

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Учреждение образования  
«Витебский государственный технологический университет»

## **ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**

Лабораторный практикум по курсу «Физика»  
для студентов механических и технологических специальностей

Витебск  
2017

УДК 531/534 + 539.19  
ББК 22.3

Составители:

В. В. Рубаник, В. В. Рубаник (мл.), А. Д. Шилин, Н. М. Лаппо

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 5 от 23.06. 2017.

**Электричество и магнетизм** : лабораторный практикум по курсу «Физика» / сост. В. В. Рубаник [ и др. ]. – Витебск : УО «ВГТУ», 2017. – 76 с.

Лабораторный практикум по курсу «Физика» содержит краткую теорию основных вопросов раздела физики «Электричество и магнетизм», в практической части изложен порядок выполнения работ в учебной лаборатории. Приводится перечень контрольных вопросов и рекомендуемой литературы для самостоятельной работы.

УДК 531/534 + 539.19  
ББК 22.3

© УО «ВГТУ», 2017

## ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

**Цель работы:** изучить принцип работы и правила использования наиболее распространенных электроизмерительных приборов.

**Принадлежности:** амперметр типа М502, вольтметр типа Э59, М45М, вольтамперметры типа Э504, М502, ваттметр типа Д598, цифровой измерительный прибор В7-16А.

Экспериментальное сравнение данной величины с другой величиной, принятой за единицу, называется измерением. При изучении электрических и магнитных явлений возникает необходимость измерять такие величины, как сила электрического тока, ЭДС, напряжение, мощность, электрическое сопротивление, электрическая емкость, индуктивность и др. Кроме того, в современной технике и физическом эксперименте широко распространены методы измерения неэлектрических величин путем преобразования их в электрические.

Методы и средства электрических измерений весьма разнообразны. Наиболее распространенными приборами для электрических измерений являются: амперметр, вольтметр, ваттметр, омметр, частотомер и др.

В основу работы измерительных приборов положено действие, производимое электрическим током при прохождении по проводнику. Электрический ток характеризуется магнитным, тепловым и химическим действиями. Каждое из них может быть положено в основу создания электроизмерительного прибора.

Наиболее распространенные электроизмерительные приборы, широко используемые в настоящее время, по принципу действия классифицируются следующим образом:

*1. Магнитоэлектрическая система.* Электроизмерительные приборы магнитоэлектрической системы предназначаются для измерения тока и напряжения в цепях постоянного тока. Применяя, различные преобразователи и выпрямители, приборы этой системы можно использовать также для электрических измерений в цепях переменного тока высокой частоты и исследования неэлектрических явлений.

Работа приборов магнитоэлектрической системы основана на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита и подвижной катушки, по которой протекает измеряемый ток. На катушку действует вращающий момент, который пропорционален проходящему току

$$M_I = k_I I \quad (1.1)$$

Так как противодействующий момент  $M_2$ , создаваемый спиральными пружинами, пропорционален углу закручивания

$$M_2 = k_2 \alpha, \quad (1.2)$$

то угол отклонения катушки, а следовательно, и скрепленной с нею стрелки будет пропорционален протекающему по обмотке току. Линейная зависимость между током и углом отклонения обеспечивает равномерность шкалы прибора. Корректор позволяет изменять положение закрепленного конца одной из спиральных пружин и тем самым производить установку стрелки прибора на нуль.

Достоинством магнитоэлектрических приборов являются: высокая чувствительность и точность показаний, нечувствительность к внешним магнитным полям, малое потребление энергии, равномерность шкалы, аperiodичность (стрелка быстро устанавливается на соответствующем делении шкалы). К недостаткам приборов этой системы относятся: возможность измерения только в цепи постоянного тока, чувствительность к перегрузкам.

2. *Электромагнитная система.* Приборы электромагнитной системы предназначены для измерения тока и напряжения в цепи переменного и постоянного токов. Принцип действия приборов электромагнитной системы основан на взаимодействии магнитного поля катушки, по которой протекает измеряемый ток, и подвижного железного сердечника. Под действием магнитного поля катушки сердечник, стремясь расположиться так, чтобы его пересекало возможно больше силовых линий, втягивается в катушку по мере увеличения в ней тока. Противодействующий момент создается спиральной пружиной.

Приборы электромагнитной системы снабжаются воздушным успокоителем. Магнитное поле катушки пропорционально току; намагничивание железного сердечника тоже увеличивается с увеличением тока. Поэтому можно приближенно считать, что вращающий момент  $M_1$  пропорционален квадрату тока

$$M_1 = k_1 I^2, \quad (1.3)$$

где  $k_1$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции прибора. Противодействующий момент  $M_2$ , создаваемый пружиной, пропорционален углу поворота подвижной части прибора

$$M_2 = k_2 \alpha, \quad (1.4)$$

где  $k_1$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от упругих свойств пружины.

Равновесие подвижной части прибора определяется равенством моментов, действующих на нее в противоположных направлениях, т. е.  $M_1 = M_2$ , откуда  $\alpha = kI^2$ .

Отсюда видно, что шкала прибора электромагнитной системы неравномерная, квадратичная. С изменением направления тока меняется как направление магнитного поля, так и полярность намагничивания сердечника. Поэтому приборы электромагнитной системы работают как на постоянном, так и на переменном токе низких частот.

Достоинством приборов электромагнитной системы являются: возможность измерения как постоянного, так и переменного токов, простота конструкции, механическая прочность, выносливость в отношении перегрузок.

К недостаткам приборов этой системы относятся: неравномерность шкалы, меньшая точность, чем в магнитоэлектрических приборах, зависимость показаний от внешних магнитных полей.

3. *Электродинамическая система.* Приборы электродинамической системы предназначены для измерения тока, напряжения и мощности в цепях переменного и постоянного токов. Принцип действия приборов электродинамической системы основан на взаимодействии магнитных полей катушек, по которым протекает измеряемый ток. Внутри неподвижно закрепленной катушки может вращаться на оси подвижная катушка, с которой жестко связана стрелка, перемещающаяся над шкалой. Противодействующий момент создается спиральными пружинами. Измеряемый ток проходит через обе катушки. В результате взаимодействия магнитного поля неподвижной катушки и тока в подвижной создается вращающий момент  $M_1$ , под влиянием которого катушка устанавливается в положение равновесия, когда вращающий момент становится равным противодействующему.

В первом приближении вращающий момент  $M_1$ , действующий на подвижную катушку, пропорционален как току  $I_1$  в неподвижной катушке, так и току  $I_2$  в подвижной катушке:

$$M_1 = k_1 I_1 I_2. \quad (1.5)$$

Пружины, закручивающиеся при вращении подвижной катушки, создают противодействующий момент  $M_2$ , пропорциональный углу  $\alpha$ , на который повернулась катушка:

$$M_2 = k_2 \alpha. \quad (1.6)$$

При равенстве моментов  $M_1$  и  $M_2$  подвижная катушка остановится. Тогда

$$\alpha = k I_1 I_2. \quad (1.7)$$

Если катушки соединены последовательно, то

$$\alpha = kI^2. \quad (1.8)$$

Последние два выражения показывают, что шкала электродинамического прибора неравномерна. Приборы этой системы пригодны для измерений как в цепи постоянного, так и в цепи переменного тока, но недостатком их является то, что они очень чувствительны к перегрузкам.

Кроме названных в измерительной технике также находят применение измерительные приборы, в которых используются тепловая, индукционная, вибрационная, электростатическая, термоэлектрическая, или детекторная системы.

В последнее время все чаще применяются цифровые измерительные приборы.

В цифровом измерительном приборе показания представляются в виде дискретных чисел на отсчетном устройстве. Преимущества такого представления связаны с уменьшением субъективных ошибок при снятии отсчетов, отсутствием ошибок из-за параллакса и ускорением считывания. Цифровые измерительные приборы содержат встроенные электронные схемы, обычно микропроцессоры, которые позволяют подсоединить дополнительные устройства. Например, некоторые приборы снабжены программой, которая позволяет выполнять основные вычисления, в частности, линеаризовать показания прибора и выводить их на дисплей.

Некоторые приборы содержат различные диагностические устройства, что уменьшает время устранения отказов. Кроме того, большинство современных стендовых приборов имеет внутренние приспособления для калибровки. Калибровка осуществляется с пульта прибора, а значения параметров хранятся в долговременной памяти. В последующие отсчеты вносятся поправки с учетом этих параметров. Многие цифровые приборы снабжены также шиной интерфейса, и могут благодаря этому работать как части больших измерительных систем.




Параметры типичного универсального цифрового измерительного прибора таковы:

- диапазон входных величин: 20 мВ–1 кВ, 0,2 мА–2 А, 200 мОм–10 МОм;
- абсолютная погрешность 0,001–0,5 % от верхнего предела измерений;
- стабильность 0,002 % (за сутки) и 0,008 % (за 6 месяцев) от верхнего предела измерений;
- разрешение  $10^{-6}$ ;
- входные характеристики: сопротивление 10 МОм, емкость 40 пФ;
- время выполнения операции 2 мс–1 с;
- частота (для переменного напряжения) 100 кГц–1 МГц.

Обычно совершенные цифровые приборы могут выбирать необходимый диапазон входной величины автоматически. Небольшие приборы, как правило, имеют индикатор перегрузки, который напоминает оператору о необходимости переключения диапазона. Приборы высокой точности должны иметь входное сопротивление порядка 10 ГОм, чтобы не нагружать измеряемую схему. Время выполнения операции обычно определяется используемым АЦП и включает время восстановления после перегрузки. Разрешение определяет минимальное напряжение, которое может быть зарегистрировано. Например, разрешение  $10^{-6}$  означает, что в диапазоне входных напряжений до 1 В можно зарегистрировать 1 мкВ.

### Общие сведения о приборах

Прежде чем приступить к измерению физической величины, необходимо выбрать прибор нужной системы. Обычно на шкале приборов условными символами обозначается, к какой системе относится тот или иной прибор. Применяются следующие символы.

1. Магнитоэлектрическая система 
2. Электромагнитная система 
3. Электродинамическая система 

Для того чтобы производить электрические измерения, необходимо определить цену деления и чувствительность прибора.

Чувствительностью  $S$  электроизмерительного прибора называется отношение линейного или углового перемещения указателя  $d\alpha$  к изменению измеряемой величины  $dx$ , вызвавшему это перемещение:

$$S = \frac{d\alpha}{dx}.$$

Размерность чувствительности зависит от характера измеряемой величины (например, чувствительность прибора к току, чувствительность прибора к напряжению и т. д.).

Величина  $C = \frac{1}{S}$ , обратная чувствительности, называется ценой деления прибора. Она определяет значение электрической величины, вызывающей отклонение на одно деление. В общем случае цена деления представляет собой разность значений измеряемой величины для двух соседних меток.

Цена деления зависит от верхнего и нижнего пределов измерения прибора и от числа делений шкалы. Например, шкала прибора рассчитана на

измерение напряжения в пределах от 0 до 100 В и имеет 50 делений. Цена деления такого прибора равна  $C = \frac{100V}{50дел} = 2 \frac{V}{дел}$ , чувствительность  $S = 0,5 \frac{дел}{V}$ .

Чтобы определить показания данного вольтметра, необходимо цену деления  $C$  умножить на число делений  $n$ , до которого дошла стрелка:

$$V = C n.$$

На практике часто применяются многопредельные приборы, электрическую схему которых можно переключать для изменения интервалов измеряемой величины.

В амперметрах изменение пределов достигается включением параллельно прибору различных шунтов, в вольтметрах – включением добавочных сопротивлений.

Применяются следующие символы и буквенные обозначения:

- прибор измерительный показывающий – Р;
- прибор измерительный регистрирующий – PS.

Рассмотрим правила пользования многопредельными приборами на тех приборах, которые наиболее широко используются в лаборатории.

1. Для измерения тока используются амперметры, миллиамперметры, микроамперметры. Для того чтобы отличить эти приборы от других, на шкале имеются соответствующие обозначения  $A$ ,  $mA$ ,  $\mu A$ . Кроме того, для измерения небольших токов используются гальванометры.

Амперметр включается последовательно в измеряемую цепь (рисунок 1.1).

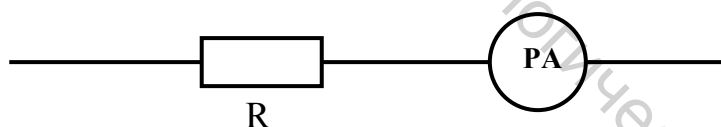


Рисунок 1.1 – Схема включения амперметра

Миллиамперметр типа М45М является прибором магнитоэлектрической системы. Он имеет шкалу, состоящую из 75 делений. Указателем делений служит стрелка. М45М – прибор четырех предельный, т. е. может включаться на четыре предела измерений: 150  $mA$ , 75  $mA$ , 15  $mA$ , 3  $mA$ . Для того чтобы включить прибор на нужный предел измерения, необходимо провод, идущий от отрицательного полюса источника тока, присоединить к клемме со знаком «←», а второй провод – к клемме с указателем необходимого предела измерений. Для определения цены деления на данном пределе нужно предел измерений разделить на число делений. Таким образом, цена деления для данного миллиамперметра будет:



$$\begin{aligned} \text{на пределе } 150 \text{ мА} - C_1 &= \frac{150 \text{ мА}}{75 \text{ дел}} = 2 \text{ мА / дел}; \\ \text{на пределе } 75 \text{ мА} - C_2 &= \frac{75 \text{ мА}}{75 \text{ дел}} = 1 \text{ мА / дел}; \\ \text{на пределе } 15 \text{ мА} - C_3 &= \frac{15 \text{ мА}}{75 \text{ дел}} = 0,2 \text{ мА / дел}; \\ \text{на пределе } 3 \text{ мА} - C_4 &= \frac{3 \text{ мА}}{75 \text{ дел}} = 0,04 \text{ мА / дел}. \end{aligned}$$

Для определения величины измеряемого тока необходимо цену деления умножить на число делений, которое показывает прибор. Если в измерительной схеме не указано, каким пределом пользоваться, то сначала (во избежание порчи прибора) необходимо включить прибор на максимальный предел и по показанию определить нужный.

Амперметр типа М502, прибор магнитоэлектрической системы, имеет шкалу со 150 делениями. В цепь прибор включается через две клеммы, одна из них имеет обозначение «-». Данный амперметр имеет восемь пределов измерения — от 0,015 до 7,5 А. Пределы измерения переключаются ручкой, которая расположена на верху прибора. Для того чтобы установить нужный предел измерения, необходимо указатель ручки поставить на метку, на которой цифрой указан соответствующий предел измерений. Цена деления для каждого предела определяется так же, как и в предыдущем приборе. Амперметр снабжен уровнем для горизонтальной установки и корректором, которые расположены в верхней части прибора.

Гальванометр типа М122 имеет один предел измерений, при этом цена деления указана на шкале прибора. На шкале гальванометра нет обозначения, какой это прибор. Прибор может использоваться как измерительный регистрирующий, так и как прибор измерительный показывающий. Перед включением в цепь гальванометр следует разарретировать кнопкой, расположенной между клеммами. Для арретирования гальванометра необходимо кнопку расположить так, чтобы стрелка на ней указывала на клеммы.

2. Для измерения напряжения в электрических цепях служат вольтметры и милливольтметры. В отличие от амперметров вольтметры имеют большое внутреннее сопротивление и включаются параллельно тому участку цепи, на котором измеряется напряжение. Для отличия вольтметров от других приборов на шкале обычно ставится буква  $V$  или пишется «вольтметр».

Схема включения вольтметра (рисунок 1.2).

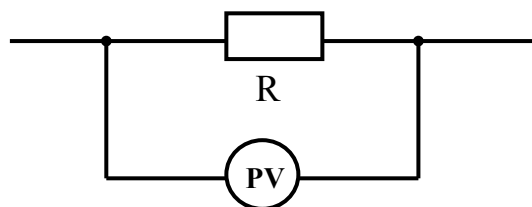


Рисунок 1.2 – Схема включения вольтметра

Вольтметр типа Э59, прибор электромагнитной системы, имеет 4 предела измерений: 75, 150, 300, 600 В, которые включаются ручкой, расположенной на верху прибора. Вольтметр может включаться как в цепь постоянного, так и в цепь переменного тока, на что указывает обозначение на шкале:  $\cong$ . Для определения цены деления для любого предела поступают так же, как и для многопредельных вольтметров.

Вольтметр типа М45М имеет совершенно одинаковое устройство с амперметром этого типа, с той только разницей, что вольтметр имеет значительно большее внутреннее сопротивление.

В практике измерений широко применяются комбинированные приборы, так называемые ампервольтметры.

Ампервольтметр типа Э504, прибор электромагнитной системы может применяться как для измерения токов, так и напряжений.

Для измерения напряжений прибор подключают к клеммам с обозначениями «\*» и  $AV$ , а переключатель пределов измерения ставят в правое положение, соответствующее выбранному пределу, в соответствии с напряжением измерительной схемы.

Для измерения силы тока прибор подключают к тем же клеммам, только переключатель пределов измерения ставят в левое положение, соответственно выбранному пределу измерений. Цену делений определяют по общему правилу. Кроме того, прибор имеет клемму 30 А. При подключении к клеммам «\*» и 30 А прибор работает как амперметр с пределом измерения 30 А независимо от положения переключателя.

Вольтамперметр типа М502 имеет одинаковое устройство с амперметром этого типа, с той только разницей, что он имеет два предела измерений для напряжения 1,5 В и 3 В. При измерении тока правый переключатель следует поставить в положение I, а напряжения – в положение U. В цепь прибор включается через клеммы – U, +AV.

3. Для измерения мощности в цепи используется ваттметр – прибор электродинамической системы. Он состоит из двух катушек: неподвижной, с небольшим числом витков толстой проволоки, включаемой последовательно с тем участком цепи, в котором следует измерить расходуемую мощность, и подвижной, содержащей большее число витков тонкой проволоки и помещенной на оси внутри неподвижной катушки. Подвижная катушка включается в цепь подобно вольтметру, т. е. параллельно потребителю.

Ваттметр включается в цепь по следующей схеме (рисунок 1.3).

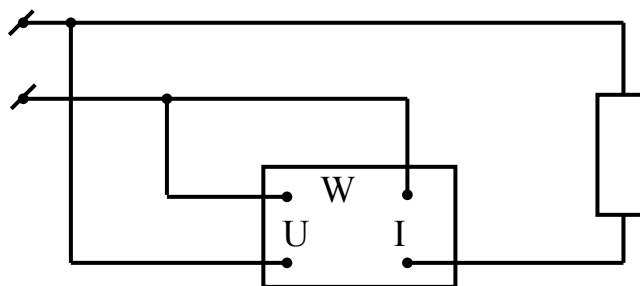


Рисунок 1.3 — Схема включения ваттметра

Левые клеммы, обозначенные буквой  $U$ , являются выводами подвижной катушки и включаются в цепь параллельно нагрузке, а правые клеммы, обозначенные буквой  $I$ , являются выводами неподвижной катушки и включаются в цепь последовательно с нагрузкой. Для уменьшения электростатического взаимодействия клеммы со знаком «\*» следует соединить перемычкой, как это показано на схеме. Для переключения полярности прибор снабжен поворотным переключателем. Перед началом измерения переключатель полярности ставят в положение «+», если же при измерениях окажется, что нагрузка носит такой характер, что  $\cos\varphi$  становится отрицательным числом и стрелка отклоняется в противоположную сторону, то необходимо переключатель полярности поставить в положение «-». Переключение полярности можно производить только при разомкнутой цепи.

Для определения цены деления на любом из пределов измерения необходимо указатель тока у токовых клемм умножить на указатель выбранного предела напряжения и разделить на число делений прибора. Например, у токовых клемм прибора сделана надпись 2 А, переключатель напряжения установлен на 150 В, число делений на приборе 75. В данном случае цена деления будет

$$C = \frac{2A \cdot 150V}{75 \text{ дел}} = 4 \text{ Вт / дел}.$$

4. Для измерения электрического сопротивления применяются омметры различных типов.

Омметр типа М371 — прибор магнитоэлектрической системы. Принцип измерения основан на том, что при определенном напряжении источника тока омметра через катушку измерительного механизма и измеряемое сопротивление протекает ток, пропорциональный измеряемому сопротивлению. Прибор имеет три предела измерения: 100, 1000 и 10 000 Ом. Перед измерением сопротивления необходимо один провод присоединить к зажиму «-», а второй — к одному из зажимов  $x1$ ,  $x10$ ,  $x100$  (в зависимости от







выбранного предела измерения), замкнуть эти проводники и корректором установить прибор на нуль. Затем эти провода присоединяют к измеряемому сопротивлению. Если измерение производится на пределе 100 Ом, т. е. провода присоединены к зажимам «←» и «xI», то отсчет ведется по шкале прибора; если подключение сделано к клемме «x10» или «x100», то результат отсчета по шкале умножается на 10 или 100.

