

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное агентство по образованию

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. А.Н. ТУПОЛЕВА»

Ф.М. ГАЙСИН, А.Х. КАРИМОВ, Р.Ш. АХМЕТЗЯНОВ,
В.С. БАСОВ, А.Ф. ГАЙСИН, Е.Л. КАСПИН, Р.Х. МАКАЕВА

ОБЩАЯ ФИЗИКА

*Лабораторный практикум
по электричеству и магнетизму*

*Рекомендовано к изданию Учебно-методическим
центром КГТУ им. А.Н. Туполева*

Казань 2009

УДК 537: (071.1)
ББК 22.34
Л12

**Гайсин Ф.М., Каримов А.Х., Ахметзянов Р.Ш., Басов В.С.,
Гайсин А.Ф., Каспин Е.Л., Макаева Р.Х.** Общая физика: Лабораторный практикум по электричеству и магнетизму. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2009. 70 с.

ISBN 978-5-7579-1269-1

Содержится описание девяти лабораторных работ по разделу «Электричество и магнетизм». В основу положены материалы практикумов, проводимых в течение 10 лет на кафедрах прикладной физики и технической физики, разработанных и изданных преподавателями этих кафедр.

Предназначено для студентов технических университетов.

Ил. 34. Табл. 8. Библиогр.: 24 назв.

Рецензенты: докт. техн. наук Н.Ф. Кашапов (Казанский государственный технологический университет);
канд. техн. наук Р.Х. Зиятдинов (Казанский государственный технологический университет)

ISBN 978-5-7579-1269-1

© Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2009
© Ф.М. Гайсин, А.Х. Каримов, Р.Ш. Ахметзянов, В.С. Басов, А.Ф. Гайсин, Е.Л. Каспин, Р.Х. Макаева, 2009

Лабораторная работа №1

СТРЕЛОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Цель работы: ознакомление с принципом действия стрелочных электроизмерительных приборов и приобретение навыков работы с ними.

Теоретическая часть

Электроизмерительным прибором (ЭП) называется совокупность деталей и механизмов, служащих для непосредственного измерения какой-либо электрической физической величины.

Всякий ЭП состоит из подвижной и неподвижной частей. По перемещению подвижной части судят о значении измеряемого параметра.

К электроизмерительным приборам относятся приборы для измерения величины тока (амперметры), напряжения (вольтметры) и мощности (ваттметры) в цепях постоянного и переменного тока.

ЭП делятся на два основных класса: стрелочные, в которых под действием электромагнитных сил происходит механическое перемещение указателя (стрелки, зеркальца и т.п.), и цифровые, в которых применяются электронные методы измерения и представления информации без преобразования ее в механическое движение.

Классификация ЭП по принципу действия

В зависимости от принципа действия стрелочные ЭП делятся на магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, индукционные, электростатические и др.

Приборы магнитоэлектрической системы работают на принципе взаимодействия магнитного поля постоянного магнита с рамкой (катушкой), по которой протекает измеряемый ток. В результате этого взаимодействия создается вращающий момент, который отклоняет подвижную часть механизма прибора относительно неподвижной части.

Работа измерительных приборов электромагнитной системы основана на взаимодействии магнитного поля, создаваемого катушкой, по обмотке которой протекает измеряемый ток, с ферромагнитным подвижным сердечником. В это магнитное поле втягивается, поворачиваясь на оси, ферромагнитный сердечник, намагничиваемый этим же полем.

Принцип работы механизма измерительных приборов электродинамической системы основан на взаимодействии магнитных полей неподвижной и подвижной катушек с токами.

В приборах индукционной системы вращающий момент создается вследствие взаимодействия двух или более переменных магнитных потоков с токами, индуцированными этими магнитными потоками в подвижной части прибора.

Действие приборов электростатической системы основано на взаимодействии подвижных и неподвижных заряженных электродов, находящихся под напряжением и образующих конденсатор.

В данной работе рассматриваются наиболее часто применяемые при электроизмерениях стрелочные приборы магнитоэлектрической и электромагнитной систем.

1. Приборы магнитоэлектрической системы

Приборы магнитоэлектрической системы предназначены для измерения силы тока и напряжения в цепях постоянного тока. В основе работы прибора магнитоэлектрической системы лежит закон, определяющий действие магнитного поля на проводник с током (закон Ампера) с силой Ампера, равной по модулю:

$$F_A = IBl \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

где B – магнитная индукция; I – сила тока; l – длина проводника; α – угол между направлением магнитного поля и направлением тока.

Измерительный прибор магнитоэлектрической системы устроен следующим образом (рис. 1).

На легкой алюминиевой рамке 4 прямоугольной формы намотана проволока (катушка). Подвижная рамка (катушка) 4 укреплена на двух полуосях 5, 6, каждая из которых жестко соединена с концами спиральных пружин 7 и 8. Эти пружины служат для создания противодействующего момента $M_{пр}$ и одновременно играют роль проводников, подводящих измеряемый ток от внешней цепи к подвижной катушке. На передней полуоси 6 закреплена стрелка 9 и ее противовесы 10.

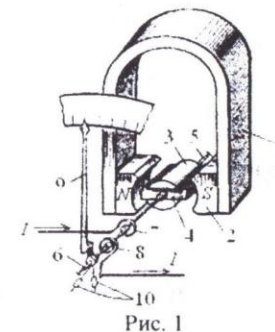


Рис. 1

Катушка помещается между полюсами постоянного магнита 1 с наконечниками 2 (N и S) специальной формы. Внутри катушки расположен цилиндр 3 из мягкого железа.

Такая конструкция прибора создает радиальное направление линий магнитной индукции \vec{B} (рис. 2) в той области, где находятся витки проволоки катушки, т.е. обеспечивается условие: $\alpha = \pi/2$.

Таким образом, при любом положении катушки сила Ампера, действующая на нее со стороны магнитного поля, максимальна и при неизменной силе тока постоянна. Взаимодействие проводников катушки, по которым проходит измеряемый ток, и магнитного потока постоянного магнита создает вращающий момент $M_{вр}$, под действием которого катушка (и стрелка) поворачивается на угол φ , пропорциональный измеряемому току.

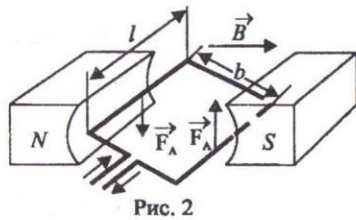


Рис. 2

Зависимость $\varphi = f(I)$ удобно получить, пользуясь схемой на рис. 2, где изображена одновитковая рамка шириной b и длиной l , находящаяся в магнитном поле с индукцией \vec{B} . По рамке протекает измеряемый ток I .

Согласно закону Ампера, на каждую из двух сторон рамки действуют механические силы Ампера F_A , одинаковые по величине, но противоположные по направлению. В реальном приборе рамка содержит n витков, следовательно, сила Ампера, действующая на одну сторону рамки, так как $\sin \alpha = 1$, будет максимальна и равна:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot n. \quad (2)$$

Пара этих сил создает вращающий момент рамки:

$$M_{вр} = 2Fb/2 = B \cdot I \cdot l \cdot n \cdot b. \quad (3)$$

Произведение $b \cdot l = S$ представляет собой площадь рамки. Тогда вращающий момент, действующий на подвижную часть, можно рассчитать по формуле:

$$M_{вр} = nBSI = k_1 I, \quad (4)$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности.

Вращающий момент $M_{вр}$ уравнивается моментом $M_{пр}$ сопротивления закручивающихся на угол φ спиральных пружин:

$$M_{пр} = k_2 \varphi, \quad (5)$$

где k_2 – постоянная закручивания пружин.

При достижении равенства моментов $M_{пр}$ и $M_{вр}$ стрелка прибора на некотором делении шкалы останавливается. Тогда можно записать:

$$k_1 I = k_2 \varphi \quad \text{или} \quad \varphi = \frac{k_1}{k_2} I = kI. \quad (6)$$

Угол поворота рамки прибора магнитоэлектрической системы пропорционален силе измеряемого тока. Коэффициент пропорциональности k зависит от конструкции прибора. Для каждого конкретного прибора k имеет свое (постоянное) значение. Из выражения (6) следует, что амперметр магнитоэлектрической системы имеет равномерную шкалу.

Приборы магнитоэлектрической системы обладают весьма высокой чувствительностью. Очевидно, что чувствительность повышается с увеличением коэффициента k_1 и уменьшением k_2 .

Увеличение значения k_1 достигается увеличением магнитной индукции \vec{B} в зазоре, в котором поворачивается рамка прибора, увеличением числа n витков рамки и ее площади S . Уменьшение коэффициента k_2 достигается выбором более слабых пружин, что возможно в условиях уменьшения сил трения, действующих на рамку.

Достоинством приборов магнитоэлектрической системы являются: высокая чувствительность к измеряемой величине; высокая точность (класс точности до 0,05); равномерность шкалы, малое собственное потребление мощности и малая чувствительность к внешним магнитным полям. К недостаткам относят возможность применения их только в цепях постоянного тока, сложность конструкции и высокую стоимость.

2. Приборы электромагнитной системы

Приборы электромагнитной системы предназначены для измерения силы тока и напряжения в цепи переменного и постоянного тока.

Принцип действия приборов электромагнитной системы (рис.3) основан на взаимодействии металлического подвижного

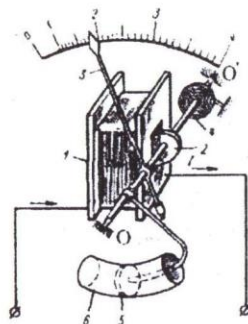


Рис. 3

сердечника с магнитным полем катушки, в которой протекает измеряемый ток. Неподвижной частью прибора служит катушка 1, намотанная на пластмассовый каркас. Сечение провода и число витков обмотки зависят от назначения прибора. У амперметров катушку наматывают малым количеством витков из провода большего сечения (соответственно номинальному току), а у вольтметров — большим количеством витков из тонкой проволоки. Подвижная часть прибора представляет собой сердечник 2 в виде лепестка из мягкой стали или специального сплава. Сердечник, эксцентрично насаженный на одну ось со стрелкой, в зависимости от напряженности магнитного поля или, фактически, от силы тока, протекающего по обмотке, в большей или меньшей степени втягивается в окно катушки. Следовательно, стрелка прибора 3 отклоняется от нулевого положения на тот или иной угол.

Противодействующий момент у этих приборов создается спиральной пружиной 4. Приборы электромагнитной системы снабжаются воздушным успокоителем, представляющим собой камеру 6, в которой перемещается алюминиевый поршень (демпфер) 5. При повороте сердечника поршень встречает сопротивление воздуха, вследствие чего колебания подвижной части быстро затухают.

Магнитное поле катушки пропорционально току, намагничивание железного сердечника тоже возрастает с увеличением тока. Поэтому можно приближенно считать, что в электромагнитном приборе момент $M_{вр}$ пропорционален квадрату измеряемого тока:

$$M_{вр} = k_1 I^2, \quad (7)$$

где k_1 — коэффициент пропорциональности, зависящий от числа витков обмотки, материала, формы сердечника и его положения относительно неподвижной катушки. При перемещении подвижной части коэффициент k_1 меняется. Противодействующий момент, создаваемый спиральной пружиной, равен:

$$M_{пр} = k_2 \varphi, \quad (8)$$

где k_2 — коэффициент пропорциональности, зависящий от упругих свойств пружины.

Равновесие подвижной части прибора определяется равенством моментов, действующих на нее в противоположных направлениях, т.е. $M_{пр} = M_{вр}$, откуда

$$\varphi = \frac{k_1}{k_2} I^2 = k I^2. \quad (9)$$

При постоянном k_1 угол отклонения φ пропорционален квадрату силы тока. В этом случае шкала прибора была бы квадратичной и неравномерной.

В действительности же значение коэффициента k_1 , как отмечалось, можно изменять. Это дает возможность путем подбора формы и расположения сердечника относительно катушки сделать шкалу прибора, начиная с 1/5 ее длины, относительно равномерной. Однако в начале шкалы при малых токах эти приборы все же недостаточно чувствительны и деления сильно сжаты. Поэтому

начальную часть шкалы электромагнитного прибора считают нерабочей. Например, вольтметром электромагнитной системы с пределом измерения 150 В можно измерить напряжения в пределах от 30 до 150 В.

