивляются стремлению внешних сил разрушить элемент.

Оценить их можно так называемым методом сечений. Представим себе стержень (рис. 9.9.1а) под действием двух равных и прямо противоположных сил  $P$  и мысленно разделим его на две части А и Б плоскостью  $mn$ . Под действием сил  $P$  обе половины стержня стремятся разъединиться и удерживаются вместе за счёт взаимодействия между атомами, находящимися по обе стороны плоскости  $mn$ . Равнодействующая этих сил взаимодействия называется *усилием*, передающимся через сечение  $mn$  от одной части стержня на другую и обратно. Внутренняя сила взаимодействия, приходящаяся на *единицу площади*, выделенную у какой-либо точки сечения  $mn$ , называется *напряжением* в этой точке по проведённому сечению. Напряжения,

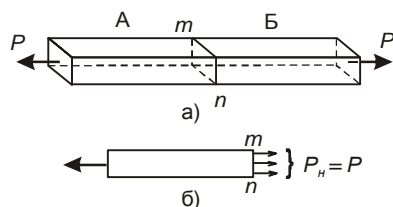


Рис. 9.9.1. Пример метода сечений

действующие от части А на часть Б и от Б на А по закону действия и противодействия равны между собой.

Так как напряжение представляет собой *силу, приходящуюся на единицу площади*, то оно измеряется в единицах силы, отнесённых к единице площади:  $\text{Н/м}^2$ ,  $\text{кг/м}^2$  и т.д.

#### 2. Деформации при растяжении и сжатии. Закон Гука

Основными типами деформаций являются: 1) растяжение или сжатие (рис. 9.9.2а и 9.9.1б); 2) кручение (рис. 9.9.2в) – работа валов; 3) изгиб – работа всякого рода балок (рис. 9.9.2г); перерезывание (рис. 9.9.2д) – работа болтов, заклёпок.

Рассмотрим деформацию стержня по рис. 9.9.1а. Центральным растяжением или сжатием называется деформация его под действием двух равных и противоположно направленных сил, приложенных к концевым сечениям и направленным по оси стержня.

Пусть сечение стержня  $mn$  *перпендикулярно* его оси. Отбросим часть Б; тогда, чтобы равновесие части А не было нарушено, нужно заменить действие отброшенной части Б силами, передающимися на часть А через сечение (рис. 9.9.1б). Заменяющие силы будут уравнивать внешнюю силу  $P$ , поэтому они должны сложиться в равнодействующую  $P_n$  сил, распределённых по сечению и выражаемых через напряжения, равную  $P$  и направленную противоположно действующей на часть А внешней силе.



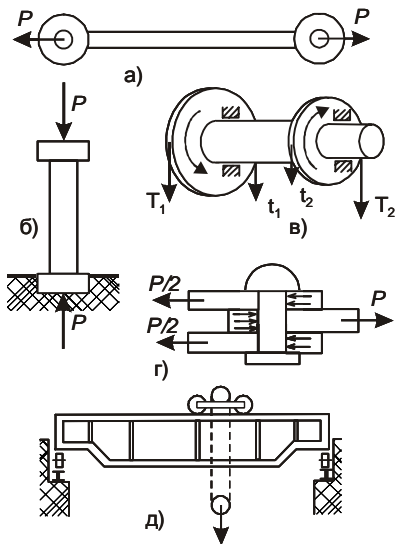


Рис. 9.9.2. Основные типы деформаций: а) растяжение; б) сжатие; в) кручение; г) срез; д) изгиб

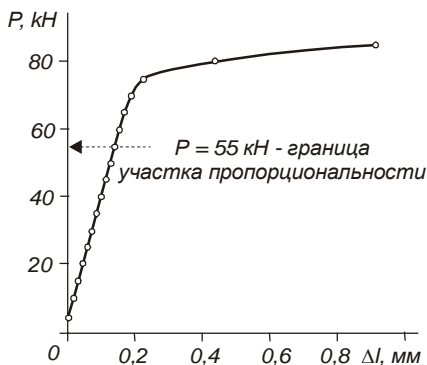


Рис. 9.9.3. Результаты опытов по растяжению стального стержня (на длине 100 мм)

Опыты показывают, что если растягивающие силы достаточно точно совпадают с осью стержня, то удлинения прямых линий, проведённых на поверхности стержня параллельно его оси, будут равны. Отсюда возникает предположение о равномерном распределении напряжений по сечению. Лишь у концов стержня, там, где происходит непосредственная передача сил на стержень, распределение напряжений неравномерно по сечению, но уже на небольшом расстоянии от концов, равном примерно 10% от длины стержня при отношении длины стержня к его диаметру 7:4 и более, наступает равномерное распределение напряжений по сечению, перпендикулярно оси. Эти напряжения направлены параллельно силе  $P$ , т.е. нормально к сечению  $mn$ , поэтому их называют *нормальными* напряжениями; их обозначают буквой  $\sigma$ . Так как они распределены равномерно по площади сечения  $F$ , то  $P_H = \sigma \cdot F$ , а так как  $P_H = P$ , получаем

$$\sigma = \frac{P}{F}.$$

По этой формуле можно вычислить напряжение  $\sigma$ , если известна растягивающая сила  $P$  и размер сечения  $F$ , либо  $P$ , если известны  $\sigma$  и  $F$ .

Без всяких изменений эта формула может быть применена к случаю сжатия стержня.

Полную картину работы элемента можно получить лишь в опытах. На рис. 9.9.3 представлены результаты опытов по растяжению стержня из стали У8 длиной 220 мм и сечением  $F=176$  мм<sup>2</sup>. Приращение  $\Delta l$  длины  $l$  измерялось на длине  $l=100$  мм в средней части стержня.

В начале опыта увеличение длины идёт пропорционально увеличению нагрузки; приращению усилия в 5 кН соответствует приращение длины на одну и ту же (в пределах точности опыта) величину, а именно  $13,6 \cdot 10^{-3}$  мм. Когда нагрузка достигла известного предела, в данном случае 55 кН, пропорциональность нарушилась, за этим пределом деформации (удлинение образца) растут быстрее, а после 75 кН ещё быстрее.

Напряжение, вызванное нагрузкой, после которой нарушается пропорциональность, называется *пределом пропорциональности*. Если до достижения предела пропорциональности нагрузку снять, элемент полностью вернётся к исходной форме.

Если повторить опыт, измеряя увеличение длины на расстоянии  $l=50$  мм, то приращения длины при тех же нагрузках будут вдвое меньше приращений на длине  $l=100$  мм.

Если в опыте использовать стержень другого поперечного сечения, то удлинения меняются обратно пропорционально площади при одних и тех же нагрузках.

Таким образом, пока нагрузка на образец не достигнет известного предела, удлинение прямо пропорционально растягивающей силе  $P$ , длине образца  $l$  и обратно пропорционально площади поперечного сечения  $F$ . Обозначив через  $\Delta l$  приращение длины образца от силы  $P$ , можно записать формулу, обобщающую опытные данные:

$$\Delta l = \frac{Pl}{EF},$$

где  $E$  – коэффициент пропорциональности, различный для разных материалов.

Величина  $\Delta l$  называется *абсолютным удлинением* стержня от силы  $P$ . Формула носит название *закона Гука*.

Разделив обе части этой формулы на первоначальную длину  $l$ , получим

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{P}{EF}.$$

Отношение  $\Delta l/l$  называется *относительным удлинением*; оно обозначается буквой  $\varepsilon$ . Подставив вместо  $\Delta l/l$  символ  $\varepsilon$ , а вместо  $P/F$  символ  $\sigma$ , получим иную запись закона Гука:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad \text{или} \quad \sigma = \varepsilon E.$$

Коэффициент пропорциональности  $E$  называется *модулем упругости*. Чем  $E$  больше, тем меньше растяжение стержня под влиянием усилия  $P$  при прочих равных условиях.

Величину  $E$  для стали У8 можно получить из приведённых опытных данных:

$$E = 210 \text{ ГПа} = 21 \cdot 10^6 \text{ Н/см}^2 = 2,14 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2.$$

Величина  $E$  даже для одного и того же материала несколько колеблется. Для некоторых материалов (сталь, медь)  $E$  одинаково при растяжении и сжатии.

Формула закона Гука позволяет определить удлинение или укорочение, которое получит элемент при растяжении и сжатии. Обратное, зная это удлинение, размеры и материал стержня, можно найти нормальное напряжение, которое в нём возникает. Если известна внешняя сила  $P$ , растягивающая или сжимающая стержень,  $\sigma$  вычисляется по уже приведённой формуле

$$\sigma = \frac{P}{F};$$

если же внешняя сила неизвестна, а можно измерить удлинение стержня, то

$$\sigma = \varepsilon E = \frac{\Delta l}{l} E.$$

С помощью этих формул, зная площадь поперечного сечения  $F$ , можно определить усилие  $P$ :

$$P = \sigma F = \varepsilon EF.$$

Стержни, работающие на растяжение или сжатие, испытывают помимо *продольных деформаций* и *поперечные*.

Опыт показывает, что при растяжении стержня длина его увеличивается на  $\Delta l$ , а ширина уменьшается на величину  $\Delta b = b - b_1$ , где  $b_1$  – ширина растянутого стержня. Относительная поперечная деформация  $\varepsilon_1 = \Delta b / b$ . Для большинства материалов  $\varepsilon_1$  в 3...4 раза меньше  $\varepsilon = \Delta l / l$ .

