

УДК 535

Рецензенты:

Кафедра физики Кубанского государственного технологического
университета

Доктор физико-математических наук, профессор

М.И. Дерябин

Матвиенко, Г.И., Исаев, В.А., Григорьян, Л.Р.

М 77 Электричество и магнетизм: лабораторный практикум/
Г.И. Матвиенко, В.А. Исаев, Л.Р. Григорьян. Кубанский гос. ун-т,
2011. – 61 с. 100 экз.

Приведено описание 8 лабораторных работ по курсу «Электричество и магнетизм». Содержит теоретические сведения, необходимые для выполнения работ, методические указания, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы.

Адресуется студентам физико-технических факультетов вузов.

УДК 535

© Кубанский государственный
университет, 2011

ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемое издание преследует цель подготовить специалиста в области основ математических и естественнонаучных знаний с высшим профессиональным образованием, обладающего универсальными и профессиональными компетенциями для успешной работы в избранной сфере деятельности и способствующими его социальной мобильности и устойчивости на рынке труда.

Лабораторный практикум позволяет решить следующие задачи:

1) на практике продемонстрировать основные законы электромагнетизма, ознакомить с принципами работы измерительной аппаратуры, дать практическое представление о системах единиц измерения и их практическом использовании;

2) привить начальные навыки экспериментальной работы, развить способность планировать и проводить эксперименты по заданным методикам, математически обрабатывать и анализировать их результаты, составлять отчет о проведенных исследованиях;

3) дать качественное представление о некоторых явлениях электромагнетизма, выходящих за рамки теоретического курса, но являющихся существенными для воспитания физика-экспериментатора.

Лабораторная работа 1

ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

Цель работы

Научиться проводить необходимые измерения в электрических цепях с помощью осциллографа.

Теоретические сведения

1. Назначение электронного осциллографа.

Электронный осциллограф в основном предназначен для исследования быстропеременных и периодических процессов. Например, с помощью осциллографа можно измерить напряжение, изменение его во времени, сдвиг фаз между напряжениями, сравнить частоты и амплитуды различных переменных напряжений. Кроме того, осциллограф при применении соответствующих преобразователей позволяет исследовать неэлектрические процессы, например, измерять малые промежутки времени, кратковременные давления и т.д.

Достоинствами электронно-лучевого осциллографа являются его высокая чувствительность и безинерционность действия, что позволяет исследовать процессы, длительность которых порядка $10^{-6} - 10^{-13}$ с.

2. *Электронно-лучевая трубка.* Основная часть осциллографа – электронно-лучевая трубка (рис.1).

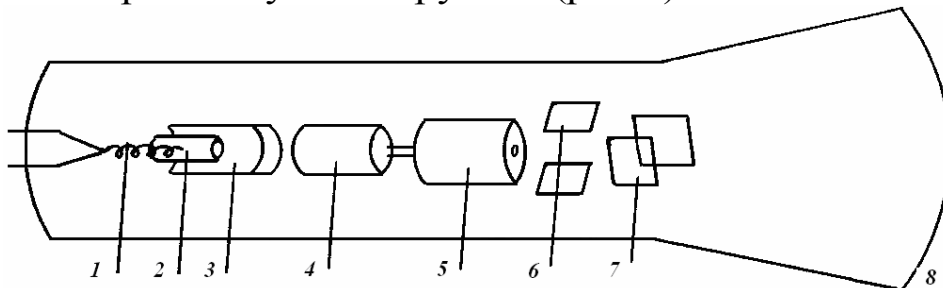


Рис. 1

Электронно-лучевая трубка представляет собой стеклянный баллон, из которого выкачан воздух до давления порядка

10^{-6} мм рт. ст. Внутри трубки впаяны электроды. Источником электронов служит катод 2, подогреваемый спиралью 1. Между катодом и первым анодом 4 приложено напряжение порядка 10^3 В, поэтому электроны ускоряются электрическим полем и попадают на флюоресцирующий экран 8, вызывая его свечение. Катод находится внутри цилиндра 3, являющегося управляющим электродом. В основании цилиндра сделано отверстие для пропуска узкого электронного пучка.

Подводя отрицательный потенциал к цилиндру, можно уменьшать количество электронов, проходящих через его отверстие, а следовательно, и яркость пятна на экране трубки.

