

Министерство образования Российской Федерации  
Амурский государственный университет

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**  
**ПО КУРСУ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**  
Методические указания для студентов специальности 01.07.00 –  
физика

Благовещенск  
2007

Лабораторный практикум по курсу «Электричество и магнетизм». Под редакцией Копыловой И.Б. Благовещенск: Амурский гос. Ун-т. 2007. - 128с.

Составители:

Согр А.А. (3-5, 3-6, 3-7, 3-11),

Ульянычева В.Ф.(3-4),

Козачкова О.В.(3-8),

Копылова И.Б.(3-0, 3-1, 3-2, 3-3, 3-9, 3-10, 3-12,),

Содержит описание 13 лабораторных работ по курсу «Электричество и магнетизм». Для студентов специальности 01.07.00 – физика.

Рецензент: С.В.Ланкин, проф. кафедры общей физики БГПУ, д-р физ.-мат. наук.

Амурский государственный университет, 2007

## **СОДЕРЖАНИЕ**

1. Лабораторная работа 3-0. Электроизмерительные приборы.....	4
2. Лабораторная работа 3-1. Градуировка электроизмерительных приборов.....	15
3. Лабораторная работа 3-2. Изучение работы электронно-лучевого осциллографа.....	24
4. Лабораторная работа 3-3. Определение удельного сопротивления проводника.....	38
5. Лабораторная работа 3-4. Изучение электростатического поля...	49
6. Лабораторная работа 3-5. Определение сопротивлений мостовым методом.....	62
7. Лабораторная работа 3-6. Исследование неоднородного участка цепи.....	71
8. Лабораторная работа 3-7. Исследование к.п.д. источника тока....	78
9. Лабораторная работа 3-8. Измерение индукции магнитного поля с помощью электродинамометра.....	85
10. Лабораторная работа 3-9. Определение удельного заряда электрона методом магнитной фокусировки.....	91
11. Лабораторная работа 3-10. Определение удельного заряда электрона с помощью вакуумного диода.....	98
12. Лабораторная работа 3-11. Исследование сегнетоэлектрических свойств триглицинсульфата.....	105
13. Лабораторная работа 3-12. Изучение свойств ферромагнитных материалов.....	118
16. Литература.....	127

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № Ф 3 - 0**

### **ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**

#### ***Цель работы:***

1. Изучить принцип действия электроизмерительных приборов.
2. Научиться определять технические характеристики приборов.
3. Освоить методику определения показаний приборов и погрешностей измерений.

#### ***КРАТКАЯ ТЕОРИЯ***

Электроизмерительные приборы служат для измерения электрических величин. Для измерения силы тока применяются амперметры, напряжения - вольтметры и гальванометры, сопротивления - омметры, мощности - ваттметры.

Электроизмерительные приборы по способу преобразования входной величины разделяются на две большие группы: аналоговые и цифровые.

Преобразование измеряемой величины в аналоговых приборах происходит непрерывно в вид удобный для отсчета. В цифровых приборах отсчеты измеряемой величины производятся через некоторые промежутки времени, либо фиксируется определенный уровень входной величины (т.е. измеряемая величина квантуется по времени или уровню). Результат измерений представляется в цифровой форме. Применение приборов той или иной группы зависит от цели и условий конкретной задачи. Необходимо отметить, что цифровые приборы обладают высоким быстродействием, удобством представления результата, возможностью вывода результата на ЭВМ или цифропечатающее устройство.

Тем не менее, применение аналоговых приборов вполне оправдано при проведении научного эксперимента, в технологических процессах для контроля определенных параметров, в ходе выполнения лабораторных работ.

Проектирование и эксплуатация приборов производится в соответствии с нормативной документацией, которая определяет условия применения и эксплуатации прибора, а также точность измерения.

Для правильного применения конкретного прибора необходимо знать принцип его действия, назначение, диапазон измеряемых величин. Необходимые для работы прибора сведения можно узнать, если уметь читать условные обозначения, вынесенные на лицевую панель (шкалу) прибора. Классификация электроизмерительных приборов осуществляется по нескольким признакам: по роду измеряемой величины : приборы для измерения тока, напряжения, сопротивления, мощности и т.д.; по роду

измеряемого тока, т.е. приборы могут работать на постоянном, переменном, трехфазном токе; по условиям эксплуатации (группы А, В, В1, В2, Т), группа эксплуатации определяет температурный режим, влажность окружающей среды, рабочее атмосферное давление, рабочее положение.

Для устранения влияния на работу приборов внешних электрических и магнитных полей предусматриваются конструктивные элементы (экраны), устраняющие помехи. Существует четыре группы защиты, которые обозначаются римскими цифрами.

В основе конструкции прибора заложен принцип преобразования электрической величины, действующей на входе прибора, в механическое смещение, поворот стрелки прибора или, если это цифровой прибор, в другую электрическую величину.

По принципу действия аналоговые прибора подразделяются на магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, электростатические, ферродинамические, индукционные, тепловые. Рассмотрим принцип действия наиболее часто применяемых приборов.

### ***Приборы магнитоэлектрической системы.***

Механизм прибора состоит из постоянного магнита с двумя полюсными башмаками (рис.1) и подвижной рамки, закрепленной на неподвижном металлическом цилиндре с помощью пружин. Рамка представляет собой несколько слоев медной проволоки, намотанной на алюминиевый каркас. Каркас имеет две полуоси, вокруг которых может вращаться рамка. К полуосям крепится указательная стрелка и один из концов спиральных пружин, другой конец пружин закреплен неподвижно.

Пружины удерживают рамку в первоначальном положении и возвращают ее в первоначальное положение после проведения измерений.

При пропускании электрического тока по рамке прибора со стороны магнита на рамку начинает действовать сила Ампера, которая создает вращающий момент:

$$M_{вр} = IBSN \quad (1)$$

где  $I$  - ток в рамке;  $B$  - магнитная индукция в зазоре;  $S$  - площадь рамки;  $N$  - число витков рамки.

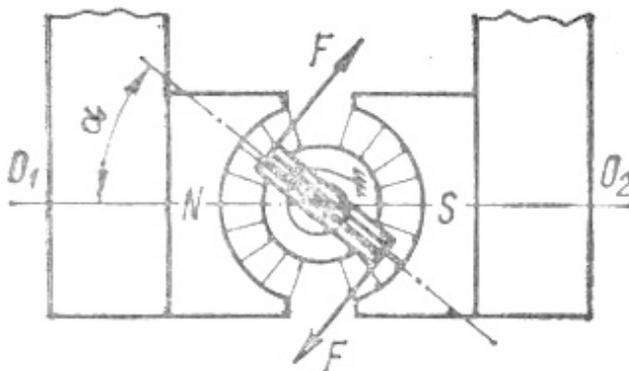


Рис. 1

С другой стороны при закручивании пружины в ней возникает момент упругих сил, который противодействует моменту сил Ампера.

$$M_{\text{упр}} = k\alpha \quad (2)$$

где  $k$ - коэффициент жесткости пружины;  $\alpha$  - угол поворота рамки.

Если упругий момент равен моменту сил Ампера, то рамка перестает вращаться, стрелка прибора, по которой снимается отсчет измеряемой величины, останавливается. Из условия равенства моментов следует, что сила тока, протекающего по рамке, пропорциональна углу поворота рамки.

$$IBSN = k\alpha \quad (3)$$

или

$$\alpha = S_I I \quad (4)$$

Коэффициент  $S_I = B S N / k$  называется токовой чувствительностью прибора и является величиной постоянной, поэтому шкала данного прибора равномерная.

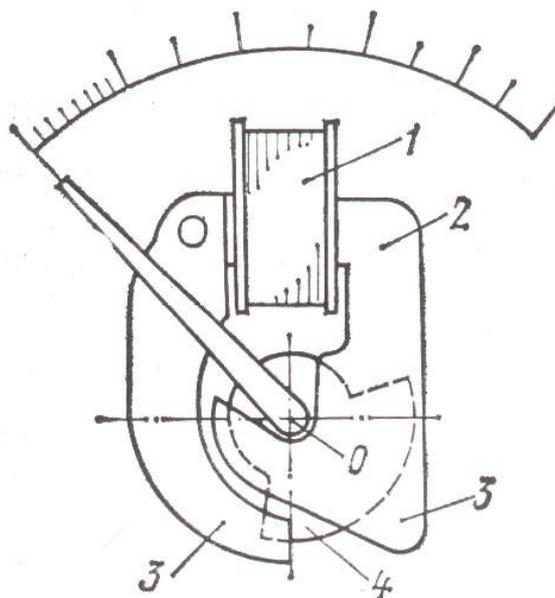
Достоинствами приборов магнитоэлектрической системы являются высокая чувствительность, точность и равномерность шкалы. Внешние поля слабо влияют на показания приборов данной системы. К недостаткам относятся недостаточная устойчивость к перегрузкам и работа только на постоянном токе.

### ***Приборы электромагнитной системы.***

Конструкция прибора состоит из неподвижной катушки и подвижного стального сердечника, который соединен со стрелкой прибора (рис.2).

Необходимой частью приборов данной системы является демпфер (успокоитель), который служит для гашения колебаний стрелки и

скорейшего установления равновесия. К оси, на которой находятся стрелка и сердечник прикреплен один конец стальной пружины, в которой при отклонении стрелки возникает механический момент упругих сил.



1-катушка, 2- сердечник, 3 – магнитопровод, 4 – стрелочный механизм.

Рис. 2.

Если по катушке пропустить измеряемый ток, то на стальной сердечник начнет действовать вращающий момент:

$$M_1 = k_1 I^2 \quad (5)$$

где  $k_1$  - постоянная, зависящая от материала, формы и расположения сердечника.

При повороте стрелки в пружине возникает момент упругих сил:

$$M_2 = k_2 \alpha \quad (6)$$

$k_2$  - коэффициент упругости пружины;  $\alpha$  - угол поворота стрелки.

При наступлении равновесия моменты  $M_1$  и  $M_2$  равны, поэтому

$$\alpha = k I^2 \quad (7)$$

где  $k = k_1 k_2$ .

Таким образом, угол поворота пропорционален второй степени силы тока, что указывает на неравномерность шкалы приборов электромагнитной системы и является недостатком данных приборов. К недостаткам также

относится невысокая точность (из-за гистерезиса в сердечнике) и чувствительность к внешним магнитным полям.

Достоинством данной системы является простота конструкции, механическая прочность, стойкость к перегрузкам, возможность работать как на постоянном, так и на переменном токе.

### ***Приборы электродинамической системы.***

Приборы данной системы используются для измерения силы тока, напряжения и мощности в цепях постоянного и переменного тока. Принцип работы приборов основан на взаимодействии постоянного и переменного токов. Измерительная часть прибора состоит из двух катушек, одна из которых неподвижна, а вторая, подвижная, находится внутри неподвижной.

Подвижная катушка очень легкая и имеет небольшое число витков тонкого медного провода, что обеспечивает малую инерционность катушки. Катушки находятся на одной оси, к этой же оси прикрепляются две спиральные пружины, которые создают механический момент упругих сил при повороте стрелки, соединенной с подвижной катушкой, и одновременно служат для подведения тока к подвижной катушке. Неподвижная катушка создает постоянное магнитное поле, т.е. выполняет роль электромагнита.

Вращающий момент возникает в подвижной катушке при одновременной подаче тока в обе катушки. Ток  $I_1$ , протекающий по неподвижной катушке создает магнитное поле. Ток  $I_2$  (измеряемый ток) протекает по подвижной катушке. Со стороны неподвижной катушки на подвижную катушку действует вращающий момент

$$M \approx I_1 I_2 \quad (8)$$

Поэтому, если приборы данной системы используются как вольтметры или амперметры, то шкала будет неравномерной, если же по данной схеме построены ваттметры (приборы для измерения мощности), то шкала будет равномерной. Это объясняется тем, что неподвижная (токовая) катушка соединяется с нагрузкой последовательно, а подвижная (катушка напряжения) - параллельно. В этом случае угол поворота определяется соотношением:

$$\alpha = k_1 I \cdot I_u = k_1 \frac{U}{R_u} I = k_2 W \quad (9)$$

где  $I$  - ток в неподвижной катушке;

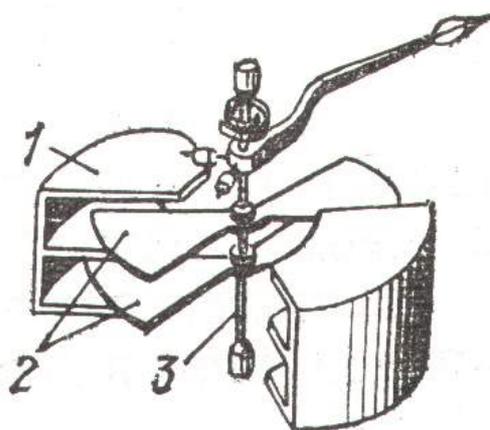
$I_u$  - ток в подвижной катушке;

$R_u$  - сопротивление подвижной катушки.

К недостаткам приборов данной системы относятся большая чувствительность к перегрузкам, значительное собственное потребление энергии, влияние внешних магнитных полей на показания прибора.

### ***Приборы электростатической системы.***

Принцип действия приборов данной системы основан на взаимодействии системы неподвижных пластин конденсатора с подвижными пластинами конденсатора (рис.4).



1 – неподвижные пластины, 2 – подвижные пластины, 3 – ось прибора.

Рис. 4.

Угол поворота пропорционален квадрату напряжения. Вследствие этого шкала данных приборов неравномерная. К недостаткам приборов данной системы относится их малая чувствительность. Достоинствами данной системы являются высокое входное сопротивление и малая потребляемая мощность.

### ***Условные обозначения на шкале прибора***

По роду измеряемой величины приборы можно разделить на:

**A** - приборы для измерения тока;

**V** - приборы для измерения напряжения;

**Ω** - приборы для измерения сопротивления;

**H** - приборы для измерения частоты;

**W** - приборы для измерения мощности;

и т.д.

Электроизмерительные приборы различаются по роду измеряемого тока:

- - постоянный ток;
- ~ - переменный ток;
- ≈ - двухфазный ток.

Для каждого прибора определяются определенные эксплуатационные условия.

Существует четыре группы защиты приборов от влияния внешних магнитных и электрических полей. Каждая группа I, II, III, IV определяет величину дополнительной погрешности от влияния внешних полей.

Существуют пять групп А, В, В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, и В<sub>3</sub> которые определяют интервал рабочих температур и влажности.

Различным может быть и рабочее положение:

- - горизонтальное;
- ↑ - вертикальное;

Электрическая прочность изоляции, выраженная в киловольтах, маркируется на шкале прибора следующим образом:



- измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана при напряжении, например 2КВ.

В зависимости от принципа действия приборы делаются на системы: магнитоэлектрическую, электромагнитную, электродинамическую, тепловую, термоэлектрическую, индукционную, электростатическую и другие.

- магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой
- электромагнитный прибор;
- электродинамический прибор;
- ферродинамический прибор;
- индукционный прибор;
- электростатический прибор;
- 
- магнитоэлектрический прибор с выпрямителем;
- тепловой прибор.

### ***Основные характеристики электроизмерительных приборов.***

**1.Точность.** Точность электроизмерительных приборов не может быть однозначно установлена абсолютной или относительной погрешностью измерения. Абсолютная погрешность не определяет точность, относительная

же зависит от значения измеряемой величины, т.е. различна для различных участков шкалы прибора.

Для характеристики точности прибора используется приведенная погрешность. Приведенная погрешность определяется отношением абсолютной погрешности прибора  $\Delta x$  к максимальному значению измеряемой величины  $x_{np}$ , которую можно измерить при отклонении стрелки на всю шкалу.

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_{np}} \quad (10)$$

Часто приведенную погрешность выражают в процентах. Для этого соотношение (10) нужно умножить на 100 %.

Величина приведенной погрешности, выраженная в процентах, называется **классом точности** прибора. Электроизмерительные приборов согласно ГОСТ 23217-78 могут иметь следующие классы точности: 0,05; 0,1; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0. Класс точности прибора обязательно указывается на шкале прибора.

Таким образом, точность электроизмерительного прибора определяется его классом точности, т.е. величиной приведенной погрешности измерения данной физической величины.

**2. Предел измерения.** Пределом измерения электроизмерительного прибора называется максимальное значение измеряемой физической величины, которое вызывает отклонение указателя шкалы прибора на всю шкалу.

**3. Быстродействие.** Быстродействие определяется временем, необходимым для измерения данной физической величины. Чаще всего это время определяется временем успокоения измерительного механизма.

**4. Чувствительность.** Чувствительность - это способность прибора реагировать на изменение измеряемой величины, т.е. величина, которая показывает на сколько делений  $\Delta n$  перемещается указатель прибора при изменении значения измеряемой величины  $\Delta x$  на единицу:

$$S = \frac{\Delta n}{\Delta x} \quad (11)$$

Единицы измерения чувствительности зависят от рода измеряемой величины (дел./В, дел./А и т.д.).

**5. Надежность.** Надежность прибора - способность работать нормально в течение определенного времени при определенных эксплуатационных условиях, определяемых группой прибора.

**6. Цена деления прибора.** Цена деления прибора - это основная его характеристика, которая определяет правильность снятия численного значения измеряемой величины. Цена деления - это величина обратная чувствительности:

$$C = \frac{1}{S} = \frac{\Delta x}{\Delta n} \quad (12)$$

Цена деление численно равна значению измеряемой величины  $x$ , вызвавшей отклонение указателя прибора на одно деление шкалы (измеряется в В/дел., А/дел. и т.д.).

### *Обработка результатов измерения электрических величин.*

Для снятия показаний электроизмерительные приборы имеют шкалу. На шкале наносятся деления, которые не всегда соответствуют значению измеряемой величины. Это связано с тем, что часто измеряемые значения имеют малый порядок или прибор имеет несколько пределов измерения.

Перед началом работы необходимо определить цену деления прибора на каждом пределе измерения.

$$C = \frac{x_{np}}{N} \quad (13)$$

где  $x_{np}$  -предел измерения данной величины;

$N$  - полное число делений шкалы.

Для определения значения измеряемой величины необходимо цену деления прибора на данном пределе измерения умножить на число делений, которое показывает стрелка.

$$x_{изм} = C \cdot n \quad (14)$$

$n$  - номер деления, на котором остановилась стрелка прибора.

Для определения погрешности измерения воспользуемся соотношением (9).

$$\Delta x = \frac{\gamma \cdot x_{np}}{100\%} \quad (15)$$

$\gamma$  - класс точности прибора;

$x_{np}$  - предел измерения прибора.

Относительная погрешность показывает какую часть составляет абсолютная погрешность  $\Delta x$  от измеренного значения величины  $x_{изм}$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_{ИЗМ}} 100\% \quad (16)$$

Относительная погрешность с учетом соотношений (15) и (16) равна:

$$\varepsilon = \frac{\gamma x_{ПР}}{x_{ИЗМ}} 100\% \quad (17),$$

т.е. относительная погрешность превышает класс точности прибора тем больше, чем меньше показания прибора по сравнению с его пределом.

Для более высокой точности измерения предел измерения прибора выбирают таким образом, чтобы отсчет производился во второй половине шкалы, тем более у многих приборов первая треть шкалы может быть нелинейной.

Погрешность измерения с помощью цифровых приборов рассчитывается по специальным формулам, которые приводятся в паспорте прибора.

### **ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ.**

1. Изучить содержание данного методического пособия.
2. Определить основные характеристики выданного преподавателем прибора:
  - а) род прибора (название);
  - б) на каком токе работает (постоянном или переменном);
  - в) определить систему прибора и рассказать принцип действия, достоинства и недостатки данной системы;
  - г) условия эксплуатации прибора, указав при этом:
    - нормальное рабочее положение;
    - категорию защищенности от внешних полей;
    - эксплуатационную группу прибора;
    - электрическую прочность изоляции;
  - д) пределы измерения;
  - е) цену деления прибора на каждом пределе измерения;
  - ж) класс точности прибора;
  - з) определить абсолютную погрешность измерения на каждом пределе.
3. Зарисуйте шкалу вашего прибора и, для определенного положения стрелки (указанного преподавателем), определите показание прибора и погрешность измеренного значения.
4. Результат измерения представить в виде:
 
$$x = (x_{ИЗМ} \pm \Delta x) \text{ ед. изм. ; } \varepsilon = \dots\dots\%.$$

### ***КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ***

1. Какие приборы называются аналоговыми и цифровыми?
2. Какие существуют системы аналоговых приборов?
3. Каков принцип действия основных систем аналоговых приборов?
4. Что такое класс точности прибора? Что он определяет?
5. Что такое цена деления прибора? Как определить цену деления прибора?
6. Как рассчитать погрешность измерения данного прибора?
7. Какие еще характеристики работы прибора Вы знаете?

### ***ЛИТЕРАТУРА***

[9]: §1.1, 3.1-3.4; [6]: §24, 61.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Ф3-1**

### **ГРАДУИРОВКА ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ.**

#### **Цель работы:**

1. Произвести градуировку шкалы вольтметра, рассчитать добавочные сопротивления для различных пределов измерения. Построить градуировочную кривую.

2. Произвести градуировку амперметра, рассчитать сопротивления шунтов для различных пределов измерения, построить градуировочную кривую.

#### **Приборы и оборудование:**

1. Универсальный лабораторный стенд со стабилизированным источником питания.
2. Сменная плата.
3. Вольтметр.

### **КРАТКАЯ ТЕОРИЯ**

Основными величинами, характеризующими состояние электрической цепи, являются ток и напряжение. Эти величины связаны между собой законом Ома.

$$I = \frac{U}{R} \quad (1)$$

где  $I$  - сила тока на участке,

$U$  - напряжение на концах участка,

$R$  - сопротивление цепи.

Измерение величин, входящих в закон Ома можно произвести соответствующими приборами: для измерения силы тока применяются амперметры, напряжения - вольтметры, сопротивления - омметры.

#### **1. Измерение постоянного тока.**

Измерение постоянного тока производится амперметром, который включается в электрическую цепь последовательно (рис.1)

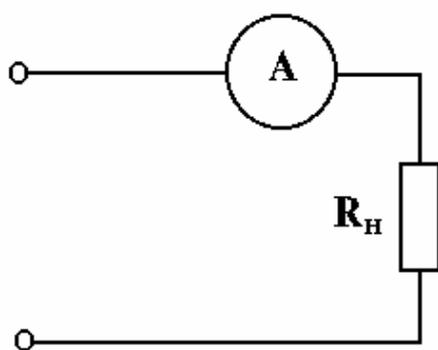


Рис.1

Так как амперметр имеет внутреннее сопротивление  $R_{вн}$ , то включение прибора вызывает уменьшение тока в цепи, а, следовательно, вносит погрешность в значение тока, протекающего через нагрузку  $R_n$ . Как правило, при включении прибора в цепь выполняется условие  $R_{вн} \ll R_n$ .

При измерении силы тока сопротивление участка складывается из сопротивления участка цепи и сопротивления измерительного прибора:

$$R = R_{вн} + R_n \quad (2),$$

где  $R_{вн}$  - внутреннее сопротивление прибора,

$R_n$  - сопротивление нагрузки.

Следовательно, амперметр измеряет силу тока, протекающего через суммарное сопротивление.

$$I_{изм} = \frac{U}{R_{вн} + R_n} \quad (3)$$

С учетом сопротивления прибора сила тока в цепи изменится на величину:

$$\Delta I = \frac{U}{R_n} - \frac{U}{R_{вн} + R_n} \quad (4)$$

Или:

$$\Delta I = I - I_{изм},$$

где  $I_{изм}$  - значение тока, которое показывает амперметр.

$I$  - истинное значение тока протекающего в цепи (без учета внутреннего сопротивления амперметра).

Тогда величина относительной погрешности определяется из следующего соотношения:

$$\varepsilon_I = \frac{\Delta I}{I} = \frac{R_{вн}}{R_{н} + R_{вн}} \cdot 100\% \quad (5)$$

Чтобы расширить пределы измерения амперметра применяются масштабные преобразователи, называемые шунтами. Шунт представляет собой сопротивление, которое включается параллельно сопротивлению измерительного механизма (рис.2).

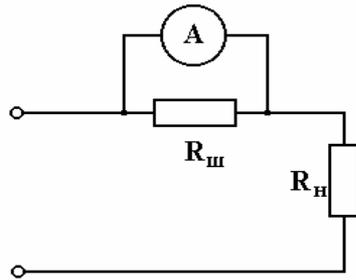


Рис.2.

Ток, протекающий в такой цепи, разветвляется, и суммарный ток  $I$  можно определить как сумму токов, протекающих через прибор  $I_{вн}$  и через шунт  $I_{ш}$ , этот же ток и определяет новый предел измерения. Значение тока в цепи не может превышать предела измерения прибора, поэтому сопротивление шунта рассчитывается исходя из предела измерения  $I_{пр}$ .

$$I = I_{пр} = I_{вн} + I_{ш} \quad (6)$$

Отсюда:

$$I_{ш} = I_{пр} - I_{вн} \quad (7)$$

Падение напряжения на шунте будет таким же как и на внутреннем сопротивлении прибора:

$$U_{ш} = U_{вн} = I_{ш} R_{ш} = I_{пр} R_{пр} + I_{вн} R_{вн} \quad (8)$$

Из соотношений (6) и (7) можно рассчитать сопротивление шунта:

$$R_{ш} = \frac{U_{вн}}{I_{ш}} = \frac{I_{вн} \cdot R_{вн}}{I_{пр} + I_{вн}} = \frac{R_{вн}}{n - 1} \quad (9),$$

где  $n = I_{np}/I_{вн}$  - называется коэффициентом шунтирования,  $I_{вн}$  - ток, протекающий через прибор,  $I = I_{np}$  - предел измерения прибора. Наличие нескольких шунтов позволяет работать на нескольких пределах измерения, что особенно важно при значительном диапазоне измеряемых токов в одной и той же цепи. Чем больше предел измерения, тем меньше сопротивление шунта.

## 2. Измерение постоянного напряжения.

Измерение постоянного напряжения производится с помощью вольтметра, который включается в электрическую цепь параллельно участку, где измеряется напряжение (рис.3).

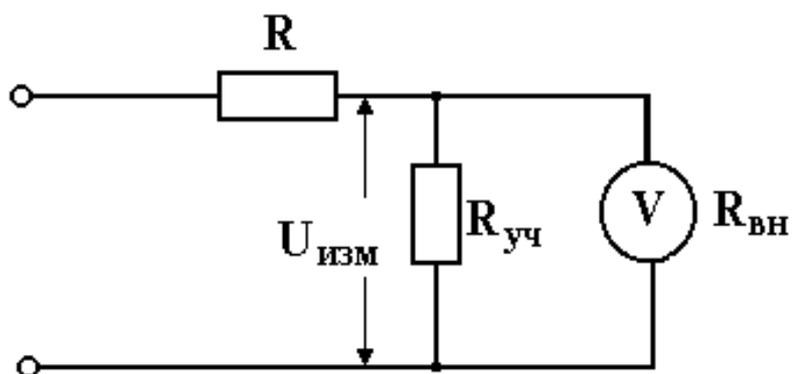


Рис.3

Сопротивление прибора должно быть много больше сопротивления участка цепи  $R_{вн} \gg R_{уч}$ . Включение вольтметра вносит дополнительную погрешность в измеряемое напряжение, так как сопротивление участка цепи уменьшается.

$$\frac{1}{R_{уч}} = \frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_{вн}} \quad (9)$$

Тогда напряжение на концах участка

$$U_{уч} = IR_{уч} = \frac{R_n R_{вн}}{R_n + R_{вн}} I \quad (10)$$

Абсолютная погрешность измерения напряжения определяется разностью напряжения на участке цепи и на зажимах нагрузки:

$$\Delta U = U_{уч} - U = \frac{IR_H R_{вн}}{R_{вн} + R_H} - IR_H = \frac{I_{вн} R_H^2}{R_H + R_{вн}} \quad (11)$$

$U$ - напряжение на концах нагрузки.

Для расширения пределов измерения вольтметра последовательно сопротивлению измерительного механизма включается добавочное сопротивление (рис.4).

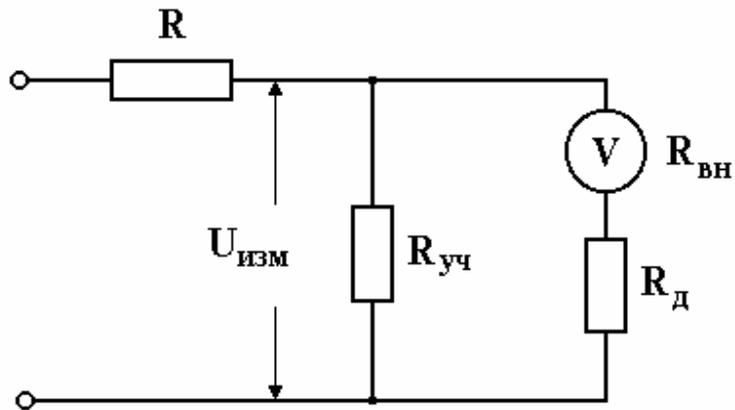


Рис.4

Напряжение на участке цепи, содержащем прибор, будет складываться из падения напряжения на внутреннем сопротивлении прибора и на добавочном сопротивлении. Ток через эти сопротивления протекает один и тот же. Из этих условий можно получить выражение для определения добавочного сопротивления.

$$U_{изм} = U_{вн} + U_{доб} = U_{пр} + I_{вн} R_{доб} \quad (11)$$

Из отношения напряжений получим:

$$\frac{U_{доб}}{U_{вн}} = \frac{I_{вн} R_{доб}}{I_{вн} R_{вн}} = \frac{R_{доб}}{R_{вн}} ;$$

$$R_{доб} = \frac{U_{доб} R_{вн}}{U_{вн}} = \frac{U_{пр} - U_{вн}}{U_{вн}} R_{вн} = (m - 1) R_{вн} \quad (12)$$

Включение добавочного резистора изменяет предел измерения в  $m$  раз:  $U = m U_{пр}$ , где  $U_{пр}$ - предел измерения прибора.

Из соотношения (12) следует, что чем больше предел измерения, тем больше должно быть добавочное сопротивление.

Для построения амперметров и вольтметров постоянного тока используется магнитоэлектрическая система измерительного механизма. Разница в выполняемых функциях (амперметр или вольтметр) зависит от способа включения в цепь и градуировки прибора.

Градуировкой называется установление соответствия между входной величиной и числом деления, на которое отклоняется стрелка прибора. Градуировка производится при условии включения прибора в цепь со стабилизированным источником питания и возможности равномерного увеличения значения входной величины. Зависимость числа делений от значений входной величины называется градуировочной кривой.

Основное назначение градуировочной кривой- это определение цены деления прибора. Цена деления прибора пропорциональна тангенсу угла наклона кривой к оси абсцисс. Вид градуировочной кривой определяет равномерность шкалы прибора. Если шкала имеет нелинейный участок, то измерения проводятся на линейном участке зависимости. Как правило, нелинейность наблюдается на начальном участке шкалы.

### ***МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА***

Для выполнения лабораторной работы используется универсальный лабораторный стенд, который состоит из стабилизированного источника постоянного напряжения "+15 В" и "+5 В" и сменной платы. Сменная плата содержит электроизмерительный прибор, подстроечный резистор  $R_{\text{п}}$ , эталонный резистор  $R_{\text{э}}$ , потенциометр  $R_0$ , постоянный резистор  $R$ . Номинальные значения резисторов указаны на плате. Для подключения шунтов и добавочных резисторов используются клеммы  $K1$  и  $K2$ . Измерительный прибор можно отградуировать и как амперметр, и как вольтметр.

