

53(07)

П851

№ 4797



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное  
автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Южный федеральный университет"  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ В Г. ТАГАНРОГЕ



КАФЕДРА ФИЗИКИ

**ПРАКТИКУМ**  
по дисциплине  
**ФИЗИКА**

раздел **ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**

**ЕГФ**

Таганрог 2011

**УДК 53(076.5)+537(076.5)+538(076.5)**

Составители: Ю.П. Пасичный (№ 301, 305), Е.Е. Нестюрина (№ 302, 304), Г.М. Набоков (№ 302), И.Б. Доценко (№ 303), Н.Н. Филиппева (№ 304), М.И. Сластен (№ 305), Н.А. Какурина (№ 305), В.А. Фатеева, Е.М. Комарова, Ю.Б. Какурин

Практикум по дисциплине "Физика" раздел "Электричество и магнетизм". – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – 88 с.

Практикум содержит описание лабораторных работ по дисциплине «Физика» и предназначен в помощь студентам, выполняющим лабораторные работы по разделу «Электричество и магнетизм». Представлены три цикла лабораторных работ: электростатическое поле, магнитное поле в вакууме, магнитное поле в магнетиках.

Табл. 11. Ил. 30. Библиогр.: 2 назв.

Рецензент С.А. Богданов, канд. техн. наук, доцент кафедры физики ТТИ ЮФУ.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Электростатическое поле.....	4
301. Исследование электростатического поля.....	6
302. Изучение движения электронов в электрическом поле.....	15
2. Магнитное поле в вакууме.....	37
303. Определение индукции магнитного поля прямолинейного и кругового проводников с током.....	44
3. Магнитное поле в магнетиках.....	56
304. Снятие кривой намагничивания петли гистерезиса с помощью осциллографа.....	62
305. Исследование зависимости обратимой магнитной проницаемости феррита от напряженности магнитного поля.....	74
Библиографический список.....	87

## 1. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Электрическое поле, создаваемое неподвижными электрическими зарядами, называется электростатическим.

Для количественной характеристики каждой точки электростатического поля используют физические величины: напряженность и потенциал.

Напряженность в какой-либо точке электрического поля называется вектор  $\vec{E}$ , численно равный силе, с которой поле действует на единичный заряд, помещенный в данную точку.

Если на пробный заряд  $q_0$  в данной точке действует сила  $\vec{F}$ , то напряженность поля

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}.$$

Напряженность по направлению совпадает с силой, действующей на положительный заряд. Таким образом, напряженность является силовой характеристикой электростатического поля.

Силовой линией (или линией вектора напряженности поля) называют линию, касательная к которой в каждой точке совпадает по направлению с вектором напряженности электростатического поля. Линии вектора напряженности поля отдельно взятого точечного заряда представляют собой совокупность радиальных прямых, исходящих из заряда, если он положителен, и входящих в него, если он отрицателен. Количество силовых линий остается постоянным и в связи с этим при удалении от заряда плотность силовых линий (количество силовых линий на единицу площади поперечного сечения) убывает.

Так как сила взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов пропорциональна величине каждого из зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними

$$F = k \frac{qq_0}{r^2},$$

то напряженность поля точечного заряда убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от точечного заряда

$$E = k \frac{q}{r^2}.$$

Электростатическое поле потенциально. Это означает, что работа электростатического поля по перемещению пробного заряда не зависит от формы пути, а определяется начальным и конечным положениями заряда.

Потенциал есть энергетическая характеристика поля. Для любого потенциального поля работа равна разности потенциальных энергий  $W$  этого заряда в начальной и конечной точках перемещения

$$A = W_1 - W_2.$$

Потенциалом в данной точке поля называют величину, численно равную потенциальной энергии единичного положительного заряда, помещенного в данную точку. Таким образом, получим

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = -q\Delta\varphi.$$

При малых перемещениях  $\Delta r$ , совпадающих с направлением силовой линии,

$$A = F\Delta r$$

или

$$A = qE\Delta r.$$

Сравнивая с  $A = -q\Delta\varphi$ , получим

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta r}.$$

Эта формула связывает между собой две важнейшие характеристики поля: силовую (напряженность) и энергетическую (потенциал). Знак "минус" отражает тот факт, что вектор напряженности направлен в сторону наиболее быстрого убывания потенциала. Кроме силовых линий, для визуального отображения электростатических полей применяются также эквипотенциальные поверх-

ности. Эквипотенциальной поверхностью называется геометрическое положение точек с равными потенциалами (на плоскости – это эквипотенциальные линии). Количество потенциальных поверхностей может быть произвольным, но картина поля, построенная с помощью эквипотенциальных поверхностей, будет наглядной, если разность потенциалов между любыми соседними эквипотенциальными поверхностями одна и та же. В этом случае по густоте эквипотенциальных поверхностей (линий) можно визуально судить о величине напряженности поля в данном месте. Все эквипотенциальные поверхности ортогональны силовым линиям в точках их пересечения.

## **301. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ**

### **301.1. Цель работы**

Изучение картины электростатического поля.

### **301.2. Теоретический материал**

Электростатическое поле в вакууме. Основные характеристики электростатического поля. Графическое изображение стационарных электрических полей с помощью силовых линий и эквипотенциальных поверхностей. Связь напряженности и потенциала электрического поля.

[1. С. 11 – 28; 2. С. 130 – 140].

### **301.3. Постановка задачи**

Построить картину эквипотенциальных линий электрического поля. Исследовать зависимости потенциала и

напряженности электростатического поля от горизонтальной и вертикальной координат.

### 301.4. Описание установки

В работе изучение электростатического поля неподвижных зарядов заменено изучением стационарного поля электрического тока, протекающего в электропроводящей бумаге между двумя электродами.

Установка для экспериментального исследования поля включает в себя: электропроводящую бумагу, по краям которой установлены электрод *B* и электрод *C*; зонд *D*, изготовленный в виде графитового щупа-карандаша; гальванометр *G* (типа М2001); вольтметр *V* постоянного напряжения (типа М2017); реостат *R*; источник тока (ЭДС = 1,5 В). Схема подключения представлена на рис. 301.1.

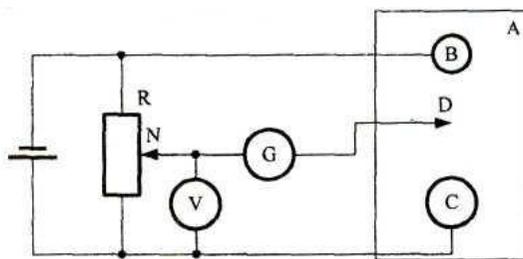


Рис. 301.1

Если зонд поставить в точку на проводящей бумаге, потенциал которой относительно электрода *C* совпадает с потенциалом зонда *D* (выставляется регулятором *R* и контролируется вольтметром *V*), то гальванометр покажет нулевой ток. Эта точка отмечается нажатием карандаша. Чтобы найти форму эквипотенциальной линии,

необходимо отметить ряд положений зонда  $D$ , соответствующих одному и тому же показанию вольтметра и нулевому току в цепи гальванометра. Незначительное стекание зарядов с электродов пополняется источником тока. Электропроводная бумага с электродами укладывается на чистый лист протокола через копировальную бумагу. При нажатии карандашом на листе протокола остается след от копировальной бумаги. После исследования эквипотенциальных линий следы одинаковых потенциалов на протоколе соединяются плавной кривой. Меняя потенциал зонда  $D$  с помощью регулятора  $R$ , аналогичным образом строят вторую эквипотенциальную линию, затем третью и т.д. Выбирать потенциалы зонда рекомендуется так, чтобы разность потенциалов между соседними эквипотенциальными линиями отличалась на одну и ту же величину.

Описанный метод применим для изучения сложных электростатических полей, точный расчет которых затруднен из-за сложности граничных условий (электростатические линзы, многоэлектродные лампы и др.).

### **301.5. Порядок выполнения экспериментальной части работы**

1. Подготовить установку в следующем порядке:

1.1. Положить бланк отчета с заранее заготовленной сеткой или миллиметровой бумагой, поверх него лист копировальной бумаги красящей основой вниз, поверх листа копировальной бумаги положить лист электропроводной бумаги, проводящей основой вверх.

1.2. По краям электропроводной бумаги установить

предлагаемые электроды.

1.3. Собрать электрическую схему, показанную на рис. 301.1.

2. Обвести карандашом электрод С и электрод В. В результате этой операции при помощи копировальной бумаги на бланке протокола будут отмечены электроды.

3. Включить установку тумблером «пит.». Должен засветиться красный светодиод.

4. Установить регулятором  $R$  минимальное напряжение, равное 0,1 В (записать значение в черновик).

5. Водить с легким нажимом зондом по электропроводной бумаге и найти точки, в которых гальванометр показывает нулевое значение тока – это и есть точки эквипотенциальной поверхности. При попадании в каждую точку необходимо нажать на зонд, чтобы след отпечатался через копировальную бумагу на бланке отчета. Получите 5 – 10 точек.

6. Установить регулятором напряжение на 0,1 В выше предыдущего и проделать п. 5. Значение напряжения записать на краю листа напротив эквипотенциальной линии.

7. Проделывать п. 6, пока щуп не достигнет второго электрода с потенциалом 1,5 В.

**Примечание.** Вблизи электродов с внутренней стороны (между электродами) эквипотенциальные линии могут быть неразличимыми и практически сливаться с электродами ввиду повышенной напряженности поля на этих участках. Постарайтесь все же найти близлежащие эквипотенциальные линии, соответствующие потенциалам 0,1; 0,2; 1,3; 1,4 В, устанавливая щуп сбоку или даже сзади электродов, где напряженность поля ниже. Эти линии должны плавно подходить к поверхностям электродов, обращенным друг к другу. Необходимо помнить, что

очертания электродов также являются эквипотенциальными линиями.

8. Выключите установку выключателем «пит.» – погаснет светодиод.

- ВНИМАНИЕ!**
1. Электрод С и электрод В между собой не соединять.
  2. Во включенном состоянии избегать касания зондом электрода.

### 301.6. Обработка результатов измерений

1. Соединить плавной кривой точки, принадлежащие одной эквипотенциальной линии, и обозначить на них значения потенциалов.

2. Провести на картине эквипотенциальных линий центральную силовую линию, которая является осью симметрии картины эквипотенциальных и силовых линий (прямая, проходящая через центры электродов, начинается на поверхности одного электрода и заканчивается на поверхности другого электрода).

3. Построить график зависимости потенциала поля от горизонтальной координаты  $x$  между электродами. Электрод С в нашем случае будет расположен слева, а электрод В – справа. Значения потенциала выберите для точек, принадлежащих координатной оси, соединяющей электроды. Начало отсчета координаты  $x$  совместите с центром электрода с нулевым потенциалом.

4. Пользуясь построенным графиком, методом численного дифференцирования найти напряженность  $E$  поля для различных значений  $x$ , зная, что

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x}, \quad (301.1)$$

где  $\Delta\varphi$  – изменение потенциала на отрезке  $\Delta x$ .

Расчет проводится следующим образом. Выбрав значение  $x_1$  установить по графику значение  $\varphi_1$ , соответствующее значению  $x_1$ , а затем значение  $\varphi_2$  для  $x_2 = x_1 + \Delta x$ . Разделив  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  на  $\Delta x$ , получим числовое значение напряженности  $E$  поля, которое следует отнести к середине выбранного интервала  $(x_1, x_1 + \Delta x)$ . Расчет выполнить для значений  $x$ , соответствующих точкам пересечения оси  $X$  с эквипотенциальными линиями. Особое внимание обратить на точки, находящиеся вблизи электродов. Результаты расчетов занести в табл. 301.1.

Таблица 301.1

$x$ , см	0													
$\varphi$ , В	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	...	1,5	
$\Delta x$ , см														
$\Delta\varphi$ , В	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	...	0,1	
$E$ , В/см														

5. Построить график зависимости напряженности  $E$  электрического поля от горизонтальной координаты  $x$  на одном графике с зависимостью  $\varphi(x)$ . Примеры зависимостей потенциала и напряженности электростатического поля от продольной координаты, проходящей через середины круглых электродов, приведены на рис. 301.2.

6. По заданию преподавателя провести вертикальную ось  $y$  на картине эквипотенциальных поверхностей. Ось проводится вблизи электродов или через один из электродов так, чтобы она пересекала наибольшее число эквипотенциальных линий. За начало отсчета координаты  $y$  можно принять самую нижнюю точку картины эквипотенциальных линий. Постройте зависимость потенциала от вертикальной координаты  $\varphi(y)$ , предварительно занеся данные в табл. 301.2.

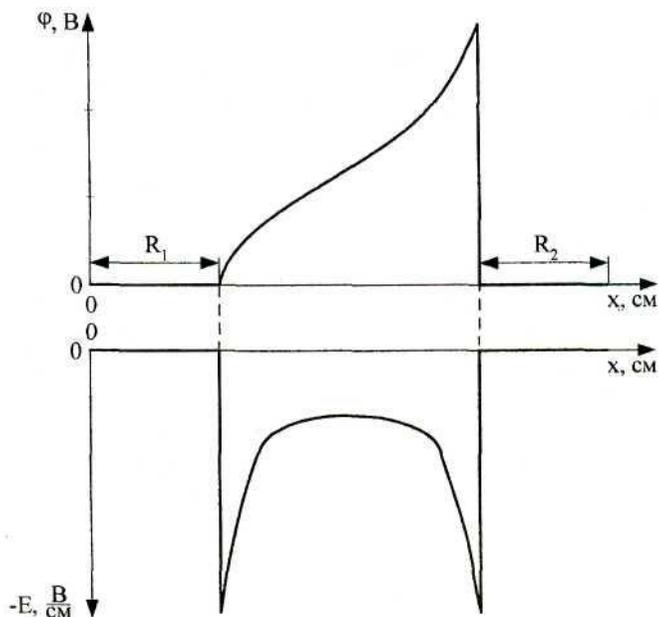


Рис. 301.2

Таблица 301.2

$y, \text{ см}$													
$\Delta l, \text{ см}$													
$\varphi, \text{ В}$													
$\Delta\varphi, \text{ В}$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$E, \text{ В/см}$													

7. В точках посередине между пересечениями вертикальной осью соседних эквипотенциальных линий определить напряженность поля, проведя через эти точки отрезки прямых, ортогональных эквипотенциальным линиям, до пересечения с последними, и разделить разность потенциалов между соседними линиями на длину  $\Delta l$  проведенных отрезков. Эта операция проиллюстрирована на рис. 301.3, на котором изображен фрагмент картины эквипотенциальных линий вблизи правого электрода.

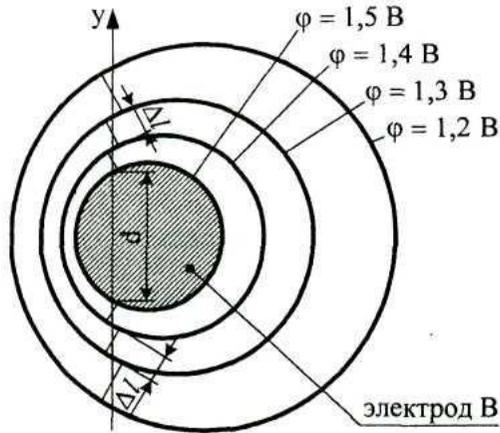


Рис. 301.3

Данные занести в табл. 301.2 и построить зависимость  $E(y)$  на одном графике с  $\varphi(x)$ .

Примеры зависимостей потенциала и напряженности электростатического поля от поперечной (вертикальной) координаты, пересекающей электрод, приведены на рис. 301.4. Здесь  $d$  – длина отрезка координатной оси, пересекающей электрод.

При построении графиков помнить, что если потенциал возрастает с ростом координаты, то напряженность отрицательна, если убывает – положительна.

8. Сопоставить зависимости  $\varphi(x)$  и  $E(x)$ , а также  $\varphi(y)$  и  $E(y)$  и сделать выводы.

### Контрольные вопросы

1. Каков физический смысл напряженности электростатического поля?
2. Каков физический смысл потенциала электростатического поля?

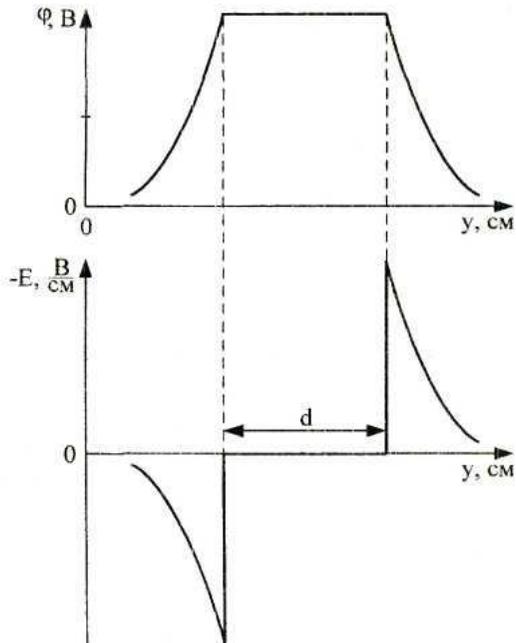


Рис. 301.4

3. Какая существует связь между напряженностью поля и разностью потенциалов?
4. Являются ли силовые и эквипотенциальные линии замкнутыми?
5. Какое поле называется потенциальным?
6. Почему гальванометр показывает нуль, когда зонд стоит на искомой эквипотенциальной линии?
7. Как направлены по отношению друг к другу силовые и эквипотенциальные линии?