Второй анод 5, потенциал которого выше первого, служит для фокусирования электронного луча. Регулируя потенциал второго анода, можно получить на экране трубки ярко светящуюся точку. Выйдя из второго анода, электронный луч проходит между двумя парами металлических пластин 6 и 7. Если на любую пару пластин подать напряжение, то электронный луч отклонится от своего первоначального направления, так как электроны будут притягиваться к пластине, заряженной положительно, и отталкиваться от пластины, заряженной отрицательно.

Пусть разность потенциалов между катодом 2 и вторым анодом 5 равна U . Работа, совершаемая силами электрического поля по перемещению электрона между катодом с потенциалом V_k и анодом с потенциалом V_a , равна:

$$A = e(V_a - V_k) = eU. \quad (1)$$

Эта работа идет на сообщение электрону кинетической энергии:

$$eU = mv^2/2. \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что электронно-лучевая трубка является практически безинерциальным прибором. Действительно, так как величина $eU = \text{const} = 10^{-16}$ эВ, а масса электрона мала $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, то скорость электрона очень велика, поэтому электроны практически мгновенно достигают экрана.

Пусть под действием приложенного напряжения U_x след электронного луча смещается на величину x в горизонтальном направлении, а под действием U_y – на величину y в вертикальном направлении. Величины:

$$j_x = x/U_x \quad (3)$$

$$j_y = y/U_y \quad (4)$$

характеризуют чувствительность трубки к напряжению соответственно по оси x и y . Чувствительность к напряжению показывает величину отклонения электронного луча на экране при разности потенциалов на пластинах в 1 В.

При постоянном анодном напряжении U величины j_x и j_y для данной электронно-лучевой трубки постоянны. Кроме трубок с электростатическим отклонением луча существуют электронно-лучевые трубки с магнитным отклонением луча.

3. Генератор развертки.

Если исследуемое переменное напряжение:

$$U_y = U_0 \sin \omega t \quad (5)$$

подать на вертикально отклоняющие пластины, то световое пятно на экране будет совершать колебания. Вследствие световой инерции экрана и способности нашего глаза сохранять некоторое время полученное световое восприятие на экране будет видна неподвижная вертикальная линия.

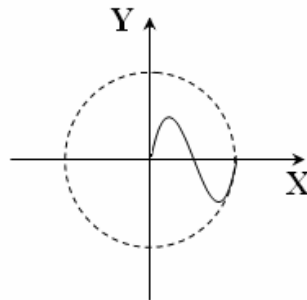


Рис. 2

Пусть одновременно напряжение на горизонтально отклоняющих пластинах возрастает по линейному закону:

$$U_x = kT. \quad (6)$$

Под действием этого напряжения пятно на экране осциллографа будет равномерно перемещаться слева направо. Результирующая траектория луча представляет зависимость исследуемого напряжения от времени (рис. 2). Действительно, из формул (3) – (6) следует, что:

$$x = U_x j_x = j_x k t;$$

$$y = U_y j_y = j_y U_0 \sin \omega t.$$

При постоянных j_x и j_y величины $j_x k t$ и $j_y U_0$ постоянны, по-

этому $y = y(x)$ является синусоидой, вычерченной электронным лучом на экране трубки в определенном масштабе. Если по истечении времени, равного периоду исследуемого колебания, напряжение на горизонтально отклоняющих пластинах U_x скачком падает до нуля, то световое пятно скачком возвращается в исходное положение. Если U_x снова возрастает по тому же закону, то на экране трубки вновь воспроизводится синусоида. Таким образом, для получения развертки исследуемого напряжения во времени на горизонтально отклоняющие пластины необходимо подать пилообразное напряжение (рис. 3), причем периоды пилообразного и исследуемого напряжения должны совпадать.



Рис. 3

Если период развертывающего пилообразного напряжения кратен периоду исследуемого, например, больше его, то на экране получится изображение нескольких полных колебаний. При неравенстве и некратности периода кривая на экране будет двигаться.

Источником пилообразного напряжения является релаксационный генератор, называемый генератором развертки. Принцип действия релаксационного генератора подробно описан в работе «Изучение релаксационного генератора». Частоту генератора пилообразного напряжения в осциллографах можно изменять в широких пределах. При ручной регулировке поддерживать строгое равенство частот напряжения неудобно, поэтому осциллографы снабжаются автоматическим устройством для синхронизации пилообразного напряжения с исследуемым.