Абсолютная величина отношения  $\varepsilon_1$  к  $\varepsilon$  называется коэффициентом *поперечной деформации* или *коэффициентом Пуассона*  $\mu$ :

$$\mu = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon}.$$

Коэффициент Пуассона  $\mu$ , как и модуль упругости  $E$ , является *характеристикой упругих свойств материала*. Для материалов, упругие свойства которых одинаковы во всех направлениях, упругие постоянные  $E$  и  $\mu$  полностью характеризуют их свойства. С достаточной для практики точностью к ним могут быть отнесены сталь и другие металлы, бетон, неслоистые пластмассы. Для стали коэффициент Пуассона при деформациях в пределах пропорциональности  $\mu = 0,24 \dots 0,30$ .

### 3. Измерение деформации с помощью тензорезисторов

Для измерения деформации на поверхности исследуемого элемента под действием внешних сил в интересующем экспериментатора направлении приклеивают тензорезистор, продольную ось которого максимально точно располагают в этом направлении. Ошибка измерения деформации при отклонении оси на  $\pm 8^\circ$  составляет  $\pm 1\%$ , на  $\pm 2^\circ - \pm 0,1\%$ .

Далее производят два измерения сопротивления тензорезистора  $R$  и  $R + \Delta R$  соответственно при ненагруженном элементе и под нагрузкой, вычисляют изменение сопротивления  $\Delta R$  с учётом знака и находят  $\varepsilon_R = \Delta R / R$ . Используя паспортные данные о коэффициенте тензочувствительности  $S$  наклеенного тензорезистора, вычисляют среднюю относительную деформацию поверхности элемента  $\varepsilon_1 = S \varepsilon_R$  в пределах длины

базы, а с учётом паспортных данных о среднеквадратичном отклонении коэффициента тензочувствительности  $\sigma_S$  её среднеквадратичное отклонение.

При статических измерениях деформаций измерение сопротивления осуществляют обычно мостовым способом с помощью уравновешенных или неуравновешенных мостов.

На рис. 9.9.4 изображена схема неуравновешенного моста. В ней  $R_p$  – рабочий тензорезистор, наклеенный на испытуемый элемент,  $R_k$  – точно такой же тензорезистор, называемый термокомпенсационным, наклеенный на вспомогательный эле-

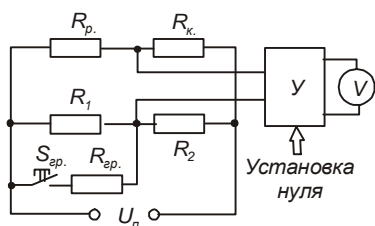


Рис. 9.9.4. Мостовая измерительная схема

мент, не подвергающийся деформации и имеющий ту же температуру, что рабочий тензорезистор. Такое включение тензорезисторов позволяет исключить возможные ошибки, связанные с изменением сопротивления рабочего тензорезистора в результате воздействия температуры. Два других плеча моста образованы стабильными и точными резисторами  $R_1$  и  $R_2$ . Мост получает питание от источника постоянного тока  $U_n$ .

Условием баланса моста является

$$\frac{R_p}{R_k} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Если условие баланса выполнено, то падения напряжения на резисторах  $R_p$  и  $R_1$  равны, и выходное напряжение моста равно нулю.

После нагружения элемента внешними силами сопротивление тензорезистора  $R_p$  изменяется, и баланс моста нарушается; его выходное напряжение после усилителя  $U$  приводит к отклонению стрелки вольтметра-указателя  $V$ .

Если по каким-то причинам при ненагруженном элементе условие баланса моста не выполнено, напряжение на выходе усилителя можно сделать равным нулю, подав на вход усилителя соответствующее напряжение противоположного знака от специальной схемы установки нуля.

Для градуирования шкалы указателя в единицах относительного изменения сопротивления плеча  $R_p$  изменяют на известную величину одно из постоянных сопротивлений плеч моста  $R_1$  или  $R_2$  путём подключения параллельно одному из них высокоточного резистора  $R_{ep}$ . Например, если элемент и наклеенный на него рабочий тензорезистор  $R_p$  будут испытывать напряжение растяжения, резистор  $R_{ep}$  включают кнопкой  $S_{ep}$  параллельно плечу  $R_1$ . Относительное изменение сопротивления плеча с  $R_1$  по действию на выходное напряжение моста равно относительному изменению сопротивления  $R_p$ . Поэтому выбирают  $R_{ep}$  такой величины, чтобы относительное изменение сопротивления  $R_1$

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{1}{R_1} \left( R_1 - \frac{R_1 R_{ep}}{R_1 + R_{ep}} \right)$$

было бы близко к ожидаемому значению изменения относительного сопротивления рабочего тензорезистора.

Пусть в результате подключения  $R_{ep}$  кнопкой  $S_{ep}$  при градуировке отклонение стрелки указателя составило  $A_{ep}$  делений, а при нагружении элемента и изменении в результате этого сопротивления рабочего тензорезистора  $R_p$  получили отклонение стрелки  $A_{uzm}$  делений. Тогда относительное изменение сопротивления рабочего тензорезистора вычисляется так:

$$\frac{\Delta R_p}{R_p} = \frac{A_{uzm}}{A_{ep}} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}.$$

Если известен коэффициент тензочувствительности  $S$  и его среднеквадратичная ошибка  $\sigma_S$ , можно отградуировать указатель непосредственно в единицах деформации  $\varepsilon_i$ :

$$\varepsilon_i = \frac{1}{(S \pm \sigma_S)} \cdot \frac{A_{uzm}}{A_{ep}} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}.$$

Такая же схема применяется при динамических измерениях, только вместо вольтметра-указателя  $V$  используют регистратор, записывающий текущее значение  $\varepsilon_i$  во времени.

#### 4. Лабораторная установка

Если известны геометрические размеры и константы материала чувствительного элемента измерительного преобразователя и параметры тензорезисторов, преобразователь может быть применён для измерения с высокой точностью усилия, приложенного к чувствительному элементу. Лабораторная установка предназначена для создания и измерения усилия растяжения пружинного динамометра и градуировки его шкалы.

Эскиз механической части лабораторной установки изображён на рис. 9.9.5. Она состоит из пружинного динамометра 1, снабжённого шкалой 2, натяжного винтового устройства 4 и 5 и чувствительного элемента тензорезисторного преобразователя 3, закреплённых на станине. Чувствительный элемент представляет собой плоский стальной растягиваемый стержень, на обеих поверхностях которого посередине напротив друг друга наклеены два тензорезистора 6. Отношение длины стержня к ширине составляет 4,5:1, что обеспечивает равномерное распределение растягивающих напряжений на большей части его длины. Электрическая часть установки включает в себя тензометрический мост, преобразователь сигналов тензометрического моста в напряжение 1909 ПА, вольтметр-указатель и устройство для

градуировки шкалы вольтметра-указателя в единицах относительной деформации чувствительного элемента или напряжения в нём. Электрическая схема соединений соответствует схеме по рис. 9.9.4.

Два тензорезистора 6, наклеенные на чувствительный элемент, включены между собой последовательно, работают согласно, т.е. одновременно и одинаково растягиваются, и образуют плечо  $R_p$  тензометрического моста. Два других тензорезистора 7, наклеенные на стальную недеформируемую пластинку, укрепленную на станине, и также включённые последовательно, образуют плечо  $R_k$  тензометрического моста. Вторая ветвь тензометрического моста составлена из стабильных марганцевых сопротивлений 9 ( $R_1$ ) и 8 ( $R_2$ ). Устройство для создания известного разбаланса моста с целью градуировки шкалы вольтметра-указателя 11 в единицах относительной деформации включает в себя высокоточный резистор 10 ( $R_{сп.}$ ) и кнопку  $S_{сп.}$  с замыкающим контактом, расположенную в корпусе вольтметра-указателя.

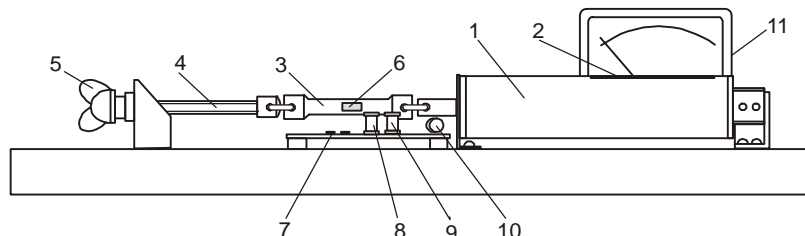


Рис. 9.9.5. Эскиз лабораторной установки: 1 - пружинный динамометр; 2 - его шкала; 3 - измерительный элемент; 4 - натяжной винт; 5 - натяжная гайка; 6 - рабочий тензорезистор  $R_p$ ; 7 - компенсационный тензорезистор  $R_k$ ; 8 -  $R_2$ ; 9 -  $R_1$ ; 10 -  $R_{сп.}$ ; 11 - вольтметр-указатель

Параметры чувствительного элемента:

материал сталь У8, модуль упругости  $E = 2,14 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2 = 210 \text{ ГПа}$ ;

ширина и толщина стержня  $12,30 \text{ мм}$  и  $0,61 \text{ мм}$ ;

площадь поперечного сечения  $F = 7,509 \text{ мм}^2$ .

Тензорезисторы заводом-изготовителем с указанием их параметров в партии снабжаются паспортом. Ниже приведены выписанные из паспорта существенные для выполнения данной лабораторной работы параметры применённых фольговых константовых тензорезисторов с прямоугольной решёткой исполнения А с базой 3 мм и номинальным сопротивлением 150 Ом.

Тип тензорезисторов : ФКПА 3-150.

Действительное значение сопротивления  $R = 126,5 \text{ Ом}$ .

Температурный диапазон работоспособности  $-40 \dots +70 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Ток питания не более 30 мА.

Измеряемая относительная деформация не более  $\pm 3 \cdot 10^{-3}$ .

