

Введение

*"- Что такое электричество? - спросил профессор.
- Я знал, но забыл! - ответил студент.
- Какая потеря, - воскликнул профессор. -
Один человек во всем мире знал, и тот забыл!"
Старый анекдот*

Теоретические знания, получаемые студентами не должны существовать сами по себе, а максимально полно должны быть использованы в его практической деятельности. Количество информации стало столь огромным, что ее необходимо упорядочить. Развернутое и систематическое применение в процессе обучения обобщенных методов, общеметодологических принципов, общих понятий и т.д. позволяет реализовать поставленную задачу.

Лабораторный практикум – это такая форма занятий, которая базируется практически только на самостоятельной работе студентов. Поэтому данные рекомендации призваны помочь студенту организовать свою работу. В них четко формулируется цель работы, краткая теория, содержание экспериментальных заданий, список литературы для самостоятельного изучения, вопросы к допуску и контрольные вопросы.

Лабораторные работы способствуют формированию исследовательских навыков, навыков работы с приборами, умению обрабатывать полученные результаты. Работы группируются так, чтобы в процессе их выполнения рассмотреть целый раздел курса физики, изучить данное явление с разных сторон.

Для проверки усвоения знаний в приложении приводятся условия задач по темам лабораторных работ.

Лабораторная работа №0

Электроизмерительные приборы

Цель работы: изучение электроизмерительных приборов и их основных характеристик.

Для контроля режима электрических цепей приходится измерять ряд физических величин: ток, напряжение, мощность и т.д. В цепях переменного тока измеряют также частоту, сдвиг по фазе.

Измерение – это нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Технические средства, которые служат для измерения электрических величин, называются электроизмерительными приборами.

От измерительных приборов, применяемых в электрических цепях, требуется, чтобы они не вносили заметных искажений в режим цепи. Поэтому электроизмерительные приборы должны потреблять минимальную мощность и не оказывать существенного влияния на сопротивление цепи.

Характеристики электроизмерительных приборов

Полученное из опыта значение измеряемой величины может отличаться от ее действительного значения. Разность между показаниями прибора X и истинным значением измеряемой величины X_0 называется абсолютной погрешностью измерительного прибора:

$$\Delta = X - X_0.$$

Относительная погрешность измерения ε определяется обычно в процентах к истинному значению X_0 , но так как отклонения X от X_0 сравнительно малы, то можно считать, что

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{X_0} \cdot 100\% \approx \frac{\Delta}{X} \cdot 100\%$$

Поскольку величина X при измерении может принимать любые значения в пределах от 0 до X_N , где X_N – верхний предел диапазона измерения прибора (номинальное значение), то оценить качество прибора по значению абсолютной или относительной погрешности невозможно. Поэтому было введено понятие приведенной погрешности

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N}$$

Значение приведенной погрешности, выраженное в процентах

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} \cdot 100\%,$$

Определяет класс точности прибора. По степени точности даваемых показаний электроизмерительные приборы делятся на классы, обозна-

чаемые соответственно числами: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 и 4,0, определяющими максимальную погрешность прибора в процентах при полном отклонении указателя.

Чувствительностью прибора называется отношение перемещения стрелки к измеряемой величине: $S = \frac{n}{X}$, где n - отклонение стрелки в делениях. Обратная величина $C = \frac{1}{S} = \frac{X}{n}$ называется ценой деления.

Цену деления также можно рассчитать по формуле $C = \frac{X_n}{n}$, где X_n - предел измерения (номинал), n - число делений шкалы, соответствующее измеренной величине.

Постоянный и переменный электрический ток

Электрическим током называется упорядоченное движение электрических зарядов, а сами заряды – носителями тока.

Например, в металлах носителями тока являются электроны, в электролитах – положительные и отрицательные ионы. За направление электрического тока условно принято направление движения положительных зарядов.

Сила тока I (А) – скалярная величина, численно равная заряду, прошедшему через поперечное сечение проводника за единицу времени.

Напряжение U (В) (или разность потенциалов, падение потенциалов) – скалярная величина, равная работе электрического поля по перемещению пробного электрического заряда.

Сопротивление R (Ом) – скалярная величина, характеризующая противодействие проводника направленному движению зарядов, т.е. электрическому току.

Если плотность и сила тока не меняются со временем, то говорят, что в проводнике течет стационарный или постоянный ток. В этом случае сила тока одинакова во всех сечениях проводника. Если сила тока не остается постоянной, то мы говорим об изменяющемся токе. Частным случаем изменяющегося тока является переменный синусоидальный ток, который называют просто переменным током.

В принципе переменным током можно назвать всякий ток, который с течением времени изменяет свою величину, но в технике переменным током называют такой ток, который периодически изменяет и величину и направление. Причем среднее значение силы такого тока за период T равно нулю. Периодическим переменный ток называется потому, что через равные промежутки времени, кратные T , характеризующие его физические величины принимают одинаковые значения.

В электротехнике наибольшее распространение получил синусоидальный переменный ток, т.е. ток, величина которого изменяется по закону синуса (или косинуса).

Для описания характеристик переменного тока необходимо избрать определенные физические величины. Мгновенные (значение в данный момент времени) и амплитудные (максимальные значения) величины для этих целей неудобны. Поэтому вводят понятия действующих (или эффективных) значений тока и напряжения, которые в $\sqrt{2}$ раз меньше мгновенных. Электроизмерительные приборы переменного тока проградуированы в действующих значениях измеряемых величин.

Электроизмерительные приборы

Электроизмерительные приборы классифицируются по ряду признаков:

1. По виду измеряемой величины, например, амперметр – А, вольтметр – V, ваттметр – W и т.д. К условной букве наименования прибора может быть добавлено обозначение кратности основной единицы: миллиампер – mA, киловольт – kV, мегаватт – MW и т.д.
2. По физическому принципу действия измерительного механизма прибора (табл. 1).
3. По роду измеряемого тока (табл. 2). На приборах переменного тока указывают номинальное значение частоты, или диапазона частот, на которые они рассчитаны, например, 120 Гц; 45-550 Гц. Если на приборе не указан диапазон рабочих частот, значит, он предназначен для работы в установках с частотой 50 Гц.
4. По классу точности

Приборы, показания которых являются непрерывными функциями измеряемых величин, называют аналоговыми (в них отсчет значения измеряемой величины производится по шкале). Измерительные приборы, автоматически вырабатывающие дискретные сигналы измерительной информации и дающие показания в цифровой форме, называют цифровыми.

На шкале электроизмерительного прибора отмечают: измеряемая им физическая величина, класс точности прибора, род тока, рабочее положение (вертикальное или горизонтальное), сопротивление изоляции прибора, внутренне сопротивление прибора.

Приборы магнитоэлектрической системы

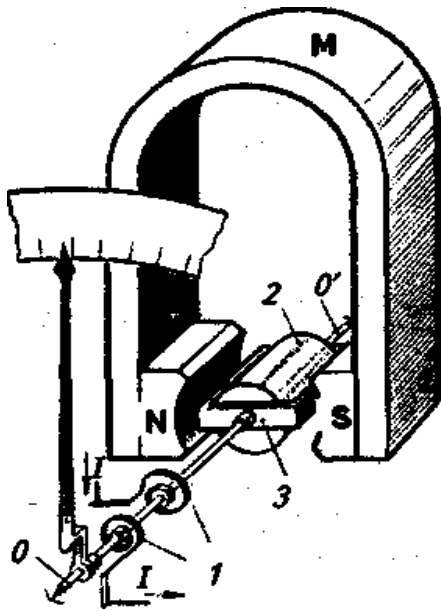


Рис. 1

Принцип действия приборов магнитоэлектрической системы основан на взаимодействии рамки с током 3 с магнитным полем постоянного магнита М (рис. 1). Полусные наконечники служат для создания однородного магнитного поля, в котором может поворачиваться легкий стальной цилиндр 2 вместе с легкой алюминиевой рамкой, которая содержит обмотку. Измеряемый ток проходит в рамку через пружины 1, которые одновременно служат для создания противодействующего момента. При протекании тока через рамку возникают силы, создающие вращательный момент, который по мере поворота рамки уравнивается механическим противодействующим моментом, создаваемым пружинами.

Угол поворота стрелки магнитоэлектрического прибора пропорционален току в рамке $\alpha = kI$ (где k – постоянная данного прибора по току, называемая чувствительностью) и шкала такого прибора равномерна.

Магнитоэлектрические приборы пригодны только для измерения в цепях постоянного тока. При включении их в цепь переменного тока применяют преобразовательные устройства (например, выпрямители).

Магнитоэлектрические приборы обладают высокой точностью и чувствительностью, равномерной шкалой, малым потреблением энергии. Недостатком таких приборов является пригодность только для измерения постоянных токов, большая чувствительность к перегрузкам, сложность конструкции и высокая стоимость.

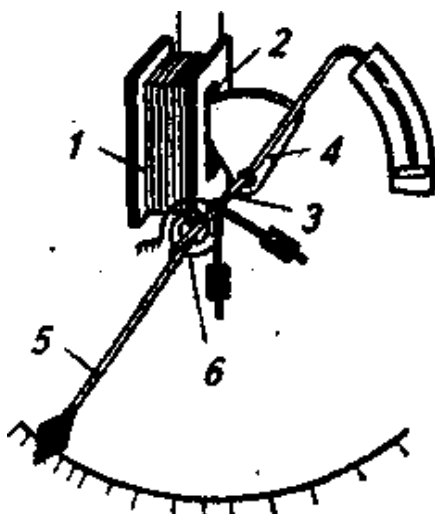


Рис. 2

Приборы электромагнитной системы

Принцип действия приборов электромагнитной системы основан на взаимодействии магнитного поля катушки, создаваемого измеряемым током, со стальным сердечником, помещенным в

это поле (рис. 2). При протекании измеряемого тока через катушку 1 в ее плоской щели 2 создается магнитное поле. Вне катушки установлена ось 3 с эксцентрично укрепленным сердечником 4 из магнитомягкой (с большой магнитной проницаемостью) стали и стрелкой 5. Магнитное поле катушки намагничивает сердечник и втягивает его внутрь, поворачивая тем самым ось со стрелкой прибора. Этому повороту препятствует закручивающаяся спиральная пружина 6, создающая противодействующий момент. У приборов электромагнитной системы угол отклонения стрелки пропорционален квадрату тока: $\alpha = cI^2$, где c - постоянная для данного прибора величина. Поэтому шкала электромагнитного прибора неравномерна. У таких приборов, начиная с 20% от верхнего предела, шкала почти равномерна. При меньших значениях измеряемой величины электромагнитные приборы недостаточно чувствительны и начальная часть шкалы считается нерабочей.

Направление отклонения стрелки прибора не зависит от направления тока в катушке, т.к. при изменении направления тока одновременно изменяется направление вектора магнитной индукции внутри катушки и в сердечнике, а характер их взаимодействия остается прежним. Следовательно, эти приборы пригодны для измерения в цепях постоянного и переменного тока. В цепи переменного тока они измеряют действующее значение.

Достоинствами электромагнитных приборов являются простота конструкции, невысокая стоимость, пригодность для постоянного и переменного тока, способность выдерживать большие перегрузки. Их недостатки: неравномерность шкалы, низкая чувствительность, сравнительно большое собственное потребление энергии, чувствительность к влиянию внешних магнитных полей.

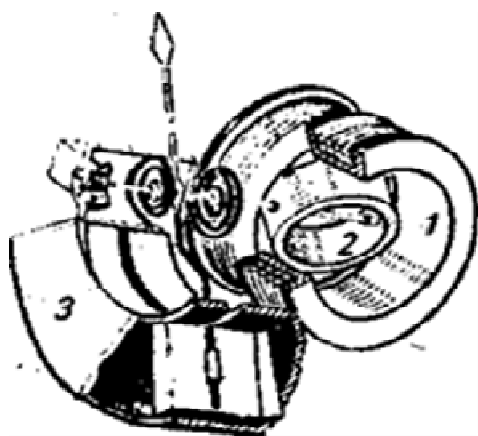


Рис. 3

Приборы электродинамической системы

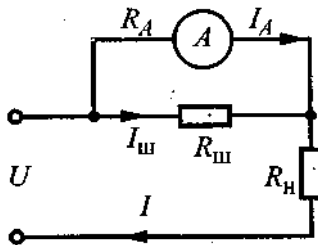
Принцип действия приборов электродинамической системы основан на взаимодействии двух катушек с током (рис. 3). Неподвижная катушка 1 создает однородное магнитное поле. Внутри нее помещается легкая подвижная катушка 2, жестко скрепленная с осью и стрелкой. Подвижная катушка включается в измеряемую цепь через спиральные пружины, создающие противодействующий момент.

Прибор также содержит воздушный успокоитель 3. При прохождении тока по катушкам создаются два магнитных поля. Они стремятся повернуть катушку в положение, в котором энергия всего механизма была бы минимальной. Угол отклонения стрелки приборов электродинамической системы пропорционален произведению токов в катушках: $\alpha = kI_1I_2$, где k – постоянная данного прибора. Приборы электродинамической системы можно использовать и для переменного тока, т.к. направления тока в обоих катушках изменяются на противоположные одновременно, и поэтому направление поворота подвижной катушки остается неизменным. Приборы электродинамической системы используются как амперметры, вольтметры и ваттметры.

К достоинствам приборов электродинамической системы относятся большая точность и пригодность для измерения в цепях постоянного и переменного тока. Недостатками являются неравномерная шкала, и зависимость от внешних магнитных полей.

Измерение токов и напряжений

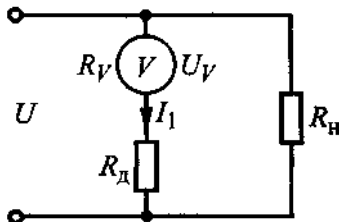
Для измерения любой ветви тока электрической цепи амперметр включают последовательно с элементами цепи. Для уменьшения погрешности нужно, чтобы сопротивление амперметра было меньше, чем сопротивление элемента цепи, в которой измеряется ток.



Для измерения напряжения вольтметр включают параллельно элементу, напряжение на котором нужно определить. Для уменьшения погрешности нужно, чтобы сопротивление вольтметра было больше, чем сопротивление элемента цепи, на котором измеряется напряжение.

Для расширения пределов измерения амперметра используют шунты, подключаемые параллельно с амперметром. Сопротивление шунта, обеспечивающее расширение пределов измерения равно:

$$R_{ш} = \frac{R_A}{n - 1}, \text{ где } n = \frac{I}{I_A} - \text{коэффициент расширения.}$$



Для расширения пределов измерения вольтметра используют дополнительные (или добавочные) сопротивления, которые включаются последовательно с обмоткой вольтметра. Величина добавочного сопротивления, обеспечивающая расширение пределов измерения равна:

$R_д = R_V(m - 1)$, где $m = \frac{U}{U_V}$ - коэффициент расширения.

Цифровые приборы

Цифровой электроизмерительный прибор – это такой прибор, в котором значение измеряемой величины представлено в виде цифр. Показания цифровых приборов легче читать, и они обеспечивают большую точность, чем аналоговые. Однако, аналоговые приборы обеспечивают возможность проследить за быстрыми изменениями тока и напряжения. Цифровые приборы применяются для измерения практически всех физических величин.

Принцип действия цифровых измерительных приборов основан на автоматическом преобразовании непрерывной (аналоговой) измеряемой величины в дискретные сигналы в виде кода, в соответствии с которым ее значения отображается на дисплее в цифровой форме. Представление аналогового сигнала в виде дискретного кода очень удобно, т.к. в таком виде аналоговые сигналы могут вводиться в ЭВМ.

Большинство цифровых электроизмерительных приборов состоит из следующих частей: измерительная цепь (выполняющая необходимые аналоговые преобразования измеряемой величины), аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и дешифратор (преобразующий кодированный сигнал для передачи на дисплей).

Практическое задание

Заполнить таблицу, выбрав несколько электроизмерительных приборов (число строк в таблице должно равняться количеству пределов измерения прибора)

Тип (название)	Система	Пределы измерения	Цена деления	Внутреннее сопротивление	Класс точности

Вопросы для отчета:

1. Характеристики электроизмерительных приборов.
2. Чем отличаются постоянный и переменный электрический ток. Его характеристики.
3. Классификация приборов.
4. Опишите приборы МЭС, ЭМС, ЭДС.
5. Измерение токов, напряжений и сопротивлений.
6. Что называется шунт и добавочным сопротивлением.
7. Цифровые приборы. Принцип работы с мультиметром.

Таблица 1. Условные обозначения, указывающие принцип действия измерительного прибора

Тип прибора	Условное обозначение
Магнитоэлектрический с подвижной рамкой	
Магнитоэлектрический логометр с подвижными рамками	
Магнитоэлектрический с подвижным магнитом	
Электромагнитный	
Электромагнитный логометр	
Электродинамический	
Электродинамический логометр	
Ферродинамический	
Ферродинамический логометр	
Индукционный	
Электростатический	
Вибрационный (язычковый)	
Термоэлектрический	
Термоэлектрический с магнитоэлектрическим измерительным механизмом	
Выпрямительный с магнитоэлектрическим измерительным механизмом	

Таблица 2. Условные обозначения, указывающие род тока для которого предназначен прибор

Род тока	Условное обозначение
Постоянный	
Переменный (однофазная система)	
Постоянный и переменный	
Трёхфазная система (общее обозначение)	
Трёхфазная система (при несимметричной нагрузке фаз)	

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Лабораторная работа № 1.1

Изучение работы электронного осциллографа

Цель работы: изучить устройство осциллографа, научиться, используя фигуры Лиссажу сравнивать частоты двух колебаний.

Приборы и материалы: осциллограф, звуковой генератор.

Краткая теория вопроса

Электронный осциллограф является электронно-лучевым прибором, позволяющим наблюдать и фотографировать кратковременные процессы длительностью порядка 10^{-10} – 10^{-9} секунд. Катодный луч, выполняющий роль пишущего инструмента осциллографа практически безынерционен и может своими колебаниями повторить миллионы измерений приложенного поля в секунду, поэтому легко удается наблюдать и фотографировать самые быстрые изменения электрических и магнитных полей.

Осциллограф в основном применяется для следующих целей:

1. Для исследования напряжения и тока быстропеременных процессов в зависимости от времени.
2. Для сравнения фаз двух токов или напряжений.
3. Для определения частот колебаний, изменения малых промежутков времени.
4. Для сравнения амплитуды двух напряжений или токов.

Катодные осциллографы основаны на применении, так называемых, электронно-лучевых трубок (ЭЛТ). ЭЛТ позволяет получить узкий, сфокусированный пучок электронов. По принципу фокусировки и отклонения ЭЛТ бывают *электростатические* и *магнитные*. В трубках первого типа для фокусировки и отклонения луча используется электрическое поле, в трубках второго типа - магнитное поле.

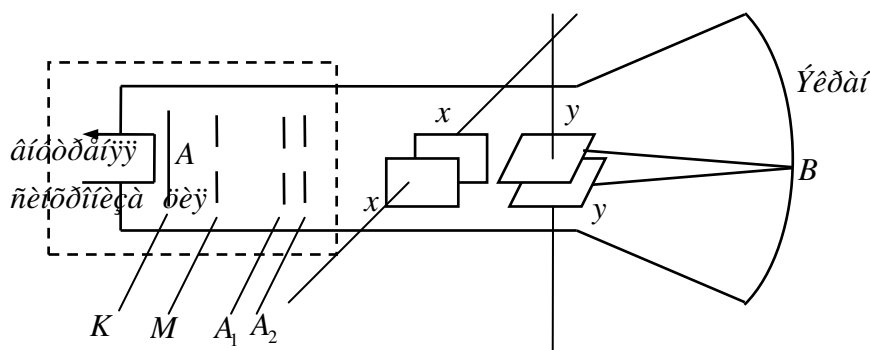


Рис. 1

На рис. 1 показано схематическое устройство ЭЛТ электростатического типа. Она состоит из электронной пушки (выделена пунктиром), отклоняющих пластин, расположенных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, флуоресцирующего экрана.

Электронной пушкой называется часть пушки, дающая и формирующая пучок электронов. В эту часть трубки вмонтированы:

- а) катод косвенного накала K , являющийся источником электронов;
- б) управляющий электрод (модулятор M), регулирующий количество вылетающих в единицу времени электронов, т.е. яркость пятна на экране;
- в) первый анод A_1 (фокусирующий) и второй анод A_2 (ускоряющий).

Напряжение, приложенное к первому и второму аноду, ускоряет электроны и концентрирует их в узкий пучок. Поле между катодом, фокусирующим цилиндром, и первым анодом образует объективную электронную линзу, окулярная электронная линза образуется полем первого и второго анодов.

Поверхность катода покрывается оксидом для повышения эмиссии и подогревается нитью накала. Большинство эмитируемых электронов с катода направляются вдоль оси трубки электрическим полем между катодом и фокусирующим цилиндром. Под действием этого поля электроны сходятся в точку A . После точки A электроны расходятся, т.к. напряженность поля внутри первого анода близка к нулю. В области между первым и вторым анодом поле снова исправляет траекторию электронов, приближая их к оси трубки. Траектория электронов после прохождения поля между первым и вторым анодом более полого и фокусируется в точку B . Если эта точка находится на поверхности экрана, то пучок называется *сфокусированным*.

Экран трубки представляет собой флуоресцирующее вещество (виллимит, вольфрамкилий Са, фосфористый сульфит цинка). Точка экрана, на которую попадают электроны, светится. В зависимости от

состава экрана пятно может быть белого, зеленого или синего цвета. Испускание света после удара длится в течение долей секунды.

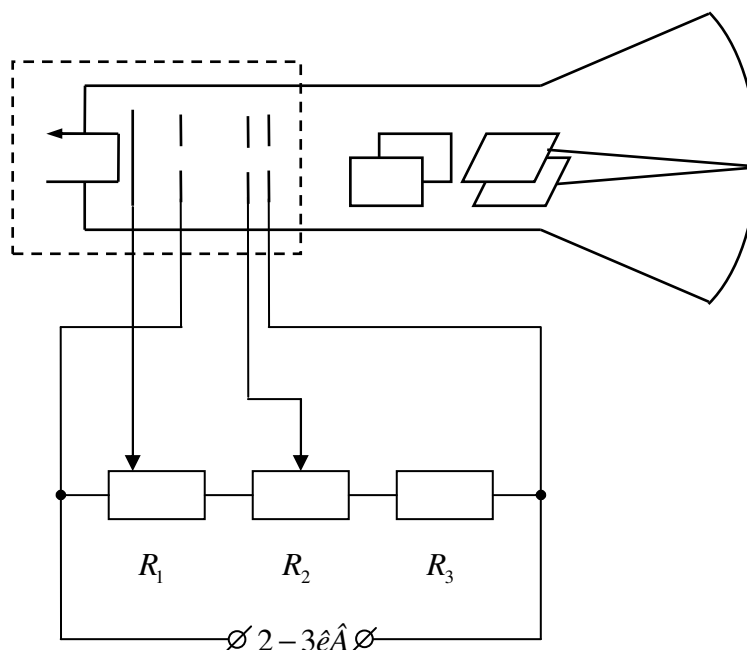


Рис. 2 Схема распределения напряжений на электродах трубки

Принято потенциал электродов ламп рассматривать относительно катода, причём потенциал самого катода принимается за нуль. Из схемы (рис. 2) видно, что переменным сопротивлением R_1 можно изменять отрицательный потенциал управляющего электрода, а, следовательно, управлять потоком электронов, вызывающих свечение экрана, т.е. управлять яркостью свечения экрана.

Переменным сопротивлением R_2 регулируется положительный фокусирующий потенциал первого анода. На второй анод подается с того же делителя положительный, ускоряющий, постоянный потенциал.

В трубку вмонтированы горизонтально и вертикально *отклоняющие пластины*. Если к пластинам какой-либо пары приложено напряжение, то электронный луч отклоняется. Величина этого отклонения пропорционально напряжению между пластинами. Если на пару вертикально отклоняющих пластин подать исследуемое, периодически меняющееся напряжение, то пятно будет перемещаться на экране в вертикальной плоскости. Чтобы получить график изме-

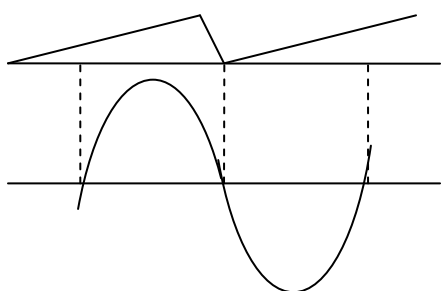


Рис. 3

нения. Чтобы получить график изме-

нения исследуемого напряжения во времени на горизонтально отклоняющие пластины подается пилообразное напряжение развертки от генератора развертки (рис. 3). За каждый период пилообразного напряжения луч вычерчивает кривую исследуемого напряжения, перемещаясь слева направо быстро возвращаясь назад. Для получения застывающей картины необходимо, чтобы новая траектория движения луча полностью совпадала с предыдущей. Это выполняется только в том случае, если период напряжения развертки будет равен или кратен периоду исследуемых колебаний. Равенство или кратность частот добиваются изменением частоты генератора развертки.

Генератор развертки. От источника постоянного напряжения через сопротивление R_1 заряжается конденсатор C_2 до напряжения зажигания газонаполненной лампы (тиратрона). Напряжение на конденсаторе за время t_0 возрастает равномерно. При зажигании лампы её сопротивление резко уменьшается и за время t через нее разряжается конденсатор C_2 . Частота полученного пилообразного напряжения зависит

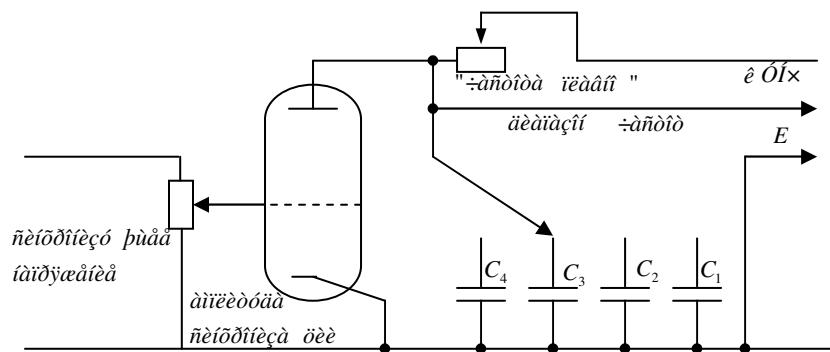


Рис. 4

от постоянной времени R_1C_2 . Подключением различных конденсаторов $C_1...C_4$ изменяем диапазон частот генератора. Переменное сопротивление служит для плавной регулировки частот.

Для получения устойчивой картины необходимо, чтобы в периоде генератора T развертки укладывалось целое число периодов исследуемого сигнала T , т.е. $T=kT$. Однако, вследствие непостоянства частоты генератора развертки нельзя ручаться за сохранение указанного равенства. Для получения данного соотношения необходимо синхронизировать частоту генератора развертки с частотой исследуемого колебания. Если на сетку генератора развертки подать переменное напряжение, то частота развертки конденсатора, т.е. частота пилообразного напряжения, будет зависеть не только от постоянной времени R_1C_2 , но и от частоты следования положительных импульсов, т.к. положительное напряжение на сетке зажигает лампу при меньшем напряжении на аноде, чем $U_{зж}$.

Осциллограф может быть использован для сравнения двух частот и в некоторых случаях для сравнения фазы двух колебаний. Такой метод имеет очень высокую точность.

Для этой цели на одну пару отклоняющих пластин подается напряжение одной частоты, а на другую – напряжение другой частоты. При этом на координатной сетке можно получить фигуру, которая будет прочерчиваться лучом на экране электронно-лучевой трубки. При этом скорость луча равна скорости подводимого колебания. По виду фигур получившихся на экране осциллографа (фигуры Лиссажу), можно судить о соотношении между рассматриваемыми частотами. Вид фигур показан на рисунке 5.