### ***ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ***

***Задание 1.*** Градуировка шкалы вольтметра.

1. На сменной плате собрать схему (рис.6) с помощью соединительных проводов.

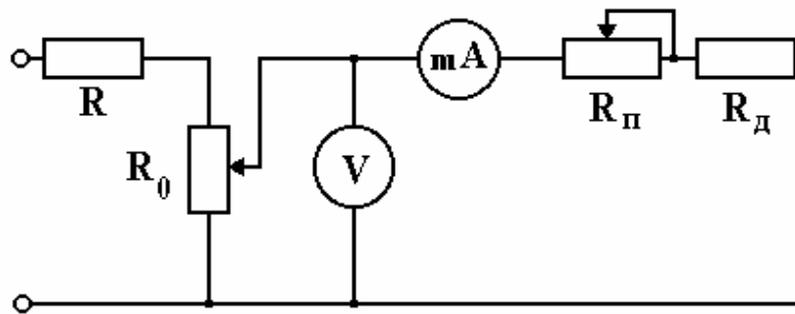


Рис.6

2. Заготовить таблицу.

Таблица 1.

$N$	дел.	
$U$	$B$	

3. Провести градуировку вольтметра. Для выполнения градуировки необходимо изменять сопротивление  $R_0$  и фиксировать значения напряжения по вольтметру при отклонении стрелки прибора на 5 делений шкалы, начиная с нулевой отметки.

4. К клеммам  $K1$  и  $K2$  подключить добавочное сопротивление, заданное преподавателем и провести градуировку прибора на новом пределе измерения аналогично п.3.

5. Определить погрешность измерения напряжения. Для этого сначала измеряют вольтметром напряжение в цепи без электроизмерительного прибора, а затем с прибором. Разность показаний приборов является погрешностью измерения.

6. Построить градуировочные кривые по данным таблицы 1.

**Задание 2.** Градуировка шкалы амперметра.

1. На сменной плате собрать схему (рис.7).

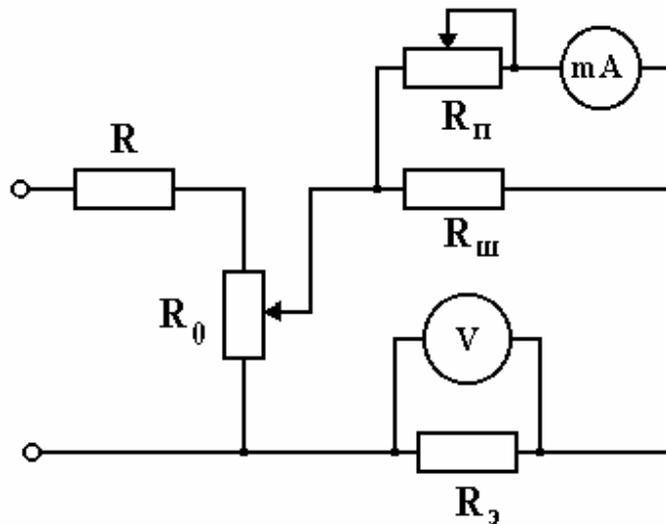


Рис.7.

2. Заготовить таблицу.

Таблица 2.

$N$	<i>дел.</i>	
$U$	$B$	
$I$	$A$	

3. Провести градуировку амперметра. Ручкой потенциометра  $R_0$  отклоняют стрелку прибора от нуля. Через каждые 5 делений фиксируют значение напряжения на эталонном сопротивлении  $R_Э$ . Затем по закону Ома рассчитать значение тока.

4. К клеммам  $K1$  и  $K2$  подключить сопротивление шунта, провести градуировку прибора на новом пределе измерения аналогично п.3.

5. Определить погрешность измерения тока аналогично п.1.3.

6. Построить градуировочные кривые по таблице 2.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Как измерить ток и напряжение в электрической цепи?
2. Как можно изменить предел измерения амперметра? Каким образом включается в измерительную цепь сопротивление шунта?

Как можно рассчитать сопротивления шунта?

3. Как изменить предел измерения вольтметра? Как включается дополнительное сопротивление в измерительную цепь? Как рассчитать дополнительное сопротивление?

4. Вывести формулу для расчета дополнительной погрешности при включении в цепь амперметра и вольтметра?

5. Что такое градуировочная кривая?

6. Как определить цену деления прибора и предел измерения прибора по градуировочной кривой?

### ***ЛИТЕРАТУРА***

[3]: §35; [9]: §3.3-3.4; [6]: §61.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Ф 3-2**

### **ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОГО ОСЦИЛЛОГРАФА И ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ МЕТОДОМ ФИГУР ЛИССАЖУ**

#### **Цель работы:**

1. Ознакомиться с устройством осциллографа.
2. Измерить амплитуду напряжения, частоту и длительность исследуемого сигнала.
3. Провести калибровку тракта горизонтального отклонения.
4. Измерить частоту электрических колебаний методом фигур Лиссажу.

#### **Оборудование:**

Электроннолучевой осциллограф С1-72, звуковой генератор ГЗ-55, источник переменного тока с частотой 50 Гц.

#### **НАЗНАЧЕНИЕ И БЛОК-СХЕМА ОСЦИЛЛОГРАФА**

Работа в современной физической лаборатории, настройка и ремонт современной электронной аппаратуры невозможны без использования измерительных приборов, одним из которых является электронно-лучевой осциллограф (ЭЛО). Он позволяет непосредственно на экране электроннолучевой трубки наблюдать форму исследуемого электрического сигнала, его изменение во времени, а также произвести его качественную и количественную оценку. Например, с помощью осциллографа можно измерить силу тока, напряжение, частоту, сравнивать фазы различных переменных напряжений. Кроме того, осциллограф при применении преобразователей позволяет исследовать неэлектрические процессы, например, измерять малые промежутки времени, перемещения, вибрации и т.д.

Достоинствами ЭЛО является его высокая чувствительность и малая инерционность, что позволяет исследовать процессы, длительность которых порядка  $10^{-6}$ - $10^{-8}$  с.

Функциональная схема осциллографа показана на рис.1. важнейшими функциональными частями этого прибора являются: 1- электроннолучевая

трубка, 2,3 - усилители сигнала, 4 - генератор развертки, 5 - блок синхронизации, 6 - блок питания.

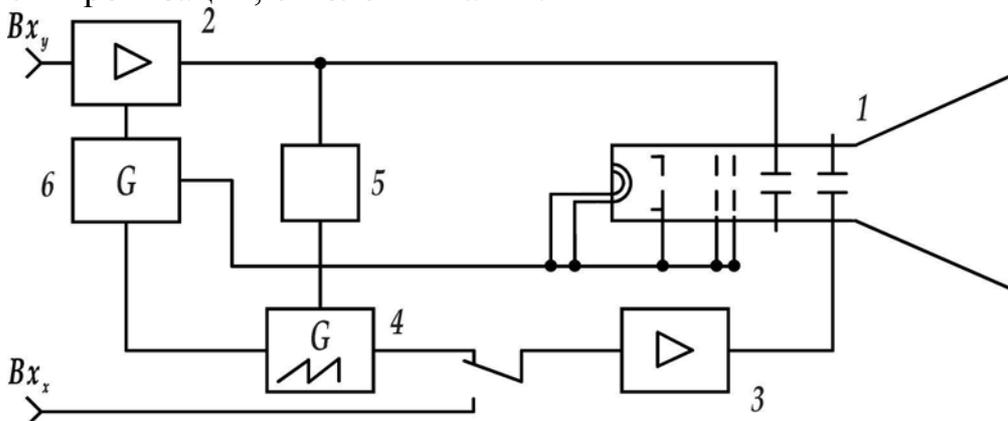


Рис.1.

Электроннолучевая трубка (ЭЛО) - представляет собой стеклянную, колбу, внутри которой создан высокий вакуум (рис. 2). Внутри трубки расположены: 1 - подогреватель катода, 2 - катод (источник электронов), 3 - модулятор, управляющий яркостью изображения, 4 - фокусирующий электрод (первый анод), 5 - второй анод, 6 - горизонтально отклоняющие пластины, 7 - вертикально отклоняющие пластины, 8 - ускоритель (третий анод, представляющий собой проводящий слой на боковой поверхности колбы), 9 - флюоресцирующий экран.

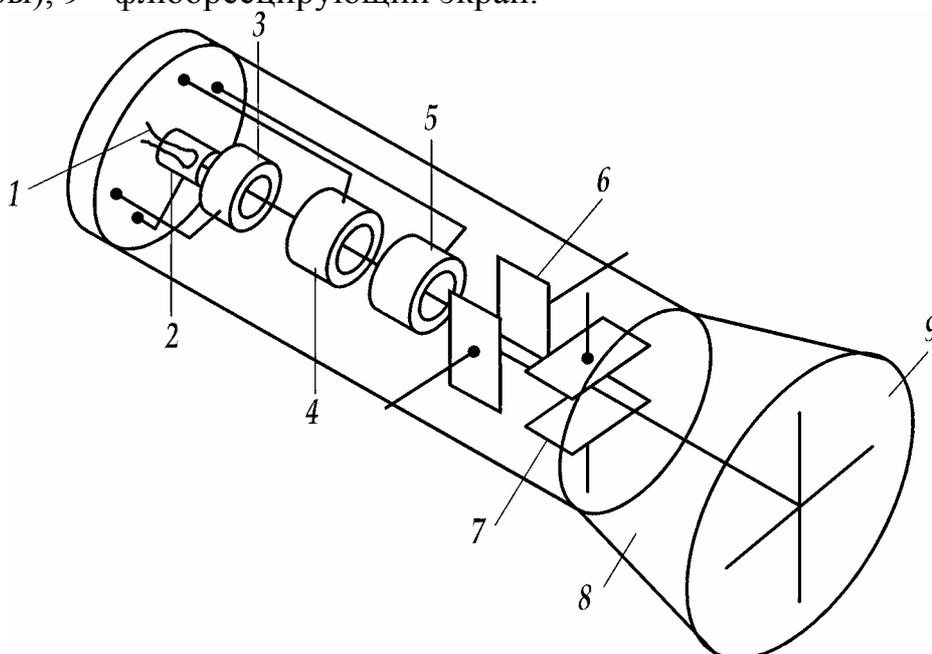


Рис.2.

Источником электронов является разогретый катод. Интенсивность электронного луча регулируется путем изменения отрицательного смещения модулятора. Модулятор М и система анодов А1, А2 образуют фокусирующе-ускоряющую систему. Сформированный электронный луч проходит между

отклоняющими пластинами и образует светящееся пятно на флюоресцирующем экране. Электрическое поле, созданное между отклоняющими пластинами, отклоняет траекторию электронов и вызывает смещение светящегося пятна на экране.

Перемещение луча в пределах экрана осуществляется ручками “ВЕРТИКАЛЬНО ” и “ГОРИЗОНТАЛЬНО ”, расположенными на панели управления. Ручки “ФОКУС ” и “ЯРКОСТЬ ” служат для фокусировки и управления яркостью луча.

### ***Получение изображения на экране ЭЛО***

Исследуемое напряжение  $U_x$  подается через усилитель 2 (рис. 1) на вертикально отклоняющие пластины. Это напряжение вызывает отклонение луча от своего первоначального направления вверх или вниз, причем отклонение луча пропорционально исследуемому напряжению. Для наблюдения зависимости исследуемого напряжения от времени необходимо “развернуть” процесс вдоль горизонтальной оси так, чтобы отклонение луча было пропорционально времени. Для перемещения луча в горизонтальном направлении по оси  $X$  на горизонтальные отклоняющие пластины подается напряжение  $U_0$ , полученное в генераторе пилообразного развертывающего напряжения 4. Это напряжение должно изменяться равномерно (линейно) во времени (прямой ход) и в конце периода развертки  $T$  быстро спадать до начального уровня (обратный ход) - рис. 3. Поэтому горизонтальное отклонение луча будет пропорционально времени (на отрезке прямого хода). Размах (амплитуда) напряжения развертки должен обеспечивать отклонение луча в пределах рабочей части (сетки) экрана ЭЛТ. Электронный луч под действием напряжения  $U_y$  исследуемого сигнала и напряжения развертки  $U_0$  участвует одновременно в двух движениях по оси  $X$  и оси  $Y$ , поэтому на экране электроннолучевой трубки будет наблюдаться график зависимости переменного сигнала от времени. Зная время, за которое луч проходит весь экран, либо определенный отрезок длины (1 см или 1 деление), можно определить длительность исследуемого процесса

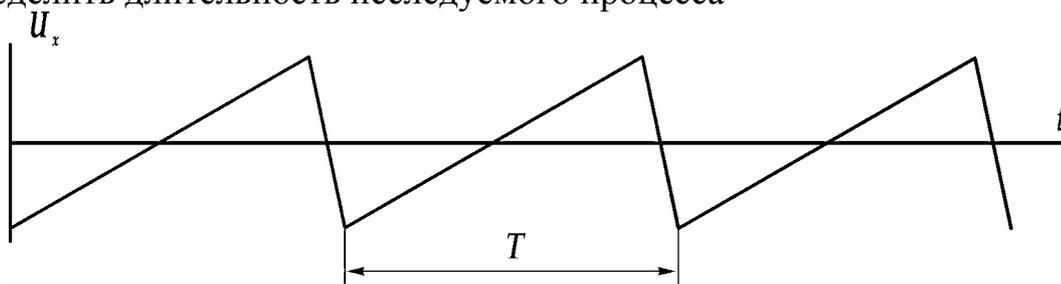


Рис. 3. Эпюра напряжения развертки.

Если за время  $t_0$  луч прошел по горизонтали расстояние  $x_0$  (дел), то цена деления (длительность развертки  $k_T$ ) определяют как

$$k_T = \frac{t_0}{x_0} \text{ (с/дел)}. \quad (1)$$

Длительность сигнала определяется по формуле

$$t = k_T x \quad (2)$$

где  $x$  - отклонение, соответствующее измеряемому времени.

Современные осциллографы имеют калибровочные развертки, позволяющие измерять длительность сигналов непосредственно по шкале, нанесенной на экран трубки. Длительность развертки обычно определяется в микро-, милли- или наносекундах на сантиметр или деление шкалы. В осциллографе С1-72 длительность развертки устанавливают ступенчатым переключателем "ВРЕМЯ/ДЕЛ" в пределах от 0,05 мкс/дел до 50 мс/дел. При отсутствии калиброванной развертки, необходимо провести калибровку, используя сигнал длительности  $t_0$  и измерив соответствующее отклонение  $x_0$ , затем формуле (1) определить постоянную времени.

### ***Измерение амплитуды исследуемых сигналов***

Исследуемый сигнал, поступающий на выход  $y$  осциллографа, подается на выход усилителя вертикального отклонения (УВО), а с выхода УВО усиленный сигнал поступает на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ.

Пусть под действием напряжения  $U_y$ , падающего на выход  $y$ , след электронного луча смещается на величину  $y$  в вертикальном направлении. Величина

$$S_y = \frac{y}{U_y} \text{ (дел/В)} \quad (3)$$

называется чувствительностью входа  $Y$  к напряжению. Она равна отклонению электронного луча на экране (в делениях шкалы) при разности потенциалов на входе равной одному вольту и зависит от коэффициента усиления УВО, а также конструкции ЭЛТ.

Для измерения величины напряжения, поданного на вход осциллографа, пользуются величиной обратной чувствительности, т.е.

$$k_y = \frac{1}{S_y} = \frac{U_y}{y} \quad (4),$$

которая называется *коэффициентом отклонения* луча по вертикали.

Коэффициент  $k_y$  отклонения луча по вертикали показывает, какое напряжение  $U_y$  на входе у осциллографа соответствует смещению луча на экране ЭЛТ на 1 деление шкалы (цена деления).

В осциллографе С1-72 величину  $k_y$  можно изменять от 20 мВ/дел до 10 В/дел при помощи ступенчатого переключателя “УСИЛИТЕЛЬ У”. В некоторых типах осциллографов величина  $k_y$  должна быть определена по известному (калиброванному) напряжению и соответствующему отклонению луча по формуле (4).

### ***Устройство синхронизации***

Для наблюдения на экране ЭЛО устойчивого изображения исследуемого сигнала необходимо, чтобы начало развертки было согласовано со строго определенной фазой исследуемого напряжения (внутренняя синхронизация), либо внешнего синхронизирующего сигнала (внешняя синхронизация). Устойчивой и четкой синхронизации добиваются ручками “УРОВЕНЬ” и “СТАБИЛЬНОСТЬ”. Для внутренней синхронизации исследуемым сигналом должна быть нажата кнопка “ВНУТРЕННЯЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ”. При нажатой кнопке “ВХОД X” генератор развертки отключается, отключение луча по оси X осуществляется от внешнего источника. Такой режим работы используется, когда нужно получить зависимость исследуемого сигнала  $U_y$  от другого напряжения  $U_x$ . Например, для получения вольтамперной характеристики, т.е. зависимости силы тока  $I$  от напряжения  $U$  на каналы  $x$  и  $y$  осциллографа необходимо подать напряжение  $U_x \approx U$  и  $U_y \approx I$ .

### ***Определение частоты электрических гармонических***

#### ***колебаний методом фигур Лиссажу***

Для определения частоты гармонических колебаний широко используется метод фигур Лиссажу. Если складываются гармонические колебания различных частот, которые происходят в двух перпендикулярных направлениях, то получается колебание сложной формы. Сложение таких колебаний можно наблюдать с помощью электрического осциллографа. В результате этого электронный луч совершает результирующее движение по сложной траектории, называемой фигурой Лиссажу, по общему виду которой можно определить частоту исследуемого гармонического колебания. Как правило, частота одного колебания известна (колебание с частотой электрической сети 50 Гц.), а частота другого колебания неизвестна.

Рассмотрим два перпендикулярных колебания, которые направлены по осям  $x$  и  $y$  с частотами  $\nu_x = \nu$  и  $\nu_y = n\nu_x = n\nu$  и с разностью фаз  $\phi$  между колебаниями. Уравнения складываемых колебаний имеет вид

$$\left. \begin{aligned} x &= x_o \cdot \sin 2\pi \cdot v \cdot t \\ y &= y_o \sin(2\pi \cdot v \cdot n \cdot t + \varphi) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где  $x_o$  и  $y_o$  - амплитуды колебаний.

Уравнение траектории движения точки, участвующей в этих колебаниях, можно получить, исключая время  $t$  из уравнения (5).

$$\left. \begin{aligned} x / x_o &= \sin 2\pi \cdot n \cdot t \\ y / y_o &= \sin n(2\pi \cdot v \cdot n \cdot t + \varphi / n) \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Решая совместно уравнения (6), получим уравнение траектории:

$$\frac{y}{y_o} + i \cdot \sin n \left( 2\pi \cdot v \cdot t + \frac{\varphi}{n} \right) = \left[ \left( \frac{x}{x_o} \cos \frac{\varphi}{n} - \sqrt{1 - \left( \frac{x}{x_o} \right)^2} \sin \frac{\varphi}{n} \right) + i + \left( \sqrt{1 - \left( \frac{x}{x_o} \right)^2} \cos \frac{\varphi}{n} + \frac{x}{x_o} \sin \frac{\varphi}{n} \right) \right]^n \quad (7)$$

Из (7) видно, что траектория частицы - фигура Лиссажу - имеет сложную форму, т.е. вид фигуры Лиссажу зависит от разности начальных фаз  $\varphi$  и отношения частот  $n = v_y / v_x$  складываемых колебаний.

Кривые Лиссажу для некоторых  $\varphi$  и  $n$  показаны на рис. 4.

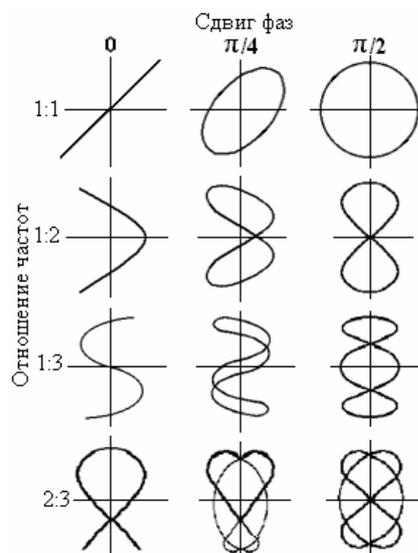


Рис. 4.

Рассмотрим первый частный случай - сложение колебаний с одинаковыми частотами, т.е.  $\nu_y = \nu_x = \nu$ ,  $n = 1$ .

Из формулы (6) получим

$$\cos 2\pi \cdot \nu \cdot t = \sqrt{1 - \left(\frac{x}{x_0}\right)^2} \quad (8),$$

$$y/y_0 = \sin 2\pi \nu t \cdot \cos \varphi + \cos 2\pi \nu t \cdot \sin \varphi. \quad (9)$$

Решая совместно (9) с (8) и (6), получим уравнение траектории:

$$(x/x_0)^2 + (y/y_0)^2 - 2(x/x_0)(y/y_0)\cos \varphi = \sin^2 \varphi. \quad (10)$$

Это уравнение является в общем случае уравнением эллипса.

Рассмотрим частные случаи полученного уравнения

1. Пусть колебания происходят в одинаковых фазах, т.е.  $\varphi = 0$ . В этом случае уравнение (10) принимает вид:

$$(x/x_0 - y/y_0)^2 = 0 \text{ или } y = y_0 \cdot x/x_0, \quad (11)$$

т.е. эллипс вырождается в прямую.

Если разность фаз равна  $\varphi = \pi$ , то эллипс вырождается в прямую (см. рис. 4).

2. Пусть разность фаз между колебаниями равна  $\pi / 2$ . Тогда уравнение (10) будет иметь вид

$$x^2/x_0^2 + y^2/y_0^2 = 1. \quad (12)$$

Полученная кривая является эллипсом, оси которого совпадают с осями координат.

Если амплитуды колебаний одинаковы  $x_0 = y_0 = R$ , то эллипс превращается в окружность

$$x^2 + y^2 = R^2$$

3. Если разность фаз колебаний  $\varphi$  имеет другое значение, то наблюдается эллипс, имеющий наклон к осям координат.

Рассмотрим теперь случай, когда частоты колебаний  $\nu_x$  и  $\nu_y$  не равны, т.е.  $n \neq 1$ . В этом случае по общему виду уравнения результирующего колебания, полученного по формуле (7), трудно судить о форме траектории.

Пусть показатель степени  $n$  в уравнении (7) есть число рациональное, т.е. может быть представлено в виде отношения двух целых чисел  $n_x$  и  $n_y$ :

$$n = \frac{n_x}{n_y} \quad (13)$$

Тогда из системы уравнений (5) следует, что

$$n = \frac{\nu_y}{\nu_x} = \frac{T_x}{T_y} = \frac{n_x}{n_y} \quad (14),$$

где  $\nu_x$  и  $T_x$  - частота и период колебаний в направлении оси  $x$ ,  
 $\nu_y$  и  $T_y$  - частота и период колебаний в направлении оси  $y$ .

Перепишем последнее соотношение в виде

$$n_y T_x = n_x T_y = t_1.$$

Отсюда следует, что за промежуток времени  $t_1$  точка совершает  $n_x$  полных колебаний в направлении оси  $y$  и  $n_y$  полных колебаний в направлении оси  $x$ . Следовательно, после истечения времени  $t_1$  точка будет находиться в той же фазе, что и в начальный момент, т.е. за следующий промежуток времени  $t_2 = t_1$ , колебания в точности повторятся. В результате колебания будут накладываться сами на себя и дадут устойчивую картину (фигуры Лиссажу, рис.4.). Если же одно из чисел  $n_x$  или  $n_y$  иррациональное, т.е. нельзя представить в виде целых чисел, то это приведет к добавочной разности фаз. В результате картина результирующего колебания будет непрерывно изменяться.

### **МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА**

В данной работе по виду фигуры Лиссажу определяется частота неизвестного электрического колебания, если известна частота другого электрического колебания. Сравнение частот проводится осциллографическим методом, когда на горизонтально отклоняющие пластины подается напряжение с известной частотой  $\nu_x = 50$  Гц, а на вертикально отклоняющие пластины напряжение с неизвестной частотой  $\nu_y$  от звукового генератора.

Из соотношения (14)

$$\nu_y / \nu_x = n_x / n_y,$$

тогда

$$\nu_y = \nu_x (n_x / n_y),$$

где  $n_x / n_y$  - отношение частот колебаний, подаваемых на выход  $x$  и  $y$  осциллографа. Выведите правило нахождения отношения частот по фигурам Лиссажу.

Учитывая (14) уравнение (7) можно переписать в виде

$$\left[ \left( \frac{y}{y_0} + i \cdot \sin n \left( 2\pi \cdot \nu \cdot t + \frac{\varphi}{n} \right) \right)^{n_y} = \left[ \left( \frac{x}{x_0} \cos \frac{\varphi}{n} - \sqrt{1 - \left( \frac{x}{x_0} \right)^2} \sin \frac{\varphi}{n} + i \cdot \left( \sqrt{1 - \left( \frac{x}{x_0} \right)^2} \cos \frac{\varphi}{n} + \frac{x}{x_0} \sin \frac{\varphi}{n} \right) \right]^{n_x}$$

Положим  $x = 0$ . Тогда, возведя правую и левую части по биному Ньютона и приравнявая действительные части, получим уравнение  $n_y$ -степени относительно  $y$ , имеющие  $n_y$  корней. Графически это означает, что прямая  $x = 0$  (ось  $y$ ) пересечет фигуру Лиссажу  $n_y$  раз; кроме того, любая прямая, параллельная оси  $y$ , пересекает фигуру Лиссажу  $n_y$  раз.

Аналогично можно показать, что любая прямая, параллельная оси  $x$ , пересечет фигуру Лиссажу  $n_x$  раз.

Отсюда возникает правило определения частоты исследуемого гармонического колебания. Проводят две взаимоперпендикулярные прямые АВ и СД, параллельные осям  $x$  и  $y$ , как показано на рис. 5, и подсчитывают число точек пересечения  $n_x$  прямой АВ и точек пересечения  $n_y$  прямой СД с фигурой Лиссажу

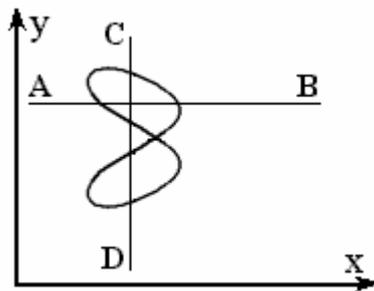


Рис. 5.

Например, на рис. 5  $n_x = 2$ ,  $n_y = 4$ , следовательно

$$n = \nu_y / \nu_x = n_x / n_y = 2/4 \quad \text{и тогда} \quad \nu_y / \nu_x = 1/2,$$

т.е. по формуле (15)  $\nu_y = \nu_x / 2$ .

Прямые желательно не проводить через точку пересечения ветвей кривой, так как в этом случае точку пересечения необходимо учитывать дважды (кратные корни).

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На вход  $x$  осциллографа подается переменное синусоидальное напряжение 6 В от понижающего трансформатора  $T$  частотой 50 Гц, а на вход  $y$  - переменное синусоидальное напряжение от звукового генератора типа ГЗ-53. В звуковом генераторе используется диапазон, позволяющий получить колебания с частотой от 0 до 200 Гц (рис.6).

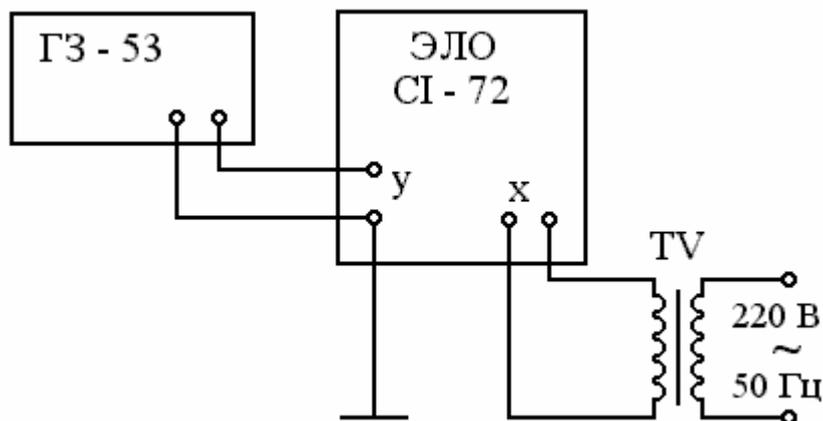


Рис.6

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

### *Подготовка прибора к измерению.*

Перед включением прибора в сеть предварительно установите органы управления в следующие положения:

- ручки “ВВЕРХ”, “ВНИЗ”, “ВЛЕВО”, “ВПРАВО”, “УРОВЕНЬ” - в среднее положение;
- “СТАБИЛЬНОСТЬ” - в крайнее положение;
- переключатель “ВОЛЬТ/ДЕЛ” в положение 10 В/дел;
- переключатель синхронизации в положение “□”;
- переключатель “ВХОД X” - в выключенном положении.

Шнур переключения прибора соедините с источником напряжения, нажатия кнопки переключателя “СЕТЬ” включите прибор. При этом должна загореться сигнальная лампочка.

Через 2-3 минуты после включения прибора следует отрегулировать яркость и фокусировку линии развертки с помощью ручек.

Если при максимальной яркости на экране не будет луча, необходимости при помощи ручек переместить него в пределы рабочей части экрана.

**Задание 1. Измерение длительности и частоты исследуемого сигнала.**

1.1. Соединить выход генератора с входом у осциллографа. Подобрать чувствительность вертикального канала, чтобы исследуемый сигнал укладывался в пределах сетки экрана. Подобрать скорость развертки так, чтобы в сетке экрана укладывалось 1-4 периода колебаний.

1.2. При помощи ручек “УРОВЕНЬ” и “СТАБИЛЬНОСТЬ” получить на экране ЭЛО устойчивое изображение исследуемого сигнала.

1.3. Измерить  $N$  - число целых периодов колебаний, укладывающихся на длине сетки экрана. Зарисовать в отчете осциллограмму исследуемого сигнала.

1.4. Измерить длительность в делениях шкалы  $= x$  (дел). Зафиксировать длительность развертки  $k_t$  (ручка “ВРЕМЯ/ДЕЛ”).

Таблица 1.

$N_2$	$N$	$k_t$	$x$	$T$	$\nu$	$\nu_2$
$n/n$	дел.	с/дел	дел	с	Гц	Гц

1.5. Вычислить период колебаний  $T = i/N = (k_t x)/N$  и частоту колебаний  $\nu = 1/T$ . Сравнить полученную частоту с показаниями шкалы генератора  $\nu_1$ . Результаты занести в таблицу 1.

1.6. Выполнит п.п. 2-5 для другой частоты генератора.

**Задание 2. Измерение амплитуды исследуемого сигнала.**

2.1. Получить на экране устойчивое изображение сигнала.

2.2. Заготовить табл. 2 для занесения результатов опыта.

Таблица 2.