4. Блок-схема осциллографа.

На рис. 4 приведена блок-схема осциллографа. Основными узлами осциллографа являются электронно-лучевая трубка, блок питания, усилитель напряжения U_x , усилитель напряжения U_y , генератор развертки и синхронизирующее устройство.

Исследуемое напряжение подаётся непосредственно либо через усилитель на вертикально-отклоняющие пластины. На вторую пару пластин подаётся напряжение от генератора развёртки. На лицевой панели осциллографа расположены все органы управления с соответствующими надписями.

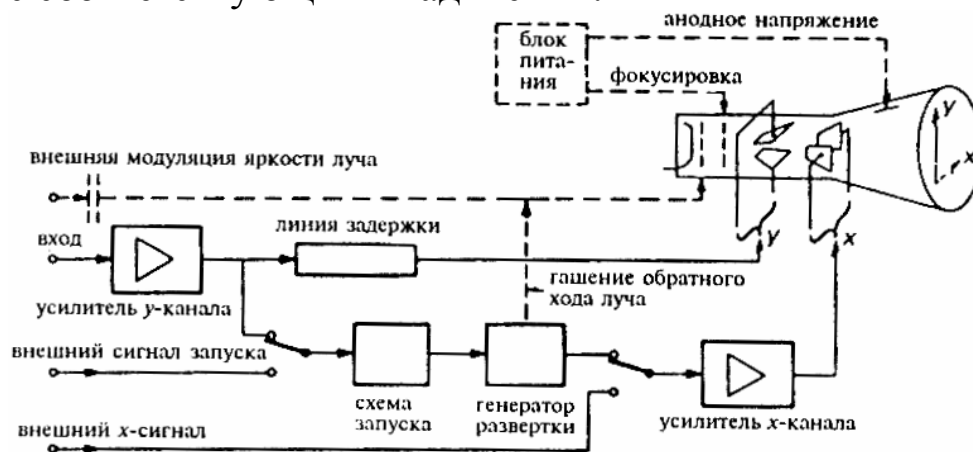


Рис. 4

Оборудование и аппаратура

Лабораторный стенд, осциллограф, вольтметр, магазин сопротивлений, соединительные провода.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Задание 1. Определение чувствительности горизонтально-отклоняющих пластин электронно-лучевой трубки.

Электрические цепи для проведения работы собираются на лабораторном стенде. В первом задании необходимо собрать схему (рис. 5) подключения генератора лабораторного стенда через делитель напряжения к выходу «X». На осциллографе необходимо отключить усилители напряжения U_x и U_y , подключить с помощью комплекта соединительных проводов осциллограф к лабораторному стенду. Включив осциллограф, генератор развёртки отключают с помощью рукояток «вверх-вниз», «вправо-влево» и выводят светлое пятно на центр координационной сетки. С помощью делителя напряжения подают на выход «X» напряжение 2,5 или 5 В и для каждого значения измеряют по координатной сетке длину световой линии $L = 2x$, в миллиметрах:

$$j_x = L/2U_x. \quad (7)$$

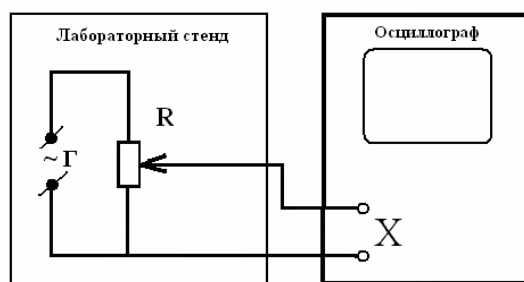


Рис. 5

Аналогично определяют чувствительность вертикально отклоняющих пластин.

Задание 2. Измерение напряжения с помощью осциллографа.

В данном задании необходимо освоить методику измерения напряжения с помощью осциллографа. Подключить осциллограф аналогично первому заданию. Затем, изменяя напряжение с помощью делителя напряжения, по величине отклонения луча с учётом коэффициентов и положения ручки аттенюатора определяют величину измеряемого напряжения по формуле (8):

$$U_y = L/2j_y. \quad (8)$$

Измеренную с помощью осциллографа величину напряжения сравнивают с напряжением, измеренным вольтметром. Затем определяют погрешность измерений напряжения в случае измерения осциллографом и вольтметром.