Аналогичным образом пользуются и омметрами другого типа.

Важной характеристикой каждого измерительного прибора является его погрешность. В большинстве случаев для характеристики точности электроизмерительных приборов пользуются приведенной погрешностью  $E_n$ . Приведенной погрешностью называется отношение абсолютной погрешности к предельному значению измеряемой величины  $\alpha_{np}$ , т. е. к наибольшему ее значению, которое может быть измерено по шкале прибора:

$$E_n = \frac{\Delta\alpha}{\alpha_{np}}$$

Некоторые условные обозначения на шкалах прибора:

Защита от внешних магнитных полей	
Защита от внешних электрических полей	
Горизонтальное положение прибора	
Вертикальное положение прибора	
Класс точности	<b>1,0</b>
Прибор для измерения в цепи постоянного тока	 постоянный ток
Прибор для измерения в цепи переменного тока	 переменный ток
Испытательное напряжение изоляции между электрической цепью прибора и корпусом, кВ	

Точность электроизмерительных приборов является главнейшей характеристикой и лежит в основе деления приборов на классы. Согласно

ГОСТу, электроизмерительные приборы по степени точности измерения делятся на восемь классов: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4,0.

Показатель класса соответствует погрешности измерения в процентах. Приборы с погрешностью более 4 % считаются внеклассными. Класс прибора обычно указывается на шкале.

При выполнении измерений различных физических величин очень часто приходится пользоваться другими электрическими приборами, которые не относятся непосредственно к измерительным. Это реостаты, магазины сопротивлений и емкостей и др.

Широко распространенным лабораторным прибором для получения тока различного напряжения является лабораторный автотрансформатор, сокращенно ЛАТР. При помощи шнура и вилки ЛАТР включается в сеть переменного тока, а нужное напряжение снимается с двух зажимов, которые обычно помечаются словом «нагрузка». Для плавного изменения снимаемого напряжения служит ручка, расположенная на верху прибора. ЛАТР обычно снабжается вольтметром, по которому можно определять величину снимаемого напряжения.

Для плавного изменения сопротивления электрической цепи используются реостаты. Реостат можно использовать и как делитель напряжения – в таком случае реостат называется потенциометром.

Если в цепь необходимо включить известное сопротивление, то применяют магазин сопротивлений. Магазин сопротивлений типа Р32 может изменять сопротивление в диапазоне от 0 до 10 000 Ом. Если необходимо установить сопротивление от 0 до 9 Ом, то прибор включают в цепь через зажимы 0 и 9 Ом, а нужное сопротивление устанавливают при помощи правого нижнего переключателя. При этом цифра переключателя, установленная перед указателем, показывает сопротивление в Ом.

Если необходимо установить сопротивление от 10 до 10 000 Ом, то магазин включают через зажимы 0 и 9999 Ом. Для определения выбранного сопротивления цифры переключателей, установленные перед указателями, умножают соответственно на множители  $\times 1$ ,  $\times 10$ ,  $\times 100$ ,  $\times 1000$  и полученные результаты складывают.

Для изменения емкости в электрических цепях применяются магазины емкостей и батареи конденсаторов. Это по существу одинаковые приборы, которые включают в электрическую цепь через два зажима. Величина емкости изменяется переключателем.

Выполнение задания.

1. Знакомятся со всеми электрическими приборами, которые используются в лаборатории.

2. Чертят схемы включения в цепь вольтметра, амперметра, ваттметра, реостата, потенциометра.

3. По надписям на шкале определяют, к какой системе относится прибор, на какой ток (постоянный или переменный) рассчитан, класс точности для

следующих приборов: амперметра типа М502, вольтметров типа Э59, М45М, вольтамперметров типа Э504, М502, ваттметра типа Д568.

4. Определяют цену делений для всех пределов перечисленных выше типов приборов.

### Выполнение задания

1. Ознакомьтесь с электромагнитными приборами, которые используются в лаборатории, и заполнить таблицу 1.1, определяя цену деления на каждом пределе.

Таблица 1.1

Название прибора	Система прибора	В цепи какого тока включается	Класс точности	Предел измерения	Цена деления
<i>гальванометр</i>	<i>магнитоэлектрическая</i>	<i>последовательно</i>	<i>1,0</i>	<i>0-30</i>	<i><math>3 \times 10^{-7}</math> А/дел</i>
<i>амперметр</i>	...	...	...	...	...

2. Начертить схему включения в цепь изучаемых приборов.

### Контрольные вопросы

1. Почему амперметр должен обладать малым внутренним сопротивлением, а вольтметр – большим?

2. В чём состоит принцип действия приборов магнитоэлектрической системы и электромагнитной системы? Каковы их функциональные отличия?

3. Что такое предел измерения прибора?

4. Как определяется цена деления шкалы ваттметра?

5. Какое значение переменного напряжения и тока измеряют приборы электромагнитной и электродинамической системы?

6. Что называется действующими напряжением и током?

## Лабораторная работа Э 2

### ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ МОСТА УИТСТОНА

**Цель работы:** изучить метод экспериментального определения величины неизвестного сопротивления.

**Принадлежности:** реохорд, магазин сопротивлений, два искомые сопротивления, выключатель нагрузки, балластное сопротивление, источник постоянного тока, гальванометр.

Способность проводника пропускать электрический ток характеризуется его сопротивлением. Величина его, обозначаемая буквой R, определяется

химической природой материала, из которого изготовлен проводник, и его геометрическими размерами.

Для однородного цилиндрического проводника

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

где  $l$  – длина проводника;  $S$  – площадь его поперечного сечения;  $\rho$  – коэффициент, зависящий от свойств материала проводника и называемый **удельным сопротивлением**.

Единицей измерения сопротивления служит  $1 \text{ Ом}$ , равный, исходя из закона Ома для участка цепи, сопротивлению такого проводника, в котором при напряжении 1 Вольт течет ток силой 1 Ампер.

Классическим методом определения неизвестного сопротивления является измерение сопротивления при помощи моста постоянного тока, называемого также **методом моста Уитстона**.

Принципиальная схема этого моста изображена на рисунке 2.1.

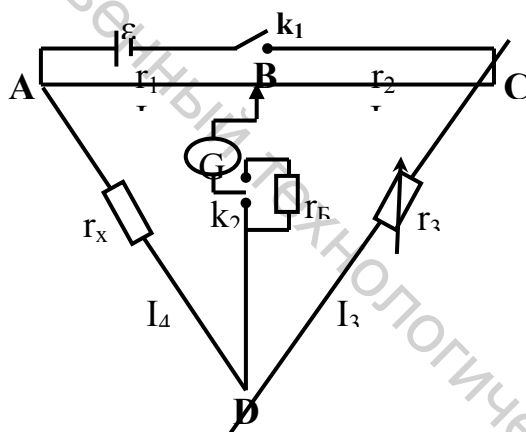


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема моста Уитстона

Мостовая схема состоит из четырех последовательно соединенных сопротивлений, образующих «четырёхугольник» ABCD. В одну из диагоналей этого «четырёхугольника» – ветвь BD – включает чувствительный гальванометр G, в другую – ветвь AC – источник  $\varepsilon$ . Стороны «четырёхугольника» называются **плечами моста**. Измеряемое сопротивление  $r_x$  включено в плечо AD, в плечо CD включен магазин сопротивлений  $r_3$ . Плечи AB и BC (сопротивления  $r_1$  и  $r_2$ ) образованы одним проводником из однородного материала с большим удельным сопротивлением, натянутым на линейку с делениями. Точка B представляет из себя подвижный контакт, который может перемещаться по этому проводнику. Эта часть схемы называется **реохордом**. Во избежание порчи гальванометра при прохождении

через диагональ ВD большого тока, возможно подключение балластного сопротивления  $r_B$  последовательно с гальванометром.

### Теоретическое обоснование

Расчет искомого сопротивления производится на основании двух правил Кирхгофа.

**Первое правило:** алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0, \quad (2.2)$$

где  $n$  – число токов, сходящихся в узле.

При этом, если ток входит в узел, то он берется со знаком «плюс», а если выходит из узла, то со знаком «минус».

**Второе правило:** в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной цепи проводников, сумма всех падений напряжений равна сумме Э.Д.С., включенных в этот контур

$$\sum_{k=1}^n I_k r_k = \sum_{i=1}^m \mathcal{E}_i, \quad (2.3)$$

где  $n$  – число участков контура, где происходит падение напряжения;  $m$  – число ЭДС, включенных в контур.

При составлении уравнения необходимо учитывать знаки токов и ЭДС. Если направление тока совпадает с условно выбранным направлением обхода контура, то ток берется со знаком «плюс», если ток имеет противоположное направление, то знак «минус».

ЭДС положительна, когда при обходе к источникам тока подходят с отрицательного полюса.

Для определения сопротивления  $r_x$  мост приводится в состояние равновесия путем подбора сопротивления  $r_3$  на магазине сопротивлений или путем перемещения подвижного контакта В. Равновесие наступает тогда, когда потенциалы точек В и D равны и, следовательно, ток в гальванометре G отсутствует.

Применяя первое правило Кирхгофа к узлам В и D, соответственно, получим

$$I_4 - I_3 = 0 \quad \text{или} \quad I_4 = I_3 \quad (2.4)$$

$$I_1 - I_2 = 0 \quad \text{или} \quad I_2 = I_1. \quad (2.5)$$



Применяя второе правило Кирхгофа к контурам к контурам ABDA и BCDB, получим

$$I_4 r_x - I_3 r_1 = 0 \quad \text{или} \quad I_4 r_x = I_3 r_1; \quad (2.6)$$

$$I_1 r_3 - I_2 r_2 = 0 \quad \text{или} \quad I_2 r_3 = I_1 r_2. \quad (2.7)$$

Разделив уравнение (2.5) на (2.6), получим

$$\frac{I_4 r_x}{I_3 r_3} = \frac{I_1 r_1}{I_2 r_2}. \quad (2.8)$$

Сопротивления  $r_1$  и  $r_2$  образованы однородным проводником цилиндрического сечения, поэтому, учитывая (2.1), можно отношение сопротивлений заменить на отношение длин плеч на реохорде. Тогда (2.7) примет вид

$$r_x = r_3 \frac{l_1}{l_2}. \quad (2.9)$$

### Выполнение работы

Лабораторная работа выполняется с помощью учебного стенда, на котором собрана вышеописанная мостовая схема. Перед включением в сеть необходимо удостовериться в соответствии соединений на стенде принципиальной схеме, изображенной на рисунке 2.1. В качестве искомого сопротивления в плечо AD включают первое неизвестное сопротивление  $r_{x1}$ . Далее измерения проводят в следующем порядке:

1. Подключают стенд к сети переменного тока и замыкают ключ сетевого питания.

2. На магазине сопротивлений все его переключатели устанавливают в положение «0». Ключом  $k_2$  включают балластное сопротивление  $r_B$ .

3. На магазине сопротивлений при помощи переключателя, обозначенного множителем « $\times 10000$ », набирают наибольшее значение сопротивления 90000 Ом путем установки в положение «9» и на мгновение замыкают ключ  $k_1$ . По гальванометру замечают, в какую сторону отклонилась стрелка. Затем постепенно уменьшают сопротивление магазина путем установки переключателя « $\times 10000$ » в положения «8», «7», «6», и т. д., замыкая после каждого переключения ключ  $k_1$  и наблюдая за отклонением стрелки гальванометра.

**ВНИМАНИЕ! ВКЛЮЧАТЬ КЛЮЧ  $k_1$  НЕОБХОДИМО ТОЛЬКО НА КОРОТКОЕ ВРЕМЯ, ТАК КАК ПРИ ЭТОМ ПРОИСХОДИТ**

## НАГРЕВАНИЕ ВСЕХ ЧАСТЕЙ СХЕМЫ БОЛЬШИМ ТОКОМ, ЧТО ВЫЗЫВАЕТ ИЗМЕНЕНИЕ ИХ СОПРОИВЛЕНИЯ.

4. Уменьшение сопротивления магазина переключателем « $\times 10000$ » проводят до тех пор, пока отклонение стрелки не будет направлено в обратную сторону. После этого переходят к следующему переключателю магазина сопротивлений, в нашем случае, обозначенным множителем « $\times 1000$ », и проводят с ним аналогичные действия, т. е., устанавливая сначала в положение «9», а затем, уменьшая, наблюдают за отклонением стрелки гальванометра.

5. Величина отклонения стрелки должна постепенно уменьшаться и, когда эти отклонения не будут выходить за пределы шкалы гальванометра, ключом  $k_2$  выключают балластное сопротивление  $r_B$  и проводят дальнейший подбор сопротивления  $r_3$  на магазине сопротивлений, пока стрелка гальванометра не будет оставаться на нулевом делении при замыкании ключа  $k_1$ .

6. После приведения моста в состояние равновесия для него справедливо выражение (2.8). Учитывая, что в нашем случае длины плеч на реохорде равны, то  $r_{x1} = r_3$ .

7. Далее вместо  $r_{x1}$  включают второе неизвестное сопротивление  $r_{x2}$  и повторяют измерение согласно п. п. 2–6.

8. Аналогичным образом измеряют сопротивление при последовательном включении  $r_{x1}$  и  $r_{x2}$ , а потом при их параллельном включении.

Все результаты измерений заносят в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

Первое сопротивление $r_1$ (Ом)	Второе сопротивление $r_2$ (Ом)	Теоретическое значение общего сопротивления при параллельном соединении $r_1$ и $r_2$ $R_{теор. пар.}$ Ом	Теоретическое значение общего сопротивления при последовательном соединении $r_1$ и $r_2$ $R_{теор. посл.}$ Ом	Практическое значение общего сопротивления при параллельном соединении $r_1$ и $r_2$ $R_{прак. пар.}$ Ом	Практическое значение общего сопротивления при последовательном соединении $r_1$ и $r_2$ $R_{прак. посл.}$ Ом

Делают вывод о выполнении правила о последовательном и параллельном соединении проводников.

### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте первое и второе правило Кирхгофа.
2. Каким образом применяются правила Кирхгофа в схеме моста Уитстона?
3. Почему отношение сопротивления плеч реохорда может быть заменено отношением плеч реохорда?
4. Единица удельного сопротивления в системе СИ?

5. Что такое электродвижущая сила (ЭДС)?  
6. Единица ЭДС в системе СИ?

### Лабораторная работа Э 3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

**Цель работы:** определить горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли.

**Принадлежности:** тангенс-гальванометр, реостат, выключатель нагрузки, выпрямитель, амперметр.

### Теоретическое обоснование

Земля представляет собой огромный шаровой магнит. Вследствие этого в любой точке пространства, окружающего Землю, и на ее поверхности обнаруживается магнитное поле. Существование магнитного поля Земли можно обнаружить с помощью магнитной стрелки.

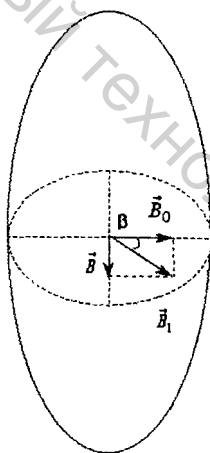


Рисунок 3.1 – Горизонтальная составляющая индукции магнитного поля Земли

Это поле в каждой точке пространства характеризуется вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ , величину и направление которого можно определить тремя элементами земного магнетизма: горизонтальной составляющей  $\vec{B}_0$ , магнитным склонением  $\alpha$  (угол между горизонтальной составляющей и плоскостью географического меридиана) и магнитным наклоном  $\beta$ , (угол

между вектором  $\vec{B}$  и плоскостью горизонта). Знание углов склонения  $\alpha$  и наклона  $\beta$ , а также горизонтальной составляющей  $\vec{B}_0$  дает возможность определить величину и направление вектора  $\vec{B}$  в данной точке (рисунок 3.1).

Для определения горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли поступают следующим образом: в центре кругового проводника из  $n$  витков, прилегающих достаточно плотно друг к другу, расположенного в плоскости магнитного меридиана, помещают магнитную стрелку, которая может вращаться только вокруг вертикальной оси. Под действием магнитного поля Земли она устанавливается вдоль. Если по катушке пропустить ток, то этот ток создает магнитное поле  $\vec{A}_1$ , величину и направление которого следует определять, исходя из закона Био–Савара–Лапласа.

Закон Био–Савара–Лапласа утверждает, что индукция магнитного поля  $d\vec{B}$ , создаваемая элементом тока  $d\vec{l}$  в некоторой точке, равна

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I |d\vec{l}, \vec{r}|}{r^3}, \quad (3.1)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $I$  – сила тока;  $d\vec{l}$  – вектор элемента тока, длина которого равна длине элемента проводника, а направление совпадает с направлением тока;  $r$  – радиус вектор, проведенный из элемента тока в точку наблюдения.

Направление  $d\vec{B}$  определяется правилом буравчика, имеет одно направление для всех элементов тока и перпендикулярно к плоскости катушки.

Для нахождения магнитной индукции  $B_1$  в центре кругового витка радиуса  $r_1$  с током  $I$ , виток следует разбить на физически бесконечно малые участки  $dl$  и по всем им осуществить суммирование соотношения (3.1), т. е.

$$B_1 = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{dl}{r^2} = \frac{\mu\mu_0 I}{2r_1}. \quad (3.2)$$

Вследствие того, что катушка состоит из  $n$  плотно прилегающих друг к другу витков, и полагая, что  $d \ll r_1$  ( $d$  – диаметр проволоки, из которой изготовлены витки катушки), с достаточной точностью можно считать, что поле, создаваемое катушкой, будет в  $n$  раз больше  $B_1$ .

$$B = nB_1 = \frac{\mu\mu_0 In}{2r_1}, \quad (3.3)$$

где в качестве  $r_1$  следует использовать средний радиус витков катушки.

Таким образом, на магнитную стрелку, помещенную в центре катушки, будут действовать при пропускании тока два магнитных поля: магнитное поле Земли и магнитное поле тока. Векторы магнитной индукции обоих полей взаимно перпендикулярны. На рисунке 3.1 изображено сечение катушки горизонтальной плоскостью. Здесь  $B$  – вектор индукции магнитного поля,  $B_0$  – горизонтальная составляющая индукции магнитного поля Земли. Стрелка установится по направлению равнодействующей  $B_1$ , т. е. по диагонали параллелограмма, сторонами которого будут векторы магнитной индукции  $B$  и  $B_0$ .

Из рисунка 3.1 видно, что

$$B = B_0 \operatorname{tg} \beta. \quad (3.4)$$

Сравнивая (3.3) и (3.4), получим

$$\frac{\mu\mu_0 In}{2r_1} = B_0 \operatorname{tg} \beta, \quad (3.5)$$

откуда 
$$B_0 = \frac{\mu\mu_0 n}{2r_1} \frac{I}{\operatorname{tg} \beta}, \quad (3.6)$$

где  $n$  – количество витков катушки;  $r_1$  – средний радиус катушки;  $\beta$  – угол отклонения магнитной стрелки.

Зная параметры катушки, можно определить ее индуктивность.

Поток вектора магнитной индукции

$$\Phi = LI. \quad (3.7)$$

С другой стороны, поток вектора магнитной индукции, создаваемый одним витком катушки, будет

$$\Phi = BS, \quad (3.8)$$

где  $B$  – вектор магнитной индукции.

Общий поток, создаваемый  $n$  витками,

$$\Phi = n\Phi_1 = BS_n. \quad (3.9)$$

Подставляя выражение (3.3) в (3.9), получим

$$\Phi = \mu\mu_0 \frac{In}{2r_1} Sn = \mu\mu_0 \frac{In^2 S}{2r_1}, \quad (3.10)$$

т. к.  $S = \pi r_1^2,$  (3.11)

тогда  $\hat{O} = \mu\mu_0 \frac{In^2 \pi r_1^2}{2r_1} = \frac{\mu\mu_0 In^2 \pi r_1}{2},$  (3.12)

т. е.  $\hat{O} = \frac{1}{2} \mu\mu_0 \pi r_1 n^2 I.$  (3.13)

Сравнивая (3.7) и (3.13), получим

$$LI = \frac{1}{2} \mu\mu_0 \pi r_1 n^2 I, \quad (3.14)$$

откуда  $L = \frac{1}{2} \mu\mu_0 \pi r_1 n^2,$  (3.15)

где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды, для воздуха ( $\mu = 1$ );  $\mu_0$  – магнитная постоянная ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м);  $r_1$  – радиус катушки;  $n$  – количество витков катушки.