$N_2$	$k_v$	$y$	$U_0$	$U_{эфф}$	$U_r$
$n/n$	В/дел	дел	В	В	В

2.3. Измерить размах колебаний луча  $y$  по вертикали, соответствующий удвоенной амплитуде колебаний. Вычислить соответствующее напряжение

$\Delta U = k_y y$  и амплитуду сигнала  $U_o = \Delta U/2 = (k_y y)/2$ . Коэффициент отклонения  $k_y$  определить по шкале “ВОЛЬТ/ДЕЛ”.

2.4. Вычислить эффективное значение напряжения

$$U_{эфф} = U_o / \sqrt{2}.$$

Сравнить полученные результаты с показаниями вольтметра  $U_r$  генератора.

2.5. Выполнить п.п. 2.1 - 2.4 для другого значения напряжения.

**Задание 3. Калибровка горизонтального канала осциллографа.**

3.1. Нажать кнопку “ВХОД X”. Подать на клемму “ВХОД СИНХ.” известное (эталонное) напряжение амплитудой  $U_o$ .

3.2. Измерить горизонтальное отклонение луча  $x$ , которое соответствует размаху колебаний  $2U_o$ .

3.3. Вычислить коэффициент отклонения луча по горизонтали

$$k_x = 2U_o/x$$

3.4. Результаты занести в таблицу 3.

Таблица 3.

№ n/n	$U_o$ В	$x$ , дел	$k_x$ В/дел

3.5. Выполнить п.п. 3.1-3.4 для другого значения  $U_o$ .

**Задание 4. Определение частоты электрических колебаний методом фигур Лиссажу.**

4.1. Соберите схему в соответствии с рис. 6.

4.2. Заготовьте таблицу результатов измерений.

Таблица 4.

№	$\nu_x = 50 \text{ Гц}$			Вид фигуры					$\nu_2$	$\varepsilon_\nu$
	$n_y$	$n_x$	$\nu_y$	$180^\circ$	$135^\circ$	$90^\circ$	$45^\circ$	$0^\circ$		

4.3. Включите осциллограф тумблером “СЕТЬ”, дайте ему прогреться 15 мин. Включите генератор развертки осциллографа.

4.4. Включите звуковой генератор тумблером “СЕТЬ”. Установите ручку регулировки напряжения на выходе звукового генератора на нуль.

4.5. Ручку “ЧАСТОТА ГРУБО” звукового генератора установите на диапазон 0-500 Гц.

4.6. Ручку “ЧАСТОТА ПЛАВНО” звукового генератора установите на деление 10-20 Гц.

4.7. Произведите фокусировку светового пятна на экране осциллографа и выведите его в центр координатной сетки.

4.8. Включите трансформатор  $T$  в сеть. На экране должна появиться горизонтальная полоска в  $1/2$  шкалы.

4.9. Увеличивая величину выходного напряжения звукового генератора и изменяя чувствительность осциллографа по выходу  $U$ , получите изображение в виде квадрата на экране осциллографа.

4.10. Увеличивая частоту выходного напряжения генератора, добейтесь получения устойчивой фигуры Лиссажу. Зарисуйте в таблицу несколько изображений в зависимости от разности фаз колебаний.

4.11. Произведите отсчет частоты  $\nu_r$  по лимбу звукового генератора и запишите в таблицу.

4.12. Проведите через фигуру Лиссажу вертикальную и горизонтальную линии и подсчитайте число точек пересечения этих прямых с фигурой Лиссажу ( $n_x$  - с горизонтальной и  $n_y$  - с вертикальной)

4.13. По формуле (15) рассчитайте частоту  $\nu_r$  исследуемых колебаний, подаваемых на выход  $U$  от звукового генератора, тогда

$$\nu_y = \nu_x (n_x / n_y),$$

где  $\nu_x = 50$  Гц.

Данные запишите в таблицу.

4.14. Повторим те же измерения для 8-10 фигур Лиссажу, увеличивая частоту колебаний генератора до 200 Гц.

4.15. Выключите установку.

### **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ**

1. Рассчитайте отклонение частоты  $\nu_y$ , полученный по методу фигур Лиссажу, от частоты  $\nu_r$ , определенной по шкале звукового генератора, т.е. найти

$$\varepsilon_\nu = \frac{|\nu_y - \nu_r|}{\nu_r} \cdot 100\%.$$

Запишите данные в таблицу.

2. Постройте график зависимости  $v_y = f(v_x)$ .

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Как работает электронно-лучевая трубка?

2. Перечислите основные блоки осциллографа. Каково их назначение? Каково назначение основных ручек управления осциллографа?

3. Как измеряется величина сигнала (напряжение) при помощи осциллографа? Что такое чувствительность и коэффициент отклонения луча по вертикали осциллографа?

4. Как изменяется длительность сигнала при помощи ЭЛО? Что такое длительность развертки?

5. Как осуществить калибровку осциллографа по напряжению и по времени (т.е. определить величины  $k_y$  и  $k_t$ ), имея в распоряжении источник эталонного напряжения и сигнал эталонной длительности?

6. Что такое амплитуда и эффективное значение синусоидального напряжения?

7. Какие колебания называются гармоническими? Что такое амплитуда, частота и фаза колебания?

8. Какие фигуры возникают в результате двух взаимоперпендикулярных колебаний с одинаковыми частотами?

9. В чем состоит метод фигур Лиссажу, применяемый для определения частоты колебаний?

10. Как по виду фигуры Лиссажу определить отношение частот?

11. Почему одному и тому же отношению частот соответствует ряд фигур Лиссажу?

### **ЛИТЕРАТУРА**

[9]: § 4.4-4.5; [10]:§40; [11]: 2.7; [1]:§131.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Ф 3-3**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПРОВОДНИКА**

#### **Цель работы:**

1. Измерить сопротивление проводника методом "амперметра-вольтметра"
2. Определить удельное сопротивление материала проводника.

#### **Оборудование:**

Лабораторный прибор FRM-01 для измерения сопротивления проводника, состоящий из нихромового провода, источника тока, амперметра, вольтметра и регулятора тока.

### **КРАТКАЯ ТЕОРИЯ**

#### **Закон Ома для однородного участка цепи.**

Упорядоченное движение электрических зарядов называется электрическим током. В металлах и полупроводниках носителями зарядов являются электроны, в жидкостях и газах отрицательные и положительные ионы. Носители зарядов в теле участвуют в хаотическом тепловом движении, поэтому число зарядов, проходящих через любое сечение  $dS$ , в среднем равно нулю.

Для создания направленного движения зарядов нужно приложить электрическое поле. При этом возникает разность потенциалов на концах проводника, и заряды под действием сил электростатического поля начинают перемещаться от большего потенциала к меньшему. Если на участке электрической цепи на заряды действуют только электростатические силы, то такой участок называют однородным.

Рассмотрим проводник, по которому перемещаются заряды со средней упорядоченной скоростью  $\vec{u}$ . Концентрация зарядов в единице объема -  $n$ . Тогда за время  $dt$  через поперечное сечение пройдет заряд

$$dq = ne\vec{u} dS \quad (1)$$

где  $n$  - число зарядов в единице объема,

$e$  - заряд электрона,

$\vec{u}$  - средняя скорость упорядоченного движения зарядов.

Величина, характеризующая число зарядов проходящих через сечение проводника в единицу времени называется силой тока.

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (2)$$

где  $I$  - сила тока.

Вектор, характеризующий величину заряда  $dq$ , переносимого через единичное сечение  $dS$  проводника в единицу времени  $dt$  называется плотностью тока и определяется соотношением:

$$\vec{j} = ne\vec{u} \quad (3)$$

Выделим определенный объем  $V$ , ограниченный поверхностью  $S$ . Через поверхность вытекает заряд  $dq$  в единицу времени  $dt$ , который можно определить следующим образом:

$$\frac{dq}{dt} = -\oint j_n \cdot dS \quad (4)$$

где  $j_n$  - нормальная составляющая плотности тока.

Знак минус означает, что количество зарядов в объеме убывает.

Заряд можно определить через объемную плотность заряда  $\rho$  следующим образом:

$$q = \int \rho \cdot dV \quad (5)$$

где  $\rho$  - объемная плотность заряда.

С учетом соотношения (5) полученное выражение (4) можно переписать в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho \cdot dV = -\int \text{div} \cdot \vec{j} \cdot dV \quad (6)$$

Применим к данному соотношению теорему Остроградского - Гаусса и получим:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \cdot \vec{j} = 0 \quad (7)$$

Соотношения (6,7) выражают закон сохранения заряда и называются уравнениями непрерывности (стационарности).

Если токи стационарны, т.е. сила тока не зависит от времени, то уравнение (7) запишется в виде:

$$\text{div} \cdot \vec{j} = 0 \quad (8)$$

Создание электрического поля в проводнике означает наличие разности потенциалов на концах проводника. Как показывает опыт, плотность тока  $\vec{j}$  пропорциональна напряженности электрического поля  $\vec{E}$ .

$$\vec{j} = \lambda \cdot \vec{E} \quad (9),$$

где  $\lambda$  - удельная проводимость или электропроводность.

Величина обратная электропроводности называется удельным сопротивлением проводника

$$\rho = \frac{1}{\lambda} \quad (10)$$

Выражение (9) называется законом Ома для однородного участка цепи в дифференциальной форме.

В интегральном виде получим следующее выражение:

$$I = \frac{U}{R} \quad (11)$$

где  $I$  - сила тока,  $U$  - напряжение на концах проводника,  $R$  - сопротивление проводника.

Для однородного участка цепи напряжение совпадает с разностью потенциалов и определяет работу электростатических сил по перемещению заряда от большего потенциала к меньшему.

### ***Сопротивление проводников.***

Если участок цепи представляет собой проводник длиной  $l$  одинакового сечения  $S$ , однородного химического состава, то сопротивление  $R$  этого проводника определяется по формуле:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (12)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление данного материала, показывающее, чему равно сопротивление однородного проводника единичной длины и единичного сечения. Удельное сопротивление зависит от химического состава материала проводника, от его температуры, и измеряется в системе СИ в Ом·м, (на практике часто пользуются внесистемной единицей - Ом·мм<sup>2</sup>/м).

При комнатной температуре наименьшее удельное сопротивление имеют проводники из химически чистых металлов. Удельное сопротивление сплавов имеет большую величину, что позволяет применять их для изготовления резисторов с большим сопротивлением (реостаты, потенциометры, нагревательные элементы, шунты к амперметрам,

добавочные сопротивления к вольтметрам). Удельное сопротивление сплавов зависит от состава сплава и процентного содержания компонентов сплава. В таблице 1 даны значения удельного сопротивления сплавов с высоким омическим сопротивлением и химически чистых металлов.

Таблица 1.

Металлы или сплавы (состав %)	Удельное сопротивление при 20 <sup>0</sup> С (Ом · мм <sup>2</sup> / м)
Серебро	0.016
Медь	0.017
Золото	0.024
Никель	0.073
Железо	0.098
Алюминий	0.028
Олово	0.12
Висмут	1.16
Графит	8.0
Бронза ( 88 % Cu, 12 % Sn )	0.18
Константан( 58,8 % Cu, 40 % Ni, 1,2 % Mn)	0.44 - 0.52
Манганин( 85 % Cu, 12 % Mn, 3 % Ni)	0.42 - 0.48
Никелин (54 % Cu, 20 % Zn, 28 % Ni)	0.39 - 0.45
Нихром (67,5 % Ni, 15 % Cr, 16 % Fe, 15 % Mn )	1.0 - 1.1
Фехраль (80 % Fe, 14 % Cr, 6 % Al)	1.1 - 1.3

### ***Методы измерения сопротивления***

Одним из методов измерения сопротивления проводника является метод "амперметра-вольтметра", позволяющий определять напряжение и ток на участке цепи. Из формулы (11) закона Ома для однородного участка цепи следует, что измерение разности потенциалов  $U$  на концах проводника и величины тока  $I$ , протекающего через него, можно определить сопротивление  $R$  проводника.

Другим методом измерения сопротивлений является метод мостовых схем, который рассматривается в другой лабораторной работе. В мостовых схемах не требуется измерять токи и напряжения, поэтому они дают более точные результаты.

### ***Погрешности измерения сопротивлений.***

При измерениях возникают погрешности, имеющие различную природу. Погрешность метода (или теоретическая погрешность) связана с несовершенством метода, с упрощениями, принятыми в уравнениях для

измерений. Данный метод имеет систематическую погрешность, для компенсации которой возможно введение поправок. При измерении сопротивления методом "амперметра-вольтметра" возникает погрешность, определяемая способом подключения амперметра и вольтметра к исследуемому участку цепи.

Для измерения сопротивления  $R$  вольтметр и амперметр могут быть включены в цепь по одной из схем, изображенных на рис.1

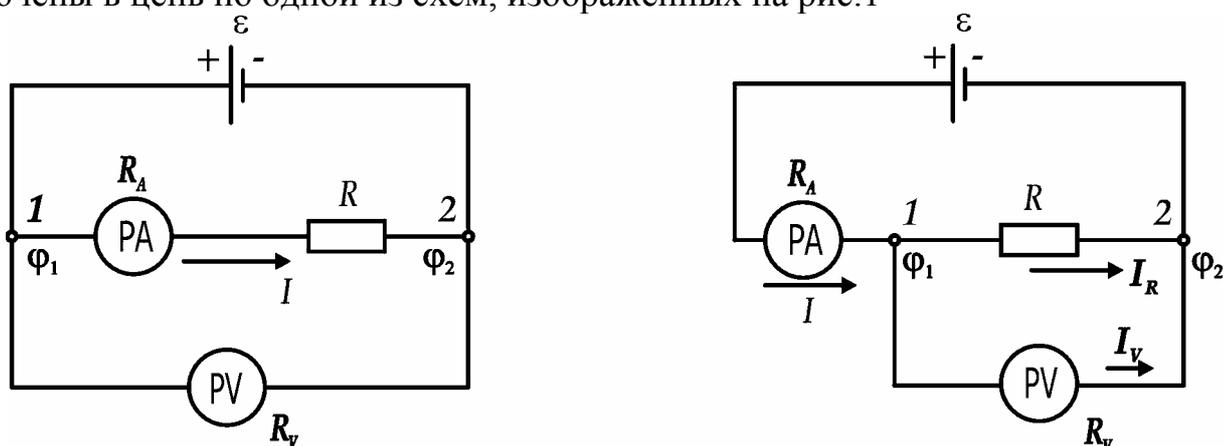


Рис. 1

В схеме 1,а вольтметр измеряет разность потенциалов  $U = \varphi_1 - \varphi_2$  на участке цепи, содержащем проводник сопротивлением  $R$  и амперметр  $PA$  сопротивлением  $R_A$ , которые соединены последовательно. Такая схема измерения реализует метод с точным измерением тока. Поэтому разность потенциалов, измеренная вольтметром между точками 1 и 2, будет равна сумме падений напряжений на сопротивлении  $R$  проводника и сопротивлении  $R_A$  амперметра:

$$U = IR + IR_A \quad (13)$$

Расчет по формуле (11) будет содержать систематическую погрешность, обусловленную особенностями метода (упрощениями, принятыми при таком расчете, т.е. не учитывает сопротивление амперметра).

Величина истинного сопротивления  $R$  проводника, с учетом сопротивления амперметра, будет равна

$$R = \frac{U}{I} - R_A \quad (14)$$

где через  $U$  обозначена разность потенциалов на участке 1-2.

Следовательно, разница  $\Delta R$  между результатами измерения сопротивления  $R_{\text{э}}$  по формуле (11) и истинным  $R$  и является той методической ошибкой, которая возникает при данном способе включения измерительных приборов.

$$\Delta R = R_{\text{э}} - R = \frac{U}{I} - \left( \frac{U}{I} - R_A \right) = R_A \quad (15)$$

Относительная погрешность этого метода равна:

$$\varepsilon_{m1} = \frac{\Delta R}{R} \approx \frac{R_A}{R_{\text{э}}} \quad (16)$$

т.е. точность измерения сопротивления будет тем больше, чем меньше сопротивление  $R_A$  амперметра по сравнению с сопротивлением  $R$  проводника. (Идеальным будет амперметр с бесконечно малым собственным сопротивлением).

В схеме 1,б амперметром измеряется *суммарный ток*  $I$ , текущий через сопротивление  $R$  и вольтметр  $PV$ , имеющий собственное сопротивление  $R_V$ . Это метод с точным измерением напряжения. В этом случае разность потенциалов  $U$  между точками 1 и 2 одинакова как для проводника, так и для вольтметра.

Тогда по закону Ома (1):

$$I_R = \frac{U}{R} \quad (17)$$

$$I_V = \frac{U}{R_V}$$

где  $I_R$  и  $I_V$  - токи, текущие соответственно через проводник и вольтметр  $PV$ ,  
 $U$  - разность потенциалов, измеренная вольтметром.

Так как измеряемый ток равен  $I = I_R + I_V$  то, учитывая соотношение (17), получим

$$I = \frac{U}{R} + \frac{U}{R_V}$$

Если не учитывать ток  $I_V$ , текущий через сопротивление  $R_V$  вольтметра, то величину сопротивления  $R_{\text{э}}$  проводника также можно найти по упрощенной формуле (11).

Величина истинного сопротивления  $R$  проводника будет равна

$$R = \frac{U}{I_R} = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}} \quad (18)$$

$$R = \frac{U}{I \left( 1 - \frac{R}{R_V} \right)} = \frac{R_{\text{э}}}{\left( 1 - \frac{R}{R_V} \right)} \quad (18^1)$$

Следовательно, в этом способе измерения также возникает погрешность метода

$$\Delta R = R - R_{\mathcal{O}}$$

Относительная погрешность этого метода равна:

$$\varepsilon_{m2} = \frac{\Delta R}{R} = \frac{R}{R_V} \approx \frac{R_{\mathcal{O}}}{R_V} \quad (19)$$

т.е. точность измерения сопротивления будет тем больше, чем больше сопротивление вольтметра по сравнению с сопротивлением  $R$  проводника (идеальным будет вольтметр с бесконечно большим собственным сопротивлением). Высоким сопротивлением обладают электронные аналоговые и цифровые вольтметры, вносящие малую погрешность.

Погрешности метода возникают при использовании формулы (11). Они могут быть скорректированы, если известны сопротивления амперметра  $R_A$  или вольтметра  $R_V$ . Формулы (14) и (18) дают уже исправленный результат измерений, свободный от погрешности этого типа.

Другим источником погрешности являются инструментальные погрешности, обусловленные конструкцией прибора. Инструментальные погрешности содержат как систематическую, так и случайную составляющую. При каждом отдельном измерении сопротивления  $R$  мы производим измерения тока  $I$  и разности потенциалов  $U$  с погрешностью, определяемой классом точности  $\gamma$  измерительного прибора

$$\Delta I = \gamma_A \frac{I_m}{100}$$

$$\Delta U = \gamma_V \frac{U_m}{100}$$

где  $\gamma_A$  - класс точности амперметра, имеющего предельный ток  $I_m$ ,

$\gamma_V$  - класс точности вольтметра с пределом  $U_m$ .

Погрешность определения сопротивления, обусловленная погрешностями приборов определяется по правилам переноса погрешностей или косвенных измерений

$$\Delta R_I = \frac{\partial R}{\partial I} \Delta I = -\frac{U}{I^2} \Delta I \quad (20)$$

$$\Delta R_U = \frac{\partial R}{\partial U} \Delta U = \frac{1}{I} \Delta U \quad (20')$$

$$\Delta R_{\text{ПР}} = \sqrt{\Delta R_I^2 + \Delta R_U^2} \quad (21)$$

$$\varepsilon_{\text{ПР}} = \frac{\Delta R_{\text{ПР}}}{R} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2} \quad (21')$$

Из формул (21) и (21') видно, что приборную погрешность можно уменьшить, применяя амперметр и вольтметр высокого класса точности, а также выбирать токи и напряжения такой величины, чтобы стрелки приборов при снятии показаний находились во второй половине шкалы (возможно ближе к пределу измерений).

Случайные погрешности возникают при сочетании не воспроизводимых от измерения к измерению факторов: нестабильности источника тока, погрешности оператора, случайной составляющей приборной погрешности и т.д. Для определения случайной погрешности проводят серию многократных измерений  $R_i$  при разных токах и напряжениях. Статистическая погрешность  $\Delta R_{\text{СТ}}$  определяется в соответствии с правилами обработки многократных измерений.

Полная погрешность определяется композицией приборной  $\Delta R_{\text{ПР}}$  и статистической  $\Delta R_{\text{СТ}}$  погрешностей

$$\Delta R = \sqrt{\Delta R_{\text{СТ}}^2 + \Delta R_{\text{ПР}}^2} \quad (22)$$

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta R}{R} \quad (22')$$

### **ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ**

Прибор FRM-01 представлен на рис.2. К основанию (1) прикреплена колонна (2) с нанесенной миллиметровой шкалой (3). На колонне укреплены два неподвижных кронштейна (4) и один подвижный кронштейн (5), который может передвигаться вдоль колонны и устанавливаться в любом положении. Между верхним и нижним кронштейном натянут нихромовый провод (6). Через контактный зажим на подвижном кронштейне обеспечивается хорошее гальваническое соединение с проводом.

На подвижном кронштейне нанесена черта, которая облегчает определение по шкале длины отрезка измеряемого нихромового провода.

Нижний, верхний и центральный подвижный контакты нихромового провода подведены при помощи проводов низкого сопротивления к измерительной части прибора (7), которая помещена в центральном корпусе.

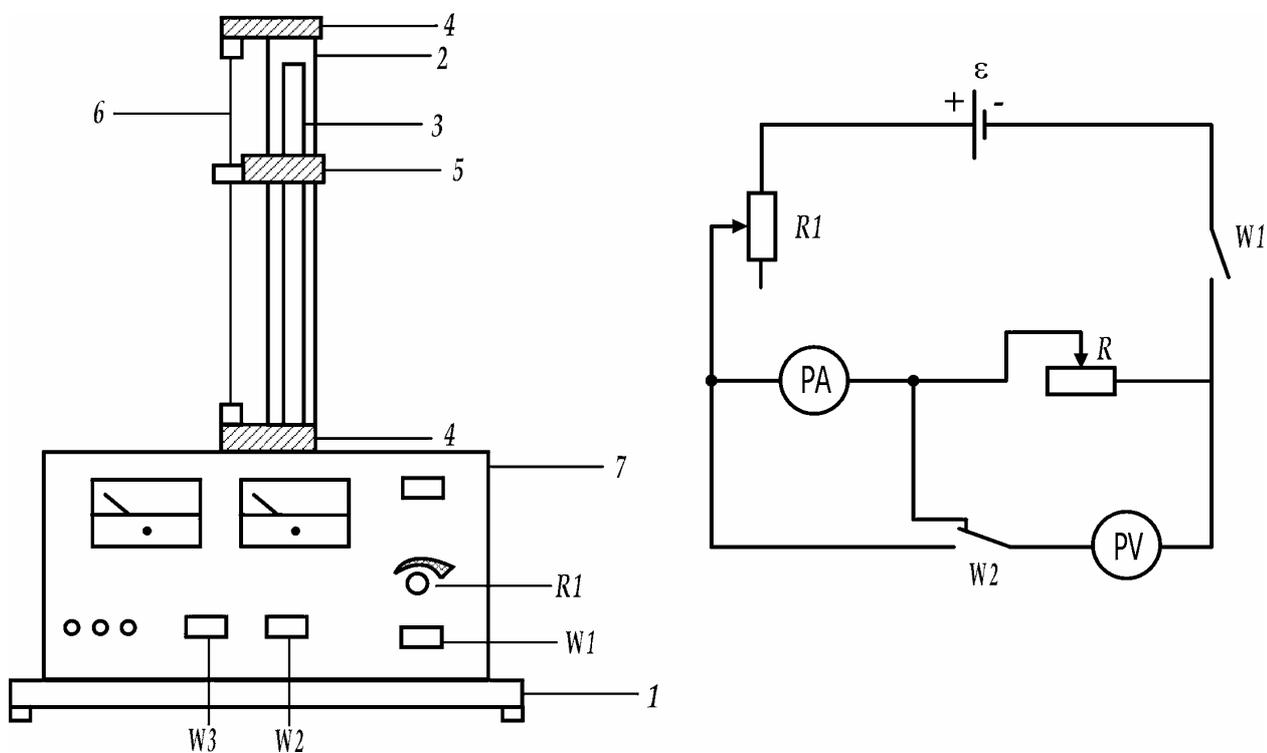


Рис. 2.

На лицевой панели корпуса расположены амперметр  $PA$ , вольтметр  $PV$ , клавиша  $W1$  для включения установки в сеть напряжением 220 В, переключатели  $W2$  и  $W3$ , ручка реостата  $R1$  регулировки тока. Отжатая клавиша переключателя  $W3$  позволяет использовать нихромовый провод в мостовых схемах измерения сопротивления. Нажатая клавиша  $W3$  позволяет произвести измерение активного сопротивления провода с использованием амперметра и вольтметра.

Если клавиша  $W2$  отжата, то измерение происходит по схеме с точным измерением тока (рис.1а), если нажата - по схеме с точным измерением напряжения (рис.1б).

### **ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ**

1. Заготовьте таблицу результатов измерений.

Таблица 2

$N_{\text{д}}$ $n/n$	$I_i$ $мА$	$U_i$ $В$	$R_{\text{эi}}$ $Ом$	$R_i$ $Ом$

2. Ручку регулятора тока установите в положение минимального тока (поверните против часовой стрелки до упора). Передвигая подвижный

кронштейн 5, установите произвольную длину  $l$  проводника. Определите длину проводника, его диаметр (микронетром), класс точности приборов и запишите результаты в табл. 3.

Таблица 3  
Справочные данные

$l, \text{ мм}$	$d, \text{ мм}$	$R_A, \text{ Ом}$	$\gamma_A$	$R_V, \text{ Ом}$	$\gamma_V$
		0,15		2500	

3. Включите установку и произведите пять измерений сопротивления при разных токах методом точного измерения тока

4. Заготовьте таблицу, аналогичную табл. 2. Произведите аналогичную серию измерений методом с точным измерением напряжения

5. Выключите установку.

### **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ**

1. Вычислите неисправленное  $R_{Эi}$  и исправленные значения  $R_{Эi}$  сопротивления проводника по формулам (4), (6) и (10), а также их средние значения  $\langle R_{Э} \rangle$  и  $\langle R \rangle$  в каждом методе измерения.

2. Определите погрешности метода  $\varepsilon_{m1}$  и  $\varepsilon_{m2}$  по формулам (8) и (11) для каждого метода измерения.

3. Определите приборные погрешности  $\Delta R_{\text{ПР}}$  и  $\varepsilon_{\text{ПР}}$  для двух опытов по формулам (12)-(13') (для минимального и максимального тока), используя данные более точного метода

4. Определите случайную погрешность  $\Delta R_{\text{СТ}}$  и  $\varepsilon_{\text{СТ}}$  (для более точного метода).

5. Определите полную абсолютную и относительную погрешности измерения сопротивления  $\Delta R$  и  $\varepsilon_R$  по формулам (14) и (14').

6. Определите удельное сопротивление  $\rho$  нихромового провода по формуле (3).

7. Выведите формулу для определения погрешности  $\Delta \rho$  по правилам оценки погрешностей косвенных измерений (через погрешности  $\Delta R$ ,  $\Delta d$ , и  $\Delta l$ ). Определите абсолютную  $\Delta \rho$  и относительную  $\varepsilon_\rho$  погрешности для наиболее точного результата измерений  $\langle R \rangle$ .

### **ВЫВОДЫ**

1. Запишите результат измерения  $R$  и  $\rho$  в стандартной форме.

2. Какой метод измерения сопротивления точнее? Подтвердите это сравнением погрешностей обоих методов с различным включением амперметра и вольтметра.

3. Какой вид погрешности (метода, приборная или статистическая) имеет наибольшее влияние на результат определения погрешности сопротивления в Ваших опытах?

4. Следует ли учитывать сопротивления амперметра и вольтметра в данных опытах?

### ***КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ***

1. Дайте определение разности потенциалов и падения напряжения на участке цепи. В каком случае они равны?

2. Каков физический смысл имеет сопротивление проводника? От чего зависит сопротивление проводника?

3. В чем состоит метод измерения сопротивления с точным измерением тока? За счет чего возникает погрешность этого метода? Чему она равна и как ее можно уменьшить? Вывести формулу.

4. В чем состоит метод измерения сопротивления с точным измерением напряжения? За счет чего возникает погрешность этого метода? Чему она равна и как ее можно уменьшить? Вывести формулу.

5. Как определяются приборные и случайные погрешности измерения в данной работе?

### ***ЛИТЕРАТУРА***

[1]: §41-42; [2]: §41; [4]: §27; [5]: §5.2; [6] §63-68; [7]: §51.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Ф-4**

### **ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ**

#### **Цель работы:**

1. Изучить конфигурацию электростатических полей, моделируемых полем стационарных токов.
2. Построить вектор напряженности электрического поля в произвольной точке.
3. Построить семейство силовых линий поля.

#### **Оборудование:**

Пантограф. Планшет с электродами. Цифровой вольтметр.

### **КРАТКАЯ ТЕОРИЯ**

#### **Электростатический заряд и его свойства.**

Существует два вида зарядов - положительные и отрицательные. Опыт свидетельствует о том, что заряды взаимодействуют между собой: одноименные друг от друга отталкиваются, разноименные - притягиваются.

Обобщая опытные факты, английский физик М. Фарадей установил фундаментальный закон природы - закон сохранения заряда: алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы (системы, не обменивающейся зарядами с внешними телами) остается неизменной при любых процессах, происходящей внутри этой системы.

Опытные данные свидетельствуют о том, что электрические заряды удовлетворяют свойству аддитивности. Это означает, что если к заряду  $q_1$  добавить заряд  $q_2$ , то результирующий заряд равен  $q_1 + q_2$ .

И наконец, электрический заряд - величина релятивистски инвариантная, то есть не зависит от того, движется этот заряд или покоится.

#### **Закон Кулона.**

Закон взаимодействия неподвижных точечных электрических зарядов экспериментально установлен Кулоном. Точечным является заряд, сосредоточенный на теле, линейные размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием до других заряженных тел, с которым он взаимодействует. Закон Кулона утверждает: сила взаимодействия между двумя покоящимися точечными электрическими зарядами в вакууме пропорциональна зарядам  $q_1$  и  $q_2$  и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Сила  $\vec{F}$  направлена по прямой, соединяющей взаимодействующие заряды, то есть является центральной и соответствует притяжению ( $F < 0$ ) в случае разноименных зарядов и отталкиванию ( $F > 0$ ) в случае одноименных зарядов.

В векторной форме закон Кулона имеет вид

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \quad (1)$$

где  $k$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц;

$\vec{F}$  - сила, действующая между зарядами  $q_1$  и  $q_2$ ,  $\vec{r}$  - радиус-вектор, проведенный от заряда  $q_1$  к заряду  $q_2$ .

Если взаимодействующие заряды находятся в однородной изолированной среде, то сила взаимодействия между ними равна

$$F = k \frac{q_1 q_2}{\varepsilon \cdot r^2} \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  - безразмерная величина - диэлектрическая проницаемость среды, показывающая, во сколько раз сила взаимодействия между зарядами в данной среде меньше силы их взаимодействия в вакууме.