Задание 3. Измерение сопротивлений.

Электронный осциллограф целесообразно применять для измерения активных сопротивлений. Для измерения комплексного сопротивления необходимо собрать схему на рис. 6, где R и R_0 – переменные сопротивления; r – активная и x – реактивная составляющие измеряемого сопротивления Z .

Перед началом измерений путем регулирования усилителей необходимо установить одинаковую чувствительность к напряжению по осям x и y . При включении схемы на экране появится эллипс. Изменением сопротивления R_0 нужно добиться равенства вертикального и горизонтального отклонений. В этом случае падение напряжения на R_0 будет равно падению напряжения на измеряемом полном сопротивлении, что соответствует условию

$z = R_0$, где z – модуль искомого полного сопротивления.

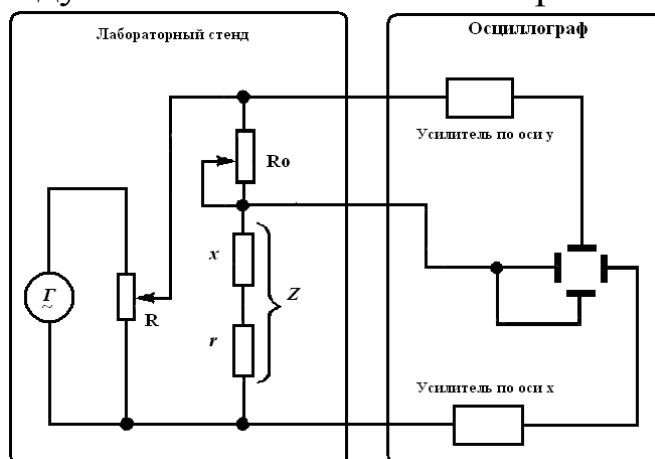


Рис. 6

По осциллограммам определяют синус угла сдвига фаз. Зная z и $\sin\varphi$, определить значения x и r по формулам

$$x = z \cdot \sin\varphi; \quad r = \sqrt{z^2 - x^2}. \quad (9).$$

Задание 4. Измерение частоты методом фигур Лиссажу.

Метод фигур Лиссажу используется для измерения частоты синусоидальных напряжений. На один из входов (например, на вход канала Y) подаётся напряжение с измеряемой частотой ω_x . На вход канала X, работающего в режиме усиления (генератор развёртки отключён), подаётся напряжение с известной частотой ω_0 . Электронный луч под действием двух взаимно перпендикулярных и меняющихся по гармоническому закону соответственно с частотами ω_x и ω_0 напряжений вычерчивает на экране некоторую сложную кривую. Если отношение частот выражается отношением целых чисел, то результирующая кривая (фигура Лиссажу) представляется в виде неподвижного изображения (пример такой фигуры приведен на рис.7).

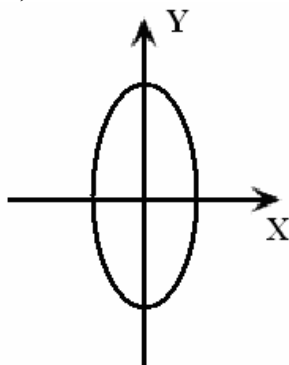


Рис. 7

Для определения отношения частот необходимо подсчитать наибольшее число точек пересечений вертикальной N_y и горизонтальной N_x прямыми наблюдаемой фигуры. Затем составляют соотношение

$$\omega_n / \omega_y = N_x / N_y,$$

где ω_y и ω_n – частоты напряжений подаваемые на входы каналов Y и X осциллографа. Для фигуры на рис.7 $N_y = 2$, $N_x = 2$ и поэтому

$$\omega_y = \omega_x N_x / N_y$$

$$\text{или } \omega_x = \omega_0 N_x / N_y.$$

Погрешность измерения определяется погрешностью известной частоты ω_0 . Для измерения частоты следует собрать схему по рис.8.