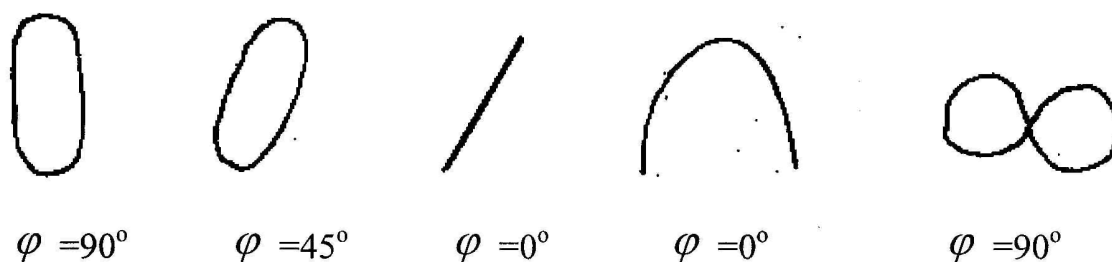


Рис. 5

На первых трех рисунках показан случай, когда частоты находятся в отношении 1:1. Наклон и ширина эллипса позволяют судить о разности фаз между колебаниями. Следующие рисунки показывают случай, когда соотношение между частотами 2:1.

Сравнение частот используется для градуировки звуковых генераторов. На пластины X подают напряжение известной частоты, а на пластины Y напряжение от генератора неизвестной частоты. Генератор развертки в этом случае не нужен. Изменяя частота генератора, добиваются на экране появления неподвижных фигур, соответствующих тому или иному соотношению частот. При равенстве частот получается окружность, эллипс или наклонная линия, в зависимости от сдвига фаз между напряжениями и величины их амплитуд. Фигура в виде восьмерки или дуги соответствует отношению частот 2:1, т.к. за время одного колебания в горизонтальном направлении происходит два колебания в вертикальном направлении.

Содержание учебных заданий

Задание 1. Изучение осциллографа.

1. Разберитесь в блок-схеме осциллографа.
2. Выясните назначение и принцип работы каждой ручки управления осциллографом используя паспорт прибора.

Задание 2. Включение осциллографа.

1. После 2 минутного прогрева электронных ламп получите в центре экрана точку. Для этого необходимо ручками смещения вывести луч точно в центр экрана и окончательно отрегулировать фокусировку и яркость луча.

Задание 3. Наблюдение графика сетевого напряжения частоты 50Гц.

1. Подайте напряжение на вход вертикального усилителя.
2. «ДИАПАЗОН ЧАСТОТ» поставьте в положение, в соответствующее исследуемой частоте (50Гц).
3. Установите размер изображения, удобный для наблюдения. Для получения устойчивой картины включите внутреннюю синхронизацию. Получите устойчивое изображение синусоиды. Научитесь получать 1, 2, 3,... периода синусоидальных колебаний.

Задание 4. Получение графиков колебаний звуковой частоты.

1. Выход звукового генератора подключите к вертикальному усилителю осциллографа. Обратите внимание на то, чтобы заземленная клемма осциллографа была соединена с заземленной клеммой звукового генератора.
2. Прodelайте все наблюдения, описанные в задании 3 для всех диапазонов звукового генератора.

Задание 5. Получение фигур Лиссажу.

1. На вход горизонтального усилителя подайте напряжение от звукового генератора.
2. На вход вертикального усилителя подайте напряжение от генератора неизвестной частоты.
3. Изменяя частоту звукового генератора, получите соотношение частот: 1:1, 1:2, 1:3 и т.д.
5. Зарисуйте вид кривых, соответствующих этим соотношениям.

Вопросы к допуску

1. Из каких основных блоков состоит электронный осциллограф? Перечислите и покажите их на блок-схеме.
2. Что такое электронная пушка?
3. Что называют фигурой Лиссажу?
4. Какие приборы называют генераторами?
5. Как проградуировать неизвестный генератор при помощи осциллографа и известного генератора?

Контрольные вопросы.

1. Как влияет положение той или иной ручки управления на вид графика?
2. В результате чего получаются фигуры Лиссажу и каким соотношениям частот соответствуют наиболее простые из них?
3. Какие типы генераторов вы знаете?

Лабораторная работа № 1.2

Исследование электростатического поля

Цель работы: экспериментальное нахождение и построение эквипотенциальных линий для 3 различных систем электродов; использование для построения линий напряженности и вычисления среднего значения напряженности на участке между соседними линиями.

Приборы и материалы: плоский стеклянный сосуд на доске с установочными винтами, набор электродов, зонд, вольтметр большого сопротивления, источник переменного тока на 12В.

Краткая теория вопроса

Электростатическое поле (ЭСП), поле неподвижных электрических зарядов в каждой точке характеризуется вектором напряженности E и потенциалом γ . Направление вектора напряженности в каждой точке поля и распределение потенциалов в поле можно сделать наглядным, используя понятие о силовых линиях и эквипотенциальных поверхностях (поверхностях равного потенциала).

Силовые линии нормальны к поверхностям находящимся в ЭСП проводников, которые являются телами с одним значением потенциала во всем объеме. Это существенно облегчает экспериментальное исследование ЭСП, так как найденное положение в эквипотенциальных поверхностях позволяет построить силовые линии и наоборот. Экспериментально намного проще производить измерения потенциала, так как это - скалярная величина. Большинство приборов пригодных для изучения полей, измеряют разности потенциалов.

Для изучения распределения потенциалов в ЭСП используется зонд - специальный дополнительный электрод, который вносится в исследуемую точку поля. Он соединяется с прибором, измеряющим приобретенным зондом в поле потенциал по отношению к какой-нибудь начальной точке. При этом необходимо обеспечить условия, чтобы зонд принял потенциал той точки поля, в которую он помещен. Выполнить эти условия в непроводящей среде нелегко. Поэтому изучение ЭСП системы проводников заменяют изучением электростатического поля между той же системой проводников, если потенциалы проводников поддерживаются постоянными и проводимость среды во много раз меньше проводимости проводников.

Такой способ изучения объекта называется *моделированием*. Преимуществами такого метода является автоматическое выравнивание потенциала зонда {простого металлического электрода) и той же

точки поля, куда он помещен; а также возможность использования токоизмерительных приборов с наиболее простым и надежным механизмом, чем электростатическая аппаратура. Цепь зонда должна обладать большим сопротивлением, чтобы не исказить распределение потенциалов в исследуемом поле. Во избежание неудобств связанных с электролизом и поляризацией электродов, питание установки производится низкочастотным переменным током.

Содержание учебных заданий

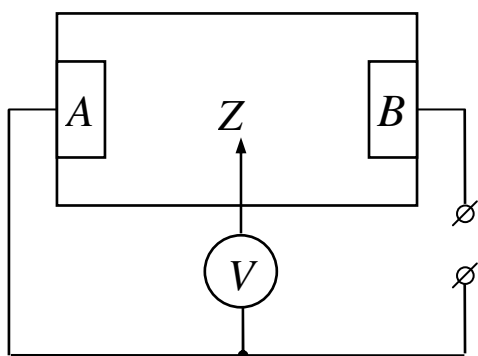


Рис. 1

Задание 1. Исследование ЭСП между плоскими металлическими пластинами.

1. Соедините приборы по схеме (рис. 1), расположив электрода А и В на расстоянии 8-10см. В стеклянный сосуд налейте воды толщиной слоя в 3-4 мм.
2. Зная разность потенциалов между А и В, оценить интервал измерения потенциала для нахождения и построения 5-7 экви-

потенциальных линий. Задавшись конкретным значением потенциала отыскать несколько положений зонда, соответствующих точкам с этим значением потенциала.

3. Начертить на листе бумаги систему эквипотенциальных линий, указать точки, соответствующие указанным значениям потенциала. Над каждой линией написать соответствующее ей значение потенциала.
4. Начертить здесь же несколько линий напряженности. Зная разность потенциалов между соседними эквипотенциальными линиями и расстояния между ними, определить среднее значение напряженности в данном месте.

Задание 2. Исследование ЭСП системы плоских электродов и цилиндра.

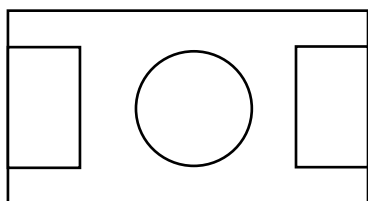


Рис. 2

1. Поместить между плоскими электродами, не перемещая их, металлический цилиндр (рис.2).
2. По той же схеме работы начертить на отдельном листе систему эквипотенциальных линий и линий напряженности.

3. Измерить и указать на графике значения потенциала внутри цилиндра.

Задание 3. Исследование ЭСП 2 цилиндрических электродов.

1. В исходной схеме заменить плоские электроды на цилиндрические, установив их так, чтобы их оси совпадали (коаксиально) (рис.3).

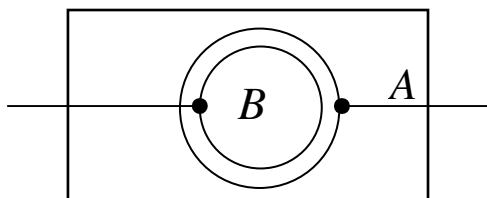


Рис. 3

2. По той же схеме работы начертить на отдельном листе систему эквипотенциальных линий и линий напряженности.

3. Измерить и указать на графике значения потенциала внутри цилиндра.

Вопросы к допуску

1. Что такое напряженность и потенциал поля в данной точке?
2. Как изучают ЭСП?
3. Что такое силовые линии поля и эквипотенциальных поверхностей? Связаны ли они между собой и как? Почему?
4. Какое ЭСП называют однородным? Привести пример, изобразить на рисунке.

Контрольные вопросы

1. Что показывает вольтметр на схеме рис. 1? При каком положении зонда вольтметр покажет наибольшее значение?
2. Как изменяется электрическое поле в проводниках и диэлектриках?
3. Чем объясняется искажение линий напряженности вблизи проводника во втором опыте?
4. Чему равен потенциал поля внутри и снаружи проводников в 3 опыте?

Лабораторная работа № 1.3

Определение емкости конденсатора посредством баллистического гальванометра

Цель работы: определить емкость конденсатора баллистическим методом.

Приборы и материалы: гальванометр демонстрационный М1032-М1, магазин емкостей МЕ, источник питания, двухполюсной переключатель, соединительные провода.

Краткая теория вопроса

Напряжение U между пластинами прямо пропорционально заряду конденсатора, поэтому отношение заряда к напряжению V является для конденсатора величиной постоянной при любых значениях заряда. Это отношение C называется емкостью конденсатора:

$$C=q/U.$$

Единица емкости в международной системе называется фарад (Ф).

При последовательном соединении конденсаторов имеет место следующая формула

$$1/C=1/C_1+ 1/C_2 + \dots + 1/C_n.$$

При параллельном соединении емкость конденсаторов равна сумме емкостей отдельных конденсаторов, т. е.

$$C=C_1+C_1+\dots+C_n.$$

В основу измерения емкости положено соотношение между зарядом конденсатора q , его емкостью C и разностью потенциалов на конденсаторе V . Если применить это соотношение к двум конденсаторам, заряженным до одной и той же разности потенциалов V , то легко прийти к соотношению

$$C_2=C_1q_2/q_1$$

Из него видно, что если емкость одного из конденсаторов известна, то относительное изменение емкости двух конденсаторов сводится к сравнению их зарядов. В данном случае сравнение зарядов конденсатора выполняется баллистическим методом.

Баллистический гальванометр применяется для измерения количества электричества протекающего по цепи за промежуток времени, малый по сравнению с периодом собственных колебаний рамки, и представляет собой особую разновидность гальванометра магнито-

электрической системы. Он отличается еще искусственным увеличением момента инерции его подвижной системы.

Движение рамки баллистического гальванометра в общем случае описывается уравнением

$$K \frac{d^2 L}{dt^2} + p \frac{dl}{dt} + DL = H_n Q_i \quad (1)$$

при $t < \tau$, где τ - время прохождения тока, получим следующее равенство:

$$K = \frac{H^2 n^2 Q^2 q^2}{DL_0^2}. \quad (2)$$

Где q - полное количество электричества, где α_0 - первое максимальное отклонение рамки от положения равновесия. $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{k}{D}}$ - период свободных колебаний рамки гальванометра.

$$K = \frac{T_0^2 D}{4\pi^2}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2) получим

$$\frac{T_0^2 D}{4\pi^2} = \frac{H^2 n^2 Q^2 q^2}{DL_0^2}.$$

Отсюда

$$q = \frac{T_0}{\pi} \frac{D}{H_n Q} \frac{L_0}{2} = \frac{T_0}{2\pi} CL_0 \text{ или } q = B\alpha_0.$$

Где $B = CT_0/2\pi$, C - динамическая постоянная гальванометра. Величина B носит название баллистической постоянной гальванометра. $a = n/2l$ - смещение светового указателя по шкале. Где l - расстояние от зеркала гальванометра до шкалы и n - число делений, которое отсчитывается по шкале.

$$q = Bn/2i = B'n,$$

где $B' = B/2l$

$$B' = q/n = \text{const} \quad (4)$$

B' - выражено в кулонах на деление шкалы.

Практически B и B' определяют, разряжая через баллистический гальванометр конденсатор известной емкости C , заряженной до известной разности потенциалов V и, следовательно, содержащий заряд

$$q=CU$$

(5)

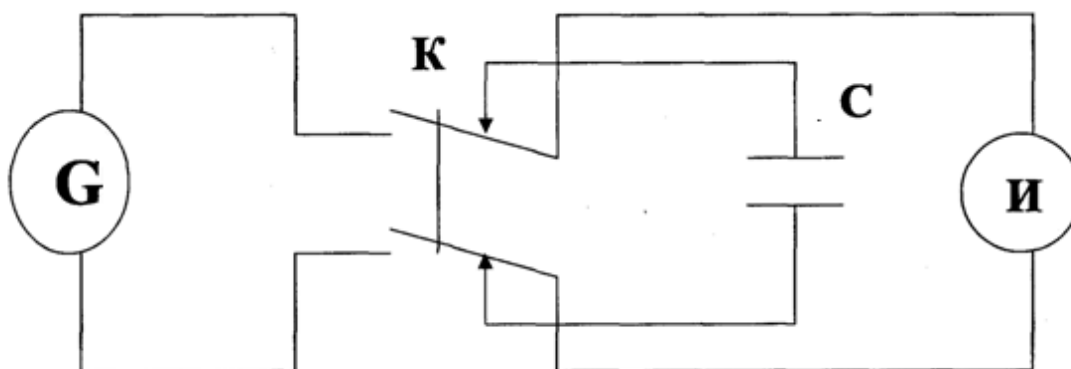
Из (4) и (5) следует, что

$$C=B'n/V$$

Содержание учебных заданий

1. Составить цепь, как показано на схеме

С – гальванометр, К - двухполюсной переключатель, С - магазин емкостей, И - источник питания.



2. Установить постоянное напряжение U . Включая в цепь конденсаторы разной емкости, определить отклонение гальванометра по линейной шкале. Полученные данные записать в таблицу. Измерения проводить не менее 3-5 раз.

№	U, B	C, Φ
1		
2		
3		

3. Установить постоянную емкость конденсатора. Определить отклонение гальванометра по линейной шкале при различном напряжении U . Полученные данные записать в таблицу. Измерения проводить не менее 3-5 раз.

4. Определить баллистическую постоянную B' .

5. Измерить емкость неизвестного конденсатора.

6. Измерить емкость системы конденсаторов при последовательном, параллельном соединении двух емкостей. Сравнить полученные экспе-

риментальные результаты с рассчитанными теоретически.

Практические указания

Ввиду того, что в лабораторной работе пользуются высоким напряжением возникает опасность при малейшей неисправности цепи пережечь гальванометр. Поэтому необходимо:

1. Ни в коем случае не включать ток до проверки соединений преподавателем.
2. Все переключения конденсаторов производить с возможной тщательностью и обязательно при выключенном источнике питания.
3. Соединение приборов производить исключительно целыми проводами с неповрежденной изоляцией.

Вопросы к допуску

1. Что такое конденсатор, емкость конденсатора?
2. Что происходит с емкостью конденсаторов при последовательном, параллельном соединениях?
3. Устройство и назначение баллистического гальванометра.

Контрольные вопросы

1. Что показывает амперметр?
2. Как связана баллистическая постоянная гальванометра с емкостью конденсатора?
3. От чего зависит емкость конденсатора?

Лабораторная работа № 1.4

Изучение свойств сегнетоэлектриков

Цель работы ознакомиться с принципом работы модуля ФПЭ – 02; изучить основные свойства сегнетоэлектриков.

Оборудование: сегнетоэлектрик ФПЭ -02, модуль ФПЭ – С1 -73, ФПЭ – М890G (или аналог).

Краткая теория вопроса

Сегнетоэлектриками называются вещества, которые ниже некоторой температуры, называемой точкой Кюри, или в некотором интервале температур имеют области домены спонтанной (самопроизвольной) поляризации. Следствием существования областей спонтанной поляризации у сегнетоэлектриков является наличие у них свойств аналогичных свойствам ферромагнетиков: большие значения диэлектрической проницаемости, характерная кривая зависимости диэлектрической проницаемости от температуры с резким пиком в точке Кюри и гистерезис (зависимости заряда на обкладках конденсатора с сегнетоэлектриком от напряженности поля в области сильных полей при температурах ниже точки Кюри).

Сегнетоэлектрические свойства сильно зависят от температуры. При температурах, превышающих определенное значение T_k , различное для различных веществ, сегнетоэлектрические свойства исчезают и сегнетоэлектрик превращается в обычный диэлектрик. Эта температура называется температурой Кюри, или точкой Кюри.

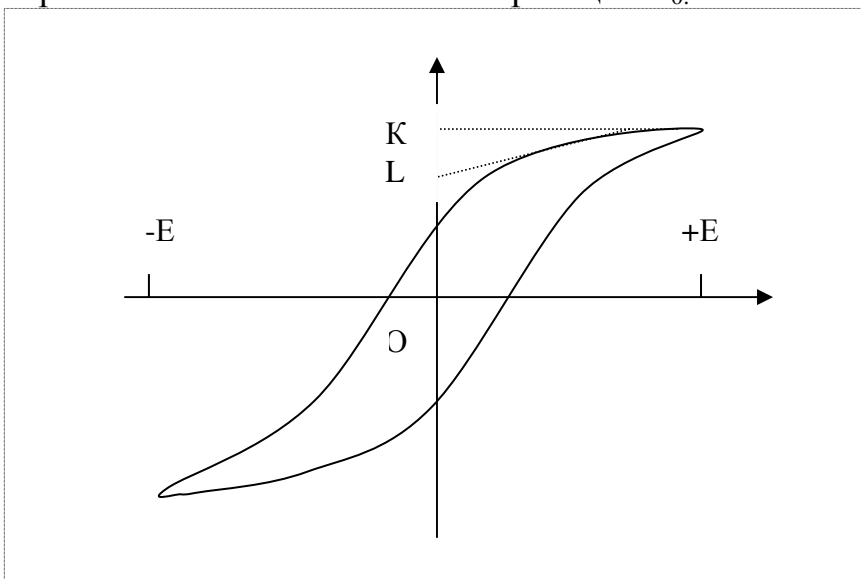
Изменение свойств при переходе через эту точку является следствием изменения кристаллической структуры сегнетоэлектрика в этой точке.

Процесс поляризации сегнетоэлектрика носит необратимый характер. Сегнетоэлектрики обладают гистерезисом. Сущность гистерезиса заключается в том, что поляризация сегнетоэлектрика определяется не только значением напряженности поля, но и зависит от предшествовавших состояний поляризации.

При изменении поля от $+E$ до $-E$ и от $-E$ до $+E$ индукция и поляризация в сегнетоэлектрике описывают замкнутую кривую, называемую петлей гистерезиса.

В общем случае и спонтанная поляризация и поляризация смещения являются нелинейными функциями напряженности поля. Однако в области не очень сильных полей поляризация смещения пропорциональна напряженности поля. В этой области можно делить

полную поляризацию на две составляющие следующим образом экстраполируют ветвь насыщения петли гистерезиса к значению поля, равному нулю. Отрезок KL соответствует поляризации смещения P , отрезок LO — спонтанной поляризации P_0 .



Вектор электрического смещения для сегнетоэлектриков определяется соотношением:

$$D = E_0 + P$$

Содержание учебных заданий

Задание 1. Получить петлю гистерезиса для сегнетоэлектрика.

Собрать установку по рис.1. Подготовка осциллографа к работе:

Установите органы управления на передней панели в следующие положения:

1. ручку «ЯРКОСТЬ» - в крайнее левое;
2. ручку «ФОКУС» - в среднее;
3. переключатель «V/ДЕЛ.» - «0,05»;
4. ручку «УСИЛЕНИЕ» - в крайнее правое;
5. ручку «↕» - в среднее;
6. переключатель « ⊥ » - « ⊥ »;
7. ручку «УРОВЕНЬ» - в крайнее правое;
8. переключатель «mS/ДЕЛ., μ S/ДЕЛ.» - «1mS /ДЕЛ.»;
9. ручку «ПЛАВНО» - в крайнее правое;
10. ручку «СТАБ.» - в крайнее правое;
11. ручку «↔» - в среднее.

Для проведения лабораторной работы модуль ФПЭ -02 подключается к сети 220 В, шнур от осциллографа (штекер вставляется в соответствующее гнездо, находящееся на левой боковой панели осцил-

логафа) соединяется с сегнетоэлектриком (чёрная клемма включает-ся в землю \perp , а красная клемма- в гнездо Y).

Простой провод соединяет гнездо X с гнездом O X (правая боковая панель осциллографа). Положение переключателя «V/ДЕЛ.» установить на «0,02». Мультиметр М890G подключается к гнездам PV (чёрный провод в нижнее гнездо на сегнетоэлектрике, а красный – в верхнее).

На мультиметре М890G чёрный провод вставляется в гнездо COM, а красный – V/ Ω /f.

Задание 2. Найти полную, спонтанную поляризации и поляризацию смещения.

Зарисуйте кривую гистерезиса и по своему рисунку определите необходимые величины при напряжении 14 В.

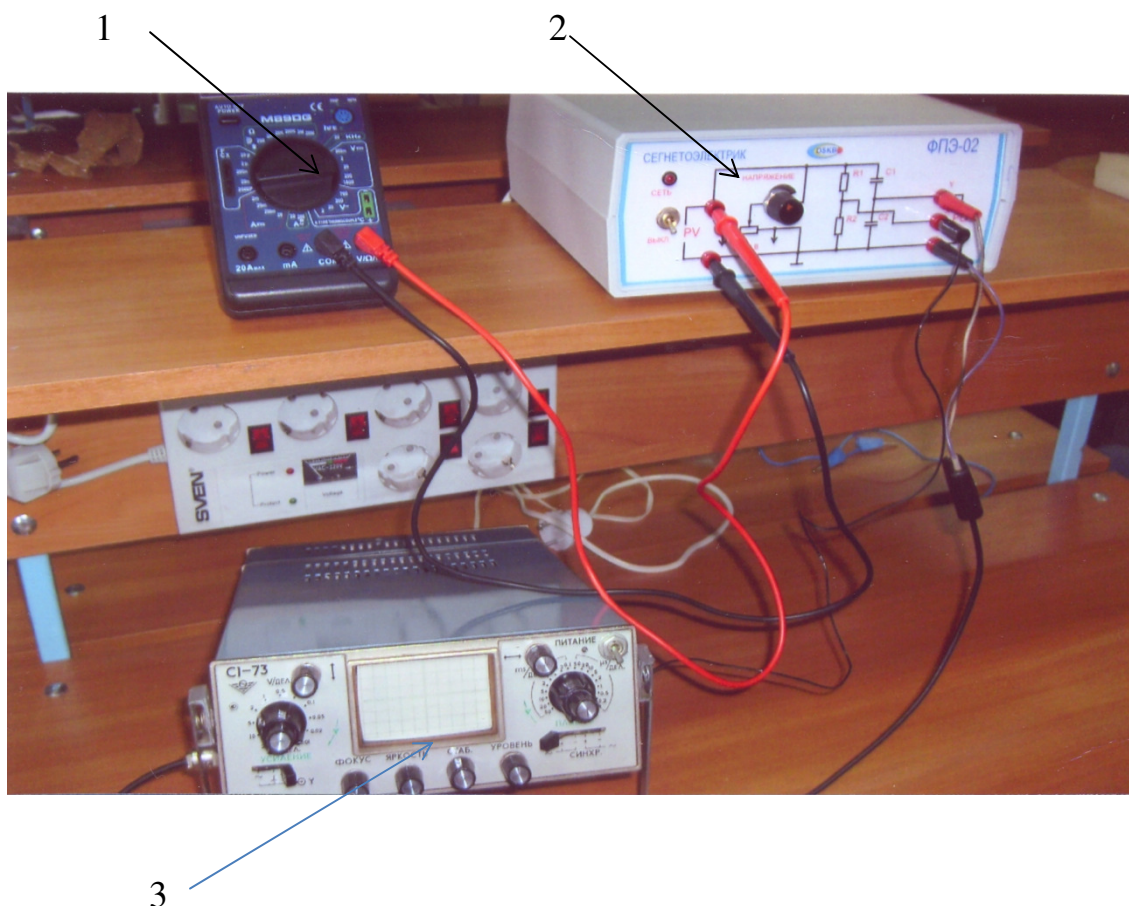


Рис.1

1. мультиметр М890G
2. сегнетоэлектрик
3. осциллограф универсальный С1-73

Вопросы к допуску

1. Что такое сегнетоэлектрики?
2. В чём сущность гистерезиса?
3. Что называется точкой Кюри?
4. Что называется вектором электрического смещения и напряжённостью?

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются сегнетоэлектрики от остальных диэлектриков?
2. Какова связь напряжённости с электрическим смещением?
3. Под действием какой силы поляризованность становится равной нулю?
4. Объясните диэлектрический гистерезис в сегнетоэлектриках (нарисовать график и объяснить его)?
5. Какое практическое применение имеют сегнетоэлектрики?
6. Что называется остаточной поляризованностью?
7. Какие вещества могут быть сегнетоэлектриками?

Лабораторная работа № 1.5

Изучение закона Ома

Цель работы: проверка и подтверждение закона Ома для полной цепи и для участка цепи.

Приборы и материалы: источник тока, 3 сопротивления, амперметр, ключ, вольтметр, соединительные провода.

Краткая теория вопроса

Для поддержания постоянного тока в проводнике необходимо сохранять неизменной разность потенциалов на его концах. Движущиеся заряды всегда стремятся к такому распределению в проводнике, которое отвечало бы статическому распределению, т.е. стремятся выровнять потенциалы во всех точках проводника. При соединении проводником двух тел, имеющих разность потенциалов, под действием электрического поля по проводнику начинают двигаться электрические заряды. Со временем разность потенциалов будет уменьшаться и количество электричества, проходящего в единицу времени через поперечное сечение проводника, будет уменьшаться от некоторой начальной величины до нуля. Для поддержания упорядоченного движения зарядов в проводнике необходимо сохранять неизменной разность потенциалов на его концах. Следовательно, на заряды в проводнике должно действовать, кроме электростатического поля, еще некоторое поле сил не электростатического происхождения. Для краткости эти силы называют *сторонними* (электрическому полю), и напряженность поля сторонних сил обозначают через E .

Сторонние силы могут возникать за счет механических, химических, тепловых и др. процессов, протекающих в цепи. В любом источнике тока электрическое поле порождается сторонними силами. В гальванических элементах разность потенциалов на границе металл - жидкость, которые и порождает стороннее поле напряженности $E_{стор}$ за счет химических процессов.

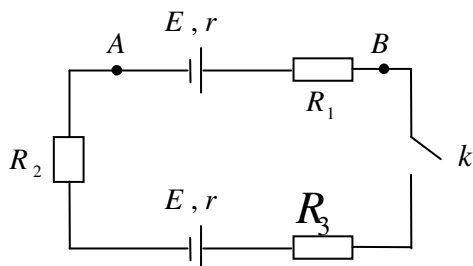


Рис. 1

Рассмотрим в замкнутой цепи участок АВ рис. 1. На этом участке действуют одновременно два электрических поля: электростатическое поле напряженности E и стороннее поле напряженности $E_{стор}$.

По закону Ома в любом сечении участка АВ имеем:

$$\gamma(E + E_{сноп}) = j, \quad (1)$$

где j - плотность тока, а γ - электропроводность.