В системе СИ коэффициент пропорциональности  $k$  в соотношении (1) равен  $k = 1/4\pi\varepsilon_0$ , и закон Кулона в системе СИ принимает вид:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (3)$$

Величина  $\varepsilon_0$  называется электрической постоянной, она относится к числу фундаментальных констант и равна  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

### ***Напряженность электрического поля. Принцип суперпозиции.***

Электрический заряд изменяет свойства окружающего его пространства. Это проявляется в том, что если в окружающее заряд пространство внести другой заряд, то на него будет действовать сила. Следовательно, в пространстве, окружающем электрический заряд, существует силовое поле, посредством которого осуществляется взаимодействие между телами. Поле реально существует и, наряду с веществом, является одним из видов существования материи. Если поле создается неподвижными электрическими зарядами, то оно называется электростатическим.

Для обнаружения и опытного исследования электростатического поля используется пробный точечный положительный заряд - такой заряд, который своим присутствием не искажает исследуемое поле.

Если в поле, создаваемое зарядом  $q$ , поместить пробный заряд  $q_0$ , то на него действует сила  $\vec{F}$ , различная в разных точках поля, которая, согласно (1), пропорциональна  $q_0$ . Отношение же  $\frac{\vec{F}}{q_0}$  не зависит от величины

пробного заряда и характеризует электростатическое поле в той точке, где находится пробный заряд. Эта величина является силовой характеристикой поля и называется напряженностью.

Итак, напряженность  $\vec{E}$  электростатического поля в данной точке есть физическая величина, определяемая силой, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в эту точку

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (4)$$

Направление вектора  $\vec{E}$  совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд.

Напряженность электростатического поля, созданного точечным зарядом  $q$  в вакууме, как это следует из (3), равна

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^3} \vec{r} \quad (5)$$

Графически электростатическое поле изображается с помощью линий напряженности (силовых линий), которые проводят так, чтобы касательная к ним в каждой точке пространства совпадала по направлению с вектором напряженности в данной точке поля. Так как в данной точке пространства вектор напряженности имеет лишь одно направление, то линии напряженности никогда не пересекаются. Для однородного поля (вектор напряженности постоянен по величине и направлению) линии напряженности параллельны вектору напряженности.

Если поле создается точечным зарядом, то линии напряженности радиальные прямые, выходящие из заряда, если он положителен, и входящие в него, если заряд отрицателен.

Чтобы с помощью линий напряженности можно было характеризовать не только направление, но и величину напряженности, силовые линии условились проводить определенным образом. А именно так, чтобы число линий напряженности, пронизывающих единичную площадку, перпендикулярную этим линиям, было равно модулю вектора  $\vec{E}$ .

Если электрическое поле создано системой  $N$  зарядов, то в каждой точке пространства, где определяется вектор напряженности, суммарный вектор можно определить как векторную сумму векторов напряженностей полей, создаваемых в этой точке каждым зарядом в отдельности.

Это утверждение выражает одно из важнейших свойств электрических полей: принцип суперпозиции.

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i \quad (6)$$

### ***Циркуляция вектора напряженности электростатического поля.***

Пусть в поле электростатического заряда  $q$  из точки 1 в точку 2 вдоль произвольной траектории перемещается точечный заряд  $q_0$ .

Работа на элементарном пути  $dl$  равна

$$dA = Fdl \cos \alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} dl \cos \alpha \quad (7)$$

Поскольку  $dl \cos \alpha = dr$ , то

$$dA = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} dr \quad (8)$$

Проинтегрируем это выражение.

$$A_{12} = \int_{r_1}^{r_2} dA = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{qq_0}{r_1} - \frac{qq_0}{r_2} \right) \quad (9)$$

Из соотношения (9) видно, что работа  $A_{12}$  не зависит от траектории, вдоль которой перемещается заряд  $q_0$ , а определяется только его начальным ( $r_1$ ) и конечным ( $r_2$ ) положением в электростатическом поле. Поля, в которых выполняются эти условия, называются потенциальными, а действующие в них силы - консервативными.

Очевидно, что работа по перемещению электрического заряда в электростатическом поле по любому замкнутому контуру  $L$  равна нулю

$$\oint_L dA = 0 \quad (10)$$

Если в качестве переносимого в поле заряда выбрать единичный положительный, то выражение (10) может быть записано в виде

$$\oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = \oint_L E_l dl = 0 \quad (11)$$

Интеграл  $\oint_L (\vec{E} \cdot d\vec{l}) = \oint_L E_1 dl$  называется циркуляцией вектора напряженности.

Итак, циркуляция вектора напряженности электростатического поля вдоль любого замкнутого контура равна нулю. Соотношение (11) представляет собой математическое выражение потенциального характера электростатического поля.

Тело, находящееся в потенциальном поле, обладает потенциальной энергией, за счет которой силами поля может совершаться работа. Из механики известно, что работа консервативных сил совершается за счет убыли потенциальной энергии. Поэтому работу (9) сил электростатического поля можно представить как разность потенциальных энергий, которыми обладает точечный заряд  $q$  в начальном (точка 1) и конечном (точка 2) положениях.

$$A_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{qq_0}{r_1} - \frac{qq_0}{r_2} \right) = U_1 - U_2 \quad (12)$$

Из формулы (12) следует, что потенциальная энергия заряда  $q_0$  в поле заряда  $q$  равна

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qq_0}{r_1} + const \quad (13)$$

Как и в механике, потенциальная энергия заряда определяется неоднозначно, а с точностью до некоторой постоянной. Если условиться считать, что при удалении заряда  $q_0$  в бесконечность ( $r \rightarrow \infty$ ) потенциальная энергия обращается в нуль ( $U \rightarrow 0$ ), то константа в уравнении (13) равна нулю и потенциальная энергия заряда  $q_0$  в поле заряда  $q$  на расстоянии  $r$  от него равна:

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qq_0}{r_1} \quad (14)$$

Для одноименных зарядов  $qq_0 > 0$  и потенциальная энергия их взаимодействия (отталкивание) положительна. Для разноименных зарядов произведение  $qq_0 < 0$ , а потенциальная энергия их взаимодействия (притяжение) отрицательна,

Если поле создается системой  $n$  точечных зарядов  $q_1, q_2, \dots, q_n$ , то, на основании принципа суперпозиции, потенциальная энергия  $U$  заряда  $q_0$ , находящегося в этом поле равна:

$$U = \sum_{i=1}^n U_i = q_0 \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_i}{r_i} \quad (15)$$

Из соотношений (14) и (15) видно, что отношение  $U/q_0$  не зависит от заряда  $q_0$ . Именно это выражение выбирается в качестве энергетической характеристики электростатического поля и называется его потенциалом  $\varphi$ .

$$\varphi = \frac{U}{q_0} \quad (16)$$

Итак, потенциал  $\varphi$  в какой-либо точке электростатического поля есть физическая величина, определяемая потенциальной энергией единичного положительного заряда, помещенного в данную точку поля.

Из формул (14) и (16) следует, что потенциал поля, создаваемый точечным зарядом  $q$ , равен

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r} \quad (17)$$

Если поле создается несколькими зарядами, то потенциал поля системы зарядов равен алгебраической сумме потенциалов полей всех этих зарядов.

Очевидно, что при заданном распределении зарядов, пользуясь принципом суперпозиции, можно рассчитать как потенциал поля, так и его напряженность. При этом следует помнить, что напряженность, будучи силовой характеристикой поля, является величиной векторной, тогда как представляющий энергетическую характеристику поля потенциал есть величина скалярная.

Представим теперь работу, определяемую соотношением (12), используя введенное понятие потенциала

$$A_{12} = (U_1 - U_2) = q(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (18)$$

Работа сил поля при перемещении заряда  $q_0$  из точки 1 в точку 2 может быть представлена также в виде:

$$A_{12} = q_0 \int_1^2 (\vec{E}, d\vec{l}) \quad (19)$$

Используя (17) и (18), находим:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 (\vec{E}, d\vec{l}) \quad (20)$$

где интегрирование можно проводить вдоль любой линии, соединяющей точки 1 и 2, так как работа сил электростатического поля не зависит от траектории перемещения заряда.

Если перемещать заряд  $q_0$  из произвольной точки за пределы поля, то есть в бесконечность, где потенциал по условию равен нулю, то работа сил поля, согласно (18), равна

$$A_{1\infty} = q_0\varphi \quad (21)$$

Таким образом, потенциал - физическая величина, определяемая работой по перемещению единичного положительного заряда из данной точки поля в бесконечность. Эта работа численно равна работе, совершаемой внешними силами (против сил поля) по перемещению единичного положительного заряда из бесконечности в данную точку поля.

### ***Напряженность как градиент потенциала.***

#### ***Эквипотенциальные поверхности.***

И потенциал, и напряженность описывают одну и ту же физическую реальность - электростатическое поле. Поэтому установив связь между этими характеристиками.

Пусть единичный положительный заряд перемещается из одной точки поля в другую вдоль оси  $x$  при условии, что точки расположены бесконечно близко друг к другу, на расстоянии  $dx$ . Тогда работа по перемещению равна  $E_x dr$ . С другой стороны та же работа, выраженная через потенциал, равна  $dA = q d\varphi$ . Приравняв оба выражения для работы, получаем

$$E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x} \quad (22)$$

Повторив аналогичные рассуждения для осей  $y$  и  $z$ , находим

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}\right) \quad (23)$$

где  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  - единичные орты координатных осей  $x, y, z$ . Вектор, стоящий справа от знака равенства в (23), называется градиентом скалярной функции  $\varphi$  и обозначается  $grad\varphi$  или  $\nabla\varphi$ . Таким образом по определению

$$grad\varphi = \nabla\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}.$$

Используя понятие градиента, соотношение (23) можно представить в виде.

$$\vec{E} = -grad\varphi = -\nabla\varphi \quad (24)$$

Таким образом, зная  $\varphi = \varphi(x, y, z)$ , можно найти модуль и направление вектора напряженности электростатического поля. Очевидно, что соотношение (24) позволяет решить и обратную задачу - по значению  $\vec{E}$  найти распределение потенциала в поле.

Отметим еще, что знак минус в (24) отражает то обстоятельство, что вектор напряженности  $\vec{E}$  направлен в сторону наибольшего убывания потенциала.

Для графического изображения распределения потенциала электростатического поля пользуются эквипотенциальными поверхностями, во всех точках которых потенциал имеет одно и то же значение. Работа по перемещению заряда вдоль эквипотенциальной поверхности согласно (18) равна нулю. С другой стороны, как следует из (19), работа равна нулю, когда  $\vec{E} \perp d\vec{l}$ . Следовательно, вектор  $\vec{E}$  ортогонален эквипотенциальным поверхностям.

Картина эквипотенциальных поверхностей и силовых линий поля точечного заряда представлена на рис.3.

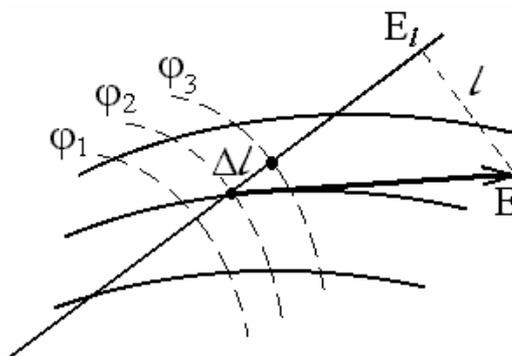


Рис.3

Эквипотенциальных поверхностей вокруг каждой системы зарядов можно провести бесчисленное множество. Однако их обычно проводят так, чтобы разности потенциалов между любыми двумя соседними эквипотенциальными поверхностями были одинаковыми.

Итак, зная расположение линий напряженности электростатического поля, можно построить эквипотенциальные поверхности, и наоборот, по известному расположению эквипотенциальных поверхностей можно определить в каждой точке поля величину и направление вектора напряженности.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПОЛЕМ СТАЦИОНАРНЫХ ТОКОВ.**

### ***Качественное рассмотрение вопроса о сходстве и различии электростатического поля и поля постоянного тока***

В настоящей работе вместо поля, создаваемого неподвижными Электрическими зарядами, исследуется поле стационарных токов. Вопрос о подобии этих полей требует специального обсуждения.

Если поле создается стационарными токами, то плотность электрических зарядов в каждой точке пространства не меняется со временем. На место уходящих электрических зарядов непременно поступают новые. Такое распределение зарядов, как показывает опыт, создает в окружающем пространстве такое же кулоновское электрическое поле, что и неподвижные электрические заряды, характеризующиеся той же плотностью распределения. Отсюда следует, что электрическое поле стационарных токов есть поле потенциальное.

Однако электрическое поле стационарных токов существенно отличается от электростатического. При равновесии зарядов на проводнике, создаваемое ими внутри проводника электростатическое поле равно нулю. Когда речь идет о кулоновском поле стационарных токов, то поле внутри проводника не равно нулю, поскольку в противном случае направленное перемещение зарядов внутри проводника было бы невозможно, и ток прекратился бы.

Силовые линии электростатического поля всегда нормальны к поверхности проводника. В поле стационарных токов это выполняется не всегда.

### ***Дифференциальное уравнение электростатического поля.***

Вопрос о подобии электростатического поля и поля стационарных токов можно рассмотреть и исходя из того, что поля, обладающие подобными свойствами, должны описываться аналогичными дифференциальными уравнениями. Получим уравнение, которому удовлетворяет электростатическое поле.

Пусть в вакууме расположены два заряженных проводника. Они создают вокруг себя электростатическое поле, удовлетворяющее теореме Гаусса – Остроградского, согласно которой поток вектора  $\vec{E}$  через любую замкнутую поверхность  $S$  равен суммарному заряду, находящемуся внутри этой поверхности:

$$\oint_S (\vec{E}, d\vec{S}) = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i \quad (26)$$

Интегральное уравнение (26), используя теорему Остроградского, которая позволяет заменить интегрирование по поверхности интегрированием по объему, можно преобразовать в дифференциальное уравнение. Математически такой переход можно представить в виде

$$\oint_S (\vec{E}, d\vec{S}) = \int_V \operatorname{div} \vec{E} dV \quad (27)$$

где  $\operatorname{div} \vec{E}$  - скаляр, образованный из вектора  $\vec{E}$  по правилу (в декартовых координатах)

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} \quad (28)$$

соотношение (28) может служить определением  $\operatorname{div} \vec{E}$ . Используя операторную символику, выражение для дивергенции можно представить в виде  $\operatorname{div} \vec{E} = (\nabla, \vec{E})$ .

На основании (26) и (27), имея ввиду, что  $q = \int_V \rho dV$ , где  $\rho$  - плотность распределения заряда, получим:

$$\int_V \operatorname{div} \vec{E} dV = \frac{1}{\varepsilon_0} \int_V \rho dV \quad (29)$$

Так как в (27) поверхность  $S$  выбрана произвольно, то, очевидно, что для выполнения (29) необходимо, чтобы

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{1}{\varepsilon_0} \rho \quad (30)$$

Уравнение (32) и есть искомое дифференциальное уравнение, которому удовлетворяют компоненты электростатического поля  $\vec{E}_x$ ,  $\vec{E}_y$ ,  $\vec{E}_z$  при заданном распределении заряда  $\rho(x, y, z)$ .

### ***Дифференциальное уравнение электрического поля стационарных токов.***

Поместим теперь заряженные проводники в какую-либо проводящую среду. В среде при этом возникает электрический ток, плотность которого определяется законом Ома (дифференциальная форма):

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}_m \quad (30)$$

где  $\sigma$  - проводимость среды,  $\vec{E}_m$  - напряженность электрического поля в среде.

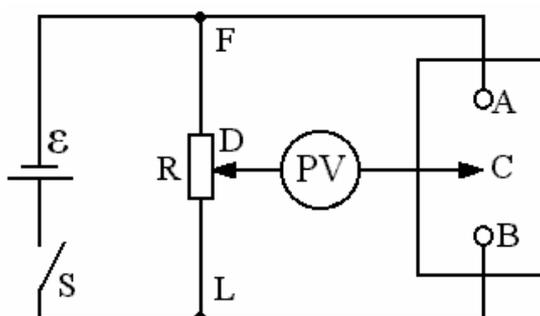
Если разность потенциалов поддерживается неизменной, то  $\vec{E}_m$  и  $\vec{j}$  не зависит от времени. Ток, плотность которого в каждой точке пространства не зависит от времени, называется постоянным.

Дифференциальное уравнение поля стационарных токов можно получить исходя из уравнения непрерывности, которое представляет собой математическую форму фундаментального физического закона - закона сохранения заряда. Получим это уравнение, используя макроскопические величины - плотность заряда  $\rho$  и плотность тока  $\vec{j}$ .

### ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Установите планшет с моделируемым полем на стенд и подключите электроды к источнику напряжения.

2. Подключите вольтметр к клеммам в соответствии с рис. 2: один конец подключите к точке D, другой будет являться зондом C.



3. В левую часть планшета под зажимы установите лист миллиметровой бумаги формата А4. При помощи пантографа перенесите изображение электродов на чертеж. Укажите полярность электродов.

4. Найдите ряд точек с потенциалом 2 В. Для этого ручку потенциометра R установите в соответствующее положение. Перемещая зонд от одного электрода к другому, добейтесь нулевого показания вольтметра. При помощи пантографа перенесите положение этой точки на чертеж. Переместив зонд немного в сторону найдите другую точку с тем же потенциалом. Зафиксировав положение 6-8 точек, соедините их плавной линией.

**ВНИМАНИЕ:** Нулевое показание цифрового вольтметра зафиксировать сложно. С достаточной точностью оно определяется в момент перемены знака напряжения на индикаторе полярности.

5. Аналогично получите эквипотенциальные линии для 3, 4, 5, 6, 7 и 8 вольт.

6. Определите компоненты вектора в точках поля, указанных преподавателем. Для этого поместите в эту точку отверстие 1 линейки, соответствующее началу координат. Отсоединив второй провод вольтметра от потенциометра R, измерьте разности потенциалов между точками 1 и 2 и между точками 1 и 3.

Результаты занесите в отчет (с указанием знака!).

Для правильного определения на индикаторе знака общая клемма вольтметра, обозначенная знаком [\*], должна быть подключена к началу координат (точка 1), а другая клемма - к точке 2 или 3. В этом случае потенциалы точек 2 и 3 будут указаны по отношению к точке 1, а не наоборот.

По формулам (6) вычислите компоненты  $\vec{E}_x$ ,  $\vec{E}_y$  (учтите, что  $X = Y = 1$  см.).

7. На чертеже в точке 1 постройте оси координат, отложите проекции  $\vec{E}_x$  и  $\vec{E}_y$  в выбранном масштабе и постройте вектор  $\vec{E}$  (рис.4).

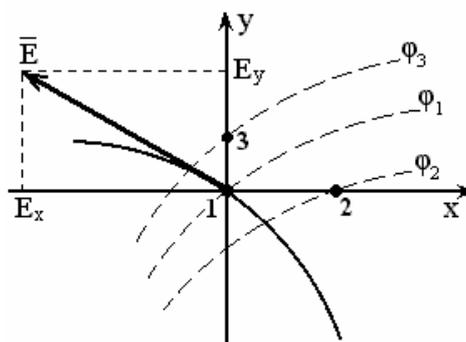


Рис.4

8. Учитывая связь между эквипотенциальными поверхностями и силовыми линиями, постройте на чертеже 5-6 силовых линий. Проверьте, соответствует ли направление построенного вектора положениям теории.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что такое электрическое поле? Чем создается электрическое поле.
2. Перечислить основные свойства заряда.
2. Сформулировать закон взаимодействия зарядов.
3. Дать определение напряженности электрического поля. Как определяется напряженность поля, созданного точечным зарядом?
4. Сформулировать теорему Остроградского – Гаусса для электрического поля.
5. Вывести формулу работы, которая совершается при перемещении заряда в электрическом поле.

6. Ввести понятие циркуляции вектора. Записать теорему о циркуляции вектора напряженности электрического поля. Какие свойства поля вытекают из теоремы о циркуляции вектора напряженности электрического поля?
7. Дать определение потенциала электрического поля. Как определяется потенциал поля точечного заряда?
8. Вывести соотношение, выражающее связь между напряженностью и потенциалов электрического поля.
9. Сформулировать принцип суперпозиции полей.
10. В чем состоит метод моделирования поля с помощью стационарных токов?
11. Как определяется напряженность электрического поля в данной работе?

### ***ЛИТЕРАТУРА***

[1]: §1-3, 17-20; [2]: §1-3, 17-20; [3]: §1-8; [4]: §6,7; [5]: §1.1,1.5,1.6; [6]: §4-6, 10-12, 19-21; [7]: §19,25-28; [11]: 2.3

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Ф-5**

### **ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ МОСТОВЫМ МЕТОДОМ**

#### **Цель работы:**

1. Определить сопротивление резисторов при помощи моста Уитстона.
2. Определить сопротивление схемы при последовательном соединении резисторов.
3. Определить сопротивление схемы при параллельном соединении резисторов.

#### **Оборудование:**

Мост постоянного тока, набор резисторов.

### **КРАТКАЯ ТЕОРИЯ**

#### **Классификация электрических цепей.**

1. По виду тока электрические цепи разделяются на цепи постоянного и цепи переменного или изменяющегося во времени тока.

2. По характеру параметров элементов цепи разделяются на линейные и нелинейные. К линейным цепям относятся цепи, у которых параметры каждого участка (сопротивление  $R$ , индуктивность  $L$ , емкость  $C$ ) не зависят от значений и направлений тока и напряжения. В противном случае цепь относится к нелинейной.

3. По степени сложности цепи бывают простыми и сложными. К простым электрическим цепям относятся цепи, все элементы которых соединены последовательно и во всех элементах протекает один и тот же ток. К сложным цепям относятся цепи с разветвлением.

Ветвь электрической цепи или схемы - это участок цепи, элементы которого соединены последовательно. Узел электрической цепи - это место (точка) соединения более 2-х ветвей. Контур - любой путь вдоль ветвей электрической цепи, начинающийся и заканчивающийся в одной и той же точке.

*Расчет разветвленных цепей* можно произвести, используя законы Кирхгофа. Они являются основными законами, определяющими режим работы электрической цепи.

Первый закон Кирхгофа применяется к узлам электрической цепи. Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю, т.е.

$$\sum_{i=1}^{N-1} I_i = 0 \quad (1)$$

Токи, входящие в узел, считаются положительными, а выходящие из узла - отрицательными. Направление тока на каждом участке цепи между двумя узлами можно выбирать произвольно, сохраняя это направление на всех этапах решения поставленной задачи. Если в результате решения уравнения для каких-либо токов получатся отрицательные численные значения, то это означает, что первоначальные направления токов были выбраны неправильно.

Уравнение (1) можно написать для любого из  $N$  числа узлов цепи, однако независимыми будут только  $N-1$  уравнение.

С точки зрения физики первый закон Кирхгофа является следствием закона сохранения заряда и описывает экспериментально установленный факт, что при постоянных токах заряды в узле электрической цепи не накапливаются.

Второй закон Кирхгофа применяется к любому, выделенному в разветвленной цепи *контуре*: алгебраическая сумма падений напряжений по всему контуру вдоль направления обхода равна сумме всех ЭДС, которые включены в этом контуре:

$$\sum_i I_i \cdot R_i = \sum_i \varepsilon_i \quad (2)$$

Направление обхода каждого контура (по часовой стрелке или против нее) произвольно. Падение напряжения считается положительным, если выбранное заранее направление тока на этом участке между узлами совпадает с направлением обхода контура, и отрицательным, если направление тока противоположно направлению обхода. Э.д.с. считается положительной, если сторонние силы действуют по направлению обхода (сторонние силы внутри источника действуют от “минуса” к “плюсу”), и отрицательной - в противном случае.

Уравнение (2) можно записать для всех контуров, которые могут быть выделены в сложной цепи. Однако независимыми будут лишь уравнения для тех контуров, которые нельзя получить наложением других контуров друг на друга.

Второй закон Кирхгофа является следствием выполнения закона сохранения энергии, т.к. при обходе контура и возвращении в исходную

точку потенциал последней не может измениться. *Измерение параметров электрических цепей* может быть выполнено различными методами и приборами. Выбор того или иного прибора определяется конкретными условиями задачи - ожидаемым значением измеряемой величины, требуемой точностью, имеющимися в распоряжении экспериментатора измерительными приборами.

В большой группе измерительных приборов реализуется метод сравнения измеряемой величины с ее мерой. Мерой называется образец, представляющий собой техническое средство, служащее для вещественного воспроизведения единицы определенной физической величины. Чаще всего применяются приборы, реализующие дифференциальный или нулевой метод сравнения.

При дифференциальном методе сравнения измеряемая величина непосредственно или косвенно сравнивается с мерой, а о результате сравнения судят по разности одновременно производимых этими величинами эффектов. При нулевом методе сравнения измеряемая величина сравнивается с мерой, а результирующий эффект воздействия этих величин на индикатор доводится до нуля. Таким образом, при достижении равновесия, наблюдается исчезновение определенного явления, например тока в участке цепи или напряжения на нем, что может быть зафиксировано при помощи служащих для этой цели приборов - нуль-индикаторов. К приборам, реализующим этот метод сравнения, относятся потенциометры (компенсаторы) и мосты. Примером применения нулевого метода может быть измерение электрического сопротивления мостом с полным его уравниванием.

Мостовые схемы широко применяются в электроизмерительной технике для измерения сопротивления, индуктивности, емкости, добротности катушки, угла потерь конденсаторов, взаимной индуктивности и частоты. Широкое применение мостовых схем объясняется большой точностью измерений, высокой чувствительностью, возможностью измерения различных величин.

Рассмотрим принцип работы одинарного моста (мост Уитстона). Одинарный мост состоит из четырех сопротивлений (плечи моста), соединенных в виде ромба (рис.1). К диагонали 1-3 подключается источник питания. В другую диагональ 2-4 включается индикаторный прибор G (гальванометр).

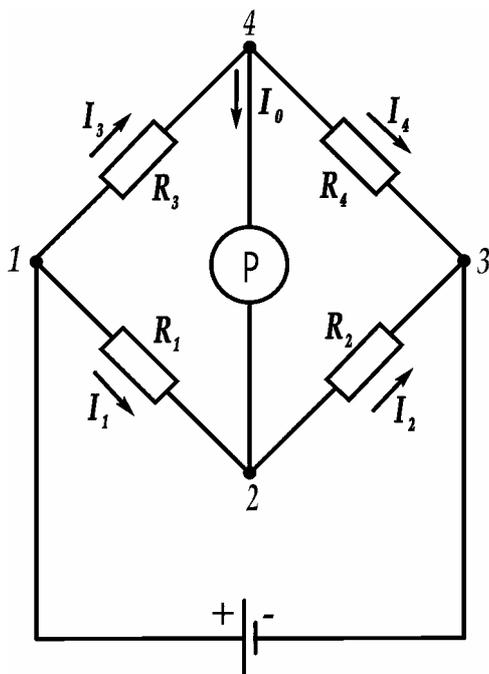


Рис.1 Принципиальная схема моста Уитстона

Расчет всех токов в этой цепи можно провести, используя правила Кирхгофа. Однако возможен более простой путь.

Наибольший практический интерес представляет мост, работающий в режиме нулевого отклонения указателя индикатора. Такой мост называется уравновешенным или сбалансированным. В этом случае реализуется нулевой метод сравнения, т.е ток через гальванометр должен быть равен нулю.

Необходимым условием отсутствия тока в диагонали моста является равенство потенциалов в точках 2 и 4. Из этого следует, что равны попарно падения напряжения  $U_{12} = U_{14}$  и  $U_{23} = U_{43}$ , т.е.

$$I_1 \cdot R_1 = I_3 \cdot R_3 \quad (3)$$

$$I_2 \cdot R_2 = I_4 \cdot R_4 \quad (4)$$

Если учесть, что ток через амперметр, включенный в диагонали моста равен нулю  $I_0 = 0$ , то  $I_0 = I_2$ , а  $I_3 = I_4$  и разделив равенство (3) на равенство (4) получим условие равновесия (баланса) моста:

$$R_1 / R_2 = R_3 / R_4 \quad (5)$$

Таким образом, если включить в одно из плеч моста резистор неизвестной величины, а затем сбалансировать мост, можно по соотношению (5) определить измеряемое сопротивление.

Аналогичный метод используется для измерения емкостей и индуктивностей катушек на мостах переменного тока. В этом случае следует учитывать также емкостное или индуктивное сопротивление каждого плеча.

В качестве примера рассмотрим L- и C- мосты Уитстона. Индуктивный мост изображен на рис.2,а.

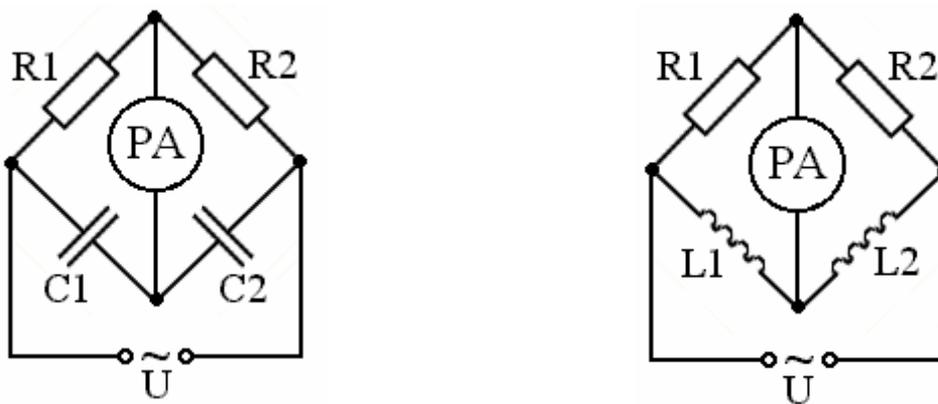


Рис.2 С- и L-мосты Уитстона.

В данном случае необходимо использовать источник переменного напряжения и измерительный прибор, работающий на переменном токе. При наличии переменного тока индуктивное реактивное сопротивление вызовет падение напряжения на катушке индуктивности аналогично тому, как напряжение падает на резисторах в плечах моста. Поэтому, если падение напряжения на  $R_2$  равно падению напряжения на  $L_x$ , то мост уравновешен, из условия равновесия можно определить неизвестную величину  $L_x$

$$L_x = L_s \cdot R_2 / R_1 \quad (6)$$

Для емкостного моста, показанного на рис.2,б, функция реактивного сопротивления является обратной, поскольку реактивное сопротивление конденсатора уменьшается при увеличении его емкости, в то время как реактивное сопротивление катушки при увеличении индуктивности возрастает. Поэтому в состоянии равновесия моста отношение сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  обратно отношению емкостей, т.е.

$$C_x = C_s \cdot R_1 / R_2 \quad (7)$$

В мостах переменного тока необходимым условием баланса является не только баланс активных сопротивлений, но и баланс сдвига фаз между активной и реактивной составляющей.

### **МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА**

Для измерения сопротивлений проводников в данной работе используется мост Уитстона, схема которого изображена на рис.3.