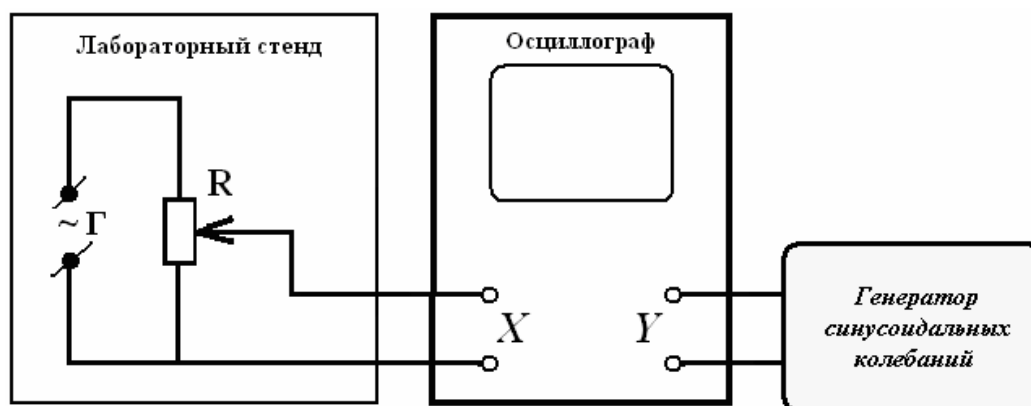


Рис. 8

На осциллографе отключают развёртку по «X», на вход «X» подают сигнал с лабораторного стенда. На вход «Y» подают сигнал от генератора синусоидальных колебаний. Первоначально получают круг на экране осциллографа. Затем, меняя частоту ручкой «Частота» на генераторе, получают другие фигуры Лиссажу. Осциллографические методы измерения частоты просты, но требуют применения генератора гармонических колебаний, частоту которого можно изменять, а её значение должно быть известно.

Контрольные вопросы и задания

1. Для чего предназначен осциллограф?
2. Основные типы и характеристики осциллографов.

3. Назовите основные блоки осциллографических устройств и особенности их применения.
4. Объясните блок-схему прибора.
5. Расскажите о назначении органов управления осциллографа.
6. Выведите формулу (7).
7. Что называется чувствительностью трубки по напряжению?
8. Почему осциллограф является практически безинерционным прибором?
9. Какую кривую будет описывать электронный луч на экране осциллографа, если переменное напряжение подаётся только на вертикально отклоняющие пластины?
10. Каково назначение генератора развёртки?
11. Как измерять с помощью осциллографа любое периодическое напряжение?
12. Каким образом можно измерить U , R , ω ?

Рекомендуемая литература

- Калашников С.Г. Электричество. М., 2003.
- Новопольский Б. А. Как работать с осциллографом. М., 1978.
- Суятин Б.Д. Осциллограф и подготовка его к работе: метод. рекомендации. Краснодар, 1983.
- Евтихийев Н.Н и др. Измерение электрических и неэлектрических величин. М., 1990.
- Певчев Ю.Ф., Финогенов К.Г. Автоматизация физического эксперимента: учеб. пособие. М., 1986.

Лабораторная работа 2

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ МОСТОВЫМ МЕТОДОМ

Цель работы

Провести измерения сопротивления с помощью мостового метода.

Теоретические сведения

Обобщенный закон Ома

Если бы все действующие на носители тока силы сводились к силам электростатического поля, то под действием этих сил положительные носители перемещались бы из мест с большим потенциалом к местам с меньшим потенциалом, а отрицательные носители двигались бы в обратном направлении. Это вело бы к выравниванию потенциалов, и в результате все соединенные между собой проводники приобрели бы одинаковый потенциал – ток прекратился. Иными словами, при наличии лишь кулоновских сил стационарное поле должно быть полем статическим.

Чтобы этого не произошло, в цепи постоянного тока наряду с участками, где положительные носители тока движутся в сторону уменьшения потенциала φ , должны иметься участки, на которых перенос положительных носителей происходит в сторону возрастания φ , т. е. против сил электрического поля. Перенос носителей на этих участках возможен лишь с помощью сил неэлектростатического происхождения. Это так называемые *сторонние силы*.

Таким образом, для поддержания постоянного тока необходимы сторонние силы, действующие либо на отдельных участках цепи, либо во всей цепи. Физическая природа сторонних сил может быть различной. Они могут быть обусловлены, например, химической и физической неоднородностью проводника – таковы силы, возникающие при соприкосновении разнородных про-

водников (гальванические элементы, аккумуляторы) или проводников различной температуры (термоэлементы) и др.