## **302. ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

### **302.1. Цель работы**

Изучение движения электронов в электрическом поле; наблюдение исследуемых сигналов и измерение их основных параметров; изучение процессов заряда и разряда конденсатора и определение времени релаксации.

### **302.2. Теоретический материал**

Движение заряженных частиц в электрическом поле. Конденсаторы. Заряд и разряд конденсатора. [1. С. 89 – 91, 210 – 212].

### **302.3. Постановка задачи**

В работе необходимо исследовать процессы заряда и разряда конденсаторов, рассчитать время релаксации и определить неизвестную емкость конденсатора  $C$ . Результаты измерений представить в виде таблиц и графиков.

### **302.4. Описание установки**

Для изучения движения электронов в электрическом поле, а также исследования процессов заряда и разряда конденсатора и определения времени релаксации используется осциллограф.

Осциллограф обладает высокой чувствительностью и безынерционностью, что позволяет исследовать процессы с длительностью до  $10^{-8}$  с в широком диапазоне частот.

Принцип отображения формы электрических сигналов на экране осциллографа можно представить следующим образом.

Исследуемый переменный электрический сигнал является функцией времени. Две пары пластин электронно-

лучевой трубки (ЭЛТ) отклоняют электронный луч в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для наблюдения на экране ЭЛТ исследуемого сигнала необходимо, чтобы луч отклонялся по горизонтальной оси пропорционально времени, а по вертикальной оси – пропорционально исследуемому напряжению. С этой целью к горизонтально отклоняющим пластинам подводят пилообразное напряжение, которое заставляет луч перемещаться по горизонтали с постоянной скоростью слева направо и быстро возвращаться обратно. Исследуемый сигнал подается на вертикально отклоняющие пластины, и, следовательно, положение луча в каждый момент времени однозначно соответствует значению исследуемого сигнала в этот момент. За время действия пилообразного напряжения луч вычерчивает кривую изменения исследуемого сигнала со временем. Изображение на экране осциллографа называется осциллограммой.

Структурная схема осциллографа представлена на рис. 302.1. В нее входят: электронно-лучевая трубка, канал вертикального отклонения, канал горизонтального отклонения и блок питания (БП).

Электронно-лучевая трубка – это электровакуумный прибор, который преобразует электрический сигнал в видимое изображение.

ЭЛТ состоит из электронного прожектора, формирующего узкий пучок электронов, горизонтально и вертикально отклоняющих систем и флюоресцирующего экрана, предназначенного для получения видимого изображения.

Электронный прожектор (см. рис. 302.1) состоит: из подогревателя 1, катода 2 с косвенным нагревом, модулятора 3, ускоряющего 4 и фокусирующего 5 электродов. Перечисленные элементы электронного прожектора служат для создания электронного пучка, регулировки его

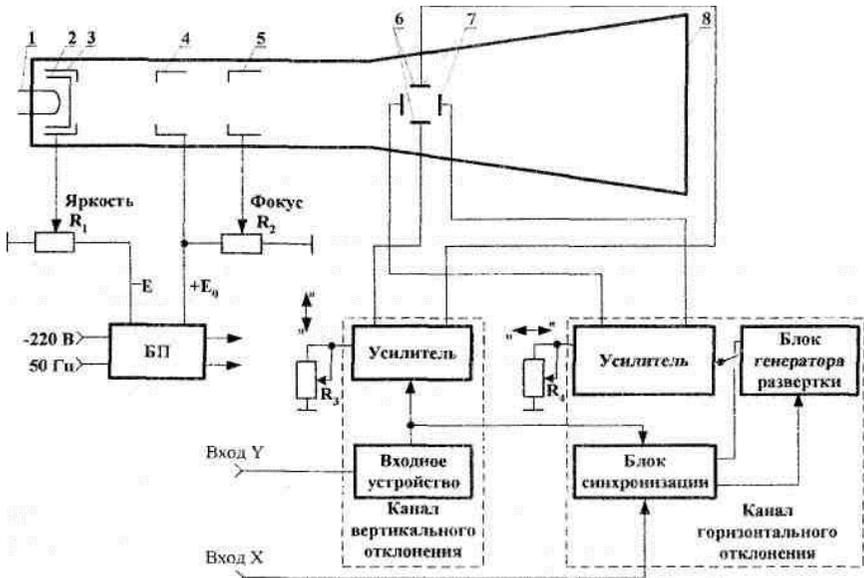


Рис. 302.1

интенсивности (ручка «INTEN») и фокусировки (ручка «FOCUS»).

Пройдя ускоряющее поле электронного прожектора, электроны приобретают кинетическую энергию и движутся к экрану, пролетая между вертикально и горизонтально отклоняющими пластинами 6 и 7. При отсутствии напряжений на отклоняющих пластинах электроны движутся прямолинейно с постоянной скоростью и, попадая на экран 8, создают на нем светящееся пятно. Если на вертикально отклоняющие пластины 6 подана разность потенциалов  $U_y$ , то в пространстве между пластинами на электрон будет действовать сила  $F_y = eU_y/d$ , сообщая ему ускорение  $a_y$  в направлении, перпендикулярном пластинам:

$$a_y = \frac{eU_y}{md}, \quad (302.1)$$

где  $e$  и  $m$  – заряд и масса электрона соответственно;

$d$  – расстояние между пластинами.

Перемещение электрона вдоль оси  $Y$   $y_1$  в области между пластинами 1 (рис. 302.2) равно

$$y_1 = \frac{a_y t_1^2}{2}, \quad (302.2)$$

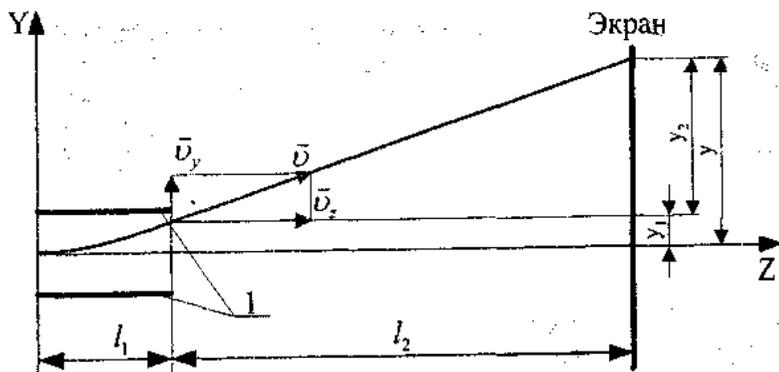


Рис. 302.2

где  $t_1$  – время пролета электрона между пластинами.

В соотношении (302.2)

$$t_1 = \frac{l_1}{v_z}, \quad (302.3)$$

где  $l_1$  – длина отклоняющих пластин;  $v_z$  – скорость движения электронов вдоль оси  $z$ .

Подставляя значения  $a_y$  и  $t_1$  из выражений (302.1) и (302.3) в соотношение (302.2), получим

$$y_1 = \frac{e l_1^2 U_y}{2 m d v_z^2}. \quad (302.4)$$

Перемещение электрона вдоль оси  $Y$   $y_2$  после прохождения отклоняющих пластин до экрана ЭЛТ может быть записано в виде

$$y_2 = v_y t_2, \quad (302.5)$$

где  $v_y$  – скорость электрона вдоль оси Y, которую он приобрел к моменту вылета из пространства между пластинами и экраном;

$t_2$  – время движения электрона от отклоняющих пластин до экрана ЭЛТ.

Составляющую скорости  $v_y$  и время  $t_2$  можно определить из соотношений

$$v_y = a_y t_1 \quad (302.6)$$

и

$$t_2 = \frac{l_2}{v_z}. \quad (302.7)$$

Подставляя значения  $a_y$ ,  $t_1$ , и  $t_2$  из выражений (302.1), (302.3) и (302.7) в выражение для  $y_2$  (302.5), получим

$$y_2 = \frac{el_1 l_2 U_y}{mdv_z^2}. \quad (302.8)$$

Полное отклонение  $y = y_1 + y_2$  получим, используя соотношения (302.4) и (302.8), в виде

$$y = \frac{el_1(l_1 + 2l_2)U_y}{2mdv_z^2}. \quad (302.9)$$

Модуль скорости электрона определяется следующим соотношением:

$$v = \sqrt{v_z^2 + v_y^2}, \quad (302.10)$$

где  $v_z$  определяется из формулы (302.9)

$$v_z = \sqrt{\frac{el_1(l_1 + 2l_2)U_y}{2mdy}}; \quad (302.11)$$

$v_y$  – определяется из уравнения (302.6), подставляя в него вместо  $a_y$ ,  $t_1$  и  $v_z$  их значения из (302.1), (302.3) и (302.11) соответственно:

$$v_y = \sqrt{\frac{2el_1 y U_y}{md(l_1 + 2l_2)}}. \quad (302.12)$$

Из формулы (302.9) видно, что отклонение электрона зависит от разности потенциалов отклоняющих пластин и пропорционально ему. Обозначим

$$P = \frac{eI_1(l_1 + 2l_2)}{2mdv_z^2}. \quad (302.13)$$

Тогда  $y = PU_y$ . Величина  $P = y/U_y$  называется чувствительностью ЭЛТ в направлении Y. Обратная чувствительности величина  $k_y = U_y/y$  показывает, какая разность потенциалов, приложенная к вертикально отклоняющим пластинам, вызывает смещение луча на единицу длины в направлении оси Y. Если к пластинам приложить периодически изменяющееся напряжение, то электронный луч на экране прочертит прямую линию, длина которой будет пропорциональна максимальному значению напряжения, приложенного к пластинам.

Аналогичные явления происходят с электронным лучом при подаче разности потенциалов на горизонтально отклоняющие пластины 7.

Чтобы на экране трубки вызвать смещение электронного луча на расстояние  $x$  в направлении горизонтальной оси, необходимо приложить напряжение  $U_x$  к горизонтально отклоняющим пластинам. Величина  $k_x = U_x/x$  показывает, какая разность потенциалов, приложенная к горизонтально отклоняющим пластинам, вызывает смещение луча на единицу длины в направлении оси X. Если разность потенциалов  $U_x$  и  $U_y$  подать одновременно на горизонтально и вертикально отклоняющие пластины, то электронный луч одновременно сместится вдоль соответствующих осей и займет положение на экране трубки, характеризуемое координатами  $x$  и  $y$ . Обычно на вертикально отклоняющие пластины подается исследуемый сигнал, а на горизонтально отклоняющие пластины подается сигнал от генератора развертки в виде пилообразного напряжения (рис. 302.3).

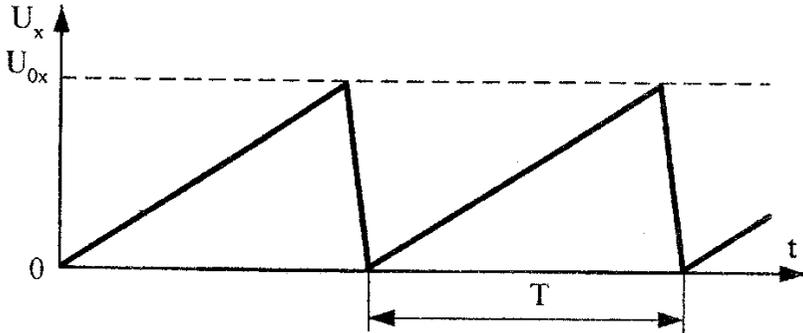


Рис. 302.3

Чтобы получить изображение входного сигнала, необходимо одновременно с подачей сигнала на вертикально отклоняющие пластины подать линейно изменяющееся во времени напряжение на горизонтально отклоняющие пластины, т.е. подать развертывающее напряжение. Принципиально важным являются выбор момента подачи развертывающего напряжения и скорость его изменения во времени.

Схема синхронизации и запуска развертки осуществляет выбор момента времени запуска развертки и формирует импульсы постоянной амплитуды независимо от величины и формы проходящего на вход сигнала. Например, для синусоидального сигнала оптимальным является момент времени, совпадающий с моментом изменения полярности сигнала.

Если генератор развертки, вырабатывающий пилообразное напряжение, запускать в моменты, когда входной сигнал меняет свою полярность, например, от отрицательной к положительной, электронный луч всегда будет попадать в точку на экране с одинаковыми координатами, а это обеспечит создание неподвижного изображения.

Функциональное назначение генератора развертки заключается в формировании пилообразного напряжения с периодом  $nT$ , где  $n$  – целое число, равным или кратным периоду измеряемого сигнала. Пилообразное напряжение усиливается до необходимой величины усилителем горизонтального отклонения и поступает на горизонтально отклоняющие пластины. Это обеспечит смещение электронного луча вдоль горизонтальной оси с постоянной скоростью.

На горизонтально отклоняющие пластины кроме пилообразного напряжения можно также подавать внешнее напряжение непосредственно или через усилитель горизонтального отклонения.

Основное назначение усилителя горизонтального отклонения то же, что и усилителя вертикального отклонения. Усилитель имеет возможность с помощью переменного резистора  $R_4$  регулировать начальную разность потенциалов на горизонтально отклоняющих пластинах для изменения положения изображения на экране осциллографа по горизонтали.

В настоящей работе используется осциллограф АСК-7022, в котором ЭЛТ имеет двойной набор электронных прожекторов, работающих на общий экран, а также имеется два усилителя вертикального отклонения.

В данной работе осциллограф применяется для изучения процессов заряда и разряда конденсатора.

Предположим, что конденсатор емкостью  $C$  был заряжен количеством электричества  $q$ . При подключении заряженного конденсатора к резистору с сопротивлением  $R$  по последнему потечет ток и конденсатор будет разряжаться. За время  $dt$  заряд конденсатора уменьшится на величину

$$dq = -Idt, \quad (302.14)$$

где  $I$  – мгновенное значение тока.

По закону Ома

$$I = \frac{U}{R} = \frac{q}{RC}, \quad (302.15)$$

где  $U$  – мгновенное значение напряжения на конденсаторе.

Продифференцировав уравнение (302.15), получим

$$dq = RCdI. \quad (302.16)$$

Приравнивая правые части уравнения (302.16) и (302.14), имеем

$$RCdI = -Idt.$$

Решив это дифференциальное уравнение, получим

$$I = I_0 e^{-\frac{1}{RC}t}, \quad (302.17)$$

где  $I$  – ток в цепи через время  $t$  после подключения резистора;

$I_0$  – ток в цепи в первый момент после подключения к конденсатору резистора;

$e$  – основание натурального логарифма.

Аналогичная зависимость имеет место и для напряжения на конденсаторе

$$U = U_{0раз} e^{-\frac{1}{RC}t},$$

где  $U_{0раз}$  – начальное напряжение при разряде конденсатора.

Ток заряда конденсатора имеет направление, противоположное току разряда, и изменяется в зависимости от времени по тому же закону, что и ток разряда (302.17).

Напряжение на конденсаторе при его заряде возрастает следующим образом:

$$U = U_{0зар} \left( 1 - e^{-\frac{1}{RC}t} \right),$$

где  $U_{0зар}$  – конечное значение напряжения при заряде конденсатора.

Время  $\tau$ , в течение которого ток заряда (или разряда) конденсатора уменьшается в  $e$  раз, называется временем релаксации. По истечении времени релаксаций  $\tau = RC$  ток в цепи равен

$$I = \frac{I_0}{e}.$$

Время релаксации может быть определено по формуле

$$\tau = \frac{t}{\ln \frac{I_0}{I}}. \quad (302.18)$$

Лабораторная установка для исследования процессов заряда и разряда конденсатора (рис. 302.4) состоит из осциллографа АСК-7022, передняя панель которого представлена на рис. 302.5, лабораторного макета и генератора сигналов SFG -2110.

Лабораторный макет представляет собой цепь, позволяющую исследовать временную зависимость заряда и разряда конденсатора и наблюдать форму входного напряжения, характер изменения напряжения на емкости при заряде и разряде, а также характер изменения тока при заряде и разряде.

Источником входного сигнала (периодической последовательности прямоугольных импульсов) является генератор SFG-2110. Сигнал подается с гнезда «Выход» генератора TTL/CMOS OUTPUT генератора на гнездо «Вход» лабораторного макета. Второй выход генератора OUTPUT подключен к входу внешней синхронизации осциллографа.