При измерении переменного тока:

$$I = I_m \sin \omega t \quad (10)$$

угол отклонения подвижной системы определяется средним за период значением вращающего момента:

$$\vec{M}_{\text{вр}} = \frac{1}{T} \int_0^T k I_m^2 \sin^2 \omega t d\tau = k_1 I^2. \quad (11)$$

Так как среднее значение $\vec{M}_{\text{вр}}$ пропорционально квадрату измеряемого тока, при измерении переменного тока показания прибора будут пропорциональны действующему его значению.

К достоинствам электромагнитной системы следует отнести возможность измерения как постоянного, так и переменного токов, простоту конструкции, механическую прочность, выносливость в отношении перегрузок. Электромагнитные приборы некоторых типов допускают стократную перегрузку.

Недостатком электромагнитных приборов является: неравномерность шкалы, сравнительно низкая чувствительность, невысокая точность, относительно большее собственное потребление электроэнергии, достигающее, например, 2Вт у амперметров с пределом измерения 0 ÷ 10А, а также зависимость показаний измерения от внешних магнитных полей.

Электромагнитные приборы благодаря простоте конструкции, надежности в работе и низкой стоимости находят широкое применение в качестве технических щитовых приборов классов точности 1,0; 1,5; 2,5 для цепей переменного тока. Промышленность выпускает также переносные лабораторные приборы класса 0,5 и выше.

10

Основные термины и определения

В литературе по метрологии часто применяются термины и определения, относящиеся к методам измерения стрелочными электроизмерительными приборами. Рассмотрим некоторые из них.

Значение физической величины – оценка физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

Истинное значение физической величины – значение физической величины, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношении соответствующее свойство объекта. Истинное значение физической величины не известно.

Действительное значение физической величины – значение физической величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что для данной цели может быть использовано вместо него.

Измерительный прибор – средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины.

Шкала средства измерения – часть отсчетного устройства, представляющая собой совокупность отметок и проставленных у некоторых из них чисел отсчета или других символов, соответствующих ряду последовательных значений величины.

Отметка шкалы – знак на шкале (черта, точка, зубец), соответствующий некоторому значению измеряемой величины.

Числовая отметка шкалы – отметка шкалы, у которой проставлено число отсчета.

Деление шкалы – промежуток между двумя соседними отметками шкалы.

Цена деления шкалы – разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы.

Начальное и конечное значения шкалы – наименьшее и наибольшее значение измеряемой величины, указанное на шкале.

Диапазон показаний – область значений шкалы, ограниченная конечным и начальным значениями шкалы.

Диапазон измерений – область измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые погрешности средства измерений. Для приборов с равномерной шкалой диапазон измерений равен диапазону показаний. У приборов с неравномерной шкалой диапазон измерений составляет 60 – 85% диапазона показаний.

Предел измерений – наибольшее или наименьшее значение диапазона измерений.

Указатель – часть отсчетного устройства, положение которой относительно отметок определяет показание средства измерений (стрелка для стрелочных электроизмерительных приборов).

Прямое измерение – измерение, при котором искомое значение величины находят непосредственно с помощью измерительного прибора.

Косвенное измерение – измерение, при котором искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, определяемыми прямыми измерениями.

Погрешность измерения – отклонение результата от истинного значения измеряемой величины.

Абсолютная погрешность измерения – погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины и равная разности измеренного и истинного (действительного) значений величины:

$$\Delta x = x_{\text{измер}} - x_{\text{истин}}. \quad (12)$$

Относительная погрешность измерения – отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины:

$$\delta = \Delta x / x_{\text{истин}}. \quad (13)$$

Относительная погрешность может быть выражена в процентах.

Систематическая погрешность измерений – составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины.

Случайная погрешность измерения – составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины.

Абсолютная погрешность измерительного прибора – разность между показанием прибора и истинным (действительным) значением измеряемой величины.

Относительная погрешность измерительного прибора – отношение абсолютной погрешности прибора к истинному (действительному) значению измеряемой им величины.

Приведенная погрешность измерительного прибора (δ) – отношение абсолютной погрешности измерительного прибора Δx к нормирующему значению измеряемой величины x_n (в процентах)

$$j = \frac{\Delta x}{x_n} \cdot 100\%. \quad (14)$$

Нормирующее значение x_n для приборов с равномерной или степенной шкалой принимается равным:

а) верхнему пределу измерения, если нулевая отметка находится на краю или вне шкалы;

б) арифметической сумме конечных значений диапазона измерений. Для приборов с логарифмической, гиперболической или другой неравномерной шкалой значение x_n принимается равным диапазону показаний.

Основная погрешность прибора – погрешность прибора, используемого в нормальных (указанных в паспорте) условиях,

например, при температуре окружающего воздуха $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, относительной влажности воздуха $(65 \pm 16)\%$; атмосферном давлении $(100 \pm 4)\text{кПа}$; напряжении питающей сети $(220 \pm 4,4)\text{В}$ и др.

Дополнительная погрешность прибора – погрешность прибора, вызываемая отклонением одной из влияющих на показания прибора величин (температуры, давления, влажности окружающей среды и др.) – от нормальных значений.

Класс точности средства измерений – обобщенная характеристика средства измерений, определяемая пределами основных и дополнительных допускаемых погрешностей.

Для стрелочных электроизмерительных приборов с равномерной или степенной шкалами, нулевой отметкой в начале или вне шкалы класс точности определяется числом, равным приведенной погрешности (14).

Условные обозначения на шкалах ЭП

На шкалах электроизмерительных приборов согласно ГОСТ 23.212-78 и ГОСТ 8.401-80 наносят условные обозначения, характеризующие единицы измерения физических величин, род тока, безопасность, используемое положение, класс точности, систему прибора и другие сведения.



Единицы измерения. Характеристика прибора «Единица измерения» показывает, в каких единицах (основных, дольных или кратных) измеряется физическая величина данным способом.

Согласно ГОСТ 8.417-81 «Единицы физических величин» на приборах наносятся международные обозначения единиц, например: кА – килоампер; А – ампер; мА – миллиампер, $\mu\text{А}$ – микроампер; В – вольт; мВ – милливольт; $\mu\text{В}$ – микровольт; W – ватт; Ω – Ом; М Ω – мегаом; к Ω – килоом; Hz – герц; МHz – мегагерц; μF – микрофарада и др.

Род тока. Приборы для измерения в цепях постоянного тока имеют на шкале обозначение —. Переменный однофазный ток обозначают знаком ~; переменный трехфазный \approx . Если прибор предназначен для измерения постоянного и переменного тока, то ставится знак $\in A$. У приборов переменного тока, работающих на частотах отличных от 50 Гц, наносится рабочая частота и диапазон рабочих частот, например 45-300 Гц.

Безопасность. Прибор, измерительная цепь которого изолирована от корпуса и испытана напряжением 500В, имеет на шкале знак: ☆.

Если испытательное напряжение превышает 500 В, то его значение в кВ указывается внутри «звездочки», например, при 2кВ-2. Прибор, находящийся под высоким напряжением, обозначается знаком ($\sim V$).

Рабочее положение. Рабочее положение прибора указывается на шкале следующим образом:  – горизонтальное,  – вертикальное, $\angle 60^\circ$ – наклонное к горизонтальной плоскости под углом 60° ; $\angle 45^\circ, 60, 75^\circ$ – наклонное к горизонтальной плоскости под углом от 45° до 75° .

Отклонение прибора от рабочего положения на угол $\pm 5^\circ$ вызывает дополнительную погрешность, не превышающую значения предела допустимой основной погрешности.






Класс точности. Для большинства типов ЭП точность измерения определяется классом точности. Применяются следующие обозначения классов точности на шкалах приборов.

Если нормирующее значение выражено в единицах измеряемой физической величины, то класс точности обозначается числом, совпадающим с приведенной погрешностью, например, если $j = \pm 1,5\%$, то класс точности обозначается 1,5.

Если нормирующее значение принято равным длине шкалы или ее части, то ставится знак, например $\sqrt{1,5}$. При определении класса точности по относительной погрешности ставится знак $(1,5)$. Применяются и другие обозначения классов точности.

Обозначение системы прибора. Обозначения системы прибора, принятые в измерительной технике, приведены в табл. 1.



Таблица 1

Обозначение	Тип прибора
	Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой
	Электромагнитный прибор
	Электростатический прибор
	Электродинамический прибор
	Индукционный прибор

Обозначения по защите от магнитных и электрических полей.

Различают первую и вторую категорию защищенности приборов от внешних магнитных и электрических полей, вызывающих дополнительные погрешности; их обозначения представлены в табл. 2.

Таблица 2

Обозначение	Вид защиты
	Защита от внешних магнитных полей
	Защита от внешних электрических полей

Обозначение группы температур- и влагуустойчивости прибора. Как правило, измерительные приборы градуируются в стандартных условиях, т.е. при температуре 20°C и относительной влажности воздуха менее 80%. Однако существуют приборы, которые могут эксплуатироваться и при нестандартных условиях.

По диапазону рабочих температур и относительной влажности электроизмерительные приборы делятся на пять групп (табл.3).

Таблица 3

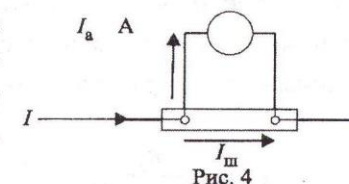
Группа	Диапазон рабочих температур	Относительная влажность, %
A*	$10 \pm 35^\circ$	Менее 80
B	-30 до $+40^\circ\text{C}$	До 90
B1	-40 до $+50^\circ\text{C}$	До 95
B2	-50 до $+60^\circ\text{C}$	До 95
B3	-50 до $+80^\circ\text{C}$	До 98

Примечание *) на шкале символ A не ставится

Прочие обозначения. Кроме перечисленных обозначений на шкале прибора указываются тип прибора (шифр), дата выпуска, заводской номер прибора, товарный знак (фабричная марка) завода-изготовителя.

Расширение пределов измерения приборов

Расширение предела измерения I_a амперметра с внутренним сопротивлением достигается подключением параллельно амперметру так называемого шунта сопротивлений $R_{ш}$ (рис. 4).



Если выбрать $R_{ш} \ll R_a$, то большая часть рабочего тока $I_{ш}$ пойдет через шунт, а меньшая I_a – через амперметр. Таким образом, амперметр с предельным током I_a может измерять силу тока $I \gg I_a$.

Амперметр и шунт находятся под одним и тем же напряжением. Следовательно, $I_a R_a = I_{ш} R_{ш}$, откуда $R_{ш} = (I_a R_a) / I_{ш}$ и $I_{ш} = (I_a R_a) / R_{ш}$.

Учитывая, что $I = I_a + I_{ш}$, получим:

$$I = I_a \left(1 + \frac{R_a}{R_{ш}} \right) = n I_a, \quad (15)$$

где n – коэффициент шунтирования, показывающий, во сколько раз амперметр с шунтом может измерять большую силу тока. Сопротивление шунта определяется по формуле:

$$R_{ш} = R_a / (n - 1) \quad (16)$$

Так как основная часть рабочего тока I проходит через шунт в виде $I_{ш}$ и лишь малая часть в виде I_a через амперметр, то последний, по существу, выполняет роль прибора, измеряющего падение напряжения на шунте. Поэтому на выпускаемых промышленностью шунтах маркируется, например, 5000A, 75 мВ. Это значит, что при токе $I_{ш} = 5000A$ падение напряжения на шунте составляет 75 мВ. Подключенный к шунту прибор измеряет данное напряжение.

Если шунт рассчитан на ток до 30A, то его чаще встраивают в корпус прибора (внутренний шунт). Для измерения больших токов применяют наружные шунты. В этом случае шкала градуируется на ток, измеряемый с помощью шунта. На шкале прибора наносятся соответствующие знаки, например, НШ 75mV. Это означает, что данный прибор работает с наружным шунтом на 75 мВ.

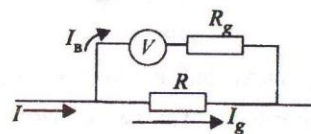


Рис. 5

Для расширения предела измерения U_b вольтметра с внутренним сопротивлением R_b последовательно с ним включают добавочный резистор сопротивлением R_g (рис. 5).