Для количественной характеристики сторонних сил вводят понятие поля сторонних сил и его напряженность \mathbf{E}^* . Этот вектор численно равен сторонней силе, действующей на единичный положительный заряд. Если под действием электрического поля \mathbf{E} в проводнике возникает ток плотности $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$ (σ – удельная проводимость), то очевидно, что под совместным действием поля \mathbf{E} и поля сторонних сил \mathbf{E}^* плотность тока

$$\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{E}^*). \quad (1)$$

Это уравнение обобщает закон Ома $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$ на случай неоднородных участков проводящей среды. Оно выражает обобщенный закон Ома в локальной форме.

Неоднородным называют участок цепи, на котором действуют сторонние силы. Рассмотрим частный, но практически важный случай, когда электрический ток течет вдоль тонких проводов. В этом случае направление тока будет совпадать с направлением оси провода и плотность тока \mathbf{j} может считаться одинаковой во всех точках сечения провода. Пусть площадь сечения провода равна S , причем S может быть и неодинаковой по длине провода.

Разделим уравнение (1) на σ , полученное выражение умножим скалярно на элемент оси провода $d\mathbf{l}$, взятый по направлению от сечения 1 к сечению 2 (его мы примем за положительное), и затем проинтегрируем по длине провода от сечения 1 до сечения 2

$$\frac{1}{\sigma} \int_1^2 \mathbf{j} d\mathbf{l} = \int_1^2 \mathbf{E} d\mathbf{l} + \int_1^2 \mathbf{E}^* d\mathbf{l}. \quad (2)$$

Преобразуем подынтегральное выражение у первого интеграла: заменим σ на $1/\rho$ и $\mathbf{j} d\mathbf{l}$ на $j_1 d\mathbf{l}$, где j_1 – проекция вектора \mathbf{j} на направление вектора $d\mathbf{l}$. Далее учтем, что j_1 – величина алгебраическая; она зависит от того, как направлен вектор \mathbf{j} по отношению к $d\mathbf{l}$: если $\mathbf{j} \uparrow \uparrow d\mathbf{l}$, то $j_1 > 0$, если же $\mathbf{j} \uparrow \downarrow d\mathbf{l}$, то $j_1 < 0$. И последнее, заменим j_1 на I/S , где I – сила тока, величина тоже алгебраическая (как и j_1). Поскольку для постоянного тока I одинаково во всех

сечениях цепи, эту величину можно вынести за знак интеграла. В результате получим

$$I \int_1^2 \rho \frac{dl}{S}.$$

Выражение $\rho dl/S$ определяет не что иное, как сопротивление участка цепи длиной dl , а интеграл от этого выражения – полное сопротивление R участка цепи между сечениями 1 и 2.

Теперь обратимся к правой части (2). Первый интеграл здесь — это разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$, а второй интеграл представляет собой электродвижущую силу (э.д.с.) ε_{12} , действующую на данном участке цепи:

$$\varepsilon_{12} = \int_1^2 \mathbf{E} * d\mathbf{l}. \quad (3)$$

Эта величина, как и сила тока I , является алгебраической: если э.д.с. способствует движению положительных носителей тока в выбранном направлении, то $\varepsilon_{12} > 0$, если же препятствует, то $\varepsilon_{12} < 0$.

После всех указанных преобразований уравнение (2) будет иметь следующий вид:

$$RI = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}.$$

Это уравнение выражает интегральную форму закона Ома – для неоднородного участка цепи в отличие от уравнения (1), представляющего тот же закон в локальной форме.

Рассмотрим участок цепи, показанный на рис. 1. Сопротивление отлично от нуля только на отрезке R . На нижней части рисунка представлен ход потенциала φ вдоль данного участка. Из того факта, что потенциал на отрезке R уменьшается слева направо, следует, что $I > 0$, т. е. ток течет в положительном направлении (от 1 к 2). В данном случае $\varphi_1 < \varphi_2$, но ток течет от точки 1 к точке 2 – в сторону большего значения потенциала. Это воз-

можно лишь потому, что на данном участке имеется ЭДС ε_{12} , действующая в положительном направлении (от 1 к 2).