Переключатель  $S1$  макета имеет два положения. В положении «1» переключатель замкнут, и сопротивления  $R1$  и  $R2$  образуют резистивный делитель. При этом гнезда «Y1» и «Y2» соединяются параллельно, а емкости  $C1$  и  $C2$ ,

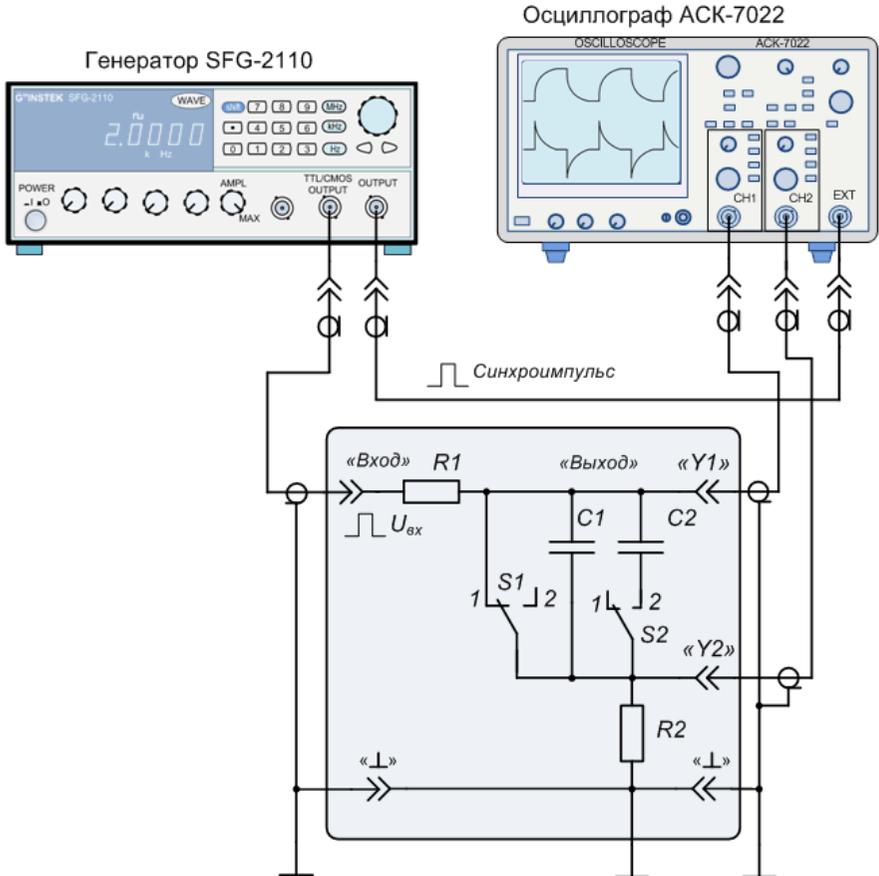


Рис. 302.4

независимо от положения переключателя  $S2$ , не оказывают влияния на форму входного сигнала. В этом положении переключателя  $S2$  контролируется форма входного сигнала.

Для исследования процессов заряда и разряда конденсатора переключатель  $S2$  устанавливают в положение «2».

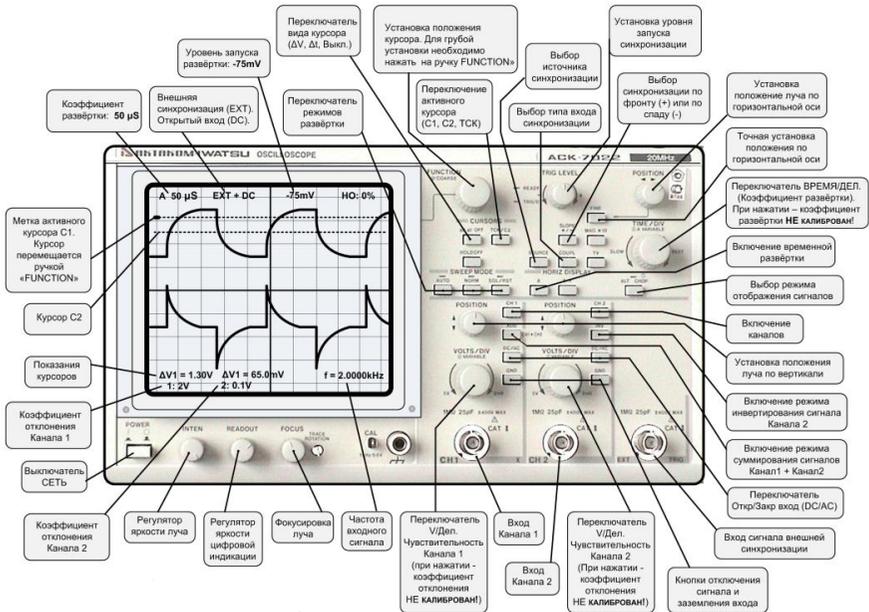


Рис. 302.5

Переключатель  $S_2$  также имеет два положения и предназначен для изменения емкости в цепи лабораторного макета. Положение «1» соответствует включению конденсатора  $C_1$  положение «2» – параллельному включению конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ .

Соотношение резисторов макета удовлетворяет неравенству  $R_1 \gg R_2$ .

Таким образом, на гнездо «Y1» выведен сигнал, пропорциональный напряжению на емкости  $C_1$ , на гнездо «Y2» – сигнал, пропорциональный току в исследуемой цепи.

### 302.5. Порядок выполнения экспериментальной части работы

1. Собрать экспериментальную установку по схеме

(см. рис. 302.4). Установка состоит из электронного осциллографа **АСК-7022**, функционального генератора **SFG2110**, выдающего прямоугольные импульсы, и лабораторного макета. Прямоугольные импульсы амплитудой 5 В и частотой следования 2 кГц с генератора через резистор **RI** поступают на конденсаторы **CI** или **CI+C2**. Лабораторный макет позволяет исследовать временную зависимость заряда и разряда конденсатора и наблюдать на экране осциллографа форму входного напряжения, характер изменения напряжения на конденсаторе при заряде и разряде, а также характер изменения тока при заряде и разряде.

2. Подключить питание генератора и включить его кнопкой «**POWER**» (СЕТЬ).

3. Установить на генераторе **SFG2110** (см. рис. 302.4) ручку «**AMPL**» (АМПЛИТУДА) в среднее положение. Эта ручка должна находиться в нажатом положении. Генератор будет выдавать напряжение на выходе «**OUTPUT**» (ВЫХОД) 5 В.

4. Установить с помощью клавиш цифрового набора частоту сигнала 2 кГц и после набора частоты нажать клавишу «**кHz**». При этом на дисплее будут видны цифры **2.0000**, а под ними – значение единиц измерения частоты **кHz**.

5. Клавишей «**WAVE**» (ФОРМА ВЫХОДНОГО СИГНАЛА) выбрать прямоугольную форму сигнала (). На дисплее над цифрами частоты сигнала будет светиться индикатор импульсов прямоугольной формы «» и индикатор «**TTL/CMOS**».

Если будут ошибочно нажаты другие кнопки, и генератор будет выдавать сигнал другой формы или на дисплее появится «**ERROR**» (ОШИБКА), то можно нажать кнопку «**SHIFT**», а затем – кнопку «2», при этом в генераторе восстановятся заводские настройки. После

этого можно вновь выполнить пп. 3-5.

Остальные органы управления генератора не используются в данной работе.

Для исследования процессов заряда и разряда конденсатора переключатель **S1** установить в положение 2.

6. Подключить питание осциллографа **АСК-7022** и включить сетевой выключатель «**POWER**» (СЕТЬ) (см. рис. 302.4).

7. После прогрева осциллографа, регулятором «**INTEN**» (ЯРКОСТЬ) установить необходимую яркость луча. При необходимости регулятором «**READOUT**» (ПОКАЗАНИЯ) произвести установку яркости дисплея (буквенно-цифровой индикации в верхней и нижней части экрана). На этом дисплее отображаются основные параметры и режимы работы осциллографа. Регулятором «**FOCUS**» (ФОКУСИРОВКА) произвести фокусировку луча.

8. Нажать кнопку «**A**» (ВКЛЮЧЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ РАЗВЁРТКИ). В этом режиме развёртку по горизонтали осуществляет блок развёртки с генератором пилообразного напряжения и блоком синхронизации, а развёртку по вертикали – два канала усилителей: «**CH1**» (КАНАЛ1) и «**CH2**» (КАНАЛ2).

В осциллографе АСК-7022 используется электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) с одной электронной пушкой, а получение на экране двух осциллограмм осуществляется с помощью электронного коммутатора. Такой тип осциллографа называется двухканальным.

9. Включить Канал-1 кнопкой «**CH1**» (КАНАЛ1), а Канал-2 – кнопкой «**CH2**» (КАНАЛ2). При этом на дисплее (в нижней части экрана) появится надпись «**1 : ... V**» «**2 : ... mV**», показывающая установленные коэффициенты отклонения соответствующих каналов. Кнопками «**GND**» (ЗАЗЕМЛЕНИЕ) в каждом канале можно отключать вход

канала от исследуемого сигнала и заземлять его, при этом на экране будет видна горизонтальная нулевая линия. На дисплее возле индикации коэффициента отклонения появится знак  $\perp$ .

10. Включить кнопкой «**AUTO**» (АВТОМАТИЧЕСКАЯ РАЗВЁРТКА) переключателя режимов развёртки «**SWEEP MODE**» режим автоматической развёртки (**первый режим**). В этом режиме запуск развёртки происходит даже при отсутствии сигнала синхронизации, но, конечно, осциллограмма будет нестабильна, потому что генератор развёртки будет работать на частоте собственных колебаний, которая никак не связана с частотой исследуемого сигнала. Когда же сигнал синхронизации присутствует, то в режиме автоматической развёртки происходит синхронизация развёртки и на экране будет устойчивое положение исследуемого сигнала.

Во **втором режиме** (кнопка «**NORM**» (ЖДУЩАЯ РАЗВЁРТКА)) при отсутствии сигнала синхронизации запуска развёртки не происходит, и на экране не будет линии развёртки, что не всегда удобно. Например, если амплитуда сигнала синхронизации окажется меньше уровня запуска развёртки, то осциллограмма может просто исчезнуть с экрана. Поэтому этот режим не используется в данной работе.

**Третий режим** (кнопка «**SGL/RST**» (ОДНОКРАТНАЯ РАЗВЁРТКА)) служит для одиночного прохода развёртки и в данной работе не используется.

11. Кнопкой «**SOURCE**» (ВЫБОР ИСТОЧНИКА СИГНАЛА СИНХРОНИЗАЦИИ) выбрать режим «**EXT**» (ВНЕШНЯЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ). В этом режиме сигнал синхронизации будет поступать через разъём «**EXT TRIG**» (ВНЕШНЯЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ) с разъёма «**OUTPUT**» (ВЫХОД) генератора **SFG2110** (см. рис. 302.4). Достоинст-

вом внешней синхронизации является то, что стабильность осциллограммы не зависит от формы исследуемого сигнала и его амплитуды. Кнопкой «**SOURCE**» можно также выбирать и другие источники сигнала синхронизации (от Канала – 1, от Канала – 2 или от напряжения сети), но они в данной работе не используются.

12. Кнопкой «**COUPL**» (ВЫБОР ТИПА ВХОДА СИНХРОНИЗАЦИИ) выбрать тип открытого «**DC**» или закрытого «**AC**» входа синхронизации. Этой же кнопкой можно выбирать типы входов «**HF REJ**» (ПОДАВЛЕНИЕ ВЧ) или «**LF REJ**» (ПОДАВЛЕНИЕ НЧ), при этом сигнал синхронизации проходит через фильтры, которые подавляют высокочастотные или низкочастотные компоненты сигнала синхронизации. В данной работе фильтры в канале синхронизации не используются.

13. Кнопкой «**SLOPE +/ -**» (ВЫБОР СИНХРОНИЗАЦИИ ПО ФРОНТУ ИЛИ ПО СПАДУ) включается способ запуска развёртки по фронту  $\uparrow$  сигнала синхронизации (+) (сигнал меняется от минимума к максимуму), или по спаду  $\downarrow$  сигнала синхронизации (-) (сигнал меняется от максимума к минимуму). Для получения осциллограммы, такой как на рис.302.7.б, 302.7.в, необходимо производить синхронизацию по фронту (+). При выборе внешней синхронизации (EXT), открытого входа (DC) и выбора синхронизации по фронту (+) в верхней части экрана появится надпись «**EXT + DC**».

14. Установить, вращая ручку переключателя «**TIME/DIV**» (ВРЕМЯ/ДЕЛ.), коэффициент развёртки, равный **50  $\mu$ S**. Индикация коэффициента развёртки «**A 50  $\mu$ S**» будет видна в левом верхнем углу экрана. При нажатии на ручку «**TIME/DIV**» (ВРЕМЯ/ДЕЛ.) и её вращении устанавливается некалиброванный коэффициент развёртки, при этом дисплей будет показывать «**A > 50  $\mu$ S**». Этот режим не используется в данной работе.

15. Вращая ручку «**TRIG LEVEL**» (УРОВЕНЬ ЗАПУСКА), необходимо получить устойчивую осциллограмму временных зависимостей заряда и разряда конденсатора (см. рис. 302.7, б, 302.7, в) на экране осциллографа. В нижнем правом углу экрана появится надпись «**f = 2.0000 kHz**», показывающая частоту входного сигнала.

16. Кнопкой «**MAG x 10**» (РАСТЯЖКА ЛИНИИ РАЗВЁРТКИ В 10 РАЗ) можно «растянуть» длину линии развёртки – увеличить её в 10 раз, при этом в правом нижнем углу экрана появляется надпись «**MAG**». Но из-за возрастания скорости перемещения луча по экрану, уменьшается его яркость, поэтому этот режим не используется в данной работе.

17. Установить переключателем «**VOLTS/DIV**» (ВОЛЬТ/ДЕЛ.) Канала-1 «**CH1**» коэффициент отклонения в положение 2V /дел., а Канала-2 – 100 mV/дел. При этом в левом нижнем углу экрана дисплей будет показывать «**1 : 2V**» и «**2 : 100 mV**». Нажатие на ручки этих переключателей приведёт к установке некалиброванного коэффициента отклонения канала. При этом на экране появится надпись: «**1 :> 2V**» или «**2 :> 100 mV**». Этот режим не используется в данной работе, и для его отключения следует повторно нажать на эту ручку.

18. Кнопка «**AC/DC**» служит для переключения входов Канала-1 в режим закрытого или открытого входа. При закрытом входе на надписи «**1 : 2V**» над буквой **V** появляется знак «**~**». В данной работе эта кнопка может быть в любом положении.

19. В результате выполнения предыдущих пунктов на экране должно появиться устойчивое изображение формы сигнала. С помощью регуляторов установки положения луча по вертикали «**POSITION**  $\updownarrow$ » (ПОЛОЖЕНИЕ  $\updownarrow$ ) в Канале-1 и Канале-2 установите изображение исследуемого сигнала примерно как на рис. 302.5.

Положение вдоль горизонтальной оси можно устанавливать регулятором «**POSITION** < >» (он находится в правом верхнем углу передней панели осциллографа), причём при нажатии кнопки «**FINE**» (ПЛАВНО), производится плавная регулировка.

Все описанные операции служат для предварительной настройки осциллографа.

20. Далее при выполнении измерений различных параметров исследуемого сигнала можно устанавливать переключателем «**VOLTS/DIV**» (ВОЛЬТ/ДЕЛ.) другие коэффициенты отклонения, изменяя размер изображения, а с помощью переключателя «**TIME/DIV**» (ВРЕМЯ/ДЕЛ.) производить «сжатие» или «растяжку» изображения по горизонтальной оси.

21. На осциллографе АСК-7022 возможно производить измерения с помощью курсоров. Использование курсоров ускоряет измерения и значительно уменьшает погрешность измерения по сравнению с традиционными методами измерения с помощью масштабной сетки экрана осциллографа.

В режиме временной развёртки можно измерять разность напряжения  $\Delta V$  по вертикальной оси и длительность временных интервалов  $\Delta t$  по горизонтальной оси. Для включения курсорных измерений необходимо нажать кнопку « **$\Delta V \Delta t$  OFF**» ( $\Delta V \Delta t$  ВЫКЛ.), которая переключает виды курсоров в последовательности: **горизонтальные курсоры – вертикальные курсоры – выкл.** При включении горизонтальных курсоров (измерение разности напряжения  $\Delta V$ ) на экране появляются две пунктирные горизонтальные линии курсора С1 и курсора С2, причём кнопкой выбора активного курсора «**ТСК/С2**» можно сделать активным любой из курсоров: С1 или С2. В режиме **ТСК** (СЛЕЖЕНИЕ) будут активны оба курсора (режим

слежения в данной работе **не используется**). Если выбран активным курсор  $C1$ , то в верхнем правом углу экрана появится надпись «**f: V – C1**». Если выбран активным курсор  $C2$ , то появится надпись: «**f: V – C2**». Активный курсор на экране выделен яркой меткой на конце пунктира, и его можно перемещать, вращая ручку «**FUNCTION**» (ФУНКЦИЯ), которая при нажатии на неё и вращении осуществляет грубое перемещение. Отсчёт показаний курсоров  $\Delta V$  будет показан в нижнем левом углу экрана. Например, « **$\Delta V1 = 1.30V$** ».