Проинтегрировав (1) получим:

$$I(R + r) = (\varphi_A - \varphi_B) + \varepsilon. \quad (2)$$

Это равенство выражает закон Ома для неоднородного участка цепи, имеющего источник тока. Для участка БВ цепи (рис.3) закон Ома имеет вид:

$$IR_2 = V_B - V_A. \quad (3)$$

В любой замкнутой цепи постоянного тока, не имеющей разветвлений (рис. 1), сумма всех разностей потенциалов = 0. Если сложить падения напряжения на всех участках цепи, то получится закон Ома для замкнутой цепи:

$$I(R_1 + R_2 + R_3 + 2r) = E - E_1. \quad (5)$$

Для любой цепи постоянного тока без разветвления закон Ома имеет вид:

$$I(\sum_n R_n + \sum_i r_i) = \sum_i \varepsilon_i, \quad (6)$$

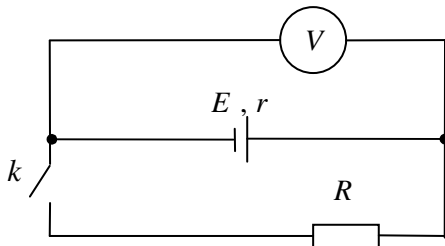


Рис. 2

где $\sum_n R_n$ - сумма внешних сопротивлений, $\sum_i r_i$ - сумма внутренних сопротивлений источников тока, $\sum_i \varepsilon_i$ - алгебраическая сумма ЭДС, включенных в цепь. Для определения знака каждой ЭДС следует руководствоваться

ранее установленным правилом.

Вольтметр в цепи, изображенный на рисунке 2 при замкнутом ключе показывает напряжение на зажимах источника тока или падение напряжения на сопротивлении R . Из (6) следует, что падение напряжения на сопротивлении R :

$$U = E - Ir \quad (7)$$

Как видно из формулы (7) напряжение на зажимах источника тока меньше ЭДС на величину падения напряжения внутри самого источника. Формула (7) показывает, что чем больше внешнее сопротивление R по сравнению с внутренним сопротивлением r , тем меньше падение напряжения внутри источника и тем ближе напряжение на зажимах к ЭДС. Если цепь разомкнута, то $U = E$, т.е. ЭДС равна напряжению на зажимах разомкнутого источника. Это лежит в основе всех методов измерения ЭДС. Пользуясь законом Ома, можно рассчитать любую электрическую цепь постоянного тока.

Содержание учебных заданий

Задание 1. Проверка закона Ома для цепи без разветвлений.

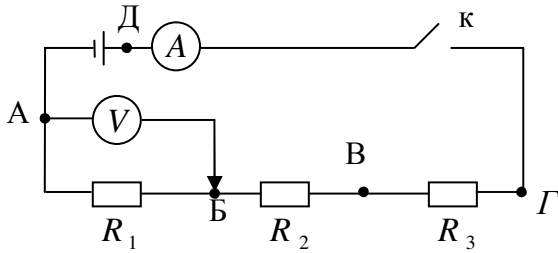


Рис. 3

1. Соберите цепь по схеме рис.3.
2. Измерьте ток и напряжение во всех указанных в таблице точках при замкнутом и разомкнутом ключе k .
3. Результаты измерений занесите в таблицу:

I, A	U, В				
	А-Б	А-В	А-Γ	Б-В	А-Д

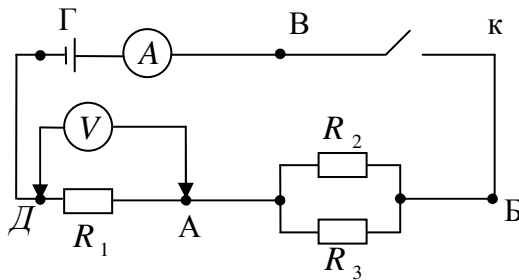


Рис. 4

Задание 2. Проверка закона Ома для цепи с разветвлениями.

1. Соберите цепь по схеме рис.4.
2. Измерьте ток и напряжение во всех точках, указанных в таблице.
3. Результаты измерения занесите в таблицу.

I, A	U, В			
	А-Д	А-Б	Д-Б	Γ-В

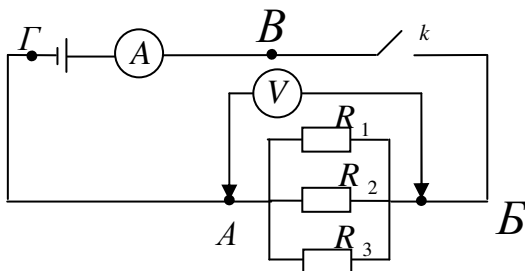


Рис. 5

Задание 3. Проверка закона Ома для цепи с параллельно соединенными сопротивлениями.

1. Соберите цепь по схеме рис.4.
2. Измерьте ток и напряжение во всех точках, указанных в таблице.
3. Результаты измерения занесите в таблицу.

I, A	U, В	
	А-Б	Г-В

Задание 4.

По результатам измерений (считая сопротивление вольтметра очень большим) определить:

А) сопротивления R_1 , R_2 , R_3 ,

Б) ЭДС E ,

В) внутреннее сопротивление элемента, включенного в цепь.

Вопросы к допуску

1. В чем состоит закон Ома для участка цепи и для полной цепи?
2. Объясните зависимость между R, I, U на участке цепи.
3. Запишите закон Ома для неоднородного участка цепи с разъяснением правила знаков.
4. Что такое сторонние силы и за счет чего они могут быть созданы?
5. Какие измерения необходимо выполнить в работе? Как с качественной стороны должны меняться показания вольтметра во всех заданиях?

Контрольные вопросы

1. Как повлияет заземление одной и двух точек в цепи, изображенной на рис. 1?
2. Как отличить показания вольтметра, подключенного к точкам А, Д при разомкнутом ключе в задании 1, от величины ЭДС источника?
3. Как вычисляют ЭДС, внутренние сопротивления, ток в нагрузке при последовательном и параллельном соединении источников?

Лабораторная работа № 1.6

Законы Кирхгофа

Цель работы: экспериментальное подтверждение двух правил Кирхгофа для разветвленных цепей; сравнение показаний амперметров с числовыми значениями токов, рассчитанных по этим правилам.

Приборы и материалы: 2 источника с различными значениями ЭДС, 4 известных сопротивления, 3 амперметра, 2 ключа, вольтметр, соединительные провода.

Краткая теория вопроса

Обобщенный закон Ома позволяет рассчитать практически любую сложную цепь. Однако, непосредственный расчет разветвленных цепей, содержащих несколько замкнутых контуров (контуров могут иметь общие участки, каждый контур может иметь несколько ЭДС и т.д.), довольно сложен. Проще решается эта задача с помощью законов Кирхгофа. Любая точка разветвленной цепи, в которой сходятся не менее трех проводников с током, называется *узлом*. При этом ток, входящий в узел, считается положительным, выходящий из узла - отрицательным.

Первое правило Кирхгофа: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю: $\sum_k I_k = 0$

Это правило вытекает из закона сохранения электрического заряда. Действительно, в случае установившегося постоянного тока ни в одной точке проводника и ни в одном его участке не должны накапливаться электрические заряды. В противном случае токи не могли бы оставаться постоянными.

Второе правило Кирхгофа получается из обобщенного закона Ома для разветвленных цепей. Рассмотрим контур, состоящий из трех участков. Направление обхода по часовой стрелке примем за положительное, отметив, что выбор этого направления совершенно произволен. Все токи, совпадающие по направлению с направлением обхода, считаются положительными, ЭДС считается положительной, если она создает ток, направленный в сторону обхода контура. Иначе ЭДС берется со знаком минус.

Второе правило Кирхгофа: в любом замкнутом контуре алгебраическая сумма произведений сил токов на сопротивления соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме ЭДС, встречающихся в этом контуре: $\sum_i I_i R_i = \sum_k E_k$

Содержание учебных заданий

Задание 1. Опытное подтверждение законов Кирхгофа.

1. Соберите цепь по схеме рис.1. Замкнув ее на короткое время, снимите показания приборов

2. Заполните таблицу:

№	E_1	E_2	R_1	R_2	R_3	R_4	I_1	I_2	I_3	U_1	U_2	U_3	U_4	ΔI_1	ΔI_2	ΔI_3
1																
2																

3. Запишите 2 закон Кирхгофа для данной в работе цепи. Подставив полученные в работе значения I_1, I_2, I_3 сделать вывод с учетом погрешностей.

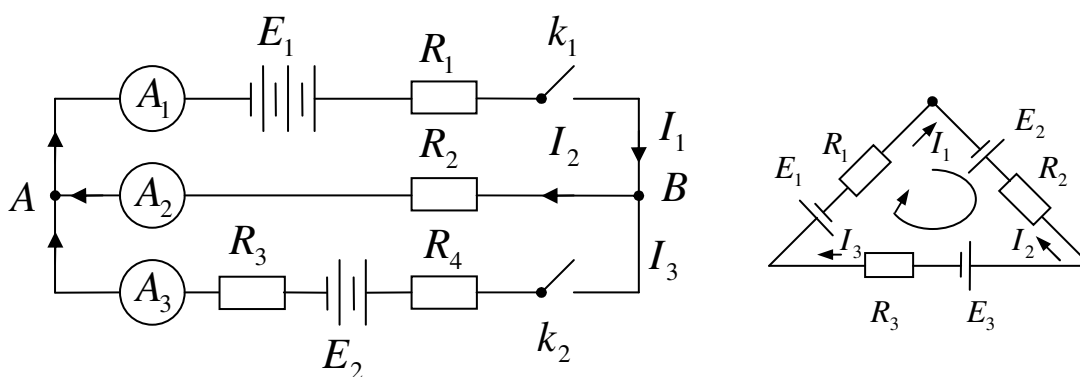


Рис. 1

Задание 2. Сравнение опытных данных с расчетными значениями сил токов.

1. Считая известными значения E_1 и E_2 и 4-х сопротивлений, решить систему уравнений, полученных из законов Кирхгофа, и найти значение силы тока в каждой из ветвей цепи.

2. Сравнить найденные значения с данными эксперимента. Сделать нужное обоснование их равенства или различия.

Вопросы к допуску

1. В чем заключается принцип изменения пределов измерения используемых приборов в работе?
2. Сформулировать законы Кирхгофа.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается обобщенный закон Ома?
2. В чем их физическая сущность законов Кирхгофа?
3. Расскажите о методе контурных токов.

Лабораторная работа № 1.7

Определение неизвестного сопротивления с помощью мостовой схемы

Цель работы: изучить мостовой метод измерения сопротивлений.

Приборы и материалы: реохорд, гальванометр, магазин сопротивлений, источник тока, 2 неизвестных сопротивления, ключ.

Краткая теория вопроса

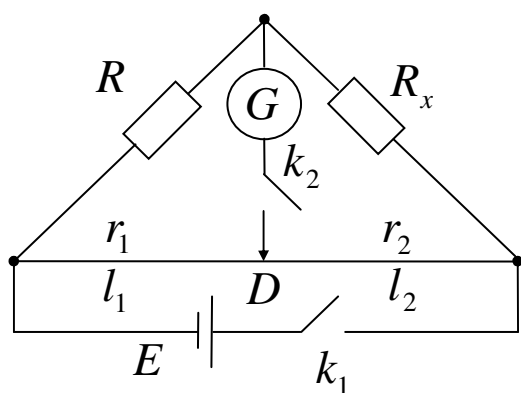


Рис. 1

Мостовая схема постоянного тока, называемая сокращенно *мостом Уитстона*, состоит из сопротивлений R , R_x , r_1 , r_2 , соединенных между собой проводами (рис. 1). В одну из диагоналей этой схемы включается источник ЭДС, в другую - чувствительный гальванометр (эта диагональ и называется *мостом* в собственном смысле). Весь процесс измерений связан с требованием равенства нулю силы тока в мосте. При про-

извольном соотношении сопротивлений через гальванометр, разумеется, должен идти ток. Но существует одно соотношение между сопротивлениями схемы, при котором сила тока через гальванометр обращается в ноль (мост уравновешен). Это

соотношение имеет вид. $\frac{R_x}{R} = \frac{r_2}{r_1}$. Т.о. в случае равновесия моста при

определении искомого сопротивления R_x ЭДС батареи, сопротивление источника и гальванометра роли не играют.

В данной работе используется *реохордный мост Уитстона*, где сопротивления r_1 и r_2 , представляют собой длинную однородную проволоку, натянутую вдоль миллиметровой шкалы с большим удельным сопротивлением (реохорд), так что отношение $\frac{r_2}{r_1}$ можно заменить на

$\frac{l_2}{l_1}$. Тогда можно записать:

$$R_x = R \frac{l_2}{l_1} \quad (1)$$

Соединение гальванометра с реохордом осуществляется при помощи контактного движка D , скользящего вдоль реохорда. Длины l_1 и l_2 легко определяются по шкале. Поэтому данный метод позволяет определить неизвестное сопротивление.

Содержание учебных заданий

Задание 1. Определение неизвестного сопротивления R_{x1} .

1. Соедините приборы по схеме (рис.1), взяв в качестве R_x одно из неизвестных сопротивлений.
2. Движок установите на середину шкалы и замкните на короткое время ключ k_1 , а затем k_2 . При такой последовательности замыкания ключей цепь гальванометра бывает, замкнута только при установившемся режиме работы цепи. Ключи следует замыкать на короткие промежутки времени, чтобы не вызвать перегрева сопротивлений цепи.
3. Изменяя величину сопротивления в магазине добиться уменьшения отклонения стрелки гальванометра при неподвижном движке (т.е. найти наиболее близкое по величине к искомому сопротивлению значения сопротивления в магазине).
4. При этом сопротивлении магазина R , давшего наименьшее отклонение гальванометра, передвигайте движок до тех пор, пока стрелка гальванометра перестанет отклоняться при размыкании и замыкании ключа.
5. Отсчитайте длины плеч моста l_1 и l_2
6. Измените в магазине сопротивлений на $\pm 0.1 R$ и вновь дважды измерьте значения плеч соответствующих равновесию моста в каждом из этих случаев
7. Результаты измерений занесите в таблицу, а также подсчитайте по формуле (1) значения неизвестного сопротивления и его среднее значение.

Задание 2. Определение второго неизвестного сопротивления R_{x2} .

Задание 3. Определение неизвестного сопротивления R_{x3} (R_{x4}), состоящего из двух последовательно и параллельно соединенных сопротивлений

1. Включайте в качестве неизвестного сопротивления, соединённые последовательно (параллельно) сопротивления R , R_x . Проведите аналогичные измерения. Результаты занесите в таблицу.
2. Сравните полученные результаты с величинами сопротивлений, рассчитанными по формулам для последовательного и параллельного

соединений сопротивлений, найденными при их отдельном измерении.

№	R	l_1	l_2	R_{x1}	R	l_1	l_2	R_{x2}	R	l_1	l_2	R_{x3}	R	l_1	l_2	R_{x4}
1.																
2.																
3.																

$$R_{x1cp} =$$

$$R_{x2cp} =$$

$$R_{x3cp} =$$

$$R_{x4cp} =$$

Задание 4. Оценка погрешностей.

1. Рассчитайте погрешности полученных результатов.
2. Окончательный ответ запишите в виде: $R = R_{cp} \pm \Delta R$.

Вопросы к допуску

1. Опишите устройство моста Уитстона.
2. Опишите принцип действия используемого в работе гальванометра.
3. Как устроен, магазин сопротивлений?
4. В какой последовательности надо включать ключи и почему?

Контрольные вопросы

1. Сохраняется ли равновесие моста, если гальванометр и источник поменять местами? Можно ли при этом производить измерения неизвестного сопротивления?
2. Почему измерения на мостике являются более точными, если сопротивление R и R_x близки друг к другу по величине?
3. Выведите формулу (1).

Лабораторная работа № 1.8

Определение электрохимического эквивалента меди и вычисление постоянной Фарадея

Цель работы: определить электрохимический эквивалент меди и постоянную Фарадея.

Приборы и материалы: источник тока, сосуд с электродами, наполненный раствором медного купороса, амперметр, реостат, часы, весы с разновесами, ключ, провода, наждачная бумага.

Краткая теория вопроса

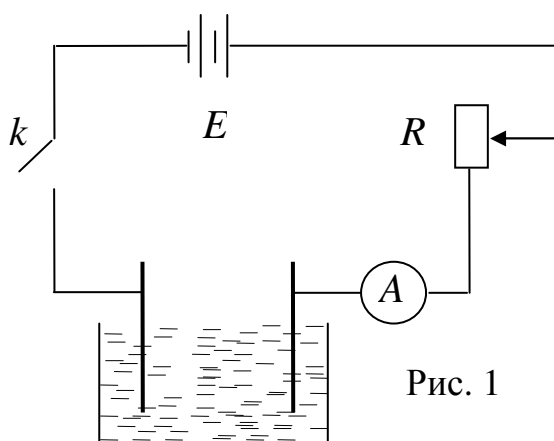
Носителями электрического тока в проводящей жидкости, например, электролите являются ионы, образующиеся при диссоциации (распаде) молекул. Процесс прохождения тока через электролит называется электролизом. При этом на катоде выделяется металл или водород. По *первому закону Фарадея* масса выделившегося на катоде вещества пропорциональна полному количеству электричества Q , протекающему через электролит: $m = kQ = kIt$, причем второе равенство верно при $I = \text{const}$ в течение времени t . Здесь k — количество вещества, выделившегося из электролита в результате прохождения через него заряда 1 Кл. называется электрохимическим эквивалентом этого вещества $[k] = \text{кг/Кл}$.

Второй закон Фарадея: массы веществ, выделенные из различных электролитов при прохождении через них одинакового количества электричества, относятся между собой как их химические эквиваленты $m_1:m_2 = k_1:k_2 = A_1/Z_1:A_2/Z_2$. (Химический эквивалент — это отношение атомного веса в граммах к валентности). Т.е. согласно этому закону электрохимические эквиваленты веществ прямо пропорциональны их химическим эквивалентам: $k = c \cdot A/z$.

Количество вещества, масса которого, выраженная в граммах, равно его химическому эквиваленту, наз. *Грамм-эквивалентом*. Величина $F = 1/c$ называется числом Фарадея. F равно электрическому заряду, который надо пропустить, через электролит для выделения на электроде 1 грамм-эквивалента любого вещества. $F = N_A \cdot e = 96494 \text{ Кл/г-экв} = 9,64194 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$.

Объединенный закон Фарадея: $m = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{Z} \cdot Q$

Содержание учебных заданий



Задание 1. Определение электрохимического эквивалента меди.

1. Собрать цепь по схеме (рис. 1). Плотность раствора медного купороса должна быть не меньше 1.05 г/см³ (насыщенный раствор).
2. Установить ток около 0,5 А (плотность тока должна быть не более 0,03 А на 1 см² площади пластин).

3. Катодную пластинку тщательно очистить, промыть, высушить и взвесить.
4. Подключите ее к отрицательному полюсу источника тока, включите секундомер и замкните цепь.
5. Поддерживая реостатом постоянство силы тока, выдержите время 25-30 мин. Затем выньте ту же пластинку, высушите ее и взвесьте.
6. Определите массу выделившейся меди: $m = m_2 - m_1$ (m_1 — первоначальный вес пластины, m_2 — ее окончательный вес).
7. Определите электрохимический эквивалент меди по формуле:

$$k = \frac{m}{It}$$
8. Заполните таблицу.

m_1	m_2	m	I	t	k	F

9. Оцените погрешность измерений, запишите ответ в виде: $k = k_{\text{ср}} \pm \Delta k$.

Задание 2. Определение постоянной Фарадея.

1. Найдите химический эквивалент меди $\mathcal{E} = A/z$.
2. Подсчитайте число Фарадея $F = \mathcal{E}/k$.
3. Найдите ΔF , запишите ответ, включая единицы измерения.

Вопросы к допуску

1. В чем различие между проводниками первого и второго рода?
2. Сформулируйте законы Фарадея.

3. Что такое грамм-эквивалент вещества? Грамм-атом? Моль? Атомный вес?
4. Объяснить процесс диссоциации.
5. От чего зависит проводимость электролитов?
6. Сформулируйте закон Ома для электролитов.

Контрольные вопросы

1. Что такое электролиз?
2. Чем вызвано ограничение допустимой плотности тока в данной установке?
3. Физический смысл постоянной Фарадея.
4. Объясните устройство гальванических элементов.

Лабораторная работа № 1.9

Исследование зависимости полезной мощности электрического тока от нагрузки

Цель работы: изучить зависимость полезной мощности электрического тока от нагрузки и построить графики.

Приборы и материалы: источник тока, реостат, амперметр, вольтметр, провода, ключ.

Краткая теория вопроса

Если источник постоянного тока с ЭДС E и внутренним сопротивлением r замкнуть на внешнее сопротивление R , то в цепи выделяется мощность $P_{\text{полная}} = IE = I^2 R + I^2 r$, где I - ток в цепи.

Полезная мощность выделяется на R :

$$P_R = I^2 R = IE - I^2 r = I(E - Ir) = IU,$$

где U - напряжение на внешнем участке цепи.

Ток в цепи может быть определен по закону Ома: $I = \frac{E}{R+r}$. При коротком замыкании ($R=0$) ток достигает своего максимального значения: $I_{\text{max}} = \frac{E}{r}$, где r – внутреннее сопротивление источника.

Исследуя выражение для полезной мощности, можно установить следующую зависимость: при $R \rightarrow \infty$ (разомкнутая цепь) $I=0$; при $R=0$ (короткое замыкание) $I=I_{\text{max}}$, но $U=0$ и $P_R=0$. Значит, при каких-то значениях тока $I=I_1$ и внешнего сопротивления $R=R_1$ полезная мощность проходит через максимум. Дифференцируя выражение P_R по R и приравнявая первую производную к нулю, можно определить I_1 и R_1 , при которых P_R принимает максимальное значение.

Очевидно, $I_1 = \frac{E}{2R} = \frac{I_{\text{max}}}{2}$, а $R_1 = r$, т.е. максимум полезной мощности

сти

наступает при равенстве внутреннего сопротивления источника и сопротивления нагрузки, и при токе, равном половине тока короткого замыкания. При этом: $P_{\text{max}} = \frac{E^2}{4r}$.

При практическом использовании источника тока важно знать не только полезную мощность, которую можно от него получить, но также и его КПД. КПД источника определяется отношением полезной мощности к полной:

$$\eta = \frac{P_R}{P_{\text{вс}}}} = \frac{IU}{EI} = \frac{U}{E}$$

или

$$\eta = \frac{EI - I^2 r}{EI} = \frac{IU}{EI} = \frac{U}{E}.$$

Значит, $\eta \rightarrow 1$ при $I \rightarrow 0$), т.е. при очень большом сопротивлении цепи. При увеличении тока КПД уменьшается по линейному закону и обращается в 0 при коротком замыкании.

Условия получения наибольшей полезной мощности и максимального КПД несовместны, т.к. P_R достигает максимального значения при $I = I_1 = \frac{E}{2r}$, КПД при этом $\eta = 1/2$. Когда же $\eta \rightarrow 1$, $P_R \rightarrow 0$.

В силовых электрических установках важнейшим является требование получения высокого КПД, а для этого надо, чтобы $\frac{Ir}{E} \ll 1$. Это может быть при малом значении внутреннего сопротивления источника, r по сравнению с сопротивлением нагрузки R .

Содержание учебных заданий

Задание 1. Измерение P_R при разных R

1. Соберите электрическую цепь по схеме (рис. 1).

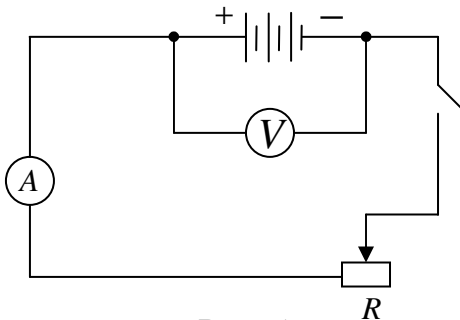


Рис. 1

2. При разомкнутом ключе измерьте ЭДС источника.

3. Замкнув ключ и меняя сопротивление R , произведите несколько измерений токов и напряжений (в том числе и I_{max}).

4. Для каждого значения тока вычислите $P_{\text{полн}}$, P_R и η .

5. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу:

№ п/п	E , В	r , Ом	I , А	U , В	$P_{\text{полн}}$, Вт	P_R , Вт	η , %	I_{max} , А

6. Результаты, полученные на основе опытных данных, сравните с теоретическими положениями.

Задание 2. Построение графиков.

1. На основании данных из таблицы постройте на одном чертеже графики:

$$P_R=f(I), \eta =f(I), P_{полн}=f(I).$$

2. Поясните полученные функциональные зависимости. Сделайте вывод о соответствии экспериментальных и теоретических данных.

Вопросы к допуску

1. Дайте определения мощности и КПД в цепи электрического тока.
2. Какова зависимость полезной мощности от сопротивления нагрузки?

Контрольные вопросы

1. Как изменяется P_R при изменении силы тока от 0 до I_{max} ?
2. Почему изменяется напряжение на зажимах источника при изменении нагрузки?
3. Что называется напряжением на участке цепи (однородном и неоднородном)?
4. Что такое короткое замыкание? Совершает ли работу источник в данном случае?

МАГНЕТИЗМ

Лабораторная работа № 2.1

Изучение магнитного поля

Цель работы: исследование спектров магнитного поля контуров с током различной формы, соленоида и постоянных магнитов.

Приборы и материалы: пластины из оргстекла с контурами различной формы, постоянные магниты, железные опилки, источник питания.

Краткая теория вопроса

Магнитное поле. Вокруг неподвижных электрических зарядов существует только электрическое поле. Движущиеся электрические заряды и изменяющиеся электрические поля создают в окружающем пространстве магнитное поле. Через магнитное поле осуществляются взаимодействия электрических токов, постоянных магнитов и токов с магнитами. Электрические взаимодействия токов пренебрежимо малы по сравнению с их магнитными взаимодействиями.

В физике магнитное поле характеризуют векторной величиной, называемой магнитной индукцией \vec{B} .

Магнитная индукция – векторная физическая величина, численно равная силе, с которой магнитное поле действует на единицу длины прямолинейного проводника с током (равным единице силы тока), расположенном перпендикулярно направлению поля.

$$\vec{B} = \frac{\Delta\vec{F}}{I\Delta l}.$$

За единицу магнитной индукции в системе СИ принята тесла (Тл), равная индукции однородного магнитного поля, действующего с силой 1 Н на каждый метр длины прямолинейного проводника с током 1 А, если проводник расположен перпендикулярно направлению поля.

Размерность единицы магнитной индукции: $[Тл] = [Н]/[А] \cdot [м] = \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$.

Вектор \vec{B} направлен в каждой точке линии магнитной индукции по касательной к ней. Индукция \vec{B} характеризует силовое действие магнитного поля на ток. Аналогичную роль играет напряженность \vec{E} электростатического поля, характеризующая его силовое действие на заряд. Магнитное поле удовлетворяет принципу суперпозиции:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots$$

Магнитное поле прямолинейного тока наблюдают, продев сквозь расположенный горизонтально лист картона вертикальный прямолинейный провод, представляющий собой часть электрической цепи. Опилки-стрелочки при замыкании тока в цепи и после легкого постукивания по листу образуют цепочки в виде окружностей с общим центром на оси тока. Поэтому магнитное поле электрического тока графически изображают в виде линий магнитной индукции, аналогичных линиям напряженности электростатического поля. Линии магнитной индукции представляют собой окружности с центрами на оси тока, расположенные в плоскостях, перпендикулярных направлению тока. Их направление определяют по правилу правого винта: при поступательном движении винта в направлении тока его вращение указывает направление магнитного поля этого тока.

Различие между линиями магнитной индукции и линиями напряженности электростатического поля: первые замкнуты и окружают электрический ток; вторые – разомкнуты, начинаются на поверхности положительно заряженных тел и оканчиваются на поверхности отрицательно заряженных.

Направление магнитного поля витка с током можно определить также по правилу правого винта: если поместить острие винта в центре витка и вращать винт в направлении тока, то его поступательное движение укажет направление линий магнитной индукции.