Измеренное падение напряжения на резисторе R равно:

$$U = U_b + U_g.$$

Пусть $U = n U_b$, тогда $n I_b R_b = I_b R_b + I_b R_g$ и окончательно получим:

$$R_g = R_b (n - 1). \quad (17)$$

Следовательно, для расширения предела измерения вольтметра в n раз последовательно с ним необходимо включить добавочный резистор сопротивлением R_g . Добавочные резисторы чаще устанавливают в корпусе прибора.

Экспериментальная часть

1. *Приборы и принадлежности:* вольтметр, амперметр, источник постоянного тока, переключатель, резисторы (3шт.), шунт.

2. *Описание лабораторной установки.* Лабораторная установка состоит из корпуса и лицевой панели, на которой установлены два электроизмерительных прибора разных систем, ручка включения и переключения резисторов.

Электрическая схема установки (рис.6) состоит из источника постоянного тока ИП, четырехпозиционного переключателя S , трех резисторов разных сопротивлений и микроамперметра – первого изучаемого прибора.

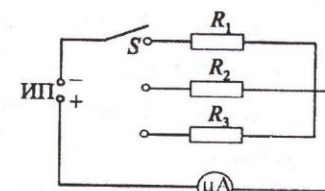


Рис. 6

Второй прибор, установленный на лицевой панели, в электрическую цепь лабораторной установки не включен и служит для получения навыков при составлении паспортных данных.

В целях увеличения срока действия элемента постоянного тока переключатель S необходимо устанавливать в положение 1, 2, 3 только в процессе измерения значения тока.

3. Порядок выполнения работы. Задание 1. Составление паспортных данных приборов.

1.1. Начертить в масштабе 1:1 шкалы приборов лабораторной установки со всеми условными обозначениями.

1.2. Составить паспортные данные приборов в следующем порядке:

- 1) наименование прибора;
- 2) система;
- 3) род измеряемого тока;
- 4) пределы измерения;
- 5) цена деления;
- 6) класс точности;
- 7) рабочее положение;
- 8) группа эксплуатации;
- 9) испытательное напряжение.

Примечание. В лабораторной установке имеются некоторые нарушения правил эксплуатации электроизмерительных приборов. Необходимо выявить эти нарушения и отразить в отчете.

Задание 2. Измерение силы тока в цепи и оценка погрешности измерения.

2.1. Установить ручку переключения установки (см. рис. 6) по указанию преподавателя в одно из трех возможных положений (например, в положение I) и провести отсчет силы тока по шкале прибора.

2.2. Поставить переключатель в положение «Выключено».

2.3. Повторить эти действия еще дважды.

2.4. В результате трех измерений получить три значения силы тока I_1 , I_2 , I_3 , которые будут различаться из-за неточности снятия показания прибора, колебания напряжения и других факторов.

2.5. Определить результат измерений с указанием погрешностей по методике прямых измерений.

4. Отчет о лабораторной работе должен содержать:

Часть 1. Прибор магнитоэлектрической системы: 1) схема прибора (см. рис. 1), формулы и схема (см. рис. 2), поясняющие принцип действия прибора;

2) шкала прибора со всеми обозначениями;

3) паспортные данные прибора (расшифровка обозначений).

Часть 2. Прибор электромагнитной системы: 1) схема механизма прибора (см. рис. 3), формулы, поясняющие принцип работы;

2) шкала прибора со всеми обозначениями;

3) паспортные данные прибора.

Часть 3: 1) описание схемы измерения силы тока амперметром с шунтом;

2) пояснение принципа измерения напряжения вольтметром с добавочным резистором.

Часть 4. Запись результатов измерения силы тока: 1) значения трех измерений силы тока;

2) расчеты номинального значения $I_{ср}$, систематической θ и случайной ϵ погрешностей, полуширины доверительного интервала ΔI , относительной погрешности δI .

3) полная окончательная запись результата прямого измерения силы тока.

Лабораторная работа №2

ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: практическое применение законов постоянного тока.

Теоретическая часть

Основными законами постоянного тока являются:

1) закон Ома, устанавливающий зависимость силы тока I от напряжения U ;

2) закон Джоуля – Ленца, определяющий количество теплоты, выделяемой током в проводнике;

3) законы Кирхгофа (точнее правила Кирхгофа), с помощью которых производится расчет разветвленных цепей постоянного тока.

Соотношение между токами, напряжениями, эдс и сопротивлениями в электрических цепях постоянного тока определяются законом Ома и правилами Кирхгофа.

Закон Ома для замкнутой цепи (рис. 7), содержащей источник тока (например, гальванический элемент ε с внутренним сопротивлением r) и резистор с сопротивлением R , записывается в виде:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (18)$$

т.е. сила тока в цепи равна отношению эдс источника тока к ее полному сопротивлению.

Отсюда

$$\varepsilon = IR + Ir. \quad (19)$$

Откуда следует, что эдс равна сумме падения напряжения на внешнем сопротивлении R и внутреннем сопротивлении гальванического элемента r . При $R \gg r$ имеем:

$$U = IR \approx \varepsilon.$$

Сопротивление однородного по химическому составу проводника с площадью сечения S и длиной L определяется формулой:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (20)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала проводника; l – длина проводника; S – площадь поперечного сечения проводника.

Величина, обратная удельному электрическому сопротивлению материала, называется его удельной проводимостью.

Зависимость удельного сопротивления металлического проводника от температуры определяется формулой: $\rho_t = \rho_0(1 + \alpha \Delta T)$, где α – температурный коэффициент сопротивления; ρ_0 – удельное сопротивление при 273К.

Для металлов $\alpha > 0$, т.е. сопротивление металлов растет с увеличением температуры. У электролитов в отличие от металлов сопротивление при нагревании уменьшается ($\alpha < 0$).

Правила Кирхгофа

В 1847 году немецкий физик Густав Роберт Кирхгоф установил закономерности течения электрического тока в разветвленных цепях постоянного тока, получившие название «правил Кирхгофа», или законов Кирхгофа.

Первое правило Кирхгофа является следствием закона сохранения электрического заряда и состоит в том, что алгебраическая сумма токов I_k , сходящихся в любой точке разветвления (узле) цепи (рис. 8), равна нулю:

$$\sum_{k=1}^N I_k = 0, \quad (21)$$

где $N > 2$ – число ветвей.

Положительными считаются токи, подходящие к узлу, отрицательными – токи, отходящие от узла.

Второе правило Кирхгофа (правило контуров) является следствием закона сохранения энергии и вытекает из закона Ома, если его применить к различным участкам замкнутой цепи, и потенциальности электростатического поля. Оно состоит в следующем:

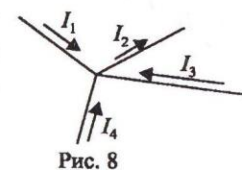


Рис. 8

в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, (рис. 9), алгебраическая сумма произведений сил токов I_k на сопротивления R_k соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме приложенных в нем эдс ϵ_k :

$$\sum_{k=1}^m I_k \cdot R_k = \sum_{k=1}^m \epsilon_k, \quad (22)$$

где ϵ_i – эдс в отдельном замкнутом контуре; m – число участков в замкнутом контуре (на рис.8 $m = 3$); I_i – сила тока на отдельном участке; R_i – сопротивление i -го участка. Токи I_i считаются положительными, если их направления совпадают с направлением обхода по контуру, и отрицательными, если не совпадают.

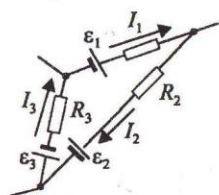


Рис. 9

Эдс источников тока считаются положительными, если они создают токи, направленные в сторону обхода контура, если же – в противоположную сторону, то – отрицательными.

Например, для схемы, представленной на рис. 9, второе правило Кирхгофа запишется в виде:

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 = \epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3. \quad (23)$$

Правила Кирхгофа позволяют рассчитывать сложные электрические цепи, например, определять силу и направление тока в любой части разветвленной системы проводников, если известны сопротивления и эдс всех его участков.

Для системы из n проводников, образующих r узлов, записываются n независимых уравнений:

1) $(r - 1)$ уравнений для узлов на основе первого правила Кирхгофа (уравнение для последнего узла не является независимым, а вытекает из предыдущих);

2) $n - (r - 1)$ уравнений для независимых замкнутых контуров на основе второго правила Кирхгофа. Каждый из n проводников в эти последние уравнения должен войти хотя бы один раз.

Так как при составлении уравнений нужно учитывать направления токов в проводниках, которые заранее не известны, эти направления задаются произвольно. Если при решении для какого-либо тока получается отрицательное значение, это означает, что его направление противоположно выбранному.

Экспериментальная часть

1. *Приборы и принадлежности:* микроамперметр, вольтметр, переменный резистор, источник постоянного тока.

2. *Описание лабораторной установки:* электрическая схема лабораторной установки (рис. 10) включает источник постоянного напряжения G , микроамперметр μA , вольтметр V и переменный резистор R .

В качестве переменного резистора R используется металлическая проволока, намотанная на фарфоровую катушку (резистор типа ППБ–50 Г 10 кОм +5%).

3. *Порядок выполнения работы:* 1) Собрать электрическую схему согласно рис. 10, проверив при этом правильность подключения полярности приборов.

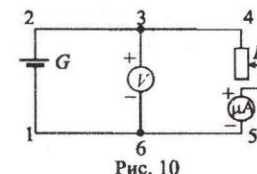


Рис. 10

Примечание. 1. Собирать и разбирать схему следует при отключенном напряжении.

2. Подключение собранной измерительной схемы производить зажимами «крокодил» к источнику постоянного тока с напряжением 1,5 В.

3. Для достижения максимальной точности измерений следует зачистить контакты соединительных проводов и обеспечить их плотное соединение между собой.

2) Увеличивая сопротивление нагрузки, снять не менее пяти показаний микроамперметра I_x и вольтметра U_x , занести их в табл. 4.

Таблица 4

Номер опыта	U_3 , В	I_3 , мкА	R , кОм (расчет)
1			
2			
3			
4			
5			

3) После окончания эксперимента полученные результаты показать преподавателю. Убедившись в правильности полученных результатов, разобрать электрическую схему.

4. *Обработка результатов измерений.* Вычислить по закону Ома для каждого значения напряжения U_3 и силы тока I_3 сопротивление R и результат занести в табл.4.

Для одного значения R вычислить по формуле (20) длину l проволочного проводника, подключенного в электрическую цепь. Диаметр проволоки $d = 9 \cdot 10^{-5}$ м, удельное электрическое сопротивление $\rho = 10^{-6}$ Ом·м.

На основании правил Кирхгофа рассчитать токи в контурах 1-2-3-6 и 3-4-5-6 схемы (рис. 11) (эквивалентной измерительной схеме рис. 10) при одном из значений R и сравнить расчетные и измеренные значения. Для удобства расчета цепи на схеме рис. 11 выделены внутреннее сопротивление R_A микроамперметра, R_B вольтметра и r источника постоянного тока.

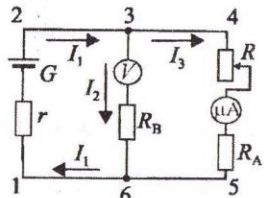


Рис. 11

Рассчитать необходимо токи I_1 , I_2 , I_3 . Для этого следует составить три уравнения. Первое уравнение составляется для узла 3 по первому правилу Кирхгофа, второе – для контура 1-2-3-6-1 и третье – для контура 3-4-5-6-3 по второму правилу Кирхгофа. За ЭДС (ϵ) можно принять значение U , измеренное при наименьшем R .

Значения R_A и R_B определять по данным, указанным на шкалах приборов. При отсутствии этих значений на шкалах приборов принять $R_A = 1$ кОм, $R_B = 10$ кОм. Внутреннее сопротивление источника постоянного тока $r = 3,5$ кОм.

5. *Отчет о работе* должен содержать:

- 1) краткое описание теоретической части, основные формулы;
- 2) схемы лабораторной установки (см. рис. 10 и 11);
- 3) результаты измерений (в виде таблицы);
- 4) исходные данные для расчетов, алгоритм вычисления длины l проволочного резистора. Три уравнения для определения I_1 , I_2 , I_3 , решение этой системы уравнений, окончательные выражения для расчета I_1 , I_2 , I_3 , расчет относительной погрешности определения силы тока;
- 5) необходимые выводы по работе.

Лабораторная работа № 3

ЗАКОН АМПЕРА ДЛЯ ПРОВОДНИКА С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Цель работы: изучение закона Ампера для проводника с током в магнитном поле, экспериментальное подтверждение закона.