Выбрав кнопкой « **$\Delta V \Delta t \text{ OFF}$** » ( $\Delta V \Delta t$  ВЫКЛ.) вертикальные курсоры, можно по горизонтальной оси измерять длительности временных интервалов  $\Delta t$ . При этом на экране вверху справа появится надпись: «**f: H – C1**» или – «**f: H – C2**» в зависимости от выбранного активного курсора. Отсчёт показаний  $\Delta t$  будет показан в нижнем левом углу экрана. Например, если дисплей (при произвольно установленных курсорах) показывает « **$\Delta t = 200 \mu S, 1/\Delta t = 5.00kHz$** », то надпись « **$1/\Delta t = 5.00kHz$** » означает, что микроконтроллер осциллографа «**вычислил**» величину обратную измеренному интервалу  $\Delta t = 200 \mu S$  и получилось **5 кГц**.

Остальные органы управления осциллографа не используются в данной работе.

22. Вращая ручку переключателя «**TIME/DIV**» (ВРЕМЯ/ДЕЛ.), получить на экране осциллографа изображение одного периода зависимости  $U_c(t)$  и  $I_c(t)$  (см. рис 302.6,б и рис 302.6,в) соответственно.

Форму входного сигнала  $U_{вх}$  можно проконтролировать, установив переключатель  $S1$  в положение «1». Затем вновь установить этот переключатель в положение «2».

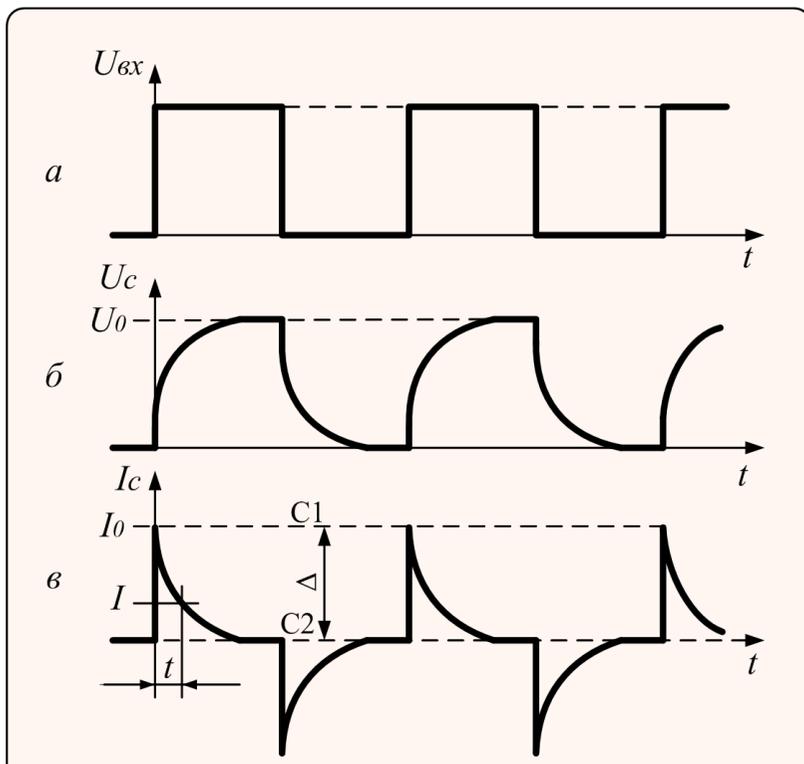


Рис. 302.6

23. Используя курсоры, измерить величины  $U_0$ ,  $I_0$ . При измерении  $U_0$  и  $I_0$  выбрать кнопкой « $\Delta V \Delta t$  OFF» ( $\Delta V \Delta t$  ВЫКЛ.) горизонтальные курсоры. Установить курсор C2 на горизонтальную ось. Для этого можно выключить исследуемый сигнал кнопкой «GND» (ЗАЗЕМЛЕНИЕ) в соответствующем канале, совместить курсор C2 с горизонтальной линией, а затем снова включить сигнал. Установить курсор C1 на вершины соответствующих импульсов (рис. 302.6, в). Отсчёт показаний курсоров будет показан внизу экрана. Если производится измерение параметров напряжения на конденсаторе  $U_c(t)$  (см. рис. 302.6, б), то надо считывать показания « $\Delta V1 = \dots V$ », а если

измеряется величина тока через конденсатор  $I_c(t)$  (см. рис. 302.6,е), то надо считывать показания « $\Delta V2 = \dots mV$ ».

При измерениях токов необходимо показания курсоров  $\Delta V2$  пересчитать в величину тока  $I_0 = \Delta V2/R2$ , где  $R2 = 1,2$  кОм.

24. Определить величину  $I$  для произвольной точки  $t$ . Для измерения  $I$  «растянуть» осциллограмму с помощью переключателя «**TIME/DIV**» (ВРЕМЯ/ДЕЛ.), установив коэффициент развёртки, равный  $20 \mu S$ . Затем регулятором «**POSITION < >**» установить изображение осциллограммы так, чтобы произвольная точка  $t$  лежала на одной из вертикальных линий масштабной сетки экрана, измерить величину  $I$  устанавливая курсор – С2 на горизонтальную ось графика зависимости  $I_c(t)$  (аналогично п. 23), а курсор С1 – на точку пересечения зависимости  $I_c(t)$  с выбранной вертикальной линией масштабной сетки. Считать показания. Для удобства измерений  $I_c(t)$  можно выключить Канал-1 кнопкой «**CH1**» (КАНАЛ1).

Измерить величину  $t$ . Для этого необходимо выбрать кнопкой « **$\Delta V \Delta t$  OFF**» ( $\Delta V \Delta t$  ВЫКЛ.) вертикальные курсоры, установить курсор С2 на начало осциллограммы, а курсор С1 на ту вертикальную линию масштабной сетки экрана, которая была выбрана для измерения величины  $I$ . Рассчитать по формуле (302.18) время релаксации  $\tau$ .

25. По известным величинам сопротивлений  $R1=27$  кОм и  $R2=1,2$  кОм и рассчитанному значению  $\tau$  определить неизвестную емкость  $C1$  из формулы  $\tau = RC$ , где  $R = R1 + R2$ .

26. Установить переключатель  $S2$  в положение «2» и повторить пп. 22 – 25 для определения неизвестной емкости  $C2$ . При этом надо сначала определить суммарную емкость, а затем уже вычислить из формулы  $C2 = C_{\Sigma} - C1$  собственно величину  $C2$ .

27. Результаты измерений и вычислений занести в

табл. 302.1.

28. Оценить абсолютную и относительную погрешность измерений.

Таблица 302.1

Положение S2	$I_0$ , А	$I$ , А	$U_0$ , В	$t$ , с	$\tau$ , с	$R$ , кОм	$C$ , Ф
«1»						28.2	
«2»						28.2	

### Контрольные вопросы

1. Выведите формулу для чувствительности ЭЛТ.
2. Расскажите об устройстве и принципах работ ЭЛТ.
3. Как происходит движение электронов в ЭЛТ?
4. Почему для развертки осциллографа используют пилообразное напряжение?
5. Выведите формулы для изменений тока и напряжения при заряде и разряде конденсатора.
6. Объясните работу схемы лабораторного макета.
7. Каково назначение элементов схемы лабораторного макета?

## 2. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ

Магнитное поле является силовым полем, действующим на движущиеся электрические заряды и на тела, обладающие магнитным моментом. Источником макроскопического магнитного поля являются намагниченные тела, проводники с током и движущиеся электрически заряженные тела. Природа этих источников едина: магнитное поле возникает в результате движения заряженных микрочастиц (электронов, протонов, ионов), а также благодаря наличию у микрочастиц собственного (спинового) магнитного момента. Аналогично электрическому полю магнитное поле изображается графически с помощью силовых линий, линий магнитной индукции, касательные к которым в любых точках совпадают по направлению с векторами магнитной индукции. Силовые линии любого постоянного магнитного поля являются замкнутыми (либо начинаются и оканчиваются на бесконечности). В этом проявляется качественное отличие магнитного поля от электростатического, силовые линии которого всегда имеют начало (на положительных электрических зарядах) и конец (на отрицательных зарядах). Направление силовых линий магнитного поля определяется по правилу буравчика (рис. 2.1, 2.2).

Силовые линии постоянного магнита выходят из его северного полюса и заходят в южный полюс, внутри постоянного магнита силовые линии замыкаются (рис. 2.3).

Основной характеристикой магнитного поля, определяющей силовое воздействие на движущийся электрический заряд, является вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ .

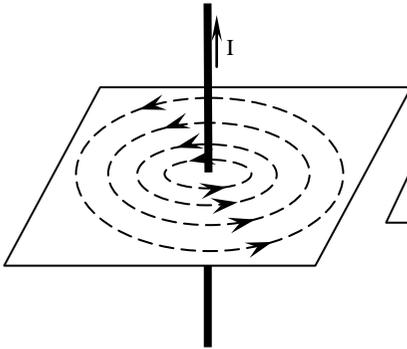


Рис. 2.1

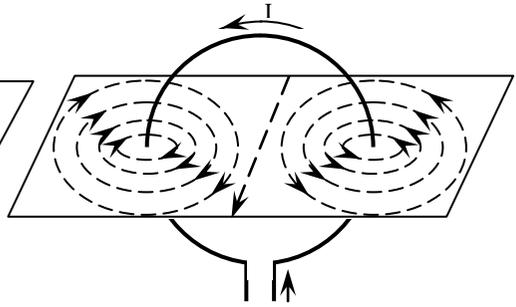


Рис. 2.2

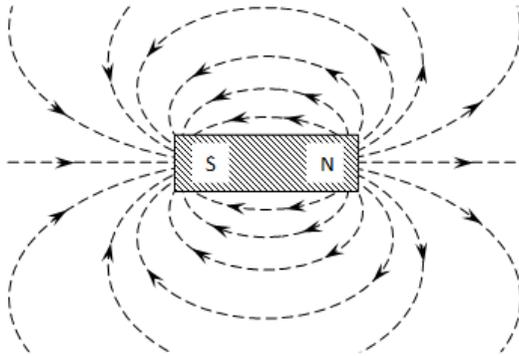


Рис. 2.3

Экспериментально установлено, что на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля действует сила, определяемая выражением

$$\vec{F} = q[\vec{v}, \vec{B}], \quad (2.1)$$

где  $q$  – электрический заряд частицы;  $\vec{v}$  – ее скорость;  $\vec{B}$  – индукция магнитного поля. Эту силу называют силой Лоренца. Модуль этой силы

$$F = |q|vB \sin \alpha, \quad (2.2)$$

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

Для положительного заряда  $q$  векторы  $\vec{F}$ ,  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$  образуют правую тройку векторов (рис. 2.4). При изменении знака заряда направление силы также изменится на противоположное. Очевидно, что сила  $\vec{F}$  будет максимальной, когда угол  $\alpha=90^\circ$ . Тогда из формулы (2.2) следует

$$B = \frac{F_{\text{макс}}}{|q|v}. \quad (2.3)$$

На основании формул (2.1) и (2.3) можно дать определение индукции магнитного поля  $\vec{B}$ : магнитная индукция есть вектор, по величине равный максимальной силе, с которой магнитное поле действует на единичный заряд, движущийся с единичной скоростью в этом магнитном поле. Вектор магнитной индукции имеет такое направление, что при кратчайшем повороте правого винта от вектора  $\vec{v}$  к вектору  $\vec{B}$  поступательное движение этого винта совпадает по направлению с силой, действующей на положительный заряд (см. рис. 2.4).

Экспериментально установлено, что индукция магнитного поля  $\vec{B}$ , создаваемая в точке  $M$  движущимся в вакууме со скоростью  $\vec{v}$  электрическим зарядом  $q$  (см. рис. 2.2), определяется выражением

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{q[\vec{v}, \vec{r}]}{r^3}, \quad (2.4)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;

$\vec{r}$  – радиус-вектор, проведенный от движущегося заряда в точку  $M$ , в которой определяется индукция  $\vec{B}$  (рис. 2.5).

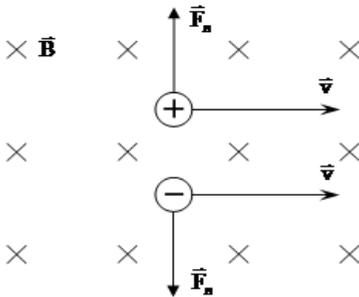


Рис. 2.4

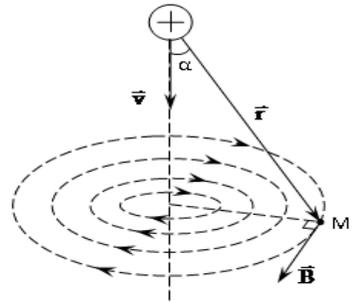


Рис. 2.5

Направление этого поля перпендикулярно к скорости  $\vec{v}$  частиц и к радиус-вектору  $r$ , проведенному из заряда в рассматриваемую точку.

Если заряд  $q$  положителен, то из конца вектора  $B$  вращение от  $\vec{v}$  к  $\vec{r}$  по кратчайшему пути кажется происходящим против часовой стрелки (рис. 2.6). Если заряд  $q$  отрицателен, то вектор  $B$  направлен в противоположную сторону (рис. 2.7).

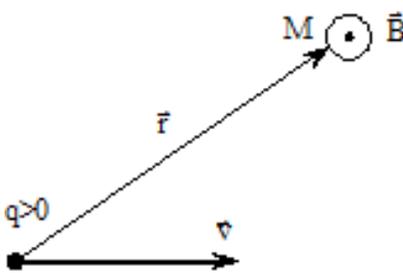


Рис. 2.6

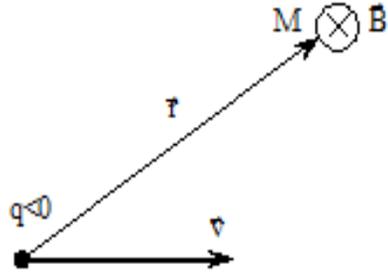


Рис. 2.7

Зная, как определить величину и направление индукции магнитного поля, создаваемого движущимся одиночным электрическим зарядом, легко определить индукцию магнитного поля, создаваемую всеми зарядами,

движущимися в проводнике с током, используя принцип суперпозиции полей  $d\vec{B} = N\vec{B}_q$ , где  $d\vec{B}_q$  – вектор магнитной индукции, создаваемой отрезком проводника  $d\vec{l}$ ,  $N$  – число зарядов, находящихся в данном отрезке,  $d\vec{B}_q$  – вектор магнитной индукции, источником которого является движущийся заряд  $q$ .

На основе выражения (2.4) можно получить выражение для индукции  $d\vec{B}$ , создаваемой в точке  $M$  зарядами, движущимися в элементе длины проводника  $d\vec{l}$ :

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}, \quad (2.5)$$

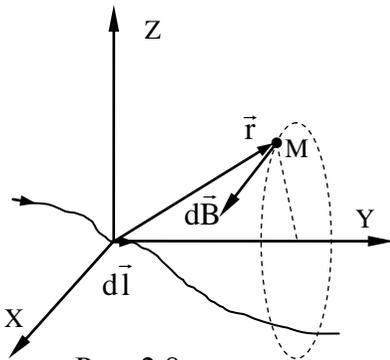


Рис. 2.8

где  $I$  – сила тока в проводнике;  $\vec{r}$  – радиус-вектор, проведенный от элемента  $d\vec{l}$  проводника в точку  $M$ , в которой определяется индукция  $\vec{B}$  (рис. 2.8).

Выражение (2.5) носит название закона Био-Савара-Лапласа.

Вектор  $d\vec{B}$  направлен перпендикулярно плоскости, проведенной через  $d\vec{l}$  и  $\vec{r}$ , и связан с направлением тока правилом правого винта.

Модуль вектора  $d\vec{B}$  равен

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}, \quad (2.6)$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $d\vec{l}$  и  $\vec{r}$ .

Закон Био-Савара-Лапласа позволяет определить индукцию магнитного поля, создаваемого проводником с током любой конфигурации. Для этого необходимо, используя принцип суперпозиции, проинтегрировать (2.5) вдоль конкретного проводника длиной  $L$ :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_L \frac{[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}. \quad (2.7)$$

В случае, когда все элементы  $d\vec{B}$  имеют в интересующей нас точке поля одинаковое направление, для нахождения индукции достаточно проинтегрировать выражение для модуля  $dB$  (2.6) вдоль контура с током

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_L \frac{\sin \alpha}{r^2} dl. \quad (2.8)$$

Интеграл (2.8) выражается в элементарных функциях лишь для токов простой конфигурации, например, для прямолинейного проводника и кругового витка с током.