### Выполнение задания

#### 1. Определение индуктивности катушки.

Как следует из выражения (3.15), индуктивность катушки зависит от радиуса катушки  $r$ , числа витков  $n$  и магнитной проницаемости среды  $\mu$ .

С помощью масштабной линейки измерьте радиус катушки по формуле (3.15) вычислите значения индуктивности катушки  $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$  в случаях подключения катушки на клеммы с  $n_1 = 50$  витков,  $n_2 = 75$  витков,  $n_3 = 100$  витков,  $n_4 = 125$  витков и  $n_5 = 175$  витков.

Результаты вычислений занесите в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

№ опыта	Радиус катушки $r$ , м	Количество витков $n$	Индуктивность катушки $L$ , мГн
1	0,2	50	
2		75	
3		100	
4		125	
5		175	

## 2. Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли.

Собирают цепь по схеме (рисунок 3.2).

Амперметр включают последовательно на предел измерения 0,75 А. Поворачивая подставку тангенс-гальванометра, устанавливают витки его катушки в плоскости магнитного меридиана, т. е. добиваются того, что катушка и магнитная стрелка при разомкнутом выключателе нагрузки QW находилась бы в одной плоскости.

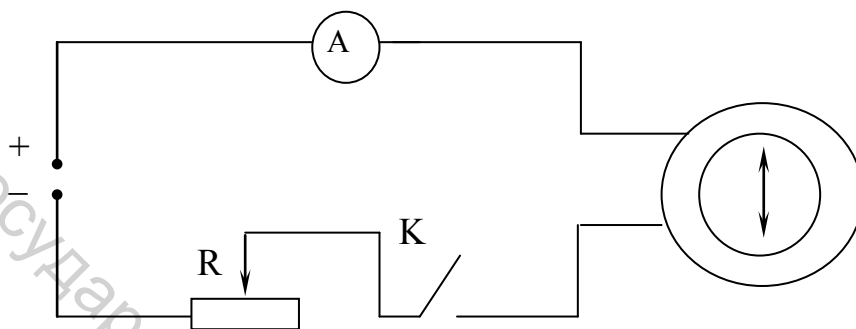


Рисунок 3.2 – Схема исследования горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

Поворачивая верхнюю часть барабана, в которой вмонтирована магнитная стрелка, подводят нулевые деления шкалы под концы стрелки.

Включают катушку на  $n = 50$  витков и замыкают ключ К.

В цепи при помощи реостата устанавливают ток  $I_1 = 0,15$  А и фиксируют угол поворота стрелки.

Затем при помощи реостата устанавливают ток  $I_2 = 0,25$  А и  $I_3 = 0,4$  А, определяя при этом угол поворота стрелки для данных токов, и по формуле

$$B_o = \frac{\mu\mu_0 n}{2r_1} \frac{I}{\operatorname{tg}\beta}$$

вычисляют горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли для всех трех случаев.

Затем аналогичные измерения и вычисления проводят для  $n = 75, 100, 125, 175$  витков.

По полученным результатам находят среднее значение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли. Результаты вычисления сводят в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

№ опыта	Количество витков	Сила тока, А	Значение угла поворота стрелки, град	Значение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли $\vec{B}_0$ , Тл
1	50	0,15		
		0,25		
		0,4		
2	75	0,15		
		0,25		
		0,4		
3	...			
Среднее значение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли				

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение индукции магнитного поля?
2. Что такое векторное произведение двух векторов?
3. Откуда следует утверждение о перпендикулярности векторов  $B$  и  $B_0$ ?
4. Как направлены линии магнитной индукции земли?
5. Укажите направление вектора магнитной индукции кругового тока?

### Лабораторная работа Э 4

## ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВА

**Цель работы:** изучить магнитные свойства различных веществ и экспериментально наблюдать явление гистерезиса.

**Принадлежности:** установка, состоящая из двух размещенных на мерной линейке соленоидов, между которыми установлена магнитная стрелка.

### Теоретическое обоснование

Опыт показывает, что все вещества, помещенные в магнитное поле, приобретают магнитные свойства, т. е. намагничиваются. Намагниченные вещества изменяют внешнее поле.

Вещества, ослабляющие внешнее магнитное поле, называются **диамагнетиками**, а вещества, которые усиливают внешнее поле, называются **парамагнетиками**. Среди парамагнетиков выделяют вещества, вызывающие особенно большое усилие внешнего поля. Эти вещества называются **ферромагнетиками**.

Причина намагничивания заключается в том, что в атомах и молекулах любого вещества имеются круговые токи, образованные движением электронов вокруг ядер. Их называют **орбитальными токами**. Каждому орбитальному



току соответствует определенный магнитный момент, который называется **орбитальным магнитным моментом**. Спиновые моменты электрона и ядра являются первоначальной характеристикой, которую нельзя свести к более простой. Геометрическая сумма орбитальных и спиновых моментов электронов и ядра образуют магнитный момент атома.

У диамагнитных веществ магнитный момент атома равен нулю, так как имеющиеся в атоме орбитальные и спиновые магнитные моменты электронов и спиновой магнитный момент ядра взаимно компенсируют друг друга. Однако под влиянием внешнего магнитного поля у этих атомов возникает магнитный момент, направленный всегда противоположно внешнему полю.

У атома парамагнитных веществ орбитальные и спиновые магнитные моменты электронов и спиновой магнитный момент ядра не компенсируют друг друга. Поэтому атом парамагнетика всегда обладает магнитным моментом. При обычных условиях эти магнитные моменты расположены беспорядочно, и парамагнитная среда не обнаруживает магнитных свойств.

Внешнее поле поворачивает атомы парамагнитных веществ так, что их магнитные моменты устанавливаются преимущественно в направлении внешнего поля. Полной ориентации препятствует тепловое движение атомов.

Намагничиваясь, парамагнетик создает собственное магнитное поле, совпадающее по направлению с внешним магнитным полем. Это ведет к усилению внешнего магнитного поля.

Степень намагничивания однородной среды характеризуется вектором намагничивания:

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{P}_i}{\Delta V}, \quad (4.1)$$

где  $\sum \vec{P}_i$  – геометрическая сумма магнитных моментов атомов, находящихся в объеме  $\Delta V$  магнетика.

При выключении внешнего магнитного поля тепловое движение разрушает ориентацию атомных магнитных моментов, и парамагнетик размагничивается.

Характерная особенность ферромагнетиков состоит в том, что после ликвидации внешнего поля ориентация атомных магнитных моментов полностью не разрушается. Это ведет к возникновению остаточного намагничивания в ферромагнетике.

Рассмотрим, от чего зависит результирующее поле в магнетиках. Пусть однородный магнетик в форме цилиндра помещен в вакуум, в однородное поле с индукцией

$$B_0 = \mu_0 H, \quad (4.2)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $H$  – напряженность внешнего магнитного поля.

В результате ориентации магнитных моментов атомов создается дополнительное магнитное поле с индукцией  $B_{\text{вн}}$ .

Вектор индукции результирующего магнитного поля в магнетике будет равен векторной сумме магнитных индукций внешнего и внутреннего полей

$$\vec{B} = \vec{B}_o + \vec{B}_{\text{вн}}$$

или

$$\vec{B} = \mu_o \vec{H} + \vec{B}_{\text{вн}} . \quad (4.3)$$

В цилиндрическом магнетике, помещенном в магнитное поле, происходит упорядочивание молекулярных токов, обусловленных движением электронов по орбитам вокруг ядер. Эти токи ориентируются так, что полный магнитный момент атома устанавливается в направлении действия внешнего магнитного поля с магнитной индукцией  $\vec{B}$ . Если внешнее магнитное поле направлено за чертеж, то все молекулярные токи (по правилу буравчика) будут течь по часовой стрелке.

Таким образом, в любой точке внутри магнетика два соседних молекулярных тока текут в противоположных направлениях и компенсируют друг друга. Некомпенсированными остаются только токи в тонком поверхностном слое магнетика. Так как магнетик взят в форме цилиндра и токи текут в тонком молекулярном слое, то магнитное поле внутри магнетика можно рассматривать как магнитное поле внутри соленоида.

Поэтому

$$\vec{B}_{\text{вн}} = \mu_o \cdot \vec{I} \cdot n, \quad (4.4)$$

где  $\vec{I}$  - величина одного молекулярного тока (в одном витке соленоида);  $n$  - число витков соленоида на единицу длины, или число молекулярных токов на единицу длины.

Если длина цилиндрического магнетика  $\Delta l$ , площадь поперечного сечения  $\Delta S$ , число витков на единицу длины  $n$  и магнитный момент одного витка равен  $P_i$ , то суммарный магнитный момент будет равен

$$\sum \vec{P}_i = \vec{P}_i \cdot n \cdot \Delta l, \text{ но } \vec{P}_i = \vec{I} \cdot \Delta S . \quad (4.5)$$

Тогда

$$\sum \vec{P}_i = \vec{I} \cdot \Delta S \cdot n \cdot \Delta l, \quad (4.6)$$

$$\Delta V = \Delta l \cdot \Delta S. \quad (4.7)$$

Подставляя (4.5), (4.6) в (4.1), найдем

$$\vec{P} = \frac{\vec{I}n \cdot \Delta S \cdot \Delta l}{\Delta l \cdot \Delta S} = \vec{I} \cdot n. \quad (4.8)$$

Сравнивая (4.8) и (4.4), получим

$$B_{\text{вн.}} = \mu_0 \cdot \vec{P}, \quad (4.9)$$

где  $\vec{P}$  – вектор намагничивания.

Для диа- и парамагнитных веществ экспериментально найдено, что

$$\vec{P} = \chi \cdot \vec{H}, \quad (4.10)$$

где  $\chi$  – коэффициент намагничивания (магнитная восприимчивость);  $\vec{H}$  – напряженность внешнего поля.

Тогда, подставляя (4.10) в (4.9), получим

$$\vec{B}_{\text{вн.}} = \mu_0 \cdot \chi \cdot \vec{H}. \quad (4.11)$$

Подставляя (4.11) в (4.3), найдем результирующее магнитное поле внутри магнетика

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \mu_0 \cdot \chi \cdot \vec{H} = \mu_0 \cdot (1 + \chi) \cdot \vec{H}, \quad (4.12)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная, в системе СИ  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\vec{H}$  – напряженность внешнего магнитного поля, в котором находится магнетик.

Теория дает формулу связи магнитной индукции с напряженностью поля

$$B = \mu_0 \mu H, \quad (4.13)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\mu$  – безразмерная величина, показывающая во сколько раз магнитное поле макроскопических токов  $H$  усилено за счет поля микротоков среды.

Сравнивая (4.13) с (4.12), получим формулу, связывающую магнитную проницаемость с магнитной восприимчивостью вещества

$$\mu = 1 + \chi. \quad (4.14)$$

Особенность ферромагнитных веществ состоит в том, что они имеют большое значение магнитной проницаемости  $\mu$  и сохраняют намагничивание после того, как магнитное поле прекратило свое действие.

Для ферромагнитных веществ магнитная проницаемость  $\mu$  и коэффициент намагничивания  $\chi$  не являются постоянными величинами, а зависят от напряженности намагничивающего поля  $H$ . Эту зависимость в дальнейшем необходимо учитывать путем введения соответствующей поправки. С учетом этого выражение (4.11) для ферромагнетиков примет вид

$$B_{\text{вн.}} = k \mu_0 \chi H. \quad (4.15)$$

Опытным путем установлено, что величина  $k$  зависит от объема ферромагнетика, расстояния от центра стержня до рассматриваемой точки поля и определяется по формуле

$$k = \frac{2V}{r^3} \cdot 10^3, \quad (4.16)$$

где  $V$  – объем стержня,  $r$  – расстояние от середины испытываемого ферромагнетика (стержня) до центра магнитной стрелки.

Если магнитную стрелку разместить в плоскости магнитного меридиана, а затем поднести к ней намагниченный сердечник, то она отклонится на некоторый угол  $\alpha$ . Тогда

$$\frac{B_{\text{вн.}}}{B_3} = \text{tg} \alpha, \quad (4.17)$$

где  $B_3$  – индукция магнитного поля Земли.

Зная  $B_3$  и угол отклонения стрелки, можно по формуле (4.17) определить индукцию сердечника  $B_{\text{вн.}}$ .

Подставить формулы (4.16) и (4.17) в выражение (4.15) и, решив его относительно  $\chi$ , получим

$$\chi = \frac{B \cdot \text{tg} \alpha \cdot r^3 \cdot 10^3}{\mu_0 \cdot H \cdot 2 \cdot V}. \quad (4.18)$$

Намагничивающее поле  $H$ , создаваемое катушкой, вычисляется по величине тока, протекающего через соленоид

$$H = I \cdot n = I \frac{N}{l}. \quad (4.19)$$

Тогда

$$\chi = \frac{H_c \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot r^3 \cdot l \cdot 10^3}{\mu_0 \cdot I \cdot N \cdot 2V}, \quad (4.20)$$

но

$$B_3 = \mu_0 H_3.$$

Окончательно получим

$$\chi = \frac{H_c \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot r^3 \cdot l \cdot 10^3}{2 \cdot I \cdot N \cdot V}, \quad (4.21)$$

где  $H_3$  – горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля Земли, равная 16 А/м;  $\alpha$  – угол отклонения магнитной стрелки;  $r$  – расстояние от середины испытуемого ферромагнитного стержня до центра магнитной стрелки;  $l$  – длина соленоида;  $I$  – ток в катушке;  $N$  – число витков соленоида, равное 320;  $V$  – объем ферромагнитного стержня.

Важной особенностью ферромагнетиков является так называемый **гистерезис**. Явление гистерезиса заключается в том, что намагничивание  $P$ , а, следовательно, и магнитная индукция  $B_{\text{вн}}$  зависят не только от значения напряженности намагничивающего поля  $H$  в данный момент, но и от того, какова напряженность была раньше. Если ферромагнетик ранее не подвергался намагничиванию, то кривая, выражающая зависимость  $B_{\text{вн}}$  от  $H$ , называется **основной кривой намагничивания** (отрезок  $OA$ , рис. 4.1).

Если, дойдя до точки  $A$ , начать уменьшать намагничивающее поле  $H$ , т. е. уменьшать величину тока в обмотке соленоида, то индукция  $B_{\text{вн}}$  будет уменьшаться по кривой  $AD$ , т. е. с некоторым отставанием. Это отставание называется **гистерезисом**. Величина  $B_{\text{вн}}$ , равная  $OD$ , когда  $H = 0$ , называется **остаточной индукцией**. Полное размагничивание наступает в том случае, если дать в обмотку соленоида ток обратного направления, т. е. создать отрицательную напряженность (отрезок  $OK$ ), рисунок 4.1.

Величина этого поля называется **коэрцитивной силой**. Дальнейшее уменьшение  $H$  вызывает уменьшение  $B_{\text{вн}}$ , причем уменьшение  $B_{\text{вн}}$  будет идти по кривой  $KA'$ . Если теперь начать увеличение  $H$ , т. е. сменить направление тока на обратное, то кривая пойдет с точки  $A'$  через  $D'$ ,  $K'$  и замкнется в точке  $A$ . Описанная замкнутая кривая, изображающая зависимость  $B_{\text{вн}} = f(H)$ , называется **петлей гистерезиса**.

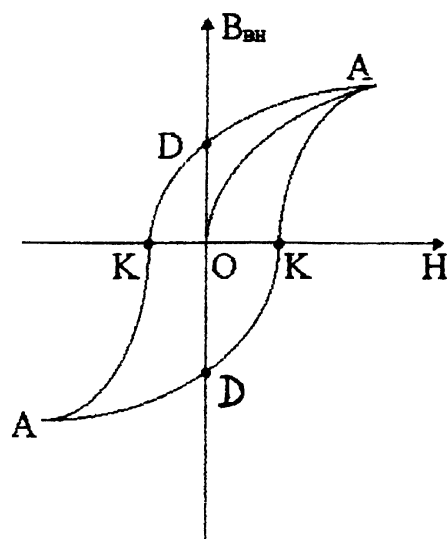


Рисунок 4.1 – Петля гистерезиса

Но, как видно из формулы (4.17),  $B_{вн}$  прямо пропорциональна  $tg\alpha$ , а из выражения (4.19) следует, что  $H$  прямо пропорциональна величине тока  $I$ . Поэтому кривая зависимости  $tg\alpha = f(I)$  будет аналогична петле гистерезиса.

Учитывая, что  $tg\alpha$  для малых углов пропорционален  $\alpha$ , зависимость  $tg\alpha = f(I)$  можно заменить зависимостью  $\alpha = f(I)$ .

#### Описание установки

Для снятия основной кривой намагничивания ОА и петли гистерезиса испытываемого ферромагнитного образца используют установку состоящую из двух размещенных на мерной линейке соленоидов, между которыми установлена магнитная стрелка. Испытуемый стальной стержень помещают внутри одного из соленоидов таким образом, чтобы ось его совпадала с осью соленоида и была направлена перпендикулярно магнитному меридиану.

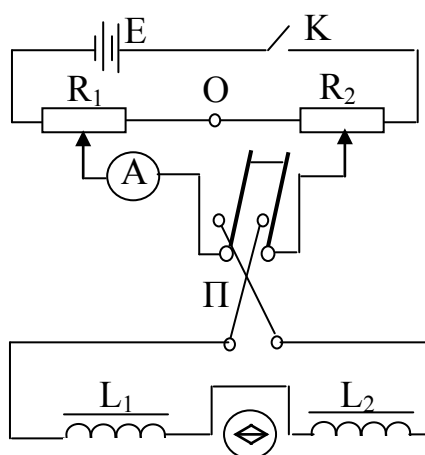


Рисунок 4.2 – Принципиальная схема сжатия основной кривой

Витки соленоида намотаны так, что при пропускании тока в отсутствие испытуемого образца магнитная стрелка останется по-прежнему в плоскости магнитного меридиана. Если в один из соленоидов поместить испытуемый ферромагнитный стержень, то магнитная стрелка будет отклоняться от плоскости магнитного меридиана, причем с увеличением силы тока сначала отклонение идет быстро, а затем замедляется.

Ток в соленоиды подводится от селенового выпрямителя, который преобразует переменный ток в постоянный.

Для изменения тока в цепи служат два реостата на 100 Ом, рассчитанные на предельный ток 2 А.

Ток в рабочей цепи измеряется амперметром типа ПМА-70.

Для размагничивания стержня служат соленоид на подставке (на 220 В, 3 А) и регулятор напряжения. Линейные размеры стержня измеряются с помощью штангенциркуля.

### Выполнение задания

Для снятия основной кривой намагничивания необходимо, чтобы образец был предварительно размагничен (к нему должны притягиваться оба конца магнитной стрелки). Если один конец магнитной стрелки притягивается к концу стержня, а второй отталкивается от этого же конца, то в стержне сохранилось остаточное намагничивание. Для размагничивания стержень помещают в катушку на подставке, которую соединяют через регулятор напряжения (ЛАТР) с сетью. Перемещением движка ЛАТРа сначала увеличивают напряжение в катушке до 250 В, а затем снижают до нуля.

После этого образец считается размагниченным (проверяется поднесением образца к магнитной стрелке).

Собирают рабочую цепь согласно схеме (рис. 4.2), соблюдая полярность. Устанавливают стрелку вдоль магнитного меридиана Земли (против нуля шкалы). Замыкают ключ К и двухполюсный рубильник П. Движками реостатов сбрасывают ток в цепи до нуля. Затем вносят в соленоид  $L_1$  ферромагнитный сердечник и, увеличивая ток от 0 до 1 А, производят отсчет угла поворота  $\alpha$  магнитной стрелки для соответствующих значений тока  $I$ .

Снижают ток от 1 А до 0 и через каждые 0,1 А, производят соответствующие отсчеты  $\alpha$ .

Переключателем П меняют направление тока в цепи (направление намагничивающего поля в соленоиде) и, уменьшая ток от 0 до -1 А через каждые 0,1 А, производят соответствующие отсчеты  $\alpha$ .

Увеличивают ток от 0 до -1 А и производят соответствующие расчеты.