Теоретическая часть

Магнитное поле. Характеристики магнитного поля

Пространство, окружающее движущийся заряд, систему движущихся зарядов или проводник, по которому протекает электрический ток, называют магнитным полем (МП). Основной характеристикой МП является его напряженность, обозначаемая символом \vec{H} . Напряженность поля характеризует силу, с которой притягиваются или отталкиваются проводники с протекающими по ним

электрическими токами. Единицей напряженности МП в системе СИ является 1 А/м (ампер/метр).

Другой важной характеристикой МП является магнитная индукция \vec{B} , связанная с напряженностью соотношением:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (24)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ – относительная магнитная проницаемость среды, $[\mu] = 1$ Гн/м (генри/метр); для вакуума и воздуха $\mu = 1$. Единицей измерения магнитной индукции является тесла: $[B] = \text{Тл}$. 1 Тл = (Н·м)/(А·м²).

Закон Ампера

Силу, действующую со стороны магнитного поля с индукцией \vec{B} на проводник с током, называют силой Ампера. Элементарная сила Ампера $d\vec{F}$, действующая на малый элемент $d\vec{l}$ длины проводника, по которому идет электрический ток I , определяется в системе СИ выражением:

$$d\vec{F} = I \cdot [d\vec{l}, \vec{B}], \quad (25)$$

где $d\vec{l}$ – вектор, численно равный длине dl элемента проводника и направленный в ту же сторону, что и вектор плотности тока \vec{J} в этом элементе проводника.

В скалярной форме:

$$dF = I \cdot dl \cdot B \cdot \sin(\angle d\vec{l}, \vec{B}). \quad (26)$$

Соотношение (26) называют законом (формулой) Ампера.

В отличие от электростатических сил, которые являются центральными, сила Ампера, как и другие силы электромагнитного взаимодействия, не является центральной. Она направлена перпендикулярно к линиям индукции магнитного поля.

Контур с током в магнитном поле

В магнитном поле, вызываемом токами, будут взаимодействовать проводники, имеющие любую форму контура, и каждый из таких контуров можно рассматривать как источник МП. Такой источник должен иметь и свою специфическую магнитную характеристику.

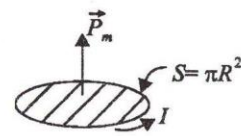


Рис. 12

Для характеристики замкнутого плоского контура, в котором течет ток, вводится магнитный момент плоского контура (рис. 12), определяемый как произведение силы тока I на площадь контура S , в котором течет этот ток:

$$P_m = IS. \quad (27)$$

Магнитный момент это аксиальный вектор \vec{P}_m , направленный перпендикулярно плоскости контура так, чтобы наблюдатель, смотрящий с конца этого вектора, видел бы движение тока по часовой стрелке.

Направления векторов \vec{P}_m , \vec{H} и \vec{B} совпадают, ибо $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$.

За положительное направление вектора \vec{P}_m выбирается направление, совпадающее с поступательным движением закручивающегося буравчика, если направление вращения его рукоятки совпадает с направлением движения положительных зарядов кругового тока.

Правило буравчика позволяет определить направления магнитных силовых линий (рис. 13).

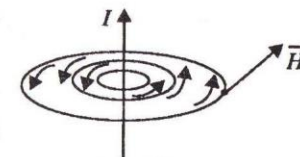


Рис. 13

Если электрический заряд q движется с постоянной скоростью v по замкнутому контуру, ему приписывается магнитный момент:

$$M_3 = q \cdot v \cdot \frac{S}{l}, \quad (28)$$

где S – площадь рамки; l – длина контура рамки.

Рассмотрим рамку с током I , помещенную в однородное магнитное поле с индукцией \vec{B} , как это показано на рис. 14. Сила, действующая на провод с током I длиной Δl в однородном магнитном поле, определяется по формуле Ампера (26), из которой следует, что силы, действующие на стороны рамки BC и AD , лежат в плоскости рамки и стремятся ее растянуть (на рис. 14 показана только одна из сил \vec{F} , приложенная к отрезку провода BC). Если переменить направление тока или магнитного поля на обратное, силы будут не растягивать, а сжимать контур $ABCD$.

Теперь рассмотрим силы, действующие на стороны AB и CD . Для этого обратимся к рис. 15, на котором изображен горизонтальный разрез рамки. К отрезку CD приложена сила \vec{F}_1 , равная по величине силе \vec{F}_2 , действующей на сторону AB , но направленная противоположно ей.

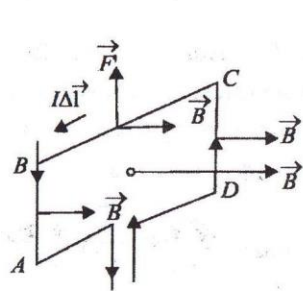


Рис. 14

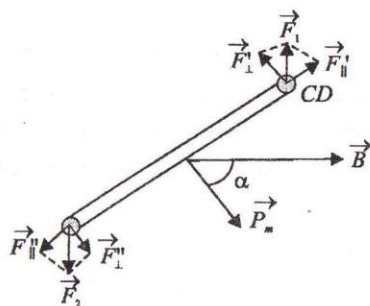


Рис. 15

На рамку действует момент сил

$$M = F_1 \cdot l_{BC} = F_1 \cdot l_{BC} \cdot \sin \alpha \quad (29)$$

и магнитный момент

$$M = ISB \cdot \sin \alpha, \quad (30)$$

где I – ток в рамке; l_{BC} и l_{CD} – длины соответствующих сторон рамки, S – площадь рамки; α – угол между направлением нормали к рамке, которую выбираем по направлению ее магнитного момента \vec{P}_m .

Через \vec{P}_m величина M определится так:

$$M = p_m B \cdot \sin \alpha. \quad (31)$$

Отсюда видно, что при $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 180^\circ$, т.е. когда плоскость рамки перпендикулярна к силовым линиям поля, момент сил, действующих на рамку, обращается в нуль. При угле $\alpha = 0^\circ$ рамка находится в устойчивом равновесии, так как силы, появляющиеся при отклонении ее от этого положения на малый угол $\Delta\alpha$, стремятся снова возвратить рамку в первоначальное положение. При угле $\alpha = \pi$ равновесие неустойчиво. Максимальный момент действует на рамку при $\alpha = \pi/2$ или $\alpha = 3\pi/2$. В этом случае вектор \vec{B} лежит в плоскости рамки.

Итак, рамка с током, помещенная в однородное магнитное поле, стремится повернуться так, чтобы направление ее магнитного момента \vec{P}_m совпадало с направлением поля (в рассмотренном случае при этом $\alpha = 0$):

$$\vec{P}_m = IS \vec{n}_0, \quad (32)$$

где \vec{n}_0 – нормальный положительный орт.

Тогда момент пары сил:

$$\vec{M} = [\vec{P}_m, \vec{B}]. \quad (33)$$

При повороте рамки с током до положения, перпендикулярного вектору магнитной индукции \vec{B} , сила Ампера будет только растя-

гивать контур и $M = 0$. Магнитный момент контура с током будет совпадать с вектором \vec{B} поля.

Таким образом, при помещении контура с током в магнитное поле он будет поворачиваться до тех пор, пока магнитный момент контура \vec{P}_m не выставится по линии магнитной индукции \vec{B} .

Справедливость соотношения (32) можно проверить при помощи магнитоэлектрического прибора, принцип действия которого основан на взаимодействии рамки с током и магнитного поля постоянного магнита. Схема устройства стрелочного измерительного прибора магнитоэлектрической системы представлена на рис.2 лабораторной работы № 1 настоящего лабораторного практикума.

Взаимодействие проводников катушки, обтекаемых измеряемым током, и магнитного поля постоянного магнита создает вращающий момент, под действием которого стрелка стремится повернуться на угол α , пропорциональный измеряемому току I .

Так как в воздушном радиальном зазоре поле равномерное и радиальное (вектор \vec{B} направлен по радиусу к оси рамки), то угол $\alpha = \pi/2$ и $\sin \alpha = 1$. Следовательно, момент \vec{M} определяется силой тока I и не зависит от положения рамки в пространстве (рис. 16):

$$M = IBnS, \quad (34)$$

где n – число витков обмотки рамки с током.

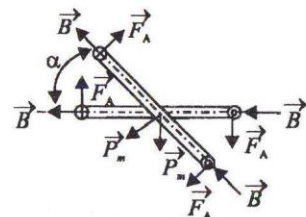


Рис. 16

На взаимодействии рамки с током и МП постоянного магнита основан принцип действия измерительных приборов магнитоэлектрической системы.

При пропускании тока I по обмотке рамки 4 (см. рис.1) она поворачивается

на угол α и закручивает пружину 7. Противодействующий момент пружины:

$$M_{пр} = K\alpha, \quad (35)$$

где K – удельный противодействующий момент пружины.

В положении равновесия рамки: $M = M_{пр}$

или

$$K\alpha = IBnS, \quad (36)$$

из чего следует, что угол поворота рамки α пропорционален силе тока I :

$$\alpha = cI, \quad (37)$$

где $c = BnS/K$ – коэффициент пропорциональности (чувствительность прибора).

Экспериментальная часть

1. *Приборы и принадлежности:* источник питания, миллиамперметр, реостат, прибор магнитоэлектрической системы.

2. *Описание экспериментальной установки:* схема установки представлена на рис.17.

3. *Порядок выполнения работы:* 1) собрать электрическую схему установки согласно схеме на рис.17;

2) включить источник питания (ИП), затем при помощи реостата R установить стрелку прибора Π на первое деление, соответствующее углу поворота $\alpha = 20^\circ$, снять показание миллиамперметра (mA) I_{31} .

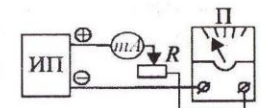


Рис. 17

3) установить стрелку прибора Π на второе (40°), третье (60°), четвертое (80°), пятое (100°) деления шкалы, замеряя каждый раз силу тока I_{3i} ;

4) опыты по замеру токов I_{31}, \dots, I_{35} повторить еще два раза. Данные эксперимента занести в табл. 5.

Таблица 5

Номер опыта	α , град	I_3 , мкА			I_p , мкА	$I_{расч}$, мкА	ΔI , мкА
		1-й опыт	2-й опыт	3-й опыт			
1	20						
2	40						
3	60						
4	80						
5	100						

5) рассчитать средние арифметические значения сил тока \bar{I}_3 ;

6) для одного деления шкалы по методике прямых измерений записать результаты измерений при $p = 0,95$, $n = 3$, в виде:

$$I = \bar{I}_3 \pm \Delta I, \quad (38)$$

$$\delta I = \frac{\Delta I}{\bar{I}_3} \cdot 100\%; \quad (39)$$

7) определить значение чувствительности s для прибора с параметрами: $B = 0,1 \text{ Тл}$; $n = 50$; $S = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $K = 1,12 \cdot 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{м/град}$;

8) по формуле (37) рассчитать силы тока I_{p1} , I_{p2} , I_{p3} , I_{p4} , I_{p5} , занести расчетные значения силы токов I_{pi} в таблицу;

9) построить графики зависимости $I_{pi} = f(\alpha)$;

10) для каждого деления шкалы определить разницу между экспериментальными I_3 и расчетными I_p значениями сил токов. Для максимальной разницы определить максимальную относительную ошибку:

$$\delta I = |I_3 - I_p| / I_p \cdot 100\%;$$

11) сделать необходимые выводы.

Лабораторная работа №4

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОСЦИЛЛОГРАФ

Цель работы: изучение физического принципа работы электронно-лучевого осциллографа и некоторого его применения.

Теоретическая часть

Электронно-лучевым осциллографом (ЭЛО) называют прибор, предназначенный для наблюдения функциональной связи между двумя или более электрическими величинами, характеризующими какой-либо физический процесс.

С помощью электронно-лучевого осциллографа наблюдают форму электрических сигналов, измеряют их временные и амплитудные значения. Главным элементом ЭЛО является электронно-лучевая трубка.

Электронно-лучевая трубка

В электронно-лучевом осциллографе применяются электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) с электростатическим управлением электронным лучом (рис.18).