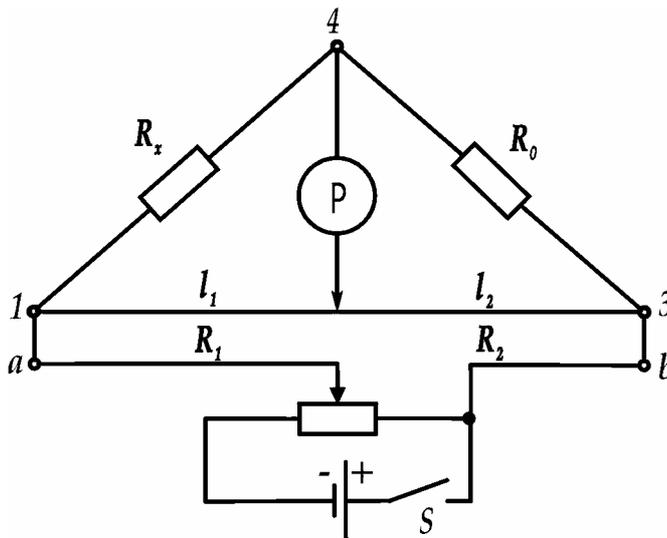


Рис.3 Мост Уитстона

Между точками 1 и 3 натянута однородная нихромовая проволока (реохорд). Вдоль проволоки может перемещаться подвижный контакт 2, который делит ее на две части длиной  $l_1$  и  $l_2$ , обладающими сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ . Сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  составляют два плеча моста. Измеряемое сопротивление  $R_x$  и эталонное сопротивление  $R_0$  (магазин сопротивлений) составляют два других плеча.

К диагонали моста 1-3 подводится регулируемое напряжение. Регулировка напряжения производится при помощи потенциометра  $G$  (ручка сбоку стенда). Схема регулировки собрана внутри лабораторного стенда. На переднюю панель выведены только клеммы  $a$ ,  $b$  и выключатель  $S$ . Регулировка напряжения необходима для увеличения чувствительности моста по мере его балансировки. Для этой же цели служит установленный в цепи гальванометра переключатель "ГРУБО-ТОЧНО" ( на рис.3 не показан). Перемещая контакт 2 можно добиться равного нулю тока через гальванометр, т.е. сбалансировать мост. В этом случае сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_x$  и  $R_0$  будут связаны соотношением, аналогичным (5). Учитывая, что

$$R_1 / R_2 = l_1 / l_2 \quad (6)$$

можно получить формулу для определения  $R_x$

$$R_x = R_0 \cdot (l_1 / l_2) \quad (7)$$

Отметим, что сбалансировать мост можно при любом значении эталонного сопротивления  $R_0$ . Однако, если одно из плеч  $l_1$  или  $l_2$  окажется слишком коротким, то относительная точность измерения длины плеча будет низка, что отразится на точности измерения. Поэтому измерения следует производить при близких значениях  $R_1$  и  $R_2$  (контакт 2 находится в средней части реохорда). При этом близкими будут значения  $R_x$  и  $R_0$ .

Погрешность определения сопротивления по формуле (7) определяется следующими факторами:

1. Погрешностью эталонного сопротивления  $R_0$ , которая определяется классом точности магазина сопротивлений.
2. Погрешностью выполнения соотношения (6), т.е. неоднородностью реохорда.
3. Погрешностью измерения соотношения  $l_1 / l_2$ . Поскольку величины погрешностей  $\Delta l_1$  и  $\Delta l_2$  связаны ( $\Delta l_1 = - \Delta l_2$ ), то погрешность этого отношения можно вычислять как погрешность величины  $l_1 / (l_0 - l_1)$ , где  $l_0$  - длина всего реохорда.
4. Сопротивление подводящих проводов.

### **ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ**

1. Установите переключатель чувствительности гальванометра в положение "ГРУБО". Регулятором напряжения  $R$  (сбоку стенда) установите минимальное напряжение на диагонали 1-3. Выключите тумблер  $S$ . Контакт реохорда установите в среднее положение. Соберите схему согласно рис.3. Сопротивление  $R$  указывается преподавателем.

2. После проверки схемы преподавателем включите тумблер  $S$ . При этом стрелка гальванометра отклонится. Подбором сопротивления магазина  $R$  произведите грубую балансировку моста (добейтесь близкого к нулю тока через гальванометр).

3. Переключатель чувствительности гальванометра переведите в положение "ТОЧНО". Постепенно увеличивая напряжение, произведите точную балансировку моста ползунком реохорда 2.

4. Проверьте правильность работы моста: слегка перемещая ползунок реохорда вправо и влево на 1-2 мм, убедитесь, что стрелка гальванометра колеблется вблизи нулевого положения. Оцените точность установки баланса: измерьте отклонение ползунка реохорда 1, вызывающее отклонение стрелки гальванометра на 1 деление. Запишите результат в отчет.

5. Измерьте величины  $l_1$  и  $l_2$ , занесите результаты в табл.1. По формуле (7) вычислите  $R_x$ .

Таблица 1

$N_0$ $n/n$	$R_x$ $Ом$	$R_0$ $Ом$	$L_1$ $м$	$L_2$ $м$	$\Delta R_0$ $Ом$	$\Delta L$ $Ом$	$\Delta R$ $Ом$

Погрешность установки баланса  $\Delta l = 1 \text{ мм}$ .

6. Установите переключатель чувствительности в положение "ГРУБО". Уменьшите напряжение, передаваемое на мост. Передвиньте контакт реохорда на 5-10 см влево. Вновь сбалансируйте мост сопротивлением  $R_0$  (ГРУБО) и ползунком реохорда (ТОЧНО) согласно п.п.2-5.

7. Повторите измерения по п. 6, передвинув ползунок реохорда вправо от среднего положения.

8. Проведите статистическую обработку полученных значений  $R_x$ . Определите действительное значение сопротивления и доверительную погрешность.

9. Проведите указанные измерения п.п. 1-7 для других сопротивлений  $R_x$ , а также для их параллельного и последовательного соединения. Данные занесите в аналогичные табл.2,3,4.

10. Запишите результаты измерений сопротивлений в установленной форме. Сформулируйте письменно вывод, выполняется ли закон сложения сопротивлений. Определите, какой из факторов - погрешность эталонного сопротивления или погрешность установки баланса больше влияет на погрешность измерений. Для этого оцените относительную погрешность эталонного сопротивления и относительную погрешность величины  $\gamma = l_1 / (l_0 - l_1)$ . Сравните их с относительной погрешностью измерения сопротивления  $\Delta R_x / R_x$ .

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Приведите классификацию электрических цепей.
2. Сформулируйте законы Кирхгофа для расчета разветвленных цепей и их физический смысл. Как определяется число независимых уравнений Кирхгофа? Приведите пример.
3. В чем заключается нулевой метод сравнения измеряемой величины?
4. Перечислите основные элементы моста. Какой мост называется сбалансированным? Чему равны при этом потенциалы диагонали и падения напряжения на плечах?
5. Выведите условие баланса моста. Покажите, что уравнения (3) и (4) соответствуют законам Кирхгофа.

6. Укажите плечи и диагонали моста на схеме экспериментальной установки. Укажите порядок балансировки. Для какой цели служит потенциометр?

7. Как с помощью мостовых схем определить емкость и индуктивность?

8. Какие факторы определяют погрешность измерения сопротивления мостовым методом?

### ***ЛИТЕРАТУРА***

[1]: §41-45; [2]: §40-44; [3]: §35-38; [4]: §28; [5]: §5.2-5.4; [6]: §65, 77; [7]: §57-59; [11]: 2.2.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Ф-6

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОГО УЧАСТКА ЦЕПИ

#### Цель работы:

1. Проверить закон Ома для участка цепи, содержащего э.д.с..
2. Построить распределение потенциала вдоль исследуемого участка цепи.

#### Оборудование:

Источник тока (3 шт.), магазины сопротивлений (3 шт.), миллиамперметр, вольтметр.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

**С т о р о н н и е с и л ы .** Движение положительных зарядов в электрическом поле происходит в сторону от большего потенциала к меньшему. Следовательно, в замкнутой цепи должен существовать хотя бы один участок, на котором заряды перемещаются от меньшего потенциала к большему. Силы, обеспечивающие такое перемещение, называются сторонними. Работа сторонних сил идет на создание и поддержание энергии электростатического поля. Устройства, обеспечивающие возникновение сторонних сил, называются источниками тока.

Природа сторонних сил зависит от типа источника тока: это могут быть силы химического происхождения, силы Лоренца, силы, действующие на заряды со стороны вихревого электрического поля и т.д.. Общее свойство всех сторонних сил - их неконсервативный характер, т.е., перемещая заряды против электростатического поля внутри источника, они не должны препятствовать движению зарядов под действием поля на внешнем участке цепи (т.е. их работа по замкнутому контуру должна быть отличной от нуля).

Величина сторонних сил, действующих на заряд, может быть выражена через напряженность поля сторонних сил

$$F^{CT} = qE^{CT} \quad (1)$$

Работа сторонних сил выражается через электродвижущую силу (э.д.с.).

$$A = q \int E_i^{CT} dl = q\varepsilon \quad (2)$$

Если э.д.с. действует только на участке замкнутой цепи, то интеграл по замкнутому контуру равен интегралу по соответствующему участку.

В общем случае, на заряд  $q$  могут действовать как электростатические, так и сторонние силы. Их работа на участке 1-2 равна

$$A = A^{\text{эл}} + A^{\text{СТ}} = q(\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}) \quad (3)$$

Величина, равная

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12} \quad (4)$$

называется напряжением (или падением напряжения). Она численно равна работе результирующих сил по перемещению единичного заряда ( $|q|=1$ ) на этом участке.

З а к о н О м а для неоднородного участка цепи позволяет вычислить силу тока на неразветвленном участке цепи, если известны характеристики электростатических ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) и сторонних ( $\varepsilon_{12}$ ) сил, а также сопротивление этого участка  $R_{12}$  (рис. 1)

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}}{R_{12}} \quad (5)$$

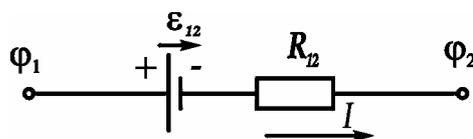


Рис. 1.

В дифференциальной форме закон Ома формулируется через локальные (т.е. определяемые в каждой точке среды) величины

$$j = \frac{E^{\text{эл}} + E^{\text{СТ}}}{\rho} \quad (5')$$

где  $j$ - плотность тока,  $\rho$ - удельное сопротивление среды,  $E^{\text{эл}}$  и  $E^{\text{СТ}}$  - напряженности поля электростатических и поля сторонних сил соответственно. Из формул (4) и (5) следует, что напряжение на участке цепи может быть определено как

$$U_{12} = I \cdot R_{12} \quad (6)$$

При использовании формулы (5) необходимо строго учитывать правила знаков:

1. Направление обхода участка может быть выбрано произвольно, но под  $\varphi_1$ - подразумевается потенциал начальной точки, а  $\varphi_2$  - конечной. Величина  $U_{12}$ - будет положительной, если потенциал падает вдоль направления обхода и отрицательной - если возрастает.

2. Э.д.с. считается положительной, если сторонние силы действуют по направлению обхода. Напомним, что сторонние силы внутри источника действуют от "минуса" к "плюсу" (от меньшего потенциала к большему, т.е. против электростатических сил, созданных этим источником).

3. Сила тока считается положительной, если ток течет по направлению обхода.

4. Сопротивление участка - величина положительная. Формула (5) позволяет также вычислить разность потенциалов на концах любого участка

$$\varphi_1 - \varphi_2 = I \cdot R_{12} - \varepsilon_{12} \quad (7)$$

На практике встречаются два важных частных случая.

1. Сопротивление участка  $R$  мало. Тогда в случае малых токов (или отсутствия тока) величиной  $I R$  можно пренебречь. В этом случае падение потенциалов на концах участка равно э.д.с. с обратным знаком.

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -\varepsilon_{12} \quad (7')$$

На этом основано измерение э.д.с. при помощи вольтметра (измеряющего разность потенциалов). Для повышения точности измерения ток, протекающий через источник, следует либо уменьшить, отключив нагрузку (в этом случае ток источника обусловлен сопротивлением вольтметра), либо вовсе скомпенсировать при помощи другого источника (компенсационный метод).

2. Участок не содержит э.д.с.. В этом случае

$$\varphi_1 - \varphi_2 = I \cdot R_{12} \quad (7'')$$

Графики изменения потенциала в этих случаях выглядят следующим образом:

1. На участке, не содержащем э.д.с. и обладающим сопротивлением  $R$ , потенциал падает вдоль направления протекания тока (рис.2,а) на величину  $I R$ .

2. На участке, содержащем э.д.с. и имеющем пренебрежимо малое сопротивление, потенциал возрастает вдоль направления э.д.с. на величину, определяемую формулой (7'). Возрастание потенциала можно изобразить в виде двух скачков, на двух пластинах гальванического элемента (рис. 2,б). Это связано с тем, что сторонние силы в гальваническом элементе действуют только в приповерхностном слое пластин.

3. Если гальванический элемент обладает внутренним сопротивлением  $r$ , то реализуются одновременно два вышеупомянутых случая: скачкообразное возрастание потенциала на пластинах элемента вдоль э.д.с. и падение

потенциала в электролите между пластинами вдоль направления протекания тока (рис. 2,в).

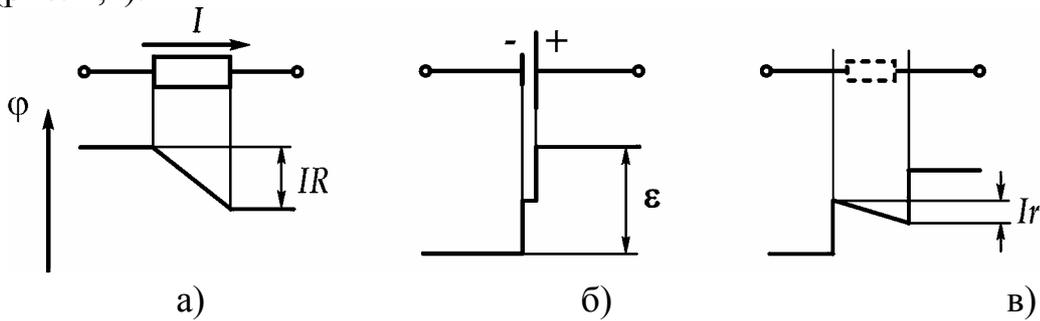


Рис. 2.

Рассмотрим превращение энергии в простейшей замкнутой цепи, выделив в ней два участка: внутренний и внешний (рис. 3).

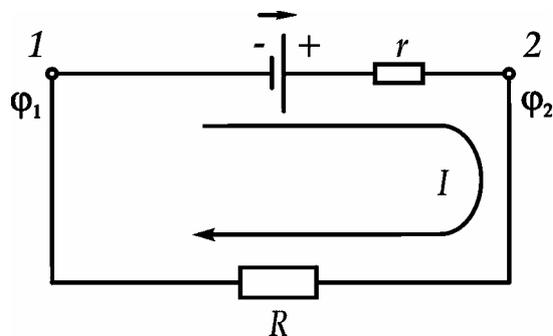


Рис. 3.

При прохождении внутри источника пробного единичного заряда  $|q| = 1$  Кл сторонние силы совершают работу, численно равную  $q\varepsilon$ . Эта работа совершается против электростатического поля и идет (частично) на увеличение потенциальной энергии единичного заряда. Другая часть работы сторонних сил превращается в тепло внутри источника из-за наличия у него внутреннего сопротивления  $r$ . Эта часть работы численно равна падению напряжения внутри источника на участке 1-ε-2.

$$U_{1-\varepsilon-2} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12} = \varepsilon_{12} - (\varphi_2 - \varphi_1) \quad (8)$$

Из формулы (8) видно, что в тепло превращается разность между работой сторонних сил и изменением потенциальной энергии пробного заряда. Работа сторонних сил связана с преобразованием химической энергии аккумулятора (или механической энергии в генераторе) в энергию электростатических сил (с частичной потерей внутри источника).

На внешнем участке 2-R-1 потенциальная энергия электростатических сил превращается в тепло.

$$U_{2-R-1} = I \cdot R = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (9)$$

(Возможно превращение и в другие виды энергии, но тогда на этом участке также появятся сторонние силы).

Если ток внутри источника течет против э.д.с. (под действием других источников), то работа электростатических сил внутри источника будет положительной, а сторонних сил - отрицательной. В этом случае энергия электростатических сил превращается в химическую энергию (или механическую: генератор будет работать как электродвигатель).

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент производится на установке, схема которой показана на рис. 4

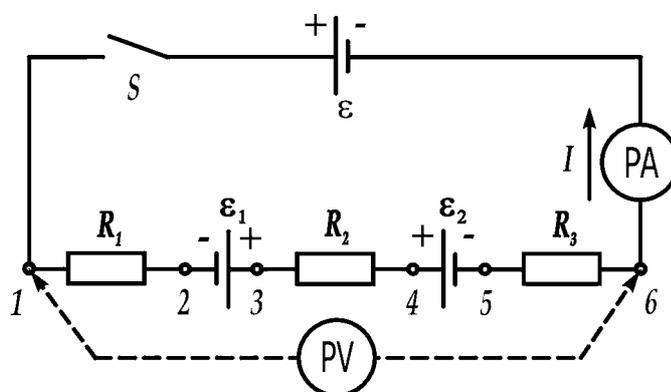


Рис. 4

Исследуемый участок 1-6 содержит 2 источника э.д.с. и (аккумуляторы), имеющих внутренние сопротивления и 3 переменных резистора  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  (магазины сопротивлений). Источник э.д.с. служит для создания на участке 1-6 отличной от нуля разности потенциалов. Сопротивления источников пренебрежимо малы.

Формула (5) может быть применена для любого участка цепи. Ток в замкнутой цепи создается тремя источниками тока, однако, для расчета тока на любом участке достаточно знать э.д.с. только на этом участке и разность потенциалов на его концах. Разность потенциалов измеряется при помощи вольтметра  $PV$ .

Запомним правило: вольтметр измеряет разность потенциалов между двумя точками, а не напряжение! Напряжение, в соответствии с определением (4), определяется не между двумя точками, а для конкретного участка цепи. И только на участках цепи, не содержащих э.д.с., значение напряжения совпадает с разностью потенциалов, что и дает основание (только в этом случае!) говорить, что вольтметр измеряет напряжение. Ток в цепи измеряется миллиамперметром  $PA$ .

В ходе эксперимента необходимо решить две задачи: 1. Рассчитать ток на участке 1-6 по формуле (5) и сравнить его с показаниями прибора *РА*. 2. Для каждого из участков 1-2, 2-3,... 5-6 рассчитать и построить график изменения потенциала по формуле (7). Сравнить суммарный результат изменения потенциала на участке 1-6 с показаниями прибора *PV*.

### **ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ**

1. Заготовьте таблицу

№ <i>n/n</i>	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$r_1$	$r_2$	$\varphi_{12}$	$\varphi_{34}$	$\varphi_{16}$	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$I$
	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>В</i>	<i>В</i>	<i>В</i>	<i>В</i>	<i>В</i>	<i>А</i>

2. Соберите схему в соответствии с рис.4. При разомкнутом ключе *S* измерьте вольтметром *PV* э.д.с. источников  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ . Запишите результаты в таблицу (Не забудьте правильно определить знаки э.д.с для участка 1-6).

3. Установите сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  по указанию преподавателя. Замкните цепь и измерьте ток в цепи  $I$  (амперметром *РА*) и разность потенциалов - на концах участка 1-6 (вольтметром *PV*). Результаты запишите в таблицу. Разберите цепь.

4. Измерьте разность потенциалов на участке включения э.д.с. и определите величину э.д.с..

5. Вычислите падение напряжения на внутренних сопротивлениях  $r_1$  и  $r_2$  источников. Для этого необходимо определить внутренние сопротивления источников тока. Соберите вспомогательную цепь, включающую источник тока, амперметр, эталонное сопротивление (магазин сопротивлений). Сопротивление магазина 800-1000 Ом. Используя закон Ома для замкнутой цепи, рассчитайте внутреннее сопротивление источника.

6. Вычислите значение тока  $I'$  на участке 1-6 по формуле (5) и сравните с результатом  $I$  измерения прибором *РА*. Определите меру расхождения результатов

$$\delta = \frac{I - I'}{I} \cdot 100\%$$

7. Для каждого из участков 1-2, 2-3,...5-6 рассчитайте изменения потенциала по формулам (7)-(7").

8. Изобразите на миллиметровке схему участка 1-6 (длиной 10-15 см). Постройте под схемой график распределения потенциала на участках 1-2, 2-

3 и т.д. в соответствии с рис.3, используя результаты расчетов в п.5.(Рекомендуемый масштаб: 1 В = 2- 2,5 см).

9. Определите по графику падение потенциала ( $\phi_1-\phi_6$ ) и сравните его с показаниями вольтметра  $PV$ .

10. Объясните превращения энергии на каждом из участков 1-2, 2-3 и т.д., а также на участке 1-6 в целом.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Дайте определение сторонних сил. Какое устройство называется источником тока?

2. Дайте определение э.д.с. и напряжения на участке цепи. Каков их физический смысл?

3. Сформулируйте закон Ома для неоднородного участка цепи и правила знаков для силы тока, э.д.с. и падения потенциала.

4. Опишите превращения энергии внутри источника тока и на активном сопротивлении.

5. Объясните изменение потенциала внутри источника тока и на активном сопротивлении.

6. В каком случае э.д.с. можно измерять вольтметром?

### **ЛИТЕРАТУРА**

[1]:§42-43; [2]:§40-44; [3]:§35-38; [4]: §26; [5]: §5.3; [6]: §71-76; [7]: §54,60; [10]:§19; [11]: 2.4.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Ф-7**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ КПД ИСТОЧНИКА ТОКА**

**Цель работы:**

1. Экспериментально установить зависимость полезной мощности от тока в цепи и сопротивления нагрузки.
2. Проверить условие максимальной мощности, выделяемой на нагрузке.

**Оборудование:**

Амперметр, цифровой вольтметр, два реостата, источник тока.

**КРАТКАЯ ТЕОРИЯ**

В электрической цепи можно выделить две части: внешнюю и внутреннюю, содержащую источник тока (рис. 1). Во внешнюю часть цепи включаются все остальные элементы цепи, которые являются нагрузкой. На нагрузке выделяется полезная мощность.

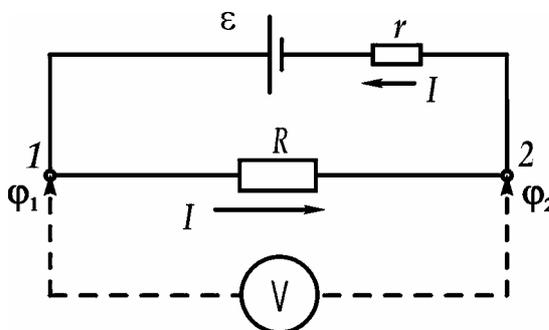


Рис. 1.

Источник тока характеризуется электродвижущей силой  $\varepsilon$  и внутренним сопротивлением  $r$ . Электродвижущей силой источника тока называется его энергетическая характеристика, которая численно равна работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда внутри источника. Сторонними являются все силы за исключением электростатических. Особенностью действия сторонних сил является их способность перемещать заряд от меньшего потенциала к большему, в то время как электростатические силы перемещают заряд от большего потенциала к меньшему.

Рассмотрим электрическую цепь с направлением обхода против часовой стрелки (рис. 1). Работа электростатических сил при перемещении заряда по замкнутому контуру равна нулю. Поэтому полная работа  $A$  на внутреннем и внешнем участках будет равна работе сторонних сил. По определению э.д.с. эта работа равна

$$A = q\varepsilon \quad (1)$$

Сторонние силы действуют внутри источника. Работа сторонних сил на внутреннем участке 2-1 идет на увеличение потенциальной энергии зарядов (создание и поддержание электростатического поля с разностью потенциалов  $(\varphi_1 - \varphi_2)$ ), часть работы  $A_{внт}$  превращается в тепло внутри источника.

$$A_0 = W_1 - W_2 + A_{внт} \quad (2)$$

Полезная работа на *внешнем* участке 1-2 совершается за счет энергии электростатического поля

$$A_n = W_1 - W_2 = q(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (3)$$

Эта работа идет на преодоление сопротивления движению заряда и превращается в тепло (в нагревательном элементе). Кроме того, эта энергия может быть преобразована в механическую работу (в электродвигателе) или химическую энергию (при зарядке аккумулятора). При этом на внешнем участке будут действовать также сторонние силы. В случае электродвигателя - это э.д.с. электромагнитной индукции, возникающая при вращении ротора двигателя, в случае аккумулятора - э.д.с. аккумулятора, в котором действуют электрохимические силы. Предположим, что на внешнем участке сторонние силы отсутствуют: например, нагрузка представляет собой нагревательный элемент, обладающий сопротивлением  $R$ . Потери энергии внутри источника согласно формулам (1), (3) равны

$$A_{внт} = q\varepsilon - q(\varphi_1 - \varphi_2) = q(\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon) \quad (4)$$

Правая часть равенства (4) имеет смысл полной работы сторонних и электростатических сил по перемещению заряда  $q$  на внутреннем участке в направлении тока. Работа, совершаемая в единицу времени, называется мощностью. Из соотношений (3) и (4) следует, что мощность электрического тока определяется соотношением:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{q(\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon)}{t} = I \cdot U \quad (4^1)$$

Величина, равная

$$U_{внт} = \varphi_2 - \varphi_1 + \varepsilon \quad (5)$$

является падением напряжения на внутреннем участке 2-1 (с учетом направления обхода). В соответствии с законом Ома это падение напряжения равно

$$U_{внт} = I r \quad (6)$$

Падение напряжения на внешнем участке 1-2 равно

$$U_n = \varphi_1 - \varphi_2 = I R \quad (7)$$

Закон Ома для замкнутой цепи

$$\varepsilon = I R + I r \quad (8)$$

по существу выражает закон сохранения энергии в форме (2) при  $|q| = I$ . Вольтметр, подключенный к клеммам нагрузки, покажет разность потенциалов между этими точками, которая равна падению напряжения на внешнем участке (т.к. э.д.с. на этом участке отсутствует). Тогда из формул (5) и (6) следует

$$U_n = \varepsilon - U_{внт} = \varepsilon - I r \quad (9)$$

Формула (9) выражает закон перераспределения напряжения между внутренним и внешним участками цепи: напряжение на внешнем участке будет меньше э.д.с. на величину падения напряжения внутри источника.

Зависимость  $U_n(I)$  в соответствии с формулой (9) является линейной: коэффициент пропорциональности равен внутреннему сопротивлению, а свободный член - э.д.с. При уменьшении сопротивления нагрузки и возрастании тока в цепи показания вольтметра будут уменьшаться. Если же цепь разомкнута, а сопротивление вольтметра велико, то ток в цепи будет весьма мал и показания вольтметра будут близки к э.д.с.

Умножив правую и левую часть уравнения (9) на силу тока  $I$ , получим закон перераспределения мощности

$$U_n I = \varepsilon I - I^2 r \quad (10)$$

или

$$P_n = P_{ист} - P_{ном} \quad (10')$$

Здесь:

$$P_n = U_n I \quad (11)$$

$P_n$ - это полезная мощность, выделяемая на нагрузке. Первый член в правой части

$$P_{ист} = \varepsilon I \quad (11')$$

$P_{ист}$  - это мощность развиваемая источником (линейно зависит от тока).

Второй член в правой части

$$P_{ном} = I^2 r \quad (11'')$$

$P_{ном}$  - мощность потерь внутри источника (квадратичная функция тока).

При  $I = 0$ , а также  $I = I_{кз} = \varepsilon / r$  (короткое замыкание:  $R = 0$ ) полезная мощность равна нулю: при разомкнутой цепи ( $R = \infty, I = 0$ ) источник не работает, а в режиме короткого замыкания вся мощность источника превращается в тепло внутри источника. Зависимость  $P_n(I)$  будет иметь максимум (это можно увидеть качественно при графическом анализе формулы (10)).

Выясним, при каких условиях полезная мощность будет иметь максимальное значение. Исследуем функцию (10) на экстремум

$$\frac{dP_H}{dI} = \varepsilon - 2Ir = 0 \quad (\text{при } I = I_m)$$

откуда

$$I_m = \frac{\varepsilon}{2r} = \frac{I_{кз}}{2} \quad (12)$$

Из сравнения формул (12) и (8) следует, что в режиме максимальной мощности  $R = r$ .

Введем коэффициент полезного действия источника тока

$$\eta = \frac{P_H}{P_{ист}} \quad (13)$$

Из формул (10-10') следует, что

$$\eta = \frac{IR}{\varepsilon} = \frac{R}{(R+r)} \quad (14)$$

В режиме короткого замыкания ( $R = 0$ )  $U = 0$  и вся мощность сторонних сил теряется внутри источника, к.п.д. равен нулю. В режиме максимальной мощности к.п.д. равен 0,5. Наиболее экономичный режим достигается при малых токах нагрузки, когда  $R \gg r$ . В этом случае  $\eta \approx 1$ .

### **МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА**

Для исследования зависимости полезной мощности и к.п.д. источника от нагрузки собирается схема по рис. 2.

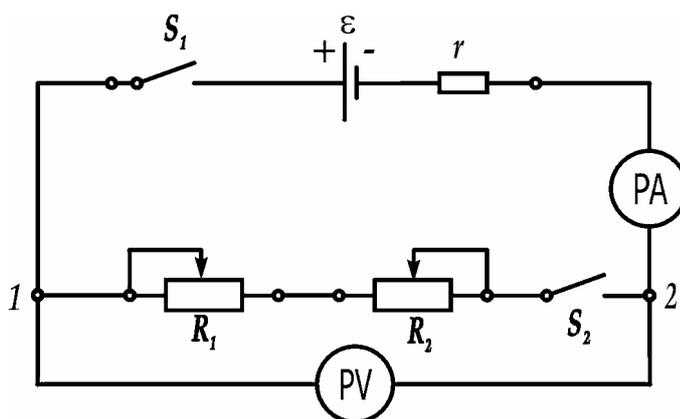


Рис 2.

Напряжение на нагрузке измеряется цифровым вольтметром, обладающим большим входным сопротивлением. Поэтому при разомкнутом ключе показания вольтметра практически равны э.д.с. Сопротивление внешней цепи  $R$  изменяется при помощи реостатов  $R_1$  и  $R_2$ , сила тока измеряется амперметром  $PA$ .

### **ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ**

1. Соберите схему по рис. 2. Перед началом работы реостаты  $R_1$  и  $R_2$  надо включить на максимальное сопротивление.
2. Заготовьте таблицу

Таблица

$N_2$	$I$	$U$	$R$	$r$	$P_n$	$P_{уст}$	$P_{ном}$	$\eta$
$n/n$	$A$	$B$	$Om$	$Om$	$Bm$	$Bm$	$Bm$	

3. Подключить источник тока в цепь при помощи ключа  $S_1$ , оставляя ключ  $S_2$  разомкнутым. Измерить вольтметром э.д.с. источника тока  $\varepsilon$ . Результат запишите в отчет.

4. Замкнуть ключ  $S_2$ . Изменяя при помощи реостатов силу тока от минимального, измеряемого амперметром, до максимального значения через  $0,05$  А измерьте 8-12 значений тока  $I$  и напряжения  $U$ . Результаты занесите в таблицу.

Примечание: При включении амперметра в соответствии с рис. 2, его сопротивление включается во внутренний участок цепи. Поэтому во время эксперимента чувствительность амперметра переключать нельзя, т.к. сопротивление внутреннего участка не будет оставаться постоянным на протяжении всего опыта. Амперметр можно включить также в разрыв участка 1-2. Тогда его сопротивление войдет в сопротивление нагрузки. Однако в этом случае не удастся получить режим короткого замыкания.