Переключателем П снова меняют направление тока в цепи и, уменьшая ток от 0 до 1 А через 0,1 А, производят соответствующие отсчеты угла отклонения магнитной стрелки  $\alpha$ .

Данные измерения заносят в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

Ток I, А	0	0,1	...	0,9	1
Угол отклонения $\alpha$ , град					
Ток I, А	1	0,9	...	0,1	0
Угол отклонения $\alpha$ , град					
Ток I, А	0	-0,1	...	-0,9	-1
Угол отклонения $\alpha$ , град					
Ток I, А	-1	-0,9	...	-0,1	
Угол отклонения $\alpha$ , град					
Ток I, А	0	0,1	...	0,9	1
Угол отклонения $\alpha$ , град					

Для значений тока 0,2А; 0,5А; 1А и соответствующий значений  $\alpha$  (0 – 1А) по формулам (4.21) и (4.14) вычисляют значения  $\chi$  и  $\mu$ . Находят среднее значение  $\chi_{\text{ср.}}$  и  $\mu_{\text{ср.}}$ .

По данным опыта строят график основной кривой намагничивания и петли гистерезиса  $\alpha = f(I)$ .

### Контрольные вопросы

1. Почему при отсутствии внешнего магнитного поля не проявляются магнитные свойства у диамагнетиков и парамагнетиков?
2. Почему диамагнетики ослабляют внешнее магнитное поле, а парамагнетики – усиливают?
3. В чем состоит явление магнитного гистерезиса? Где оно применяется?
4. Что такое коэрцитивная сила?

### Лабораторная работа Э 5

#### ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

**Цель работы:** изучить функциональное назначение и порядок проведения измерений электронным осциллографом.

**Принадлежности:** электронный осциллограф, генератор синусоидальных сигналов.

#### Назначение и устройство

Осциллограф малогабаритный универсальный С1-73 предназначен для исследования формы электрических сигналов в диапазоне частот от 0 до 5 МГц путем визуального наблюдения и измерения их амплитуд в диапазоне от 0,02 до 120 В. Прибор дает возможность измерять длительность и амплитуду сигналов, наблюдать кривые периодических процессов и фигуры Лиссажу. Осциллограф



предназначен для использования при разработке, настройке и регулировке радиоэлектронной аппаратуры в лабораторных, цеховых и полевых условиях.

Основной частью осциллографа является электроннолучевая трубка (рисунок 5.1), представляющая собой вакуумную колбу специальной формы.

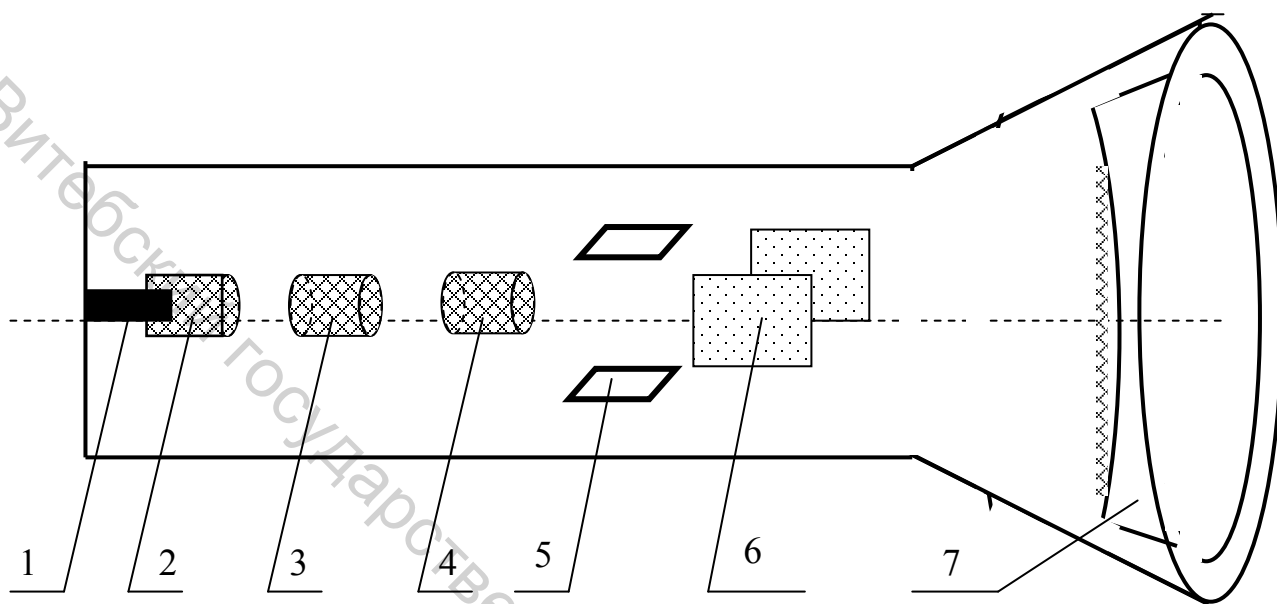


Рисунок 5.1 – Схема устройства электроннолучевой трубки

Оксидный подогревный катод 1 выполнен в виде цилиндрика, внутри которого помещен подогреватель. Такое устройство катода позволяет получить узкий пучок электронов, интенсивность которого регулируется при помощи модулятора 2, выполненного в виде цилиндрика. Действие этого цилиндрика аналогично действию сетки электронной лампы: чем больше отрицательное напряжение на модуляторе, тем меньше электронов пройдет через отверстие его цилиндра. Кроме того, модулятор фокусирует электронный луч.

Однако для получения наибольшей резкости изображения на экране трубки необходимо сфокусировать электронный пучок в одну точку. Для обеспечения такой фокусировки в электроннолучевой трубке имеются два анода 3 и 4, представляющие собой цилиндры, к которым приложены положительные напряжения. Электрические поля анодов действуют на электронный пучок как электронно-оптическая система линз. Путем изменения напряжения между обоими цилиндрами можно регулировать степень фокусировки пучка.

Сфокусированный электронный пучок направляется вдоль трубки по оси в направлении экрана. Для ускорения движения электронов в трубке имеется третий анод 7. Он выполнен в виде кольцеобразного слоя металла,

нанесенного на внутреннюю поверхность расширенной части колбы. На него подается положительное напряжение с потенциалом более высоким, чем на втором аноде. Экран трубки покрыт специальным люминесцирующим материалом, поэтому попадающий на него электронный луч вызывает появление светового пятна.

Во избежание прогорания экрана при сильной бомбардировке одного и того же места в течение длительного промежутка времени не следует делать пятно слишком ярким и оставлять сфокусированное пятно неподвижным.

По пути к экрану электронный луч проходит между двумя парами плоских пластин 5 и 6, из которых одна расположена горизонтально, а вторая – вертикально. Если к пластинам не приложено электрическое поле, влияющее на направление электронного пучка, то пятно образуется в центре экрана. При прохождении же пучка электронов между разноименно заряженными пластинами он будет отклоняться в сторону положительно заряженной пластины. Если поменять полярность пластин, пучок отклонится в противоположную сторону, т. е. снова к положительной пластине. Скорость, с которой электроны влетают в пространство между пластинами, велика, поэтому они не падают на пластину, а только меняют траекторию движения. Регулируя величину приложенного к пластине напряжения, можно менять величину отклонения луча. Пластины 5, расположенные горизонтально, отклоняют электронный луч вверх или вниз, т. е. по вертикали (ось  $Y$ ), и называют **вертикально отклоняющими**. Пластины 6, расположенные вертикально, отклоняют электронный луч влево или вправо (ось  $X$ ) и называют **горизонтально отклоняющими**.

Величина отклонения электронного луча по оси  $X$  или  $Y$  прямо пропорционально величине отклоняющего напряжения

$$X = k_x U \quad \text{и} \quad Y = k_y U,$$

где  $X$  и  $Y$  – величины отклонения по соответствующей оси (в мм);  $k_x$  и  $k_y$  – величины чувствительности трубки, показывающие на сколько мм сдвинется световое пятно по соответствующей оси от первоначального положения, если напряжение на пластинах изменится на 1 В;  $U$  – напряжение на пластинах.

Если на пластины подано переменное напряжение, то электроны находятся под действием переменной силы, и электронный луч чертит на экране линию (рис. 5.2 а).

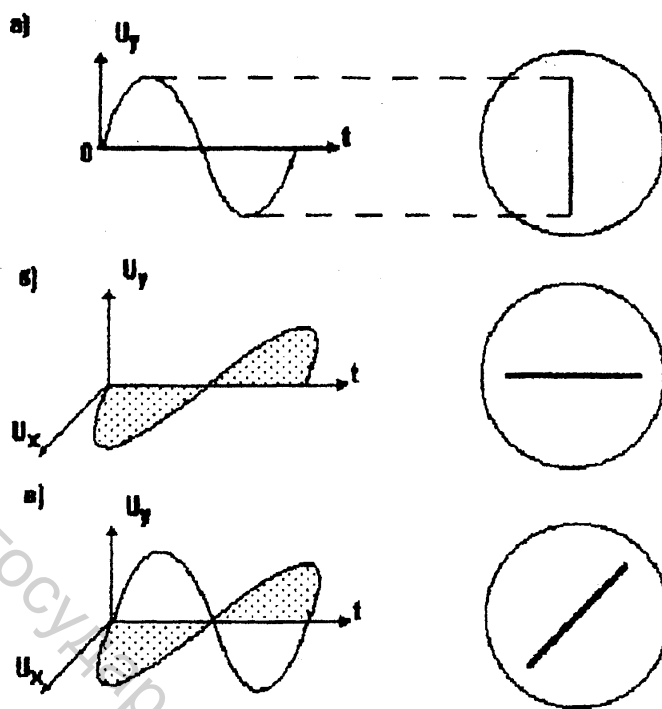


Рисунок 5.2 – Вид линий на экране осциллографа при подаче переменного напряжения: а) на пластины у; б) на пластины х; в) одновременно на пластины у и х

На рисунке показано положение линий на экране, при котором переменное синусоидальное напряжение подано только на пластины Y (рис. 5.2 а), только на пластины X (рис. 5.2 б), и одновременно на обе пластины (рис. 5.2 в). В последнем случае происходит сложение взаимно перпендикулярных колебаний с одинаковыми периодами при разности фаз, равной нулю. По величине горизонтальной и вертикальной полосок можно определить амплитудное значение переменного напряжения, поданного на оси X или Y.

Однако для излучения электрического процесса простого измерения напряжения недостаточно. Часто бывает необходимо знать, по какому закону меняется исследуемое напряжение во времени, т. е. получить его временную развертку. Для того чтобы обеспечить отклонение электронного луча по оси X в зависимости от времени, необходимо получить такое электрическое напряжение, которое бы равномерно нарастало или убывало в зависимости от времени (т. е. в определенном масштабе выражало бы само время), и подать его на горизонтально отклоняющие пластины. Кроме того, напряжение должно быть таким, чтобы светлое пятно на экране трубки перемещалось по оси X от левого до правого края экрана с постоянной скоростью (пропорционально времени).

Если светлое пятно в тот момент, когда оно дойдет до правого края экрана, возвратит быстро на левый край для совершения того же движения и повторять этот процесс с достаточно высокой скоростью, то на экране будет получаться прямая линия, линейный масштаб которой соответствует

определенному промежутку времени. Таким образом, время развертывается в отрезок прямой оси X. Такой процесс называется **разверткой**. Напряжение, определяющее время в определенном масштабе, называется **развертывающим напряжением**, а источник такого напряжения – **генератором развертки**. Чаще всего в качестве развертывающего напряжения используется пилообразное напряжение (рис. 5.3), подаваемое на горизонтально отклоняющие пластины.

Если при этом подать на вертикально отклоняющие пластины переменное напряжение, которое мы хотим исследовать, то произойдет сложение колебаний, в результате которого на экране будет «нарисована» кривая, показывающая зависимость исследуемого напряжения от времени. На рисунке 5.4 сложение этих колебаний показано графически.

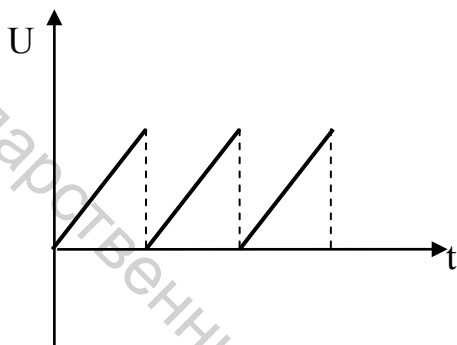


Рисунок 5.3 – Пилообразное напряжение, подаваемое в качестве развёртывающего напряжения на пластины электронно-лучевой трубки

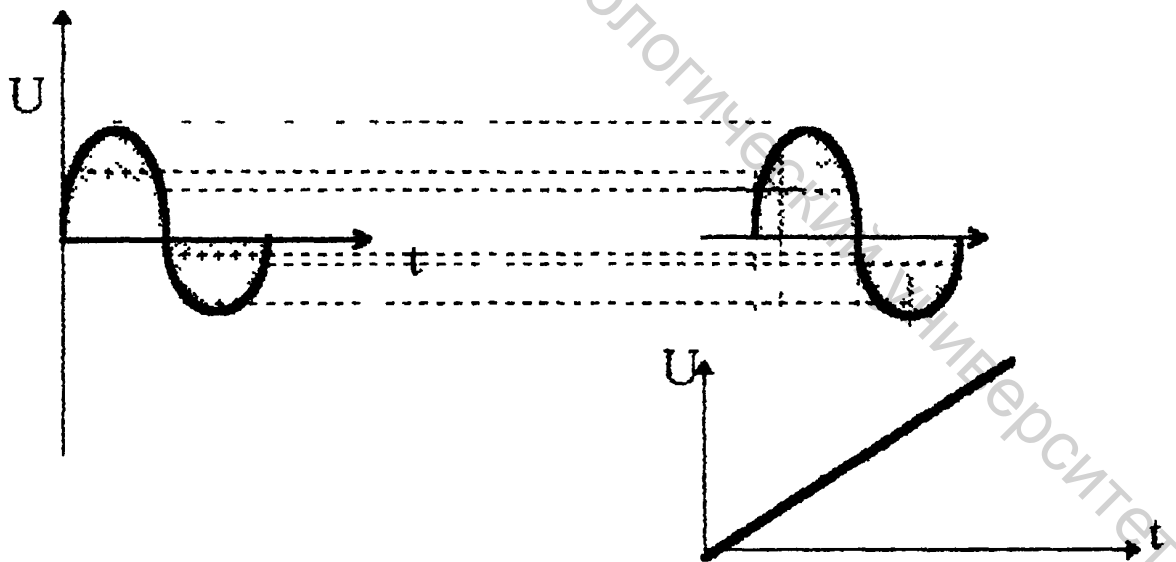


Рисунок 5.4 – Сложение колебаний развертки и исследуемого сигнала

Синусоида слева изображает исследуемое напряжение, прямая линия справа внизу – напряжение, снимаемое с генератора развертки, а синусоида справа сверху – картину, получаемую на экране осциллографа.

Для того чтобы изображение на экране осциллографа было неподвижным, необходимо точное равенство или пропорциональность частот развертки и исследуемого сигнала. Если такого соответствия частот нет, изображение будет перемещаться по экрану влево или вправо.

Устройство генератора развертки позволяет плавно регулировать частоту генератора развертки. Плавное изменение частоты генератора развертки производится ручкой 8а. Скачкообразное изменение частоты – ручкой 8. Каждое фиксированное положение отмечено цифрой, обозначающей длительность импульсов развертки в мкс/дел. Диапазон генерируемых частот от 10 Гц до 5 МГц. Однако частота вырабатываемого генератором напряжения недостаточно стабильна, поэтому изображение на экране не будет устойчивым. Для устранения этого недостатка и получения устойчивого неподвижного изображения генератор развертки необходимо синхронизировать (согласовать во времени) с частотой исследуемого напряжения. Частоту генератора развертки можно синхронизировать частотой исследуемого сигнала (внутренняя синхронизация) или путем подачи синхронизирующего напряжения от внешнего источника (внешняя синхронизация).

Вид синхронизации устанавливается при помощи переключателя «синхр.», находящегося на правой боковой панели осциллографа (рисунок 5.5).

При включении тумблера «синхр.» в положение «» запускающий сигнал поступает на вход схемы синхронизации с усилителем У. При включении тумблера « синхр. » в положение «» синхронизация осуществляется внешним сигналом, который следует подать на гнездо «1:1» или «1:10».

Для получения устойчивой синхронизации внешний сигнал должен зависеть от исследуемого сигнала. Внешний сигнал слишком мал или содержит составляющие, нежелательные для синхронизации, либо когда нужно запустить генератор развертки опережающим сигналом. Сигнал синхронизации, подаваемый на гнездо «1:10», ослабляется в 10 раз.

Переключатель «синхр.» выбирает режим запуска схемы и полярность запускающего сигнала. При исследовании положительной части импульса переключатель «синхр.» ставится в положение «.+ ~» или «+ ~». При исследовании отрицательной части импульса – в положение «- ~» или «- ~».

В положении переключателя «~» постоянная составляющая запускающего сигнала не поступает на вход схемы синхронизации, при этом ослабляются сигналы с частотой ниже 50 Гц.

В положении « $\sim$ » обеспечивается устойчивая синхронизация низкочастотными сигналами с частотой до 50 Гц или сигналами с малой частотой повторения.

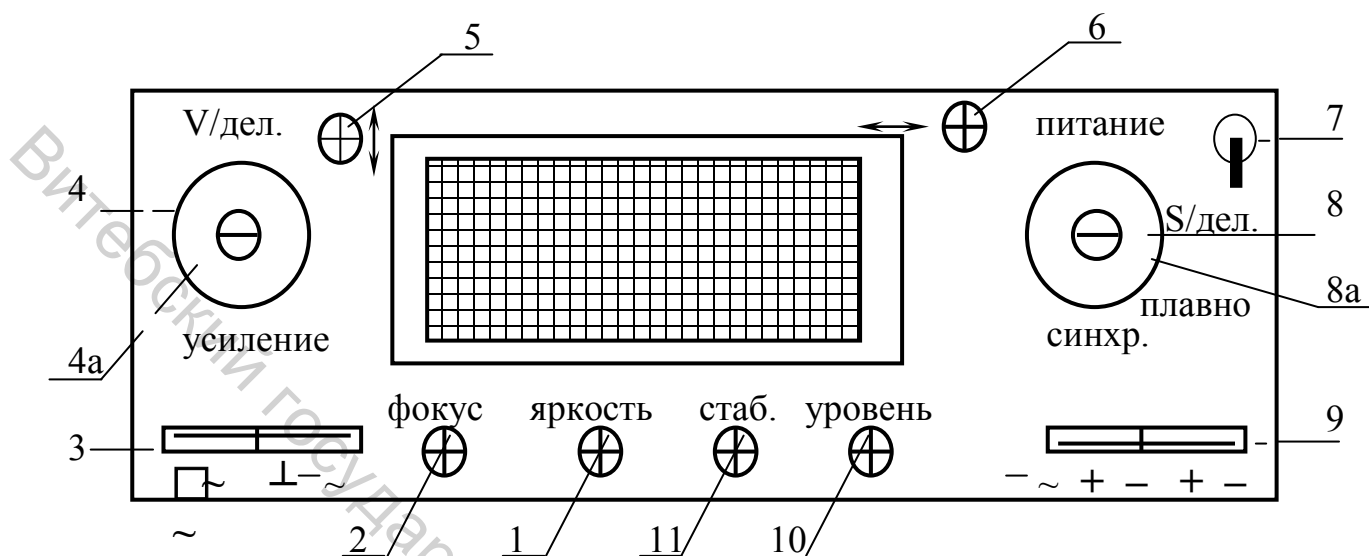


Рисунок 5.5 – Вид передней панели осциллографа и расположение ручки управления

Ручкой «уровень» можно обеспечить запуск схемы синхронизации на любом уровне запускающего сигнала. Этой ручкой выбирается точка на запускающем сигнале, с которой синхронизируется развертка. Прежде чем установить ручку «уровень», выберите источник синхронизирующего сигнала, режим запуска схемы синхронизации и полярность запускающего сигнала. Для нахождения точки, в которой синхронизируется развертка, поверните ручку «уровень» влево до упора, затем медленно вращайте ручку «стаб.» до начала срыва развертки (ждуший режим). Вращая ручку «уровень» вправо до появления развертки, установите необходимую точку синхронизации развертки.

Управление электронным лучом осуществляется при помощи ручек, расположенных в нижней части лицевой панели.