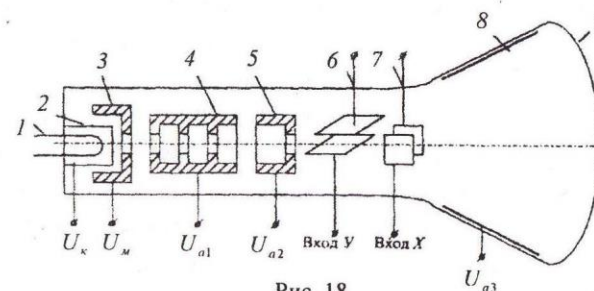


Рис. 18

Электронно-лучевая трубка состоит из подогревателя катода 1; катода 2; модулятора 3; или управляющего электрода, первого анода 4; второго анода 5; вертикально отклоняющих пластин 6; горизонтально отклоняющих пластин 7; третьего анода 8; экрана 9.

ЭЛТ изготавливается из стекла и имеет цилиндрическую форму с расширением в виде конуса или цилиндра большего диаметра. В полости трубки создается высокий вакуум. Внутри трубки установлены устройства для генерации, ускорения электронного луча и для управления им. Выводы с электродов выходят на штырьки

цоколя. На рис. 18 для упрощения выводы электродов показаны проходящими через стекло баллона.

Электронная пушка

Источником электронов является катод 2 косвенного накала, выполненный в виде цилиндра. В ЭЛО обычно применяются оксидные катоды, изготовленные из вольфрама с нанесенным покрытием из смеси оксидов бария, кальция, стронция. При нагреве катода происходит термоэлектронная эмиссия электронов с поверхности катода. Появившиеся электроны ускоряются электрическим полем между катодом и анодом и образуют пучок быстролетящих электронов.

Вокруг катода расположен модулятор, или управляющий электрод 3, цилиндрической формы с отверстием в доннышке. Модулятор предназначен для изменения плотности электронного луча и предварительной его фокусировки. На модулятор подается отрицательное относительно катода напряжение $|U_m| \leq 200...500$ В. Электроны, летящие с катода, отталкиваются от модулятора к его оси и образуют более узкий пучок. Чем больше U_m , тем меньше электронов пройдет через модулятор и при определенном напряжении $U_{m,зап}$ трубка запирается. Увеличение числа электронов в пучке увеличивает яркость светящегося на экране пятна. Таким образом, яркостью пятна управляют изменением напряжения U_m на модуляторе. Вслед за модулятором расположены первый 4 и второй 5 аноды. Они также имеют цилиндрическую форму. Внутри анодов выполнены перегородки – диафрагмы с отверстиями. На аноды подаются положительные относительно катода напряжения: $U_{a1} \sim 200...1000$ В, U_{a2} от 500В до 10...20 кВ. Первый анод называют фокусирующим, второй – ускоряющим.

Модулятор и система анодов образуют фокусирующую систему (рис. 19, здесь К – катод; М – модулятор; A_1 – первый анод; A_2 – второй анод; Э – экран трубки). Штриховыми линиями показаны траектории электронов, сплошными – эквипотенциальные линии электростатических полей.

Силовые линии (на рис.19 не показаны) электростатических полей направлены по нормальям к эквипотенциальным поверхностям.

Силы электростатических полей, действующие на движущиеся электроны, стремятся приблизить траектории электронов к силовым линиям. Поэтому левые части электростатических полей $M-A_1$ и A_1-A_2 оказывают на электроны собирающее действие, а правые части – рассеивающее. Но так как в правых частях электростатических полей электроны движутся быстрее, чем в левых, то в целом преобладает собирающе-фокусирующее действие.

Устройства, образующие неоднородные электростатические поля и вызывающие искривление траекторий движения электронов, подобные преломлению световых лучей в оптических линзах, называются электростатическими электронными линзами. Так, поля $M-A_1$ и A_1-A_2 подобны оптическим системам, состоящим из собирающей и рассеивающей линз.

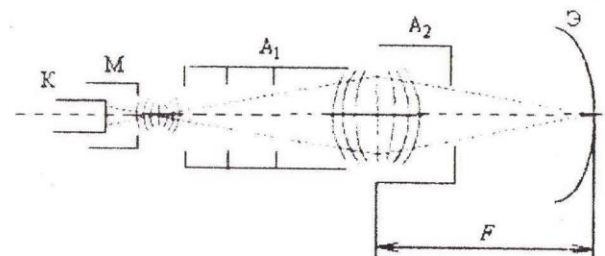


Рис. 19

Напряжение на втором аноде A_2 обычно поддерживают постоянным, так как от него зависит скорость вылетающих из A_2 электронов. С изменением напряжения на первом аноде A_1 изменяется напряженность и неоднородность электростатического поля A_1-A_2 , а следовательно, изменяется фокусное расстояние F электростатической линзы A_1-A_2 и фокусировка электронного луча на экране ЭЛТ.

Систему, состоящую из катода, модулятора и анодов A_1 и A_2 , называют *электронной пушкой*.

Некоторые современные осциллографы имеют более сложные конструкции электронных пушек.

Рассмотрим принцип действия вертикально отклоняющих пластин (рис. 20). Пусть на верхнюю пластину подано положительное напряжение U_y относительно нижней пластины. Электрон с массой m_e и зарядом e влетает между пластинами по оси Z со скоростью v_z .

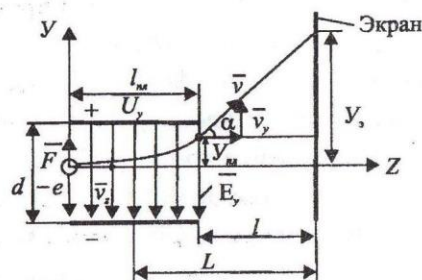


Рис. 20

Напряженность электростатического поля между пластинами:

$$E_y = \frac{U_y}{d}$$

перпендикулярна скорости \vec{v}_z движения и направлена вдоль оси Y .

Как известно, в этом случае сложное движение разделяют на два простых: равномерное движение со скоростью \vec{v}_z вдоль оси Z и равноускоренное движение под действием силы \vec{F} вдоль оси Y :

$$z = v_z \tau; \quad y = \frac{a \tau^2}{2}.$$

Ускорение a находят из второго закона Ньютона:

$$F = eE_y = m_e a \rightarrow a = eE_y / m_e.$$

Траектория движения электрона $y = f(z)$ представляет собой

параболу:

$$y = \frac{eE_y}{2m_e v_z^2} z^2.$$

На выходе из промежутка между пластинами траектория электрона отклоняется от первоначального положения на высоту $Y_{пл}$ и угол α .

С учетом того, что в этом случае $z = l_{пл}$, $\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_y}{v_z} = \frac{a \tau}{v_z}$, получаем

$$Y_{пл} = \frac{eE_y}{2m_e v_z^2} l_{пл}^2, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{eE_y}{m_e v_z^2} l_{пл}.$$

Вылетев из промежутка между пластинами, электрон движется по прямой под углом α к оси Z . Отклонение Y_3 электрона на экране

$$Y_3 = Y_{пл} + l \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{eE_y}{m_e v_z^2} l_{пл} \left(\frac{l_{пл}}{2} + l \right) = \frac{eE_y l_{пл} L}{m_e v_z^2}.$$

Скорость v_z электрона определяется напряжением U_{a2} между катодом и вторым анодом:

$$\frac{mv_z^2}{2} = eU_{a2}.$$

С учетом этого окончательно имеем:

$$Y_3 = \frac{l_{пл} L}{2dU_{a2}} \cdot U_y = k_y \cdot U_y,$$

где $k_y = \frac{l_{пл} L}{2dU_{a2}}$ называют чувствительностью трубки к напряжению по оси Y в мм/В.

Аналогично рассчитывается чувствительность k_x трубки к напряжению по оси X .

Экран электронно-лучевой трубки

Экран ЭЛТ покрыт специальным люминесцирующим материалом (оксид цинка и др.). Электроны, ударяя в экран, передают свою кинетическую энергию атомам покрытия. При этом электроны атомов переходят на орбиту с большей энергией. Возвращаясь

обратно на стационарную орбиту, электроны выделяют фотоны – кванты лучистой энергии, и наблюдается свечение. Данное явление называется катодолюминесценцией, а вещество, светящееся под действием ударов электронов, называют катодолуминофором или просто люминофором.

Электроны, падающие на экран, заряжают его отрицательно, создают электрическое тормозящее поле. Поэтому отрицательный заряд с экрана отводят. С этой целью на внутреннюю поверхность расширяющейся части трубки вблизи экрана наносят графитовый проводящий слой, называемый аквадагом. Аквадаг соединяют со вторым анодом. В некоторых типах осциллографов аквадаг служит третьим анодом 8 (см. рис. 18). Он предназначен для дополнительного ускорения электронов после отклоняющих пластин.

Блок-схема электронно-лучевого осциллографа

На рис. 21 приведена блок-схема электронно-лучевого осциллографа, включающего в себя основные традиционные элементы.

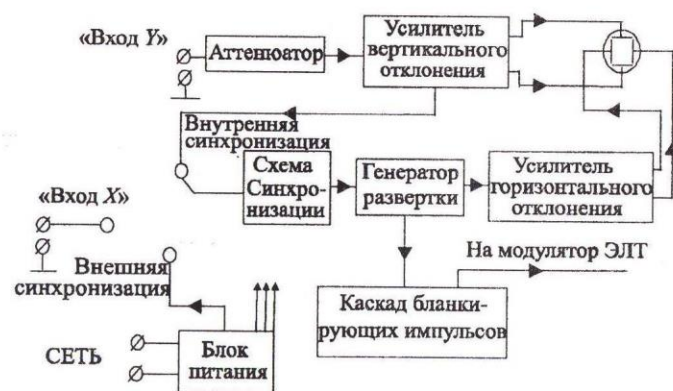


Рис. 21

Исследуемый сигнал поступает на гнездо «Вход Y». Аттенюатор представляет собой делитель напряжения, ослабляющий входной сигнал, например, в 10, 100, 1000 раз.

Усилитель вертикального отклонения увеличивает напряжение исследуемого сигнала до значения, необходимого для отклонения луча на экране ЭЛТ.

С выхода усилителя вертикального отклонения сигнал поступает на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ, а также на вход схемы синхронизации.

Некоторые типы осциллографов имеют дополнительный «Вход Y» непосредственно на отклоняющие пластины, минуя аттенюатор и усилитель. Для исследования одновременно двух сигналов используются двухлучевые осциллографы, в которых предусматривается два входа Y.

При изучении переменных по времени электрических сигналов их подают на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ, а на горизонтально отклоняющие пластины прикладывают равномерно нарастающие пропорционально времени напряжение – напряжение развертки $U_{разв}$ (рис. 22).

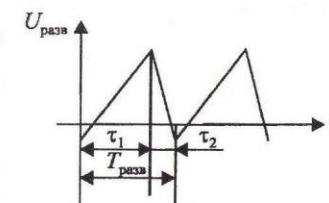


Рис. 22

Если напряжение развертки не подавать, то исследуемый сигнал даст на экране ЭЛТ вертикальную прямую линию. Напряжение развертки в течение времени τ_1 перемещает электронный луч по оси X от левого края экрана до правого с постоянной скоростью (прямой или рабочий ход луча). Далее луч гасится каскадом блокирующих импульсов и быстро возвращается в исходное положение за время τ_2 обратного хода. Этот процесс повторяется с периодом $T_{разв}$ и частотой $f_{разв}$.

Напряжение развертки генерируется с помощью так называемого генератора развертки. В осциллографах обычно предусматривается ряд частот напряжений развертки.

Если, например, при изучении синусоидального сигнала с частотой f частота напряжения развертки $f_{\text{разв}} = f$, то на экране ЭЛТ наблюдается один период сигнала (рис. 23, а).

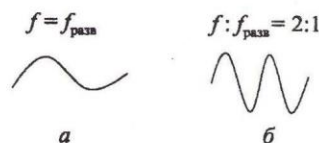


Рис. 23

На рис. 23, б показаны сигналы при соотношениях частот $f : f_{\text{разв}} = 2 : 1$.

Для получения неподвижного изображения сигнала на экране ЭЛТ необходимо обеспечить точное соотношение частот $f_{\text{разв}} = nf$, ($n = 1, 2, 3 \dots$). С этой целью используют принудительное согласование периодов напряжения развертки и исследуемого сигнала – синхронизацию. В осциллографах синхронизацию частоты генератора развертки обычно осуществляют исследуемым сигналом, от сети частотой 50 Гц или от внешнего источника.