## **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ**

1. Постройте оси графика зависимости  $U(I)$ ; выберите масштаб, нанесите экспериментальные точки  $I, U$ .

2. Через экспериментальные точки проведите оптимальную прямую, определите по графику э.д.с. и внутреннее сопротивление  $r$ . (Можно использовать метод наименьших квадратов с расчетом на ЭВМ).

3. Для каждой точки вычислите значения  $R, P_n, P_{уст}, P_{ном}, \eta, r$  по формулам (7),(8),(9),(11-11"),(14). Предварительно получите формулы для расчета этих величин в явном виде.

4. Рассчитайте среднее значение внутреннего сопротивления  $\langle r \rangle$ . Сравните результаты измерения э.д.с. и внутреннего сопротивления с соответствующими результатами, полученными в п. 2 графическим путем из зависимости  $U(I)$ .

5. Постройте на миллиметровой бумаге графики зависимости полезной мощности, мощности источника, мощности потерь и к.п.д. от силы тока в цепи:  $P_n = P_n(I), P_{уст} = P_{уст}(I), P_{ном} = P_{ном}(I), \eta = \eta(I)$ . Графики  $P_n(I), P_{уст}(I)$ , и  $P_{ном}(I)$  можно построить совмещенными. По графику определите величину тока  $I$ , при которой полезная мощность будет максимальной. Рассчитайте соответствующее сопротивление внешней цепи  $R$  по формулам (7),(11).

7. Сформулируйте письменно выводы по результатам Вашего эксперимента: - Какой характер имеет зависимость  $P_n(I)$ ? При каком значении  $R$  полезная мощность максимальна? Оцените степень расхождения величин  $R$  и  $r$  (например, вычислив параметр  $\varepsilon = (R - r)/r$ ). Чему равен к.п.д. цепи в этом режиме?

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Начертите схему экспериментальной установки. Укажите внешний и внутренний участки цепи.

2. Запишите формулы мощности и работы: - сторонних сил - электростатических сил. Какие силы действуют на каждом участке цепи?

3. Дайте определение падения напряжения. Запишите формулу для падения напряжения на внешнем участке. В чем состоит явление перераспределения напряжения на внутреннем и внешнем участках цепи? Почему, при возрастании тока, напряжение на нагрузке уменьшается? Когда показания вольтметра равны э.д.с.?

4. Выведите условие максимальной полезной мощности. Почему при значительном возрастании силы тока ( $I > I$ ) полезная мощность уменьшается, несмотря на рост мощности источника тока?

5. Покажите на графике, как будут зависеть от силы тока мощности: - источника - потерь – полезной. Постройте эти графики качественно по формулам (10'),(11'),(11").

***ЛИТЕРАТУРА:***

[2]: §42; [5]: §27; [6]: §78; [7]: §60; [10]:§19; [11]: 2.6.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Ф3-8

### ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ЭЛЕКТРОДИНАМОМЕТРОМ.

#### Цель работы:

1. Определить индукцию магнитного поля в зазоре электромагнита.
2. Вычислить плотность витков обмотки электромагнита, установить характер зависимости  $B=f(I_M)$ .

#### Оборудование:

Электромагнит, электродинамометр, источники питания, два амперметра, разновесы.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Как известно, движущийся заряд подобен электрическому току. Он возбуждает в окружающем пространстве магнитное поле, через которое взаимодействует с другими движущимися зарядами и токами.

Для определения силы магнитного взаимодействия рассмотрим заряд  $q$ , движущийся во внешнем магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ . Опыт показывает, что эта сила зависит от величины заряда  $q$ , его скорости  $\vec{v}$ , индукции внешнего поля  $\vec{B}$ , а также от взаимного расположения векторов  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$ . Эта эмпирическая зависимость была сформулирована Лоренцом в виде закона:

$$\vec{F} = q[\vec{v}; \vec{B}] \quad (1)$$

Сила, действующая на частицу в магнитном поле, получила название силы Лоренца. Из формулы (1) видно, что направление силы  $\vec{F}$  определяется правилом векторного произведения (см. рис.1).

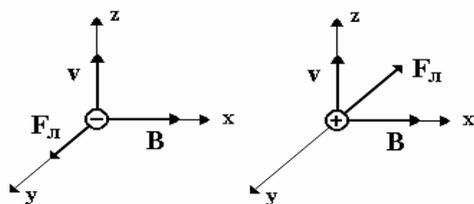


Рис. 1. Сила Лоренца.

Если проводник, по которому течет ток, находится в магнитном поле, то на каждый носитель тока действует сила:

$$\vec{F} = e \cdot [\vec{v} + \vec{u}, \vec{B}] \quad (2)$$

Здесь  $\vec{v}$  - скорость хаотического движения носителя,  $\vec{u}$  - скорость упорядоченного движения.

От носителя тока действие этой силы передается проводнику, по которому он перемещается. В результате на проводник с током в магнитном поле действует сила.

Найдем величину  $d\vec{F}$ , действующей на элемент проводника длиной  $dL$ . Усредним выражение (2) по всем источникам тока,  $dL$ :

$$\langle \vec{F} \rangle = e [(\langle \vec{v} \rangle + \langle \vec{u} \rangle), \vec{B}] = [\langle \vec{u} \rangle, \vec{B}] \quad (3)$$

(здесь  $\vec{B}$  - магнитная индукция в том месте, где находится элемент  $dL$ ).  
Число носителей тока в элементе  $dL$  равно:  $n S dL$ ,

где  $n$  - концентрация носителей,

$S$  - площадь поперечного сечения проводника в данном месте.

Умножив (3) на число носителей, найдем интересующую силу:

$$d\vec{F} = \langle \vec{F} \rangle n s dL = [ne \langle \vec{u} \rangle, \vec{B}] \cdot S \cdot dL \quad (4)$$

Приняв во внимание, что произведение  $ne \langle \vec{u} \rangle = \vec{j}$  - есть плотность тока

$$d\vec{F} = [\vec{j}, \vec{B}] \cdot S \cdot dL \quad (5)$$

Заменив  $\vec{j} \cdot S \cdot dL$  на  $\vec{j} \cdot S \cdot dL = I \cdot d\vec{L}$ , приходим к известной формуле, выражающей закон Ампера: сила, действующая на проводник с током  $I$  длиной  $dL$  в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ , имеет вид:

$$d\vec{F} = I [d\vec{L}, \vec{B}] \quad (6)$$

Модуль силы Ампера вычисляется по формуле:

$$dF = I B \sin \alpha \cdot dL \quad (7)$$

где  $\alpha$  - угол между вектором  $\vec{B}$  и элементом тока  $I d\vec{L}$  (см. рис.2).

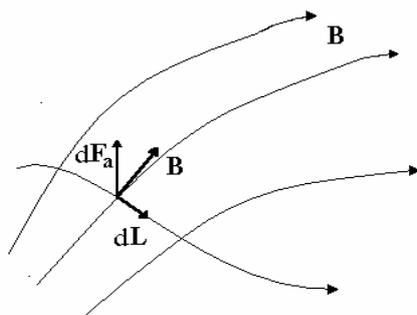


Рис.2. К выводу силы Ампера.

Анализируя выпрямление (7) приходим к выводу, что действие магнитного поля на проводник с током может быть использовано для измерения индукции магнитного поля:

$$B = \frac{1}{I} \cdot \frac{dF_a}{dL} \quad (8)$$

здесь  $dF_a$  - сила, действующая на проводник длиной  $dL$ , ориентированный перпендикулярно линиям магнитной индукции. Выражение (8) служит также для определения единицы индукции магнитного поля. В системе СИ магнитную индукцию измеряют в теслах (Тл). 1Тл - это индукция однородного магнитного поля, которое действует на каждый метр прямолинейного проводника с током в 1А, расположенного перпендикулярно полю, с силой в 1Н.

$$[B] = \frac{[F]}{[I] \cdot [L]},$$

$$Тл = \frac{Н}{А \cdot м}.$$

### **МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА**

В настоящей работе магнитная индукция поля, созданного током электромагнита между полюсами сердечника, измеряется при помощи электродинамометра. Электродинамометр представляет собой коромысло, вращающееся вокруг оси  $OO'$  (рис.3), на котором укреплен проводник с током  $I$ , помещенный между полюсами электромагнита, в магнитное поле. При отсутствии тока в рамке система сбалансирована. Если через рамку пропустить ток, то на проводник  $ab$  длиной  $l$  будет действовать сила Ампера, вследствие чего рамка перемещается вверх или вниз в зависимости от направления тока, равновесие нарушается (силы, действующие на вертикальные отрезки проводника вызывают незначительную деформацию рамки и не сообщают ей поступательного движения). На отрезок рамки  $ab$  длиной  $l$  будет действовать сила Ампера:

$$F = I \cdot B \cdot l \cdot \sin \alpha \quad (9)$$

Т.к. поле между полюсами магнита можно считать однородным, то проводник составляет с вектором магнитной индукции прямой угол. Тогда силу Ампера можно записать в виде:

$$F = I \cdot B \cdot l \quad (9^1)$$

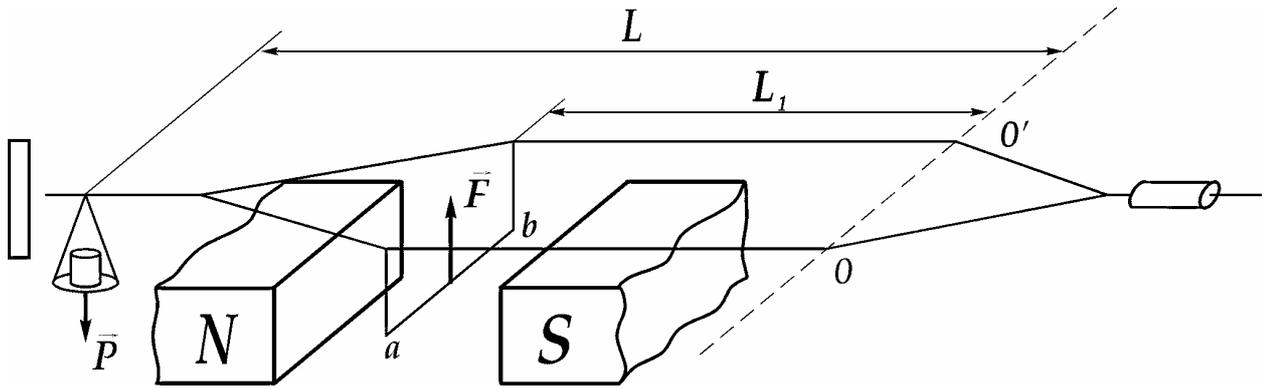


Рис.3. Схема электродинамометра.

Таким образом, зная длину  $l$  активной части проводника, силу тока  $I$  и измеряя силу Ампера, можно определить индукцию магнитного поля, в которое помещена рамка.

Величину силы Ампера найдем, восстанавливая равновесие системы. Для этого помещаем перегрузок  $P$  на чашечку, подвешенную к коромыслу. Как известно, в состоянии равновесия сумма моментов всех сил, приложенных к системе относительно любой горизонтальной оси равна нулю. Запишем правило моментов относительно оси  $OO'$ :

$$PL - L_1 F_1 = 0 \quad , \quad (10)$$

где  $L$  - плечо силы  $P$ ,  $L_1$  - плечо силы  $F$ .

Решая совместно (9) и (10) найдем выражение для экспериментального определения  $B$ :

$$B = \frac{L}{L_1 \cdot l} \cdot \frac{P}{I} \quad (11)$$

Заметим, что коэффициент

$$B = \frac{L}{L_1 \cdot l} \quad (12)$$

определяется размерами установки, назовем его постоянной прибора. С учетом (12) рабочая формула принимает простой вид:

$$B = K \frac{P}{I} \quad (13)$$

### **ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ**

1. Измерьте величины  $l$ ,  $L$ ,  $L_1$ . Вычислите постоянную прибора по формуле (12) и запишите в отчет.

2. Заготовьте таблицу:

$N$	$C$	$I$	$I$	$P$	$B_i$	$\Delta B_i$	$\Delta B_i^2$
$n/n$	$A/\text{дел}$	$A/\text{дел}$	$A$	$H$	$Tл$		
1							
2							
3							
4							
5							
				$\langle B \rangle =$		$\Delta B =$	

3. Соберите схему согласно рис.4.

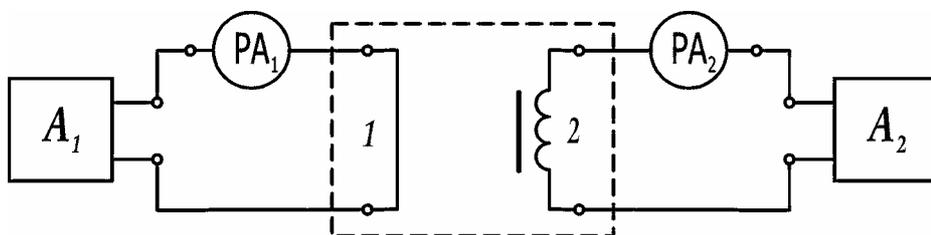


Рис. 4. Электрическая схема установки.

4. Установите ток магнита  $I_M = 0.5$  А. При выключенном токе рамки установите стрелку коромысла против нулевой отметки шкалы.

5. Положите на чашку груз минимальной массы. Изменяя силу тока в рамке, восстановите нарушенное равновесие. Измерьте силу тока в рамке  $I_P$  в делениях шкалы (измерения проводите при максимальной чувствительности прибора). Определите соответствующую цену деления прибора  $C$ . Результаты занесите в таблицу.

6. Прделайте п.5 с другими имеющимися грузами (не менее 5 раз).

7. Рассчитайте магнитную индукцию по формуле (13) для каждого тока рамки. Произведите статистическую обработку результатов. Определите  $\langle B \rangle$  и  $\Delta B$ .

8. Выполните п.п. 5-7 для токов магнита от 0,6 до 1 А через  $\Delta I = 0.1$  А. Результаты занесите в таблицу, аналогичную табл.1.

9. Учítывая, что при  $I_M = 0$ ,  $B = 0$ , постройте график зависимости  $B = f(I_M)$ . На графике укажите интервал  $\Delta B_i$  разброса для каждого значения  $B_i$ .

10. Используя график зависимости  $B = f(I_M)$ , вычислите плотность витков катушки электромагнита. Рассеянием магнитного потока пренебречь, поле в зазоре сердечника считать однородным.

11. Сделайте выводы:

- Зависит ли ток рамки в состоянии равновесия от массы груза  $P$  ?  
Почему?

- Зависит ли результат измерения индукции от тока рамки  $I_P$ ? Обоснуйте ответ, проанализировав формулу (9).

- Как зависит измеряемое поле  $B$  от тока  $I_M$  в обмотке электромагнита?

- Всегда ли зависимость  $B = f(I_M)$  линейна? Обоснуйте ответ.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Изобразите на схеме движущийся в магнитном поле заряд. Укажите пространственное направление силы Лоренца. Запишите формулу.

2. Изобразите проводник с током в магнитном поле. Определите на чертеже направление силы Ампера. Выведите формулу для силы Ампера.

3. В каких природных явлениях, технических устройствах проявляют действие силы Лоренца и силы Ампера, что общего Вы находите между этими силами?

4. Как определяется индукция магнитного поля в данном эксперименте?  
Начертите схему электродинамометра.

5. Выведите рабочую формулу.

### **ЛИТЕРАТУРА**

[1]: §49-51; [3]: §42-45; [4]: §39; [5]: §6.1-6.3,6.6; [6]: §91-96; [7]: §80-82,86,87; [11]: 2.3.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Э-9

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ФОКУСИРОВКИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

#### Цель работы:

1. Изучить устройство электроннолучевой трубки.
2. Ознакомиться с методом магнитной фокусировки электронных пучков.
3. Определить удельный заряд электрона.

#### Оборудование

Электроннолучевая трубка, соленоид, блок питания, амперметр, реостат.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

На движущийся в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  электрический заряд действует сила Лоренца

$$\vec{F} = e[\vec{v}; \vec{B}] \quad (1)$$

где  $\vec{v}$  - скорость движения заряда.

В скалярном виде можно записать:

$$F = e \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

Сила Лоренца перпендикулярна плоскости, содержащей вектор магнитной индукции и вектор скорости движения заряда. Характер движения частицы в однородном поле зависит от угла  $\alpha$  между направлением вектора скорости  $\vec{v}$  и вектора индукции  $\vec{B}$  магнитного поля.

1.  $\alpha = \pi/2$ . Вектор скорости заряда  $\vec{v}$  перпендикулярен вектору магнитной индукции  $\vec{B}$ , в этом случае сила Лоренца  $\vec{F}$  имеет максимальное значение  $F = e v B$  и направлена перпендикулярно к вектору скорости  $\vec{v}$  и вектору магнитной индукции  $\vec{B}$ . Эта сила создает центростремительное ускорение и заставляет электрон двигаться по окружности в плоскости, перпендикулярной к вектору индукции магнитного поля  $\vec{B}$  (направление вектора  $\vec{B}$ , указано на рисунке крестиками, т.е. вектор направлен за плоскость чертежа) (рис. 1).

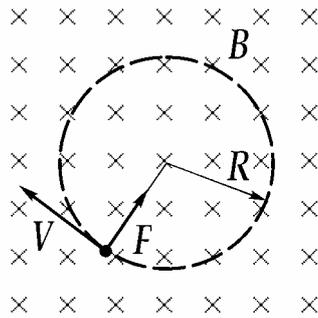


Рис. 1.

2.  $\alpha = 0$ . Вектор скорости заряда параллелен вектору магнитной индукции, тогда  $F = e v B \sin \alpha = 0$ , магнитное поле никакого действия на заряд не производит.

3.  $0 < \alpha < \pi / 2$ . Вектор скорости заряда направлен под острым углом к вектору магнитной индукции (рис. 2а), тогда скорость движения электрона можно разложить на две составляющие, одна из которых  $\vec{v}_n$  перпендикулярна, а другая  $\vec{v}_r$  параллельна магнитному полю.

$$v_n = v \cdot \sin \alpha \tag{3}$$

$$v_r = v \cdot \cos \alpha$$

Таким образом, на величину силы Лоренца  $\vec{F}$ , помимо величины поля, влияет только нормальная составляющая скорости. Справедливо и обратное утверждение - сила Лоренца изменяет только нормальную составляющую скорости (почему?). Движение электрона можно рассматривать как сложное движение со скоростями  $v_n$  и  $v_r$ . В этом случае можно утверждать, что сила Лоренца не влияет на движение вдоль поля (движение по прямой) и является причиной изменения направления нормальной составляющей скорости (движение по окружности). Одновременное смещение заряда вдоль прямой и по окружности приводит к движению заряда по винтовой линии (рис.2а).

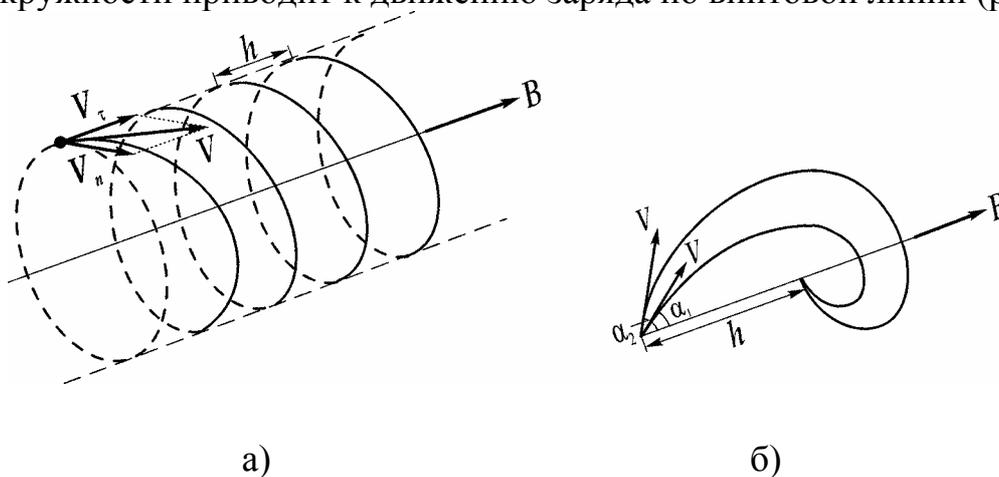


Рис. 2.

При движении по окружности (в плоскости, перпендикулярной к вектору  $\vec{B}$ ), сила Лоренца является центростремительной:

$$e \cdot v_n \cdot B = \frac{mv_n^2}{2} \quad (4)$$

Тогда время одного оборота  $T$  с учетом (4) равно:

$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{v_n} = \frac{2m}{eB} \quad (5)$$

За время одного оборота электрон, участвуя в равномерном и прямолинейном движении вдоль поля, сместится в этом направлении на расстояние, равное шагу винта  $h$ :

$$h = v_\tau T \quad (6)$$

Из (2), (5), (6) следует, что:

$$h = \frac{2\pi \cdot m \cdot v \cdot \cos \alpha}{e \cdot B} \quad (7)$$

Рассмотрим важный для практики случай, когда углы малы

( $\alpha \ll 1$ ). Тогда  $\cos \alpha \approx 1 - \frac{\alpha^2}{2}$  и, с точностью до величин более высокого порядка малости, чем  $\alpha$ , можно положить  $\cos \alpha \approx 1$ . В этом случае

$$h = \frac{2\pi m v}{eB} \quad (8)$$

Таким образом, путь  $h$ , пройденный электроном в магнитном поле за один оборот, не зависит от угла (для малых углов). Поэтому все электроны, вышедшие из одной точки в разных направлениях под небольшими углами к магнитному полю, после одного оборота вновь соберутся в одной точке (рис. 2.6). В этом заключается принцип магнитной фокусировки электронов. Соотношение (8) может служить для определения удельного заряда электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{2v}{hB} \quad (9)$$

Для осуществления эксперимента электроны разгоняются в электрическом поле с разностью потенциалов  $U$  и приобретают кинетическую энергию:

$$\frac{mv^2}{2} = eU \quad (10)$$

Решая совместно (9) и (10), можно найти:

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U}{h^2 B^2} \quad (11)$$

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка состоит из электроннолучевой трубки (ЭЛТ), помещенной в магнитное поле, и блока питания БП. Магнитное поле, создаваемое катушкой-соленоидом с большим числом витков, направлено вдоль оси ЭЛТ. Катушка выполнена на картонном каркасе из толстого изолированного медного провода (намотка в 4 слоя; 19,1 витков на 1 см). Питание катушки осуществляется от аккумуляторов через реостат  $R$ , ток катушки фиксируется амперметром  $PA$ . ЭЛТ дает возможность получить узкий, сфокусированный пучок электронов, движущийся вдоль оси трубки. Питание самой трубки осуществляется от блока питания БП. Регулировка яркости, ускоряющего напряжения и фокусировка осуществляются посредством потенциометров, ручки которых выведены на переднюю панель блока ЭЛТ и соленоида. Горизонтальные отклоняющие пластины осциллографа могут быть подсоединены к источнику переменного напряжения, вертикальные отклоняющие пластины заземлены. Вольтметр  $PV$  для измерения ускоряющего напряжения  $U$  расположен на лицевой панели блока питания.

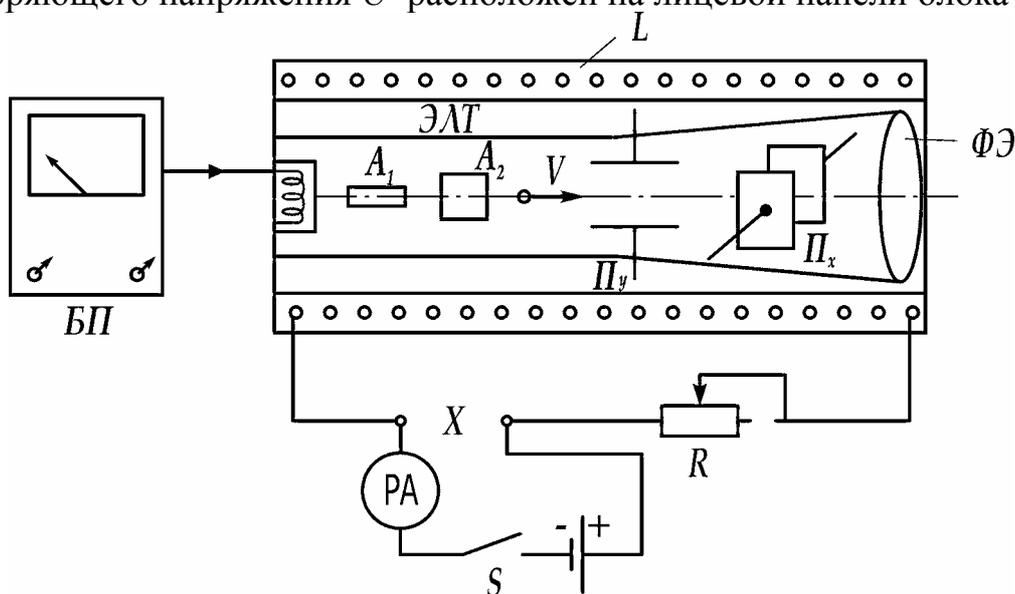


Рис. 3.

Величина скорости электронов определяется ускоряющим напряжением. Если изменять ускоряющее напряжение, то будет изменяться и скорость электронов. Первоначальная фокусировка пучка электронов осуществляется изменением фокусирующего напряжения, подаваемого соответственно на

второй и первый аноды трубки. При выходе электронов из второго анода возникает узкий пучок электронов, движущихся вдоль оси трубки со скоростью  $v$ . Затем сфокусированный электронный пучок проходит между отклоняющими пластинами  $\Pi_x$  и  $\Pi_y$ , расположенными во взаимно-перпендикулярных плоскостях.

Если электрическое поле между пластинами отсутствует, то электроны луча будут двигаться вдоль оси трубки и попадут на флуоресцирующий экран ФЭ в точку  $O$ . При подаче на отклоняющие пластины постоянного напряжения, между пластинами возникнет однородное электростатическое поле, которое отклоняет луч в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

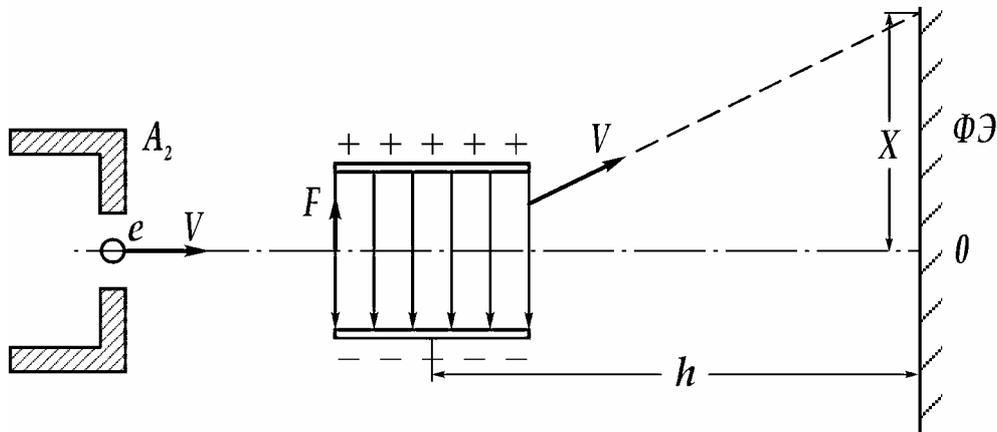


Рис. 4.

Отклонение  $X$  пятна на экране зависит от напряжения, поданного на вертикальные отклоняющие пластины. Если же на пластины подать переменное напряжение, то, пройдя эти пластины, электронный пучок будет выходить из промежутка между пластинами со скоростями, направленными под разными углами к оси трубки. На экране будет наблюдаться прямая горизонтальная линия.

Для фокусировки электронного пучка в точку создается магнитное поле, направленное вдоль оси электроннолучевой трубки. Тогда электроны, расходящиеся из центра пластин под разными углами к магнитному полю, начнут двигаться по винтовым линиям. Изменяя индукцию магнитного поля можно добиться фокусировки пучка в центре экрана: все электроны, сделав один оборот по разным траекториям, вновь соберутся в одной точке. В этом случае шаг винта  $h$  (формулы (8) и (9)) будет равен расстоянию от середины пластин  $\Pi$  до экрана ФЭ (рис. 4).

Величина магнитной индукции соленоида определяется по формуле

$$B = \mu_0 n I \tag{12}$$

где  $n$  - число витков, приходящихся на единицу длины соленоида,  $I$  - ток в соленоиде,  $\mu_0$  - магнитная постоянная.

Используя формулы (12) и (11), получим:

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U}{\mu_0^2 n^2 h^2 I^2} \quad (13)$$

Учитывая, что  $n = 1,91 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$  и  $h = 12,7 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ , получим рабочую формулу:

$$\frac{e}{m} = 8,59 \cdot 10^8 \frac{U}{I^2} \quad (14)$$

### **ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ**

1. Соберите схему питания катушки-соленоида по рис. 3. Для этого к клеммам  $X$ , расположенным на правой панели электронно-лучевой трубки ЭЛТ, подключите источник питания  $GB$  ( $\varepsilon = 6,5 \text{ В}$ ), ключ  $S$  и амперметр  $PA$  (предел измерения  $2,5 \text{ А}$ ). Реостат  $R$ , с клеммами  $X$  служащий для изменения тока  $I$ , протекающего через катушку, расположен на правой стороне панели ЭЛТ. Движок реостата должен находиться в крайнем положении "а", ключ  $S$  должен быть разомкнут.

2. Включите блок питания электроннолучевой трубки в сеть. Включите тумблер "сеть" блока питания ЭЛТ.

3. При помощи ручки потенциометра "ускоряющее напряжение", расположенного на лицевой панели ЭЛТ, установите ускоряющее напряжение ( $1100-1200$ ) В по вольтметру  $PV$ , расположенному в блоке питания ЭЛТ. Запишите значение напряжения  $U$  в таблицу.

Таблица.

$U$	$B$	
$I$	$A$	
$e/m$	$Kл/кг$	

4. При помощи потенциометров  $R1$  (яркость) и  $R2$  (фокус), расположенных на лицевой панели ЭЛТ, добейтесь четкого изображения луча в виде точки на экране электроннолучевой трубки.

5. Подайте на отклоняющие пластины электроннолучевой трубки переменное напряжение  $20 \text{ В}$  (тумблер "  $20 \text{ В}$ ", расположенный на блоке питания ЭЛТ). На экране трубки появится светящаяся линия, соответствующая расходящемуся пучку.

6. Восстановите фокусировку. Для этого замкните ключ  $S$  (см. рис. 3). Увеличивая при помощи реостата  $R$  ток через катушку, получите четкое изображение точки на экране ЭЛТ. Значение тока  $I$  запишите в таблицу.

7. Возвратите движок реостата в исходное положение, разомкните ключ  $S$ , выключите тумблер " $\sim 20$  В". Повторите опыт не менее 5 раз для других значений ускоряющего напряжения в диапазоне 700-1100 В.

8. Выключите установку.

9. Вычислите значение  $e/m$  по формуле (14) для каждого опыта. Проведите статистическую обработку результатов.