1. Регулировка яркости луча производится ручкой 1 «яркость» (рис. 5.5). При крайнем левом положении этой ручки световое пятно на экране не видно, а при крайнем правом – яркость наибольшая.

2. Фокусировка луча проводится ручкой 2 «фокус 2». Эта регулировка дает возможность установить наибольшую четкость изображения на экране.

3. Смещение светового пятна (изображения) в вертикальном направлении осуществляется при помощи ручки 5. При вращении ее влево пятно перемещается вверх, а при вращении вправо - вниз.

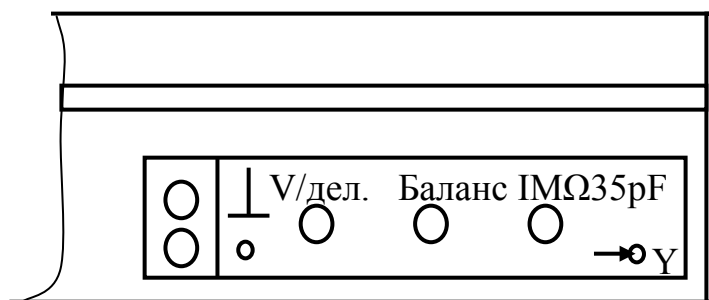


Рисунок 5.6. – Левая панель входного сигнала и регулировка осциллографа

4. При вращении ручки 6 « $\leftrightarrow$ » пятно  $\updownarrow$  перемещается влево, а при вращении ручки вправо-вправо. Эта регулировка дает возможность перемещать изображение по горизонтали.

Исследуемое напряжение подается на гнездо « $\rightarrow \text{Y}$ », расположенное на левой боковой панели осциллографа (рис. 5.6). Для установления величины исследуемого напряжения, удобного для наблюдения на экране ЭЛТ, предусмотрены ручки управления 4 и 4а «усилие». Переключатель 4 предназначен для скачкообразной регулировки, а 4а – для плавной регулировки. Вращение переключателя 4 слева направо дает возможность увеличивать амплитуду напряжения на вертикально отклоняющих пластинах, а вращение справа налево – уменьшить ее. Максимальное напряжение, которое может быть подано на гнездо « $\rightarrow \text{Y}$ » прибора,  $\sim 220$  В. Каждое фиксированное положение переключателя 4 обозначено цифрами, обозначающими величину напряжения, измеряемую в V/дел.

При помощи ручки 10 «уровень» можно установить устойчивое изображение на экране ЭЛТ.

### Выполнение задания

1. Подсоедините осциллограф кабелем питания к сети  $\sim 220$  В.

2. Включите тумблер 7 «Питание» на передней панели осциллографа.

При этом должна загореться сигнальная лампочка. Дайте осциллографу прогреться в течение 2 – 3 минут. Приступайте к измерениям.

### Задание 1. Измерение полного размаха переменного напряжения.

1. Подайте исследуемый сигнал на гнездо « $\rightarrow \text{Y } 1\text{M}\Omega 35\text{pF}$ » усилителя Y.

2. Установите переключатель «V/дел.» так, чтобы исследуемый сигнал на экране ЭЛТ занимал около 5 делений.

3. Установите переключатель « $\sim \perp \sim$ » в положение « $\sim$ ».

4. Установите устойчивое изображение с помощью ручки «уровень». Переключите «mS/дел.,  $\mu$ S/дел.» установите так, чтобы на экране наблюдалось несколько периодов исследуемого сигнала.

5. Установите ручку « $\blacktriangleleft\blacktriangleright$ » так, чтобы нижний уровень сигнала совпадал с одной из нижних линий сетки, а верхний уровень находился в пределах рабочей части экрана. Ручкой « $\leftrightarrow$ » сместите изображение таким образом, чтобы верхний уровень находился на центральной вертикальной (градуированной) линии (рис. 5.7). Максимум расположен на градуированной вертикали.

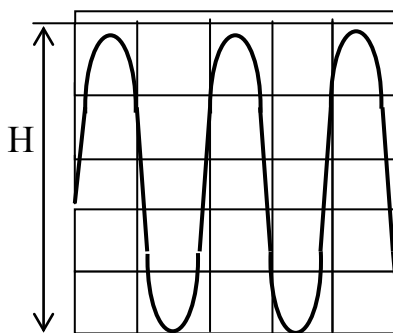


Рисунок 5.7 – Установка изображения на экране осциллографа для проведения измерения

6. Измерьте расстояние в делениях между крайними точками изображения вертикали Н. Ручку усилителя Y «усиление» поставьте в крайнее правое положение.

7. Умножьте величину Н на коэффициент усиления.

Следует также учитывать коэффициент ослабления, если используется выносной делитель напряжения 1:10.

Пример. Предположим, что величина изображения по вертикали  $H = 4,8$  деления и при измерении используется внешний делитель напряжения 1:10. Переключатель «V/дел.» находится в положении «0,5». Размах напряжения сигнала будет:  $4,8 \text{ дел.} \times 0,5 \text{ В/дел.} \times 10 = 24 \text{ В.}$

## Задание 2. Измерение переменного напряжения с постоянной составляющей.

1. Подайте исследуемый сигнал на гнездо « $\rightarrow \odot Y 1M\Omega 35pF$ ».

2. Установите переключатель «V/дел.» так, чтобы импульс занимал на экране ЭЛТ примерно пять делений. Ручку усилителя Y «усиление» поверните в крайнее правое положение.

3. Установите переключатель « $\sim \perp \sim$ » в положение « $\perp$ ».

4. Установите линию развертки на нижней линии сетки или другой контрольной линии, если измеряемое напряжение положительное, или на верхней линии сетки, если измеряемое напряжение отрицательное.



Не следует поворачивать ручку « » после установки контрольной линии. Переключите переключатель « $\sim \perp \sim$ » в положение « $\sim$ ». Контрольная линия может быть проверена в любое время переключением в положение « $\perp$ » переключателя « $\sim \perp \sim$ ».

5. Установите ручкой «уровень» устойчивое изображение. Переключатель «mS/дел.,  $\mu$ S/дел.» установите в положение, при котором на экране наблюдается несколько периодов исследуемого сигнала.

6. Определите расстояние в делениях между контрольной линией и точкой на линии сигнала, в которой нужно измерять напряжение.

Например, измерение производится между контрольной линией и точкой А (рис. 5.8).



Рисунок 5.8 – Прямоугольная форма импульсов на экране осциллографа

7. Умножьте полученный размер в делениях на коэффициент усиления. Следует также учитывать коэффициент ослабления выносного делителя, если он используется.

Пример. Допустим, что измеренное расстояние составляет 4 деления (рис. 5.8), сигнал положительной полярности (изображение находится выше контрольной линии). Переключатель «V/дел.» находится в положении «2». При измерении используется делитель напряжения 1:10. Измеренное мгновенное значение напряжения будет:  $4 \text{ дел.} \times 2 \text{ В/дел.} \times 10 = 80 \text{ В}$ .

### Задание 3. Измерение длительности сигнала между двумя его точками.

1. Подайте исследуемый сигнал на гнездо « $\rightarrow \odot Y \text{ } 1 \text{ M}\Omega \text{ } 35 \text{ pF}$ ».
2. Установите переключатель «V/дел.» в такое положение, чтобы изображение на экране составляло около 5 делений.
3. Установите переключатель «mS/дел.,  $\mu$ S/дел.» в такое положение, в котором расстояние между измеряемыми точками будет меньше 10 делений.
4. Установите ручкой «уровень» устойчивое изображение на экране ЭЛТ.

5. Переместите ручкой « $\blacktriangleleft\blacktriangleright$ » изображение так, чтобы точки, между которыми измеряется время, находились на горизонтальной центральной линии.

6. Установите ручкой « $\leftrightarrow$ » изображение так, чтобы точки, между которыми измеряется время, находились в пределах десяти центральных делений сетки.

7. Измерьте горизонтальное расстояние между измеряемыми точками. Ручка развертки «плавно» должна быть установлена в крайнее правое положение.

8. Умножьте расстояние, измеренное в п. п. 7, на коэффициент развертки.

Пример. Допустим, что расстояние между измеряемыми точками составляет 6 делений, а переключатель «mS/дел.,  $\mu$ S/дел.» установлен в положение «0,2 mS/дел.» (рис. 5.9). Время  $T = 6 \text{ дел.} \times 0,2 \text{ mS/дел.} = 1,2 \text{ mS}$ .

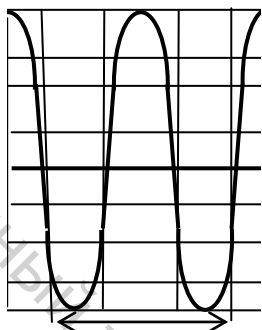


Рисунок 5.9 – Измерение расстояний между точками на экране осциллографа, при синусоидальной форме сигнала

#### Задание 4. Измерение частоты периодических сигналов.

1. Измерьте длительность времени одного периода сигнала, как описано в задании 3.

2. Рассчитайте частоту сигнала  $f_c$  по формуле

$$f_c (\text{Гц}) = \frac{1}{T(\text{с})}, \quad (5.1)$$

где  $f_c$  – частота в Гц;  $T$  – длительность периода (в секундах).

Пример. Частота сигнала с длительностью периода  $1 \text{ mS}$  будет равна

$$f_c = \frac{1}{1 \text{ mS}} = 1 \text{ кГц.}$$

#### Контрольные вопросы

1. Каково функциональное назначение элементов электроннолучевой трубки: модулятора, анодов, плоских пластин?

2. Как сместить пятно на экране осциллографа горизонтально влево, вертикально вверх или в одну из точек верхнего левого квадрата экрана?

3. Какое напряжение называется пилообразным? Что увидим на экране при подаче такого напряжения на вертикально отклоняющиеся пластины?

4. Как получить на экране синусоиду? При каком условии изображение на экране будет неподвижным?

## Лабораторная работа Э 6

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

**Цель работы:** экспериментально определить удельный заряд электрона.

**Принадлежности:** электронный осциллограф, реостаты, источники тока, амперметр, вольтметр, выключатели.

**Удельным зарядом частицы** называется отношение ее заряда к массе. В настоящее время существует несколько способов определения этой физической величины. Эксперименты по измерению удельного заряда частиц давали возможность получать ценные сведения о природе этих частиц и о тех процессах, в которых они возникают. Такие эксперименты фактически привели к открытию самого существования электрона. В 1887 году английский физик Дж. Томсон впервые определил отношение заряда электрона к его массе. В основе опытов Томсона лежало изучение движения заряженных частиц в электрическом и магнитном полях.

Рассмотрим схему опыта, позволяющая потоку заряженных частиц одновременно двигаться в магнитном и электрическом полях (рис. 6.1).

Внутри стеклянной колбы, в которой создан высокий вакуум, помещен катод К, служащий источником электронов. Между катодом К и анодом А приложена ускоряющая разность потенциалов  $U$ . При  $U > 1000$  В можно пренебречь начальной энергией вылетающих электронов и приравнять их

кинетическую энергию  $\frac{mv^2}{2}$  работе электрических сил  $eU$ , затраченной на ускорение этих электронов  $\frac{mv^2}{2} = eU$ .

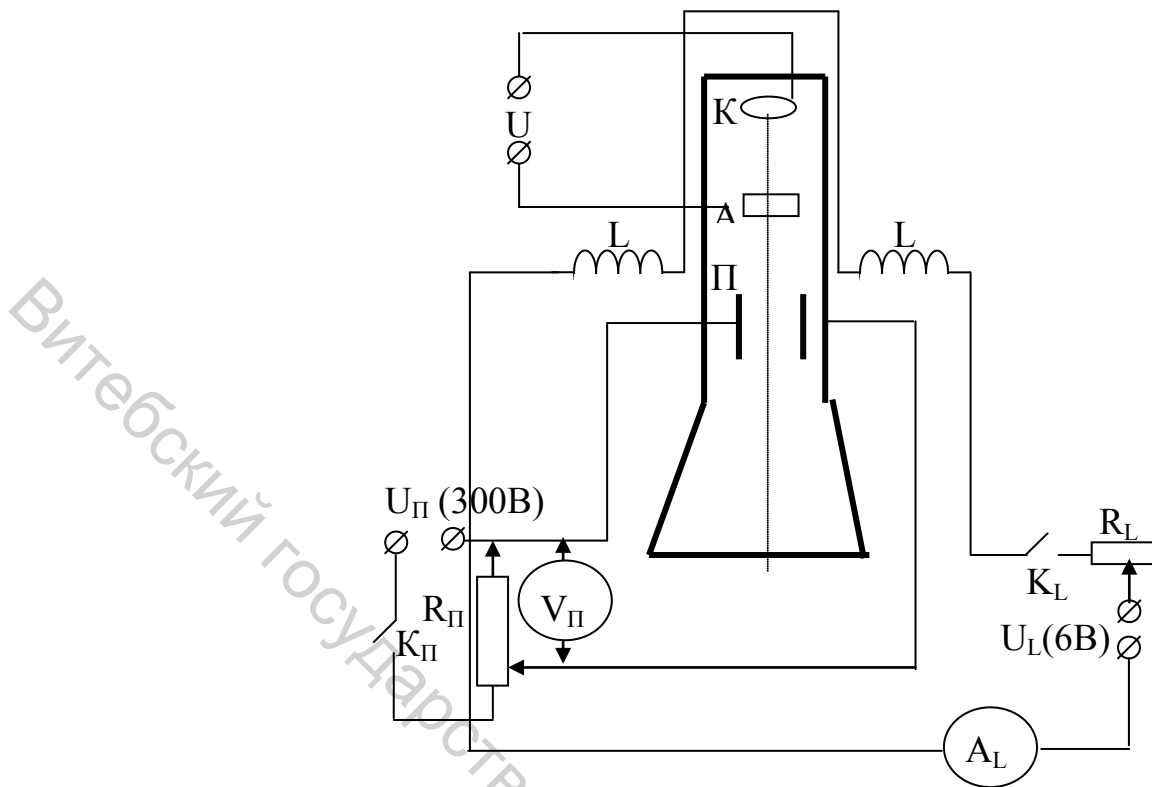


Рисунок 6.1 – Схема опыта по определению удельного заряда электрона

Откуда

$$\frac{e}{m} = \frac{v^2}{2U}, \quad (6.1)$$

где  $v$  – скорость электронов;  $U$  – разность потенциалов между катодом и анодом ( $U = 1200$  В).

Таким образом, для определения удельного заряда электрона нужно знать скорость  $v$ , которую определим при рассмотрении движения электронов в электрическом и магнитном полях. Стеклообразную колбу помещают в магнитное поле соленоидов, характеризуемое вектором магнитной индукции  $\vec{B}$  и перпендикулярное к направлению движения потока электронов. При этом возникает сила Лоренца, с которой магнитное поле действует на движущийся в нем электрон. Сила в общем случае определяется выражением:  $\vec{F}_e = q[\vec{v}\vec{B}]$ , где  $\vec{B}$  – вектор магнитной индукции;  $\vec{v}$  – вектор скорости заряда;  $q$  – величина заряда.

В соответствии с определением векторного произведения вектор этой силы перпендикулярен плоскости, в которой лежат векторы  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$  так, как показано на рисунке 6.2, а ее модуль  $F_L$  равен:  $F_L = qvB\sin\alpha$ , где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$ .

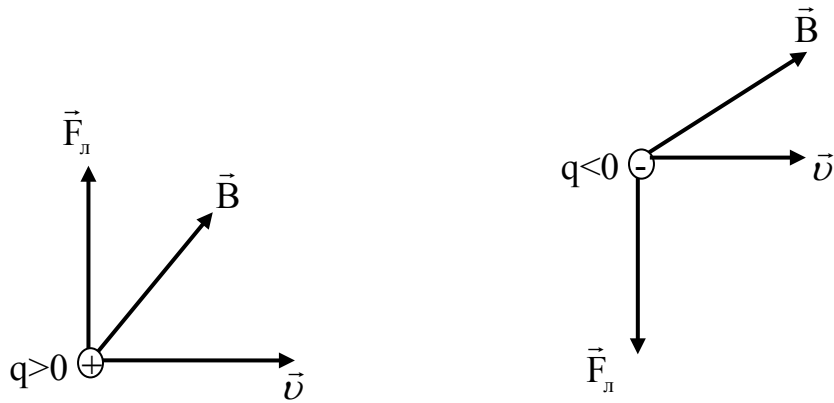


Рисунок 6.2 – Направление силы Лоренца

Так как в нашем опыте скорость частиц  $\vec{v}$  перпендикулярна  $\vec{B}$  ( $\alpha = 90^\circ$ ), а движущейся частицей является электрон, то модуль силы Лоренца равен

$$F_L = e v B.$$

В однородном магнитном поле ( $\vec{B} = const$ ) и при условии  $\vec{v} \perp \vec{B}$  электрон будет двигаться по дуге окружности постоянного радиуса в плоскости, перпендикулярной вектору  $\vec{B}$  (рис. 6.3).

Если в области локализации магнитного поля создать поле электрическое ( $\vec{E} = const$ ), то на электрон одновременно будут действовать и сила Лоренца и кулоновская сила  $\vec{F}_k = e\vec{E}$ .

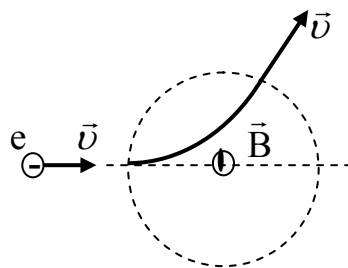


Рисунок 6.3 – Траектория движения заряда в магнитном поле

Однородное электрическое поле может быть получено с помощью двух плоских параллельных проводящих (металлических) пластин, располагаемых на расстоянии  $d$  друг от друга (плоский конденсатор П). При подаче на них напряжения  $U_P$  электрон будет испытывать действие кулоновской силы  $\vec{F}_k$ , как показано на рисунке 6.4.

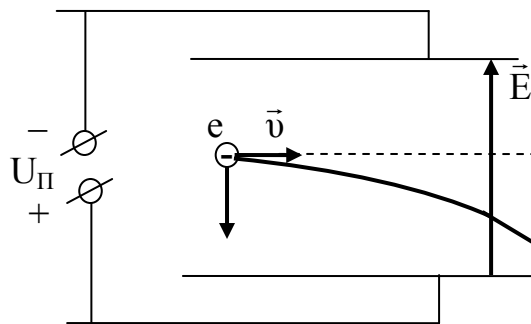


Рисунок 6.4 – Траектория заряда движения в электрическом поле

Так как  $E = \frac{U_{\Pi}}{d}$ , то модуль кулоновской силы равен  $F_k = e \frac{U_{\Pi}}{d}$ .

Влетая в конденсатор перпендикулярно вектору напряженности поля  $\vec{E}$ , электрон будет отклоняться от первоначального направления движения.

Варьируя величину  $B$  и  $U_{\Pi}$ , можно добиться того, что электрон не будет претерпевать отклонения. Это возможно, если  $F_k = F_{\text{л}}$ , т. е.  $e v B = e \frac{U_{\Pi}}{d}$ .

Конденсатор располагают таким образом, чтобы отклонение электрона магнитным и электрическим полями происходило в противоположных направлениях (рис. 6.5).

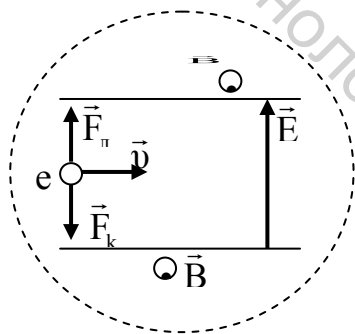


Рисунок 6.5 – Силы, действующие на движущийся заряд в электрических и магнитных полях

Следовательно  $v = \frac{U_{\Pi}}{Bd}$ . Магнитное поле создается с помощью двух соленоидов  $L$ . Так как  $B = \mu_0 H$ , а  $M = kI n$ , то

$$v = \frac{U_{\Pi}}{\mu_0 k I n d}. \quad (6.2)$$

В выражении (6.2)  $\mu_0$  – магнитная постоянная ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Н/м<sup>2</sup>);  $I$  – сила тока в соленоидах;  $n$  – число витков на единицу длины соленоида (в нашей установке  $n = 2,56 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{м}}$ );  $d = 0,05$  м. Коэффициент пропорциональности  $k$  учитывает то обстоятельство, что напряженность магнитного поля  $\vec{H}$ , в котором движется электрон, не есть поле внутри соленоида, а между концами соосно расположенных двух соленоидов. Величина его зависит от геометрии расположенных соленоидов. В нашем случае  $k = 0,01$ .