Результат интегрирования для прямолинейного проводника с током конечной длины известен:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2). \quad (2.9)$$

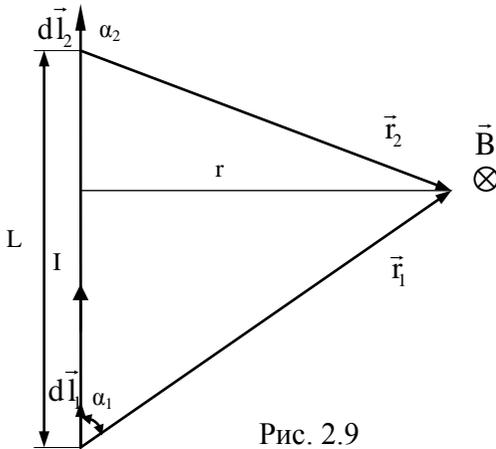


Рис. 2.9

В соответствии с правилом правого винта индукция магнитного поля  $\vec{B}$  в интересующей нас точке направлена перпендикулярно плоскости рисунка за рисунок, что отмечено кружочком с крестиком (рис. 2.9). Из ри-

сунка также видно, что  $r$  – расстояние от точки, в которой определяется поле, до проводника с током;  $\alpha_1$  – угол между начальным радиус-вектором  $\vec{r}_1$  и элементом проводника  $d\vec{l}_1$ ;  $\alpha_2$  – угол между конечными  $\vec{r}_2$  и  $d\vec{l}_2$ ;  $L$  – длина проводника. Если определить  $\vec{B}$  в точках, расположенных на перпендикуляре, восстановленном из середины проводника, то, учитывая (2.9), для проводника конечной длины имеем

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{IL}{r\sqrt{r^2 + L^2/4}}. \quad (2.10)$$

Для определения зависимости индукции магнитного поля от продольной координаты  $z$  введем ось  $OZ$  (рис. 2.10), поместив начало оси в середине проводника. Тогда, в соответствии с (2.9), для любой точки с координатами  $r$  и  $z$  после преобразований получим

$$B(r, z) = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \left[ \frac{L/2 + z}{\sqrt{r^2 + (L/2 + z)^2}} + \frac{L/2 - z}{\sqrt{r^2 + (L/2 - z)^2}} \right]. \quad (2.11)$$

Отметим, что (2.10) является частным случаем (2.11) при  $z = 0$ .

При рассмотрении магнитного поля, созданного током, текущим по тонкому проводнику, имеющему форму окружности с радиусом  $R$  (круговой ток), легко определить индукцию магнитного поля в любой точке на оси витка. В каждой точке поле направлено вдоль оси, а направление вектора  $\vec{B}$  связано с направлением тока в контуре правилом правого винта (рис. 2.11).

Модуль вектора  $\vec{B}$  в любой точке  $z$  на оси витка с током  $I$  равен

$$B(z) = \frac{\mu_0 I}{2} \cdot \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{3/2}}. \quad (2.12)$$

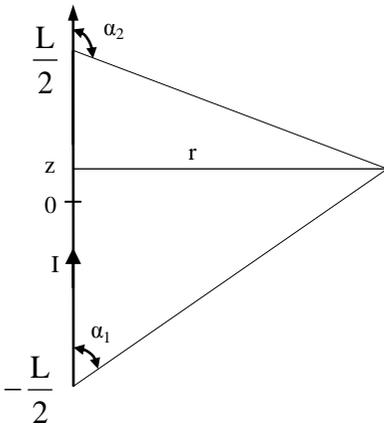


Рис. 2.10

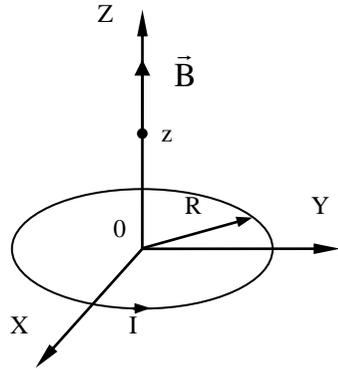


Рис. 2.11

### 303. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО И КРУГОВОГО ПРОВОДНИКОВ С ТОКОМ

#### 303.1. Цель работы

Экспериментальная проверка закона Био-Савара-Лапласа для прямого и кругового токов.

#### 303.2. Теоретический материал

Магнитное поле, индукция магнитного поля, закон Био-Савара-Лапласа, магнитное поле прямого тока, магнитное поле кругового контура с током.

#### 303.3. Постановка задачи

1. Экспериментально определить модуль индукции магнитного поля, созданного током, текущим по

прямолинейному проводнику конечной длины в зависимости от поперечной координаты  $r$  и от продольной координаты  $z$ .

Сравнить экспериментально полученные значения индукции магнитного поля со значениями индукции, рассчитанными с помощью закона Био-Савара-Лапласа и принципа суперпозиции полей.

2. Экспериментально определить модуль индукции магнитного поля, созданного круговым витком с током, в зависимости от координаты  $z$  на оси витка (аксиальной координаты).

Сравнить экспериментально полученные значения индукции магнитного поля со значениями индукции, рассчитанными с помощью закона Био-Савара-Лапласа и принципа суперпозиции полей.

### 303.4. Описание установки

Для экспериментального исследования магнитного поля используется явление электромагнитной индукции. Прямоугольная проволочная рамка ABCD ( $AB < BC$ ), состоящая из  $N_1$  витков, присоединяется к генератору переменного напряжения низкой частоты (рис. 303.1). По рамке течет переменный ток

$$I = I_0 \cos(\omega t),$$

где  $I_0$  – амплитудное значение силы тока;  
 $\omega$  – круговая частота колебаний тока.

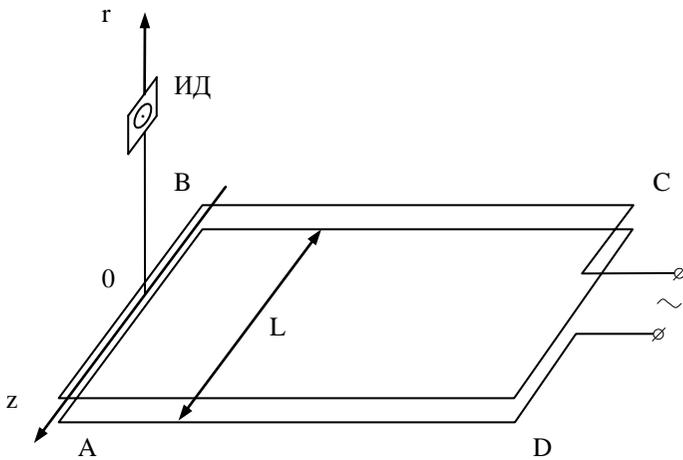


Рис. 303.1

Будем исследовать магнитное поле в вертикальной плоскости, содержащей сторону АВ прямоугольного контура. Начало координат поместим в середине проводника АВ. Ось продольной координаты  $z$  направим горизонтально вдоль стороны АВ. Ось поперечной координаты  $r$  направим вертикально вверх (рис. 303.1).

Вокруг проводника с током в каждой точке создается переменное магнитное поле

$$B = B_0 \cos(\omega t),$$

где  $B_0 = B_0(r, z)$  – амплитудное значение индукции магнитного поля в точке с координатами  $r, z$ .

Наличие переменного магнитного поля в пространстве можно зарегистрировать с помощью индукционного датчика (ИД) – маленькой плоской катушки, содержащей  $N_2$  витков проволоки. Центр датчика помещается в ту точку пространства, для которой определяется магнитное поле. По закону электромагнитной

индукции в катушке возникает электродвижущая сила (ЭДС):

$$E = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (303.1)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток, пронизывающий каждый виток катушки.

Для того чтобы датчик обладал наибольшей чувствительностью, его необходимо ориентировать так, чтобы он пронизывался максимально возможным магнитным потоком, т.е. чтобы плоскость его витков была перпендикулярна вектору индукции магнитного поля. Если площадь витка индукционного датчика  $S$  достаточно мала, то магнитное поле в пределах датчика можно считать однородным. При выполнении этих условий магнитный поток, пронизывающий датчик, равен

$$\Phi = BS = B_0 S \cos(\omega t).$$

Подставляя выражение для магнитного потока в формулу (303.1), получим после дифференцирования выражение для мгновенного значения ЭДС в индукционном датчике

$$E = N_2 B_0 S \omega \sin(\omega t) = E_0 \sin(\omega t),$$

где  $E_0 = E_0(r, z)$  – амплитудное значение ЭДС в индукционном датчике, центр которого расположен в точке с координатами  $r, z$ , причём

$$E_0 = N_2 B_0 S \omega. \quad (303.2)$$

Равенство (303.2) показывает, что для определения  $B_0$  необходимо знать параметры  $N_2, S$  и  $\omega$  конкретной экспериментальной установки, а также измерить амплитудное значение ЭДС  $E_0$ , возникающей в индукционном датчике. Милливольтметр, подключенный к

индукционному датчику, регистрирует напряжение  $U$ , которое является действующим значением ЭДС, возникающей в датчике, т.е.  $E_0 = \sqrt{2}U$ . Учитывая, что  $\omega = 2\pi\nu$ , получим

$$B_0 = \frac{\sqrt{2}U}{2\pi\nu N_2 S}, \quad (303.3)$$

где  $\nu$  – частота генератора переменного электрического тока.

Рамка ABCD закреплена горизонтально, катушка датчика помещается в вертикальной плоскости, проходящей через сторону AB. Такое расположение индукционного датчика приводит к тому, что он регистрирует только магнитное поле стороны AB. Это объясняется тем, что изменение магнитного потока, создаваемого участками AD и BC контура с током, датчиком не регистрируется, а вкладом со стороны участка CD можно пренебречь, так как расстояние от датчика до стороны CD значительно больше, чем до стороны AB. Положение датчика может изменяться в вертикальной плоскости. Величина силы тока в рамке ABCD контролируется с помощью амперметра.

Для исследования магнитного поля кругового тока к генератору низкой частоты подключается проволочный контур, содержащий  $N_1$  витков проволоки и имеющий форму окружности радиуса  $R$ . Индукционный датчик в этом случае перемещается вдоль вертикального стержня, совпадающего с осью кругового контура.

Подключение генератора низкой частоты к прямоугольному или круговому контуру производится с помощью переключателя, расположенного на панели экспериментальной установки.

### 303.5. Порядок выполнения работы

**Часть 1.** Определение индукции магнитного поля прямолинейного проводника с током

1. Подключить прямоугольный контур к генератору с помощью переключателя на лабораторном стенде.

2. Опустить индукционный датчик в крайнее нижнее положение и расположить его над серединой проводника ( $z=0$ ).

3. Подключить индукционный датчик к милливольтметру.

4. Установить на панели генератора частоту 500 Гц. Включить генератор. С помощью регуляторов напряжения выходного сигнала генератора установить ток через контур величиной 0,6 А.

5. Включить питание милливольтметра. С помощью переключателя диапазонов измерения милливольтметра выбрать такой диапазон (D), при котором отклонение стрелки будет наибольшим. Это увеличивает точность измерений.

6. Изменяя высоту датчика над серединой проводника (примерно через 2 см), снять зависимость напряжения на датчике (U) от поперечной координаты r при фиксированном значении продольной координаты  $z=0$ . Следите за тем, чтобы при каждом измерении значение диапазона измерений (D) было минимально возможным.

Данные измерений для r, U и D занести в табл. 1.

Таблица 1

№	r, м	U, В	D, В	$B_0$ , Тл	$\Delta B_0$ , Тл	B, Тл	$\Delta B$ , Тл
1							
2							
3							
...							

7. Для исследования зависимости магнитного поля прямолинейного проводника с током от продольной координаты  $z$  необходимо зафиксировать поперечную координату датчика  $r_0$  (по согласованию с преподавателем). Занести  $r_0$ , а также остальные параметры экспериментальной установки (указанные на лабораторном стенде) в табл. 2.

Таблица 2

I, A	$\Delta I$ , A	$v$ , Гц	$\Delta v$ , Гц	$S$ , $m^2$	R, м	$r_0$ , м	L, м	$N_1$	$N_2$

8. Изменяя продольную координату датчика ( $z$ ) от 0 (середина проводника) до  $L/2$  (через 2-3 см), снять зависимость напряжения на датчике ( $U$ ) от продольной координаты  $z$  при фиксированном значении поперечной координаты  $r_0$ . Данные измерений занести в табл. 3. Следите за тем, чтобы при каждом измерении значение диапазона измерений ( $D$ ) было минимально возможным.

Таблица 3

№	$z$ , м	U, В	D, В	$B_0$ , Тл	$\Delta B_0$ , Тл	B, Тл	$\Delta B$ , Тл
1							
2							
3							
...							

**Часть 2.** Определение индукции магнитного поля кругового витка с током

1. Отключить ток в контуре, уменьшив до нуля выходное напряжение генератора.

2. Подключить круговой контур к генератору с помощью переключателя на лабораторном стенде.

3. Опустить индукционный датчик в крайнее нижнее положение.

4. Подключить индукционный датчик к милливольтметру.

5. С помощью регуляторов выходного напряжения на генераторе установить ток в контуре равным 0,6 А.

6. Изменяя высоту датчика (с шагом примерно 2 см), снять зависимость напряжения на датчике  $U$  от высоты  $z$  (аксиальной координаты). С помощью переключателя диапазонов милливольтметра выбирать при каждом измерении такой диапазон ( $D$ ), при котором отклонение стрелки будет наибольшим.

Результаты измерений  $z$ ,  $U$  и  $D$  занести в табл. 4.

Таблица 4

№	$z$ , м	$U$ , В	$D$ , В	$B_0$ , Тл	$\Delta B_0$ , Тл	$B$ , Тл	$\Delta B$ , Тл
1							
2							
3							
...							

### 303.6. Порядок выполнения расчётной части работы:

**Все расчеты производятся после снятия всех экспериментальных данных и выключения установки!**

Таблица 1

Экспериментальное значение магнитной индукции рассчитать по формуле

$$B_0 = \frac{\sqrt{2}U}{2\pi\nu N_2 S} .$$

Теоретическое значение магнитной индукции рассчитать по формуле

$$B = \frac{\mu_0 N_1 I L}{4\pi r \sqrt{r^2 + \frac{L^2}{4}}} .$$

Оценить погрешность измерения поперечной (радиальной) координаты  $\Delta r$ , учитывая цену деления линейки и размеры индукционного датчика. По классу точности вольтметра рассчитать погрешность измерения напряжения  $\Delta U$ .

Рассчитать погрешности нахождения  $B$  и  $B_0$  для трёх значений координаты  $r$ :  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ , выбирая их в разных частях диапазона изменения поперечной координаты.

Формулы для расчета погрешностей:

$$\Delta B_0 = B_0 \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2} ,$$

$$\Delta B = B \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2 \left[1 + \left(1 + \frac{L^2}{4r^2}\right)^{-1}\right]^2} .$$

Для каждой из трёх радиальных координат  $r_i \{r_1, r_2, r_3\}$  записать результаты в виде  $B_i = B(r_i) \pm \Delta B(r_i)$ ;  $B_{0i} = B_0(r_i) \pm \Delta B_0(r_i)$ .

По данным табл. 1 построить в одной системе координат графики  $B(r)$  и  $B_0(r)$ .

### Таблица 2

Экспериментальное значение магнитной индукции рассчитать по формуле

$$B_0 = \frac{\sqrt{2}U}{2\pi v N_2 S} .$$

Теоретическое значение магнитной индукции рассчитать по формуле

$$B = \frac{\mu_0 N_1 I}{4\pi r_0} \left[ \frac{L/2 + z}{\sqrt{r_0^2 + (L/2 + z)^2}} + \frac{L/2 - z}{\sqrt{r_0^2 + (L/2 - z)^2}} \right].$$

Рассчитать погрешности нахождения  $B$  и  $B_0$  для трёх значений координаты  $z$ :  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $z_3$ , выбирая их в разных частях диапазона изменения продольной координаты.

Формулы для расчета погрешностей:

$$\Delta B_0 = B_0 \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2},$$

$$\Delta B = \sqrt{(B'_l \Delta l)^2 + (B'_z \Delta z)^2},$$

$$\text{где } B'_l = \frac{B}{l},$$

$$B'_z = \frac{\mu_0 N_1 I r_0}{4\pi} \left\{ \left[ r_0^2 + \left(\frac{L}{2} + z\right)^2 \right]^{-3/2} - \left[ r_0^2 + \left(\frac{L}{2} - z\right)^2 \right]^{-3/2} \right\}.$$

Для каждой из трёх продольных координат  $z_i \{z_1, z_2, z_3\}$  записать результаты в виде  $B_i = B(z_i) \pm \Delta B(z_i)$ ;  $B_{0i} = B_0(z_i) \pm \Delta B_0(z_i)$ .

По данным табл. 2 построить в одной системе координат графики  $B(z)$  и  $B_0(z)$ .

### Таблица 3

Экспериментальное значение магнитной индукции рассчитать по формуле

$$B_0 = \frac{\sqrt{2}U}{2\pi v N_2 S}.$$

Теоретическое значение магнитной индукции рассчитать по формуле

$$B = \frac{\mu_0 N_1 I R^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}}.$$

Рассчитать погрешности нахождения  $B$  и  $B_0$  для трёх значений координаты  $z$ :  $z_1, z_2, z_3$ , выбирая их в разных частях диапазона изменения аксиальной координаты.