10. Ответ запишите в установленной форме. Сравните результат с табличными значениями. Проанализируйте, наблюдается ли зависимость величины  $e/m$  от ускоряющего напряжения?

### ***КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ***

1. Как магнитное поле действует на движущийся заряд? Как определяется сила Лоренца? От чего зависит ее величина и направление?

2. Объясните траекторию полета электрона в магнитном поле.

3. Как определить величину скорости движения электрона, ускоренного разностью потенциалов  $U$ ?

4. Зарисуйте схему электроннолучевой трубки, объясните назначение всех электродов ЭЛТ. Поясните назначение отклоняющих пластин.

5. Объясните принцип магнитной фокусировки.

6. Выведите рабочую формулу для определения удельного заряда электрона.

### ***ЛИТЕРАТУРА:***

[1]: § 49-50, 89; [2]: § 49; [4]: § 39; [5]: § 6.1; [6]: § 98, 198, 201; [7]: § 81-8

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Ф 3-10**  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА С**  
**ПОМОЩЬЮ ВАКУУМНОГО ДИОДА**

***Цель работы:***

1. Изучить принцип работы вакуумного диода.
2. Проверить закон Богуславского-Ленгмюра ( закон $3/2$ ).
3. Вычислить удельный заряд электрона.

***Оборудование:***

Универсальный лабораторный стенд со стабилизированным источником питания, плата с вакуумным диодом, вольтметр.

***КРАТКАЯ ТЕОРИЯ***

Электрический ток в вакууме существовать не может, так как в вакууме нет носителей тока. Появление в вакууме зарядов может привести к возникновению тока.

В металле содержатся “свободные электроны” (электронный газ), которые в результате теплового движения могут выходить в окружающее пространство, образуя вблизи поверхности электронное облако. Это облако находится в динамическом равновесии с электронным газом в металле, так как некоторые электроны способны вновь вернуться в металл. Наличие электронного облака вблизи металла приводит к образованию двойного электрического слоя, потому что вблизи поверхности остается слой положительно заряженных ионов. Двойной электрический слой действует подобно конденсатору и не создает электрического поля в окружающем пространстве.

*Явление образования электронного облака вблизи металла за счет теплового движения называется термоэлектронной эмиссией.*

Термоэлектронная эмиссия лежит в основе работы электровакуумных приборов, простейшим из которых является диод. Диод представляет собой вакуумную лампу с двумя электродами. Источником электронов является нагретый катод. Под действием электрического поля электроны, которые выходят из катода, движутся к аноду, создавая электрический ток. Если изменять напряжение между катодом и анодом, а температуру катода поддерживать постоянной, то зависимость термоэлектронного тока от напряжения будет носить нелинейный характер (рис.1), закон Ома в этом случае не выполняется.

При нулевом напряжении на аноде тока в цепи не будет, так как нет ускоряющего электрического поля. С ростом напряжения на аноде ток начинает возрастать, в определенном интервале напряжений анода зависимость тока от напряжения можно считать линейной, именно в этом режиме работают большинство диодов. Далее увеличение напряжения анода приводит к тому, что все электроны, покидающие катод, достигают анода и диод работает в режиме насыщения. Если напряжение на катоде равно нулю, то режим работы лампы (ток и напряжение) определяется величиной заряда вблизи поверхности катода.

Теоретическое рассмотрение вопроса о зависимости анодного тока от величины анодного напряжения в вакуумном диоде проведем при следующих допущениях:

- 1) начальные скорости электронов, испускаемых катодом, настолько малы, что можно считать их равными нулю;
- 2) анодный ток далек от насыщения;
- 3) объемный заряд создает такое распределение потенциала, что непосредственно у поверхности катода напряженность электрического поля равна нулю.

Будем считать, что электроды плоские и электроны движутся вдоль оси  $X$ , направленной нормально к электродам. Потенциал катода примем равным нулю  $\varphi=0$ , напряжение на аноде обозначим как  $U_a$ . Размеры электродов будем считать достаточно большими, чтобы пренебречь распространением электронов по всем другим направлениям, кроме  $X$ . Тогда уравнение Пуассона для потенциала примет вид:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{\rho_0}{\varepsilon_0} = \frac{ne}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

где  $n$  - концентрация электронов;

$e$  - заряд электрона;

$\rho_0$  - плотность электронов в электронном облаке;

$\varepsilon_0$  - электрическая постоянная.

Для электронов движущихся между катодом и анодом выполняется закон сохранения энергии:

$$\frac{mv^2}{2} = e\varphi \quad (2)$$

где  $v$  - скорость движения электрона в точке с потенциалом  $\varphi$ ;

$m$  - масса электрона.

Объемная плотность тока в этой же точке:

$$\vec{j} = n \cdot e \cdot \vec{v} \quad (3)$$

Подставим выражение для скорости из уравнения (2) в уравнение (3), получим следующее выражение:

$$ne = j \sqrt{\frac{m}{2e\varphi}} \quad (4)$$

С учетом выражения (4) уравнение Пуассона примет вид:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{j}{\varepsilon_0} \sqrt{\frac{m}{2e}} = \frac{\alpha}{\sqrt{\varphi}} \quad (5)$$

Обе части уравнения умножим на  $d\varphi/dx$ , получим:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} \cdot \frac{d\varphi}{dx} = \frac{\alpha}{\sqrt{\varphi}} \cdot \frac{d\varphi}{dx} \quad (6)$$

Учитывая что:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} \cdot \frac{d\varphi}{dx} = \frac{d}{dx} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{d\varphi}{dx}\right)^2; \quad \frac{1}{\sqrt{\varphi}} \cdot \frac{d\varphi}{dx} = \frac{2d(\sqrt{\varphi})}{dx} \quad (7)$$

уравнение (6) запишется в виде:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{d\varphi}{dx}\right)^2 = \frac{4d\sqrt{\varphi}}{dx} \alpha \quad (8)$$

Проинтегрируем обе части полученного уравнения (8) по  $X$  в пределах от 0 до того значения  $X$ , при котором потенциал равен  $\varphi$ . Тогда:

$$\left(\frac{d\varphi}{dx}\right)^2 - \left(\frac{d\varphi}{dx}\right)_0^2 = 4\alpha\sqrt{\varphi} \quad (9)$$

где учтено, что  $\varphi_{(0)} = 0$ .

Если учесть, что напряженность поля на катоде равняется нулю, а, следовательно, и  $d\varphi/dx = 0$ . Поэтому получаем:

$$\frac{d\varphi}{dx} = 2\sqrt{\alpha\varphi}^{1/4} \quad (10)$$

или

$$\frac{d\varphi}{\varphi^{1/4}} = 2\sqrt{\alpha} \cdot dx \quad (11)$$

Интегрируя обе части уравнения (11) в пределах от  $x = 0$ ,  $\varphi = 0$  до  $x = d$  - расстояние между электродами,  $\varphi = U$ , получим:

$$U^{3/4} = \frac{3}{2} d \sqrt{\alpha} \quad (12)$$

Возведя обе части в квадрат и учитывая, что

$$\alpha = \frac{j}{\varepsilon_0} \sqrt{\frac{m}{2e}} - \text{получаем:}$$

$$j = \frac{4\sqrt{2}\varepsilon_0}{9d^2} \sqrt{\frac{e}{m}} \cdot U^{3/2} \quad (13)$$

$$\text{или } j = \beta U^{3/2}, \quad (14)$$

$$\text{где } \beta = \frac{4\sqrt{2}\varepsilon_0}{9d^2} \sqrt{\frac{e}{m}}.$$

Учитывая, что плотность тока есть:

$$j = \frac{I}{S_0} \quad (15)$$

где  $S_0$  - действующая площадь анода, получим зависимость силы тока, протекающего в вакууме между электродами, от приложенной разности потенциалов:

$$I = \frac{4\sqrt{2} \cdot \varepsilon_0 S_0}{9d^2} \sqrt{\frac{e}{m}} \cdot U^{3/2} \quad (16)$$

Расчет аналогичной задачи для коаксиальных цилиндрических электродов, для концентрических сферических электродов приводит к тому же виду зависимости объемной плотности тока от разности потенциалов в степени три вторых. В случае коаксиальных цилиндрических электродов выражение, называемое «законом 3/2» или уравнением Богуславского–Ленгмюра имеет вид:

$$I = \frac{2\sqrt{2} \cdot l}{9r\beta^2} \sqrt{\frac{e}{m}} \cdot U^{3/2} \quad (17)$$

где  $r$  - радиус анода;

$l$  - длина катода;

$\beta^2$  - коэффициент, зависящий от отношения радиуса анода и катода.

### **МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА**

Для выполнения лабораторной работы используется схема, смонтированная на специальной плате, которая является частью стандартного лабораторного стенда. Плата вставляется в лабораторный

стенд, содержащий стабилизированный источник питания. Принципиальная схема платы приведена на рис. 2

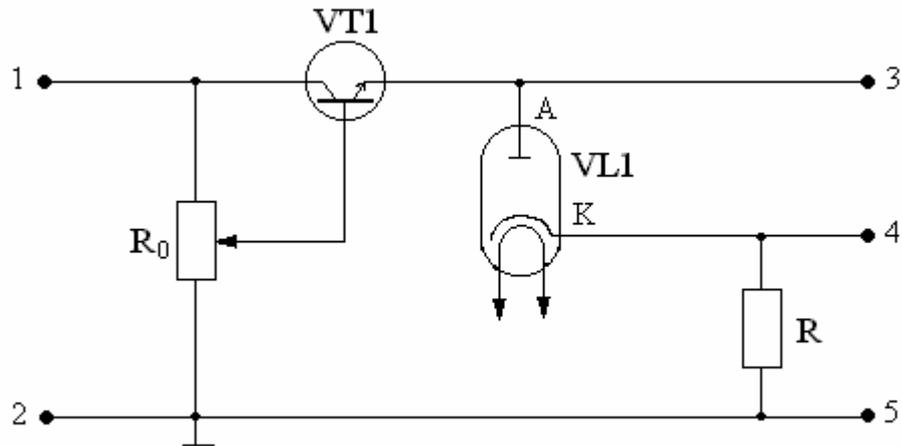


Рис.2

Основной частью схемы является вакуумный диод с известными параметрами,  $S$ -площадь электродов,  $d$ -расстояние между электродами указаны на плате ( $d=0,6 \text{ mm}$ ,  $S=1,45\text{cm}^2$ ). С помощью потенциометра  $R_0$  регулируется величина анодного напряжения лампы, которое снимается с эмиттера транзистора VT1. Сопротивление  $R$  является измерительным, с него снимается напряжение  $U_A$  в анодной цепи лампы при подключении вольтметра к точкам «3» и «5». Анодный ток  $I_A$  определяется отношением напряжения  $U_R$  между точками «4» и «5» к сопротивлению  $R$ . Напряжение между катодом и анодом можно вычислить как разность между напряжением на аноде и на измерительном сопротивлении  $R$ . При подстановке параметров лампы в уравнение (16) получим рабочую формулу для определения удельного заряда электрона.

$$\frac{e}{m} = \frac{1,99 \cdot 10^{17} \cdot I^2}{U^3} \quad (18)$$

### ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Установить плату в универсальный лабораторный стенд.
2. Заготовить таблицу

$U_A$	$B$								

$U_R$	$B$								
$U$	$B$								
$I$	$A$								
$e/m$	$\frac{Kл}{кг}$								

3. Включить приборы в сеть и прогреть их в течение 3-5 минут.
4. Подключить вольтметр к точкам «3» и «5».
5. Поставить ручку потенциометра  $R_0$  в крайнее верхнее положение. Затем, вращая ручку потенциометра, установить напряжение на аноде равное 2-3 В.
6. Не меняя положение потенциометра, подключить вольтметр между точками «4» и «5» и измерить напряжение  $U_R$  на измерительном сопротивлении  $R$ .
7. Увеличивая анодное напряжение на 2-3 В повторить аналогичные измерения 8-10 раз.
8. Отключить вольтметр и установку от сети.
9. Для каждого эксперимента вычислить значение напряжения между анодом и катодом:

$$U = U_A - U_R \quad (19)$$

10. Вычислить анодный ток по соотношению:

$$I = \frac{U_R}{R} \quad (20)$$

11. Вычислить теоретическую зависимость анодного тока от напряжения, пользуясь законом  $3/2$  (16).
12. Построить на одних координатных осях экспериментальную и теоретическую зависимость анодного тока от напряжения  $I_A = f(U)$ .
13. Вычислить значения удельного заряда для каждой пары значений, провести статистическую обработку результатов и записать результат.
14. Сделать выводы по работе.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.**

1. В чем состоит явление термоэлектронной эмиссии?
2. Как устроен вакуумный диод и какие физические процессы в нем происходят?
3. Выведите закон Богуславского-Лэнгмюра.

4. Каким методом проверяется “закон  $3/2$ ” в данной работе?
5. Как находится удельный заряд электрона в данной работе?

### ***ЛИТЕРАТУРА***

[1]: §49-5,105,89; [2]: §49; [4]: §39; [5]: §6.1; [6]: §98,170,173; [7]: §81-82,69;  
[11]: 2.3.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Ф 3-11**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРИГЛИЦИНСУЛЬФАТА**

#### **Цель работы:**

1. Исследовать зависимость спонтанной поляризованности и коэрцитивного поля сегнетоэлектрика триглицинсульфата от напряженности поля и температуры.
2. Построить основную кривую поляризации.
3. Определить температуру Кюри.

#### **Оборудование:**

Установка Сойлера-Гауэра. Электронный осциллограф. Цифровой мультиметр.

### **КРАТКАЯ ТЕОРИЯ**

#### **Дипольный момент**

Система двух равных по величине разноименных зарядов  $q$ , разнесенных на некоторое расстояние  $l$  называется электрическим диполем, который характеризуется дипольным моментом.

$$\vec{p} = ql \quad (1)$$

Дипольный момент является вектором, направленным от отрицательного заряда к положительному. Если заряды не могут считаться точечными, то под  $l$  следует понимать расстояние между их “центрами тяжести”.

Хотя диполь обладает нулевым суммарным зарядом, он создает вокруг себя электрическое поле. На электрический диполь со стороны внешнего поля действует момент сил, стремящийся ориентировать диполь по полю. И поле, и ориентирующий момент зависят не от  $q$  и  $l$  в отдельности, а от их произведения, что и определяет целесообразность введения понятия дипольного момента.

#### **Поляризация диэлектриков**

Диэлектрик, помещенный в электрическое поле, поляризуется, то есть приобретает электрический дипольный момент. При этом, в зависимости от молекулярного строения диэлектрика, в нем будут происходить различные

процессы. В так называемых неполярных диэлектриках под действием электрического поля происходит смещение "центра тяжести" положительных и отрицательных зарядов в молекулах и атомах. В результате каждый атом, молекула или элементарная ячейка приобретают индуцированный дипольный момент.

Степень поляризации диэлектрика характеризуется поляризованностью (старый термин - вектор поляризации), которая равна векторной сумме всех дипольных моментов единицы объема.

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_i}{\Delta V} \quad (2)$$

Объем  $\Delta V$  в котором производится суммирование должен быть достаточно мал, чтобы величина  $\vec{P}$  считалась определенной в каждой точке, но достаточно большим, чтобы содержать большое число диполей (элементарных ячеек). Такой объем называется физически бесконечно малым.

В полярных диэлектриках молекулы уже обладают постоянным дипольным моментом, но тепловое движение создает хаотическую ориентацию диполей. В электрическом поле происходит их ориентация в определенном направлении и векторная сумма (1) становится также отличной от нуля.

В большинстве диэлектриков вектор поляризованности пропорционален напряженности электрического поля. Такие диэлектрики называются линейными

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad (3)$$

Коэффициент пропорциональности  $\chi$  называется диэлектрической восприимчивостью диэлектрика.

### ***Поле в диэлектриках***

Поляризация диэлектрика приводит к появлению дополнительных источников поля и изменению поля в диэлектрике. Это можно объяснить как появление дополнительного поля связанных (поляризационных) зарядов на границах диэлектрика. Поверхностная плотность связанных зарядов  $\sigma'$  численно равна скачку нормальной компоненты поляризованности  $\Delta P_n = \sigma'$ . Так, в однородном поле плоского конденсатора результирующее поле внутри диэлектрика состоит из внешнего поля  $E_0 = \sigma/\epsilon_0$  созданного свободными зарядами с поверхностной плотностью  $\sigma$  и поля связанных зарядов  $E' = P/\epsilon_0 = \sigma'/\epsilon_0$  направленного против внешнего поля (рис. 1).

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' \quad (4)$$

или в скалярном виде

$$E = E_0 - E' . \quad (4')$$

Ослабление поля в диэлектрике характеризуется диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon = 1 + \chi = E_0 / E \quad (5)$$

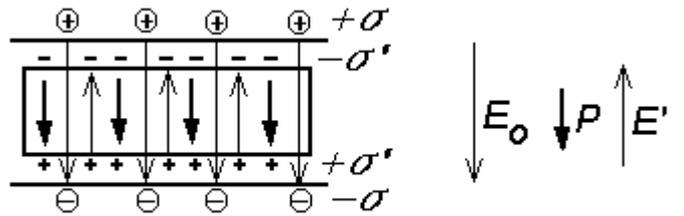


Рис. 1. Поле и поляризация в диэлектрике

### ***Поляризуемость атомов***

Если атом, не обладающий дипольным моментом, переместить в электрическое поле, то вследствие деформации электронной оболочки, он приобретает дипольный момент, который в первом приближении можно считать пропорциональным полю.

$$\vec{p} = \alpha \varepsilon_0 \vec{E} \quad (6)$$

где  $\alpha$ - коэффициент пропорциональности, называемый поляризуемостью атома (не путать с поляризованностью!).

Тогда поляризованность диэлектрика будет равна

$$\vec{P} = n \vec{p} \quad (7)$$

где  $n$  - концентрация молекул (диполей).

Поле, действующее на каждый атом отличается от поля, которое рассматривается в макроскопической теории диэлектриков. Локальное поле, существующее в каждой точке элементарной ячейки, называется микроскопическим  $E_{\text{микро}}$ , а усредненное по объему, содержащему большое число элементарных ячеек. - макроскопическим  $E$ . Расчет микроскопического поля чрезвычайно сложен, однако для узла простой кубической ячейки он дает результат

$$E_{\text{микро}} = E + f \cdot P \quad (8)$$

где  $f$  - так называемый фактор Лоренца,  
 $f = 1/(3\varepsilon_0)$  - в СИ и  $f = 4\pi/3$  - в системе Гаусса.

На каждый атом действует локальное поле, поэтому в формулу (5) следует подставить именно микроскопическое поле. Из формул (6) и (7) следует, что

$$P = n\alpha\varepsilon_0 (E + 1/(3\varepsilon_0)P) \quad (9)$$

Таким образом:

$$P = \frac{n\alpha\varepsilon_0 E}{(1 - \frac{1}{3}n\alpha)}. \quad (10)$$

Наличие положительной обратной связи между микроскопическим полем и поляризованностью кристалла (увеличение поля увеличивает поляризованность и наоборот) создает потенциальную неустойчивость структуры кристалла. Из формулы (9) видно, что при достаточно сильной связи ( $n\alpha > 3$ ), в кристалле может появиться поляризованность при отсутствии внешнего поля (знаменатель обращается в нуль,  $P \neq 0$  при  $E = 0$ ).

Эта поляризованность обусловлена не внешним полем, а внутренним взаимодействием в кристалле (спонтанная поляризованность). Переход в сегнетоэлектрическое состояние как раз связан с подобного рода неустойчивостью, появляющейся в кристаллах при определенной температуре.

Сегнетоэлектрики - это диэлектрики, которые обладают спонтанной (самопроизвольной) поляризованностью  $\vec{P}_S$  в отсутствие электрического поля. Переход в сегнетоэлектрическое состояние является фазовым переходом. Если этот переход является фазовым переходом первого рода, скачок испытывают первые производные термодинамического потенциала. Энтропия (дает скрытую теплоту перехода), удельный объем (параметры элементарной ячейки и ее симметрия) и поляризованность изменяются скачком.

Для фазовых переходов второго рода скрытая теплота перехода отсутствует, параметры ячейки изменяются плавно и спонтанная поляризованность растет плавно от нулевого значения. Вторыми производными, испытывающими скачок, являются такие величины как теплоемкость, упругость, диэлектрическая восприимчивость и проницаемость, пиро- и пьезоконстанты и др..

### **Важнейшие свойства сегнетоэлектриков:**

1. Наличие спонтанной поляризованности.

2. Доменная структура. Спонтанная поляризованность имеет одинаковое направление в пределах макроскопических (т. е. содержащих очень большое число элементарных ячеек) областей, называемых доменами. Обычно домены имеют размеры порядка 1-10 мкм.

Направления поляризованности в соседних доменах отличаются, поэтому в отсутствие электрического поля в состоянии равновесия средняя поляризованность образца равна нулю, что соответствует минимуму его термодинамического потенциала.

На рис. 2 показана доменная структура изучаемого в этой работе сегнетоэлектрика - триглицинсульфата (ТГС). Этот кристалл имеет лишь два возможных направления  $\vec{P}_S$ , что обусловлено его кристаллической симметрией, в других кристаллах их может быть больше.

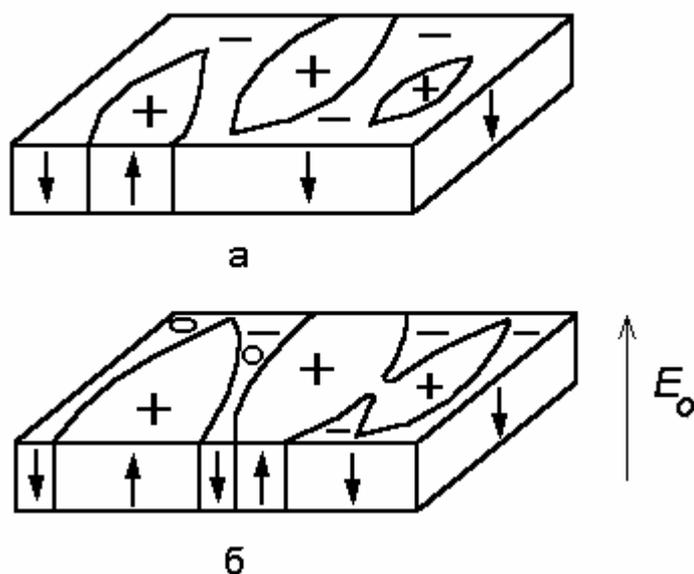


Рис. 2. Схема доменной структуры триглицинсульфата.

а - в отсутствие электрического поля, б - изменение доменной структуры в электрическом поле.

3. Возможность изменения доменной структуры электрическим полем. Если образец поместить в электрическое поле, то ориентация доменов с параллельным полю (или близким к нему) направлением спонтанной поляризованности будет энергетически более выгодной. Доменная структура начнет изменяться "в пользу" указанных доменов за счет движения доменных стенок, а также появления и роста зародышей новых доменов (рис. 2, б). Средняя поляризованность образца

станет отличной от нуля.

4. Зависимость  $P(E)$ . Зависимость поляризованности образца от напряженности поля у сегнетоэлектриков, в отличие от обычных диэлектриков, нелинейная (рис. 3, а).

На участке о-а поляризованность образца растет за счет изменения доменной структуры. Когда образец станет монодоменным, т. е. будет представлять единый домен, поляризованность с ростом поля будет возрастать незначительно за счет индуцированного увеличения дипольного момента каждой элементарной ячейки. Этот участок а-б называется участком насыщения. Если данный участок насыщения экстраполировать до пересечения с осью  $P$  ( $E = 0$ ), мы получим величину поляризованности монодоменного кристалла в отсутствие электрического поля, т. е. величину спонтанной поляризованности кристалла  $P_s$ .

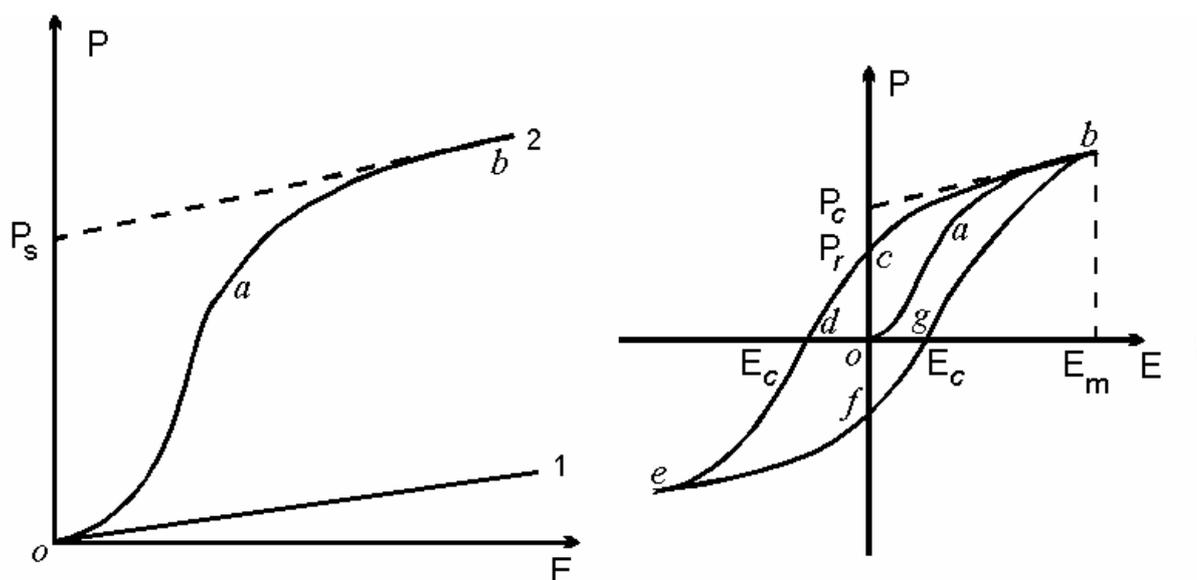


Рис. 3. Зависимости  $P(E)$ . а) 1 - для линейного диэлектрика.  
 2 - начальная кривая поляризации сегнетоэлектрика.  
 б) - петля гистерезиса для циклической переполаризации.

5. Петля гистерезиса. Если образец заполяризовать до насыщения (начальная кривая о-а-б), а затем уменьшить поле до нуля, то деполяризация образца будет происходить не по начальной кривой, а по некоторой кривой б-с (рис. 3, б). При  $E = 0$  образец будет иметь остаточную поляризованность  $P_r$ . Это происходит из-за того, что при снятии поля, вследствие эффектов "трения" доменная структура не восстанавливает начальную конфигурацию. Для полной деполяризации

образца необходимо приложить обратное поле напряженностью  $E_c$ . Это поле называется коэрцитивным.

При дальнейшем увеличении обратного поля зависимость  $P(E)$  снова выходит на насыщение (кривая d-e). Если поле изменять циклически, то в следующем полуволне изменения поля поляризованность кристалла будет изменяться согласно кривой f-g-b. Кривая зависимости  $P(E)$  называется петлей диэлектрического гистерезиса. Петля гистерезиса характеризует неоднозначную зависимость  $P(E)$  в зависимости от предыстории образца.

Форма петли гистерезиса зависит от амплитуды переменного поля: величины  $P_r$  и  $E_c$  растут с ростом поля до определенного предела, при дальнейшем росте поля они остаются постоянными, происходит лишь рост “усов” (рис. 4, а). Соответствующие петли называются насыщенными, петли, полученные при меньших амплитудах называются частными циклами. Величины  $P_r$  и  $E_c$  обычно определяют на насыщенной петле. Геометрическое место вершин частных циклов называется основной кривой поляризации.

Для нелинейной зависимости  $P(E)$  определяются различные виды диэлектрической восприимчивости: эффективная, дифференциальная, начальная и др.. Диэлектрическая восприимчивость в нелинейных диэлектриках является функцией напряженности поля.

Диэлектрическая восприимчивость, определенная на основной кривой поляризации (по отношению амплитуд поляризованности  $P_m$  и напряженности  $E_m$  каждого частного цикла), называется эффективной или нормальной (рис. 4, б).

$$\chi_{эфф} = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{P_m}{E_m} \quad (11)$$

Эффективная восприимчивость пропорциональна тангенсу угла наклона секущей ОА, проведенной через вершину частного цикла и начало координат.

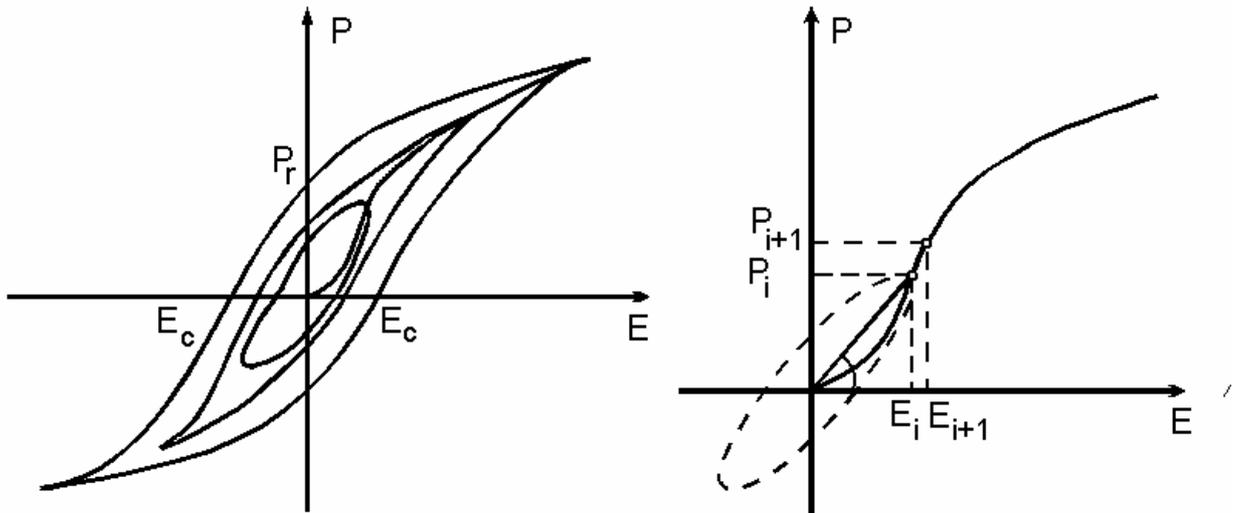


Рис. 4. а - частные циклы переполяризации,  
 б - основная кривая поляризации и определение  
 эффективной и дифференциальной восприимчивостей.  
 Дифференциальной восприимчивостью называется величина

$$\chi_{эфф} = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{dP}{dE} \quad (12)$$

равная отношению бесконечно малых приращений  $dP$  и  $dE$  в окрестности точки  $E, P$  (деленная на  $\varepsilon_0$ ). Она пропорциональна тангенсу угла наклона касательной к линии  $P(E)$  в точке  $E$ . Если функция  $P(E)$  определена по точкам  $P_i$  и  $E_i$ , то производная вычисляется через малые приращения

$$\Delta P_i = P_{i+1} - P_i,$$

$$\Delta E_i = E_{i+1} - E_i$$

и относится к средней точке интервала

$$E_i' = (E_i + E_{i+1})/2.$$

$$\chi_i(E_i') \approx \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\Delta P_i}{\Delta E_i}. \quad (13)$$

5. Температура перехода в сегнетоэлектрическое (параэлектрическое) состояние называется температурой Кюри. С ростом температуры величины  $P_r$  и  $E_c$ , как правило, уменьшаются и при температуре Кюри сегнетоэлектрические свойства кристалла исчезают.