Вычислив скорость электрона по формуле (6.2), можно определить удельный заряд электрона по формуле (6.1). Зная удельный заряд и заряд электрона, можно вычислить его массу. Это один из способов определения массы электрона на основании опытных данных.

### Описание установки

В работе используется электроннолучевая трубка, установленная в школьном осциллографе ЭОШ–61. Осциллограф включается в сеть при помощи соединительного кабеля и тумблера, расположенного на передней панели осциллографа в правом нижнем углу. В осциллограф дополнительно введены по обе стороны от трубки соединенные последовательно катушки. Выводы катушек подключены к клеммам с маркировкой «L». При пропускании тока через катушки создается магнитное поле, которое изменяет направление электронного луча. Светлое пятно на экране осциллографа при этом смещается от центра вверх или вниз. В качестве источника тока используется батарея аккумуляторов с напряжением 6 В. На вертикально отклоняющие пластины П электроннолучевой трубки напряжение подается при помощи клемм «вход Y», расположенной на передней панели осциллографа. В качестве источника напряжения используется выпрямитель, подключаемый к сети переменного тока при помощи соединительного кабеля и тумблера, расположенного на передней панели.

### Выполнение работы

Перед включением установки необходимо проверить правильность соединений в схеме согласно рисунку 6.1. Ключи  $K_{\Pi}$  и  $K_L$  должны находиться в состоянии «Выкл». На амперметре  $A_L$  устанавливают предел измерения 1А, а на вольтметре  $U_{\Pi}$  – предел 75 В. Затем все измерения проводят в следующем порядке:

1. Подключают к сети переменного тока осциллограф и выпрямитель. По истечении некоторого времени прогрева на экране осциллографа должно появиться светлое пятно в центре.

2. Включают ключ  $K_L$ .

3. При помощи реостата  $R_L$  добиваются тока в цепи близкого к максимально возможному. При этом пятно на экране сместится по вертикали вверх или вниз от центра.

4. Включают ключ  $K_{II}$  и при помощи потенциометра  $R_{II}$  добиваются того, чтобы пятно снова стало в центре экрана.

5. Записывают в таблицу показания приборов, т. е. значения тока в катушках и разность потенциалов между пластинами.

Таблица 6 – Показания приборов

№ п/п	заряд электрона $e$ , Кл	число витков на единицу длины соленоида $n$ 1/Н	Коэффициент пропорциональности $k$	Магнитная постоянная $\mu_0$ Н/м <sup>2</sup>	Масса электрона $m$ , кг	$d$ , мм	$I_L$ , А	$U_{II}$ , В (на вольтметре $lim=75V$ )	$v$ , м/с	$e/m$ , Кл/кг
1	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$2,56 \cdot 10^3$	0,01	$4\pi \cdot 10^{-7}$	$9,1095 \cdot 10^{-31}$	0,005	0,9			
2							0,7			
3							0,6			
4							0,55			

6. Повторяют действия п. п. 3-5 для четырех различных значений тока в катушках.

7. По формуле (6.4) вычисляют значение скорости электронов для каждого опыта.

8. По формуле (6.1) определяют значение удельного заряда электрона.

9. Сравнить полученные данные.

Табличные величины:  $e/m = 1,8 \cdot 10^{11}$  Кл/м.

### Контрольные вопросы

1. Под действием каких сил происходит движение электрона в электроннолучевой трубке в данной лабораторной установке?

2. Какие силы, действующие на электрон, изменяют в процессе выполнения работы и каким образом?

3. При каком условии траектория движения электронов будет прямолинейной?

4. Что такое векторное произведение двух векторов?



## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ МУЛЬТИВИБРАТОРА В КОНТУРЕ, СОДЕРЖАЩЕМ ИНДУКТИВНОСТЬ, ЕМКОСТЬ И СОПРОТИВЛЕНИЕ

**Цель работы:** изучить затухающие электрические колебательные процессы.

**Принадлежности:** установка для наблюдения затухающих электромагнитных колебаний.

### Свободные колебания

**Свободными (собственными) колебаниями** называются колебания, которые происходят в отсутствие переменных внешних воздействий на колебательную систему и возникают вследствие какого-либо начального отклонения этой системы от состояния ее устойчивого равновесия.

Колебания называются **периодическими**, если значения всех физических величин, характеризующих колебательную систему и изменяющиеся при колебаниях, повторяются через равные промежутки времени. Наименьший промежуток времени, удовлетворяющий этому условию, называется **периодом колебаний (T)**. За период колебаний система совершает одно полное колебание. **Частотой периодических колебаний** называется

величина  $\nu = \frac{1}{T}$ , равная числу полных колебаний, совершающих за единицу времени.

**Циклической (круговой, угловой) частотой периодических колебаний** называется величина  $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$ , равная числу колебаний, совершающихся за  $2\pi$  единиц времени.

При периодических колебаниях зависимость колеблющейся величины  $s$  от времени  $t$  удовлетворяют условию:  $s(t) = s(t + T)$ .

**Гармоническими** принято называть периодические колебания, при которых величина  $S$  удовлетворяет уравнению

$$\frac{d^2s}{dt^2} + \omega^2s = 0. \quad (7.1)$$

Из теории дифференциальных уравнений известно, что общим решением этого уравнения является

$$s = A_1\sin(\omega t) + A_2\cos(\omega t), \quad (7.2)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – постоянные интегрирования, которые могут быть найдены из начальных условий

$$A_1 = \frac{1}{\omega} \left( \frac{ds}{dt} \right)_{t=0} ; \quad A_2 = s(0)'. \quad (7.3)$$

Примером электрической цепи, в которой могут происходить свободные гармонические колебания, служит простейший колебательный контур (рис. 7.1), состоящий из конденсатора емкостью  $C$  и соединенный с ним последовательно катушки индуктивностью  $L$ . При замыкании на катушку предварительно заряженного конденсатора в колебательном контуре возникают свободные колебания заряда на обкладках конденсатора и силы тока в катушке. Переменное электромагнитное поле распространяется в пространстве со скоростью, равной скорости света. Поэтому, если линейные размеры контура  $l$  не слишком велики ( $l \ll c/v$ , где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме;  $v$  – частота колебаний в контуре), то можно считать, что в каждый момент времени  $t$  сила тока  $I$  во всех частях контура одинакова. Такой переменный ток называется **квазистационарным**.

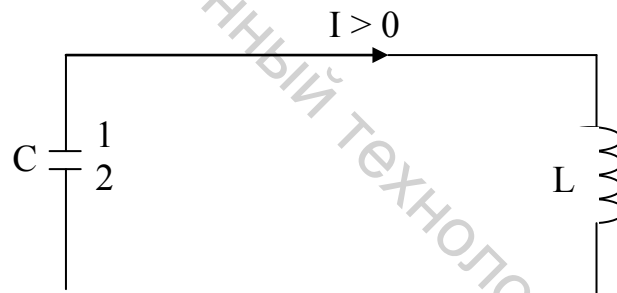


Рисунок 7.1 – Схема колебательного контура

По закону Ома для неоднородного участка цепи  $I - L - 2$ :

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_c \quad (7.4)$$

где  $\varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{q}{C}$  – разность потенциалов обкладок конденсатора;

или

$$IR = -\frac{q}{C} - L \frac{dI}{dt}, \quad (7.5)$$

где  $q$  – заряд на обкладках конденсатора;  $R$  – электрическое сопротивление колебательного контура;  $\varepsilon_c = -L \frac{dI}{dt}$  – ЭДС самоиндукции в катушке.

Из закона сохранения заряда следует, что сила квазистационарного тока в контуре  $I = \frac{dq}{dt}$ . Поэтому дифференциальное уравнение колебаний заряда  $q$  имеет вид

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0. \quad (7.6)$$

Свободные колебания в идеальном колебательном контуре ( $R = 0$ ) будут являться гармоническими, так как уравнение в этом случае примет вид

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{LC} q = 0. \quad (7.7)$$

Циклическая частота  $\omega$  и период  $T$  этих колебаний удовлетворяют

**формуле Томпсона:**  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad \dot{O} = 2\pi\sqrt{LC}.$  (7.8)

Решением уравнения (8.7) является функция

$$q = q_o \sin(\omega t + \varphi_o), \quad (7.9)$$

где  $q_o$  – амплитуда заряда на обкладках конденсатора.

Напряжение на конденсаторе  $U_c$  отличается от заряда множителем  $\frac{1}{C}$

$$U_c = \frac{q_o}{C} \sin(\omega t + \varphi_o) = U_o \sin(\omega t + \varphi_o). \quad (7.10)$$

Продифференцировав выражение (7.10) по времени, получим выражение для силы тока в контуре

$$I = -\omega q_o \cos(\omega t + \varphi_o) = I_o \sin(\omega t + \varphi_o + \frac{\pi}{2}). \quad (7.11)$$

Таким образом, сила тока в контуре опережает по фазе напряжение на конденсаторе на  $\frac{\pi}{2}$ .

## Затухающие колебания

**Затуханием колебаний** называется постепенное уменьшение амплитуды колебаний с течением времени, обусловленное потерей энергии колебательной системой.

Свободные колебания реальных систем всегда затухают. Затухание в электрических колебательных системах вызывается тепловыми потерями в проводниках, потерями энергии на излучение электромагнитных волн, а также потерями в диэлектриках и ферромагнетиках и вследствие электрического и магнитного гистерезиса.

Всякий реальный колебательный контур обладает электрическим сопротивлением ( $R \neq 0$ ), поэтому колебания заряда описываются уравнением

(7.6). Введя обозначения  $\beta = \frac{R}{2L}$  и  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , можем записать уравнение

(7.6)

в виде

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0. \quad (7.12)$$

В теории дифференциальных уравнений доказывается, что решением подобного уравнения является выражение вида

$$q = q_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (7.13)$$

при условии, что  $\beta < \omega_0$ , т.е.  $\frac{R^2}{4L^2} < \frac{1}{LC}$ . Здесь  $\omega_0$  – частота собственных колебаний соответствующего идеального контура;  $\omega$  – частота затухающих колебаний реального контура, определяемая по формуле  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ .

Подставив значения для  $\beta$  и  $\omega_0$ , найдем, что

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}. \quad (7.14)$$

Таким образом, частота затухающих колебаний  $\omega$  меньше  $\omega_0$ . При условии  $R = 0$  выражение (7.14) переходит в формулу Томпсона. Величину  $\beta$  называют **коэффициентом затухания**.

Разделив функцию (7.13) на емкость  $C$ , получим напряжение на конденсаторе, которое будет затухать по закону

$$U_c = U_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (7.15)$$

Для определения скорости затухания колебаний обычно используют логарифмический декремент затухания, определяемый формулой

$$\Theta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)}, \quad (7.16)$$

где  $A(t)$  и  $A(t+T)$  – амплитуды соседних колебаний.

Логарифмический декремент затухания  $\Theta$  связан с параметрами контура  $L$ ,  $C$  и  $R$  соотношением

$$\Theta = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{L}{CR^2} - \frac{1}{4}}}. \quad (7.17)$$

Таким образом, логарифмический декремент затухания является характеристикой контура.

При увеличении электрического сопротивления контура  $R$ , а, следовательно, и коэффициента затухания  $\beta$ , происходит увеличение периода затухающих колебаний и при некотором значении  $R$ , называемом **критическим**, период колебаний обращается в бесконечность. Значение  $R_{кр.}$  находится из условия

$$\frac{R_{кр.}^2}{4L^2} = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad R_{эд.} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (7.18)$$

В этом случае разряд конденсатора переходит из колебательного в апериодический.

### Выполнение работы

Используемая в настоящей лабораторной работе установка (7.2) состоит из: мультивибратора  $M$ , предназначенного для генерации электрических колебаний прямоугольной формы; устройства  $D$ , преобразующего эти колебания в кратковременные импульсы, служащие для запуска изучаемого колебательного контура  $K$ ; электронного осциллографа  $O$ , с помощью которого производятся наблюдения затухающих колебаний.

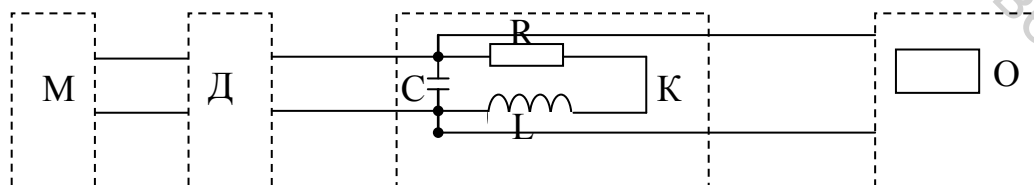


Рисунок 7.2 – Блок-схема установки по исследованию затухающих колебаний

## Измерения

Перед началом работы необходимо установить органы управления осциллографа в исходные положения:

1. Переключатель длительности развертки, находящийся справа от экрана, установить в положение  $50 \mu\text{s}/\text{дел}$ .

2. Переключатель усилителя вертикального отклонения, находящийся слева от экрана, установить в положение  $5 \text{ V}/\text{дел}$ .

После этого подать питание на установку и включить осциллограф переключателем, находящемся в правом верхнем углу передней панели осциллографа. Вращением ручек «стабильн.» и «уровень» добиться четкого изображения затухающих колебаний на экране осциллографа. При этом на установке должны быть соединены клеммы, обозначенные «L1» и «R1». Это соответствует включению в колебательный контур катушки с индуктивностью L1 и резистора с сопротивлением R1.

Для определения логарифмического декремента затухания по формуле (7.16) необходимо измерить амплитуды первых двух положительных полувольт, используя вертикальную масштабную сетку экрана осциллографа. Для большей точности этих измерений следует переместить соответствующие полувольты к центру экрана, используя для этого ручку управления « $\longleftrightarrow$ », расположенную справа от экрана осциллографа.

Аналогичные измерения произвести для других значений R и L, соединяя клемму установки «L1» с клеммами «R2» и «R3», а затем «L2» с «R1», «R2», «R3». Используя формулу (7.16), определить логарифмический декремент затухания для каждого случая. Результаты представляют в виде графиков зависимости  $\Theta$  от R для двух значений L. На этих же графиках, используя формулу (7.17), строят теоретические кривые этой зависимости.

Для значений индуктивности L1 и L2 определить, используя формулу (7.18), значение  $R_{\text{кр}}$ , при котором колебательный разряд конденсатора переходит в апериодический. Для наблюдения такого вида разряда соединить клемму «L1» или «L2» с клеммой «R4».

При проведении вычислений использовать следующие значения элементов установки:

Ёмкость конденсатора C, Ф	Колебательный контур катушки с индуктивностью L, Гн	Резистор с сопротивлением Ом	A(t)	A(t+T)	Логарифмический декремент затухания колебаний $\Theta$ , практ.	Логарифмический декремент затухания колебаний $\Theta$ , теор.
$6,8 \cdot 10^{-9}$	$0,57 \cdot 10^{-2}$	170				
		300				
		500				
	$1,02 \cdot 10^{-2}$	170				
		300				
		500				

### Контрольные вопросы

1. Из чего состоит простейшая электрическая колебательная система?
2. Каковы причины затухания колебаний в колебательном контуре?
3. Что показывает логарифмический декремент затухания?
4. Что происходит, когда значение сопротивления контура становится равным критическим?
5. Запишите закон сохранения энергии в идеальном колебательном контуре. Какие физические величины совершают колебания в колебательном контуре?
6. Запишите закон сохранения энергии в реальном колебательном контуре. Какие физические величины совершают колебания в колебательном контуре?

### Лабораторная работа Э 8

#### ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

**Цель работы:** изучить явление резонанса в цепи переменного тока низкой частоты.

**Принадлежности:** блок питания, вольтметр, амперметр, ваттметр, катушка индуктивности, магазин электроемкостей, реостат, магазин сопротивлений МРС 55.

Явление резонанса, возникающее в колебательных системах при вынужденных колебаниях, как известно, заключается в резком увеличении амплитуды колебаний. Условием возникновения этого явления является совпадение значений собственной частоты колебательной системы и частоты изменения внешнего воздействия.

В цепи переменного тока, содержащей индуктивность  $L$ , емкость  $C$  и омическое сопротивление  $R$ , возможно создание условий, когда ток в цепи или резко возрастает или, наоборот, убывает. В этом случае говорят о наступлении электрического резонанса.

Различают два вида электрического резонанса: резонанс токов, когда ток становится минимальным, и резонанс напряжений, когда ток достигает максимального значения. Для наблюдения резонанса напряжений используется цепь, в которой  $L$ ,  $C$  и  $R$  соединяют последовательно, а для наблюдения резонанса токов – параллельно.

В данной работе изучается цепь из последовательно соединенных  $L$ ,  $C$  и  $R$ . Эта цепь представляет собой простейшую электрическую колебательную систему – колебательный контур. Если эту цепь подключить к сети переменного синусоидального тока, то можно говорить о наличии в данной

колебательной системе вынужденных колебаний. Синусоидальный ток  $I$  вызовет на активном сопротивлении падение напряжения  $U_R$ , фаза которого совпадает с фазой тока

$$U_R = I \cdot R,$$

где  $R$  – значение активного сопротивления

На векторной диаграмме (рис. 8.1) вектор, изображающий  $U_R$ , нужно отложить по оси тока. Падение напряжения на индуктивности  $U_L$  ( $U_L = \omega L I$ , где  $\omega L = X_L$  – индуктивное сопротивление) опережает ток по фазе на  $\pi/2$ , поэтому вектор, изображающий  $U_L$ , должен быть повернут относительно оси тока на угол  $\pi/2$  против часовой стрелки.

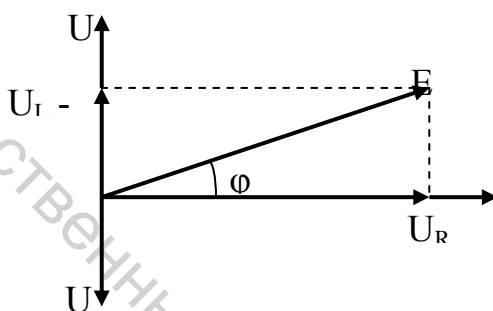


Рисунок 8.1 – Векторная диаграмма RCL цепи

Наконец, падение напряжения на емкости  $U_C$  ( $U_C = \frac{1}{\omega C} I$ , где  $\frac{1}{\omega C} = X_C$  – емкостное сопротивление) отстает от тока по фазе на  $\pi/2$ , следовательно вектор, изображающий  $U_C$ , должен быть повернут относительно оси тока на угол  $\pi/2$  по часовой стрелке.

В цепях постоянного тока ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжений на отдельных участках цепи. В случае переменного тока строят векторную диаграмму и величина синусоидальной ЭДС будет равна геометрической сумме падений напряжений.

Из векторной диаграммы видно, что  $E^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2$ , или

$$E = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{I^2 R^2 + (I \omega L - I \frac{1}{\omega C})^2} = I \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2},$$

откуда 
$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} = \frac{E}{Z},$$



где  $E$  – синусоидальная ЭДС, а  $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$  называют **полным сопротивлением цепи переменного тока**. Угол  $\varphi$  называют **сдвигом фаз между током и ЭДС**. Сдвиг фаз можно найти из соотношения

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Величина  $X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$  называется **реактивным сопротивлением цепи переменного тока**. В зависимости от соотношения между  $X_L$  и  $X_C$  ток может отставать от напряжения по фазе (при  $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ ,  $\varphi > 0$ ), или опережает его по фазе (при  $\omega L < \frac{1}{\omega C}$ ,  $\varphi < 0$ ). При определенных значениях  $\omega$ ,  $L$  и  $C$  может оказаться, что  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$  ( $\varphi = 0$ ). В этом случае изменение тока и напряжения происходит синфазно. Амплитудное значение тока будет наибольшим:  $I = \frac{E}{R}$ .

При этом может оказаться, что падение напряжения на индуктивном и емкостном сопротивлениях во много раз больше, чем значение внешней синусоидальной ЭДС. Но так как  $U_L$  и  $U_C$  колеблются в противоположных фазах, то в сумме они равны нулю. Это явление получило название **электрического резонанса напряжений**. Оно характерно тем, что полное сопротивление цепи оказывается частично активным и имеет наименьшую при данных параметрах цепи величину.

Из равенства индуктивного сопротивления емкостному можно найти значение резонансной частоты  $\omega_{\text{рез}} L = \frac{1}{\omega_{\text{рез}} C}$ , следовательно  $\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ .

Исходя из общего условия наступления резонанса частота внешней вынужденной силы должна совпадать с собственной частотой колебательной системы. В данном случае для наступления резонанса необходимо совпадение значения собственной частоты контура с частотой сети переменного тока. Выполнение условия электрического резонанса может быть достигнуто тремя способами:

- 1) изменением частоты переменного тока;
- 2) изменением электроемкости;

3) изменением индуктивности.

В данной работе условие резонанса достигается путем изменения емкости. Если при заданных значениях параметров  $L$ ,  $R$  и  $\omega$  изменять величину  $C$ , то, измеряя эффективное значение тока в цепи, можно получить зависимость  $I_{эф.} = f(C)$ . Графическое изображение этой зависимости называют **резонансной кривой**. Она имеет максимум при значении емкости  $C = \frac{1}{\omega_{рез}^2 L}$ .

Характер резонансной кривой при заданном значении синусоидальной ЭДС будет зависеть от значения активного сопротивления цепи, т. е.  $R$ . Чем больше значение  $R$ , тем менее выраженным будет явление резонанса, т. е. резонансная кривая будет иметь более пологий вид.

### Выполнение задания

1. Установить приборы на следующие пределы измерений: амперметр на 1А, ваттметр на 75В, 5А.
2. Собрать схему для снятия резонансной кривой (рис. 8.2).

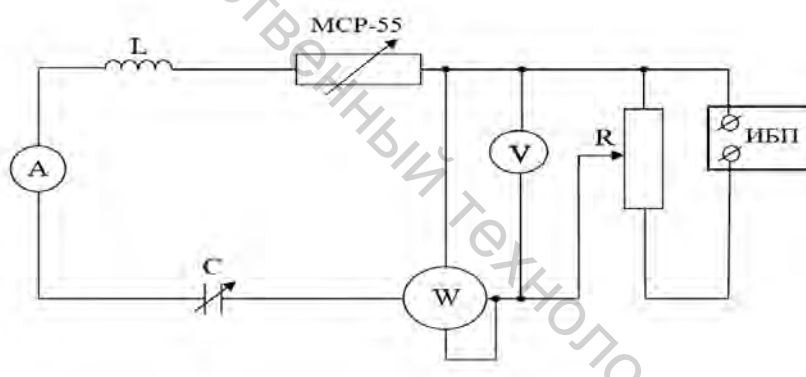


Рисунок 8.2 – Принципиальная схема для снятия резонансной кривой

3. Установить подвижный контакт реостата в крайнее положение, при котором все его сопротивление включено в цепь.

4. На магазине емкостей выбрать емкость наименьшей величины. Выбор осуществляется путем замыкания соответствующих контактов при вдвигании стержня.

5. Подключить установку к сети переменного тока.

6. При помощи реостата установить напряжение переменного тока, подаваемое на исследуемую цепь, значением 50 В.

7. Изменяя значение емкости на магазине емкостей от минимальной до максимальной, снимают показания амперметра и ваттметра. Полученные данные занести в таблицу.

R, Ом	U	C, Ф	I, А	U <sub>эф</sub> , В	W, Вт	cosφ
50	52,5	0,5·10 <sup>-6</sup>				
		1·10 <sup>-6</sup>				
		2·10 <sup>-6</sup>				
		4·10 <sup>-6</sup>				
		8·10 <sup>-6</sup>				
		16·10 <sup>-6</sup>				
		32·10 <sup>-6</sup>				
		38·10 <sup>-6</sup>				
100	52,5	0,5·10 <sup>-6</sup>				
		1·10 <sup>-6</sup>				
		2·10 <sup>-6</sup>				
		4·10 <sup>-6</sup>				
		8·10 <sup>-6</sup>				
		16·10 <sup>-6</sup>				
		32·10 <sup>-6</sup>				
		38·10 <sup>-6</sup>				

8. Уменьшить значение R наполовину путем установки подвижного контакта в среднее положение и повторить измерения, указанные в п. 7. При этом возможно потребуются перейти к большему пределу измерения на амперметре.

9. Построить резонансные кривые на основании полученных данных. Для этого по оси абсцисс откладывают значение емкости, а по оси ординат – величину эффективного тока.

10. Исходя из имеющихся данных, определить значение cosφ для каждого значения емкости и построить кривую, показывающую зависимость cosφ от емкости.

$$\cos \varphi = \frac{W}{I_{\text{эф}} U}$$

где  $W$  – значение мощности по показаниям ваттметра;  $U$  – напряжение переменного тока, подаваемого на исследуемую цепь ( $U = 120 \text{ В}$ ).

На каждом графике стоят две кривые, соответствующие двум значениям активного сопротивления, включенного в цепь.

### Контрольные вопросы

1. Какие существуют виды электрического резонанса? В каких схемах их можно наблюдать?
2. В чем состоит условие наступления резонанса напряжений? Каким путем может достигаться это условие?
3. При каком числовом значении собственной частоты колебательного контура наступает резонанс в данной работе?

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА

**Цель работы:** определение удельного сопротивления проводника.

**Принадлежности:** установка измерения сопротивления методом амперметра и вольтметра.

### Экспериментальная установка и методика измерений

Определение удельного сопротивления проводника осуществляется путем измерения активного сопротивления участка проводника по техническому методу (измерение тока и напряжения). Ток, текущий через сопротивление, и напряжение на нем можно измерить двумя способами.

#### 1. Прямое измерение тока (рисунок 9.1).

В этом случае показания вольтметра  $V$  соответствуют напряжению на общем сопротивлении  $R_{\text{общ.}}$ , состоящим из сопротивления участка проводника  $R$  и внутреннего сопротивления амперметра  $R_A$ .

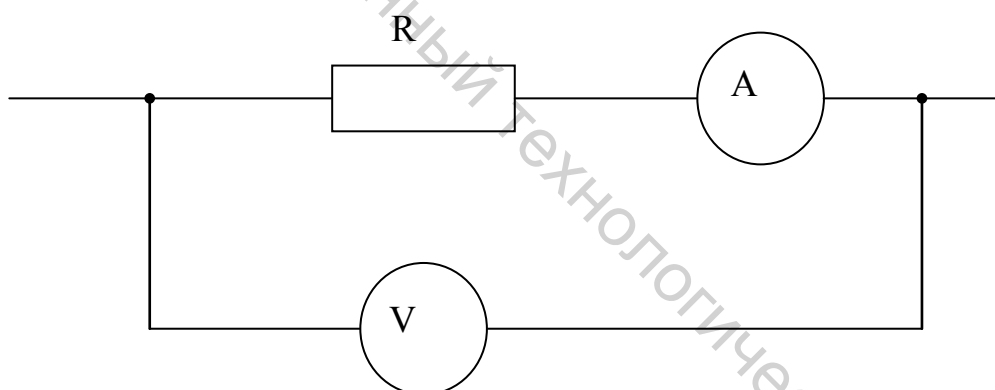


Рисунок 9.1 – Схема включения электроизмерительных приборов для прямого измерения тока

$$R_{\text{общ.}} = R + R_A \quad (9.1)$$

С другой стороны  $R_{\text{общ.}} = \frac{U}{I_A}$ , где  $I_A$  – показания амперметра. (9.2)

Тогда

$$R_{\text{общ.}} = \frac{U}{I_A} - R_A \quad (9.3)$$

## 2. Прямое измерение напряжения (рисунок 9.2).

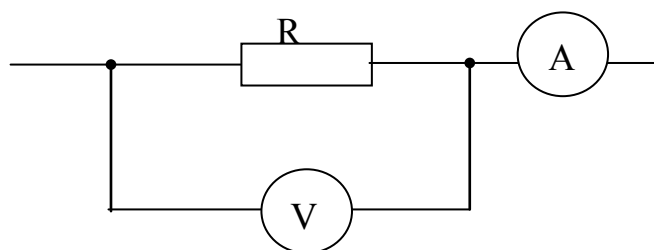


Рисунок 9.2 – Схема включения электроизмерительных приборов для прямого измерения напряжения

В этом случае показания амперметра  $I_A$  соответствуют току, текущему через сопротивление  $R$  и вольтметр  $I_U$ .

$$I_A = I_R + I_U \dots \quad (9.4)$$

или  $I_A = \frac{U}{R} + \frac{U}{R_U}$ , где  $R_U$  – внутренне сопротивление вольтметра. (9.5)

Отсюда  $R = \frac{R_U U}{I_A R_U - U}$ . (9.6)

Удельное сопротивление проводника  $\rho$  определяется из формулы

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где  $l$  – длина участка проводника;  $S$  – площадь поперечного сечения.

$$\rho = R \frac{S}{l}. \quad (9.7)$$

В установке для определения удельного сопротивления проводника (рис. 9.3) на стойке с метрической шкалой 1 при помощи кронштейнов закреплена проволока из хромникеля. Через контактный зажим на подвижном кронштейне 2 ток подается к измерительной части прибора.

На передней панели прибора находится кнопка включения прибора К-1 «Сеть». Нажатие кнопки К-1 вызывает свечение неоновой лампочки. Переключатель П-1 служит для соединения прибора с внешним мостом постоянного тока. Нажатый показатель П-1 позволит произвести измерение сопротивления проводника по техническому методу. Переключатель П-2 позволяет измерить сопротивление по схеме (рис. 9.1) (отжатый) или по схеме

(рис. 9.2) (нажатый). Ручка потенциометра Р позволяет регулировать величину подаваемого на проводник напряжения. Зажимы  $R_X$  служат для подключения внешнего моста постоянного тока.

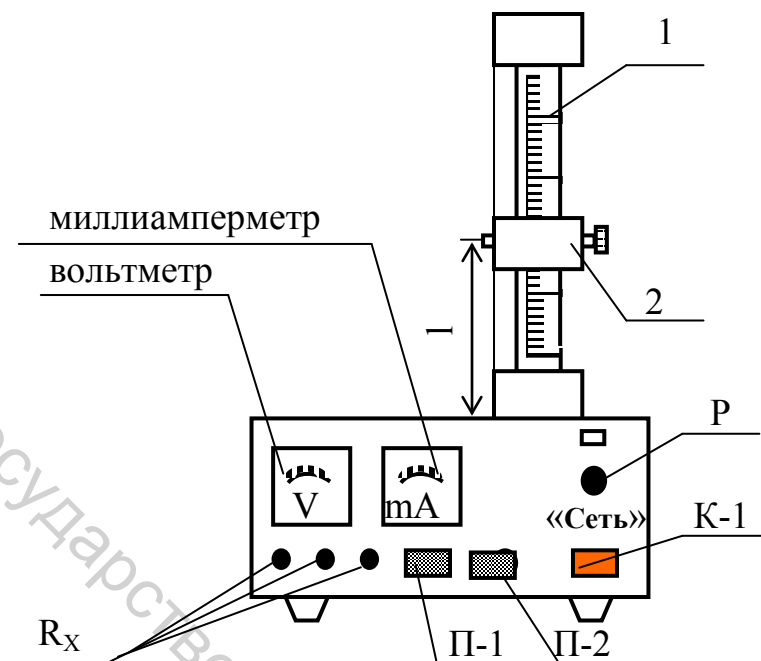


Рисунок 9.3 – Внешний вид установки для определения удельного сопротивления проводника

### Измерения и их обработка

1. Нажатием кнопки К-1 включить прибор.
2. Нажать переключатель П-1 (измерение по техническому методу).
3. Переключатель П-2 выбрать схему измерения напряжения и тока.  
«Отжатый» – схема рис. 9.1, расчетная формула (9.3).  
«Нажатый» – схема рис. 9.2, расчетная формула (9.6).
4. Подвижным кронштейном 2 задать определенную длину проводника  $l$  от основания (удобную для вычислений).

5. Вращением ручки потенциометра Р подают определенное напряжение на проводник и измеряют соответствующие ему ток и напряжение на участке проводника  $l$ .

6. В соответствии со схемой измерения по формулам (9.3) и (9.6) определить сопротивление участка проводника  $l$ . Внутреннее сопротивление миллиамперметра  $R_A = 0,15$  Ом. Внутреннее сопротивление вольтметра  $R_V = 2500$  Ом.

7. Определив длину участка проводника  $l$  и площадь поперечного сечения

$$S = \frac{\pi d^2}{4}, \text{ по формуле (9.7) вычисляют удельное сопротивление нихрома.}$$

8. Подобные измерения и вычисления произвести для различных напряжений и различных длин  $l$  (не менее 10).

9. По методике прямых измерений определить доверительный интервал для  $\rho$ . Записать окончательный результат.

### Контрольные вопросы

1. Можно ли одновременно измерить напряжение на сопротивлении и ток в нем?

2. Какие Вы знаете схемы включения измерительных приборов для измерения тока и напряжения на заданном сопротивлении?

### Лабораторная работа Э 10

### СЛОЖЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ

**Цель работы:** изучение процессов сложения колебаний одного и взаимно перпендикулярного направлений при помощи осциллографа.

**Принадлежности:** электронный осциллограф, два генератора синусоидальных колебаний.

#### Введение

1. Сложение нескольких колебаний одинакового направления удобно представлять при помощи **вектора амплитуды**. На оси  $X$  от точки  $O$  под углом  $\varphi_0$  отложим вектор длины  $a$ . Если вектор  $a$  вращать вокруг точки  $O$  с угловой скоростью  $\omega$ , то угол  $(\vec{a}, X)$  в любой момент времени будет  $\varphi = \omega t + \varphi_0$ . Проекция конца вектора будет перемещаться по оси  $X$  в пределах от  $-a$  до  $+a$ , причем координата этой проекции будет изменяться со временем по закону

$$x = a \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (10.1)$$

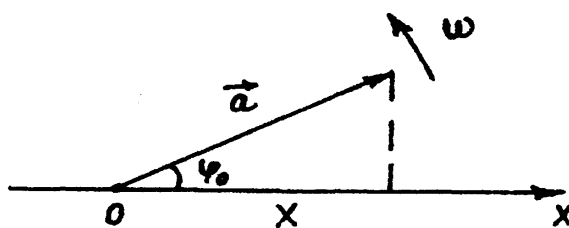


Рисунок 10.1 – Гармонические колебания вектора амплитуды

Следовательно, проекция конца вектора на ось будет совершать гармонические колебания с амплитудой, равной длине вектора  $\mathbf{a}$ , частотой  $\omega$ , фазой  $\varphi = \omega t + \varphi_0$ , где  $\varphi_0$  – начальная фаза.

Таким образом, гармоническое колебание может быть задано при помощи вращающегося вектора амплитуды.

Рассмотрим сложение двух гармонических колебаний одинакового направления и одинаковой частоты с амплитудой  $a_1$ ,  $a_2$  и начальными фазами  $\varphi_{01}$  и  $\varphi_{02}$ .

$$x_1 = a_1 \cos(\omega t + \varphi_{01}), \quad (10.2)$$

$$x_2 = a_2 \cos(\omega t + \varphi_{02}). \quad (10.3)$$

Так как колебания совершаются вдоль одной прямой, то и результирующее колебание будет происходить вдоль этой же прямой. Представим оба колебания с помощью векторов амплитуд  $\mathbf{a}_1$ ,  $\mathbf{a}_2$  (рис. 10.2).

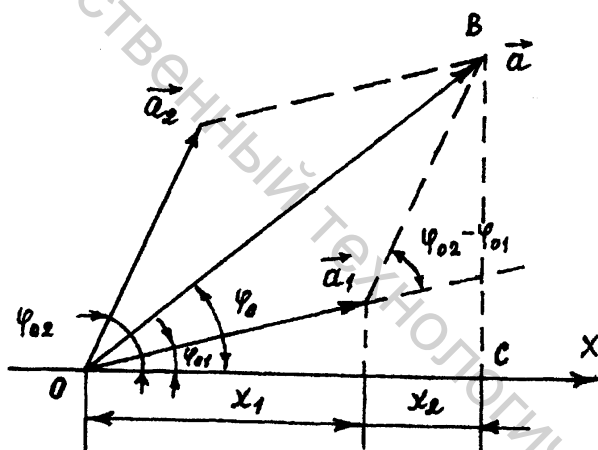


Рисунок 10.2 – Сложение гармонических колебаний с помощью векторов амплитуд

По правилу сложения векторов результирующий вектор  $\vec{a} = \vec{a}_1 + \vec{a}_2$ , причем он будет вращаться с той же угловой скоростью, что и векторы  $\vec{a}_1$  и  $\vec{a}_2$ . Проекция этого вектора на ось X (результирующее колебание) описывается уравнением

$$x = a \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (10.4)$$

где  $\varphi_0$  – начальная фаза результирующего колебания.

Из построения видно, что



$$a^2 = a_1^2 + a_2^2 - 2a_1a_2 \cos[\pi - (\varphi_2 - \varphi_1)], \quad (10.5)$$

где

$$\varphi_2 - \varphi_1 = (\omega t + \varphi_{02}) - (\omega t + \varphi_{01}) = \varphi_{02} - \varphi_{01}. \quad (10.6)$$

Тогда

$$a^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\varphi_{02} - \varphi_{01}). \quad (10.7)$$

Начальная фаза определится из соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{BC}{OC} = \frac{a_1 \sin \varphi_{01} + a_2 \sin \varphi_{02}}{a_1 \cos \varphi_{01} + a_2 \cos \varphi_{02}}. \quad (10.8)$$

Из выражения (10.7) следует, что амплитуда результирующего колебания  $a$  зависит от разности начальных фаз  $\varphi_{02} - \varphi_{01}$ . Если разность фаз обоих колебаний равна нулю или целому числу  $2\pi$ , то  $a = a_1 + a_2$ . Если разность фаз равна  $+\pi$  или  $-\pi$ , т. е. оба колебания находятся в противофазе, то амплитуда результирующего колебания равна  $|a_1 - a_2| = |a_2 - a_1|$ .

На рисунке 10.3 приведены графики зависимости смещения  $x$  от времени для складываемых и результирующих колебаний.

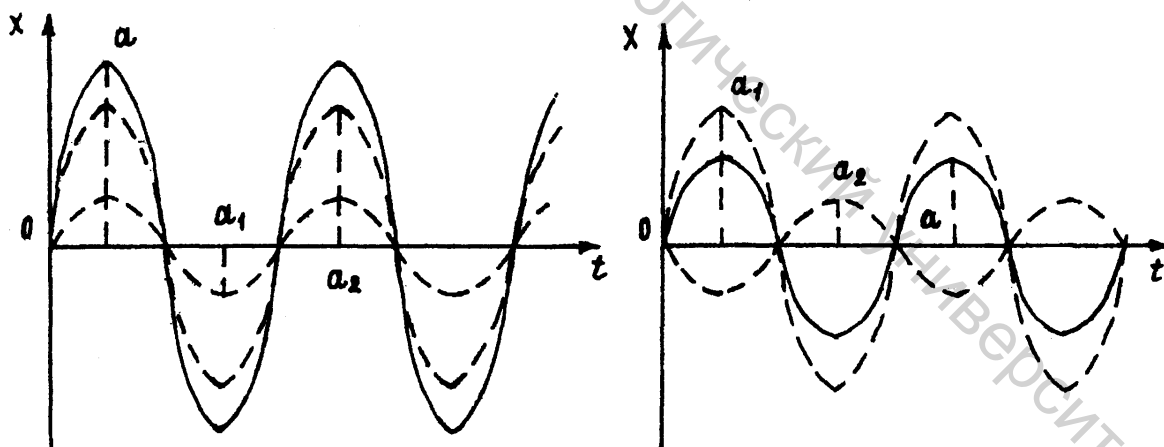


Рисунок 10.3 – Зависимости смещения  $x$  от  $t$  для складываемых и результирующих колебаний

Если частоты колебаний  $x_1$  и  $x_2$  неодинаковы, векторы будут вращаться с различной скоростью. В этом случае результирующий вектор  $\vec{a}$  пульсирует по величине и будет вращаться с непостоянной скоростью, в результате колебание будет негармоническим, а сложным колебательным процессом. Однако, если два складываемых гармонических колебания одинакового направления мало отличаются по частоте, то результирующее движение при этих условиях можно рассматривать как гармоническое колебание с пульсирующей амплитудой. Пусть  $\omega_2 = \omega_1 + \Delta\omega$ . Тогда соотношения (10.6) и (10.7) примут вид (10.9) и (10.10)

$$\varphi_2 - \varphi_1 = [(\omega_1 + \Delta\omega)t + \varphi_{02} - (\omega_1 t + \varphi_{01})] = [\Delta\omega t + (\varphi_{02} - \varphi_{01})] \quad (10.9)$$

$$a^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos[\Delta\omega t + (\varphi_{02} - \varphi_{01})] \quad (10.10)$$

Из (10.10) видно, что амплитуда таких колебаний меняется с течением времени с частотой  $\Delta\omega \ll \omega \approx \omega_1$ . Колебания, амплитуда которых периодически, но медленно по сравнению с периодом самих колебаний, изменяется с течением времени, называются **биениями**. В этом случае амплитуда меняется от  $a_1 + a_2$  до  $|a_1 - a_2|$ . В частном случае, если  $a_1 = a_2 = a_0$ , амплитуда меняется от  $2a$  до нуля.