Коэффициент относительной тензочувствительности наклеенного тензорезистора  $S$  при темпера-

туре

$t = -40 \text{ }^\circ\text{C}$      $S = 2,23$      $\sigma_S = \pm 0,93 \%$ ,

$t = +20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$      $S = 2,23$      $\sigma_S = \pm 0,79 \%$ ,

$t = +70 \text{ }^\circ\text{C}$      $S = 2,22$      $\sigma_S = \pm 0,90 \%$ ,

где  $\sigma_S$  – среднеквадратичное отклонение  $S$ .

Значения сопротивлений плеч тензометрического моста:

$R_p = 253,65 \text{ Ом}$ ,                       $R_k = 254,15 \text{ Ом}$ ,

$R_1 = 598,9 \text{ Ом}$ ,                       $R_2 = 599,5 \text{ Ом}$ ,

$R_{сп.} = 1 \text{ МОм} \pm 0,03 \%$ .

Преобразователь 1909ПА :

напряжение питания моста 6 В;

возможность установки нуля от минус 20 до плюс 20 мВ;

погрешность нелинейности 0,1 %.

Поскольку согласно фактическим значениям сопротивлений плеч моста условие баланса не выполняется, установка нуля на выходе при разгруженном чувствительном элементе должна быть сделана органами настройки 1909ПА.

## 5. Выполнение работы

В результате выполнения работы студент должен освоить метод измерения деформаций на поверхности какой-либо детали, элемента, конструкции с помощью наклеиваемых тензорезисторов. Для этого следует выполнить следующие пункты.

*Теоретический раздел работы.*

1. Усвоить понятия сила, деформация, напряжение, изучить их взаимосвязи.

2. Ознакомиться с конструкциями тензорезисторов, понять, как зависит относительное изменение сопротивления тензорезистора от его относительной деформации, как рассчитать относительную деформацию поверхности элемента, с какой погрешностью будет получен результат этого расчёта.

3. Изучить мостовую схему для измерения изменения сопротивления тензорезистора и способ градуировки измерителя в единицах относительного изменения сопротивления тензорезистора и в единицах его относительного удлинения.

*Практический раздел работы.*

1. Гайкой 5 (рис. 9.9.5) разгрузить измерительный элемент 3 и динамометр 1 и сбалансировать электрическую схему до получения выходного напряжения, равного нулю.

2. Подключить кнопкой  $S_{эп.}$  резистор  $R_{эп.}$  параллельно резистору  $R_1$  и записать отклонение стрелки вольтметра-указателя  $A_{эп.}$ . По приведённой выше формуле подсчитать относительное изменение сопротивления плеча моста с резистором  $R_1$  в результате этого подключения. Из-за большой разницы сопротивлений  $R_1$  и  $R_{эп.}$  вычисления надо производить с не менее чем тремя знаками после запятой. Рассчитать, какой относительной деформации наклеенного тензорезистора  $R_p$  соответствует отклонение  $A_{эп.}$ . Пренебрегая малой нелинейностью 1909ПА, найти цену деления вольтметра-указателя в единицах относительной деформации.

3. Увеличить усилие до перемещения указателя динамометра до первого оцифрованного деления, считать и записать в журнал наблюдений (пример журнала в приведённой ниже таблице) показание вольтметра-указателя. Увеличивать усилие надо медленно и внимательно, чтобы указатель не перешёл за первое деление. Проскочив это деление, нельзя вернуться к нему обратно, а нужно вновь разгрузить динамометр и начать увеличивать усилие сначала.

4. Повторять операции предыдущего пункта, устанавливая указатель динамометра на всех оцифрованных делениях.

5. После последнего деления уменьшать усилие, вновь устанавливая указатель динамометра на всех оцифрованных делениях вплоть до нулевого и записывая показания вольтметра.

6. Повторить операции пунктов 3...5 не менее пяти раз.

Журнал наблюдений

Отметка на шкале динамометра, кг	Показания по вольтметру-указателю, деления									Результаты расчётов					
	1 опыт		2 опыт		3 опыт		4 опыт		5 опыт		Среднее значение при нагружении	Среднее значение при разгрузке	Усреднённое значение	Действительное значение усилия, кг	Среднее квадратичное отклонение (ошибка) усилия $\pm \delta$ , кг
	Нагружение	Разгрузка	Нагружение	Разгрузка	Нагружение	Разгрузка	Нагружение	Разгрузка	Нагружение	Разгрузка					
0															
5															
...															
45															

7. Рассчитать средние значения показаний при нагружении и при разгрузке и занести результаты в журнал наблюдений.

8. На одном графике построить зависимости величины средних для пяти опытов значений показаний при нагружении и средних при разгрузке в зависимости от положения указателя динамометра.

9. По полученным данным, находя полусумму средних значений показаний при нагружении и разгрузке по усреднённым значениям показаний вольтметра-указателя и используя паспортные данные о коэффициенте тензочувствительности  $S$  тензопреобразователей ФКПА-3-150 при комнатной температуре, рассчитать относительные деформации  $\varepsilon_l$  и действительные значения усилия и его среднеквадратичного отклонения в каждой оцифрованной точке шкалы динамометра. Для расчёта усилия следует воспользоваться формулой

$$P = \sigma F = \varepsilon_l EF,$$

результаты занести в последние две колонки журнала наблюдений и построить по ним градуировочный график динамометра в координатах «Отметка на шкале динамометра – Действительное значение усилия».

## 6. Оформление отчёта

Отчёт по работе должен содержать:

- 1) цели работы;
- 2) основные определения, теоретические сведения и формулы, необходимые для осмысления материала, для проведения опытов и расчётов;
- 3) принципиальную схему электрической части установки, эскиз механической части установки или её кинематическую схему;
- 4) описание проведения опытов;
- 5) журнал наблюдений, опытные данные, промежуточные и окончательные расчёты, графики;
- 6) выводы по работе, в которых должны быть оценены трудоёмкость опытов, погрешности и их источники, близость полученных результатов к ожидаемым из теоретического рассмотрения вопроса.

### Вопросы для самопроверки

1. Определить понятия: сила, деформация, напряжение.
2. Определить понятия модуль упругости и коэффициент Пуассона.
3. Чему равны модуль упругости и коэффициент Пуассона для стали?
4. Как по известной деформации стержня определить усилие, действующее на стержень?
5. Как измерить деформацию стержня с помощью тензорезисторов?
6. Как и чем измерить деформацию тензорезистора?
7. Как по известному изменению сопротивления наклеенного тензорезистора определить деформацию исследуемого элемента?

### Библиографический список

1. Метрология, стандартизация, сертификация и электро-измерительная техника: Учеб. пособие / К.К. Ким, Г.Н. Анисимов, В.Ю. Барбарович, Б.Я. Литвинов. – СПб.: Питер, 2006. – 368 с.: ил.
2. Электрические измерения. Средства и методы измерений (общий курс). Учеб. пособие для втузов / Под ред. Е.Г. Шрамкова. – М.: Высш. шк., 1972. – 520 с.

## 9.10. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10

### ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРОВОЛОЧНОГО ТЕНЗОРЕЗИСТОРА, НАКЛЕЕННОГО НА ДЕТАЛЬ КОНСТРУКЦИИ

*Цель работы:*

- 1) изучить материалы главы 7 и инструкцию к лабораторной работе №9.9;
- 2) ознакомиться с методом измерения деформаций с помощью наклеиваемых тензометрических преобразователей;
- 3) научиться работать с типичным тензометрическим усилителем ТА-5;
- 4) определить коэффициент тензочувствительности наклеенного тензорезистора, мгновенный и длительный переходные коэффициенты.

*Приборы и материалы:* градуировочная балка с наклеенными тензорезисторами, усилитель для тензометрических измерений ТА-5, магазины сопротивлений.

#### 1. Теоретические сведения

Тензорезисторы применяются, главным образом, для измерения деформаций и напряжений в частях механических конструкций.

Принцип действия проволочного тензорезистора (тензодатчика) основан на зависимости активного сопротивления проволоки от ее растяжения и сжатия. Многочисленными исследованиями установлено, что эта зависимость может быть представлена в виде:

$$\frac{\Delta R}{R_M} \bigg/ \frac{\Delta l}{l_M} = \frac{\varepsilon_{R_M}}{\varepsilon_{l_M}} = S_M,$$

где  $l_M, R_M$  – первоначальная длина и сопротивление проволоки;

$\Delta l, \Delta R$  – абсолютные удлинение и изменение сопротивления проволоки в результате деформации;

$\varepsilon_{R_M}, \varepsilon_{l_M}$  – относительные изменения длины и сопротивления проволоки;

$S_M$  – коэффициент чувствительности к деформации материала проволоки (коэффициент тензоувствительности материала проволоки).

В общем случае изменение сопротивления материала проволоки связано с изменением её геометрических размеров и удельного сопротивления, поэтому  $S_M$  можно разбить на геометрический  $S_e$  и физический  $S_\phi$  коэффициенты:

$$S_M = S_e + S_\phi.$$

Коэффициенты  $S_e$  и  $S_\phi$  равны:

$$S_e = 1 + 2\mu_M;$$
$$S_\phi = C(1 - 2\mu_M),$$

где  $\mu_M$  – коэффициент Пуассона материала проволоки (коэффициент, показывающий, какую часть от относительной деформации в направлении приложенного усилия составляет деформация в перпендикулярном направлении);

$C$  – постоянная Бриджмена, зависящая от кристаллического строения материала проводника и меняющаяся для чистых металлов в пределах от -12 (никель) до +6 (платина).

Таким образом.

$$S_M = 1 + 2\mu_M + C(1 - 2\mu_M).$$

Коэффициент  $C$  зависит не только от материала, но и от условий его механической и термической обработки, и для каждого материала определяется экспериментально. Экспериментально вполне надежно установлено, что в области упругости (в пределах закона Гука) коэффициент  $S_M$  постоянен.

В области пластической деформации проводник ведет себя как изотропное несжимаемое вещество, в ней  $\mu_M = 0,5$ . Поэтому у всех металлов в этой области  $S_M = 2$ .