Линии магнитной индукции катушки с током, или соленоида, входят в катушку со стороны ее южного магнитного полюса и выходят из северного. Внутри катушки, длина которой во много раз больше ее диаметра, магнитное поле однородно, т. е. линии магнитной индукции параллельны и плотность их одинакова.

Магнитное поле постоянного магнита можно наблюдать, насыпав железные опилки на лист картона, положенный на магнит. Вне прямого магнита оно похоже на магнитное поле катушки с током. С помощью железных опилок можно наблюдать магнитное поле только вне постоянного магнита.

Магнетизм. Магнетизм (от греческого *magnetis* — магнит), проявляется в макромасштабах как взаимодействие между электрическими токами, между токами и магнитами (то есть телами с магнитным моментом) и между магнитами. В наиболее общем виде магнетизм можно определить как особую форму материальных взаимодействий, возникающих между движущимися электрически заряженными частицами. Передача магнитного взаимодействия, реализующая связь между пространственно-разделёнными телами, осуществляется особым материальным носителем — магнитным полем. Оно представляет собой наряду с электрическим полем одно из проявлений электромагнитной формы движения материи. Между магнитным и электрическим полями нет полной симметрии. Источниками электрического поля являются электрические заряды, которыми обладают элементарные частицы — электроны, протоны, мезоны и другие. Аналогичных магнитных зарядов пока не наблюдали в природе, хотя гипотезы об их существовании высказывались.

Источником магнитного поля является движущийся электрический заряд, то есть электрический ток. В атомных масштабах для электронов и нуклонов (протонов, нейтронов) имеются два типа микроструктурных токов — орбитальные, связанные с переносным движением центра тяжести этих частиц, и спиновые, связанные с внутренними степенями свободы их движения.

Количественной характеристикой магнетизма частиц являются их орбитальный и спиновый магнитные моменты. Поскольку все микроструктурные элементы веществ — электроны, протоны и нейтроны — обладают магнитными моментами, то и любые их комбинации — атомные ядра и электронные оболочки — и комбинации их комбинаций, то есть атомы, молекулы и макроскопические тела, могут в принципе быть источниками магнетизма. Таким образом, магнетизм веществ имеет универсальный характер.

Известны два основных эффекта воздействия внешнего магнитного поля на вещества. Во-первых, диамагнитный эффект, являющийся следствием закона индукции Фарадея: внешнее магнитное поле всегда создаёт в веществе такой индукционный ток, магнитное поле которого направлено против поля его создающего (правило Ленца). Поэтому создаваемый внешним полем диамагнитный момент вещества всегда отрицателен по отношению к этому полю.

Во-вторых, если атом обладает отличным от нуля магнитным моментом (спиновым, орбитальным или тем и другим), то внешнее поле будет стремиться ориентировать его вдоль своего направления. В результате возникает параллельный полю положительный момент, который называют парамагнитным.

Существенное влияние на магнитные свойства вещества могут оказать также внутренние взаимодействия (электрической и магнитной природы) между атомными магнитными моментами. В некоторых случаях благодаря этим взаимодействиям оказывается энергетически выгоднее, чтобы в веществе существовал самопроизвольный (не зависящий от внешнего поля) атомный магнитный порядок. Вещества, в которых атомные магнитные моменты расположены параллельно друг другу, называются ферромагнетиками; соответственно антиферромагнетиками называются вещества, в которых соседние атомные моменты расположены антипараллельно. Сложность атомной структуры веществ, построенных из огромного числа атомов, приводит к практически неисчерпаемому разнообразию их магнитных свойств. При рассмотрении магнитных свойств веществ для последних употребляют общий термин — «магнетики». Взаимосвязь магнитных свойств веществ с их немагнитными свойствами (электрическими, механическими, оптическими и т.д.) позволяет очень часто использовать исследования магнитных свойств как источник информации о внутренней структуре микрочастиц и тел макроскопических размеров. Широкий диапазон явлений магнетизма, простирающийся от магнетизма элементарных частиц до магнетизма космических тел (Земли, Солнца, звёзд и других), обуславливает большую роль магнетизма в явлениях природы, в науке и технике.

Магниты. Магнит – это объект, сделанный из определенного материала, который создает магнитное поле. Каждый магнит имеет один "северный" (N) и один "южный" (S) полюс. Ученые условились, что линии магнитного поля выходят из "северного" конца магнита и входят в "южный" конец магнита. Это пример магнитного диполя ("ди" означает два, диполь – два полюса). Если Вы возьмете кусок магнита и разломите его на два кусочка, каждый кусочек опять будет иметь "северный" и "южный" полюс. Если Вы вновь разломите получившийся кусочек на две части, каждая часть опять будет иметь "северный" и "южный" полюс. Неважно, как малы будут образовавшиеся кусочки магнитов – каждый кусочек всегда будет иметь "северный" и "южный" полюс. Невозможно добиться, чтобы образовался магнитный монополюс ("моно" означает один, монополюс – один полюс). По крайней мере, такова современная точка зрения на данное явление.

Когда ферромагнитный материал помещается около магнита, он начинает притягиваться по направлению к области с наибольшим магнитным полем. Это то, с чем мы хорошо знакомы, наблюдая, как магнит собирает кнопки или скрепки. Железо, кобальт, никель, взвеси и сплавы из этих элементов представляют явление ферромагнетизма вследствие взаимодействия электронов с соседними электронами.

Электроны выстраиваются, создавая магнитные домены, формирующие постоянный магнит. Если кусок железа поместить внутри сильного магнитного поля, магнитные домены вытянутся в направлении силовых линий поля и сожмутся в направлении, перпендикулярном магнитному полю.

Существуют сотни способов использования магнитов. В общем случае, магниты используются для удержания, разделения, контроля, транспортировки и поднятия продукции, а также для преобразования электрической энергии в механическую и обратно.

Содержание учебных заданий

1. На пластинку из оргстекла насыпьте железные опилки. По проводнику пропустите ток.
2. Слегка потряхивая пластинку, добейтесь упорядоченного расположения опилок.
3. Выполните данное задание для всех контуров и постоянных магнитов.
4. Схематически изобразите форму линий магнитной индукции, указав их направление.

Вопросы к допуску

1. Что называется магнитным полем? Какие основные характеристики магнитного поля вы знаете?
2. Какие источники магнитного поля вы знаете?
3. Что определяют сила Лоренца и сила Ампера. Как определяется направление действия этих сил?

Контрольные вопросы

1. Как выглядит магнитное поле прямолинейного проводника с током, контура, соленоида, постоянного магнита.
2. Что такое магнетизм, магнитный момент.
3. В чем различие между ферромагнетизмом, парамагнетизмом и диамагнетизмом.
4. Почему постоянные магниты создают магнитное поле?

Лабораторная работа № 2.2

Определение горизонтальной составляющей напряжённости магнитного поля Земли

Цель работы: определить горизонтальную составляющую напряжённости магнитного поля Земли в данном месте.

Приборы и материалы: тангенс-буссоль, источник тока, амперметр, реостат (магазин сопротивлений).

Краткая теория вопроса

1. Магнитное поле Земли.

Магнитное поле Земли представляет собой как бы огромный магнит, полюса которого лежат вблизи географических полюсов: вблизи северного географического полюса расположен южный магнитный S, а вблизи южного географического - северный магнитный полюс N, (рис. 1).

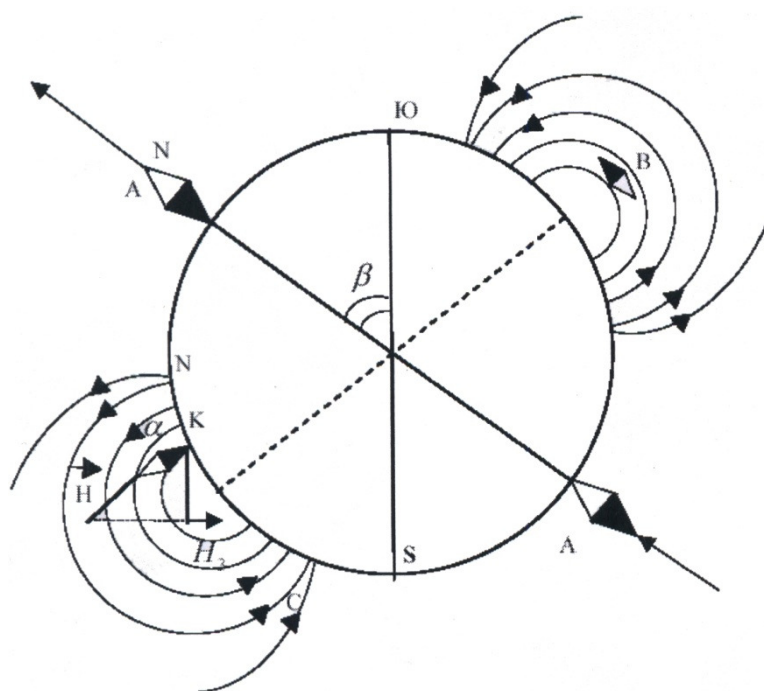


Рис. 1

Магнитное поле Земли на экваторе направлено горизонтально (точка B), а у магнитных полюсов - вертикально (точка A). В остальных точках земной поверхности магнитное поле Земли направлено под некоторым углом (точка K).

Величину проекции напряжённости земного магнитного поля \vec{H} на горизонтальную плоскость называют

горизонтальной составляющей магнитного поля Земли \vec{H}_3 . Направление этой составляющей принимается за направление магнитного меридиана, а вертикальная плоскость, проходящая через него, называется плоскостью магнитного меридиана. Угол α между направлением

магнитного поля Земли и горизонтальной плоскостью называют углом наклоения, а угол β между географическим и магнитным меридианом - углом склонения.

Магнитная стрелка, которая может вращаться лишь около вертикальной оси, будет отклоняться в горизонтальной плоскости и устанавливаться в плоскости магнитного меридиана под действием горизонтальной составляющей магнитного поля Земли (H_3).

Отметим, что магнитная стрелка или рамка с током устанавливается в определенном направлении под действием вектора индукции магнитного поля, а не вектора напряженности. Но в силу установившейся традиции обычно говорят о векторе напряженности. Итак, стрелка компаса под действием горизонтальной составляющей магнитного поля Земли устанавливается в плоскости магнитного меридиана. Если с помощью кругового тока около стрелки создать еще одно магнитное поле, то стрелка установится по направлению равнодействующей обоих магнитных полей. В соответствии с принципом суперпозиции

$$\vec{H}_p = \vec{H}_1 + \vec{H}_3, \quad (1)$$

где H_1 - поле созданное током в катушке; H_3 - горизонтальная составляющая магнитного поля Земли. Так как поле кругового тока не трудно вычислить, зная ток, то горизонтальную составляющую земного магнитного поля можно определить по углу отклонения стрелки и величине поля тока.

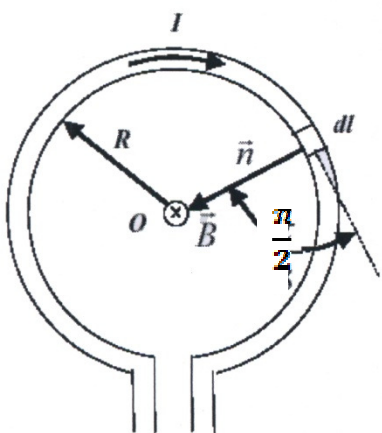


Рис. 2

2. Магнитное поле кругового тока

Индукцию и напряжённость магнитного поля в центре O кругового

витка радиусом R , по которому протекает ток I (рис. 2) найдем по закону Био-Савара-

Лапласа (2). Магнитная индукция $d\vec{B}$ поля,

создаваемого в точке O элементом dl витка с током, равна:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0 I dl \sin(\vec{dl}, \vec{r})}{4\pi r^2} \quad (2)$$

В рассматриваемом примере радиус-вектор r перпендикулярен к элементу тока dl , а по модулю равен радиусу витка, так что $\sin(\vec{dl}, \vec{r}) = 1$ и $r = R$

Поэтому $d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0 I dl}{4\pi R^2}$. Все векторы $d\vec{B}$ магнитных полей, создаваемых

в точке O различными участками dl кругового витка с током, направ-

лены перпендикулярно к плоскости чертежа "от нас". Поэтому индукция результирующего поля в точке O равна:

$$B = \int_0^B dB = \int_0^{2\pi R} \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{R^2} dl = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{R^2} \cdot \int_0^{2\pi R} dl,$$

$$B = \mu\mu_0 \cdot \frac{I}{2R}. \quad (3)$$

Напряженность магнитного поля в центре кругового витка с током имеет вид:

$$H = \frac{B}{\mu\mu_0} = \frac{I}{2R}. \quad (4)$$

Содержание учебных заданий

1. Описание установки.

В данной работа при определении горизонтальной составляющей магнитного поля Земли, пользуются прибором, который называется тангенс-буссолью. Она представляет собой плоскую вертикальную катушку радиуса R с некоторым числом витков N . В центре катушки в горизонтальной плоскости расположен компас. Величина радиуса катушки и число витков указаны на установке. Магнитная стрелка компаса при отсутствии тока в катушке будет расположена по магнитному меридиану Земли.

Поворотом катушки около вертикальной оси можно добиться совмещения плоскости катушки с плоскостью магнитного меридиана. Если после такой установки катушки по ней пропустить ток, то магнитная стрелка повернется на некоторый угол α . Объясняется это тем, что на магнитную стрелку будут действовать два поля: первое - горизонтальная составляющая напряженности поля Земли H_z и второе - созданное током - H_I (рис. 3).

Под действием этих полей магнитная стрелка займет такое положение равновесия, при котором равнодействующая двух полей будет совпадать с линией, соединяющей полюса стрелки. На рис. 3 NS направление магнитного меридиана Земли; A и B сечения витка катушек, горизонтальной плоскостью; $N_I S_I$ - магнитная стрелка компаса, помещенная в центре катушки; H_z - вектор горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли; вектор напряженности магнитного поля, созданного током в катушке (определяется по правилу буравчика).

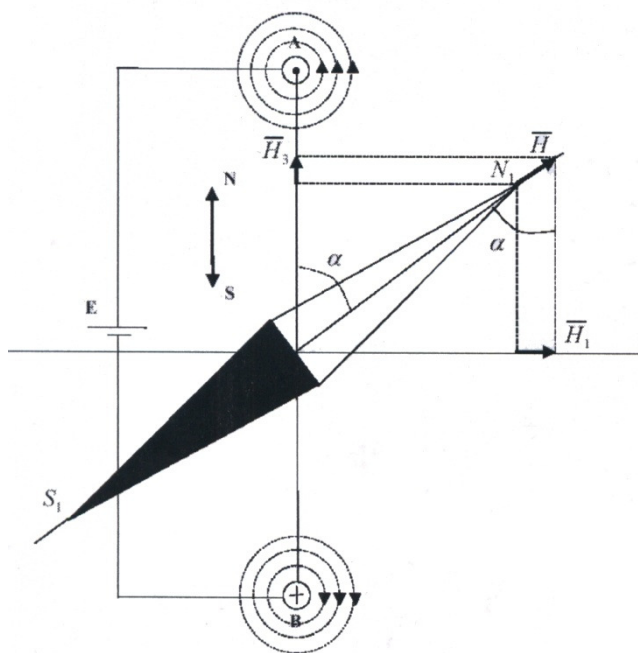


Рис. 3

Обратите внимание на расположение магнитных силовых линий вокруг проводника с током; в точке *A* ток идет на нас (показан точкой), в точке *B* ток идет от нас (показан крестиком). Магнитное поле тока (вектор H_1 направлено перпендикулярно плоскости витков. Из рис. 3 видно, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H_1}{H_c}. \quad (5)$$

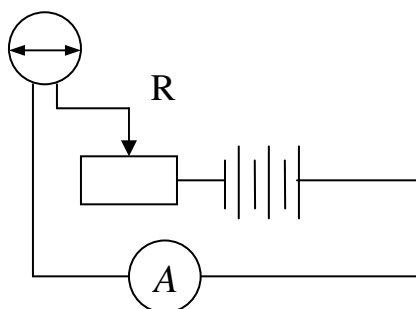
Величина напряженности поля H_1 созданного током в центре одного витка, вычисляется по закону Био-Савара-Лапласа для случая кругового

тока по формуле (4) $H_1 = \frac{I}{2R}$ где I - ток, текущий в витке, R - радиус витка катушки. Подставляя значение H_1 в формулу (5), получим:

$$H_3 = \frac{I}{2R \operatorname{tg} \alpha} \quad (6)$$

Эта формула является расчётной для опытного определения H_3 (для $N=1$)

2. Выполнение работы



1. Установить магнитную стрелку (компас) в центре тангенс-буссоли.
2. Установить тангенс-буссоль так, чтобы магнитная стрелка располагалась в плоскости её витков.
3. Собрать цепь по схеме.
4. Пользуясь реостатом, изменять ток, проходящий по витку, отсчитывая каждый раз показания амперметра и углы отклонения стрелки компаса. Должно быть сделано 8-10 измерений при углах отклонения, не превышающих 60-65 градусов.
5. Все наблюдения и результаты вычислений записывают в таблицу.

Должно быть сделано 8-10 измерений при углах отклонения, не превышающих 60-65 градусов.

Должно быть сделано 8-10 измерений при углах отклонения, не превышающих 60-65 градусов.

Все наблюдения и результаты вычислений записывают в таблицу.

№ п/п	I , А	α_1 , град	α_2 , град	$\alpha_{\text{ср}}$, град	H_3 , Тл

α_1 - угол отклонения стрелки при одном направлении тока,

α_2 - угол отклонения стрелки при противоположном направлении тока.

6. Изменить направление тока и повторить измерения для тех же абсолютных значений тока.

Вопросы к допуску

1. Что представляет собой магнитное поле Земли?
2. Что такое напряжённость и индукция магнитного поля? Как они связаны между собой?
3. Назовите единицы измерения магнитной индукции и напряжённости и их производных.
3. Как определяется магнитное поле в центре кругового витка?

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте принцип суперпозиции поля.
2. В чем заключается вихревой характер магнитного поля?
3. В чем состоит принципиальное отличие линий магнитной индукции стационарных магнитных полей от силовых линий электростатических полей?
4. Как определяется магнитное поле проводников с током, контуров с током катушек?

Лабораторная работа № 2.3

Определение индуктивности катушки методом измерения ее полного сопротивления

Цель работы: экспериментальное определение индуктивности 2-х катушек и коэффициента их взаимной индукции.

Приборы и материалы: исследуемые катушки, состоящие из большого числа витков медной проволоки, выдвигающийся сердечник для одной катушки, амперметр переменного тока на 5А, вольтметры на 25 и 150 В, реостат на 80 Ом, ключ.

Краткая теория вопроса

Если в цепь переменного тока частоты f включена катушка, активное сопротивление которой R и индуктивность L , то ее полное сопротивление

$$Z = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}, \text{ откуда } L = \sqrt{Z^2 - R^2} / (2\pi f), \quad (1)$$

Следовательно, определив полное сопротивление Z катушки, ее активное сопротивление R и частоту f , можно определить индуктивность катушки. Если катушка не имеет железного сердечника, то ее индуктивность зависит только от ее геометрических размеров и числа витков, т.е. является величиной постоянной. Если же катушка имеет железный сердечник, то ее индуктивность зависит еще и от магнитной проницаемости железа. Т.к. величина магнитной проницаемости зависит от напряженности магнитного поля, а, следовательно, и от тока в катушке, то и индуктивность последней зависит от тока.

Если имеются 2 катушки, соединенные последовательно, то индуктивность такой системы равна:

$$L = L_1 + L_2 \pm 2M, \quad (2)$$

где L_1 и L_2 - индуктивности 1-й и 2-й катушек, M - коэффициент их взаимной индукции. Знак "+" имеет место в случае, если магнитные поля катушек усиливают друг друга, знак "-" - когда ослабляют.

Содержание учебных заданий

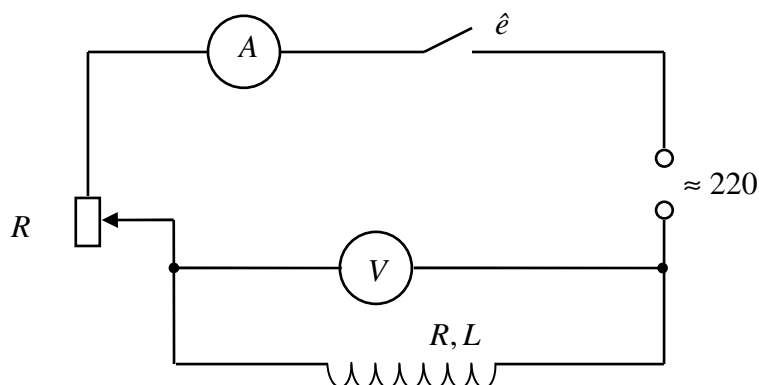
Задание 1. Определение активного сопротивления катушек.

1. Существует несколько способов измерения активного сопротивления (например, с помощью мостовой схемы). Можно рассчитать R по закону Ома для участка цепи, если включить катушку в цепь постоянного тока и измерить ток в цепи и падения напряжения на катушке.

2. Активное сопротивление катушки можно измерить с помощью мультиметра.

Задание 2. Определение индуктивности катушки без сердечника.

1. Соберите цепь по схеме:



2. Установите движок реостата на наибольшее сопротивление, замкните цепь. Снимите показания приборов.

3. Определите полное сопротивление катушки без сердечника по формуле

$$Z = U_{\text{эф}} / I_{\text{эф}}$$

4. Измерьте, таким образом, полное сопротивление каждой из двух данных катушек 3 раза при разных токах в цепи.

5. Найдите среднее значение полного сопротивления для каждой катушки и определите их индуктивности по формуле (1).

6. Результаты измерения занесите в таблицу:

№	$U_{\text{эф}1}$	$I_{\text{эф}1}$	Z_1	$Z_{\text{ср}1}$	L_1	$U_{\text{эф}2}$	$I_{\text{эф}2}$	Z_2	$Z_{\text{ср}2}$	L_2

Задание 3. Определение полного сопротивления и индуктивности одной катушки с полностью вдвинутым сердечником.

1. Включите в собранную цепь катушку с полностью вдвинутым сердечником.

2. Показания вольтметра снимите 3 раза для токов 2 А; 2,5 А; 3 А.

3. В каждом из этих случаев найдите Z и L , сравните их значения.

4. Заполните таблицу:

№	$U_{\text{эф}}$	Z	$I_{\text{эф}}$	L
1				

2				
3				

Задание 4. Определение коэффициента взаимной индукции 2-х данных катушек без сердечника при их последовательном соединении.

1. Соединив катушки последовательно один раз так, чтобы их поля усиливали друг друга, а другой раз - ослабляли и, включив их в цепь определить в каждом из этих случаев их общую индуктивность. Измерения проводить, так как сказано в задании 1. Результаты измерений занесите в таблицу:

№	Взаимное усиление					Взаимное ослабление							
	$U_{эф}$	$I_{эф}$	Z	$Z_{ср}$	L_1	$U_{эф}$	$I_{эф}$	Z	$Z_{ср}$	L_2	M_1	M_1	$M_{ср}$
1													
2													
3													

Заметим, что вывод о взаимном усилении или ослаблении магнитных поле, соединенных катушек можно легко сделать по результатам вычислений и сделать заключение о совпадении или несовпадении направлений обмоток катушек в каждом из проделанных опытов по их последовательному соединению. Практически труднее заранее определить в каком случае будет усиление (ослабление) полей катушек.

2. Вычислите взаимную индуктивность по формуле (2) для случаев усиления и ослабления полей катушек и найдите его среднее значение.

3. Пусть L_1 - общая индуктивность катушек в случае взаимного ослабления полей, L_2 - в случае их усиления. Выведете формулу для вычисления коэффициента взаимной индукции M и найдите его значение. Результаты занесите в таблицу.

4. Проверьте, справедливо ли неравенство: $M \leq \sqrt{L_1 L_2}$. Оцените погрешности измерений в каждом случае.

Вопросы к допуску

1. Что называется индуктивностью проводника? От чего зависит индуктивность катушки?
2. Что такое взаимная индуктивность и от чего она зависит?
3. Как следует соединить катушки, чтобы их поля усиливали (ослабляли) друг друга?
4. Почему индуктивность катушки с сердечником более близка к расчетной, чем без него?

Контрольные вопросы

1. Постройте векторные диаграммы в масштабе а) для каждой катушки; б) для катушки с сердечником; в) для обеих катушек, включенных последовательно и навстречу.
2. В каком случае сдвиг фаз наибольший (наименьший)? Как это объяснить?
3. Как определяется магнитная индукция на оси катушки?
4. Почему приборы переменного тока измеряют действующее значение тока и напряжения?

Лабораторная работа № 2.4

Использование явления электромагнитной индукции для изучения магнитного поля

Цель работы — изучение закона электромагнитной индукции и его применение для исследования пространственного распределения магнитного поля.

Оборудование: экспериментальная установка, микровольтнаноамперметр Ф-136, генератор звуковой учебный.

Краткая теория вопроса

Согласно закону электромагнитной индукции, ЭДС индукции ε , возникающая в замкнутом контуре, равна взятой с обратным знаком скорости изменения потока Φ вектора магнитной индукции B через поверхность, ограниченную этим контуром:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

При этом, в частности, изменение потока Φ может обеспечиваться внешним контуром с изменяющимся в нем током. Теория этого явления, называемого электромагнитной индукцией в связанных контурах, подробно описана в [1, 2]. Рассмотрим важные для практики стороны этого явления.

Если в первом контуре протекает ток $I_1(t) = I_{01} \sin(\omega t)$, то во втором контуре поток будет изменяться по закону

$$\Phi_2(t) = L_{12} I_1(t) = L_{12} I_{01} \sin(\omega t) \quad (2)$$

где L_{12} — коэффициент взаимной индукции контуров 1 и 2, зависящий от формы и взаимного расположения контуров. Тогда с учетом (1) ЭДС индукции ε в контуре 2 выражается формулой

$$\varepsilon_2(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = -\omega L_{12} I_{01} \cos(\omega t) = -\varepsilon_{02} \cos(\omega t) \quad (3)$$

Как видно из (3), величина ε_{02} зависит от величин L_{12} , I_{01} и ω , что дает возможность определить одну из них, зафиксировав остальные. Именно такая схема является основой многих современных измерительных приборов — электронных микрометров, измерителей силы или давления (при использовании дополнительной пружины), амперметров переменного тока, частотомеров. Точность и чувствительность таких простых устройств очень высока, например смещения можно измерять с помощью описанной ниже лабораторной установки с погрешностью до долей микрометра, причем результаты измерений по-

лучают сразу в виде электрического сигнала, что облегчает автоматизацию измерений.