На рисунке. 10.4 показана зависимость смещения  $X$  результирующего колебания и амплитуды  $a$  от времени  $t$ .

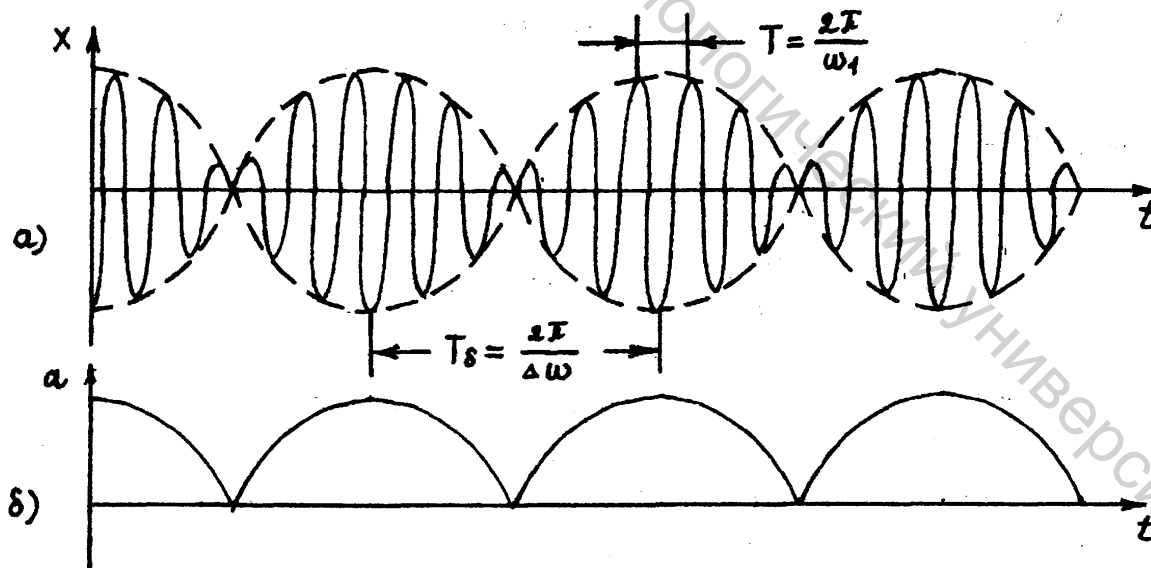


Рисунок.10.4 – Зависимость смещения  $x$  от результирующего колебания и амплитуды от времени  $t$

2. Пусть тело участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях одинаковой частоты  $\omega_x = \omega_y = \omega$ , совершающих вдоль осей X и Y.

$$x = a_1 \cos(\omega t + \varphi_{01}), \quad (10.11)$$

$$y = a_2 \cos(\omega t + \varphi_{02}). \quad (10.12)$$

Определим траекторию движения тела, для чего из (10.11) и (10.12) исключим время. Получим (10.11) и (10.12) в виде

$$\frac{x}{a_1} \cos \omega t \cos \varphi_{01} - \sin \omega t \sin \varphi_{01}, \quad (10.13)$$

$$\frac{y}{a_2} \cos \omega t \cos \varphi_{02} - \sin \omega t \sin \varphi_{02}. \quad (10.14)$$

Умножим (10.13) на  $\cos \varphi_{02}$ , а (10.14) на  $\cos \varphi_{01}$  и вычтем (10.14) из (10.13)

$$\frac{x}{a_1} \cos \varphi_{02} - \frac{y}{a_2} \cos \varphi_{01} = \sin \omega t \sin(\varphi_{02} - \varphi_{01}). \quad (10.15)$$

Умножим (10.13) на  $\sin \varphi_{02}$ , а (10.14) на  $\sin \varphi_{01}$  и вычтем (10.14) из (10.13)

$$\frac{x}{a_1} \sin \varphi_{02} - \frac{y}{a_2} \sin \varphi_{01} = \cos \omega t \sin(\varphi_{02} - \varphi_{01}). \quad (10.16)$$

Возведем (10.5) и (10.6) в квадрат и сложим

$$\frac{x^2}{a_1^2} + \frac{y^2}{a_2^2} - \frac{2xy}{a_1 a_2} \cos(\varphi_{02} - \varphi_{01}) = \sin^2(\varphi_{02} - \varphi_{01}). \quad (10.17)$$

Указание траектории результирующего движения (10.17) является уравнением эллипса, ориентацией осей которого зависит от разности фаз  $\varphi_{02} - \varphi_{01}$ .

Исследуем форму траектории в некоторых частных случаях.

1. Разность фаз равняется нулю, т. е.  $\varphi_{02} = \varphi_{01} = \varphi_0$ . В этом случае уравнение (10.17) принимает вид

$$\left( \frac{x}{a_1} - \frac{y}{a_2} \right)^2 = 0 \text{ или } y = \frac{a_2}{a_1} x. \quad (10.18)$$

Данное уравнение – уравнение прямой, проходящей через 1 и 3 четверти системы координат.

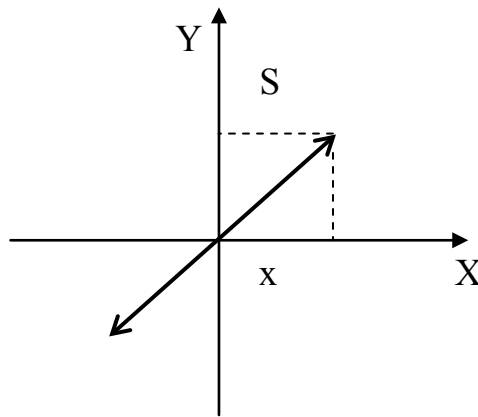


Рисунок 10.5 – Форма траектории колебаний при разности фаз, между складываемых сигналов

$$S = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{a_1^2 \cos^2(\omega t + \varphi_0) + a_2^2 \cos^2(\omega t + \varphi_0)} = \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (10.19)$$

т. е. результирующее движение является гармоническим колебанием вдоль прямой с частотой  $\omega$  и амплитудой  $\sqrt{a_1^2 + a_2^2}$ .

2. Разность фаз равна  $\pm\pi$ . Тогда уравнение (10.7) имеет вид

$$\frac{x^2}{a_1^2} + \frac{y^2}{a_2^2} = 0. \quad (10.20)$$

В этом случае результирующее движение представляет собой гармоническое колебание вдоль прямой, проходящей через 2 и 4 четверти координатной системы.

3. При  $j_{02} - j_{01} = \pm\frac{\pi}{2}$  уравнение (10.17) переходит в  $\frac{x^2}{a_1^2} + \frac{y^2}{a_2^2} = 1. \quad (10.21)$

Полученная кривая является эллипсом, оси которого совпадают с осями координат. При равенстве амплитуд  $a_1$  и  $a_2$  эллипс вырождается в окружность.

Случаи  $\varphi_{02} - \varphi_{01} = +\frac{\pi}{2}$  и  $\varphi_{02} - \varphi_{01} = -\frac{\pi}{2}$  соответствуют различным направлениям движения по эллипсу или окружности.

Если частоты складываемых колебаний не одинаковы, то траектория результирующего движения представляет собой сложную незамкнутую кривую, постепенно заполняющую весь экран осциллографа. Однако, если

частоты различны, но относятся как целые числа  $\frac{\omega_x}{\omega_y} = \frac{m}{n}$ , то сложные кривые повторяются через равные промежутки времени, образуя устойчивую картину **фигуры Лиссажу**. Вид фигур Лиссажу будет зависеть как от отношения целых чисел  $m$  и  $n$ , как и от разности фаз  $\varphi_{02} - \varphi_{01}$ .

## Выполнение работы

### 1. Сложение колебаний одного направления.

а) на вход «Y» электронного осциллографа поочередно подают складываемые сигналы одинаковой частоты  $\nu_1 = \nu_2$  от двух звуковых генераторов ЗГ. Наблюдают их синусоиды, измеряют амплитуды  $a_1$  и  $a_2$ . При помощи специального соединительного шнура подают одновременно на вход «Y» осциллографа эти сигналы. Наблюдают результирующее колебание, измеряют его амплитуду  $a$ . При помощи соотношения (10.7) определяют разность фаз  $\varphi_2 - \varphi_1 = \varphi_{02} - \varphi_{01}$  складываемых колебаний. Подобные наблюдения и измерения проводят для разных частот  $\nu_1 = \nu_2$  и различных амплитуд;

б) на вход «Y» осциллографа одновременно подаются сигналы равных частот и равных амплитуд. Плавно меняют частоту одного из генераторов и на экране осциллографа наблюдают картину биений. При этом равенство амплитуд складываемых колебаний является обязательным условием отчетливой осциллограммы биений.

Биения позволяют определить неизвестную частоту источника колебаний  $\nu_x$ . Для этого нужно получить биения два раза. Один раз при частоте звукового генератора (ЗГ)  $\nu$ , немного меньше, чем исследуемая частота  $\nu_x$ . В этом случае частота биений равна  $\nu'_\delta = \nu_\delta - \nu_1$ . Второй раз при частоте ЗГ  $\nu_2$  большей частоты  $\nu_x$  и притом такой, чтобы частота биений  $\nu''_\delta = \nu_2 - \nu_\delta$  совпала с частотой  $\nu'_\delta$ . Если частоты биений равны, то равны и периоды пульсаций амплитуды, что легко установить, сравнивая осциллограммы. В этом случае

$$\nu_\delta = \frac{\nu_1 + \nu_2}{2}.$$

Эксперимент по определению частоты  $\nu_x$  проделать для трех различных значений частот  $\nu_\delta$ . Найти среднее значений  $\nu_x$ , оценить ошибку измерений.

### 2. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний.

Звуковые сигналы от генератора подают на вход «X» «Y» осциллографа и наблюдают фигуры Лиссажу. Частоты устанавливают такими, чтобы их отношения

$$\frac{v_X}{v_Y} = \frac{n_X}{n_Y}, \quad (10.22)$$

где  $n_X$  и  $n_Y$  – соответственно, число точек пересечения фигуры с осью X и Y.

В случае, когда ось проходит через точку пересечения ветвей кривой, ее считают как две точки. По различным фигурам Лиссажу, с помощью соотношения (10.22), определяют известную частоту  $v_X$ . Зарисовывают фигуры, по которым определялась частота.

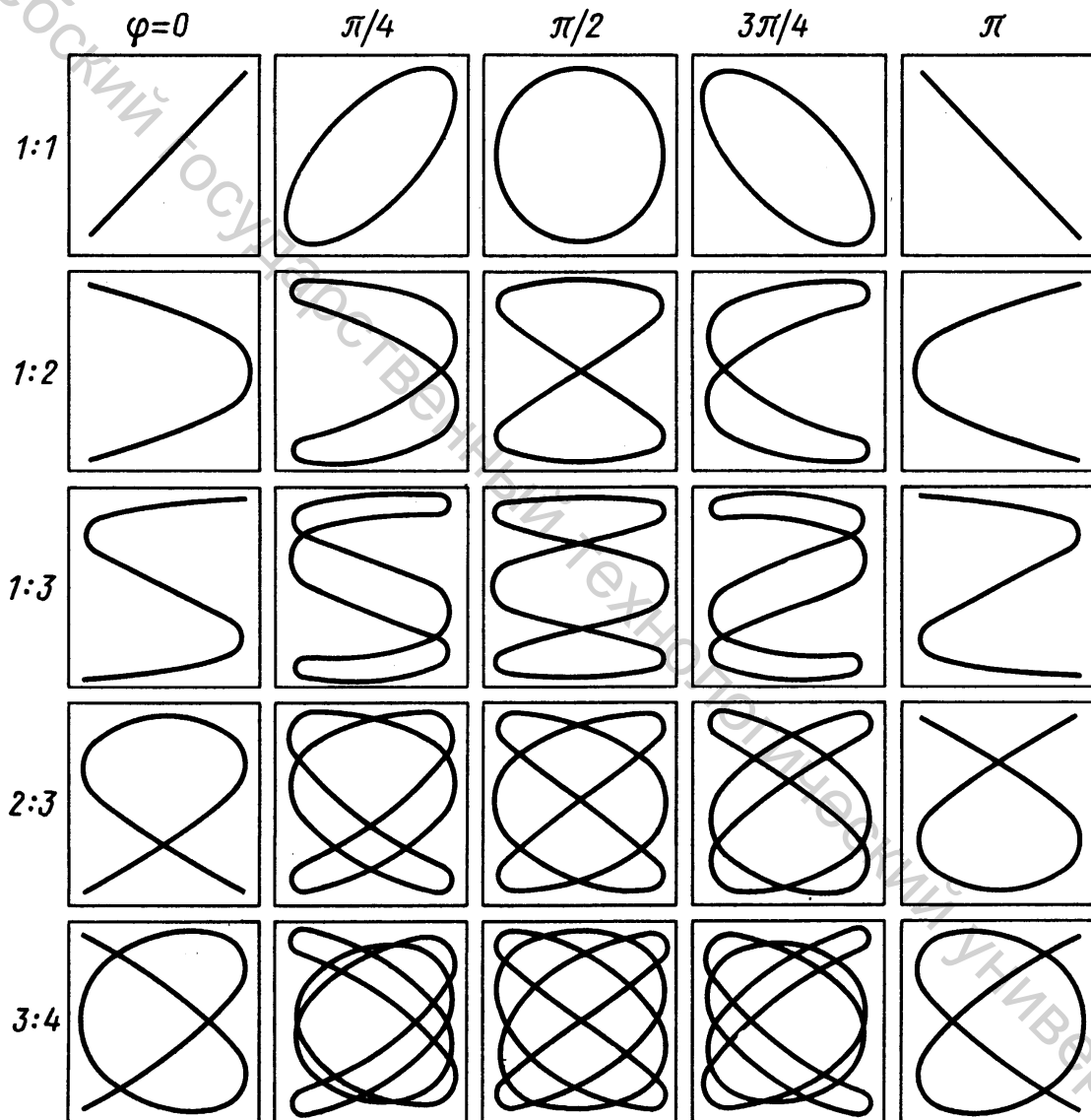


Рисунок 10.6 – Фигуры Лиссажу

Сравнить частоту  $v_X$ , определенную по фигурам Лиссажу, со значением частоты, определенной по биениям. Оценить ошибку измерений.

### Контрольные вопросы

1. Как задается гармоническое колебание при помощи вращающегося вектора амплитуды?
2. Какое условие возникновения гармонических колебаний при сложении одинаково направленных колебаний?
3. Что называется биениями и когда они возникают? Изобразить графические биения.
4. По какой траектории движения точка при сложении взаимно перпендикулярных колебаний одинаковой частоты? Записать уравнение траектории движения.
5. При каких условиях результирующее движение происходит по эллипсу, окружности, прямой?
6. Когда возникают фигуры Лиссажу?
7. Как определить неизвестную частоту при помощи биений?
8. Как определить неизвестную частоту по фигурам Лиссажу?

## Литература

1. Детлаф, А. А. Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Высш. школа, 1989. – 608 с.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики / И. В. Савельев. Т. 2. – Москва : Наука, 1982. – 496 с.
3. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – Москва : Высш. школа, 1990. – 478 с.
4. Осциллограф универсальный С1-73. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. И22.044.067 ТО. – 1989.
5. Уродов, В. И. Практикум по электричеству и магнетизму / В. И. Уродов, М. М. Зубарева, В. С. Стрижнев. – Минск, 1969. – 114 с.
6. Уродов, В. И. Практикум по физике твердого тела, осциллографированию и атомной физике / В. И. Уродов, Э. В. Кондрацкий, Е. С. Лашков. – Минск, 1969. – 122 с.
7. Уродов, В. И. Практикум по физике / В. И. Уродов, В. С. Стрижнев. – Минск, 1973. – 382 с.



## Содержание

Лабораторная работа Э 1 Изучение электроизмерительных приборов	3
Лабораторная работа Э 2 Измерение сопротивления при помощи моста Уитстона	14
Лабораторная работа Э 3 Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли	19
Лабораторная работа Э 4 Изучение магнитных свойств вещества	24
Лабораторная работа Э 5 Изучение электронного осциллографа	32
Лабораторная работа Э 6 Определение удельного заряда электрона	43
Лабораторная работа Э 7 Исследование затухающих колебаний	49
Лабораторная работа Э 8 Изучение явления резонанса напряжения низкой частоты	55
Лабораторная работа Э 9 Определение удельного сопротивления проводника	60
Лабораторная работа Э 10 Сложение колебаний	63
Литература	72
Содержание	73
Приложение А	74

## Приложение А

Таблица А.1 – Основные физические постоянные

Гравитационная постоянная	$G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Число Авогадро $N_A$	$N_A = 6,02205 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярный объем идеального газа при нормальных условиях	$V_0 = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{моль}$
Универсальная газовая постоянная $R$	$R = 8,3144 \text{ Дж} / (\text{моль} \cdot \text{К})$
Постоянная Больцмана	$k = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} / \text{К}$
Число Фарадея	$F = 9,6485 \cdot 10^4 \text{ Кл} / \text{моль}$
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Постоянная Планка $h$	$h = 6,6262 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Заряд электрона $e$	$e = 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5,4858 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,007276 \text{ а.е.м.}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,67495 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,008665 \text{ а.е.м.}$
Скорость света в вакууме	$c = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ м} / \text{с}$

Таблица А.2 – Диэлектрическая проницаемость диэлектриков

Воск	7,8	Парафин	2	Эбонит	2,6
Вода	81	Слюда	6	Парафинированная бумага	2
Керосин	2	Стекло	6		
Масло	5	Фарфор	6		

Таблица А.3 – Удельное сопротивление проводников при  $0^\circ \text{С}$ ,  $10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Алюминий	2,53	Нихром	100
Графит	3,9	Ртуть	94
Железо	8,7	Свинец	22
Медь	1,7	Сталь	10

Таблица А.4 – Подвижности ионов в электролитах,  $10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$

	6,4	$\text{Cl}^-$	6,8
$\text{H}^+$	32,6	$\text{Ag}^+$	5,6
$\text{K}^+$	6,7		

$\text{NO}_3^-$

Таблица А.5 – Работа выхода электронов из металла, эВ

W	4,5	Ag	4,74
W+Cs	1,6	Li	2,4
W+Th	2,63	Na	2,3
Pt+Cs	1,40	K	2,0
Pt	5,3	Cs	1,9

Греческий алфавит

Обозначения букв	Название букв	Обозначения букв	Название букв
A, $\alpha$	альфа	N, $\nu$	ню
B, $\beta$	бета	E, $\xi$	кси
G, $\gamma$	гамма	O, $\omicron$	омикрон
D, $\delta$	дэльта	P, $\pi$	пи
E, $\epsilon$	эпсилон	P, $\rho$	ро
Z, $\zeta$	дзета	$\Sigma$ , $\sigma$	сигма
H, $\eta$	эта	T, $\tau$	тау
Theta, $\theta$	тэта	Y, $\upsilon$	ипсилон
I, $\iota$	йота	Phi, $\phi$	фи
K, $\kappa$	каппа	X, $\chi$	хи
L, $\lambda$	ламбда	Psi, $\psi$	пси
M, $\mu$	ми	Omega, $\omega$	омега

Учебное издание

## ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Лабораторный практикум по курсу «Физика»

Составители:

Рубаник Василий Васильевич,  
Рубаник Василий Васильевич (мл.),  
Шилин Александр Дмитриевич,  
Лаппо Наталья Михайловна

Редактор *Н.В. Медведева*  
Корректор *Т.А. Осипова*  
Компьютерная верстка *И.Л. Кудина*

---

Подписано к печати 18.09.17 Формат 60x90 1/16 Усл. печ. листов 4.75.  
Уч.-изд. листов 4.5 Тираж 75 экз. Заказ № 287.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»  
210035, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет»

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.