Современные осциллографы для определения длительности исследуемого сигнала оснащаются генератором меток времени, с помощью которого на осциллограмме образуется светящийся ряд точек-меток. Если на осциллограмме наблюдается n таких точек, то длительность исследуемого сигнала $\tau = n/f$, где f – частота импульсов меток времени, Гц.

Для измерения напряжения наблюдаемого сигнала в осциллографе предусматривается генератор калибровочного напряжения.

Экспериментальная часть

1. *Приборы и принадлежности:* осциллограф, генератор.
2. *Описание установки:* Основным элементом установки является осциллограф.

3. *Порядок проведения опытов:* 1) ознакомиться с передней панелью осциллографа;

2) установить в среднее положение ручки: «Яркость», «Фокус», «Смещ. X», «Смещ. Y»;

3) включить осциллограф в сеть;

4) вращая ручки «Яркость», «Фокус», «Смещ. X», «Смещ. Y», определить их действие;

5) установить среднюю яркость, сфокусировать луч и установить изображение в центре экрана;

6) посмотреть, что изображается на экране при выключенной и включенной развертке. Зарисовать наблюдаемые изображения в отчете и объяснить их;

7) на клеммы «Вход Y» подать сигнал от генератора. Переключить кнопку синхронизации на «Внутр». Установить неподвижное изображение ручкой «Стабилизация». Переключая ручку «Развертка», установить на экране минимальное число периодов сигнала. Зарисовать осциллограмму в отчет. Определить соотношение частот исследуемого сигнала и развертки;

8) измерить напряжение сигнала, поступающего с генератора;

9) выключить генератор и осциллограф;

10) провести анализ произведенных измерений и сделать выводы.

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ И КПД ИСТОЧНИКА ТОКА ОТ НАГРУЗКИ

Цель работы: построение графиков зависимостей полезной мощности, полной мощности и КПД источника тока от сопротивления нагрузки.

Теоретическая часть

Работа тока и развиваемая мощность

Пусть по проводнику протекает ток I . Рассмотрим участок проводника, между концами которого имеется разность потенциалов U . В течение промежутка времени dt на участке перемещается заряд:

$$dQ = Idt$$

и, следовательно, совершаемая током работа равна:

$$dA = UdQ = UI dt. \quad (40)$$

Работа, выполняемая в единицу времени, называется мощностью. Единицей измерения мощности в СИ является $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$.

В цепях постоянного тока полезная (потребляемая нагрузкой) мощность равна произведению тока и напряжения:

$$N_{\text{полезн}} = IU = I^2 R = E^2 R / (R + r)^2 \quad (41)$$

Полная мощность источника тока выразится формулой:

$$N_{\text{полн}} = IE = E^2 / (R + r). \quad (42)$$

Отношение полезной мощности, развиваемой в нагрузке, к полной мощности источника называется коэффициентом полезного действия источника:

$$\eta = IU / IE = U / E. \quad (43)$$

В настоящей работе исследуется изменение полной и полезной мощностей; КПД источника тока в зависимости от нагрузки цепи.

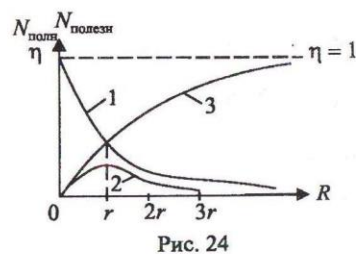


Рис. 24

Из формулы (42) видно, что при $R = 0$ полная мощность достигает наибольшего значения. При увеличении R значение $N_{\text{полн}}$ падает, стремясь асимптотически к нулю (рис. 24, кривая 1). Полезная мощность равна нулю при $R = 0$ (рис. 24, кривая 2). Наибольшего

значения она достигает при $R = r$ (внешнее сопротивление цепи равно внутреннему сопротивлению источника тока). При этом

$$N_{\text{полезн}} = E^2 / (4r). \quad (44)$$

КПД источника при $R = 0$ также равен нулю, а с увеличением сопротивления нагрузки он возрастает, приближаясь к единице (рис. 24, кривая 3).

Экспериментальная часть

1. *Приборы и принадлежности:* источник питания E , амперметр A , вольтметр V , реостат R (нагрузка цепи), ключ K .

2. *Описание лабораторной установки.* Схема лабораторной установки приведена на рис. 25.

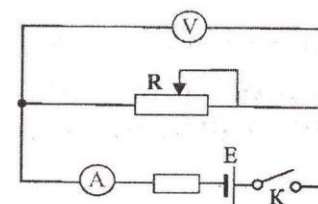


Рис. 25

3. *Порядок выполнения работы:* 1) ознакомиться с рабочей установкой, схема которой дана на рис. 25;

2) определить и записать цену деления приборов;

3) установить ползунок реостата R в положение максимального сопротивления;

4) включить ключом K измерительную цепь и записать показания амперметра и вольтметра в таблицу;

5) постепенно уменьшая сопротивление реостата (нагрузки), отметить и записать в табл. 6 не менее 10 значений тока и напряжения:

Таблица 6

№ п/п	E , В	I , А	U , В	$R = U/I$, Ом	$N_{\text{полн}} = IE$, Вт	$N_{\text{полн}} = JU$, Вт	$\eta = U/E$
1							
2							
3							
...							
10							

Примечание. Значение эдс источника тока (обозначено через E) измерить при помощи вольтметра V .

б) произвести необходимые для каждого случая вычисления с целью определения значений R , $N_{\text{полн}}$, $N_{\text{полн}}$, η и по полученным данным построить графики зависимостей полезной мощности, полной мощности и кпд источника тока от сопротивления нагрузки;

7) сделать необходимые выводы.

Лабораторная работа №6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС ИСТОЧНИКА ТОКА КОМПЕНСАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Цель работы: изучение методики измерения эдс; измерение эдс источника тока (аккумулятора).

Теоретическая часть

Электродвижущей силой (эдс) источника тока называется разность потенциалов между полюсами незамкнутого источника тока. Эдс можно измерить обычным вольтметром, однако показания вольтметра при этом будут меньше истинного значения эдс, так как вольтметр потребляет ток. Из закона Ома для полной цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad (45)$$

имеем $\varepsilon = IR + Ir$ (здесь $IR = U$ – показание вольтметра, соответствующее падению напряжения на нем; Ir – падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника); т.е. показание вольтметра $U = \varepsilon - Ir$ меньше фактического значения эдс на величину падения напряжения внутри источника.

Таким образом, измерение эдс вольтметром дает ошибку, зависящую от сопротивления вольтметра. Более точным способом измерения эдс является компенсационный. При этом через испытуемый источник ток не проходит, следовательно, не происходит и падения напряжения на источнике.

Измерение эдс компенсационным методом

При перемещении ползунка переменного сопротивления ($R_{\text{пер}}$) разность потенциалов между точками А и В изменяется в широких пределах. Если подобрать положение ползунка таким (точка В), чтобы ток через гальванометр Г был равен нулю, то падение напряжения IR_{AB} батареи Б компенсирует эдс испытуемого элемента Е, т.е. $IR_{\text{AB}} = E$.

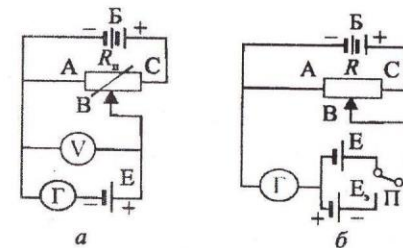


Рис. 26

Тогда показание вольтметра V точно равно эдс исследуемого элемента. Точность измерения эдс при этом зависит от точности вольтметра. Однако вольтметр не всегда обеспечивает нужную точность, поэтому вольтметром не пользуются, а сравнивают эдс испытуемого элемента с эдс эталонного элемента («нормальный элемент Вестона»).

Измерение эдс компенсационным методом с применением эталонного элемента

В этом случае в измерительную цепь (см. рис. 26, б) по очереди включается или эталонный элемент E_3 , или испытуемый источник E . Пусть при включении E_3 компенсация происходит при значении сопротивления R_1 участка АВ, а при включении E при значении сопротивления R'_1 участка АВ. В обоих случаях ток через гальванометр равен нулю, а сопротивление участка АС остается неизменным. Поэтому для обоих случаев ток I будет один и тот же.

Тогда для первого случая: $I \cdot R_1 = E_3$, а для второго – $I \cdot R'_1 = E$. Из последних равенств, поделив первое на второе, получим:

$$E = \frac{R'_1}{R_1} E_3. \quad (46)$$

Экспериментальная часть

1. *Приборы и принадлежности:* аккумулятор Б; два магазина сопротивлений M_1 и M_2 ; эталонный источник E_3 с известной эдс; источник E ; ключ K_1 ; кнопка K_2 ; переключатель П.

2. *Порядок выполнения работы.* На лабораторной установке (рис. 27) участки цепи АВ и ВС представлены магазинами сопротивлений M_1 и M_2 . По условиям измерения сумму сопротивлений магазинов оставляют неизменной, для чего сопротивление одного магазина при измерениях увеличивают, а сопротивление другого на столько же уменьшают.

1) Ознакомиться с установкой, выполненной по схеме, представленной на рис. 27.

2) Включить источник питания Б цепи ключом K_1 , переключатель П установить в положение E_3 (эталонный элемент включен в цепь гальванометра Г).

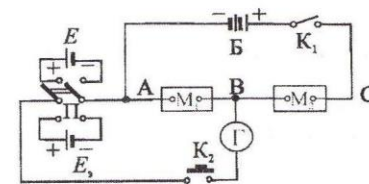


Рис. 27

3) Проверить исправность схемы следующим образом:

а) выставить все ручки магазина M_1 на 9, тогда общее сопротивление этого магазина будет 99...9 Ом;

б) выставить все ручки магазина M_2 на 0, общее его сопротивление при этом будет равно 0;

в) нажать на кнопку K_2 и зафиксировать направление отклонения стрелки гальванометра Г;

г) выставить все ручки магазина M_1 на 0, а магазина M_2 – на 9. Если нажатие кнопки K_2 приведет к отклонению стрелки гальванометра в противоположную сторону, то схема исправна;

4) Постепенно увеличивая сопротивление магазина M_1 и на столько же уменьшая сопротивление магазина M_2 , добиться нулевого (равного нулю) тока гальванометра Г при нажатии кнопки K_2 .

5) Сопротивление первого магазина при нулевом токе гальванометра записать в табл. 7, обозначив его через R_1 (п. 4 с каждым элементом повторить три раза, а результат каждого замера занести в табл. 7).

Таблица 7

Номер опыта	Сопротивление, Ом		Эдс источника, В		
	R_1	R'_1	E_3	E	ΔE
1					
2					
3					

$$E_{\text{ср}} = \dots \text{В}$$

$$\Delta E_{\text{ср}} = \dots \text{В}$$

6) Переключить переключатель П на испытуемый источник Е. Прodelать операции, описанные в пп.4 и 5, с целью достижения нулевого тока гальванометра. Соответствующее этому состоянию сопротивление R'_1 магазина M_1 записать в табл. 7.

7) По формуле (45) для каждой пары значений R_1 и R'_1 вычислить значение эдс испытуемого элемента.

8) Произвести расчеты и записать окончательный результат с указанием абсолютной и относительной погрешностей эксперимента.

9) Сделать необходимые выводы.

Лабораторная работа № 7

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ. ГРАДУИРОВКА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТЕРМОПАРЫ

Цель работы: применение термоэлектрического эффекта для измерения температуры; градуировка и определение чувствительности термопары.

Теоретическая часть

Если замкнутая электрическая цепь состоит из двух разнородных проводников, точки соединения (спаи) которых находятся при разных температурах, то в такой цепи (без внешнего источника тока) возникает термоЭДС(ε_T), величина которой зависит от разности температур горячего ($t_{гор}$) и холодного ($t_{хол}$) спаев, а также от физической природы материалов проводников. Для данной температуры ε_T является функцией только температур $t_{гор}$ и $t_{хол}$, т.е.

$$\varepsilon_T = f(t_{гор}) - f(t_{хол}). \quad (47)$$

Поддерживая температуру одного из спаев постоянной, например, полагая $t_{хол} = \text{const}$ и введя обозначение: $f(t_{хол}) = C$, можно записать:

$$\varepsilon_T = f(t_{гор}) - C = \varphi(t_{гор}), \quad (48)$$

т.е. получаем однозначную зависимость ε_T от температуры горячего спаев. Основываясь на зависимости (47), можно использовать такую цепь (называемую термопарой) для измерения температуры. Для этого необходима предварительная градуировка термопары – получение зависимости $t = f(\varepsilon_T)$.