Важная для практики задача измерения магнитной индукции неоднородного поля $B(r, t)$, создаваемого контуром (или их сложной системой), может быть решена с помощью явления взаимной индукции. Для этого необходимо второй контур сделать "пробным" — достаточно малым, чтобы магнитную индукцию B_1 , создаваемую первым контуром в каждой точке поверхности, ограниченной вторым, можно было считать примерно постоянной. На первый контур следует подать переменный ток $I_1(t) = I_{01} \sin(\omega t)$, с тем, чтобы $B(r, t)$ изменялось как $B_1(r, t) = B_{01}(r) \sin(\omega t)$. Тогда ЭДС индукции в пробном контуре

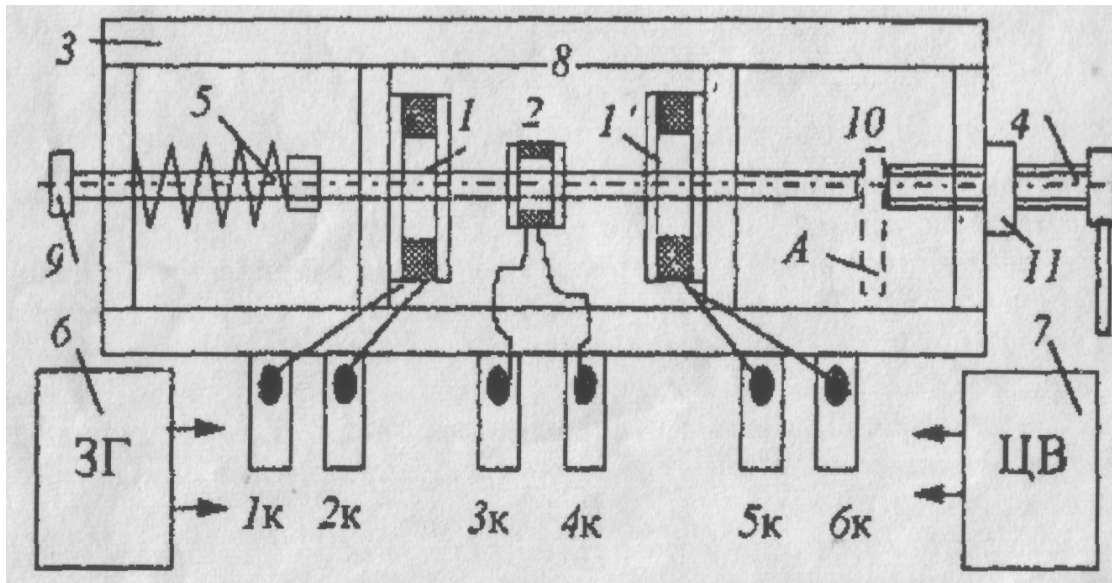
$$\varepsilon_2(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = -S \frac{dB}{dt} = -\omega S B_{01}(r) \cos(\omega t) \quad (4)$$

окажется пропорциональной $B_{01}(r)$. Такой способ измерения позволяет очень просто получать распределение индукции магнитного поля в относительных единицах, что бывает нужно для проверки однородности магнитного поля или исследования закономерностей его изменения в пространстве. Ясно, что таким способом можно определять и относительные изменения амплитуды I_{01} в удаленном недоступном контуре

Содержание учебных заданий

Лабораторная установка

Схема лабораторной установки приведена на рисунке. Используются одинаковые жестко закрепленные на станине 3 соосные контуры — катушки 1 и 1' и подвижный небольшой соосный с ними контур — катушка 2, который может перемещаться вдоль этой оси. Перемещение контура 2 осуществляется микрометрическим винтом 4 с шагом винта 1 мм, возможные зазоры и люфты уничтожаются постоянным прижимом с помощью пружины 5. Контур 1, 1', 2 соединены с клеммами 1к — 6к, через которые их можно по-разному соединять как друг с другом, так присоединять к источнику переменного напряжения — звуковому генератору 6 или измерительному прибору — цифровому вольтметру 7. Цифровой вольтметр имеет входное сопротивление намного больше, чем сопротивление контуров, поэтому он позволяет измерять ЭДС индукции ε без введения поправок на их внутреннее сопротивление. Установка позволяет изучать взаимную индукцию в двух контурах 1 и 2, причем контур 1 может быть составлен из двух последовательно включенных контуров 1 и 1'. Использование



составного контура $1+1'$ широко используется на практике. Дело в том, что одна катушка 1 создает очень неоднородное поле B на своей оси. Зависимость $L_{12}(x)$ при этом получается сильно нелинейной, что осложняет калибровку приборов.

С целью получения зависимости $L_{12}(x)$, максимально приближенной к линейной, используют два одинаковых соосных контура, создающих противоположно направленные поля (у нас — катушки 1 и $1'$), и одну измерительную катушку 2. Часто роль измерительной катушки играет контур $1+1'$, а роль катушки с током — катушка 2. Такое устройство называют дифференциальным трансформатором, поскольку его можно считать составленным из двух трансформаторов (без сердечника) — $1+2$ и $1'+2$, вторичные обмотки 1 и $1'$ которых включены навстречу друг другу.

Часто необходимо получать более однородное поле B . Для этого используют два соосных, создающих сонаправленные поля контура, у нас — катушки 1 и $1'$, называемые катушками Гельмгольца.

Задание 1. Изучение распределения магнитного поля на оси катушки.

Клеммы 1к и 2к исследуемой катушки 1 присоединить к генератору, а клеммы 3к и 4к контура 2 — к вольтметру, клеммы 5 и 6 не использовать. Контур 2 установить винтом 4 на указанном, на установке расстоянии от средней точки 8. Частоту генератора задать равной 800 Гц. Установить выходное напряжение генератора, указанное на установке.

номер точки i	x_i , мм	$\epsilon_2 = U_2(x_i)$, мВ (для задания 1)	$\epsilon_2 = U_2(x_i)$ мВ (для задания 2)	$\epsilon_2 = U_2(x_i)$ мВ (для задания 3)

1.				
2.				
...				

Заносить показания напряжения с вольтметра $U_2(x)$ (приблизительно равное ε_2) в третий столбец таблицы, перемещая винтом 4 контур 2 с шагом 2 мм к центральной точке 8. Число точек x_i указано на установке. Величину U_2 измерять с максимально возможной точностью — наибольшим числом значащих цифр. При перемещении контура 2 винтом 4 удобно поворачивать его на целый оборот, останавливая указатель винта 4 в нижнем вертикальном положении около отметки на корпусе установки.

Задание 2. Изучение распределения магнитного поля на оси катушек Гельмгольца.

Соединить клеммы 2к и 5к проводником, клеммы 1к и 6к присоединить к генератору, а клеммы 3к и 4к контура 2 — к вольтметру. Снять зависимость $U_2(x)$, как в задании 1, результаты занести в четвертый столбец таблицы.

Задание 3. Исследование дифференциального трансформатора.

Соединить клеммы 2к и 6к проводником, клеммы 1к и 5к присоединить к генератору, а клеммы 3к и 4к контура 2 — к вольтметру. Снять зависимость $U_2(x)$ как в задании 1, результаты занести в пятый столбец таблицы. Следует учесть, это приблизительно в средней точке (где $U_2(x)$ близко к нулю) необходимо поменять знак $U_2(x)$, поскольку в этом месте фаза потока Φ_2 и ЭДС ε_2 меняются на π (левее этой точки (см. рисунок) поток от катушки 1 превосходит противоположно направленный поток от катушки 1', а правее этой точки — наоборот, поэтому результирующий поток катушек от 1 и 1' меняет направление, а с ним и ЭДС ε_2).

Обработка и анализ результатов измерений

1. По данным таблицы построить графики $U_2(x)$ соответственно для заданий 1-3. Согласно изложенному в теоретической части, зависимости $U_2(x)$, $L_{12}(x)$, $B_1(x)$, нормированные на соответствующие им максимальные значения $\max [U_2(x)]$, $\max [L_{12}(x)]$, $\max [B_1(x)]$, эквивалентны.

2. По графику задания 2 определить диапазон положений x катушки 2, в котором $U_2(x)$, а значит и индукция поля В катушек Гельмгольца изменяются в пределах 10 % от минимального значения.

3. По построенному для задания 3 графику оценить область изменения величины x , в которой зависимость $U_2(x)$ изменяется линейно.

Вопросы к допуску

1. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
2. Как определяется ЭДС индукции? Сформулируйте правило Ленца.
3. Ознакомьтесь с описанием приборов (Ф-136, звуковой генератор).

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление самоиндукции? Что такое индуктивность?
2. Объяснить понятие взаимной индукции и коэффициента взаимной индукции контуров. Чем определяется значение этой величины?
3. Опишите устройство дифференциального трансформатора. Его назначение.
4. Объяснить принцип измерения однородности магнитного поля с помощью явления электромагнитной индукции.

Лабораторная работа № 2.5

Изучение гистерезиса ферромагнитных материалов

Цель работы: изучение гистерезиса ферромагнитных материалов, расчет и графическое построение основной кривой намагничивания, расчет работы перемагничивания.

Оборудование: генератор, электронный осциллограф, ФПЭ-07 – модуль, соединительные провода.

Краткая теория вопроса

Все вещества обладают магнитными свойствами, т.е. являются магнетиками. Зависимость намагниченности I магнетиков от напряжения и внешнего магнитного поля изображена на рис. 1.а.

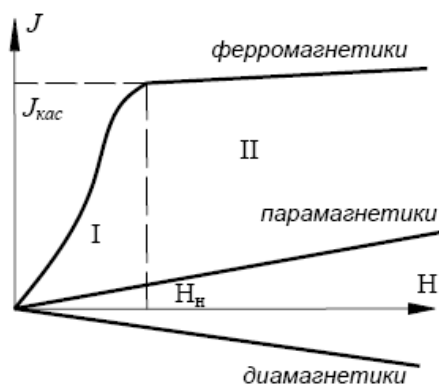


рис.1,а

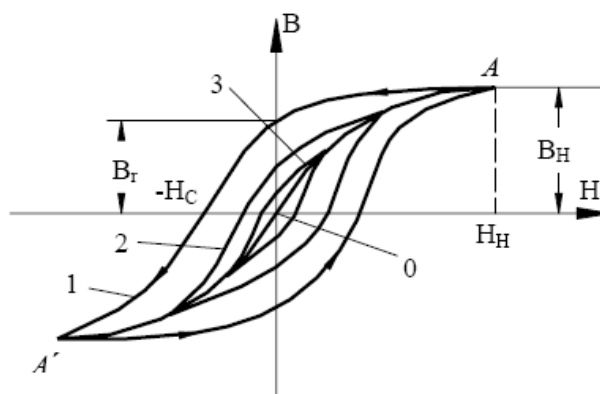


рис.1,б

На рис.1,а приведена основная кривая намагничивания (намагничивания) для ферромагнетика (кривая 1) и для сравнения - соответствующие зависимости для парамагнетика (кривая 2) и диамагнетика (кривая 3).

В слабых полях намагниченность J у ферромагнетиков растет быстрее, чем по линейному закону, и при некотором значении напряженности достигает насыщения: $J = J_{нас} = const$. Магнитная индукция $B = \mu_0(H + J)$ также растет с увеличением H , а после достижения состояния насыщения меняется с увеличением H по линейному закону. Кривая $J = f(H)$ носит название основной Кривой намагничивания. Для пара- и диамагнетиков зависимость $J = f(H)$ линейная.

У ферромагнетиков и ферритов имеет место магнитный гистерезис, в котором проявляется зависимость намагниченности от предшествующего состояния. При циклических изменениях величины и направления напряженности внешнего поля H эта зависимость характе-

ризуется кривой, называемой петлей гистерезиса (рис. 1,б, кривые 1, 2, 3). Если ферромагнетик был первоначально размагничен ($B = 0, H = 0$), то его намагничивание происходит по основной кривой намагничивания OA , в точке A напряженность H_n и индукция B_n соответствуют состоянию магнитного насыщения. Если в точках A и A' достигается насыщение, то получается максимальная петля гистерезиса. Если же при выбранных значениях H насыщения нет, то получаемая в этом случае петля гистерезиса называется частным циклом. Частных циклов существует бесконечное множество, и все они лежат внутри максимальной петли гистерезиса (рис. 1,б), а максимумы значений B и H (или J и H) частных циклов всегда лежат на основной кривой намагничивания (кривая OA). Его размагничивание происходит по кривой I ($A-B_r-H_c-A'$). При $H = 0$ намагниченность ферромагнетика не исчезает $B = B_r$. Это состояние называется остаточным магнетизмом. С наличием остаточного намагничивания связано существование постоянных магнитов. Для того чтобы полностью размагнитить вещество, к нему необходимо приложить противоположное по знаку поле с напряженностью $-H_c$. Величина H_c называется коэрцитивной силой. Значения B_r и H_c для разных ферромагнетиков меняются в широких пределах. Для изготовления постоянных магнитов используются так называемые жесткие ферромагнетики, имеющие широкую петлю гистерезиса и большое значение H_c . Максимум B и H частных циклов лежат на основной кривой намагничивания OA . Условно принято считать ферромагнетики жесткими, если $H_c \geq 100$ А/м. Если $H_c < 100$ А/м, ферромагнетики считаются мягкими. Магнитная проницаемость μ ферромагнетика зависит от напряженности магнитного поля H .

Содержание учебных заданий

Принципиальная схема установки приведена на рис. 2. Исследуемый образец выполнен в виде тороидального трансформатора T , первичная обмотка которого содержит N_1 , витков, а вторичная $-N_2$ витков. На-

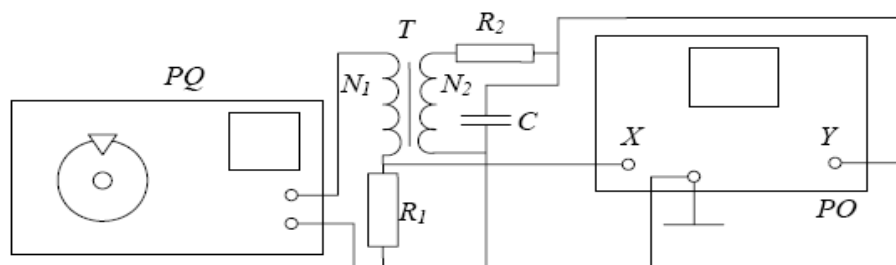


Рис. 2

напряжение на первичную обмотку трансформатора T подается с выхода генератора PQ через сопротивление R_1 . Вторичная обмотка трансформатора последовательно соединена с сопротивлением R_2 и конденсатором C . С сопротивления R_1 на вход усилителя горизонтального отклонения осциллографа PO подается напряжение U_x , пропорционально напряженности магнитного поля H . На вертикальный вход "У" с конденсатора C подается напряжение U_y , пропорциональное индукции магнитного поля B .

Задание 1. Определение основной кривой намагничивания.

1. Установить на стенде приборы, указанные на рис. 3.
2. Ознакомившись с описанием установки и методом измерения, соединить приборы в соответствии со схемой, изображенной на рис. 3.
3. Ознакомиться с работой генератора PQ и электронного осциллографа PO .
4. Подготовить приборы к работе:
 - а) установить следующие параметры выходного сигнала генератора: 2 кГц – частота.
 - б) отключить развертку на осциллографе PO .
5. Включить лабораторный стенд и приборы.
 - а) Установить луч в центре экрана осциллографа,
 - б) Постепенно, вращая вправо ручку генератора "Регулятор выхода", получить на экране осциллографа петли гистерезиса;
 - г) органами управления осциллографа добиться, чтобы вся петля гистерезиса располагалась в центральной части экрана.
 - д) С помощью ручки "Усиление" и при необходимости с помощью тумблера "x10x1" добиться, чтобы петля гистерезиса занимала как можно большую часть экрана. Уменьшая величину выходного напряжения, получить семейство петель гистерезиса.

Задание 2. Получение петли гистерезиса.

С помощью генератора получить максимальную петлю гистерезиса и зарисовать в координатах $X - Y$.

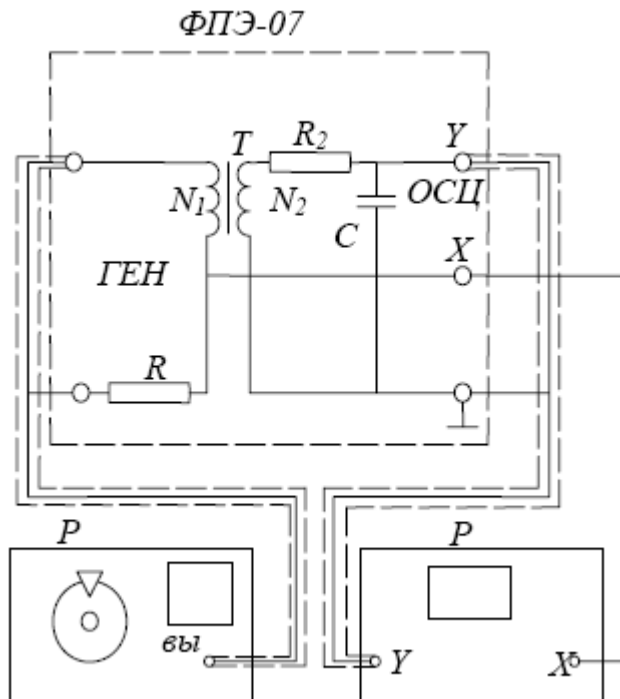


Рис.3

Вопросы к допуску

1. Дайте определение понятию «остаточный магнетизм».
2. В чём различия между “мягким” и “жестким” ферромагнетиком?
3. Где применяются ферромагнетики.

Контрольные вопросы

1. Какими свойствами обладают ферромагнетики?
2. Что означает насыщение ферромагнетика?
3. Объясните, что такое “частный цикл”?
4. Объясните смысл коэрцитивной силы.
5. Определить какой ферромагнетик используется в установке.
6. В чем заключается явление магнитного гистерезиса?

Лабораторная работа № 2.6

Эффект Холла

Цель работы определить значение постоянной Холла при изменении величины и направления тока через объект исследования (датчик Холла) и через электромагнит, постоянной Холла и концентрацию носителей заряда

Оборудование: установка для изучения эффекта Холла в полупроводниках.

Краткая теория вопроса

При помещении металлической пластинки (или полупроводника), вдоль которой течет постоянный электрический ток, в перпендикулярное к ней магнитное поле, вследствие действия на носители зарядов (электроны проводимости или дырки) силы Лоренца, между гранями, параллельными направлению тока, возникает разность потенциалов $\Delta\phi$.

Возникновение в твердом проводнике с током плотностью j , помещенном в магнитное поле B , электрического поля в направлении, перпендикулярном B и j называется *эффектом Холла*.

При достижении значения напряженности E_g этого поперечного поля, равного величине действующей силы Лоренца, установится стационарное распределение зарядов в поперечном направлении.

$$eE_g = evB \cdot \sin \alpha \quad (1),$$

где v - средняя скорость движения носителей зарядов, α – угол между векторами B и v . Если B перпендикулярно v , то $\sin \alpha = 1$ и поле Холла E_g максимально (рис. 1):

$$E_g = ev \text{ или } \Delta\phi = vbB \quad (2),$$

где $\Delta\phi$ – поперечная (холловская) разность потенциалов, b - ширина пластинки. Выразим v через плотность тока j , концентрацию носителей зарядов n и его величину e в соответствии с формулой $j = nev$. В результате получим:

$$\Delta\phi = \frac{1}{ne} jBb \quad (3)$$

или с учетом, что $I = jS$

$$\Delta\phi = \frac{1}{nebd} Bb = \frac{1}{ne} \frac{IB}{d} = R \frac{IB}{d} \quad (4),$$

т.е. холловская поперечная разность потенциалов прямо пропорциональна магнитной индукции B , силе тока I и обратно пропорциональна толщине пластинки d . Коэффициент пропорциональности

$$R = \frac{1}{ne} \quad (5)$$

называется постоянной Холла и является основной количественной характеристикой эффекта Холла вещества определенной природы. Знак R совпадает со знаком носителей заряда. Для металлов, у которых $n \sim 10^{28} \text{ м}^{-3}$, $R \sim 10^{-9} \text{ м}^3/\text{Кл}$, у полупроводников $R \sim 0,1 \text{ м}^3/\text{Кл}$.

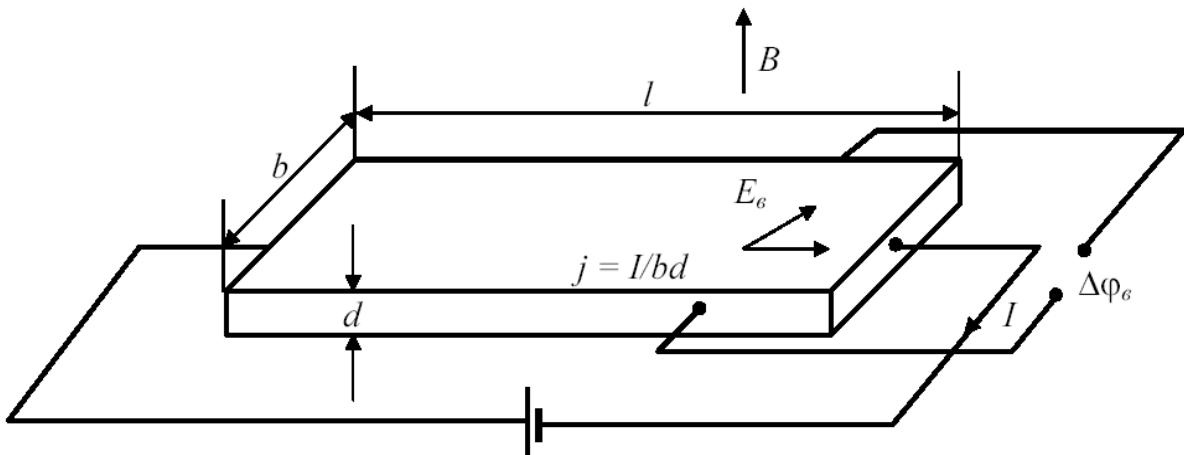


Рис. 1. Возникновение эффекта Холла

Измерив постоянную Холла, можно найти концентрацию носителей тока в данном металле (т.е. число носителей в единице объема).

Постоянная Холла может быть выражена через подвижность носителей заряда u . Подвижностью носителей тока называется средняя скорость, приобретаемая носителями при напряженности электрического поля, равной единице. Если в поле напряженности E носители приобретают скорость $\langle v \rangle$, то подвижность их u равна

$$u = \frac{\langle v \rangle}{E} \quad (6).$$

Подвижность можно связать с проводимостью σ и концентрацией носителей n . Для этого разделим соотношение $j = neu$ на напряженность E . Приняв во внимание, что отношение j к E дает σ , а отношение $\langle v \rangle$ к E - подвижность, получим

$$R = \frac{u}{\sigma} \quad (7).$$

В полупроводниках в электропроводности участвуют одновременно электроны проводимости и дырки. В этом случае выражение для постоянной Холла имеет более сложный вид:

$$R = \frac{1}{e} \frac{u_d^2 \cdot n_d - u_e^2 \cdot n_e}{(u_d \cdot n_d + u_e \cdot n_e)} \quad (8),$$

где n_e и n_d – концентрации дырок и электронов, u_e и u_d – их подвижности. Если основной вклад в эффект вносит один из носителей, то для постоянной Холла можно пользоваться выражением (5). Зная величину R , можно с помощью этого выражения найти концентрацию носителей тока n , а по знаку возникающей холловской разности потенциалов установить характер проводимости – электронный или дырочный.

Эффект Холла – один из наиболее эффективных методов изучения энергетического спектра носителей заряда в металлах и полупроводниках. Зная R , можно определить знак носителей и оценить их концентрацию, что позволяет сделать заключение о количестве примесей в полупроводниках. Линейная зависимость R от B используется для измерения напряженности магнитного поля. Эффект Холла используется для умножения постоянных токов в аналоговых вычислительных машинах, в измерительной технике и др. (датчики Холла).

Описание экспериментальной установки

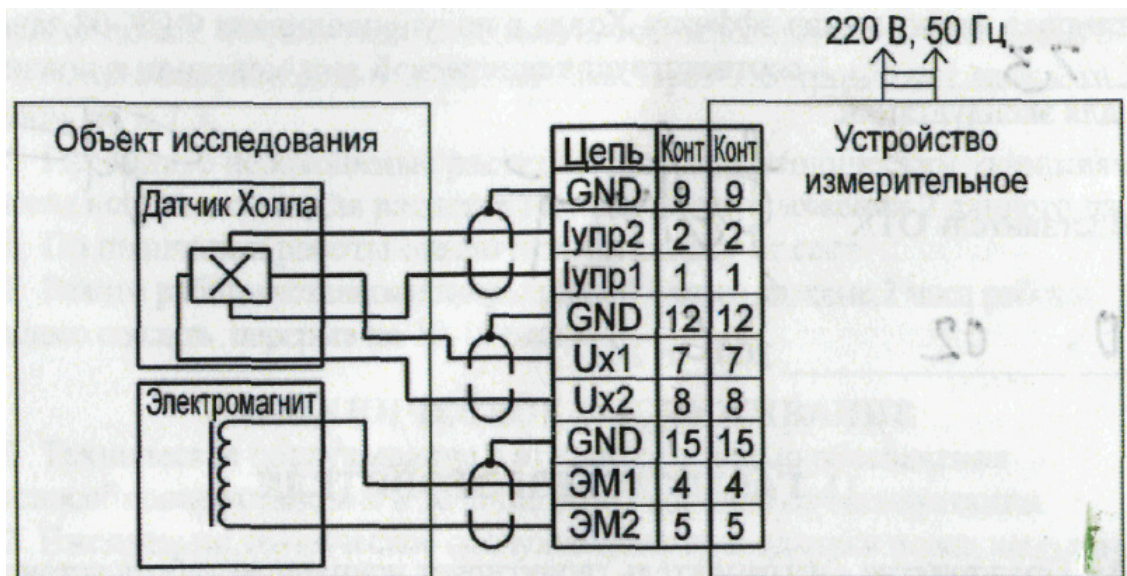


Рис. 2. Схематическое изображение подключения установки

Явление эффекта Холла изучают на установке (рис.2, 3), состоящей из объекта исследования и измерительного устройства, выполненных в виде конструктивно законченных изделий, устанавливаемых на лабораторном столе и соединяемых между собой кабелем. Объект исследования конструктивно выполнен в виде сборного корпуса, в



Рис. 3. Установка для изучения эффекта Холла в полупроводниках

котором установлены электромагнит и датчик Холла. Измерительное устройство выполнено в виде конструктивно законченного изделия. В нем применена однокристалльная микро-ЭВМ с соответствующими дополнительными устройствами, позволяющими производить измерение тока электромагнита и датчика, установленного в объекте исследования, а также осуществлять функции управления установкой. В состав измерительного устройства входят также источники его питания. На передней панели измерительного устройства размещены следующие органы управления и индикации:

- кнопки НАПРАВЛЕНИЕ и ТОК «+», « - » задают значение и направление тока через датчик Холла и электромагнит
- ЭЛ.МАГНИТ - ДАТЧ.ХОЛЛА включает индикацию тока электромагнита или датчика Холла, что индуцируется соответствующим светодионом
- табло мА и мВ индуцируют значения тока через датчик Холла и электромагнит и э. д. с. Холла.

Принцип действия установки основан на эффекте Холла, состоящем в возникновении на гранях полупроводника, параллельных протекающему в нем току и помещенном в магнитное поле, электродвижущей силы.

Содержание учебных заданий

1. Ознакомьтесь с установкой, ее устройством и принципом действия.
2. Убедитесь, что установка заземлена, поскольку в ней имеется опасное для жизни напряжение.

3. Получите у преподавателя номера заданий (не менее трех) и выберите по таблице значения токов I_H , протекающих через датчик Холла и электромагнит $I_Э$.

№№ заданий	I_H , мА	$I_Э$, мА				
		0.5	1.5	2.5	3.5	4.5
1	0.5	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5
2	1.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
3	1.5	1.5	3.0	4.0	5.0	6.0
4	2.0	2.0	3.5	4.5	5.5	6.5
5	2.5	2.5	4.0	5.0	6.0	7.0
6	3.0	3.0	4.5	5.5	6.5	7.5
7	3.5	3.5	5.0	6.0	7.0	8.0
8	4.0	4.0	5.5	6.5	7.5	8.5
9	4.5	4.5	6.0	7.0	8.0	9.0
10	5.0	5.0	6.5	7.5	8.5	9.5

4. Установите необходимую полярность источников питания для датчика Холла и электромагнитов нажатием на соответствующие кнопки.
5. Задайте по модулю одно из указанных преподавателем значений тока I_H , протекающего через датчик Холла.
6. Измерьте поперечную разность потенциалов $\Delta\phi_0$, вызванную асимметрией расположения электродов (ток в цепи электромагнита равен нулю).
7. Установите указанные в таблице значения токов $I_Э$, протекающих через электромагнит и определите соответствующие им разности потенциалов $\Delta\phi$;
8. Вычислите э.д.с. Холла для каждого значения тока, протекающего через электромагнит $\Delta\phi_B = \Delta\phi_i - \Delta\phi_0$. Измерения проведите при обоих направлениях тока, протекающего через электромагнит.
9. Проведите измерения холловской разности потенциалов по п. 6-8 для остальных значений токов, протекающих через датчик Холла.
10. Повторите все измерения не менее трех раз и определите средние значения полученных величин.
11. Вид таблицы для занесения экспериментальных результатов разработайте самостоятельно.
12. Для каждого значения тока, протекающего через электромагнит, рассчитайте величину магнитного поля B .