Все приведенные соотношения справедливы только для прямолинейно деформированного проводника. Для тензорезистора, и тем более наклеенного, соотношения другие.

Пусть тензорезистор имеет форму, как на рис.9.10.1а, и пусть он подвергнут напряжению простого растяжения вдоль оси  $u$  с относительной деформацией  $\varepsilon_y$ . Тогда поперечная часть проводника, лежащая в направлении  $x$ , подвергнется деформации

$$\varepsilon_x = -\mu_{\partial} \varepsilon_y,$$

где  $\mu_{\partial}$  – постоянная Пуассона для материала детали, на которую наклеен тензорезистор.

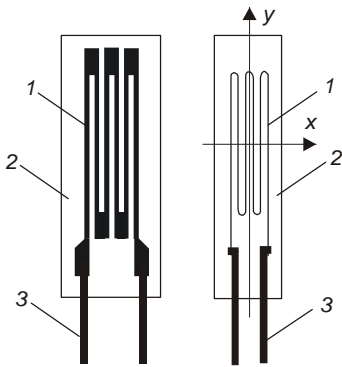


Рис. 9.10.1. Тензорезисторы:  
а) с решёткой из проводника прямоугольного сечения (фольговый);  
б) с решёткой из проводника круглого сечения (проволочный)  
1 - проводник;  
2 - подложка;  
3 - вывод

Чувствительность к деформации проводника тензорезистора  $S'$  будет теперь на  $\chi$  меньше, чем чувствительность материала  $S_M$ :

$$S' = S_M - \chi = S_M \left(1 - \frac{\chi}{S_M}\right).$$

Отношение  $\frac{\chi}{S_M}$  зависит от соотношения

длины тензорезистора и его ширины, от типа тензорезистора (фольговый или проволочный, одно- или многонитевой) и формы поперечных соединений. У проволочных тензорезисторов

$$\frac{\chi}{S_M} = (3..20)10^{-3},$$

у фольговых с уширенной

перемычкой  $\frac{\chi}{S_M} = 10^{-4}$ , т.е. практически равно нулю.

Из-за влияния связующего (клея) и неравномерного распределения деформаций и напряжений по переходному слою между проводником и деталью на проводник передается только часть деформации с поверхности объекта, так что общая тензочувствительность тензорезистора  $S$  намного меньше, чем  $S_M$  или  $S'$ . Отношение *коэффициента тензочувствительности наклеенного тензорезистора*  $S$  коэффициенту тензочувствительности *материала решетки*  $S_M$

$$K = S / S_M$$

называется *переходным коэффициентом*. Коэффициент  $K$  зависит от вида подложки и сорта клея, от их толщины, от наличия и качества защитного покрытия; у правильно изготовленного и хорошо наклеенного тензорезистора он должен лежать в пределах 0,98...1, что необычайно трудно выполнить. Увеличение  $K$  до 1 приводит к сокращению ряда методических погрешностей тензоизмерений. Оно означает меньшее рассеивание величины коэффициента  $K$ , а следовательно, близкое совпадение результатов, получаемых при градуировке партии тензорезисторов и при использовании тензорезисторов этой партии в процессе измерения.

При статическом нагружении постоянным напряжением деформация связующего изменяется во времени  $t$ . Явление непрерывного изменения деформации при заданном напряжении называется *ползучестью*. Под *предельной ползучестью*  $\Pi_{пр}$  понимается разность переходных коэффициентов при  $t = 0$  и  $t \rightarrow \infty$ :

$$\Pi_{пр} = K_{мен.} - K_{длит.}$$

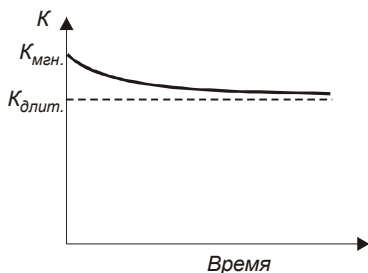


Рис. 9.10.2. Кривая ползучести наклеенного тензорезистора

*Предельная ползучесть представляет собой разность показаний тензорезистора, взятых непосредственно после нагружения (мгновенно,  $t = 0$ ) и после длительной выдержки ( $t \rightarrow \infty$ ), отнесенную к деформации детали и коэффициенту тензочувствительности материала решетки.* Явление ползучести проиллюстрировано на рис.9.10.2. При медленном изменении деформации (близком к статическому) тензорезистор регистрирует некоторую комбинацию процессов деформации основного материала и собственной ползучести. При измерении переменных деформаций из-за вязкоупругих несовершенств связующего в результаты измерений вносятся динамические погрешности.

Как правило, для работы с тензорезисторами используют мостовые схемы. Мостовые схемы позволяют уменьшить искажение результатов измерений под влиянием на объект измерения и тензорезисторы температуры. Изменение температуры оказывает двойное воздействие на тензорезисторы и тензометрический мост: изменяется чувствительность моста и происходит дрейф нуля. Чувствительность моста изменяется, в основном, в результате температурной зависимости коэффициента тензочувствительности. Дрейф нуля возникает в результате изменения сопротивлений тензорезисторов из-за теплового расширения объекта измерения при нагреве.



Тепловой дрейф нуля можно удерживать в малых пределах, если использовать одновременно два тензорезистора, которые находятся в одинаковых температурных условиях, наклеены на один и тот же материал и включены в соседние плечи моста. Разумеется, чтобы получить хорошую компенсацию, сами тензорезисторы должны иметь одинаковые характеристики (материал, температурный коэффициент сопротивления, коэффициент тензочувствительности). Второй тензорезистор (компенсационный) не обязательно при этом должен подвергаться механической деформации. Одинаковое температурное воздействие на компенсационный и активный тензорезисторы может осуществляться благодаря тому, что компенсационный тензорезистор имеет хорошую тепловую связь с объектом измерения (обеспечиваемую, например, винтами или точечной сваркой, рис.9.10.3).

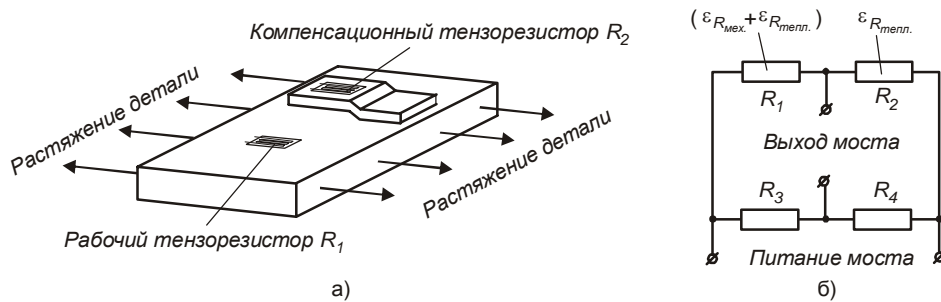


Рис. 9.10.3. Размещение рабочего  $R_1$  и компенсационного  $R_2$  тензорезисторов (а) включения этих тензорезисторов в соседние плечи тензометрического моста (б).  $R_3$  и  $R_4$  - постоянные стабильные резисторы, образующие соседнюю ветвь моста

Для перехода от относительного изменения сопротивления тензорезистора к относительному удлинению на поверхности объекта служит уравнение деформации тензорезистора, получаемое следующим образом.

Как было показано, коэффициент  $S$  есть величина постоянная, выражающая связь относительного удлинения тензорезистора  $\varepsilon_R$  и относительного удлинения поверхности детали  $\varepsilon_l$ , на которой наклеен тензорезистор:

$$S = \frac{dR}{R} \bigg/ \frac{dl}{l} = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l}.$$

Интегрируя это выражение, можно получить связь между конечным относительным изменением сопротивления тензорезистора и его конечным удлинением

$$\int_R^{R+\Delta R} \frac{dR}{R} = S \int_l^{l+\Delta l} \frac{dl}{l},$$

откуда после интегрирования и преобразования имеем:

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(1 + \frac{\Delta l}{l}\right)^S - 1 = \exp\left(S \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta l}{l}\right)\right) - 1.$$

Эта связь нелинейна; при необходимости она может быть упрощена разложением в ряд:

$$\frac{\Delta R}{R} = S \frac{\Delta l}{l} \left(1 + \frac{S-1}{2} \frac{\Delta l}{l} + \frac{(S-1) \cdot (S-2)}{6} \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \dots\right)$$

или

$$\frac{\Delta l}{l} = \left(1 + \frac{\Delta R}{R}\right)^{1/S} - 1 = \frac{1}{S} \frac{\Delta R}{R} \left(1 + \frac{1-S}{2S} \cdot \frac{\Delta R}{R} + \frac{(1-S)(2-S)}{6S^2} \cdot \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \dots\right).$$

При использовании тензорезисторов с  $S = 2$  обе последние формулы значительно упрощаются. Оба последних выражения являются основной расшифровки результатов тензометрирования.

## 2. Лабораторная установка

В лабораторную установку входит балка с наклеенными тензорезисторами (рис.9.10.4), усилитель для тензометрических измерений типа ТА-5 и магазины сопротивлений.