Очевидно, что точность измерения температуры связана с точностью измерения малых значений термоЭДС. Для этого применяется компенсационный метод измерения. Особенностью метода, реализованного в принципе работы потенциометра, является то, что возникающая ε_T в термопаре уравнивается (компенсируется) равным ему по величине, но обратным по знаку напряжением от вспомогательного источника тока (см. лабораторную работу №6).

Так как в момент полной компенсации ε_T в цепи гальванометра сила тока $I = 0$, то сопротивление внешней цепи и гальванометра на точность измерения не оказывают влияния. Нуль-гальванометр потенциометра в компенсационном методе измерения термоЭДС служит только как индикатор, а не как измеритель тока.

Экспериментальная часть

1. *Приборы и принадлежности:* установка для градуировки термопар; потенциометр постоянного тока, лабораторный автотрансформатор типа ЛАТР.

2. *Описание экспериментальной установки.* Схема установки для измерения температуры объекта и градуировки термопар приведена на рис.28. Градуируемая термопара 1 и образцовый термометр 2 помещены в металлический блок 3, который нагревается электронагревателем 4. Нагрев термопары в блоке происходит до температуры $t_{гор}$, тогда как температура холодного спаев $t_{хол}$ остается равной комнатной температуре, т.е. практически постоянной. Для измерения ε_T один из проводов термопары разрывается (точка 5) и в разрыв цепи подключается измерительный прибор (здесь потен-

циометр ИП). Изменение температуры нагревателя осуществляется при помощи лабораторного автотрансформатора типа ЛАТР ступенчатым повышением питающего напряжения на 20 – 25В. Отсчет показаний образцового термометра 2 и потенциометра 6 производится тогда, когда колебания температуры не превышают 2-3 градусов за 3 мин. Точно также при 5 – 7 других температурах измеряется значение ε_T и показания образцового термометра 2.

Градуировочный график строится следующим образом: на оси абсцисс откладываются измеренные термометром 2 температуры горячего спая термопары в градусах Цельсия, а на оси ординат – измеренные потенциометром 6 значения термоЭДС в мВ. (Около графика указывается температура холодного спая.)

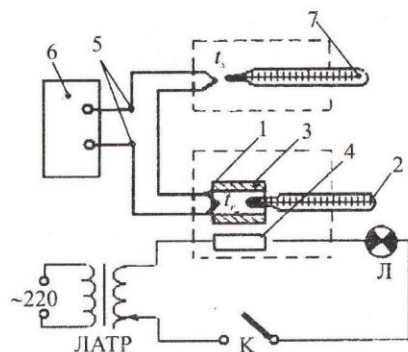


Рис. 28

Градуировочный график позволяет оценить чувствительность термопары K_T , которая равна изменению термоЭДС в милливольтках, соответствующему изменению температуры $t_{гор}$ на один градус, т.е

$$K_T = \Delta \varepsilon_T / \Delta t. \quad (49)$$

Величина K_T для платиновой-платиновой (ПП) термопары составляет 0,01, для медькопелевой (МК) – 0,06, для хромель-алюмелевой (ХА) – 0,04; для хромель-копелевой (ХК) – 0,08 мВ/град.

3. *Порядок выполнения работы:* 1) к установке для градуировки термопар подключить потенциометр 6 и ЛАТР в соответствии со схемой, приведенной на рис. 28;

2) подключить установку через ЛАТР в сеть 220В, выставив при этом начальное напряжение порядка 20-30В;

3) По достижении стационарного режима (изменение температуры по термометру 2 не более 2-3 градусов за 3 мин) заметить и записать в табл.8 показания термометра 2 и потенциометра 6.

Таблица 8

Номер измерений	Измерения при нагреве		Измерения при охлаждении		Средние значения из замеров при нагреве и охлаждении	
	$t_{гор}, ^\circ\text{C}$	Показания потенциометра, мВ	$t_{гор}, ^\circ\text{C}$	Показания потенциометра, мВ	$^\circ\text{C}$	мВ
1						
2						
3						
4						
5						
6						

4) Увеличивая напряжение, ступенчато повышать температуру нагревателя, контролируя ее по показанию термометра 2. Отсчет показаний приборов для каждой температуры производить согласно п.3. Чтобы не допустить перегрева и порчи термометра, необходимо строго следить за показанием термометра 2.

5) Для увеличения достоверности градуировки необходимо, соблюдая требования п.3, повторить измерения для тех же значений температур в процессе охлаждения блока 3, т.е. при отключенном нагревателе. Измеренные при нагревании и охлаждении величины усреднить, занести в соответствующий столбец таблицы. Температура холодного спая $t_{хол} = \dots ^\circ\text{C}$.

6) На основе полученных результатов построить градуированный график, т.е. зависимость $t = f(\varepsilon_T)$.

7) Вычислить на основе градуировочного графика чувствительность термопары в соответствии с формулой (3), определить марку термопары.

8) Сделать необходимые выводы.

Лабораторная работа № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Цель работы: определение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли для г.Казани.

Теоретическая часть

Земля представляет собой огромный магнит, полюса которого лежат вблизи географических полюсов: вблизи северного географического полюса расположен южный магнитный S , а вблизи южного географического – северный магнитный N . Вектор напряженности магнитного поля Земли на экваторе направлен горизонтально, а на магнитных полюсах – вертикально. В остальных точках земной поверхности магнитное поле Земли направлено под некоторым углом.

Величину проекции напряженности земного магнитного поля \vec{H} на горизонтальную плоскость называют горизонтальной составляющей магнитного поля Земли \vec{H}_3 . Направление этой составляющей принимается за направление магнитного меридиана, а вертикальная плоскость, проходящая через него, называется плоскостью магнитного меридиана.

Для измерения \vec{H}_3 необходимо определить для подвешенного на нити полосового магнита (ПМ) период крутильных колебаний около нити подвеса, как около вертикальной оси. Необходимо также

замерить угол отклонения магнитной стрелки компаса от плоскости магнитного меридиана, когда на стрелку одновременно действуют магнитное поле Земли и поле постоянного магнита.

На длинную некрученную нить (леску) подвешивают горизонтально ПМ. Отклонение его от плоскости магнитного меридиана приводит к тому, что на него будет действовать вращающий момент

$$M = p\mu\mu_0 H_3 \sin\alpha, \quad (50)$$

где p – магнитный момент полосового магнита; H_3 – горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля Земли; μ_0 – магнитная постоянная; μ – магнитная проницаемость среды (для воздуха $\mu = 1$).

Под действием момента M происходят крутильные колебания магнита. Эти колебания описываются дифференциальным уравнением:

$$J \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \tau^2} + p H_3 \sin\alpha = 0. \quad (51)$$

Здесь J – момент инерции магнита (маятника) относительно нити (оси качания). Для малых углов выражение (51) можно записать в виде:

$$\frac{\partial^2 \alpha}{\partial \tau^2} + p H_3 \alpha / J = 0. \quad (52)$$

Решением этого уравнения является:

$$\alpha = \alpha_0 \cos \omega \tau, \quad (53)$$

где $\omega = \sqrt{\frac{p\mu_0 H_3}{J}}$ – круговая частота; α_0 – амплитуда колебаний.

С учетом связи между периодом и круговой частотой колебаний получим:

$$T = 2\pi/\omega = 2\pi \sqrt{\frac{J}{p\mu_0 H_3}}. \quad (54)$$

Момент инерции полосового магнита относительно рассматриваемой оси качания (нити) определяется формулой:

$$J = m(l^2 + a^2)/12, \quad (55)$$

где m – масса; l – длина; a – ширина полосового магнита.

Угол отклонения стрелки компаса от плоскости магнитного меридиана определим следующим образом. Расположим ПМ перпендикулярно магнитному меридиану, компас поместим на расстоянии $R > 3l$ от центра магнита (центр стрелки компаса лежит на продолжении оси ПМ – (рис.29)), стрелка компаса при этом установится вдоль вектора \vec{H} , являющегося равнодействующей напряженностей поля Земли H_3 и поля полосового магнита H_m . Тогда стрелка компаса отклонится от плоскости магнитного меридиана на угол φ .

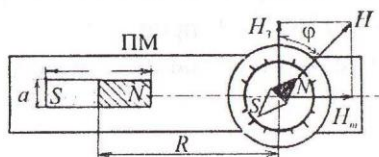


Рис. 29

Из рис. 29 видно, что

$$\operatorname{tg} \varphi = H_m / H_3. \quad (56)$$

Для точек, удовлетворяющих условию $R \geq 3l$, напряженность полосового магнита H_m вычисляется по формуле:

$$H_m = \frac{2p}{4\pi R^3}. \quad (57)$$

Расчет H_3 проводится по формуле:

$$H_3 = \frac{2\pi}{T} \sqrt{\frac{2J}{4\pi\mu_0 R^3 \cdot \operatorname{tg} \varphi}}, \quad (58)$$

которая легко получается исключением величин H_m и p из уравнений (55), (57).

Экспериментальная часть

1. *Приборы и принадлежности:* компас, полосовой постоянный магнит; масштабная линейка; обойма с леской для подвешивания магнита; секундомер и весы с разновесом.

3. *Порядок выполнения работы:* 1) взвешиванием определить массу магнита. Измерить длину l и ширину a магнита, результаты написать под таблицей (табл. 9);

2) подвесить ПМ на нити (леске), добиться, чтобы он расположился в плоскости магнитного меридиана Земли. Затем повернуть вокруг нити на небольшой угол и отпустить, приведя его тем самым в крутильно-колебательное движение. Отсчитав некоторое число колебаний (например, 10) и соответствующие им времена, найти период колебания полосового магнита;

Таблица 9

Номер опыта	Число колебаний, N	Время колебания, t_c	Период колебаний, T_c	Положение магнита	Угол, φ°
1				Восток	
2				Восток	
3				Запад	
4				Запад	
			$T_{cp} = \dots$		$J_{cp} = \dots$

3) на середину масштабной линейки установить компас, а линейку расположить перпендикулярно магнитному меридиану (стрелке компаса) вращением ее в плоскости стола. По градусной шкале компаса заметить нулевое положение стрелки. Затем со стороны Востока от компаса на расстоянии $R = 3l$ от центра компаса на линейку поместить ПМ. Магнитная стрелка при этом отклоняется от нулевого положения на угол φ_1 . Повернуть ПМ на 180° . Стрелка компаса теперь отклонится в противоположную сторону на угол φ_2 . Подобную процедуру повторить при расположении ПМ со стороны Запада;

4) по формуле (55) вычислить момент инерции магнита;

5) подставив полученные значения величин T (период колебаний), $\varphi_{\text{ср}}$, R и J в формулу (58), вычислим горизонтальную составляющую напряженности магнитного поля Земли для Казани;

6) сделать необходимые выводы.

Лабораторная работа № 9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА К ЕГО МАССЕ МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Цель работы: измерение отношения e/m (удельного заряда электрона) методом магнетрона.

Теоретическая часть

На заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, действует сила, которую называют магнитной силой (силой Лоренца):

$$\vec{F} = q \cdot [\vec{v}, \vec{B}], \quad (59)$$

где q – заряд частицы; \vec{v} – ее скорость; \vec{B} – магнитная индукция.

Эта сила направлена перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы \vec{v} и \vec{B} . Модуль магнитной силы определяется формулой:

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha, \quad (60)$$

где α – угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .

Траектория движения заряженной частицы в магнитном поле определяется конфигурацией магнитного поля, ориентацией вектора скорости и отношением заряда частицы к ее массе.

В электромагнитном поле сила, действующая на заряженную частицу, определяется как сумма двух слагаемых:

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + [\vec{v}, \vec{B}]), \quad (61)$$

где \vec{E} – напряженность электрического поля.

Существуют различные методы определения отношения e/m , в основе которых лежат результаты исследования движения электрона в электрическом и магнитном полях. Один из них – метод магнетрона. Называется он так потому, что конфигурация полей в нем напоминает конфигурацию полей в магнетронах – генераторах электромагнитных колебаний сверхвысоких частот.

Экспериментальная часть

1. *Приборы и оборудование:* модуль ФПЭ–03; модуль питания ИП; миллиамперметр РА.