13. Постройте на графике семейство характеристик $\Delta\varphi_B(I_H) = f(B)$ и определите угловые коэффициенты этих зависимостей, используя метод наименьших квадратов. Из сопоставления линейной зависимости $y_1 = kx_1$ и уравнения (4) получим $y_1 = \Delta\varphi$, $x_1 = B$, $k = \frac{RI_H}{d}$.
14. Постройте график зависимости угловых коэффициентов k_i от величин токов, протекающих через датчик Холла $(I_H)_i$, и определите угловой коэффициент этой зависимости, используя метод наименьших квадратов. Из сопоставления линейной зависимости $y = Ax$ и соотношения $k = \frac{RI_H}{d}$ получим $y = k$, $x = I_H$, $A = R/d$.
15. По угловому коэффициенту A определите величину постоянной Холла.
16. Результат запишите в виде $R = \langle R \rangle \pm \sigma_{\langle R \rangle}$.
17. По найденной величине постоянной Холла определите концентрацию носителей тока.
18. Число витков катушки электромагнита N , длина намотки L и высота датчика Холла d указаны на верхней поверхности измерительной установки.

Вопросы к допуску

1. Опишите устройство экспериментальной установки (характеристики, устройство, порядок выполнения работы).
2. В чем заключается эффект Холла?
3. Чему равна и как направлена сила, действующая на отрицательный электрический заряд, движущийся в магнитном поле?

Контрольные вопросы

1. Какие вещества называются диэлектриками, проводниками, полупроводниками? Чем объясняется различие их электрических свойств? Объясните механизм проводимости в металлах и полупроводниках. Как зависит от температуры проводимость проводников и полупроводников?
2. Чему равна работа силы Лоренца при движении протона в магнитном поле? Ответ объяснить.
3. От чего зависит поперечная разность потенциалов? Рассмотрите эффект Холла в беспримесных полупроводниках.
4. Выведите расчетные формулы для определения концентрации, подвижности носителей заряда и для проводимости вещества.

Лабораторная работа № 2.7

Исследование распределения термоэлектронов по скоростям методом магнетрона

Цель работы: экспериментальное исследование распределения термоэлектронов по скоростям.

Оборудование: двухэлектродная лампа ЗЦ18П; вольтметр, микроамперметр, соленоид, источники питания, измеритель магнитной индукции РШ1-10.

Краткая теория вопроса

В настоящей работе для исследования распределения термоэлектронов по скоростям применяется метод, получивший название «метода магнетрона». Это название связано с тем, что применяемая в работе конфигурация электрического и магнитного полей напоминает конфигурацию полей в магнетронах — генераторах электромагнитных колебаний в области сверхвысоких частот. Движение электронов

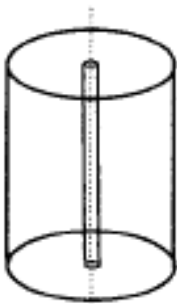


Рис.1 Схема двухэлектродной лампы

в этом случае происходит в кольцевом пространстве, включенном между катодом и анодом двухэлектродной электронной лампы. Нить накала лампы (катод) располагается вдоль оси цилиндрического анода (рис.1), так что электрическое поле между катодом и анодом имеет радиальное направление. Лампа помещается внутри соленоида, создающего магнитное поле, параллельное оси лампы.

Рассмотрим траекторию электронов, движущихся в лампе под действием электрического и магнитного полей. Если радиус катода мал по сравнению с радиусом анода, то траектория будет близкой к окружности (рис.2). Действительно, в этом случае максимальная напряженность электрического и, следовательно, наибольшее ускорение электрона будут в области, близкой к катоду. Подавляющую же часть пути электрон пройдет почти с постоянной по модулю скоростью v . Поэтому его траектория будет определяться почти целиком однородным перпендикулярным магнитным полем, которое действует на электрон с силой $F = e[v, B]$. Если векторы v и B ортогональны, а модуль этой силы можно считать постоянным, то траектория электрона будет окружностью некоторого радиуса R . Тогда по закону Ньютона

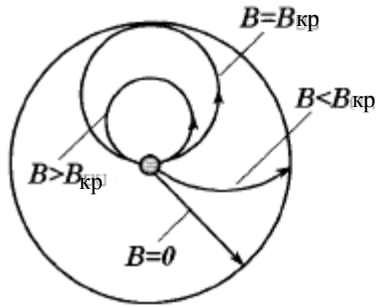


Рис. 2. Траектории электронов, вылетающих из катода, при разных значениях индукции магнитного поля

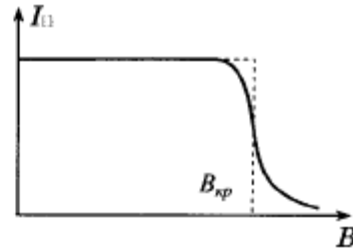


Рис. 3. Зависимость анодного тока от индукции магнитного поля в соленоиде

$$evB = m \frac{v^2}{R} \quad (1),$$

где m — масса электрона. Электроны вылетают из катода с малыми скоростями. Если ими пренебречь, то по закону сохранения и превращения энергии

$$m \frac{v^2}{2} = eU_a \quad (2),$$

где U_a — напряжение. Тогда

$$U_a = \frac{eR^2 B^2}{2m} \quad (3)$$

Величина радиуса окружности R зависит от индукции поля B (при постоянном U). В отсутствие магнитного поля траектория электрона прямолинейна (рис. 2). При слабом поле траектория несколько искривляется, но электрон все же попадает на анод. При некотором (критическом) значении магнитного поля $B_{кр}$ траектория искривляется настолько, что только касается анода. Наконец, при $B > B_{кр}$ электрон вовсе не попадает на анод и возвращается к катоду. Величину $B_{кр}$ нетрудно найти из (3), заметив, что в этом случае $R = r_a / 2$ (r_a — радиус анода). Тогда

$$B_{кр} = \sqrt{\frac{8mU_a}{er_a^2}} \quad (4)$$

Формула (4) позволяет при известном радиусе анода r_a и заданной величине магнитного поля (оно ограничено техническими параметрами соленоида) определить такое значение анодного напряжения U при котором данное магнитного поля является критическим т.е. электроны перестают попадать на анод.

До сих пор мы предполагали, что все электроны покидают катод со скоростью, точно равной нулю. В этом случае при $B < B_{кр}$ все элек-

троны без исключения попадали бы на анод, а при $B > B_{кр}$ они возвращались бы на катод, не достигнув анода. Анодный ток I_a с увеличением магнитного поля изменялся бы при этом также, как это изображено на рис. 3 штриховой линией. На самом деле электроны, испускаемые нагретым катодом, обладают различными начальными скоростями. Критические условия достигаются поэтому для разных электронов при разных значениях B . Кривая $I_a(B)$ (так называемая сбросовая характеристика) оказывается поэтому сглаженной (сплошная линия на рис.3). Заметим, кроме того, что невозможно обеспечить полную коаксиальность анода и катода, что в реальных условиях вектор индукции магнитного поля всегда несколько наклонен по отношению к катоду, и т. д. Эти причины приводят к дополнительному сглаживанию кривой $I_a(B)$ (рис. 3). В хорошо собранной установке перелом функции $I_a(B)$ остается, однако, достаточно резким.

Содержание учебных заданий

Задание 1. Определение области однородности магнитного поля внутри соленоида.

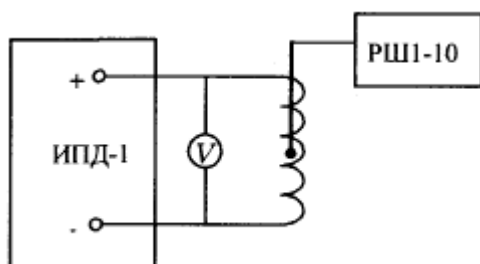


Рис. 4. Схема установки для градуировки соленоида

Величина индукции магнитного поля и область однородности определяются с помощью измерителя магнитной индукции РШ1-10. Соберите установку, схема которой показана на рис. 4. С помощью рукоятки на передней панели выпрямителя ИПД-1 установите значение напряжения 9 В. Введите щуп измерителя магнитной индукции во внутреннюю область соленоида. На щупе имеются сантиметровые отметки. Вводя щуп,

через каждый сантиметр снимайте значения индукции магнитного поля. Щуп вводится на всю длину катушки, измерения следует начинать, когда нулевая отметка на щупе совпадет с ближайшим краем катушки. Результат измерения занесите в таблицу 1.

Таблица 1. Зависимость магнитного поля соленоида от глубины погружения датчика

№	$l, \text{см}$	$B, \text{Тл}$

По данным таблицы 1:

1. постройте график зависимости магнитного поля катушки от глубины погружения;
2. определите область однородности магнитного поля B ;

- определите максимальное значение магнитного поля B_{max} .
- по формуле (4) оцените величину $B_{кр}$, сравните это значение с B_{max} .

Задание 2. Градуировка соленоида.

- Введите щуп прибора РШ1-10 в центральную часть соленоида. Увеличивая напряжение U на соленоиде от 0 В до 9 В с шагом в 0,2 В снимайте показания с измерителя магнитной индукции. По результатам наблюдений заполните табл. 2.

Таблица 2. Зависимость магнитного поля соленоида B от поданного на него напряжения U

№	$U, В$	$B, Тл$

По данным таблицы 2:

- Постройте график зависимости магнитного поля соленоида B от поданного на него напряжения U (градуировочная кривая соленоида)
- Сделайте вывод о характере этой зависимости.

Задание 3. Определение распределения термоэлектронов по скоростям с помощью магнитного поля.

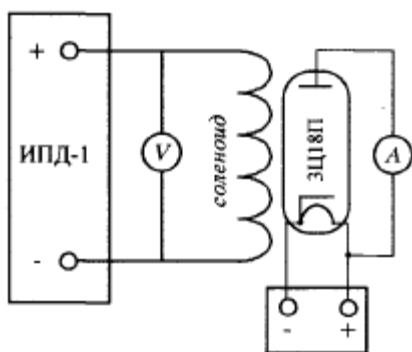


Рис. 5. Схема установки

- Соберите установку, показанную на рис. 5. Необходимо обратить внимание на то, что лампа ЗЦ18П должна находиться в области однородности магнитного поля.
- Установите величину напряжения накала 3 В.
- Увеличивая напряжение U на соленоиде от 0 В до 9 В с шагом в 0,5 В измерьте величину анодного тока лампы I_a . Результаты измерения занесите в таблицу
- Используя градуировочную кривую соленоида определите значение магнитного поля B для каждого значения напряжения U (заполните третий столбец табл.3)

5. Постройте график зависимости $I_a(B)$. Сделайте вывод относительно вида полученной кривой.

Таблица 2. Зависимость анодного тока от магнитного поля соленоида

№	$U, В$	$I_a, А$	$B, Тл$

Вопросы к допуску

1. В чем заключается явление термоэлектронной эмиссии?
2. Что такое критическое значение магнитного поля и как оно определяется?
3. Какая сила действует на движущийся заряд в магнитном поле?
4. В чем заключается метод магнетрона?

Контрольные вопросы

1. Объясните, почему электроны, испускаемые нагретым катодом, обладают различными начальными скоростями.
2. Какой вид должна иметь зависимость $I_a(B)$, получаемая в работе?
3. Почему лампа должна находиться в области однородности магнитного поля?

Лабораторная работа № 2.8

Изучение затухающих колебаний в колебательном контуре

Цель работы: получение и наблюдение затухающих электромагнитных колебаний; ознакомление с основными количественными характеристиками колебательного контура.

Приборы и материалы: электронный осциллограф С1-73, модуль ФПЭ-10, магазин сопротивлений, генератор сигналов функциональный.

Краткая теория вопроса

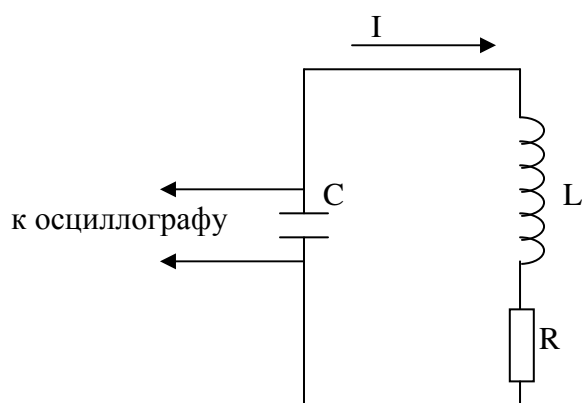


Рис. 1. Колебательный контур

В работе изучаются свободные колебания в колебательном контуре, состоящем из индуктивности L , емкости C и резистора R (резистор в реальной схеме не обязателен: его роль может исполнять омическое сопротивление катушки самоиндукции) (рис.1)

п 8

Конденсатор контура заряжается короткими одиночными импульсами, после этого в контуре возникают свободные колебания.

Напряжение на конденсаторе изучается при помощи осциллографа. По картине, возникающей на экране осциллографа можно определить период электромагнитных колебаний, исследовать затухание колебаний и определить основные параметры колебательного контура. В колебательном режиме контур принято характеризовать периодом колебаний, добротностью и логарифмическим декрементом затухания.

Как известно, период T колебаний определяется по формуле

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}},$$

где δ – коэффициент затухания

$$\delta = \frac{R}{2 \cdot L},$$
$$\omega^2 = \omega_0^2 - \delta^2$$

ω – круговая частота

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L \cdot C},$$

ω_0 – собственная круговая частота.

При малых δ , $T = 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$ и напряжение на конденсаторе изменяется по закону:

$$U = U_0 \cdot e^{-\delta \cdot t} \cos(\omega \cdot t + \varphi).$$

Т.к. запас энергии колебательной системы определяется по формуле

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2},$$

то потеря энергии за период составит

$$\Delta W = W(1 - e^{-2 \cdot \delta \cdot T}).$$

Добротность контура Q показывает, во сколько раз запас энергии в колебательном контуре превосходит среднюю потерю энергии за время, в течение которого фаза колебаний изменяется на 1 радиан.

Добротность Q равна $Q = \frac{W}{\Delta W} = \frac{\pi}{\delta T} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC}$, R – сопротивление. Справедлива для слабого затухания, $2 \cdot \delta \cdot T \ll 1$. Логарифмический декремент затухания ν равен логарифму отношения амплитуд двух последовательных отклонений в одну сторону.

$$\nu = \ln\left(\frac{U_k}{U_{k+1}}\right) = \ln e^{\delta \cdot T} = \delta \cdot T$$

Добротность, величина обратно пропорциональная логарифмическому декременту затухания

$$Q = \frac{\pi}{\delta} = \pi \cdot N_e.$$

Содержание учебных заданий

Собрать установку согласно фото-схеме



Принцип работы модуля ФПЭ-10 основан на получении затухающих колебаний в колебательном контуре $L1, C1$, соединенном через гнезда с обозначением «R» с магазином сопротивлений через гнезда X1, X4. Колебания в контуре наблюдаются и изучаются с помощью модуля ФПЭ-С1-73, который подключается следующим образом:

ФПЭ-10	ФПЭ –С1-73
Y и \perp	1M Ω 35pF(левая панель)
PO	▼V/дел.(левая панель) \perp

К модулю подсоединяется генератор сигналов через гнезда на модуле ФПЭ-10 –вх. \square к гнезду на генераторе - «выход».

Штекеры от генератора и осциллографа включаются в сеть.

Задание № 1. Получить на осциллографе осциллограмму, показывающую затухающие колебания

Перед началом работы установить частоту на генераторе 100Гц, переключатель «Аттенюатор» в положение 0, переключатель «Режим» в положение « \square ». Ручку «Амплитуда» в среднее положение, переключатель V/дел. Установить на отметке от 0,01 до 0,05, а переключатель mS/дел. на

отметке 2. На осциллографе увидите осциллограмму показывающую, что в контуре возникают затухающие колебания. Для этого необходимо ручками «Грубо», «Плавно» подобрать соответствующую частоту.

Задание № 2. Зарисовать осциллограмму

Задание № 3. Рассчитать период колебаний T , добротность контура Q , логарифмический декремент затухания δ

При этом принять величины $L=100\text{мГн}$, $C=0,1\cdot 10^{-6}\text{Ф}$ и сравнить с экспериментальными. Рассчитать погрешности измерений.

Задание № 4. По осциллограмме определить зависимость амплитуды от изменения сопротивления. Результаты занести в таблицу.

R, Ом					
A					

Вопросы к допуску

1. Что называется электромагнитными колебаниями? Виды колебаний.
2. Какие колебания называются затухающими?
3. Что называется электрическим колебательным контуром?
4. Для чего предназначен модуль ФПЭ-10?
5. Принцип работы осциллографа.
6. Принцип работы магазина сопротивлений.
7. Какую частоту должен подавать генератор для получения затухающих колебаний?
8. Формула Томсона. Что она определяет?
9. К каким гнездам на модуле ФПЭ-10 подключается генератор сигналов?
10. Каким переключателем регулируется вертикальная и горизонтальная величина изображения?

Контрольные вопросы

1. Почему свободные колебания в колебательном контуре затухают?
2. Что называется собственной частотой, добротностью, логарифмическим декрементом затухания?
3. Как определить логарифмический декремент затухания контура по картине колебаний в фазовой плоскости?
4. Устройство осциллографа.
5. Устройство магазина сопротивлений.
6. Выведите формулы изменения напряжения на конденсаторе.
7. Получите формулу энергии, запасенной в контуре.

8. Покажите связь между добротностью и логарифмическим декрементом затухания.
9. Как по графику можно определить добротность контура?

Лабораторная работа № 2.9

Изучение релаксационных колебаний

Цель работы: получить и изучить релаксационные колебания в контуре при подаче питающего напряжения при различных параметрах RC цепи; снять вольтамперную характеристику неоновой лампы V_1 .

Приборы и материалы: магазин емкостей, магазин сопротивлений, модуль ФПЭ ИП, модуль ФПЭ-12, осциллограф универсальный С₁-73, мультиметр М-890G, соединительные провода.

Краткая теория вопроса

Колебаниями называются движения или процессы, которые обладают определенной повторяемостью во времени. Периодом колебаний называется наименьший промежуток времени, по истечении которого повторяются состояния колеблющейся системы (совершается одно полное колебание).

$$T = \frac{U_3 - U_r}{\varepsilon} \cdot R \cdot C = \frac{U_3 - U_r}{\varepsilon} \cdot \tau$$

Колебания могут происходить и в системах, не содержащих резонатора. Колебания при этом, как правило, не являются гармоническими. Типичными примерами таких систем могут служить генератор пилообразных колебаний на неоновой лампе и гидравлическое устройство, показанное на рис.1

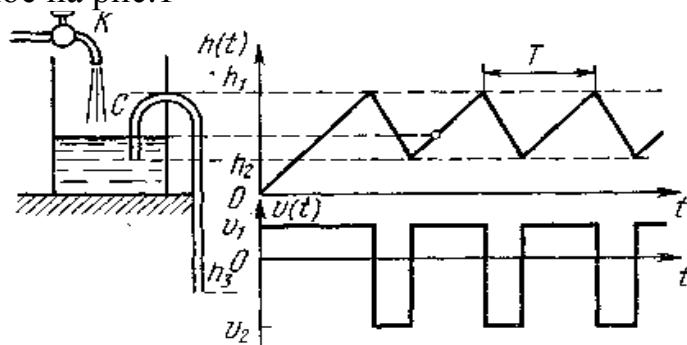


Рис.1 Типичный пример релаксационных колебаний

В генераторе пилообразных колебаний на неоновой лампе происходят следующие процессы: Неоновая лампа обладает тем свойством, что ток через нее не проходит до тех пор, пока приложенное к лампе напряжение не достигнет определенной величины, называемой напряжением зажигания U_3 . Если после возникновения тлеющего разряда в лампе напряжение на ней несколько уменьшить, то в лампе будет продолжаться свечение. Ток через лампу прекратится лишь тогда,

когда напряжение будет уменьшено до определенного значения, называемого напряжением гашения $U_{г}$.

При замыкании ключа конденсатор начинает медленно заряжаться через сопротивление R . Как только напряжение на конденсаторе достигнет значения, равного напряжению зажигания лампы U_3 , в лампе возникает газовый разряд, и конденсатор начинает быстро разряжаться через лампу, так как сопротивление горячей неоновой лампы очень мало. Когда напряжение на конденсаторе уменьшится до значения напряжения гашения $U_{г}$, разряд в лампе прекращается, и конденсатор опять начинает заряжаться. Затем все повторяется снова. График зависимости напряжения на конденсаторе от времени $U(t)$ приведен на рис. 2

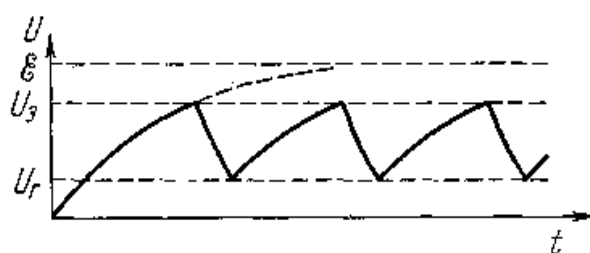


Рис.2 Зависимость напряжения на конденсаторе от времени

Автоколебания, в происходящие генераторе на неоновой лампе и в рассмотренном выше гидравлическом устройстве, носят название релаксационных. Для таких колебаний характерно постоянное накопление энергии системой до некоторого значения, а затем быстрое «избавление» от накопленной энергии. Аналогом накопительного бачка в гидравлическом устройстве является конденсатор в генераторе пилообразного напряжения, аналогом сифона является неоновая лампа, а роль крана играет сопротивление R

Для контура, содержащего сопротивление и емкость, быстрота установления зависит от произведения

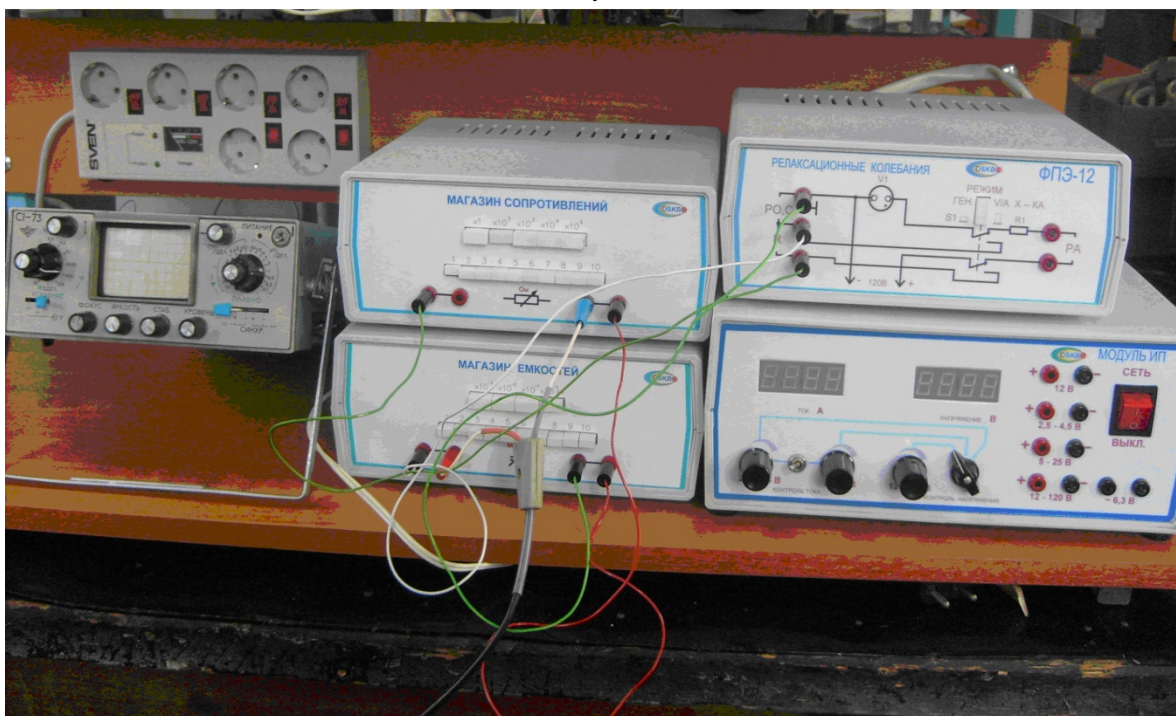
$$\tau = R \cdot C,$$

которое имеет размерность времени и называется постоянной времени данного контура или временем релаксации. Постоянная времени показывает, через какое время после выключения ЭДС напряжение уменьшится в $e=2.72$ раза.

Для того чтобы снять вольтамперную характеристику нужно:

1. На модуле ФПЭ-12 отключить кнопку S_1 , при этом неоновая лампа должна погаснуть
2. К разъемам РА подсоединить мультиметр М-890G

Внешний вид установки



1. модуль ФПЭ ИП
2. модуль ФПЭ-12
3. осциллограф универсальный С₁-73
4. магазин емкостей
5. магазин сопротивлений
6. мультиметр М-890G

Модуль источника питания ФПЭ ИП

Модуль ИП предназначен для питания электрическим напряжением постоянного тока и применяется при проведении лабораторных работ по курсу физики. Модуль также предназначен для эксплуатации в помещении и при температуре от +15°С до +35°С относительной влажности от 45% до 80% и атмосферном давлении 650-800 мм. рт. ст. Устройство и принцип работы:

Конструкция модуля выполнена в виде настольно-переносного блока. Пластмассовый корпус состоит из 2-х панелей: лицевой и задней, и двух крышек: нижней и верхней. Крышки стягиваются винтами, одновременно зажимая переднюю и заднюю панели.

Лицевая панель

На лицевой панели расположены основные органы управления, коммутации и индикации параметров электрических цепей выходных каналов модуля.

Кнопка «СЕТЬ» осуществляет подключение модуля к питающей сети 220В, 50 Гц и снабжена неоновым индикатором подключения.

Контактные гнезда поз. 5 «6,3В», «2,5 - 4,5В»; «5 - 25В», «12 -120В»; «12В» служат для контрольной проверки величины выходных напряжений каналов и возможности добавочного использования каналов, минуя специальный разъём на задней стенке модуля. Два измерительных прибора, амперметр и вольтметр, предназначены для контроля величины тока и напряжения в каналах 2,5 - 4,5В, 5 - 25В, 12 - 120В соответственно. Причем, для поочередного переключения амперметра в каналы 2,5 - 4,5В и 5 - 25В служит переключатель SU1 («контроль тока»), а вольтметра в канале 2,5 - 4,5В; 5 - 25В и 12 - 120В переключатель SU2 («контроль напряжения»). Ручки регулятора служат для плавного регулирования величин выходных напряжений соответствующих каналов.

Задняя стенка

На задней стенке модуля установлены предохранители FU1 и FU2 защиты от короткого замыкания в цепях питания сети 220В, 50 Гц; штепсельный разъём XS11 для подсоединения нагрузки с помощью кабеля, входящего в комплект модуля; клемма заземления XS12 для подсоединения модуля к контуру заземления.

Внутри корпуса крепятся 3 модуля с элементами радиоэлектронной аппаратуры.

Подготовка изделия к работе:

1. Заземлить корпус прибора.
2. проверить исправность сетевого шнура путём внешнего осмотра.
3. установить ручку регулятора плавной установки величин выходного напряжения по каналам в крайнее левое положение.
4. включить вилку шнура в розетку сети питания 220В, 50Гц.

Порядок работы с модулем:

1. перед началом работы с модулем необходимо ознакомиться с его описанием.
2. с помощью кабеля, входящего в комплект модуля, подключить нагрузки к штепсельному разъёму.
3. кнопкой «Сеть» включить модуль, при этом кнопка освещается изнутри.
4. регуляторами выходного напряжения каналов установить необходимую величину напряжения по приборам, установленным на лицевой панели.

Осциллограф универсальный С₁-71

Осциллограф предназначен для использования при разработке, настройке и регулировке радиоэлектронной аппаратуры в лабораторных, цеховых и полевых условиях, для использования формы элек-

трических сигналов в диапазоне частоты от 0 до 5 МГц путём визуального наблюдения и измерения их амплитуд в диапазоне от 0,02 до 120В и с выносным делителем 1:10 до 350В, временных интервалов от $0,2 \cdot 10^{-6}$ до 0,53.