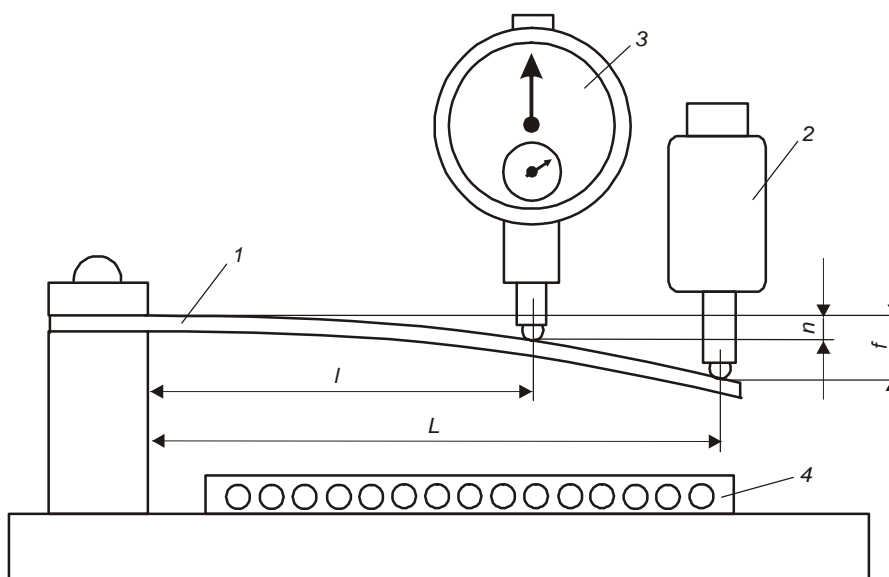


Рис. 9.10.4. Градуировочная балка равного сопротивления:  
1 - балка с наклеенными тензорезисторами; 2 - нажимной микрометрический винт;  
3 - индикатор перемещения часового типа; 4 - штеккерный разъём

Стальная балка 1 (рис.9.10.4), выполненная как балка равного сопротивления (треугольная в плане), жестко заделана на одном конце и изгибается с помощью микрометрического винта 2, действующего на её другой конец (в вершине треугольника). Из-за конструктивных особенностей балки перемещение её конца  $f$  не может быть измерено правильно, оно вычисляется по показаниям индикатора перемещения часового типа 3 из уравнения

$$f^2 - \frac{l^2 + n^2}{n} f + L^2 = 0,$$

где  $l$  – расстояние от заделки до оси индикатора часового типа;  $l = 150$  мм;

$L$  – расстояние от заделки до микрометрического винта;  $L = 250$  мм;

$n$  – показания индикатора часового типа, мм.

Наоборот, при заданном значении  $f$  величина  $n$  находится из уравнения

$$n^2 - \frac{L^2 + f^2}{f} n + l^2 = 0.$$

При нагружении по примененной схеме ось балки равного сопротивления изгибается по дуге окружности, относительная деформация в продольном направлении на обеих поверхностях балки вычисляется по формуле

$$|\varepsilon_l| = \frac{hf}{L^2},$$

где  $h$  – толщина балки;  $h = 2,48$  мм.

На обеих плоскостях балки параллельно её оси наклеено 10 пар проволочных тензорезисторов типа ПКБ-10-100 ТУ 0117-66, изготовленных из проволоки, имеющей  $S_M = 2,26$ , среднеквадратичное отклонение  $S_M \sigma = 0,98\%$ . Выводы тензорезисторов подсоединены к разъему 4. Тензорезисторы, расположенные на поверхностях балки друг против друга, соединены последовательно, т.е. образуют соседние плечи  $R_1$  и  $R_2$  термокомпенсированного тензомоста, причем оба тензорезистора воспринимают деформацию одинаковой абсолютной величины, но разного знака. Такое использование тензорезисторов по сравнению с вариантом, показанным на рис. 9.10.3, увеличивает чувствительность моста вдвое.

Пары тензорезисторов различаются маркой и толщиной слоя использованного клея, режимом его сушки, наличием и жесткостью покровного герметизирующего слоя. Все необходимые данные приведе-

ны в таблице. Измеряя коэффициент тензочувствительности тензорезистора  $S$  для разных пар, можно оценить влияние на него способа наклейки и герметизации тензорезисторов.

Таблица

Сведения о наклейке, термообработке, герметизации и распайке тензорезисторов

Номер пары тензорезисторов	Клей для наклейки, режим сушки	Толщина слоя клея, мм	Герметизирующий слой клея, режим сушки	Номера выводов от пары тензорезисторов
1	БФ-2, сушка при 150°C	0,01	Нет	1 - 2 - 3
2	То же	0,01	Резиновый	4 - 5 - 6
3	То же	0,01	БФ-2, сушка при 150°C	7 - 8 - 9
4	То же	0,04	Нет	10 - 11 - 12
5	БФ-2, сушка при комнатной температуре	0,04	Нет	13 - 14 - 15
6	То же	0,04	Резиновый	16 - 17 - 18
7	То же	0,04	БФ-2, сушка при комнатной температуре	19 - 20 - 21
8	Ацетоно-целлулоидный	0,04	Нет	22 - 23 - 24
9	То же	0,04	Резиновый	25 - 26 - 27
10	То же	0,04	Ацетоно-целлулоидный	28 - 29 - 30

Относительное изменение сопротивления тензорезисторов  $\varepsilon_R$  при данном относительном удлинении на поверхности объекта в месте приклейки тензорезисторов  $\varepsilon_l$  измеряется усилителем ТА-5, который предварительно градуируется с помощью магазинов сопротивлений. Устройство усилителя и приемы работы с ним подробно изложены в прилагающемся к нему «Кратком описании усилителя ТА-5».

### 3. Выполнение работы

1. Изучить по описанию устройство и приемы использования тензометрического усилителя ТА-5.

2. Отградуировать шкалу ТА-5 в единицах  $\varepsilon_R$ . Для этого подключить магазины сопротивлений к выводам 1–2 (активный тензорезистор) и 2–3 (компенсационный) кабеля одного из каналов, установить на них сопротивления по 100,00 Ом и сбалансировать усилитель. Затем, изменяя сопротивление одного из магазинов от 100,00 до 100,50 Ом через 0,10 Ом и обратно, записать показания прибора. Для получения случайной ошибки измерения, равной среднеквадратичному отклонению с надежностью 0,95, провести 7 циклов измерения, проверяя перед началом каждого цикла правильность балансировки усилителя и измеряя величину контрольного калибровочного сигнала тензоусилителя. Результаты измерений представить в виде таблицы, по средним значениям  $\varepsilon_R$  при каждом сопротивлении построить градуировочный график шкалы ТА-5 в координатах «Показание прибора –  $\varepsilon_R$ ».

3. Изучить влияние толщины слоя клея на переходный коэффициент  $K$ .

Используя пары тензорезисторов 1 и 4, определить для них коэффициенты  $S$  и  $K$  при относительной деформации  $|\varepsilon_l|$ , соответствующей  $f = 5, 10$  и  $15$  мм, проведя по одному измерению при каждом значении  $f$ . Величину  $f$  вычислять по квадратному уравнению при каждом установленном значении  $n$ , отсчитываемом по показаниям индикатора часового типа. Найти средние значения  $S_{cp}$  и  $K_{cp}$  для каждой пары тензорезисторов.

4. Изучить влияние жесткости клея на переходный коэффициент  $K$ .

Для измерений использовать пары тензорезисторов 4, 5 и 8.

Поступая как в п.3, найти средние значения  $S_{cp}$  и  $K_{cp}$  для каждой пары.

5. Изучить влияние на коэффициент  $K$  жесткости герметизирующего слоя на поверхности тензорезисторов

Для измерений использовать пары тензорезисторов 1, 2, 3; 5, 6, 7; 8, 9, 10. Средние значения  $S_{cp}$  и  $K_{cp}$  находятся как в п.3.

6. Найти предельную ползучесть  $\Pi_{пр}$  для пары тензорезисторов 10.

Для этого быстро (в идеале – мгновенно) нагружают балку до некоторой относительной деформации и оставляют её в таком состоянии на достаточно долгое время. По показаниям тензометрического моста измеряют деформацию балки непосредственно в момент нагружения и далее во времени. Быстрое нагружение балки осуществляют, вставляя прокладку между концом балки и микрометрическим

винтом, например, такую, которая обеспечивает расчётное перемещение конца балки на  $f = 15$  мм. Балку при этом отгибают вручную, не допуская её изгиба на величину, большую толщины прокладки. Измерения делают, как уже сказано, сразу же после нагружения, а также через 5, 10 и далее через каждые 10 минут в течение приблизительно часа. Зная относительную деформацию балки по показаниям индикатора часового типа и вычисляя значение коэффициента тензочувствительности  $S$  этой пары тензорезисторов для каждого момента времени, рассчитывают значения  $K$  и наносят их на график (см. рис.9.10.2). Ввиду большой длительности опыта его производят только один раз, так что полученные результаты имеют невысокую точность.

Замечание.

Перед каждым измерением проверяют положение нуля и коэффициент усиления тензометрического усилителя. Уход нуля учитывают вычитанием его из показаний прибора. Для учёта текущего значения коэффициента усиления как перед градуировкой ТА–5 с помощью магазинов сопротивлений, так и перед каждым измерением записывают показания прибора тензоусилителя при подаче на его вход калибровочного сигнала перестановкой переключателя ТА–5 в соответствующее положение. Изменение коэффициента усиления учитывают, умножая результат измерения (после корректировки на уход нуля) на отношение  $A_{ке}/A_{ки}$ , где  $A_{ке}$  и  $A_{ки}$  – амплитуды контрольного сигнала соответственно при проведении градуировки усилителя (выполнение задания по п.2) и при измерении.

#### 4. Оформление отчёта

Отчет должен содержать:

- 1) схемы подключения усилителя при градуировке и при измерениях;
- 2) таблицу и график, полученные при градуировке усилителя, и значение  $A_{ке}$ ;
- 3) таблицу значений  $S_{ср}$  и  $K_{ср}$  для всех 10 пар тензорезисторов;
- 4) выводы ( в словесной и графической формах ) о влиянии толщины и жёсткости клея, жёсткости защитного покрытия; рекомендации по наклейке тензорезисторов;
- 5) кривую ползучести тензорезистора, приклеенного и покрытого для герметизации ацетоноцеллулоидным клеем (пара тензорезисторов 10).