2. *Описание экспериментальной установки (рис. 30).* Сущность метода состоит в следующем: специальная двухэлектродная электронная лампа, электроды которой представляют собой коаксиальные цилиндры, помещается внутри соленоида так, что ось лампы совпадает с осью соленоида. Электроны, вылетающие из катода лампы, при отсутствии тока в соленоиде движутся радиально к аноду. При подключении тока к соленоиду в лампе создается магнитное поле, параллельное оси лампы, и на электроны начинает действовать магнитная сила:

$$\vec{F} = -e \cdot [\vec{v}, \vec{B}], \quad (62)$$

где e – величина заряда электрона; \vec{v} – скорость электрона; \vec{B} – магнитная индукция.

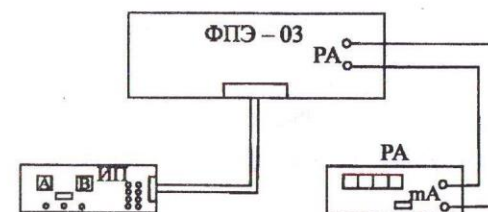


Рис. 30

Под действием этой силы, направленной в каждый момент времени перпендикулярно вектору скорости, траектория электронов искривляется. При определенном соотношении между скоростью электрона и магнитной индукцией электроны перестают поступать на анод, и ток в лампе прекращается.

Рассмотрим подробнее движение электронов в лампе при наличии магнитного поля. Для описания этого движения воспользуемся цилиндрической системой координат (рис. 31), в которой положение электрона определяется расстоянием его от оси лампы r , полярным углом φ и смещением вдоль оси Z . Электрическое поле, имеющее только радиальную компоненту, действует на электрон с силой, направленной по радиусу от катода к аноду. Магнитная сила, действующая на электрон, не имеет составляющей, параллельной оси Z . Поэтому электрон, вылетающий из катода без начальной скорости (начальные скорости электронов, определяемые температурой катода, много меньше скоростей, приобретаемых ими при движении в электрическом поле лампы), движется в плоскости, перпендикулярной оси Z .

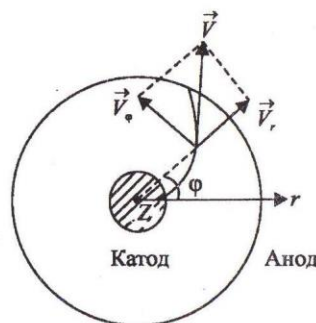


Рис. 31

Момент импульса L_z электрона относительно оси Z определяется:

$$L_z = m \cdot v_\varphi \cdot r, \quad (63)$$

где $v_\varphi = \frac{d\varphi}{dt}$ – составляющая скорости, перпендикулярная радиусу r .

Момент сил, действующих на электрон, относительно оси Z определяется только составляющей магнитной силы, перпендикулярной r . Электрическая сила и составляющая магнитной силы, направленные вдоль радиуса r , не создают момента относительно оси Z . Таким образом:

$$M_z = r \cdot F_\varphi = r \cdot e \cdot v_r \cdot B, \quad (64)$$

где $v_r = \frac{dr}{d\tau}$ – радиальная составляющая скорости электрона.

Согласно уравнению моментов

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{d\tau}. \quad (65)$$

Проектируя уравнение (65) на ось Z , получаем: $\frac{d(mv_\varphi r)}{d\tau} =$

$$= e \cdot r \cdot v_r \cdot B = e \cdot r \cdot \frac{dr}{d\tau} B$$

или

$$\frac{d(mv_\varphi r)}{d\tau} = \frac{1}{2} e \cdot B \cdot \frac{d(r^2)}{d\tau}. \quad (66)$$

Проинтегрируем уравнение (66):

$$mv_\varphi r = \frac{1}{2} \cdot e \cdot B \cdot r^2 + C.$$

Константу C найдем из начальных условий: при $r = r_k$ (r_k – радиус катода) $v_\varphi = 0$. Тогда

$$C = -\frac{1}{2} \cdot e \cdot B \cdot r_k^2$$

и

$$v_\varphi = \frac{1}{2} \cdot \frac{e}{m} \cdot \frac{B}{r} \cdot (r^2 - r_k^2). \quad (67)$$

Кинетическая энергия электрона равна работе сил электрического поля:

$$\frac{m \cdot (v_\phi^2 + v_r^2)}{2} = e \cdot U, \quad (68)$$

где U – потенциал относительно катода точки поля, в которой находится электрон.

Подставляя в выражение (68) значение v_ϕ из уравнения (67), получаем:

$$e \cdot U = \frac{m}{2} \cdot \left[v_r^2 + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{e}{m} \right)^2 \cdot \frac{B^2}{r^2} \cdot (r^2 - r_k^2)^2 \right]. \quad (69)$$

При некотором значении магнитной индукции $B_{кр}$, которое называют критическим, вектор скорости электрона вблизи анода станет перпендикулярным радиусу r , т.е. $v_r = 0$. Тогда уравнение (69) примет вид:

$$e \cdot U_a = \frac{m}{8} \cdot \left(\frac{e}{m} \right)^2 \cdot \frac{B_{кр}^2}{r_a^2} \cdot (r_a^2 - r_k^2)^2, \quad (70)$$

где U_a – потенциал анода относительно катода (анодное напряжение); r_a – радиус анода.

Отсюда найдем выражение для удельного заряда электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{8 \cdot U_a}{B_{кр}^2 \cdot r_a \cdot (1 - r_k^2 / r_a^2)^2}. \quad (71)$$

Индукция магнитного поля соленоида, длина L которого соизмерима с диаметром D , находится по формуле:

$$B_{кр} = \mu_0 \cdot n \cdot i_{кр} \frac{L}{\sqrt{L^2 + D^2}} = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot i_{кр}}{\sqrt{L^2 + D^2}} \quad (72)$$

где $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; n – число витков соленоида на единицу его длины.

Таким образом, экспериментально определив $B_{кр}$, можно вычислить величину e/m . Для нахождения $B_{кр}$ в лампе следует установить разность потенциалов между анодом и катодом и, включив ток в соленоиде, постепенно наращивать его, увеличивая магнитное поле в лампе. Если бы все электроны покидали катод со скоростью, равной нулю, то зависимость величины индукции магнитного поля имела бы вид, показанный на рис. 32 (пунктирная линия).

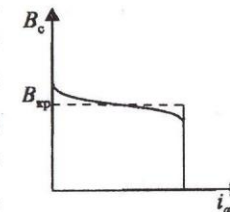


Рис. 32

В этом случае при $B < B_{кр}$ все электроны, испускаемые катодом, достигали бы анода, а при $B > B_{кр}$ ни один электрон не попадал бы на анод. Однако некоторая некоаксиальность катода и анода, наличие остаточного газа в лампе, падение напряжения вдоль катода, неоднородность поля соленоида по высоте анода и т.д. приводят к тому, что критические условия достигаются для разных электронов при различных значениях B . Все же перелом кривой останется достаточно резким и может быть использован для определения $B_{кр}$.

3. *Порядок выполнения работы:* 1) собрать электрическую схему установки (рис. 30 и рис. 33);

2) установить анодное напряжение $U_a \approx 50$ В по вольтметру ИП;

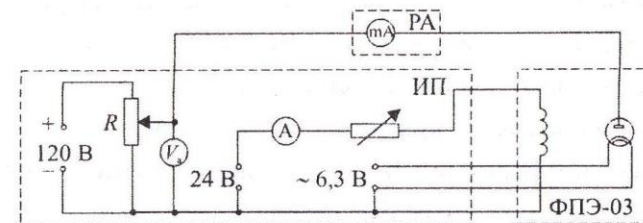


Рис. 33

3) изменяя ток в соленоиде от минимального (начального) значения до максимального через 0,1 А при постоянном анодном напряжении, снять сбросовую характеристику, т.е. зависимость

анодного тока i_a от тока в соленоиде i_c . Значения анодного тока i_a , определяемые по прибору РА, и значения тока в соленоиде i_c , определяемые по показаниям амперметра ИП, занести в табл. 10.

Таблица 10

$U_a = \dots \text{В}$		$U_a = \dots \text{В}$		$U_a = \dots \text{В}$	
I_c	i_a	I_c	i_a	I_c	i_a

Повторить пп.2) и 3) при двух других значениях анодного напряжения (более 50 В). Результаты измерений занести в табл. 11.

Таблица 11

U_a	$i_{кр}$	$B_{кр}$	e/m
-------	----------	----------	-------

4) Для каждого значения анодного напряжения построить сбросовую характеристику, откладывая по оси ординат значения анодного тока, а по оси абсцисс – значения тока в соленоиде. Для нахождения критического значения тока в соленоиде $i_{кр}$ провести до взаимного пересечения касательную к точке перегиба сбросовой характеристики (на участке ее спада) и прямую, соответствующую изменению минимальных значений анодного тока (рис. 34).

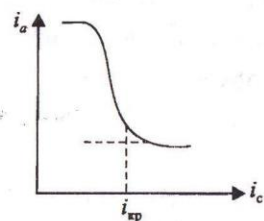


Рис. 34

Занести полученные значения $i_{кр}$ в табл. 11.

5) Для каждого критического значения тока в соленоиде рассчитать по формуле (72) индукцию магнитного поля. Величины L , D , N , r_a и r_k указаны на передней панели модуля ФПЭ – 03.

6) Вычислить e/m по формуле (71) для каждого значения критического поля в соленоиде и определить ее среднее значение.

7) Вычислить погрешность полученной величины e/m .

8) Сделать необходимые выводы.

Контрольные вопросы

1. Поясните физические принципы работы приборов электромагнитных, магнитоэлектрических и электродинамических систем.
2. Область применения электромагнитных и приборов.
3. Какую информацию о приборе можно получить на основе условных обозначений, приводимых на шкале прибора?
4. Что такое цена деления шкалы?
5. Что такое класс точности прибора?
6. Дайте определение абсолютной, относительной и приведенной погрешностей прибора.
7. Как записывается и читается результат измерения?
8. Почему сопротивление амперметра должно быть мало по сравнению с сопротивлением цепи, а сопротивление вольтметра велико по сравнению с сопротивлением участка, на котором измеряются напряжения?
9. В чем заключается различие между эдс гальванического элемента от напряжения на его клеммах?
10. Запишите закон Ома для участка и для полной цепи.
11. Сформулируйте правила Кирхгофа.
12. Принцип действия электронной пушки электронно-лучевой трубки.
13. Фокусирование луча.
14. Отклоняющая система.
15. Развертка изображения на экране.
16. Назначение ручек управления на передней панели осциллографа.
17. Объясните наблюдаемые в лабораторной работе осциллограммы.
18. Область применения осциллографа.

19. Что такое магнитное поле? Какие физические величины характеризуют магнитное поле?

20. Как устанавливается магнитная стрелка в магнитном поле?

21. Сформулировать закон Био – Савара – Лапласа.

22. В чем суть метода магнетрона для определения отношения e/m ?

23. Влияет ли на величину $B_{кр}$ изменение направления тока в соленоиде на противоположное?

24. Зависит ли величина e/m от величины анодного напряжения?

25. Рассмотреть движение электрона в однородном магнитном поле в двух случаях: а) скорость электрона $\vec{v} \perp \vec{B}$; б) скорость электрона \vec{v} направлена под углом α к полю \vec{B} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. М.: Наука, 1988. 496 с.
2. Детлаф А.А., Яворский В.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 1989. 607с.
3. Илюнин К.К., Леонтьев Д.И. и др. Справочник по электроизмерительным приборам / Под ред. К.К. Илюнина. Изд-е 3-е Л.: Энергоатомиздат, 1983. 784с.
4. ГОСТ 232117-78. Условные обозначения, наносимые на электроизмерительные приборы и вспомогательные части. М: Изд-во стандартов, 1978.
5. Жеребцов И.П. Основы электроники. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 352с.
6. Авдусь З.И. и др. Практикум по общей физике. М.: Просвещение, 1971.
7. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. Т.2. М.: Наука, 1969. 340с.
8. Белянкин А.Г. и др. Физический практикум. М.: ГТТИ, 1953.
9. Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики: Учебное пособие. Изд-е 2-е, перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1970. 448с.
10. Ахматов А.С., Андреевский В.М., Кулаков А.И. и др. Лабораторный практикум по физике: Учебное пособие для студентов втузов / Под ред. А.С. Ахматова. М.: Высшая школа, 1980. 360с.
11. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. М. – Л.: Энергия, 1969. 328с.