Устройство и принцип работы:

Осциллограф содержит: вход аттенюатор, вход каскад, предварительный усилитель Y, линию задержки, выходной усилитель Y, генератор развёртки, схему блокировки, усилитель X, калибратор, блоки питания (низковольтный и высоковольтный), выпрямитель.

Используемый сигнал подаётся на входное гнездо «Y1MΩ35pF» тракта вертикального отклонения луча. При помощи аттенюатора устанавливается величина сигнала, удобная для наблюдения на экране ЭЛТ. Используемый сигнал усиливается предварительным усилением. Затем усиленный сигнал задерживается линией задержки на время, компенсирующее задержку сигнала в схемах синхронизации, развёртки и усилителя подсвета, что позволяет наблюдать передние фронты импульсов.

Подготовка изделия к работе:

Установите органы управления на передней панели в следующие положения:

1. ручку «ЯРКОСТЬ»- в крайнее левое;
2. ручку «ФОКУС»- в среднее;
3. переключатель «V/ДЕЛ.»- «0,05»;
4. ручку «УСИЛЕНИЕ»- в крайнее правое;
5. ручку «↓»- в среднее;
6. переключатель «~ ⊥ » - «⊥»;
7. ручку «УРОВЕНЬ»- в крайнее правое;
8. переключатель «mS/ДЕЛ., μS/ДЕЛ.»- «1 mS/ДЕЛ.»;
9. ручку «ПЛАВНО»- в крайнее правое;
10. ручку «СТАБ.»- в крайнее правое;
11. ручку «↔»- в среднее.

Модуль изучения релаксационных колебаний ФПЭ-12

Устройство и принцип работы

Принцип работы модуля ФПЭ-12 основан на получении релаксационных колебаний в контуре при подаче питающего напряжения. Модуль позволяет изучать релаксационные колебания при различных параметрах RC-цепи и снимать вольтамперную характеристику неоновой лампы V1. Переключатель S1 необходим для выбора режима: снятие вольтамперной характеристики лампы или изучение релакса-

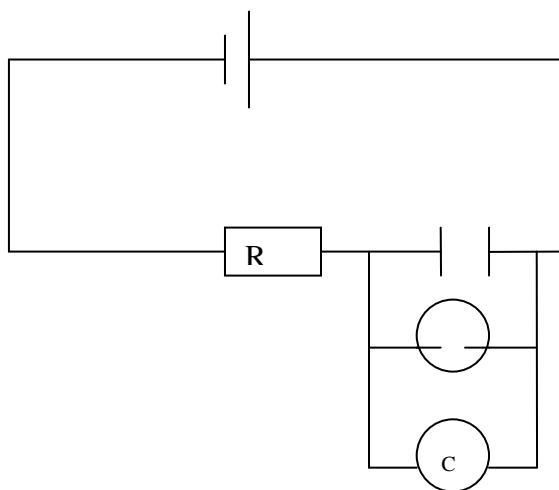
ционных колебаний. Гнёзда X1-X5 используются для подключения модуля в схему.

Подготовка изделия к работе:

1. установить модуль на верхнюю полку стойки;
2. к гнездам на передней панели модуля с обозначением РО,С подключить магазин емкостей, к которому параллельно подключается модуль ФПЭ С1-73 через делитель напряжения; с обозначением R-магазин сопротивлений и РА- миллиамперметр универсальный; при снятии вольтамперной характеристики лампы кнопка S1 должна быть в отключенном состоянии, при изучении релаксационных колебаний кнопку S1 включить;
3. к разъёму на задней панели подключить модуль ИП;
4. подключение магазинов сопротивлений и емкостей выполнить соединительными проводами, модуль ИП-кабелем с соответствующим разъёмом, приборы подключить с помощью кабелей, входящих в их комплект;
5. порядок выполнения лабораторной работы согласно методическим указаниям.

Содержание экспериментальных заданий

1. Получить и изучить релаксационные колебания в контуре.
 - а) к гнездам РО,С модуля ФПЭ-12 параллельно присоединить магазин емкостей
 - б) гнездо R модуля ФПЭ-12 последовательно соединить с магазином сопротивлений
 - в) магазин сопротивлений и магазин емкостей соединить параллельно
 - г) к осциллографу универсальному С₁-71 через делитель напряжения подключить параллельно магазин сопротивлений.



2. Полученные результаты занести в таблицу

3. Снять вольтамперную характеристику и построить график

I, mA									
U, V									

Вопросы к допуску

1. Для чего предназначен модуль ФПЭ ИП?
2. Для чего предназначен модуль ФПЭ-12?
3. Для чего предназначен осциллограф универсальный С₁-73?
4. Как подготовить модуль ФПЭ ИП к работе?
5. Как подготовить модуль ФПЭ-12 к работе?
6. Как подготовить осциллограф универсальный С₁-73 к работе?
7. Что такое колебание?
8. Какие колебания называются релаксационными?
9. Что называется временем релаксации?
10. Что называется периодом колебаний?
11. Как получить вольтамперную характеристику?

Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип работы модуля ФПЭ ИП.
2. Устройство и принцип работы модуля ФПЭ-12.
3. Устройство и принцип работы осциллографа универсального С₁-73.
4. От чего зависит размер получаемых колебаний на осциллографе?
5. Каково назначение неоновой лампы и принцип её работы в данной работе?
6. Проанализируйте полученные релаксационные колебания в контуре.
7. Как можно изменить период релаксационных колебаний?

Лабораторная работа № 2.10

Исследование резонанса напряжений

Цель работы: изучение явления резонанса напряжений в неразветвленной цепи переменного тока с элементами в параллельных ветвях и его практическое использование для повышения коэффициента мощности промышленных электрических установок, освоение методики и практики вычислений и построения векторных диаграмм по данным измерений.

Приборы и материалы: трансформатор 220/36-42 В, вольтметр 50-60 В и два 300 В, ваттметр, амперметр, катушка индуктивности с сердечником, батарея конденсаторов, соединительные провода.

Краткая теория вопроса

Явление резонанса напряжений наблюдается в цепях переменного тока с последовательным соединением индуктивностей и емкостей наступает тогда, когда полное сопротивление последовательной цепи R, L, C становится чисто активным. Соответственно при резонансе ток и напряжение на входе цепи совпадают по фазе, цепь потребляет только активную мощность. В настоящей работе рассматриваются цепи, состоящие из последовательно включенных индуктивной катушки и батареи конденсаторов. Катушка обладает индуктивностью L и активным сопротивлением R , а батарея конденсаторов емкостью C . Активным сопротивлением конденсаторов можно пренебречь.

Условие возникновения резонанса в такой цепи - равенство индуктивного сопротивления катушки X_L и емкостного сопротивления конденсатора X_C , т.е.

$$\begin{aligned}\omega L &= \frac{1}{\omega C} \\ \omega^2 LC &= 1\end{aligned}\quad (1)$$

Частота при которой в контуре заданными величинами L и C достигается резонанс напряжений, называется резонансной частотой контура. Из формулы (1) следует, что

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

или

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\quad (2)$$

Подставляя это равенство в формулу (1), получим выражение для сопротивления реактивных элементов резонансной цепи

$$\omega_0 = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho \quad (3)$$

Величина ρ называется характеристическим или волновым сопротивлением. Отношение падения напряжения на каком-либо реактивном элементе при резонансе к приложенному напряжению называется добротностью цепи. Добротность цепи Q , соответственно равна отношению волнового сопротивления к активному сопротивлению:

$$Q = \frac{U_{C0}}{U} = \frac{I_0 \omega_0 L}{I_0 i} = \frac{\rho}{r}$$

$$Q = \frac{U_{C0}}{U} = \frac{I_0}{r \omega_0 C I_0} = \frac{\rho}{r} \quad (4)$$

Резонанс напряжений может быть достигнут при различных частотах источника питания, в том числе и при стандартной частоте $f = 50$ Гц. Для этого надо соответственно изменить один из параметров цепи L или C , или оба параметра одновременно.

На рис. 1 представлены примерные векторные диаграммы последовательной цепи R, L, C при постоянной частоте и индуктивности и переменной емкости.

Ток в цепи выражается формулой

$$I = \frac{U}{\sqrt{r_k^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}} \quad (5)$$

и будет при резонансе иметь наибольшее из всех возможных для него при данном напряжении цепи значение

$$I = U/I_k \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что падение напряжения на активном сопротивлении при резонансе будет равно напряжению, приложенному ко всей цепи

$$U_a = I_0 \quad r_k = 0 \quad (7)$$

Реактивные падения напряжения U_L и U_C при резонансе будут равны друг другу по величине $U_{L0} = U_{C0}$ или

$$I_0 \omega_0 L_0 = \frac{L_0}{\omega_0 C} \quad (8)$$

и противоположны по фазе (рис. 1)

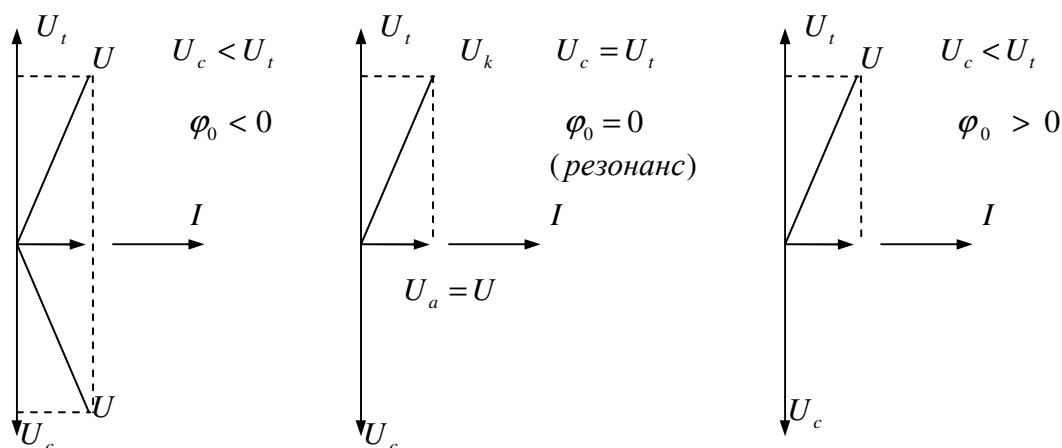


рис. 1

При соответствующих величинах R, L, C напряжение на емкости и индуктивности при резонансе при $U_{C0} = U_{L0}$ могут быть во много раз выше, напряжения на входе цепи $U = U_a$

В настоящей работе производится определение характеристик

$I, U_a, U_L, U_c, \cos \varphi_L, \varphi = f(L)$ при $C = \text{const}, f = \text{const}$

$I, U_a, U_L, U_c, \cos \varphi_L, \varphi = f(C)$ при $C = \text{const}, f = \text{const}$

С этой целью измеряются следующие величины: входное напряжение U , ток I , активная мощность P , напряжение на батарее конденсаторов №, напряжение на катушке индуктивности №. По данным измерения вычисляются:

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}$$

И находится величина угла φ . Активная составляющая напряжения на катушке определяется по формуле:

$$U_a = U \cos \varphi \quad (10)$$

после чего индуктивная составляющая № находится из формулы:

$$U_L = \sqrt{U_a^2 + U_c^2} \quad (11)$$

Содержание учебных заданий

1. Собирается рабочая схема (рис.3), устанавливается заданное входное напряжение (30В), включается часть конденсаторов. После этого плавным изменением индуктивности в цепи и проверяется по соотношению $P = UI_0$, где P - мощность по ваттметру, U -входное напряжение по вольтметру I_0 -ток в цепи по амперметру. Найденная установка индуктивности остается неизменной.

2. Производится опыт резонанса при изменении емкости. Для этого отключается секция батареи конденсаторов и снимается первая точка характеристики при $C=0$. Последующие точки снимаются при увели-

чении емкости ступенями 5-10 мкф. Перед снятием каждой точки проверяется и в случае необходимости корректируется входное напряжение U . Все изменения производятся при постоянной частоте $f=50$ Гц. (таб. 1)

3. Производится опыт резонанса при изменении индуктивности. Для этого включается часть емкости конденсаторной батареи и при изменении индуктивности от минимального до максимального значения снимается 8-10 точек, в том числе точка резонанса, которая проверяется по соотношению $P=UI$. Все изменения проводятся с частотой 50 Гц.(таб. 2).

4. Производятся все вычисления, указанные в таблице 1-2 с помощью формул, приведенных в работе и по данным каждой из таблиц строится график зависимости величин $I, U_a, U_c, \cos\varphi, \varphi$ от соответствующего переменного параметра цепи - в первом случае от емкости, во втором от индуктивности.

5. Строятся векторные диаграммы в каждом случае для трех точек - одной при $U_L > U_C$, второй при резонансе и в третьей при $U_L < U_C$. Входные напряжения полученные на векторных диаграммах графически, сравниваются с данными измерений.

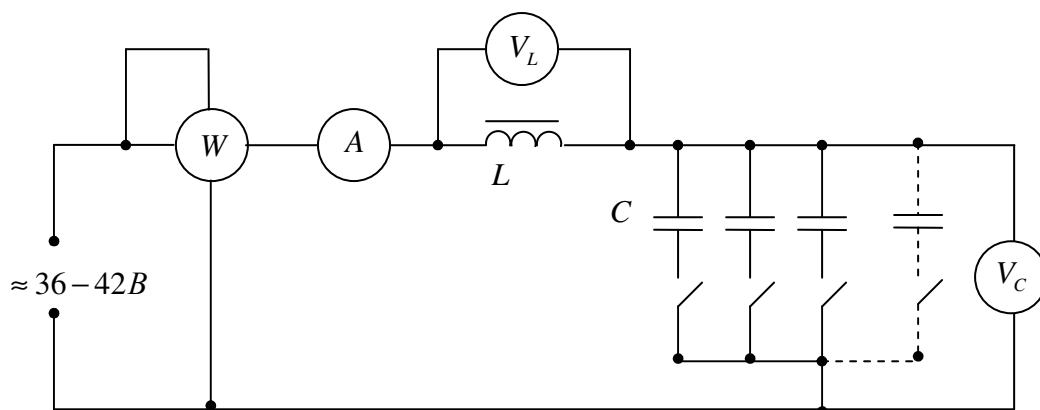
6. отчете должны быть представлены: рабочая схема, таб. 1-2, два графика $I, U_a, U_c, U, \cos\varphi, \varphi=f(C)$ при $f=const$ и $c=const$ и шесть векторных диаграмм.

Таблица 1. Опыт резонанса при изменении емкости

Наблюдения						Вычисления					
C	P	I	U	U_L	U_C	$\cos\varphi$	φ	U_a	U_L	C	L

Таблица 2. Опыт резонанса при изменении индуктивности

Наблюдения						Вычисления					
C	P	I	U	U_L	U_C	$\cos\varphi$	φ	U_a	U_L	C	L



Вопросы к допуску

1. В каких цепях наблюдается резонанс токов?
2. В каких цепях наблюдается резонанс напряжений?
2. Назовите признаки и условия наличия резонанса напряжений в цепи.
3. Расскажите о ходе выполнения работы.

Контрольные вопросы

1. Что является признаком наличия резонанса в последовательной цепи?
2. Какая цепь исследуется в настоящей работе?
3. В чем заключается условие резонанса в последовательной цепи?
4. Что называется резонансной частотой и волновым сопротивлением контура и как определить эти величины?
5. Что называется добротностью цепи ?
6. Как может быть достигнут резонанс напряжений при заданной частоте?
7. Чему равны полное сопротивление и ток в цепи при резонансе напряжений?
8. От чего зависят напряжения на емкости и на индуктивности в последовательной цепи при резонансе?
9. Какие характеристики последовательной цепи определяются в настоящей работе?
10. Как проводится опыт резонанса при изменении емкости?
11. Как проводится опыт резонанса при изменении индуктивности?
12. Как по данным измерений определяются индуктивность L и емкость C цепи?
13. Как строятся векторные диаграммы напряжений и токов?

Лабораторная работа № 2.11

Исследование резонанса токов

Цель работы: изучение явления резонанса токов в разветвленной цепи переменного тока с элементами в параллельных ветвях и его практическое использование для повышения коэффициента мощности промышленных электрических установок, приобретение навыков по настройке цепи и по производству измерений, освоение методики и практики вычислений и построения векторных диаграмм по данным измерений.

Приборы и принадлежности: трансформатор 220 /36-42В, вольтметр 50-60 В, ваттметр, амперметр (3 шт.) 2А, катушка индуктивности с сердечником, батарея конденсаторов, соединительные провода.

Краткая теория вопроса

Явление резонанса токов наблюдается в разветвленных цепях переменного тока, содержащих ветви с индуктивностью и емкостью. Резонанс представляет такой режим цепи, при котором реактивная проводимость всей цепи равна нулю. Соответственно угол сдвига фаз между напряжением и общим током равен нулю, и цепь потребляет только активную мощность.

В настоящей работе исследуется разветвленная цепь из двух параллельных ветвей (рис., 1). В одну ветвь включена катушка индуктивности, которая моделирует активно-индуктивную нагрузку электрических сетей большинства промышленных предприятий. Вторая ветвь состоит из Батареи конденсаторов емкостью C (активное сопротивление конденсаторов настолько мало, что им можно пренебречь). Условие резонанса в такой цепи – равенство индуктивной проводимости и ёмкостной проводимости

Так как $b_L = \frac{x_L}{z^2}$ и $b_c = \frac{x_c}{z^2} = \frac{1}{x_c^2}$ то условие резонанса

выражается формулой:

$$\frac{\omega L}{r_k^2 + (\omega L)^2} = \omega C \quad (1)$$

Частота, при которой в контуре с заданными величинами L и C достигается резонанс токов, называется резонансной частотой контура. Из формулы (1) следует, что

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{\frac{L/C - r_k^2}{L/C}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{\frac{L/C - r_k^2}{L/C}}$$

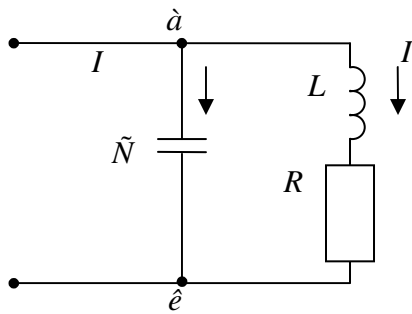


Рис. 1

Если пренебречь активным сопротивлением катушки индуктивности (что можно сделать при условии $\gamma \ll \omega L$), то уравнение (1) принимает вид

$$\frac{1}{\omega C} = \omega L \text{ или}$$

$$\omega^2 LC = 1 \quad (3)$$

Откуда следует

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4)$$

или

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad /r_k=0/ \quad (5)$$

т.е. при указанном допущении резонансная частота разветвленной цепи определяется по такой же формуле, как и резонансная частота в последовательной цепи.

Сопротивление реактивных элементов резонансной цепи в этом случае определяется выражением; $W_0 L \frac{1}{\omega_0 \tilde{N}} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho$ и называется волновым или характеристическим уравнением.

Так же, как и резонанс напряжений, резонанс токов может быть достигнут при различной частоте питающего напряжения, в частности, при стандартной частоте 50 Гц. Для этого надо соответственно изменять один из параметров цепи L или C , или оба параметра одновременно.

На рис. 2 представлены примерные векторные диаграммы разветвленной цепи при постоянной частоте и индуктивности и переменной. Аналогичные диаграммы могут быть построены для случая постоянной частоты и емкости и переменной индуктивности.

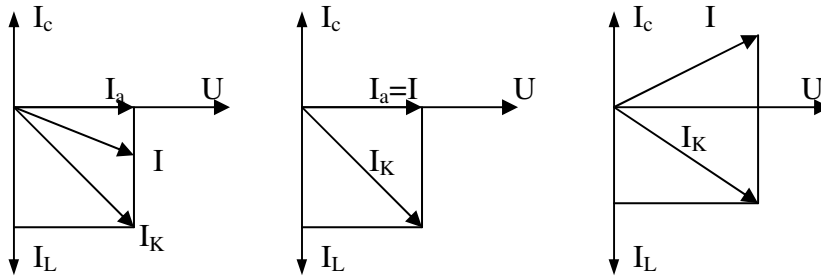


Рис. 2

Общий ток в цепи, выраженный формулой

$$I = U \cdot y = U \sqrt{g^2 + b^2} = U \sqrt{\left[\frac{r_k}{r_k^2 + (\omega L)^2} \right]^2 + \left[\frac{\omega L}{r_k^2 + (\omega L)^2} - \omega C \right]^2} \quad (6)$$

Получает при резонансе значение

$$I_0 = U \cdot y_0 = \frac{U \cdot r_k}{r_k^2 + (\omega_0 L_0)^2} \quad (7)$$

Он будет чисто активным, так как полная проводимость цепи не имеет в этом случае реактивной составляющей.

В зависимости от значения L и C ток в конденсаторах и индуктивная составляющая тока в катушке при резонансе могут быть во много раз больше общего тока в цепи. Эти реактивные токи будут равны по величине $I_L = I_C$ или

$$U \frac{\omega_0 L_0}{r_k^2 + (\omega_0 L_0)^2} = U \omega_0 L_0 \quad (8)$$

и противоположны фазе.

Приведенная на рис. 1 схема включения статических конденсаторов параллельно приемникам электрической энергии широко используется в народном хозяйстве для повышения коэффициента мощности фабрично-заводских установок. Естественный коэффициент мощности большинства промышленных установок не превышает из-за значительного индуктивного тока, потребляемого асинхронными двигателями, наиболее распространенными на заводах и фабриках. При таком коэффициенте мощности установленная мощность трансформаторов на подстанциях использовалась бы только на 70-80%, так как активная мощность переменного тока:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad [\text{кВт}] \quad (9)$$

где $U \cdot I = S$ – мощность, трансформатора, выражаемая в [кВА] (киловольтамперах). Ток, потребляемый электрической установкой

$$I = \frac{P}{U \cdot \cos \varphi} \quad (10)$$

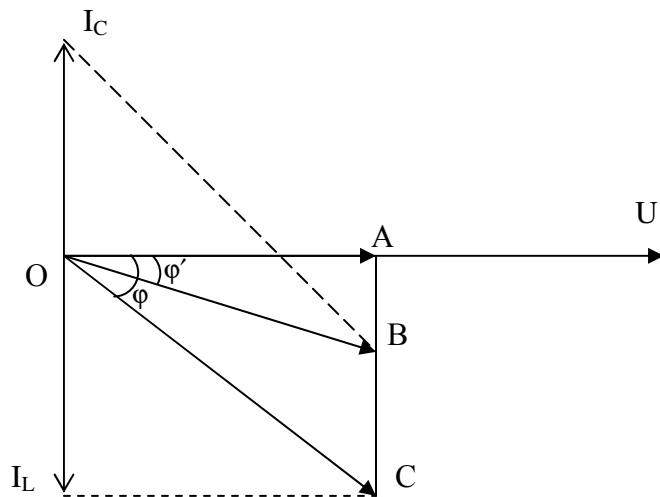
Следовательно, чем меньше $\cos\varphi$, тем больше для передачи той же активной мощности P , а значит большее сечение проводов. Наконец потери мощности

$$\Delta P = I^2 r = \frac{P^R r}{U^2 (\cos\varphi)^2} \quad (11)$$

Значит, при передаче одной и той же активной мощности потери мощности будут обратно пропорциональны квадрату коэффициента мощности. Таким образом, повышение коэффициента мощности ($\cos\varphi$) на промышленных электрических установках дает следующие преимущества:

1. Возможность получения дополнительных приемников при той же мощности трансформаторов, установленных на фабрично-заводских подстанциях.
2. Возможность уменьшения при той же мощности величины тока и, следовательно, сечений проводов электрических сетей.

Пусть на рис. 3 угол φ - естественный угол сдвига фаз тока и напряжения на установке, которому соответствует естественный коэффициент мощности $\cos\varphi$. Для того, чтобы довести коэффициент мощности до заданной величины $\cos\varphi$ необходимо установить параллельно приемникам энергии батарею статистических конденсаторов такой емкости C , чтобы ток, потребляемый из сети и представляющий геометрическую сумму тока конденсаторов I_C и тока приемника $I_{пр}$, отставая от напряжения U



оставая от напряжения U на угол φ . Из треугольников OAC и OAB следует, что

$$I_C = I_a (tg\varphi - tg\varphi') \quad (12)$$

Умножением обеих частей равенства получаем формулу для расчета реактивной мощности конденсаторов

Рис. 3

$$Q_C = P (tg\varphi - tg\varphi') \text{ кВт/ч} \quad (13)$$

Необходимая емкость конденсаторной батареи C определяется из формулы

$$Q_C = U^2 wc \quad (14)$$

В настоящей работе производится снятие характеристики

$I, I_a, I_C, I_L, \cos \varphi, \varphi = f(t)$ при $C = \text{const}$ и $f = \text{const}$,

$I, I_a, I_C, I_L, \cos \varphi, \varphi = f(C)$ при $L = \text{const}$ и $f = \text{const}$

С этой целью измеряются следующие величины: входное напряжение, активная мощность P , общий ток в цепи, ток в ветви с индуктивной катушкой (ток приемника) $I_k = I_{np}$, ток в ветви с конденсатором I_c . По данным измерений вычисляется:

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI} \quad (15)$$

и находится величина угла.

Активная составляющая тока в приемнике определяется по формуле

$$I_a = I \cos \varphi \quad (16),$$

после чего индуктивная составляющая находится из формулы

$$I_k = \sqrt{I_a^2 + I_L^2} \quad (17)$$

Для вычисления емкости используется формула:

$$I_c = U \omega C = \frac{U}{X_C} \quad (18)$$

Вычисления производятся по известным соотношениям

$$r_k = \frac{P_k}{I_k^2} \quad (19)$$

$$X_L = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{\left(\frac{U_K}{I_K}\right)^2 - (r_k)^2} = \omega L \quad (20)$$

Содержание учебных заданий

1. Собирается рабочая схема (рис. 4), устанавливается с помощью РНШ заданное входное напряжение (порядка 30-40 В). Начиная с 0 В.

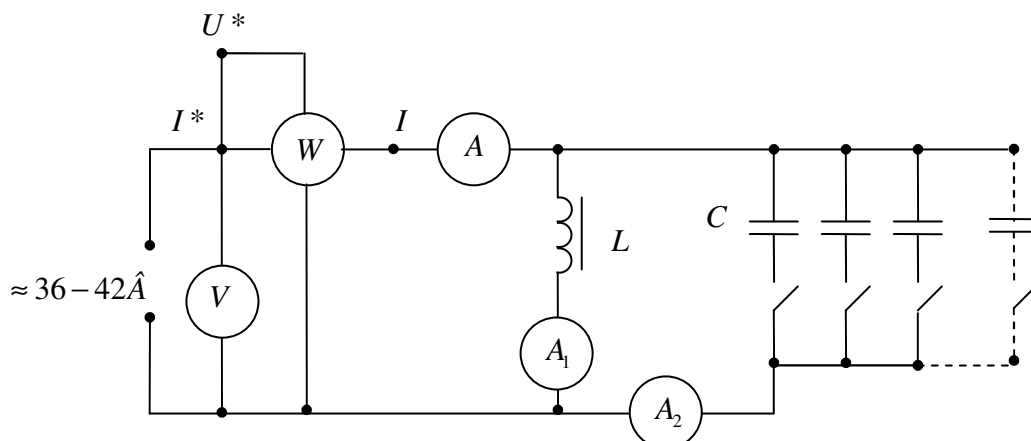


Рис. 4. Схема исследования резонанса токов

4. Проверить правильность сборки цепи, показав ее лаборанту или преподавателю.

5. При полностью или (почти полностью) введенном сердечнике, переключая емкость, добиваются резонанса, после чего производится опыт резонанса при изменении емкости. Для этого отключаются все конденсаторы и снимается первая точка характеристики при $C = 0$. Данные наблюдения в этой точке заносятся в табл. 1 и по ним вычисляются параметры катушки индуктивности, которые в последующих точках не изменяются. Последующие точки снимаются при увеличении емкости цепи ступенями по 10 мкФ. Перед снятием каждой точки проверяется входное напряжение и в случае надобности корректируется. Все измерения производятся при постоянной частоте источника питания (50 Гц). Данные наблюдения на всех точках заносятся в табл. 1.