#### Вопросы для самопроверки

1. Что такое тензочувствительность материала  $S_M$ ?
2. Как зависит тензочувствительность наклеенного тензорезистора от его конструкции и материала связующего?
3. Что такое ползучесть, каким параметром она характеризуется?
4. Как, зная  $\varepsilon_R$  тензорезистора, найти  $\varepsilon_I$  на поверхности объекта?
5. Как устроен тензометрический усилитель?
6. Как балансировать тензометрический мост и учитывать в процессе работы дрейф нуля и изменение коэффициента усиления тензометрического усилителя?

#### Библиографический список

1. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник. – М.: Техносфера, 2006. – 588 с.
2. Электрические измерения. Средства и методы измерений (общий курс): Учеб. пособие для вузов. / Под ред. Е.Г. Шрамкова. — М.: Высшая школа, 1972. — 520 с.
3. Электрические измерения неэлектрических величин. Изд. 5–е, перераб. и доп./ Под ред. П.В. Новицкого. — Л.: Энергия, 1975. — 576 с.

## 9.11. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11.

### РАСЧЁТ СОПРОТИВЛЕНИЙ РЕЗИСТОРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИОМЕТРА. ГРАДУИРОВКА ПОТЕНЦИОМЕТРА

*Цели работы:*

- 1) изучить принцип действия, устройство и работу автоматического потенциометра;
- 2) освоить методики расчёта резисторов измерительной схемы потенциометра, экспериментальной подгонки диапазона измерений и градуировки потенциометра.

*Приборы и материалы:* автоматический потенциометр КСП – 3, потенциометр ПП – 63, магазины сопротивлений.

#### 1. Общие сведения об измерительной схеме автоматического потенциометра

С помощью автоматических потенциометров производится компенсационное измерение термо-э.д.с. Компенсирующее напряжение получается как разность потенциалов в диагонали четырёхплечного резисторного моста с изменяемым соотношением сопротивлений двух соседних плеч. В потенциометрах, предназначенных для работы с термопарами конкретного типа, автоматически вводится поправка на температуру холодного спая. Упрощённая принципиальная схема автоматического потенциометра приведена на рис.9.11.1.

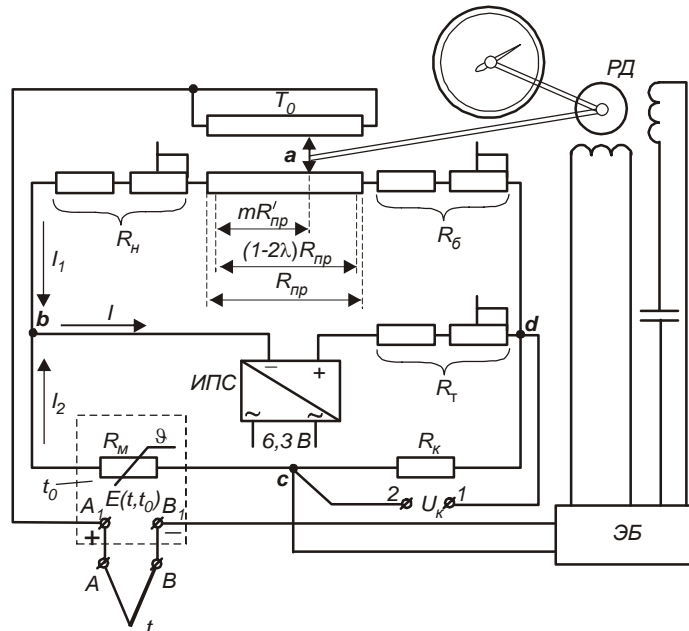


Рис. 9.11.1. Принципиальная схема автоматического потенциометра

Термопара, рабочий спай которой имеет температуру  $t$ , с помощью удлиняющих термоэлектродных проводов  $AA_1$  и  $BB_1$  подключена ко входным клеммам потенциометра, имеющим температуру  $t_0$ . Измеряемая термо-э.д.с.  $E(t, t_0)$  автоматически уравнивается падением напряжения  $U_{ac}$  на участке  $a - c$ . Если  $E(t, t_0) \neq U_{ac}$ , на вход электронного блока ЭБ поступает разность сигналов  $\Delta U = E(t, t_0) - U_{ac}$ , которая в ЭБ преобразуется из постоянного тока в переменный и усиливается по напряжению. Выходной сигнал ЭБ управляет вращением реверсивного двигателя РД, который перемещает движок реохорда  $R_{np}$  в такую сторону, что  $\Delta U$  уменьшается вплоть до нуля. В этот момент РД останавливается, при этом  $E(t, t_0) = U_{ac}$ , а ток в цепи термопары отсутствует. Одновременно с перемещением движка по реохорду перемещаются стрелка по шкале прибора и перо по диаграммной бумаге.

На рис.9.11.1 реохорд упрощённо изображён в виде  $R_{np}$ . В действительности узел реохорда состоит из нескольких параллельно включённых резисторов (рис.9.11.2).

Эквивалентное сопротивление  $R_3$  параллельно включённых собственно реохорда  $R_p$  и шунта  $R_w$

$$R_3 = \frac{R_p R_w}{R_p + R_w},$$

унифицировано и для выпускаемых потенциометров КСП-2, КСП-3, КСП-4 обычно принимается равным соответственно  $100 \pm 0,1$  Ом,  $270 \pm 0,1$  Ом,  $90 \pm 0,1$  Ом. Резистор  $R_n$ , разделённый на секции установочную и подгоночную, служит для установки диапазона измерения. Приведённое сопротивление реохорда  $R_{np}$  определяется сопротивлением параллельно включённых  $R_3$ ,  $R_n$ :

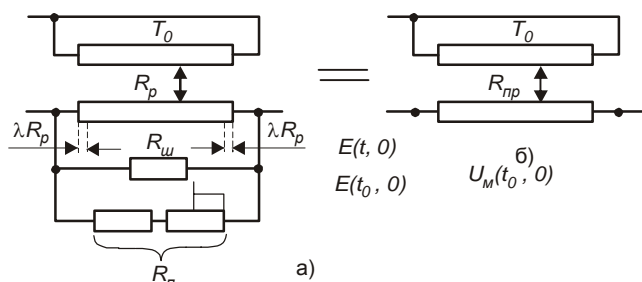


Рис. 9.11.2. Электрическая схема узла реохорда (а) и его эквивалентная схема

$$R_{np} = \frac{R_3 R_n}{R_3 + R_n}.$$

Из-за конструктивных особенностей движок реохорда не доходит до крайних точек реохорда, так что сопротивление участка реохорда в пределах диапазона измерения равно

$$(1 - 2\lambda)R_{np},$$

где  $\lambda$  – нерабочие участки реохорда, обычно выражаемые в относительных единицах.

Функции остальных элементов измерительной схемы следующие.

С помощью резистора  $R_6$  устанавливается требуемая величина тока, протекающего через ветвь  $d - a - b$  реохорда (называемого рабочим током),  $I_1 = 3$  мА. Двухсекционным резистором  $R_n$  при токе  $I_1 = 3$  мА в крайнем левом (по схеме) возможном положении движка реохорда напряжение  $U_{ac}$  устанавливается равным термо-э.д.с.  $E(t_n, t_0)$ , развиваемой термоэлектрическим термометром в нижней точке  $t_n$  диапазона измерения (начало шкалы). При надлежащем выборе  $R_n$  при перемещении движка реохорда в крайнее правое возможное положение напряжение  $U_{ac}$  должно стать равным термо-э.д.с.  $E(t_k, t_0)$ , развиваемой термоэлектрическим термометром в верхней точке диапазона измерения  $t_k$  (конец шкалы).

Питание измерительной схемы стабильным рабочим током  $I_1$  осуществляется от источника питания стабилизированного ИПС, обеспечивающего постоянство тока  $I = 5$  мА с погрешностью не более  $\pm 0,02\%$  при номинальном напряжении  $U_{ИПС} = 5$  В и номинальном сопротивлении цепи нагрузки ИПС  $R_1 = 1$  кОм. Для установки величины тока  $I$  используется двухсекционный резистор  $R_7$ .

Резистор  $R_k$  служит для эпизодической проверки работы ИПС по нормальному элементу, для чего служат зажимы 1 и 2.

При токе  $I_2 = 2$  мА  $R_k$  должно быть равно

$$R_k = \frac{E_{н.э.}}{I_2} = \frac{1019 \text{ мВ}}{2 \text{ мА}} = 509,5 \text{ Ом},$$

где  $E_{н.э.}$  – э.д.с. нормального элемента при нормальной температуре окружающей среды ( $20^\circ\text{C}$ ).

Для автоматического введения поправки на температуру холодного спая термоэлектрического термометра в схеме имеется резистор  $R_m$ , изготовленный из медной проволоки (все остальные резисторы выполнены из манганина, а реохорд – из сплава палладий-вольфрам ПдВ – 20). Медный резистор  $R_m$  расположен рядом с концами термометра на зажимах потенциометра и имеет ту же температуру  $t_0$ , что и холодный спай. Поправка представляет собой изменение падения напряжения  $\Delta U_m$  на резисторе  $R_m$  в результате изменения его температуры от  $0^\circ\text{C}$  до  $t_0$  такое, что

$$\Delta U_m(t_0, 0) = E(t_0, 0),$$

автоматически прибавляемое к термо-э.д.с. термометра  $E(t, t_0)$ .  $\Delta U_m$  с нужным знаком получается в результате вычитания падений напряжений на  $(R_n + \lambda R_{np})$  и на  $R_m$  путём включения  $R_m$  в ветвь  $d - c - b$  схемы.