Формулы для расчета погрешностей:

$$\Delta B_0 = B_0 \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2},$$

$$\Delta B = B \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 \left(\frac{2z^2 - R^2}{z^2 + R^2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta z}{z}\right)^2 \left(\frac{3z^2}{R^2 + z^2}\right)^2}.$$

Для каждой из трёх аксиальных координат  $z_i$  {  $z_1, z_2, z_3$  } записать результаты в виде  $B_i = B(z_i) \pm \Delta B(z_i)$ ;  $B_{0i} = B_0(z_i) \pm \Delta B_0(z_i)$ .

По данным табл. 3 построить в одной системе координат графики  $B(z)$  и  $B_0(z)$ .

При построении графиков необходимо откладывать соответствующие абсолютные погрешности для тех экспериментальных точек, для которых эти погрешности рассчитывались (см. рис. 303.2).

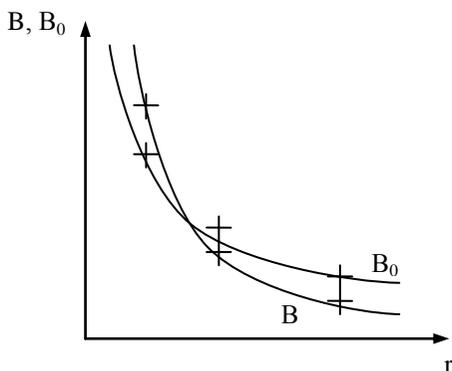


Рис. 303.2

Проанализировав, совпадают ли в пределах погрешностей экспериментальные и теоретические значения для индукции магнитного поля, сделайте выводы о результатах проверки закона Био-Савара-Лапласа.

### Контрольные вопросы

1. Что называется индукцией магнитного поля?
2. Как определить направление индукции магнитного поля?
3. Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа и поясните смысл величин, входящих в него.
4. Какое физическое явление положено в основу работы индукционного датчика?
5. Почему, измеряя напряжение, возникающее в индукционном датчике, мы можем судить о величине индукции магнитного поля в той же точке, где находится датчик?
6. Может ли в предложенном экспериментальном методе использоваться постоянный ток для создания магнитного поля?
7. Как и почему зависят показания индукционного датчика от его ориентации относительно сторон контура с током?
8. Объясните характер зависимости  $B_0(r)$  для прямолинейного проводника с током.
9. Объясните характер зависимости  $B_0(z)$  для кругового тока.
10. Объясните характер зависимости  $B_0(z)$  для прямолинейного проводника с током.

### 3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В МАГНЕТИКАХ

Вещества, способные изменять магнитную индукцию при внесении их во внешнее магнитное поле, называются магнетиками.

Это свойство магнетиков объясняется тем, что атомы или молекулы этих веществ обладают собственными магнитными моментами или приобретают их, благодаря действию внешнего магнитного поля. Эти магнитные моменты, ориентируясь определенным образом во внешнем магнитном поле  $\vec{B}_0$ , создают свое собственное магнитное поле  $\vec{B}'$ , которое, накладываясь на внешнее, образует результирующее магнитное поле

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'. \quad (3.1)$$

В этом случае говорят, что вещество намагничивается, а мерой этого процесса является величина, определяющая магнитный момент единицы объема:

$$\vec{J} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^n \vec{P}_i}{\Delta V},$$

где  $\vec{P}_i$  – магнитный момент атома;  $n$  – число атомов в объеме  $\Delta V$ . Эта величина называется вектором намагничивания или намагниченностью вещества. Нетрудно показать, что индукция собственного поля магнетика пропорциональна намагниченности

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{J}. \quad (3.2)$$

Подставляя (3.2) в (3.1), получим

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{J}. \quad (3.3)$$

Индукция  $\vec{B}_0$  и намагниченность  $\vec{J}$  зависят от напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ :

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}, \quad \vec{J} = \chi \vec{H}, \quad (3.4)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\chi$  – магнитная восприимчивость вещества.

Подставляя (3.4) в (3.3), получим

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H}.$$

Вводя обозначение

$$1 + \chi = \mu,$$

получим

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (3.5)$$

где  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость вещества.

Из (3.5) и (3.4) следует, что

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{B}{B_0}.$$

Таким образом, относительная магнитная проницаемость показывает, во сколько раз индукция магнитного поля усиливается веществом.

Все вещества по своим магнитным свойствам делятся на три класса: диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики. Критерием такого деления является величина и знак магнитной восприимчивости  $\chi$ , которая у диамагнетиков составляет от  $-10^{-8}$  до  $-10^{-5}$ , у парамагнетиков – от  $+10^{-7}$  до  $+10^{-3}$ , а у ферромагнетиков – от  $+10^2$  до  $+10^5$  и более. Эта величина для ферромагнетиков к тому же является функцией напряженности магнитного поля. Для практики наибольший интерес представляют ферромагнетики. Они являются сильномагнитными веществами, их намагниченность может превышать намагниченность диа- и парамагнетиков в  $10^{10}$  раз. Такие уникальные магнитные свойства ферромагнетиков обусловлены их доменной структурой. Домены представляют собой микроскопические области размерами ( $10^{-3} - 10^{-4}$ ) см, которые

самопроизвольно намагничены. Каждый из доменов намагничен до насыщения, т.е. внутри каждого домена все спиновые магнитные моменты атомов располагаются параллельно, создавая результирующий магнитный момент домена.

В отсутствие внешнего магнитного поля домены ориентированы хаотически, так что суммарная намагниченность ферромагнетика равна нулю. Физическая сущность процесса намагничивания заключается в смещении границ доменов, роста одних доменов за счет других и создании преимущественного их направления по внешнему полю. Если на образец ферромагнетика еще не действовало магнитное поле, то при постепенном увеличении напряженности магнитного поля процесс намагничивания будет совершаться по основной кривой намагничивания  $B(H)$ . В результате смещения границ сразу большого числа доменов создается их преимущественная ориентация, индукция магнитного поля резко возрастает, и крутизна начального участка кривой намагничивания будет также возрастать (рис. 3.1). При дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля все меньше будет оставаться не сориентированных по полю доменов. Рост крутизны, а затем и сама крутизна основной кривой намагничивания будут уменьшаться. Когда все домены будут сориентированы по полю, зависимость  $B(H)$  станет линейной, так как  $B$  будет увеличиваться только за счет увеличения  $H$ . В этом случае ферромагнетик намагничен до насыщения.

При дальнейшем циклическом уменьшении и увеличении поля в противоположных направлениях кривая  $B(H)$  будет представлять собой петлю гистерезиса (рис. 3.2).

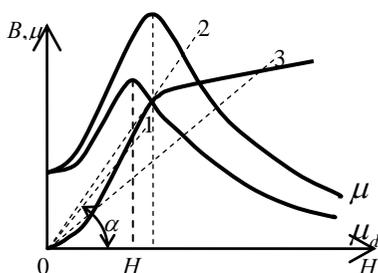


Рис. 3.1

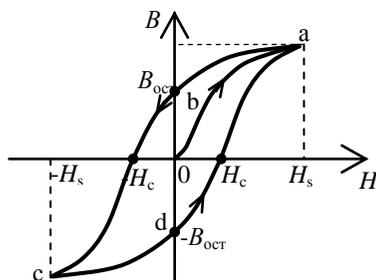


Рис. 3.2

Процессы намагничивания необратимы (обратимы только на начальном участке основной кривой намагничивания, когда происходит упругое смещение границ доменов). Если напряженность магнитного поля, доведенную до величины  $H_s$ , соответствующей насыщению вектора намагничивания (началу линейного участка кривой  $B(H)$ ), уменьшить до нуля, то намагничивание сохранит определенное значение, называемое остаточной намагниченностью, а индукция магнитного поля станет равной остаточной индукции  $B_{ост}$  (см. рис. 3.2). Для снятия остаточной намагниченности (или индукции) необходимо приложить обратное поле с напряженностью  $H_c$ .

Величина  $H_c$  называется коэрцитивной силой и является важной характеристикой ферромагнетика. При его перемагничивании от  $+H_s$  до  $-H_s$ , и обратно кривые не совпадают. При увеличении обратного намагничивающего поля вновь достигается насыщение. Если от точек насыщения «с» уменьшить магнитное поле до нуля, а затем, изменив направление поля, увеличить его, получим кривую намагничивания «cda». Замкнутая кривая «abcd» называется петлей гистерезиса. Если вначале увеличить напряженность магнитного поля, не доводя намагничивание до насыщения, а затем уменьшить ее, то можно

получить семейство петель гистерезиса. Если коэрцитивная сила  $H_c$  велика, ферромагнетик называют магнитожестким. Для него характерна широкая петля гистерезиса. Ферромагнетик с малой  $H_c$  и соответственно с узкой петлей гистерезиса – магнитомягкий.

Понятие относительной магнитной проницаемости применимо к тем значениям  $B$  и  $H$ , которые определяются основной кривой намагничивания. Следовательно, относительная магнитная проницаемость определяет наклон прямых 1, 2, 3 ( $\operatorname{tg}\alpha$ ), проведенных из начала координат в те точки основной кривой намагничивания  $B(H)$ , которые соответствуют заданным значениям напряженности поля  $H$  и соответствующим им значениям  $\mu$  (см. рис. 3.1).

Из рис. 3.1 видно, что наклон этих прямых с ростом  $H$  возрастает на начальном участке  $B(H)$ , достигает максимума, когда прямая, соединяющая начало координат с основной кривой намагничивания, становится касательной к  $B(H)$ , и убывает при дальнейшем росте  $H$ . Отсюда ясно, что такой же характер должна иметь зависимость  $\mu(H)$ .

Существует также понятие дифференциальной магнитной проницаемости

$$\mu_d = \frac{dB}{\mu_0 dH},$$

где  $dB$  – приращение индукции магнитного поля в магнетике, определенное по основной кривой намагничивания, соответствующее бесконечно малому приращению напряженности магнитного поля  $dH$ . Из определения следует, что  $\mu_d$  определяет крутизну основной кривой намагничивания как тангенс угла наклона касательной к ней в точке, соответствующей заданному значению  $H$ . Поскольку основная кривая намагничивания  $B(H)$  имеет точку перегиба при некотором значении  $H_d$ , то этому значению будет соответствовать экстремум функции

$\mu_d(H)$  как производной  $B(H)$ . Поэтому  $\mu_d(H)$  имеет максимум, соответствующий точке перегиба основной кривой намагничивания  $B(H)$  (см. рис. 3.1).

Используя петлю гистерезиса, легко рассчитать потери энергии на перемагничивание образца.

Интеграл  $\oint HdB$ , вычисленный вдоль петли гистерезиса, равен площади  $S_{\Pi}$  охватываемой петлей. По завершении цикла перемагничивания  $H$  и  $B$ , а следовательно, и магнитная энергия будут иметь первоначальную величину. Это значит, что работа перемагничивания ферромагнетика идет на увеличение внутренней энергии ферромагнетика, т.е. на его нагревание.

При совершении одного цикла перемагничивания ферромагнетика в расчете на единицу объема затрачивается работа, численно равная площади петли гистерезиса:

$$A_{ед.об.} = \oint HdB = S_{\Pi}.$$

Эта работа идет на нагревание ферромагнетика.

Как следует из формулы, величина потерь, приходящаяся на единицу объема, численно равна площади петли гистерезиса. Таким образом, площадь петли гистерезиса есть мера потерь энергии в единице объема за один цикл перемагничивания. При частоте перемагничивания  $f$  потери в единице объема за единицу времени равны

$$Q_v = A_v \cdot f. \quad (3.7)$$

## **304. СНЯТИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА**

### **304.1. Цель работы**

Изучение гистерезиса ферромагнетика, исследование зависимости магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности магнитного поля.

### **304.2. Теоретический материал**

Магнитные свойства вещества. Ферромагнетики и их свойства. Намагниченность, магнитная проницаемость, напряженность и индукция магнитного поля, явление гистерезиса. Энергия магнитного поля.

[1. С. 153 - 162, 165 - 166, 176 - 180, 195 - 198; 2. С. 187 - 188, 206 - 208, 209 - 212].

### **304.3. Постановка задачи**

В работе студент должен получить на экране осциллографа семейство петель гистерезиса, снять для каждой из них координаты ее вершин и, используя полученные данные, вычислить значение индукции  $B$  и напряженности  $H$  магнитного поля, кроме того, вычислить относительную магнитную проницаемость  $\mu$  и построить зависимость  $B = B(H)$  и  $\mu = \mu(H)$ . Рассчитать по полученным значениям намагниченность  $J$ , построить зависимость  $J = J(H)$  и объяснить ход этой кривой.

### **304.4. Описание установки**

На рис. 304.1 изображена схема для наблюдения петли гистерезиса на экране осциллографа.

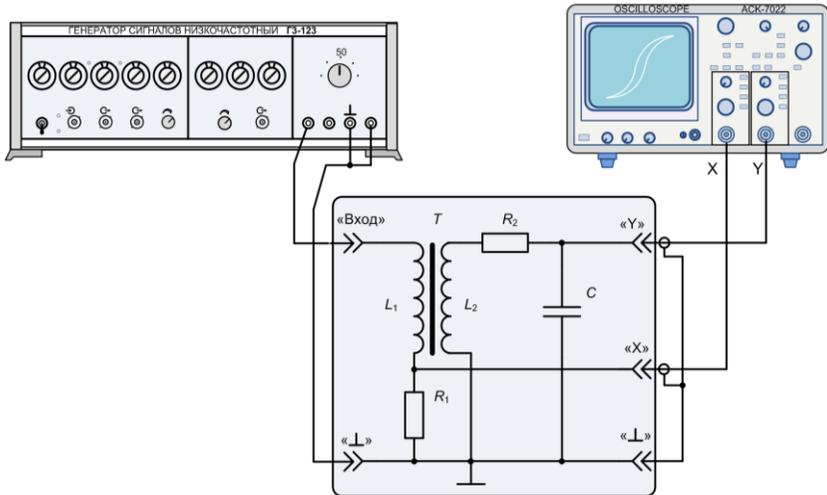


Рис. 304.1

Синусоидальное напряжение регулируемой амплитуды с выхода генератора ГЗ-123 подается на гнезда «Вход» и «⊥». На кольцевом ферромагнитном сердечнике намотаны обмотки  $L_1$  и  $L_2$ .

Чтобы получить на экране осциллографа петлю гистерезиса, необходимо на вход усилителя горизонтального отклонения луча осциллографа подать напряжение, пропорциональное напряженности магнитного поля, а на вход усилителя вертикального отклонения – напряжение, пропорциональное магнитной индукции. Для получения семейства петель гистерезиса необходимо изменять амплитуду напряжения  $U_x$ .

В схеме на рис. 304.1 напряжение, подаваемое с резистора  $R_1$  на вход усилителя горизонтального отклонения луча осциллографа, равно

$$U_x = iR_1, \quad (304.1)$$

где  $i$  – переменный ток, проходящий по обмотке  $L_1$ .

Переменный ток  $i$ , проходя по намагничивающей обмотке, создает в трансформаторе магнитное поле с напряженностью

$$H = \frac{N_1}{l} i, \quad (304.2)$$

где  $N_1$  – число витков в первичной обмотке  $L_1$ , а  $l$  – длина сердечника.

Из уравнений (304.1) и (304.2) получим

$$U_x = \frac{lR_1}{N_1} H. \quad (304.3)$$

Таким образом,  $U_x \sim H$ .

Во вторичной обмотке  $L_2$  возникает ЭДС индукции

$$E = -\frac{d\psi}{dt} = -SN_2 \frac{dB}{dt}, \quad (304.4)$$

где  $\psi = N_2BS$  – потокосцепление вторичной обмотки;  $S$  – площадь сечения сердечника;  $N_2$  – число витков вторичной обмотки;  $B$  – индукция магнитного поля в сердечнике.

Для того чтобы получить напряжение, пропорциональное индукции магнитного поля, между обмоткой  $L_2$  и осциллографом ставят интегрирующую  $RC$  – ячейку, удовлетворяющую условию  $RC \gg T$  ( $T$  – период колебаний переменного тока). Напряжение, снимаемое с конденсатора, будет пропорционально индукции магнитного поля. Покажем это.

При  $R_2 \gg \frac{1}{\omega C}$  ток в цепи обмотки  $L_2$  с учетом (304.4)

равен

$$i = \frac{E}{R_2} = \frac{SN_2}{R_2} \cdot \frac{dB}{dt}. \quad (304.5)$$

Напряжение на конденсаторе

$$U_y = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int idt. \quad (304.6)$$

Подставляя выражение (304.5) в (304.6), получим

$$U_x = -\frac{SN_2}{R_2C} \cdot B. \quad (304.7)$$

Таким образом, на вход усилителя горизонтального отклонения электронного луча осциллографа подается напряжение, пропорциональное  $H$ , а на вход усилителя вертикального отклонения – напряжение, пропорциональное  $B$ . На экране осциллографа получается петля гистерезиса  $B = B(H)$ .

За один период синусоидального изменения тока след электронного луча на экране опишет полную петлю гистерезиса и за каждый последующий период повторит ее полностью. Поэтому на экране будет видна неподвижная петля гистерезиса.