Табл.1 Опыт резонанса при изменении емкости.
Постоянные величины. Наблюдения производятся при $C=0$

Наблюдения			Вычисления				
$U, В$	$I, А$	$P, Вт$	$I, А$	$X_L, Ом$	$X_C, Ом$	$R, Ом$	$L, мГн$

Переменные величины

Наблюдения			Вычисления		
$C_{ном}, мкФ$	$I, А$	$P, Вт$	$\cos \varphi$	$\varphi, град$	$C, мкФ$

Производится опыт резонанса при изменении индуктивности. Для этого в цепи с емкостью устанавливается ток, примерно равный среднему току в цепи индуктивности, Затем, изменяя с помощью сердечника ток в индуктивности от минимального к максимальному (при вставленном и выдвинутом сердечнике) снимают 8-19 точек. Все измерения производятся при постоянной частоте источника питания 50 Гц. Данные наблюдения на всех точках заносятся в табл. 2.

Табл. 2. Опыт резонанса при изменении индуктивности.
Постоянные величины.

$C_{ном}, мкФ$	$U, В$	$I, А$	$C, мкФ$

Переменные величины

Наблюдения			Вычисления							
$U, В$	$I, А$	$P, Вт$	$I, А$	$X_L, Ом$	$X_C, Ом$	$R, Ом$	$L, мГн$	$\cos \varphi$	$\varphi, град$	$U, В$

Производятся все вычисления, указанные в табл.1 и 2 с помощью формул, приведенных в п. 2 и по данным таблицам строится график зависимости величин I, I_a, I_L, I_C от соответствующего переменного параметра цепи - в первом случае от емкости, во втором - от индуктивности. Строятся векторные диаграммы (U, I) в каждом случае для трех точек. Одной при $I_C < I_L$, второй при резонансе и третий при $I_C > I_L$.

По данным табл. 1 определяется необходимая мощность и емкость батареи конденсаторов, для доведения коэффициента мощности до величины $=0,95$

В отчете должны быть представлены:

рабочая схема, заполненные табл. 1 и 2, два графика

$I, I_a, I_C, I_L, \cos\varphi, \varphi = f(t)$ при $t = \text{const}$ и $f = \text{const}$,

$I, I_a, I_C, I_L, \cos\varphi, \varphi = f(C)$ при $C = \text{const}$ и $f = \text{const}$

6 векторных диаграмм и расчет повышения коэффициента мощности.

Вопросы к допуску

1. В каких цепях наблюдается резонанс токов?
2. Назовите признаки и условия наличия резонанса тока в цепи.
3. Расскажите о ходе выполнения работы.

Контрольные вопросы

1. В каких цепях исследуется резонанс токов?
2. Что является основным признаком наличия резонанса в разветвленной цепи?
3. Какая цепь исследуется в настоящей работе?
4. В чем заключается возникновение (условие) резонанса в разветвленной цепи?
5. Как может быть достигнут резонанс токов при заданной частоте?
6. От чего зависят реактивные токи в ветвях цепи при резонансе?
7. Как производится опыт резонанса при изменении емкости?
8. Как производится опыт резонанса при изменении индуктивности?
9. Как строятся векторные диаграммы напряжения и токов?
10. Чему равно полное сопротивление параллельной цепи при резонансе?

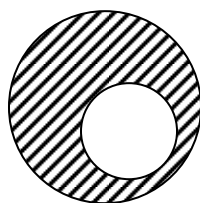
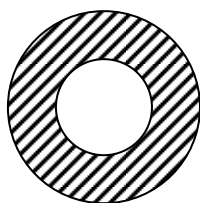
Задачи для самостоятельного решения

Лабораторная работа № (1.1)

1. Точка участвует одновременно в двух гармонических колебаниях одинаковой частоты происходящих во взаимно перпендикулярных направлениях и описываемых уравнениями $x = A \sin(\omega t + \pi/2)$ и $y = A \sin \omega t$. Определите уравнение траектории точки и начертите, указав направление ее движения по траектории.

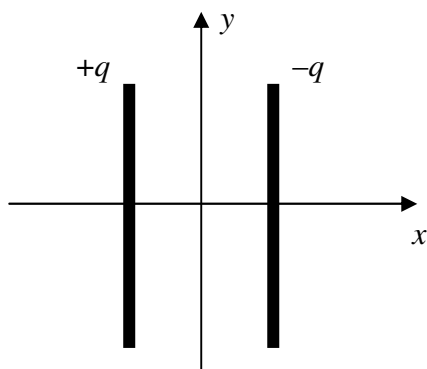
2. Точка участвует одновременно в двух гармонических колебаниях одинаковой частоты происходящих во взаимно перпендикулярных направлениях и описываемых уравнениями $x = A \sin \omega t$ и $y = B \cos \omega t$. Определите уравнение траектории точки и начертите, указав направление ее движения по траектории.

Лабораторная работа № (1.2)

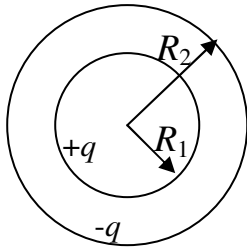


1. Электрическое поле создано положительным зарядом q , сообщенным проводящему шару радиусом R . Установить зависимости напряженности E и потенциала φ электрического поля от расстояния r до центра шара. Построить графики установленных зависимостей. Изменится ли результат, если тот же заряд сообщить проводящему шару с полостью внутри? Ответ пояснить.

2. Пластины плоского конденсатора несут заряды q разных знаков и одной величины. Изобразить силовые линии создаваемого пластинами поля. Построить графики зависимости напряженности $E_x(x)$ и потенциала $\varphi(x)$ этого поля от координат вдоль оси x , перпендикулярной пластинам, а также график зависимости $E_x(y)$ вдоль оси y , параллельной пластинкам. Положение осей показано на рисунке.

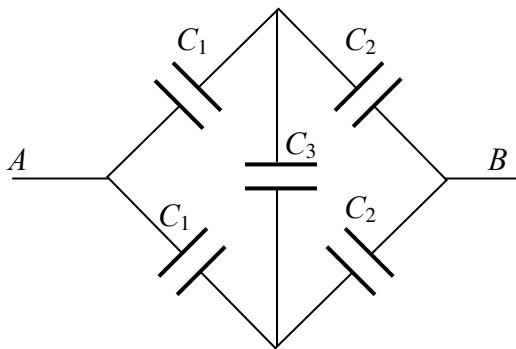


2. Пластины плоского конденсатора несут заряды q разных знаков и одной величины. Изобразить силовые линии создаваемого пластинами поля. Построить графики зависимости напряженности $E_x(x)$ и потенциала $\varphi(x)$ этого поля от координат вдоль оси x , перпендикулярной пластинам, а также график зависимости $E_x(y)$ вдоль оси y , параллельной пластинкам. Положение осей показано на рисунке.



3. Две концентрические проводящие сферы радиусами R_1 и R_2 несут заряды $+q$ и $-q$. Построить графики зависимости напряженности и потенциала электрического поля от расстояния до центра сфер и найти разность потенциалов сфер.

4. Металлический шар радиусом 2 см несет на себе заряд $1,3 \cdot 10^{-8}$ Кл. Шар окружен концентрической металлической оболочкой радиусом 5 см, заряд которой равен $-2 \cdot 10^{-8}$ Кл. Определить напряженность и потенциал поля на расстояниях 1, 4 и 6 см от центра шара.

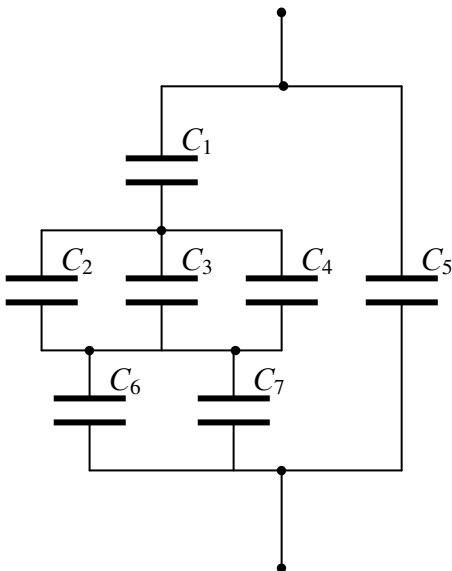


Лабораторная работа № (1.3)

1. Определить емкость соединения конденсаторов. Подключение производится в точках A и B соединения. Необходимые данные заимствовать из обозначений на рисунке.

C_1

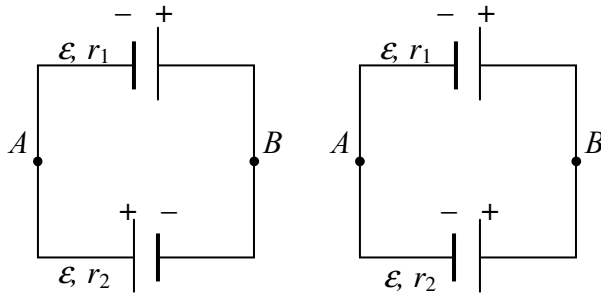
2. Два одинаковых плоских конденсатора (емкость каждого 0,01 мкФ) соединили параллельно, зарядили до напряжения 300 В и отключили от источника. Затем пластины одного из конденсаторов раздвинули на расстояние, вдвое большее первоначального. Какой заряд протечет при этом по соединительным проводам?



3. Группа конденсаторов (изображенная на рисунке) с емкостями $C_1 = 400$ мкФ, $C_2 = 100$ мкФ, $C_3 = 60$ мкФ, $C_4 = 200$ мкФ, $C_5 = 195$ мкФ, $C_6 = 350$ мкФ, $C_7 = 130$ мкФ подключена к электродам A и B . Определить емкость всей группы.

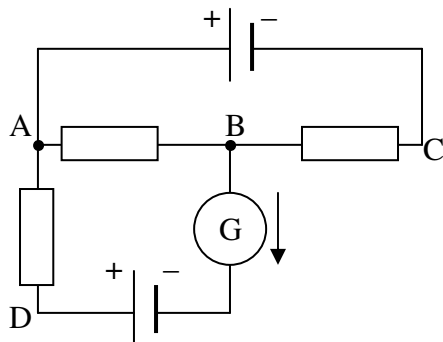
Лабораторная работа № (1.5)

1. Если к источнику тока подключить соединенные между собой последовательно 2 различных вольтметра, их показания будут 6 В и 3 В. При подключении одного первого вольтметра его показания 8 В. Найти ЭДС источника тока, пренебрегая сопротивлением соединительных проводов.



2. В электрических цепях изображенных на рисунке определить разность потенциалов между точками *A* и *B*. Необходимые данные заимствовать из рисунка. Сопротивлением соединительных проводов пренебречь.

3. Каково сопротивление проволоки диаметром 1 мм и длиной 20 м, если сопротивление проволоки диаметром 0,6 мм и длиной 9 м, изготовленной из того же материала, 25 Ом?



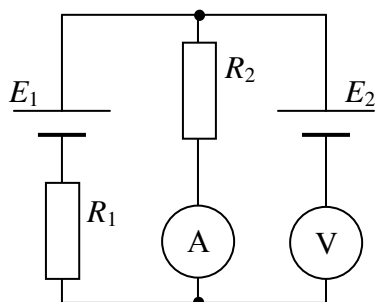
4. На рисунке изображена схема, на которой сопротивления участков *AB*, *BC* и *AD* равны соответственно 1000, 500 и 200 Ом. Гальванический элемент имеет ЭДС 18 В. Гальванометр регистрирует ток силой 0,5 мА, идущий в направлении, указанном стрелкой. Определить ЭДС второго гальванического элемента, пренебрегая

внутренними сопротивлениями обоих элементов и сопротивлением гальванометра.

Лабораторная работа № (1.6)

1. Электрическая цепь постоянного тока состоит из двух источников тока с ЭДС 4 В и 6 В, включенных встречно. Внутренние сопротивления источников тока одинаковы и равны 1 Ом. Определить тепловую мощность, которая выделяется на сопротивлении 2 Ом, подключенным параллельно источникам тока.

2. Три гальванических элемента с ЭДС 1,8 В, 1,4 В и 1,1 В и внутренними сопротивлениями 0,4 Ом, 0,6 Ом и 0,2 Ом соединены параллельно одноименными полюсами. Определить силу тока, идущего через каждый элемент.



3. ЭДС источников тока $\varepsilon_1 = 50$ мВ и $\varepsilon_2 = 120$ В. Сопротивления $R_1 = 80$ Ом и $R_2 = 200$ Ом. Сопротивление вольтметра 500 Ом. Каковы показания приборов? Сопротивлением источников пренебречь.

Лабораторная работа № (1.8)

1. В ванне для никелирования за 2 часа на пластинке площадью 100 см^2 образовалась пленка никеля толщиной 20 мкм. Валентность никеля равна 2. Плотность $8,8 \text{ г/см}^3$. При какой силе тока проводится электролиз?

2. При никелировании изделия его поверхность покрывается слоем никеля толщиной 0,05 мм. Определить среднюю плотность тока, если никелирование длится 2,5 часа.

3. При электролизе раствора азотносеребряной соли в течение часа выделилось 9,4 г серебра. Определить ЭДС поляризации, если напряжение на зажимах ванны 4,2 В, а сопротивление ванны 1,5 Ом.

Лабораторная работа № (1.9)

1. В нагревателе, подключенном к аккумулятору с ЭДС 12 В и внутренним сопротивлением 0,2 Ом, выделяется тепловая мощность 100 Вт, при этом КПД аккумулятора больше 50%. Когда спираль нагревателя перегорела, к аккумулятору подключили оставшуюся целой $\alpha = 0,8$ часть спирали. Во сколько раз изменится при этом мощность в нагревателе и КПД аккумулятора?

2. Определить коэффициент полезного действия аккумулятора, ЭДС которого 2,15 В, если он дает во внешнюю цепь ток силой 5 А. Внутреннее сопротивление аккумулятора 0,18 Ом.

Лабораторная работа №0

1. Гальванометр с ценой деления $1 \cdot 10^{-6}$ А/дел и сопротивлением 2 Ом необходимо использовать для измерения напряжения. Какое добавочное сопротивление необходимо подключить, чтобы цена деления составила $1 \cdot 10^{-5}$ В/дел?

2. Миллиамперметр, имеющий сопротивление 0,2 Ом, рассчитан на измерение силы тока до 100 мА. Каково должно быть сопротивление шунта, чтобы прибором можно было измерять силу тока до 5 А?

Лабораторная работа № (2.8)

1. Какова емкость конденсатора, которую нужно подключить к катушке индуктивностью $4 \cdot 10^{-5}$ Гн, сопротивление которой ничтожно мало, чтобы получить колебательный контур с собственной частотой колебаний 500 кГц?

2. Конденсатор колебательного контура имеет емкость 0,11 мкФ. Напряжение на его пластинах меняется по закону $U = U_0 \sin 10^4 \pi t$. Определить индуктивность катушки контура.

3. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью 0,5 мкФ и катушки индуктивностью 1 Гн с сопротивлением 40 Ом. Сколько полных колебаний должно совершиться в контуре, чтобы их амплитуда уменьшилась в e раз?

Лабораторная работа № (2.1)

1. По двум длинным прямым проводникам, находящимся на расстоянии 5 см друг от друга, протекают токи силой по 10 А в одном направлении. Определить индукцию магнитного поля в точке, находящейся на расстоянии 3 см от каждого проводника.

2. Два параллельных проводника с одинаковыми по силе токами находятся на расстоянии 8,7 см друг от друга и притягиваются с силой $2,5 \cdot 10^{-2}$ Н. Определить силу тока в проводниках, если длина каждого из них 320 см, а токи направлены в одну сторону.

Лабораторная работа № (2.2)

1. По кольцу из медной проволоки с площадью сечения 1 мм^2 протекает ток силой 10 А. К концам кольца приложена разность потенциалов 0,15 В. Найти индукцию магнитного поля в центре кольца.

2. Прямой бесконечный проводник имеет круговую петлю радиусом 80 см. определить силу тока в проводнике, если известно, что в точке А магнитная индукция равна 12,5 мкТл.

Лабораторная работа № (2.3)

1. Два соленоида $L_1=0,64$ Гн и $L_2=1$ Гн одинаковой длины и практически одинакового сечения вставлены один в другой. Определите взаимную индуктивность соленоидов.

2. Соленоид без сердечника с однослойной обмоткой из проволоки диаметром 0,5 мм имеет длину 0,4 м и поперечное сечение 50 см^2 . Какой ток течет по обмотке при напряжении 10 В, если за 0,5 мс в обмотке выделится количество теплоты, равное энергии поля внутри соленоида?

Лабораторная работа № (2.4)

1. Соленоид диаметром 4 см, имеющий 500 витков, помещен в магнитное поле, индукция которого изменяется со скоростью 1 мТл/с. Ось соленоида составляет с вектором магнитной индукции угол 45° . Определить ЭДС индукции, возникающую в соленоиде.

2. В однородном магнитном поле с индукцией 0,06 Тл находится соленоид диаметром, 8 см имеющий 80 витков проволоки сечением 1 мм^2 . Соленоид поворачивают на угол 180° за 0,2 с так, что ось остается направленной вдоль линий индукции поля. Определить ЭДС индукции, возникающей в соленоиде.

Лабораторная работа № (2.6)

1. Через сечение медной пластинки толщиной 0,2 мм пропускается ток 6 А. Пластика помещается в однородное магнитное поле с индукцией 1 Тл, перпендикулярное ребру пластины и направлению тока. Считая концентрацию электронов проводимости равной концентрации атомов определите возникающую холловскую разность потенциалов (плотность меди $8,93 \text{ г/см}^3$).

Лабораторная работа № (2.5)

1. По круговому тока радиусом 40 см, погруженному в жидкий кислород течет ток 1 А. Определите намагниченность в центре этого контура. Магнитная восприимчивость кислорода $3,4 \cdot 10^{-3}$.

2. Индукция и напряженность магнитного поля в веществе 1,2 Тл и 800 А/м. Определите намагниченность вещества.

Приложение

Обозначение единиц измерений некоторых физических величин

Ампер	А	Метр	м
Ватт	Вт	Минута	мин
Вебер	Вб	Ньютон	Н
Вольт	В	Ом	Ом
Генри	Гн	Паскаль	Па
Герц	Гц	Радан	рад
Джоуль	Дж	Секунда	С
Кельвин	К	Стерadian	ср
Килограмм	кг	Тесла	Тл
Кулон	Кл	Фарад	Ф
Люмен	лм		
Люкс	лк		

Десятичные приставки к названиям единиц

гига	10^9	Г
мега	10^6	М
кило	10^3	к
милли	10^{-3}	м
микро	10^{-6}	мк
нано	10^{-9}	н
пико	10^{-12}	п

Некоторые внесистемные единицы

$$1 \text{ \AA} (\text{ангстрем}) = 10^{-10} \text{ м.}$$

$$1 \text{ атм} = 0,101 \text{ МПа} = 760 \text{ мм. рт. ст.}$$

$$1 \text{ эВ} (\text{электрон-вольт}) = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Некоторые физические постоянные

Атомная единица массы	$a.e.m. = 1,6604 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Боровский радиус	$r_0 = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$
Гравитационная постоянная	$\gamma = 6,6720 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$
Магнетон Бора	$\mu_B = 0,92741 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/Тл}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Масса нейтрона	$m_n = 1,67495 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса протона	$m_p = 1,67265 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса электрона	$m_e = 0,91096 \cdot 10^{-30} \text{ кг}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,380622 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Постоянная Планка	$\hbar = 1,0545915 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$

Постоянная Фарадея	$F = 9,64194 \cdot 10^4$ Кл/моль
Скорость света в вакууме	$c = 2,997925 \cdot 10^8$ м/с
Универсальная газовая постоянная	$R = 8,31434$ Дж/(моль·К)
Число Авогадро	$N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Элементарный заряд	$e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$ Кл
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 0,885 \cdot 10^{-11}$ Ф/м

Погрешности измерений

Измерения: 1) прямые – измеряемая величина непосредственно определяется с помощью измерительного прибора
 2) косвенные – производятся непосредственные измерения величин связанных с искомой функциональной зависимостью

Алгоритм расчёта погрешности косвенных многократных измерений.

Пусть проведено n измерений величины x и n измерений величины y . Необходимо найти погрешность косвенных измерений величины z , причём $z = f(x, y)$.

- 1) Находим ошибку прибора $\sigma_{пр}$. Ошибка прибора указывается в техпаспорте (инструментальная погрешность). Если техпаспорта нет, то за $\sigma_{пр}$ берётся половина цены деления прибора или одна единица младшего разряда.
- 2) Субъективная ошибка $\sigma_{суб}$. В том случае если в работе производятся измерения интервалов времени, то для секундомера её принимают равной 0,3 секунды.
- 3) Рассчитываем средние значения измеренных величин:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{и} \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}.$$

- 4) Вычислим среднюю квадратичную погрешность среднего значения или отклонение среднего:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad \text{и}$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n \cdot (n-1)}} .$$

- 5) Рассчитываем ошибки измерения величин x и y :

$$\sigma_x = \sqrt{S_x^2 + \sigma_{\text{суб}}^2 + \sigma_{\text{нр}}^2} \quad \text{и} \quad \sigma_y = \sqrt{S_y^2 + \sigma_{\text{суб}}^2 + \sigma_{\text{нр}}^2} .$$

- 6) Находим ошибку функции $z = f(x, y)$ данных аргументов по формуле:

$$\sigma_z = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \cdot \sigma_x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \cdot \sigma_y\right)^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} . \quad \text{Ошибка}$$

округления $\sigma_{\text{окр}}$ принимается равной 1 единице разряда, до которого ведётся округление (если при расчете данной ошибки одно из слагаемых оказывается во много раз меньше другого, то им можно пренебречь).

- 7) Рассчитываем среднее значение функции $\bar{z} = f(\bar{x}, \bar{y})$.

- 8) Рассчитываем относительную погрешность $\varepsilon = \frac{\sigma_z}{\bar{z}} \cdot 100\%$

- 9) Записываем ответ в виде $z = \bar{z} \pm \sigma_z, \varepsilon = \dots\%, P = 68\%$ (с доверительной вероятностью 0,68).

- 10) В том случае если необходимо её повысить ответ записываем в виде: $z = \bar{z} \pm t_s \cdot \sigma_z, P = \dots\%$. Коэффициент Стьюдента выбирается по таблице по известному числу измерений и выбранной доверительной вероятности.

Пример.

Алгоритм расчёта погрешности косвенных однократных измерений.

Необходимо рассчитать погрешность определения электрохимического эквивалента меди. Проведены измерения: масса пластины $m_{\text{пл}}=20$ г, масса меди выделившейся на пластине $m=250$ мг, ток в цепи $I=0,5$ А, время $t=30$ мин. Электрохимический эквивалент меди рассчитываем по формуле $k = \frac{m}{I \cdot t}$. Необходимо рассчитать погрешность

косвенных (электрохимический эквивалент меди находим не напрямую, а находим по формуле) однократных (произведено по одному прямому измерению величин). Массу измеряли на весах, силу тока – амперметром, время – секундомером.

- 1) Находим ошибки приборов σ_{np} . Цена деления амперметра 0,01 А, следовательно, $\sigma_{np I} = 0,005$ А. Аналогично для секундомера $\sigma_{np t} = 0,05$ с. Приборная погрешность весов (в отсутствии описания) равна одной единице младшего разряда: $\sigma_{np m} = 0,1$ г = $1 \cdot 10^{-4}$ кг.

2) –

3) –

- 4) Находим ошибки измерения величин: $\sigma_I = \sqrt{0,005^2} = 0,005$ А,
 $\sigma_m = \sqrt{(1 \cdot 10^{-4})^2} = 1 \cdot 10^{-4}$ кг, $\sigma_t = \sqrt{0,05^2 + 0,3^2} = 0,3391$ с.

- 5) Находим ошибку расчета электрохимического эквивалента меди. Найдём частные производные:

$$\sigma_k = \sqrt{\left(\frac{1}{I \cdot t} \cdot \sigma_m\right)^2 + \left(-\frac{m}{I} \cdot \frac{1}{t^2} \cdot \sigma_t\right)^2 + \left(-\frac{m}{t} \cdot \frac{1}{I^2} \cdot \sigma_I\right)^2 + \sigma_{окр}^2}.$$

Погрешность округления принимаем равной 0,0001.

$$\sigma_k = \sqrt{\dots}$$

- 6) Находим электрохимический эквивалент меди по расчетной формуле: $k = \dots$

- 7) Находим относительную погрешность $\varepsilon = \frac{\sigma_k}{k} \cdot 100\%$

- 8) Записываем ответ в виде (в случае однократных измерений доверительная вероятность не записывается):
 $k = k \pm \sigma_k, \varepsilon = \dots\%$.

Литература для самостоятельного изучения

1. Трофимова Т.И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. 5-е изд., стер. – М.: «Высшая школа», 1998 – 542 с., ил.
2. Курс физики: Учебник для вузов: В 2 т. Т. 1. 2-е изд., испр./Под ред. В.Н. Лозовского. – СПб.: Издательство «Лань», 2001 – 576 с.
3. Курс физики: Учебник для вузов: В 2 т. Т. 2. 2-е изд., испр./Под ред. В.Н. Лозовского. – СПб.: Издательство «Лань», 2001 – 592 с.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1,2,3 М. Наука, 1977- 1979
5. Сивухин Д.А. Общий курс физики. Т 1,2,3,4,5 . М. Наука 1974-1990.
6. Гершешон Е.М.. Малов Н.Н. Курс общей физики т. 1 ,2,3,4 . М. Просвещение. 1979 - 1982.
7. Курс общей физики. (В основу положен курс общей физики Г.А Зисман, О.М. Тодес. – М.: Наука, 1965.) В 3-х частях. – Киев: «Дніпро». 1994. – 349 с.
8. Трофимова Т.И. Справочник по физике для студентов и абитуриентов / Т.И. Трофимова. – М.: ООО «Издательство Астрель»: ООО «Издательство АСТ», 2001. – 400 с., ил.
9. Калашников А. А. Электричество М.: Наука, 1970.
10. Телесин Р.В., Яковлев В.Ф. Курс физики: Электричество. – М.: Учпедгиз, 1960. – 456 с.

Содержание

Введение.....	3
Лабораторная работа №0. Электроизмерительные приборы.....	4
Электричество.....	13
Лабораторная работа №1.1. Изучение работы электронного осциллографа.....	13
Лабораторная работа №1.2. Исследование электростатического поля.....	20
Лабораторная работа №1.3. Определение емкости конденсатора посредством баллистического гальванометра.....	23
Лабораторная работа №1.4. Изучение свойств сегнетоэлектриков.....	27
Лабораторная работа №1.5. Изучение закона Ома.....	31
Лабораторная работа №1.6. Законы Кирхгофа.....	35
Лабораторная работа №1.7. Определение неизвестного сопротивления с помощью мостовой схемы.....	37
Лабораторная работа №1.8. Определение электрохимического эквивалента меди и вычисление постоянной Фарадея..	40
Лабораторная работа №1.9. Исследование зависимости полезной мощности электрического тока от нагрузки.....	43
Магнетизм.....	46
Лабораторная работа №2.1. Изучение магнитного поля.....	46
Лабораторная работа №2.2. Определение горизонтальной составляющей напряжённости магнитного поля Земли.....	51
Лабораторная работа №2.3. Определение индуктивности катушки методом измерения ее полного сопротивления.....	56

Лабораторная работа №2.4. Использование явления электромагнитной индукции для изучения магнитного поля	60
Лабораторная работа №2.5. Изучение гистерезиса ферромагнитных материалов	65
Лабораторная работа №2.6. Эффект Холла.....	69
Лабораторная работа №2.7. Исследование распределения термоэлектронов по скоростям методом магнетрона	75
Лабораторная работа №2.8. Изучение затухающих колебаний в колебательном контуре.....	80
Лабораторная работа №2.9. Изучение релаксационных колебаний.....	85
Лабораторная работа №2.10. Исследование резонанса напряжений.....	92
Лабораторная работа №2.11. Исследование резонанса токов	97
Задачи для самостоятельного решения.....	104
Приложение.....	110
Погрешности измерений.....	111
Литература для самостоятельного изучения.....	114
Содержание.....	115