## 2. Методика расчёта сопротивления резисторов измерительной схемы автоматического потенциометра

Для расчёта измерительной схемы должны быть заданы:

- тип термопары;
- начальное  $t_n$  и конечное  $t_k$  значения диапазона измеряемых температур,  $^\circ\text{C}$ ;
- нижний  $t'_0$  и верхний  $t''_0$  пределы измерения температуры холодного спая,  $^\circ\text{C}$ ;
- эквивалентное сопротивление реохорда  $R_3$ , Ом;
- суммарная длина нерабочих участков реохорда  $2\lambda$ , отн. ед;

– токи  $I_1$  и  $I_2$ ; в серийных потенциометрах КСП-2 ... КСП-4  $I_1 = 3 \text{ мА}$ ,  $I_2 = 2 \text{ мА}$  при расчётном значении сопротивления резистора  $R_M$  и нормальной температуре окружающей среды.

Находятся по номинальным статическим характеристикам (НСХ) преобразования термоэлектрических термометров, заданных интерполяционными уравнениями или таблично:

– термо-э.д.с., развиваемые термометрами на концах измерительного диапазона  $E(t_H, t_0)$ ,  $E(t_K, t_0)$ ;

– термо-э.д.с., соответствующие диапазону измерения температуры холодного спая  $E(t'_0, 0)$ ,  $E(t''_0, 0)$ .

Вычислению подлежат сопротивления резисторов  $R_{\pi}$ ,  $R_M$ ,  $R_H$ ,  $R_{\delta}$ ,  $R_m$ .

### 1) Определение $R_{\pi}$ .

При перемещении движка реохорда из конечного положения в начальное изменение напряжения  $U_{ac}$  равно  $E(t_K, 0) - E(t_H, 0)$ . Назовём такую э.д.с. шириной диапазона измеряемых э.д.с.

$$E_{\delta} = E(t_K, 0) - E(t_H, 0)$$

Согласно схеме рис. 9.11.1 можно записать:

$$E_{\delta} = (1 - 2\lambda)R_{\pi\pi} I_1. \quad (9.11.1)$$

Учитывая, что  $R_{\pi\pi} = \frac{R_3 R_{\pi}}{R_3 + R_{\pi}}$ , из (9.11.1) имеем:

$$R_{\pi} = \frac{R_3 E_{\delta}}{(1 - 2\lambda)I_1 R_3 - E_{\delta}} \quad (9.11.2)$$

### 2) Определение $R_M$ .

Принцип определения величины компенсирующего напряжения и, следовательно, величины  $R_M$  легко уяснить из рассмотрения рис.9.11.3.

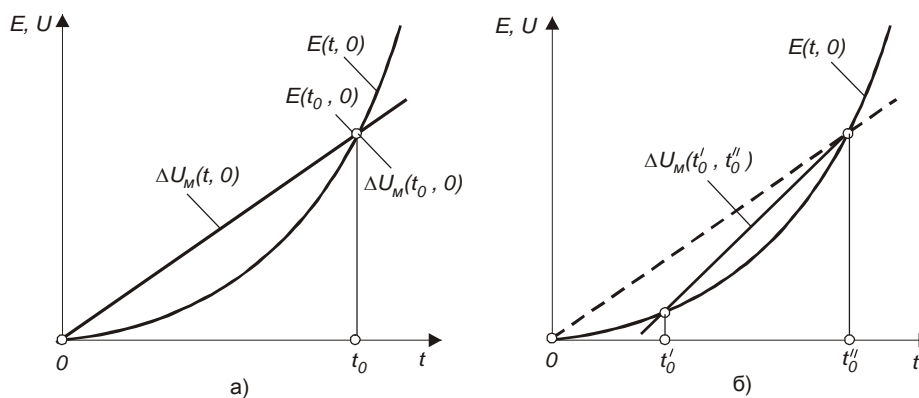


Рис. 9.11.3. Компенсация ошибки за счёт изменения температуры холодного спая: а) от 0 до  $t_0$ ; б) от  $t'_0$  до  $t''_0$

При изменении температуры холодного спая от 0 до  $t_0$  термо-э.д.с. термопары изменяется на  $E(t_0, 0)$  (рис.9.11.3 а). При изменении на ту же величину температуры терморезистора  $R_M$  падение напряжения на нём изменяется на  $\Delta U_M(t_0, 0)$ . Статические характеристики преобразования термопар существенно нелинейны (см. подробнее 7.2). Наоборот, сопротивление медного терморезистора  $R_M$  линейно зависит от температуры:

$$R_M^t = R_M^{t_{нач}} [1 + \alpha(t - t_{нач})], \quad (9.11.3)$$

где  $R_M^t$  – сопротивление терморезистора при температуре  $t$ ,

$R_M^{t_{нач}}$  – сопротивление терморезистора при некоторой температуре  $t_{нач}$ ;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления (ТКС) – для меди  $\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$  (или  $4,26 \cdot 10^3 1/^\circ\text{C}$ , зависит от марки применённого провода).

При надлежащем выборе величины  $R_M$  полная компенсация изменения термо-э.д.с. термопары возможна лишь в двух точках при температурах 0 и  $t_0$ .

Если известно, что температура холодного спая меняется только от  $t_0'$  до  $t_0''$ , более эффективным будет обеспечить компенсацию в точках, соответствующих  $t_0'$  и  $t_0''$  (рис.9.11.3 б). Этот случай будем считать общим, и именно для него рассмотрим определение  $R_M$ .

Итак, имеем

$$\Delta U_M(t_0'', t_0') = E(t_0'', t_0') = E(t_0'', 0) - E(t_0', 0).$$

Из рис.9.11.1 имеем также

$$\Delta U_M(t_0'', t_0') = I_2 (R_M^{t_0''} - R_M^{t_0'}).$$

Используя (9.11.3), получаем:

$$R_M^{t_0'} = \frac{E(t_0'', 0) - E(t_0', 0)}{\alpha(t_0'' - t_0') I_2}. \quad (9.11.4)$$

Для изготовления резистора  $R_M$  принято приводить его сопротивление к сопротивлению при 0°C (обозначается как  $R_M^0$ ) или при 20°C ( $R_M^{20}$ ). Это приведение осуществляется по величине  $R_M^{t_0'}$  и использованием формулы (9.11.3).

### 3) Определение $R_H$ .

При температуре рабочего спая термопары  $t_H$  и температуре холодного спая  $t_0'$  движок реохорда должен находиться в крайнем левом положении, и измерительная схема при этом должна быть уравновешена. По второму закону Кирхгофа для контура  $A_1 - A - B - B_1 - (\text{вход ЭБ}) - c - b - a - A_1$  имеем:

$$R_M^{t_0'} I_2 - (R_H + \lambda R_{np}) I_1 + E(t_H, t_0') = 0,$$

откуда

$$R_H = \frac{R_M^{t_0'} I_2 - \lambda R_{np} I_1 + [E(t_H, 0) - E(t_0', 0)]}{I_1}. \quad (9.11.5)$$

### 4) Определение $R_B$ .

Для тех же условий уравновешивания для контура  $A_1 - A - B - B_1 - (\text{вход ЭБ}) - c - d - a - A_1$  имеем

$$[R_B + (1 - \lambda) R_{np}] I_1 - R_K I_2 + E(t_H, t_0') = 0,$$

откуда

$$R_B = \frac{R_K I_2 - (1 - \lambda) R_{np} I_1 - [E(t_H, 0) - E(t_0', 0)]}{I_1}. \quad (9.11.6)$$

### 3. Определение $R_T$ .

$R_T$  представляет собой разность между номинальным сопротивлением цепи нагрузки ИПС  $R_l = 1 \text{ кОм}$  и сопротивлением  $R_{bd}$  параллельно включенных ветвей измерительной схемы  $b - a - d$  и  $b - c - d$ . Последнее подсчитывается при расчётном значении температуры холодного спая термопары  $t_0'$  по выражению

$$R_{bd} = \frac{(R_M^{t_0'} + R_K)(R_H + R_{np} + R_B)}{R_M^{t_0'} + R_K + R_H + R_{np} + R_B}, \quad (9.11.7)$$

с учётом чего находим

$$R_T = 1 \text{ кОм} - R_{bd}.$$

4. Правильность расчёта сопротивлений резисторов измерительной схемы проверяется по соотношению

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{3}{2} = \frac{R_M^{t_0'} + R_K}{R_H + R_{np} + R_B}.$$



### 3. Пример расчёта

Рассчитать измерительную схему КСП – 4 ( $R_3 = 90 \text{ Ом}$ ), если шкала прибора 200 ... 600°C, термопара ХА(К), температура холодного спая 20 ... 50°C, нерабочие участки реохорда  $2\lambda = 0,05$ .

Используя аппроксимирующий полином НСХ термопары ХА(К) (см.7.2), находим

$$E(t_H, 0) = E(200^\circ \text{C}, 0^\circ \text{C}) = 8,137 \text{ мВ};$$

$$E(t_6, 0) = E(600^\circ \text{C}, 0^\circ \text{C}) = 24,902 \text{ мВ};$$

$$E(t'_0, 0) = E(20^\circ \text{C}, 0^\circ \text{C}) = 0,799 \text{ мВ};$$

$$E(t''_0, 0) = E(20^\circ \text{C}, 0^\circ \text{C}) = 2,012 \text{ мВ}.$$

Вычисляем  $E_\delta$ :

$$E_\delta = 24,902 - 8,137 = 16,756 \text{ мВ}.$$

Вычисляем  $R_{пр}$ :

$$R_{пр} = \frac{90 \cdot 6,293}{90 + 6,293} = 5,882 \text{ Ом}$$

Для нахождения  $R_M$  принимаем точную компенсацию изменения температуры холодного спая в точках 20°C и 50°C.