При уменьшении  $U_x$  будет уменьшаться амплитуда колебаний напряженности  $H$  и на экране получится ряд различных по своей площади петель гистерезиса. Верхняя точка петли гистерезиса находится на основной кривой намагничивания. Следовательно, для построения основной кривой намагничивания необходимо снять с осциллографа значение координат вершин петель гистерезиса  $U_x$  и  $U_y$ .

Для построения кривой намагничивания из формул (304.3) и (304.7) определяем  $H$  и  $B$ :

$$H = \frac{N_1}{lR_1} U_x, \quad (304.8)$$

$$B = \frac{R_2C}{SN_2} U_y.$$

### 304.5. Порядок выполнения экспериментальной части работы

1. Подключить лабораторный макет по схеме (см. рис. 304.1).

2. Установить частоту генератора равную 1000 Гц, выходное напряжение 8 В, а переключатель «НАГРУЗКА» в положение – 50 Ом.

3. Подключить питание генератора сигналов низкой частоты (НЧ) ГЗ-123 и включить сетевой тумблер.

4. Подключить питание осциллографа АСК-7022 и включить сетевой выключатель «POWER» (СЕТЬ) (рис. 304.2).

5. После прогрева осциллографа, регулятором «INTEN» (ЯРКОСТЬ) установить необходимую яркость луча.

**ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ:** Не устанавливать чрезмерную яркость луча, так как, если на экране осциллографа видна яркая неподвижная точка, то возможно повреждение люминофора экрана!

При необходимости произвести установку яркости цифровой индикации регулятором «READOUT» (ПОКАЗАНИЯ), а фокусировку луча – регулятором «FOCUS» (ФОКУСИРОВКА).

6. Включить на осциллографе режим X-Y, нажав кнопку «X-Y». При этом Канал-1 осциллографа будет производить отклонение луча по оси X, а Канал-2 – по оси Y.

7. Установить переключателями чувствительности каналов «VOLTS/DIV» (ВОЛЬТ/ДЕЛ.) коэффициент отклонения Канала -1 в положение 2 В/дел., а Канала-2 в положение 100 мВ/дел. При этом в левом нижнем углу экрана цифровые индикаторы будут показывать « 1 : 2V 2 : 100mV »

Нажатие на ручку этого переключателя приведёт к установке некалиброванного коэффициента отклонения соответствующего канала. (При этом, на экране появится надпись: «1 : 2V 2 : > 100mV»). Этот режим не используется в данной работе, поэтому для установки калиброванного коэффициента следует повторно нажать на эту ручку.

8. Кнопками включения каналов «CH1» (КАНАЛ1) и «CH2» (КАНАЛ2) и с помощью регуляторов установки положения луча на экране «POSITION» (ПОЛОЖЕНИЕ) установите изображение петли гистерезиса в центре экрана. Положение по оси X можно устанавливать регулятором «POSITION < >» (в правом верхнем углу передней панели осциллографа), причём, при нажатии кнопки «FINE» (ПЛАВНО), производится плавная регулировка.

9. Кнопками «GND» (ЗАЗЕМЛЕНИЕ) можно отключать сигнал, подаваемый на вход соответствующего канала и получать линию на экране. Таким образом, можно точнее установить положение петли гистерезиса в центре экрана. Для этого нажмите кнопку «GND» Канала-1. Так как при этом на вход Канала-1 (Вход X) не будет поступать сигнал, то луч будет отклоняться только по оси Y, и на экране будет видна вертикальная линия, которую необходимо регулятором «POSITION < >» совместить с центральной вертикальной линией шкалы экрана. После центровки по оси X необходимо повторным нажатием на кнопку «GND» Канала-1 снова включить сигнал, подаваемый на вход Канала-1. Затем произвести аналогичные операции с центровкой изображения по оси Y с помощью кнопки «GND» Канала-2 и регулятором «POSITION» Канала-2.



10. Кнопка «**INV**» (ИНВЕРТИРОВАНИЕ) в Канале-2 производит инвертирование изображения (изменения полярности сигнала). Кнопка «**ADD**» (СУММИРОВАНИЕ) в Канале-1 включает режим суммирования сигналов, поступающих на входы каналов. В данной лабораторной работе эти кнопки не используются и должны быть выключены.

Кнопки «**AC/DC**» служат для переключения входов каналов в режим закрытого или открытого входа. При закрытом входе на надписи « **1 : 2V**    **2 : 100mV** » над буквой **V** появляется знак « $\sim$ ». Для уменьшения искажений петли гистерезиса входы обоих каналов необходимо установить в режим открытого входа (DC).

11. Установить максимальный размер изображения петли гистерезиса с помощью декадных ступенчатых переключателей и ручкой плавной установки выходного напряжения генератора ГЗ-123.

Зарисовать на миллиметровой бумаге петлю гистерезиса, соответствующую максимальному напряжению 8 В, подаваемому с выхода генератора ГЗ - 123 и подсчитать число клеток  $\beta$ , охватываемых петлей гистерезиса.

### **Измерение напряжений $\Delta V_x$ и $\Delta V_y$ , пропорциональных **H** и **B** соответственно**

12. В осциллографе АСК-7022 есть возможность производить измерения с помощью курсоров. В режиме X-Y можно измерять разность напряжения как по оси X, так и по оси Y, что ускоряет измерения параметров петли гистерезиса и значительно уменьшает погрешность измерения по сравнению с традиционными методами измерения с помощью масштабной сетки экрана осциллографа. Для включения курсорных измерений необходимо нажать кнопку « **$\Delta V \Delta t$  OFF**», которая переключает виды курсоров в последовательности: **горизонтальные курсоры – вертикальные курсоры –**

**выкл.** В режиме X-Y оба вида курсора будут давать показания разности  $\Delta V$  по соответствующей оси. При включении горизонтальных курсоров на экране появляются две пунктирные горизонтальные линии курсора C1 и курсора C2, причём кнопкой выбора активного курсора «ТСК/C2» можно сделать активным любой из курсоров: C1 или C2, а в режиме ТСК (СЛЕЖЕНИЕ) будут активны оба курсора (режим слежения в данной работе не используется). На экране справа вверху появляется надпись «f: Y – C1», означающая что выбран режим измерения по оси Y и активен курсор C1. Если выбран активным курсор C2, то на экране появится надпись «f: Y – C2». Активный курсор на экране выделен яркой меткой на конце пунктира, и его можно перемещать, вращая ручку «FUNCTION» (ФУНКЦИЯ), которая при нажатии на неё осуществляет грубое перемещение.

Выбрав кнопкой « $\Delta V \Delta t$  OFF» вертикальные курсоры, можно производить измерения разности напряжения по оси X. При этом на экране появится надпись: «f: X – C1» или – «f: X – C2» в зависимости от выбранного курсора.

Отсчёт показаний курсоров  $\Delta V$  будет показан в нижнем левом углу экрана. Для режима X-Y при вертикальных курсорах (измерения по оси X) показания будут на экране в виде  $\Delta V1 = \dots V$ , а для горизонтальных курсоров (измерения по оси Y) – в виде  $\Delta V2 = \dots mV$ . В нашем случае можно обозначить  $\Delta V1 = \Delta V_x$ , а  $\Delta V2 = \Delta V_y$ .

Для измерения  $\Delta V_y$  надо выбрать кнопкой « $\Delta V \Delta t$  OFF» горизонтальные курсоры и, нажав кнопку «GND» Канала-1, получить вертикальную линию. Затем установить курсор C1 на нижний конец линии, а курсор C2 – на верхний и считать показания  $\Delta V2 = \Delta V_y$  с экрана. Результаты измерений занести в табл. 304.1.

Для измерения  $\Delta V_x$  выбрать кнопкой « $\Delta V \Delta t$  OFF» вертикальные курсоры и, нажав кнопку «GND» Канала-2,

получить горизонтальную линию. Затем установить курсор С1 на левый конец линии, а курсор С2 – на правый и считать показания  $\Delta V_1 = \Delta V_x$  с экрана. Результаты измерений занести в табл. 304.1.

13. Получить на экране семейство петель гистерезиса (6-8), уменьшая подаваемое напряжение с помощью декадного переключателя генератора НЧ. Шаг изменяемого напряжения 1 В. Измерить для каждой из петель величины  $\Delta V_x$ ,  $\Delta V_y$  (см. п. 12.), данные занести в табл. 304.1.

Таблица 304.1

№ п/п	$\Delta V_x$ , В	$\Delta V_y$ , В	$H$ , А/м	$B$ , Тл	$\mu = B/\mu_0 H$	$J$ , А/м
1						
2						
3						
...						
8						

14. Занести в табл. 304.2 данные с лабораторного макета.

Таблица 304.2

$N_1$ , вит.	$N_2$ , вит.	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$C$ , Ф	$\ell$ , м	$S$ , м <sup>2</sup>	$f$ , Гц
100	150	160	$5.1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{-6}$	$103.6 \cdot 10^{-3}$	$77 \cdot 10^{-6}$	1000

### 304.6. Порядок выполнения расчётной части и обработка результатов измерений

1. Рассчитать максимальные значения величин  $H$  и  $B$ , используя выражение (304.8) для различных петель. В выражении (304.8) величина  $U_x$  определяется как  $U_x = \Delta V_x / 2$ , а величина  $U_y$  определяется как  $U_y = \Delta V_y / 2$ , так как величины  $\Delta V_x$  и  $\Delta V_y$  измерены от вершины и до вершины петли гистерезиса. Результаты занести в табл. 304.1.

2. По полученным данным построить график зависимости  $B = B(H)$ .

3. Вычислить относительную магнитную проницаемость  $\mu$  по формуле  $\mu = B / \mu_0 H$ . Полученные данные занести в табл. 304.1.

4. Построить график зависимости  $\mu = \mu(H)$ .

5. Используя экспериментальные и расчётные данные, вычислить для полученных значений  $H$  намагниченность  $J$ , используя выражение  $H = \frac{B}{\mu_0} - J$ .

Результаты вычислений занести в табл. 304.1.

6. По полученным данным построить график зависимости  $J = J(H)$ .

7. Объясните вид кривой  $J = J(H)$ .

8. Рассчитать потери энергии на перемагничивание по следующей методике.

Цена одной клетки миллиметровой бумаги в направлении оси  $H$  определяется по формуле  $K_x = 2H/N_x$ , а в направлении оси  $B$  по формуле  $K_y = 2B/N_y$ , где  $N_x$  и  $N_y$  – количество клеток по соответствующим осям от вершины до вершины петли,  $H$  и  $B$  значения напряжённости и индукции магнитного поля соответствующие вершине петли гистерезиса (точка  $a$  на рис. 3.2). Тогда плотность энергии потерь, приходящихся на площадь одной клетки,

равна ( $K_x K_y$ ).

Если петля гистерезиса содержит  $\beta$  клеток, то площадь её в единицах энергии будет численно равна

$$S = \beta K_x K_y.$$

Таким образом, потери энергии в единице объёма за единицу времени составят

$$Q_v = \beta \cdot K_x \cdot K_y \cdot f,$$

где  $[K_x] = [\text{А/м} \cdot \text{дел.}]$ ;  $[K_y] = [\text{Тл/дел.}]$ ;  $[f] = [\text{Гц}]$ ;  $[Q_v] = [\text{Дж/м}^3 \cdot \text{с}]$ .

9. Оценить погрешность определения потерь энергии.

### Контрольные вопросы

1. Почему значение  $\mu$  для ферромагнетиков велико?
2. В чем заключается явление гистерезиса?
3. Как можно объяснить остаточную намагниченность?
4. Что называется коэрцитивной силой?
5. На что затрачивается энергия при перемагничивании ферромагнетика?
6. Укажите, какое измерение в работе дает результат, обладающий самой большой погрешностью?
7. Объясните зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.
8. Дайте определение вектора намагничивания.
9. В чем отличие процессов намагничивания пара- и ферромагнетиков?

## **305. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ОБРАТИМОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ФЕРРИТА ОТ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

### **305.1. Цель работы**

Экспериментальное исследование зависимости обратимой магнитной проницаемости феррита от напряженности внешнего магнитного поля.

### **305.2. Теоретический материал**

Магнетики. Ферромагнетики, кривая намагничивания. Магнитная проницаемость.

[1. С. 165 – 166, 176 – 180].

### **305.3. Постановка задачи**

В данной лабораторной работе необходимо измерить зависимость резонансной частоты колебаний в параллельном контуре  $LC$  от тока в обмотке подмагничивания. По полученным результатам измерений и параметрам элементов лабораторной установки рассчитать напряженность поля подмагничивания и обратимую магнитную проницаемость. Построить график зависимости обратимой магнитной проницаемости от величины напряженности поля подмагничивания.

### **305.4. Описание установки**

На практике для определения магнитной проницаемости измеряют, как правило, индуктивность катушки, намотанной на сердечник из исследуемого магнетика. Индуктивность катушки прямо пропор-

циональна магнитной проницаемости сердечника, например, индуктивность соленоида  $L = \mu_0 \mu n^2 V$ , где  $n$  – число витков на единицу длины соленоида;  $V$  – объем соленоида. Магнитная проницаемость сердечника тороидальной формы практически равна магнитной проницаемости материала, из которого он изготовлен. Если через такую катушку пропустить переменный ток с амплитудой  $I_m$ , то характеристика намагничивания будет иметь вид частной петли гистерезиса, симметричной относительно начала координат, ось которой наклонена под углом  $\alpha_1$  к горизонтальной оси (рис. 305.1). Наклон оси этой петли определяет среднюю за период индуктивность катушки, а следовательно, и среднюю магнитную проницаемость материала сердечника при данной амплитуде тока  $I_m$ . В действительности, магнитная проницаемость сердечника и индуктивность катушки в течение периода проходящего по ней тока непрерывно меняются. Поэтому, чтобы определить начальную магнитную проницаемость материала сердечника  $\mu_n$ , соответствующую  $H \rightarrow 0$ , необходимо применять ток как можно меньшей амплитуды.

Если кроме переменного тока через катушку пропускать постоянный ток, создающий в сердечнике постоянное магнитное поле  $H$ , то частная петля гистерезиса при той же амплитуде переменного тока будет иметь другой вид и наклон  $\alpha_2$  (см. рис. 305.1). Это означает, что средние значения индуктивности и магнитной проницаемости примут новые значения, пропорциональные  $\text{tg} \alpha_2$ . Из рис. 305.1 видно, что наклон оси малой частной петли гистерезиса  $\alpha_2$  не соответствует наклону основной кривой намагничивания при том же значении  $H$ , а определяется наклоном частной петли гистерезиса, симметричной относительно начала координат (пунктирные линии на рис. 305.1).

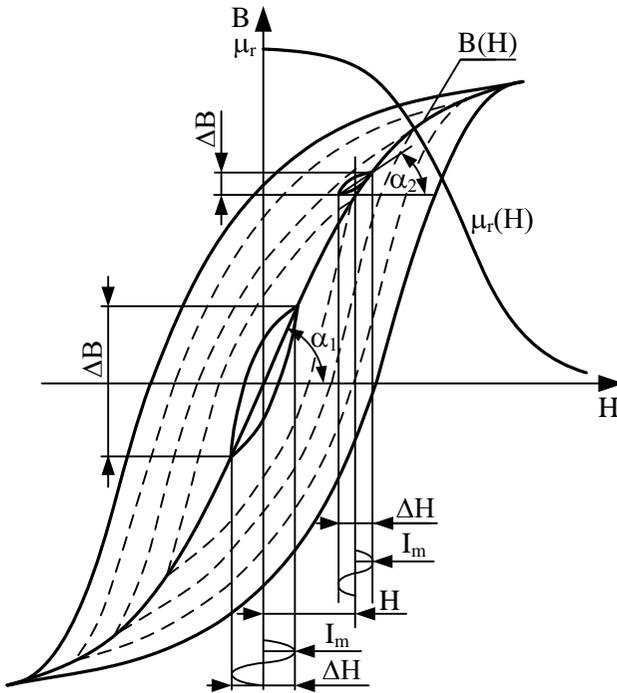


Рис. 305.1

Так как измеренное значение индуктивности катушки определяется наклоном частной петли гистерезиса, то полученное значение магнитной проницаемости также определяется этим наклоном и может быть представлено

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\Delta B}{\Delta H} \right)_H, \quad (305.1)$$

где  $\Delta B$  – приращение индукции магнитного поля в сердечнике, соответствующее приращению напряженности магнитного поля за счет действия малого переменного сигнала. Измеренная таким образом магнитная проницаемость  $\mu_r$  называется обратимой магнитной проницаемостью.

Чтобы получить зависимость  $\mu_r(H)$  в точках, необходимо на катушку с предварительно размагниченным сердечником подавать постепенно увеличивающийся постоянный ток и одновременно на другую катушку, намотанную на том же сердечнике, переменный ток, амплитуда которого должна быть значительно меньше величины постоянного тока. При этом измерение индуктивности второй катушки необходимо производить на этом переменном токе. Поскольку наклон частных петель гистерезиса (пунктирные линии на рис. 305.1) с ростом  $H$  постепенно уменьшается, то обратимая магнитная проницаемость при этом будет также постепенно уменьшаться. Максимум зависимости  $\mu_r(H)$  соответствует, как правило,  $H=0$  (см. рис. 305.1).