6. Аномалии (скачки) величин, являющихся производными термодинамических потенциалов в окрестности температуры перехода.

7. Наличие значительной связи между различными свойствами

кристалла: зависимость поляризованности от температуры (пироэффект); зависимость размеров образца от поля и наоборот, поля в образце от механической нагрузки (пьезоэффект); зависимость оптических свойств от нагрузки (фотоупругость) и электрического поля (электрооптический эффект) и т.п..

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектом исследования в настоящей работе является монокристалл триглицинсульфата (ТГС), который имеет формулу  $(\text{CH}_2\text{NH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ . Исследование основной кривой  $P(E)$  и температурной зависимости спонтанной поляризованности  $P_s(t^0)$  и коэрцитивного поля  $E_c(t^0)$  производится осциллографическим методом по схеме Сойера-Тауэра (рис. 5).

Для получения изображения петли гистерезиса на экране осциллографа необходимо подать на горизонтальные пластины напряжение  $U_x$ , пропорциональное напряженности поля в образце,  $E$  а на вертикальные - напряжение  $U_y$ , пропорциональное поляризованности образца  $P$ . Тогда отклонение луча  $y(x)$  будет воспроизводить в некотором масштабе зависимость  $P(E)$ .

Проанализируем работу схемы. Исследуемый образец помещается между пластинами конденсатора  $C_x$ .

1. Напряжение  $U_y$ , подводимое на вертикальные пластины снимается с эталонной емкости  $C_0$

$$U_y = q/C_0$$

Заряд эталонной емкости  $q$  равен свободному заряду, возникающему на пластинах образца  $C_x$ :

$$q = \sigma \cdot S_x$$

где  $S_x$  - площадь пластины сегнетоэлектрического образца.

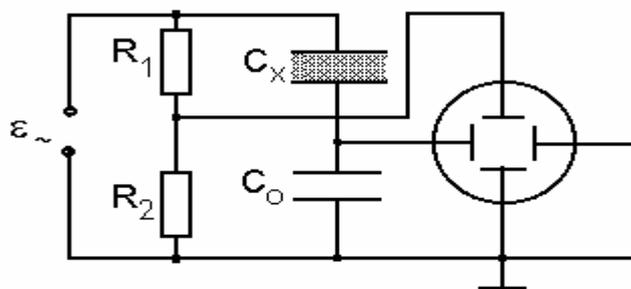


Рис. 5. Схема Сойера-Тауэра.

$R_1$ - $R_2$  - делитель напряжения,  $C_x$  - образец,  $C_0$  - эталонная емкость.

Из равенства (4') следует, что

$$E_0 = E + P/\varepsilon_0$$

Так как в сегнетоэлектриках  $\varepsilon = \chi + 1 \gg 1$ , следовательно  $E \ll E_0$ . Поэтому

$$E_0 = \sigma/\varepsilon_0 \approx P/\varepsilon_0 = \sigma'/\varepsilon_0$$

Это означает, что связанный поляризационный заряд практически равен свободному заряду на пластинах образца и эталонной емкости.

Тогда  $q = PS_x$  и, следовательно

$$U_y = \frac{\sigma S_x}{C_0} = \frac{PS_x}{C_0}. \quad (14)$$

2. Если эталонная емкость  $C_0$  достаточно велика, то напряжение  $U_y$  будет значительно меньше полного напряжения  $U$ , приложенного к последовательной цепочке  $C_x - C_0$ . Тогда практически все напряжение  $U$  будет приложено к образцу. Напряженность поля в образце будет равна

$$E = U/d$$

где  $d$  - толщина образца.

Часть напряжения, снимаемая с делителя  $R_1 - R_2$  подается на горизонтальные пластины

$$U_x = U \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = E \cdot d \cdot R_2 / (R_1 + R_2) \quad (15)$$

Мы показали, что в нашей схеме  $U_x \sim E$  и  $U_y \sim P$ . Из формул (14) и (15) можно получить формулы для расчета  $E$  и  $P$

$$E = \frac{(R_1 + R_2)}{R_2 d} \cdot U_x, \quad (16)$$

$$P = \frac{C_0}{S_x} \cdot U_y. \quad (16)$$

Отклонение луча осциллографа  $X$  и  $Y$  связано с подаваемыми на пластины напряжениями  $U_x$  и  $U_y$  соотношениями

$$U_x = k_x \cdot X$$

$$U_y = k_y \cdot Y$$

где  $k_x$  и  $k_y$  - цены деления (коэффициент отклонения) каналов  $x$  и  $y$  осциллографа. Из формул (15), (16) можно получить выражения для перевода отклонений  $X$  и  $Y$  в значения  $E$  и  $P$ :

$$E = \frac{k_x (R_1 + R_2)}{R_2 d} \cdot X, \quad (17)$$

$$P = \frac{k_y C_0}{S_x} \cdot Y. \quad (18)$$

Цены деления  $k_x$  и  $k_y$  измеряются в В/дел и определяются чувствительностью каналов осциллографа. Отклонения  $X$  и  $Y$  следует также измерять в делениях сетки экрана.

Измерение  $P_s$ . Петля гистерезиса исследуемого в настоящей работе образца имеет почти прямолинейный участок b-c (рис. 3, б) поэтому величины  $P_r$  и  $P_s$  практически совпадают. Поэтому измерение спонтанной поляризованности производится по точке пересечения петли гистерезиса с осью  $Y$ . Вычисления проводятся по формуле (9) при  $Y_s = 0$ -с. Для более точной оценки отрезка 0-с рекомендуется измерять двойное отклонение c-f с последующим делением на два.

Измерение  $E_c$ . Коэрцитивное поле определяется по пересечению петли гистерезиса с осью  $X$ :  $X_c = 0$ -d (также рекомендуем измерять удвоенное значение d-g). Из очевидного соотношения  $X_c / X_m = E_c / E_m$  следует также более простая формула для расчета  $E_c$

$$E_c = \frac{U_m}{X_m d} \cdot X_c, \quad (17)$$

где  $E_m = U_m / d$  - максимальное поле, подаваемое на образец.

$U_m$  - амплитуда приложенного к образцу напряжения,

$X_m$  - соответствующий размах петли.

Напряжение, подаваемое на образец, регулируется автотрансформатором (ЛАТР). Максимальная амплитуда при полностью выведенном движке составляет 100 В.

Для изучения температурной зависимости  $P_s(t^0)$  и  $E_c(t^0)$  образец помещен в печь. Рядом с кристаллом находится терморезистор. Измеряя его сопротивление  $R_t$  по градуировочному графику можно определить температуру в печи.

## **ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ**

Запишите в отчет параметры установки  $U_m, S_x, d, k_x, k_y, R_1, R_2$ .

### **1. Построение зависимости $P(E)$**

1.1. Заготовьте таблицу.

Таблица 1.

$X$ , дел ( $U_x$ , В)	
$Y$ , дел ( $U_y$ , В)	

$E, \text{В}\cdot\text{м}^{-1}$	
$P, \text{Кл}\cdot\text{м}^{-2}$	
$\chi_{\text{диф}}$	
$E_i', \text{В}\cdot\text{м}^{-1}$	

Выключите тумблеры СЕТЬ и ПЕЧЬ на схеме Соьера-Тауэра. Включите осциллограф и мультиметр и дайте им прогреться в течение 10 мин.

1.2. Включите тумблер СЕТЬ. При максимальном напряжении на образце получите на экране осциллографа петлю гистерезиса. Центр петли должен находиться точно в центре экрана.

1.3. Изменяя напряжение, снимите 8-12 точек основной кривой  $P(E)$ . Измерять можно координаты вершины петли гистерезиса  $X$  и  $Y$ , либо напряжения  $U_x$  и  $U_y$  на входах осциллографа при помощи мультиметра. В последнем случае петля будет построена точнее.

## 2. Получение зависимостей $P_s(t^0)$ и $E_c(t^0)$

2.1. Заготовьте таблицу.

Таблица 2.

$X_c$ , дел	
$Y_s$ , дел	
$R_t$ , кОм	
$P_s$ Кл·м <sup>-2</sup>	
$E_c$ В·м <sup>-1</sup>	
$t$ , °С	

2.3. Для насыщенной петли измерьте отклонение луча  $Y_s = \text{o-c}$ , соответствующее спонтанной поляризованности  $P_s$ . Одновременно измерьте отклонение  $X_c = \text{o-d}$ , соответствующее коэрцитивному полю  $E_c$  и сопротивление терморезистора  $R_t$ . Результаты запишите в таблицу 2.

2.4. Включите нагреватель тумблером ПЕЧЬ. Когда величины  $X_c$  и  $Y_s$  уменьшатся на 10-15 % произведите измерения по п. 2.3.

Продолжайте измерения, пока величины  $X_c$  и  $Y_s$  не уменьшатся до нуля (8-10 точек). Четко зафиксируйте температуру (по  $R_t$ ) обращения  $E_c$  и  $P_s$  в нуль (т.е. температуру Кюри).

После достижения температуры Кюри выключите установку.

## **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ**

1. Пересчитайте экранные координаты  $X$  и  $Y$ , в значения  $P$  и  $E$  по формулам (17) и (18) (либо  $U_x$  и  $U_y$  по (15, 16)).

2. Рассчитайте значения  $\chi_{диф}$  и соответствующие значения  $E_i'$  по формуле (13). Постройте на совмещенном (общая ось  $E$ ) графике зависимости  $P(E)$  и  $\chi_{диф}(E_i')$

3. По градуировочному графику для каждой экспериментальной точки определите температуру и вычислите значения  $E_c$  и  $P_s$  (по формулам (14) и (15)). Запишите результаты в таблицу 2. По данным таблицы постройте графики зависимостей  $P_s(t^0)$  и  $E_c(t^0)$ . Укажите на графике температуру Кюри.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какие процессы происходят в диэлектрике, помещенном в электрическое поле? Дайте определение дипольного момента, поляризованности, поляризуемости.

2. Объясните эффект ослабления поля в диэлектрике. Какой физический смысл имеют диэлектрическая восприимчивость, проницаемость?

3. Рассмотрите диэлектрик, помещенный между пластинами заряженного плоского конденсатора. Как будет направлен вектор поляризованности в диэлектрике? Где располагаются связанные заряды? Какое соотношение существует между величиной поляризованности и плотностью связанного заряда?

4. Какие вещества относятся к сегнетоэлектрикам? Перечислите их характерные свойства.

5. Объясните происхождение петли гистерезиса.

6. Дайте определение эффективной и дифференциальной диэлектрической восприимчивости

7. Объясните работу экспериментальной установки Сойера-Тауэра.

## **ЛИТЕРАТУРА:**

[1]: § 35,39; [2]: § 39; [3]: §20; [4]: §17,23; [5]: §3.1-3.6; [6]: § 44-56; [7] § 37-40 .

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Ф-12

### ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

#### Цель работы:

1. Изучить особенности намагничивания ферромагнетиков.
2. Построить график зависимости  $\mathbf{B} = f(\mathbf{H})$  и  $\mathbf{J} = f(\mathbf{H})$  по частным циклам намагничивания для различных образцов.
3. Построить зависимости эффективной и дифференциальной магнитной проницаемости от напряженности внешнего поля.

#### Оборудование:

Соленоид, осциллограф, генератор, ферромагнитные образцы.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Магнитное поле создается подвижными зарядами или токами. Движение электронов по орбите можно уподобить элементарному току. При этом электрону можно приписать механический момент импульса  $\vec{L}$  и магнитный момент  $\vec{p}_m$  (рис.1).

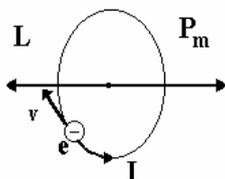


Рис.1

Магнитный момент определяется соотношением:

$$p_m = I \cdot S = e\nu S = e\nu\pi r^2 \quad (1),$$

где  $I = e\nu$  - элементарный ток;

$e$  - заряд электрона;  $\nu$  - частота обращения электрона по орбите;  $S$  - площадь орбиты.

Механический момент вращения (момент импульса):

$$\vec{L} = m\vec{v}r \quad (2)$$

$m$  - масса электрона;  $v$  - скорость электрона;  $r$  - радиус орбиты электрона.

Если учесть, что  $v = 2\pi \nu r$ , то соотношение (2) переписывается в виде:

$$L = 2\pi \cdot \nu \cdot m \cdot r^2 \quad (3)$$

Отношение магнитного момента к механическому моменту есть универсальная величина, называемая гиромагнитным отношением:

$$\frac{p_m}{L} = -\frac{e}{2m} \quad (4)$$

Знак минус указывает на противоположную ориентацию векторов магнитного момента  $\vec{p}_m$  и момента импульса  $\vec{L}$ .

Из экспериментов было установлено, что гиромагнитное отношение равно  $(-e/m)$ , т.е. в два раза больше, чем следовало из теории. Данное противоречие было снято с введением в теорию собственного механического момента электрона (спина), который является внутренне присущим электрону свойством и определяется отношением  $\pm h/4\pi$ , где  $h$  - постоянная Планка.

Проекция собственного магнитного момента электрона может принимать два значения:

$$p_m = -\frac{eh}{2m} = \pm \mu_B \quad (5)$$

Величина  $\mu_B$  называется *магнетроном* Бора и является единицей магнитного момента электрона.

Таким образом, магнитный момент атома складывается из магнитного момента вращения по орбите и спинового магнитного момента.

$$\vec{p}_a = \sum \vec{p}_m + \sum \vec{p}_s \quad (6)$$

При помещении в магнитное поле любого вещества происходит его намагничивание, т.е. приобретение собственного магнитного момента атомами этого вещества. Вещества, атомы которых способны приобретать магнитный момент при помещении их в магнитное поле, называются магнетиками. При внесении магнетика во внешнее магнитное поле  $\vec{B}_0$  в нем возникает собственное магнитное поле  $\vec{B}'$ . Согласно принципу суперпозиции суммарное поле является векторной суммой двух полей:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' \quad (7)$$

Для описания степени намагниченности магнетика введем вектор намагничивания, который определяется величиной суммарного магнитного момента всех атомов в единице объема.

$$\vec{J} = \frac{\sum \vec{p}_a}{V} \quad (8)$$

$\vec{J}$  - намагниченность;  $\vec{p}_a$  - магнитный момент атома;  $V$  - объем магнетика.

Собственное магнитное поле магнетика можно определить следующим образом:

$$\vec{B}' = \mu_0 \vec{J} \quad (9)$$

Если учесть, что основные характеристики магнитного поля магнитная индукция и напряженность магнитного поля связаны соотношением:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H},$$

то можно переписать выражение (7) в виде:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{J} + \vec{H}) \quad (10)$$

Как показывает эксперимент, вектор намагниченности пропорционален напряженности магнитного поля:

$$\vec{J} = \chi \vec{H} \quad (11),$$

где  $\chi$  - магнитная восприимчивость магнетика. Тогда для напряженности магнитного поля можно записать следующее выражение:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 (1 + \chi)} \quad (12)$$

Безразмерная величина  $\mu = 1 + \chi$  - называется магнитной проницаемостью вещества и показывает как изменится магнитное поле при внесении в него магнетика. Соотношение (12) можно переписать в виде:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu} \quad (13)$$

Внесение магнетика в магнитное поле приводит к возникновению прецессии электронной орбиты атомов вокруг направления магнитного поля (рис.2). Частота прецессии определяется теоремой Лармора:

$$\vec{\omega}_L = -\frac{e\vec{H}}{2m} \quad (14)$$

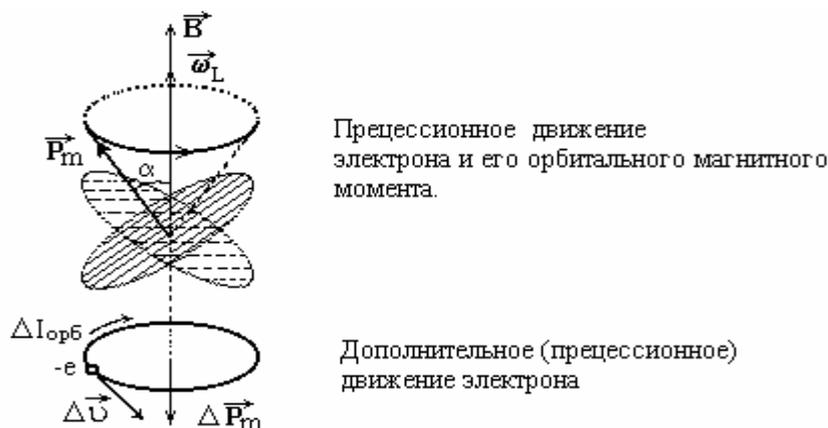


Рис.2

Возникновение прецессии приводит к появлению собственного магнитного поля, которое может быть направлено одинаково с внешним полем - в этом случае возникает парамагнитный эффект, а вещества, в которых наблюдается этот эффект, называются парамагнетиками.

Если собственное поле магнетика направлено противоположно внешнему полю - это явление носит название диамагнитного эффекта - вещества называются диамагнетиками.

У диамагнетиков и парамагнетиков  $\chi = 10^{-4} - 10^{-6}$ ,  
 $\mu > 0$ ,  $\mu > 1$  для парамагнетиков;  
 $\mu < 0$ ,  $\mu < 1$  для диамагнетиков.

Существует особый класс магнетиков, у которых магнитная проницаемость значительно выше единицы  $\mu \gg 1$  (может достигать порядка нескольких тысяч), эти вещества получили название ферромагнетиков. К ферромагнетикам относятся железо, кобальт, никель, гадолиний, их сплавы и соединения.

Кроме того, зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля  $B = f(H)$  для ферромагнетиков является нелинейной. При циклическом перемагничивании она представляет собой петлю гистерезиса (рис.3). Если напряженность внешнего поля достигает нуля, то ферромагнетик остается частично намагниченным, индукция магнитного поля в этом случае называется остаточной  $B_r$ . Для того, чтобы полностью размагнитить ферромагнетик к нему нужно приложить поле, напряженность которого называют коэрцитивной силой  $H_c$ . Если напряженность внешнего поля не достигает величины коэрцитивной силы  $H_c$ , то перемагничивание образца будет происходить по петле гистерезиса, называемой частным циклом перемагничивания. При этом образец не достигает состояния насыщения  $B_m$ .

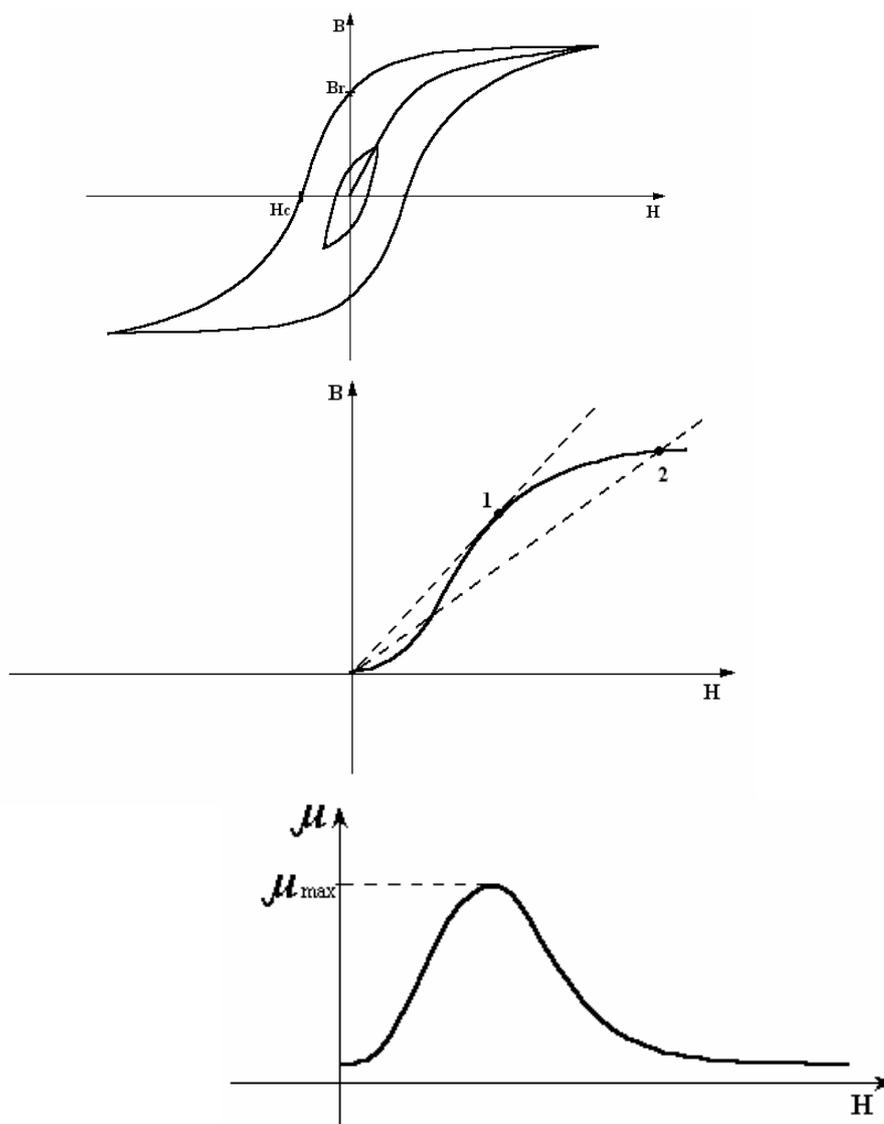


Рис.3.

На петле гистерезиса обозначены особые точки, которые определяют основные параметры ферромагнетика:

$B_m$  - индукция насыщения;

$B_r$  - остаточная индукция, которая определяет величину частичной намагниченности образца после выключения внешнего поля.

$H_c$  - коэрцитивная сила, напряженность поля, при котором происходит полное размагничивание ферромагнетика.

Величины  $B_r$  и  $H_c$  характеризуют основные свойства ферромагнетика. Если значение коэрцитивного поля мало, т.е. петля узкая, то ферромагнетик называют жестким. Если значение остаточной индукции велико, то на основе такого магнетика возможно создание постоянных магнитов.

Магнитные свойства ферромагнетиков в значительной степени зависят от температуры. При некоторой температуре, называемой точкой Кюри ,

ферромагнитные свойства образца исчезают, ферромагнетик становится обычным магнетиком.

Ферромагнетиками чаще всего являются кристаллические вещества, у которых внутренние электронные оболочки оказываются недостроенными, т.е. имеют нескомпенсированный спин. В кристалле могут возникнуть силы, которые называют обменными, способные выстраивать магнитные моменты параллельно в пределах макроскопических областей, т.е. к возникновению областей спонтанного намагничивания - доменов. Домены могут существовать в кристалле только при температурах ниже точки Кюри.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Ферромагнитный образец помещается в соленоид. Первичная обмотка соленоида  $L_1$ , имеющая  $N_1$  витков является намагничивающей (рис.4).

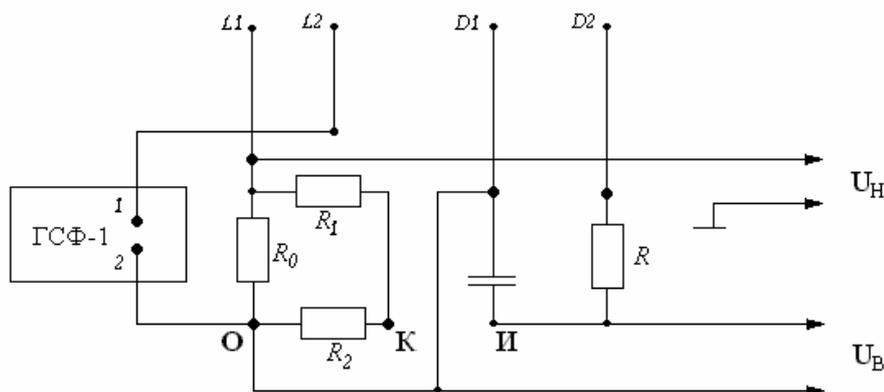


Рис.4

При протекании тока  $I$  по первичной обмотке в соленоиде возникает магнитное поле:

$$H = \frac{N_1 I}{l} \quad (15)$$

где  $N_1$  - число витков первичной обмотки;

$I$  - ток в первичной обмотке;

$l$  - длина соленоида.

Напряжение с выхода генератора через резистор  $R_0$  подается на вертикальные пластины осциллографа

$$U_y = R_0 I = \frac{R_0 l H}{N_1} \quad (16)$$

Напряжение  $U_H$  пропорционально напряженности магнитного поля соленоида.

Вторичная обмотка  $N_2$  является регистрирующей. В этой обмотке наводится э.д. с. электромагнитной индукции

$$\varepsilon = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (17)$$

где  $N_2$  - число витков вторичной обмотки;

$\Phi$  - магнитный поток, возникающий в соленоиде:

$$\Phi = BS_2 = \mu_0 HS_2 \quad (18)$$

$S_2$  - средняя площадь витка вторичной катушки.

Э.д.с. с помощью интегрирующей  $RC$  цепочки преобразуется в напряжение и подается на горизонтальные пластины осциллографа

$$U_B = \frac{N_2 \Phi}{\tau} = \frac{N_2 S_2 B}{RC} \quad (19)$$

$\tau = RC$  - постоянная интегрирующей цепочки.

При размещении в соленоиде длинного образца  $(\frac{1}{d} \sqrt{\mu})$  в образце возникает магнитное поле

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J} \quad (20)$$

В результате магнитный поток, пронизывающий витки соленоида изменяется на величину

$$\Delta \vec{\Phi} = \mu_0 \vec{J} S_2 \quad (21)$$

Для наблюдения зависимости намагниченности образца от напряженности внешнего поля на горизонтальные пластины осциллографа подается напряжение через делитель  $R_1$ ,  $R_2$ , при этом интегрирующая цепочка отключается. Напряжение, подаваемое на пластины становится пропорциональным намагниченности образца.

$$U_B = \frac{\mu_0 J N_2 S_2}{\tau} \quad (22)$$

Изменяя входной ток схемы можно получить частные циклы петли гистерезиса (рис.3). Вершины частных циклов лежат на кривой намагничивания образца  $B=f(H)$ .

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} \quad (23)$$

Отношение  $B/H$  в каждой точке основной кривой намагничивания является тангенсом угла наклона кривой и, в то же время, определяет значение магнитной проницаемости ферромагнетика.

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B}{H} \quad (24)$$

Магнитная проницаемость, определяемая по соотношению (24) называется эффективным значением магнитной проницаемости  $\mu_{эфф}$ . Если взять производную  $B$  от  $H$ , то получим значение дифференциальной магнитной проницаемости  $\mu_{дифф}$ . Воспользовавшись теоремой Лагранжа для непрерывной и дифференцируемой на определенном участке функции можно получить выражение для нахождения дифференциальной магнитной проницаемости по графику функции  $B=f(H)$  :

$$\mu_{дифф} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{dB}{dH} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B(a) - B(b)}{H(b) - H(a)} \quad (25)$$

Построение графика зависимости  $\mu_{дифф} = f(H)$  можно выполнить определив значение функции в точках  $a$  и  $b$  по формуле (25).

### **ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ**

1. Заготовить таблицу.

$N$	$X$	$Y$	$B$	$H$	$\mu_{эфф}$	$\mu_{дифф}$	$J$
	<i>дел</i>	<i>дел</i>	<i>Тл</i>	<i>А/м</i>			<i>А/м</i>

2. Собрать схему установки согласно рис. 4. Выводы схемы расположены на задней панели установки.

3. Изменяя ток на входе схемы получить координаты 5-10 частных циклов  $X$  и  $Y$  зависимости  $B(H)$  и  $J(H)$ . Наблюдение кривой  $J(H)$  производится при переключении ключа  $K$  (ключ расположен на задней панели установки).

4. Зарисовать петлю гистерезиса при максимальном значении тока с учетом масштаба по осям осциллографа. Записать чувствительности осциллографа по осям  $X$  и  $Y$ .

5. По формулам (16) и (19) рассчитать значения  $B$  и  $H$ . Построить кривую намагничивания. Значения  $J$  рассчитать по формуле (22), построить зависимость  $J(H)$ .

6. Используя кривую намагничивания построить графики зависимости  $\mu_{дифф} = f(H)$  и  $\mu_{эфф} = f(H)$ .

7. Используя рисунок определить значения коэрцитивного поля и остаточной индукции.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какие вещества называются магнетиками? Какие существуют магнетики?

2. Дать определение магнитной индукции и напряженности магнитного поля.

3. Дать определение магнитной проницаемости. Виды магнитной проницаемости. Как получить значения эффективной и дифференциальной магнитной проницаемости, воспользовавшись кривой гистерезиса.

4. Особенности ферромагнитных материалов.

5. Что означают понятия магнитомягкие и магнитотвердые материалы?

6. Получить зависимость вектора намагничивания от напряженности магнитного поля.

7. При какой форме образцов напряженность магнитного поля в них постоянна во всем объеме?

8. Получить зависимость вектора намагничивания от напряженности внешнего поля.

9. Описать способ построения зависимостей  $\mu_{дифф} = f(H)$ ,  $\mu_{эфф} = f(H)$ .

### **ЛИТЕРАТУРА**

[1]: §73-79; [2]: §74-79; [3]: §60,63,72; [4]: §40-43; [5]: §7.1-7.6; [6]: §115-122; [7]: §89-93; [11]: 2.12.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Д.В.Сивухин. Общий курс физики. Т.III. Электричество. М.:Наука.1977.С.688.
2. Д.В.Сивухин. Общий курс физики. Т.III. Электричество. Ч.I. М.: Наука. 1996. С.320.
3. И.Е.Тамм. Основы теории электричества. М.: Наука. 1989. С.504.
4. А.Н.Матвеев. Электричество и магнетизм. М.: Высш.шк. 1983 С.463.
5. И.Е.Иродов. Электромагнетизм. Основные законы. М.: Лаборатория Базовых Знаний. 2000. С.352.
6. С.Г.Калашников. Электричество. М.: Наука.1970. С.668.
7. Г.Е.Зильберман. Электричество и магнетизм. М.: Наука. 1970. С.384.
8. М.Мэндл. 200 избранных схем электроноки. М.: «Мир». 1980.С.344.
9. Электрические измерения. Под ред. А.В.Фремке. Е.М.Душина. Л.: «Энергия».1980. С.392.
10. Э.В.Бурсиан. Физические приборы. М.:Просвещение. 1984. С.271.
11. Лабораторный практикум по общей физике. Под ред. Е.М.Гершензона. Н.Н.Малова. М.: Просвещение. 1985. С.351.
12. Лабораторный практикум по физике. Под ред. Л.М.Гольдина. М.: Наука. 1983. С.704.

Сведения об авторах

**Ирина Борисовна Копылова,**

Доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики АмГУ, канд.  
физ.-мат. наук;

**Александр Анатольевич Согр,**

И.о. зав. кафедрой теоретической и экспериментальной физики АмГУ, канд.  
физ.-мат. наук, доцент;

**Вера Федоровна Ульянычева,**

Доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики АмГУ, канд.  
физ.-мат. наук;

**Ольга Викторовна Козачкова,**

Старший преподаватель кафедры теоретической и экспериментальной  
физики АмГУ;