Находим  $R_M^{20}$

$$R_M^{20} = \frac{2,012 - 0,799}{4,28 \cdot 10^{-3} (50 - 20) \cdot 2} = 4,724 \text{ Ом}.$$

Теперь есть все данные для расчёта  $R_H$ :

$$R_H = \frac{4,724 \cdot 2 - 0,025 \cdot 5,882 \cdot 3 + (8,137 - 0,799)}{3} = 5,448 \text{ Ом}.$$

Принимаем сопротивление установочной секции 5,25 Ом, подгоночной – 0,5 Ом.

Определяем  $R_6$ :

$$R_6 = \frac{509,5 \cdot 2 - (1 - 0,025) \cdot 5,882 \cdot 3 + (8,137 - 0,799)}{3} = 331,486 \text{ Ом}.$$

Принимаем сопротивление установочной секции  $331 \pm 0,5$  Ом, подночной – 1 Ом.

Вычисляем  $R_T$ :

$$R_T = 1000 - \frac{(4,724 + 509,5)(5,448 + 5,882 + 331,486)}{4,724 + 509,5 + 5,448 + 5,882 + 331,486} = 794,3 \text{ Ом}.$$

Принимаем сопротивление установочной секции  $770 \pm 10$  Ом, подночной –  $50 \pm 0,5$  Ом.

Проверка правильности расчёта:

$$\frac{4,724 + 509,5}{5,448 + 5,882 + 331,486} = 1,5000.$$

### 4. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка представляет собой потенциометр КСП-3, в котором резисторы  $R_H$ ,  $R_L$ ,  $R_6$ ,  $R_M$ ,  $R_T$  заменены магазинами сопротивлений. Источником напряжения, имитирующим термо-э.д.с.  $E(t, t_0)$ , служит переносный потенциометр ПП – 63.

## 5. Выполнение работы

1. Для заданного варианта задания (см. приведённую ниже таблицу) произвести расчёт сопротивлений резисторов измерительной схемы потенциометра.

Таблица 9.11.1

Варианты заданий

Номер задания	Тип термопары	Пределы измерения, °C		Пределы измерения температуры холодного спая, °C	
		нижний $t_n$	верхний $t_k$	$t'_0$	$t''_0$
1	МК(М)	-200	0	20	50
2		-100	100	-20	20
3		0	100	20	50
4	ХК(L)	-200	0	20	50
5		-200	100	0	50
6		100	600	-20	20
7	ХА(К)	-200	0	0	50
8		-100	100	20	50
9		0	500	20	50
10		500	1000	-20	20
11	ПП(S)	0	1000	20	50
12		500	1300	-20	50

2. На магазинах сопротивлений набрать значения вычисленных  $R_n$ ,  $R_p$ ,  $R_6$ ,  $R_M^{20}$  резисторов, и магистраль подключить к клеммам схемы, с помощью  $R_r$  установить рабочий ток.

3. Подать на вход схемы с потенциометра ПП – 63  $E(t_n, 20^\circ\text{C})$ , затем  $E(t_k, 20^\circ\text{C})$  и отметить положение стрелки на шкале потенциометра. В случае несовпадения положения стрелок с началом и концом стандартной шкалы потенциометра изменением значений сопротивлений резисторов добиться совпадения. Записать эти значения сопротивлений резисторов.

4. В случае значительного (более 1%) расхождения с вычисленными значениями проверить вычисления.

5. Установить чистую шкалу и отградуировать её через  $50^\circ\text{C}$ , подавая на вход значения по градуировочной характеристике термопары по стандарту МЭК 584 – 1.1977 и ГОСТ 3044 – 84 (см. таблицу с. 57).

### Оформление отчёта

Отчёт по работе должен содержать:

- 1) принцип работы автоматического потенциометра;
- 2) упрощённую принципиальную схему автоматического потенциометра;
- 3) принцип введения поправки на температуру холодного спая;
- 4) расчёт требуемых значений термо-э.д.с. по НСХ для термопары по варианту задания;
- 5) подробные расчёты величин сопротивлений резисторов схемы автоматического потенциометра;
- 6) подробное описание процедуры градуировки потенциометра;
- 7) диаграмму результатов градуировки;
- 8) выводы по работе с анализом результатов.

### Вопросы для самопроверки

1. Для всех потенциометров сопротивление резисторов  $R_k = 509,5 \text{ Ом}$ . Чем обусловлен выбор такого значения сопротивления?
2. Будут ли одинаковыми значения сопротивления  $R_n$  у потенциометров с диапазоном измерения  $-50 \dots +100^\circ\text{C}$ ,  $0 \dots 200^\circ\text{C}$  одной и той же градуировкой ХК(L)?
3. Каково назначение резистора  $R_{ш}$ ?
4. Где находится  $R_M$ ?
5. Одинаковы ли значения сопротивления медного резистора у потенциометров КСП – 4 с диапазоном измерения  $-50 \dots +100^\circ\text{C}$  градуировки ХК,  $0 \dots 600^\circ\text{C}$  градуировки ХА? Токи схемы для всех потенциометров одинаковы.

### Библиографический список

1. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник. – М.: Техносфера, 2006. -588 с.
2. Афанасьев А.А. Физические основы измерений: учеб. – М. : ИЦ Академия, 2010. -384 с

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

величины переменного напряжения:

- максимальное значение напряжения 19
- мгновенные значения напряжения 17, 20, 22
- средневыпрямленное значение напряжения 19, 21, 22, 24, 28, 29, 66
- эффективное значение напряжения 16, 17, 19, 20, 22, 25, 26, 28, 29
- коэффициент амплитуды 19, 22, 28, 47
- коэффициент формы 19, 22, 28, 41, 82

деформация 53, 54, 96, 98, 100-104

- средняя 96, 103
- остаточная 96
- относительная 53, 54, 98, 100, 106
- упругая 96

дифференциально-трансформаторный преобразователь (ДТП) 91 – 95  
закон Гука 96

измерения 7, 9, 19, 28, 30

измерительная катушка (ИК) 38-40, 85-87

измерительный механизм:

- магнитоэлектрический 13, 14
- электромагнитный 14, 15
- электродинамический 15
- ферродинамический 18

интегратор 39, 46, 48, 50, 51, 84, 85

калибратор 30, 31, 67, 69, 81

катушка Гельмгольца 84

класс точности 8, 14, 25, 28

кривая намагничивания:

- начальная 43, 45
- основная 43, 44, 82

коэффициент прямоугольности 50, 82

коэффициент Пуассона 54, 98, 103

магнитная индукция 13, 18, 38, 39, 40, 47, 85, 87

магнитный момент 37

магнитное поле 17, 18, 39, 41, 43

магнитный поток 38, 40, 91

магнитная проницаемость:

- абсолютная 39
- относительная 39, 50

модуль упругости 54, 98, 100

мостовые измерительные схемы:

- мост Вина 33
- мост Максвелла – Вина 35
- мост Грюнцмахера 36

напряжённость 37, 39, 44-47, 84, 86, 88

осциллограф 6, 30, 31, 48, 59, 61, 67, 70

петля гистерезиса 44, 46, 50, 83

преобразователь Холла 41, 90

приборы выпрямительной системы 22:

- вольтметр амплитудный 28, 61
- вольтметр средневыпрямленного значения 24, 29, 47, 61, 64
- вольтметр эффективных значений 28, 46, 61

погрешность:

- абсолютная 8, 94
- относительная 8, 62, 94
- приведённая 8, 62

потенциометр автоматический 109

тензопреобразователь 7, 52, 101

терморезистор 54, 57, 58, 111

термоэлектрический преобразователь 55

термо-э.д.с. 27, 55-57, 109-112

тесламер 42

термометр 110

фазовый сдвиг 27, 35, 70-75

фазометр 7, 17, 70-75

фазовращатель 70, 73

фазочувствительный выпрямитель 9, 25, 27, 54

функция преобразования 51, 52, 57, 91

холодные спаи 57, 110-114

чувствительность моста 77-80

э.д.с. Холла 41, 89

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ермуратский П.В., Лычкина Г.П., Минкин Ю.Б. Электротехника и электроника. –М.: Из-во "ДМК Пресс", 2011. - 417 с.
2. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. - М.: Из-во "Лань", 2009. - 592 с
3. Ермуратский П.В., Лычкина Г.П., Минкин Ю.Б. Электротехника и электроника. –М.: Из-во "ДМК Пресс", 2011. - 417 с.
4. Грабовски Б.Ф. Справочник по электронике. - М.: Из-во "ДМК Пресс", 2009. 416 с
5. Муханин Л.Г. Схемотехника измерительных устройств. Учебное пособие. - М.: Изд-во "Лань", 2009. - 288 с.
6. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник. – М.:Техносфера, 2006. -588 с.
7. Афанасьев А.А. Физические основы измерений: учеб. – М. .: ИЦ Академия, 2010. -384 с
8. Стародубцев Ю.Н. Теория и расчёт трансформаторов малой мощности. – М.:ИП РадиоСофт, 2005. – 320с.
9. Семёнов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 416с.
10. Джексон Р.Г. Новейшие датчики: пер. с англ. – М.: Техносфера, 2008. – 397 с.
11. «Электричество»
12. «Электротехника»
13. «Электроника»
14. «Компоненты и технология»
15. «Физика металлов и металловедение»
16. «Схемотехника»

Учебное текстовое электронное издание

**Артамонов Юрий Спиридонович  
Гребенникова Вера Владимировна**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

Учебно-методическое пособие

Издается полностью в авторской редакции

1,13 Мб

1 электрон. опт. диск

г. Магнитогорск, 2012 год

ФГБОУ ВПО «МГТУ»

Адрес: 455000, Россия, Челябинская область, г. Магнитогорск,  
пр. Ленина 38

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова»

Кафедра промышленной кибернетики и систем управления

Центр электронных образовательных ресурсов и

дистанционных образовательных технологий

e-mail: ceor\_dot@mail.ru