Кроме того, индуктивность катушки с ферритовым сердечником, а следовательно, и обратимая магнитная проницаемость зависят от остаточной индукции в сердечнике и от частоты тока, на котором производится измерение. Таким образом, следует измерять  $\mu_r(H)$  при тех токах и частотах, при которых катушка с данным ферритовым сердечником будет работать.

Исследование обратной магнитной проницаемости осуществляется на лабораторной установке, схема которой представлена на рис. 305.2.

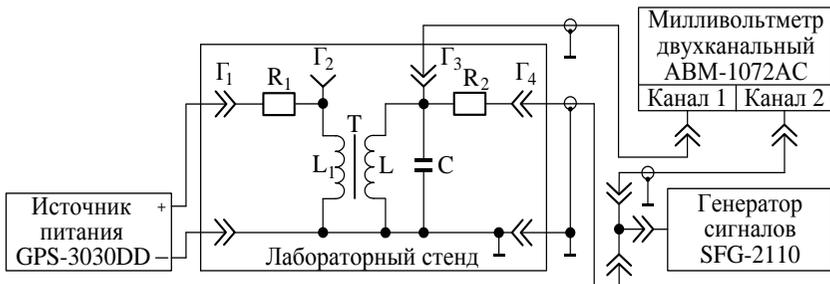


Рис. 305.2

Объектом исследований является кольцевой феррит с внешним диаметром 12 мм, помещенный в специально сделанный для него вырез второго кольцевого феррита большего диаметра (внешний диаметр 38 мм) (рис. 305.3, а).

Оба кольцевых феррита имеют одинаковую ширину  $a$ , а толщина  $h$  кольцевого феррита большего диаметра вдвое больше толщины кольцевого феррита меньшего диаметра. На кольцевом феррите меньшего диаметра сделаны плоские площадки с целью устранения воздушного зазора между кольцевыми ферритами. Марка обоих кольцевых ферритов 2000 НМ, начальная магнитная проницаемость  $\mu_H = 2000_{-200}^{+400}$ .

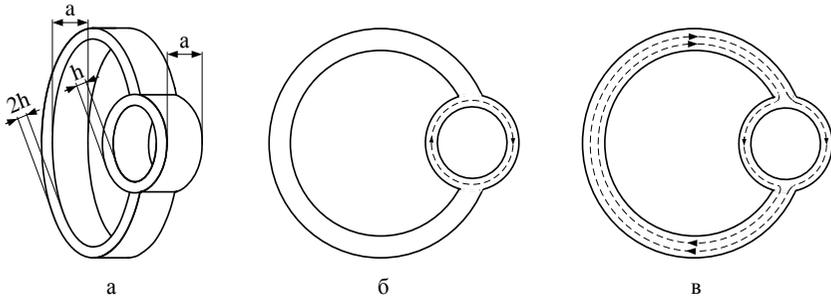


Рис. 305.3

На кольцевом феррите большего диаметра намотана обмотка подмагничивания  $L_1$ . В эту обмотку через резистор  $R_1$  подается регулируемый постоянный ток от источника питания GPS-3030DD. Изменяя в необходимых пределах величину тока в обмотке подмагничивания, можно изменять напряженность магнитного поля в обоих кольцевых ферритах.

На кольцевом феррите малого диаметра намотана измерительная катушка индуктивности  $L$ . К ней

параллельно подключен конденсатор  $C$ , который с индуктивностью  $L$  образует параллельный колебательный контур  $LC$ . На этот колебательный контур через резистор  $R_2$  подается переменное напряжение с генератора SFG-2110. Изменяя частоту переменного напряжения генератора, можно экспериментально определить резонансную частоту колебательного контура  $LC$ . На резонансной частоте напряжение на параллельном колебательном контуре  $LC$  достигает своего максимального значения. Измерение напряжения на колебательном контуре  $LC$  осуществляется с помощью двухканального милливольтметра АВМ-1072АС, первый канал которого подключен параллельно колебательному контуру.

Если пренебречь омическим сопротивлением катушки индуктивности, то резонансная частота контура  $LC$ :

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}.$$

Отсюда индуктивность катушки

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_p^2 C}. \quad (305.2)$$

С другой стороны, индуктивность измерительной катушки  $L$  с кольцевым ферритовым сердечником можно рассчитать по формуле

$$L = k\mu_0\mu_r N^2 h \frac{a}{D}, \quad (305.3)$$

где  $k$  – поправочный коэффициент;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;

$\mu_r$  – обратимая магнитная проницаемость кольцевого феррита;

$N$  – число витков измерительной катушки;

$h$  – толщина ферритового сердечника измерительной катушки;

$a$  – ширина кольцевого ферритового сердечника;

$D$  – средний диаметр магнитной силовой линии измерительной катушки.

Из формул (305.2) и (305.3) находим

$$\mu_r = \frac{D}{4\pi^2 \mu_0 k N^2 h a C f_p^2}. \quad (305.4)$$

Из формулы (305.4) видно, что, зная размеры кольцевого ферритового сердечника измерительной катушки, число витков измерительной катушки, емкость конденсатора и измерив резонансную частоту, можно определить обратимую магнитную проницаемость.

При изменении силы тока подмагничивания будет меняться и  $\mu_r$  о чем можно судить по изменению резонансной частоты  $f_p$  контура  $LC$ .

Измерительная обмотка  $L$  намотана на кольцевом феррите меньшего диаметра так, что ее магнитные силовые линии замыкаются только в кольцевом феррите меньшего диаметра (см. рис. 305.3, б). Магнитные силовые линии подмагничивающей обмотки  $L_1$  замыкаются через кольцевой феррит малого диаметра (см. рис. 305.3, в). Такое разделение пути замыкания магнитных силовых линий переменного и постоянного магнитных полей необходимо для того, чтобы переменное магнитное поле измерительной катушки  $L$  не наводило ЭДС индукции в катушке  $L_1$  (число витков в которой значительно больше, чем в катушке  $L$ ), так как эта ЭДС создает индукционный ток в катушке  $L_1$ , а он, замыкаясь через внешний источник питания, в свою очередь, создает переменное магнитное поле, стремящееся, согласно правилу Ленца, скомпенсировать изменение первичного магнитного поля измерительной катушки  $L$ .

Величину подмагничивающего поля  $H$  можно выразить с помощью теоремы о циркуляции вектора напряженности магнитного поля

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum_{i=1}^N I_i. \quad (305.5)$$

Применительно к конфигурации магнитопровода лабораторной установки на основании (305.5) имеем

$$H_1 l_1 + Hl = IN_1, \quad (305.6)$$

где  $H_1$  и  $H$  – напряженности магнитного поля в кольцевом феррите подмагничивающей и измерительной катушек соответственно;

$l_1$  – средняя длина феррита подмагничивающей катушки;

$l$  – средняя длина силовой линии магнитного поля, создаваемого катушкой подмагничивания в феррите измерительной катушки;

$I$  – ток в подмагничивающей катушке;

$N_1$  – число витков в подмагничивающей катушке.

Учитывая, что создаваемый подмагничивающей катушкой магнитный поток, замыкаясь через кольцевой феррит измерительной катушки, разветвляется в нем на два равных потока, запишем

$$B_1 S_1 = 2BS, \quad (305.7)$$

где  $B_1$  и  $B$  – индукции магнитного поля в кольцевом феррите подмагничивающей и измерительной катушек соответственно;

$S_1$  и  $S$  – площади поперечного сечения кольцевого феррита подмагничивающей и измерительной катушек соответственно.

Учитывая также, что  $B = \mu_0 \mu H$ , соотношение (305.7) запишем следующим образом:

$$\mu_0 \mu H_1 S_1 = 2\mu_0 \mu HS. \quad (305.8)$$

Так как ширина кольцевых ферритов одинакова, а толщина кольцевого феррита подмагничивающей катушки вдвое больше толщины кольцевого феррита измерительной катушки, то  $S_1=2S$ , и так как оба кольцевых феррита имеют одинаковую марку, то

$$H_1 = H. \quad (305.9)$$

Подставляя (305.9) в (305.6), получим выражение для вычисления напряженности подмагничивающего поля в измерительной катушке

$$H = \frac{IN_1}{l + l_1}. \quad (305.10)$$

Необходимые для вычислений параметры приведены в табл. 305.1.

Таблица 305.1

$D = (8,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$ м	$a = (7,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$ м	$h = (3,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$ м
$l = (13,3 \pm 0,7) \cdot 10^{-3}$ м	$l_1 = (88,7 \pm 0,9) \cdot 10^{-3}$ м	$k = (5,1 \pm 0,8) \cdot 10^{-2}$
$C = (68 \pm 4) \cdot 10^{-9}$ Ф	$N = 100 \pm 3$	$N_1 = 700 \pm 50$

### 305.5. Порядок выполнения работы

1. В лабораторной работе используются двухканальные милливольтметры АВМ-1072АС двух модификаций: со светодиодными указателями установленных диапазонов измерений напряжений, а также с установкой диапазонов измерений с помощью ручек, на которых имеются указатели выбранного диапазона измерений.

В случае использования милливольтметра АВМ-1072АС со светодиодными указателями необходимо:

а) установить на задней панели милливольтметра АВМ-1072АС переключатели «LOCK, UNLOCK» и «FLOAT, GND» в нижнее положение;

б) включить питание милливольтметра АВМ-1072АС, нажав кнопку «POWER» (СЕТЬ), при этом должна загореться лампочка под надписью «PWR ON»;

в) над клавишей переключателя «ASYN, SYNC» имеются два светодиода. Нажимая эту клавишу, необходимо выбрать режим «ASYN», об установке которого свидетельствует загоревшийся над этой надписью светодиод;

г) переключателями «CH1 RANGE» и «CH2 RANGE» установить диапазоны измерения напряжений первого и второго каналов «30 mV».

В случае использования милливольтметра АВМ-1072АС с установкой диапазонов измерений с помощью ручек, на которых имеются указатели выбранного диапазона измерений, установить переключателями «CH1 RANGE» и «CH2 RANGE» диапазоны измерения напряжений первого и второго каналов «30 mV».

2. Подключить к лабораторному стенду источник питания GPS-3030DD, милливольтметр двухканальный АВМ-1072АС и генератор сигналов SFG-2110 по схеме, представленной на рис. 305.2.

3. Установить минимальное выходное напряжение генератора SFG-2110. Для этого ручку «AMPL» (АМПЛИТУДА) повернуть против часовой стрелки в крайнее положение, а затем потянуть эту ручку на себя. При этом включается добавочное ослабление выходного сигнала на 20 дБ.

4. Включить питание генератора SFG-2110, нажав кнопку «POWER» (СЕТЬ). При этом цифровой дисплей отобразит частоту выходного сигнала генератора. Над

дисплеем должен светиться индикатор «-20 dB», показывающий включение аттенюатора -20 дБ.

5. Клавишей «WAVE» (ФОРМА ВЫХОДНОГО СИГНАЛА) выбрать форму СИНУС, при этом над цифрами частоты дисплея должен засветиться индикатор «~».

6. Установить с помощью клавиш цифрового набора частоту сигнала 10 кГц и после набора частоты нажать клавишу «kHz», при этом на дисплее будут видны цифры 10.0000, а под ними значение единиц измерения частоты kHz.

Остальные органы управления генератора не используются в данной лабораторной работе.

7. Установить на выходе генератора SFG-2110 напряжение 15 мВ, вращая ручку «AMPL» (АМПЛИТУДА) и контролируя это напряжение милливольтметром АВМ-1072АС (красная стрелка) в диапазоне измерений второго канала 30 mV.

8. Установить диапазон измерений первого канала милливольтметра АВМ-1072АС так, чтобы черная стрелка отклонилась примерно на 1/3 шкалы.

9. Определить частоту резонанса LC-контура по максимуму показаний КАНАЛА 1 милливольтметра, изменяя частоту генератора в диапазоне от 10 до 15 кГц. При этом целесообразно вначале изменять частоту в старшей декаде (в разряде единиц кГц), а затем, чтобы точнее определить частоту резонанса, необходимо клавишами выбора перестраиваемого разряда, находящимися под ручкой установки частоты, переходить на младшие декады (десятые доли кГц).

10. Записать значение резонансной частоты при нулевом токе подмагничивания в табл. 305.2.

11. На источнике питания GPS-3030DD нажать кнопку «AMPS» (ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ ДИАПАЗОНА

ВЫХОДНОГО ТОКА) «HI/LO» (ВЕРХНИЙ / НИЖНИЙ пределы), установив его в положение «LO».

Таблица 305.2

$I$ , мА	0	2	4	6	8	10	20	30	40
$f_p$ , кГц									
$\mu_r$									
$H$ , А/м									

Окончание табл. 305.2

$I$ , мА	50	60	70	80	90	100	120	140	160
$f_p$ , кГц									
$\mu_r$									
$H$ , А/м									

12. Установить ручку «CURRENT» (ТОК) «FINE» (ТОЧНО) в крайнее положение по часовой стрелке, а ручку «CURRENT» «COARSE» (ГРУБО) в крайнее положение против часовой стрелки.

13. Установить ручки «VOLTAGE» (НАПРЯЖЕНИЕ) «FINE» (ТОЧНО) и «VOLTAGE» «COARSE» (ГРУБО) в крайние положения против часовой стрелки.

14. Включить источник питания GPS-3030DD, нажав кнопку «POWER» (СЕТЬ), при этом загорится светодиод под надписью «С.V.» (СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ).

15. Последовательно устанавливая ток в обмотке подмагничивания ручками «VOLTAGE» (НАПРЯЖЕНИЕ) в соответствии с табл. 305.2, измерить частоту резонанса LC-контура. Устанавливать заданную величину тока в обмотке подмагничивания необходимо по показаниям цифрового дисплея источника питания. Токи до 30 мА удобно устанавливать ручкой «VOLTAGE» «FINE» (ТОЧНО), при этом ручка «VOLTAGE» «COARSE» (ГРУБО) должна находиться в крайнем положении против часовой стрелки. Токи больше 30 мА необходимо уста-

навливать с помощью обеих ручек «VOLTAGE» «FINE» и «VOLTAGE» «COARSE».

16. Записать измеренные значения резонансных частот при заданных токах в обмотке подмагничивания в табл. 305.2.

17. Выключить приборы.

### 305.6. Обработка результатов

1. Для каждого значения тока  $I$  в обмотке подмагничивания по формуле (305.4) рассчитать обратимую магнитную проницаемость  $\mu_r$ .

2. Для каждого значения тока  $I$  в обмотке подмагничивания по формуле (305.10) рассчитать напряженность поля подмагничивания  $H$ .

3. Полученные значения  $\mu_r$  и  $H$  при соответствующих токах  $I$  в обмотке подмагничивания занести в табл. 305.2.

4. Построить график зависимости обратимой магнитной проницаемости  $\mu_r$  от напряженности  $H$  поля подмагничивания.

5. Оценить погрешность измерения  $\mu_r$  и  $H$  (при токе  $I$  в обмотке подмагничивания 10 мА).

### Контрольные вопросы

1. Какова природа ферромагнетизма?
2. Что представляют собой ферриты?
3. В чем состоят особенности намагничивания ферромагнетиков?
4. Дайте определение относительной магнитной проницаемости. Каков ее физический смысл?
5. Дайте определение дифференциальной магнитной проницаемости  $\mu_d$  и обратимой магнитной проницаемости  $\mu_r$ . От чего они зависят?

6. Объясните нелинейную зависимость  $\mu_r(H)$ .
7. Чему равны предельные значения относительной, обратимой и дифференциальной магнитных проницаемостей при  $H = 0$  и при  $H = H_s$ .
8. Что представляет собой индукция магнитного поля в ферромагнетике?
9. Объясните сущность резонансного метода определения обратимой магнитной проницаемости.
10. Сформулируйте теорему о циркуляции вектора напряженности магнитного поля.

### Библиографический список

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. – М.: Наука, 1988. – 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1990. – 478 с.

**Пасичный Юрий Павлович  
Нестюрина Елена Евгеньевна  
Набоков Геннадий Михайлович  
Доценко Игорь Борисович  
Филиппьева Наталья Николаевна  
Сластен Михаил Иванович  
Какурина Наталья Андреевна  
Фатеева Валентина Афанасьевна  
Комарова Екатерина Михайловна  
Какурин Юрий Борисович**

**Практикум по дисциплине  
ФИЗИКА  
раздел ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**

Ответственный за выпуск Какурин Ю.Б.  
Редактор Селезнева Н.И.  
Корректор Селезнева Н.И.

ЛР № 020565 от 27.06.97 г. Подписано к печати  
Формат 60x841/16. Бумага офсетная. Офсетная печать.  
Усл. п. л. – 5,5. Уч–изд. л.– 5,0.  
Заказ № . Тираж 100 экз.

«С»

---

Издательство Технологического института  
Южного федерального университета  
ГСП 17А, Таганрог, 28, Некрасовский, 44  
Типография Технологического института  
Южного федерального университета  
ГСП 17А, Таганрог, 28, Энгельса, 1