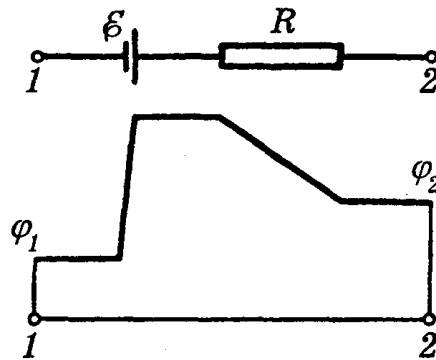


Рис. 1

Расчет разветвленных цепей, например нахождение токов в отдельных ее ветвях, значительно упрощается, если пользоваться двумя *правилами Кирхгофа*.



Рис. 2

Первое правило Кирхгофа – оно относится к узлам цепи, т. е. к точкам ее разветвления: **алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:**

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0. \tag{4}$$

При этом токи, идущие к узлу, и токи, исходящие из узла, следует считать величинами разных знаков, например: первые – положительными, вторые – отрицательными (или наоборот – это несущественно). Применительно к рис. 2 уравнение (4) запишется так:

$$I_1 + I_3 - I_2 = 0.$$

Уравнение (4) является следствием условия стационарности, а в конечном итоге – следствием закона сохранения заряда.

Второе правило Кирхгофа относится к любому выделенному в разветвленной цепи замкнутому контуру: **алгебраическая сумма произведений сил токов в отдельных участках произвольного замкнутого контура на их сопротивления равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом контуре:**

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{k=1}^n \varepsilon_k.$$

Для доказательства этого правила достаточно рассмотреть случай, когда выделенный контур состоит из трех участков (рис. 2). Зададим направление обхода, например, по часовой стрелке, как показано на рисунке. Затем применим к каждому из трех участков закон Ома:

$$\begin{aligned} I_1 R_1 &= \varphi_2 - \varphi_3 + \varepsilon_1, \\ I_2 R_2 &= \varphi_3 - \varphi_1 + \varepsilon_2, \\ I_3 R_3 &= \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_3. \end{aligned}$$

Сложив эти равенства, приходим после сокращения всех потенциалов ко второму правилу Кирхгофа.

Таким образом, второе правило Кирхгофа является следствием закона Ома для неоднородных участков цепи.

Важным классом устройств, предназначенных для измерения параметров электрических цепей (сопротивления, емкости, индуктивности и др.), являются мостовые устройства, реализующие методы сравнения. Это методы, при которых измеряемая величина сравнивается с величиной, воспроизводимой мерой. Мостовые методы сложны, но характеризуются высокой точностью. Методы сравнения включают дифференциальный и нулевой методы, метод противопоставления, метод замещения и метод совпадений.

В зависимости от рода питающего источника различают мосты постоянного тока и переменного тока. Принципиальная схема моста постоянного тока приведена на рис. 3. Мост состоит из четырёх резисторов с сопротивлениями R_1, R_2, R_3, R_x , образующими замкнутый четырёхугольник. Стороны этого четырёхугольника называются плечами моста, а точки соединения соседних плеч – вершинами моста. Цепи, соединяющие противоположные вершины, называются диагоналями. В одну диагональ включён источник постоянного напряжения E , а в другую – индикатор нуля G . В качестве индикатора используются чувствительные гальванометры с нулём посередине. В случае моста переменного тока его плечи могут включать не только резисторы, но также емкости и катушки индуктивности, т.е. сопротивления могут иметь комплексный характер.

При равенстве потенциалов рис. 3 точек A и B ток в цепи индикатора отсутствует и мост считается уравновешенным или сбалансированным. Соотношение между сопротивлениями плеч, при котором мост уравновешен, называется условием равновесия моста. Положение равновесия достигается соответствующим подбором сопротивлений плеч моста. Значения сопротивлений, при которых выполняется условие равновесия моста, можно получить, используя законы Кирхгофа для расчета мостовой схемы.

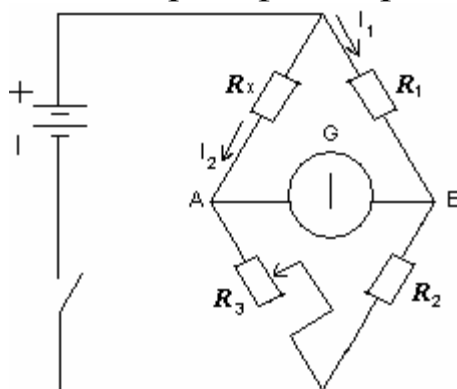


Рис. 3

Предположим, что мост уравновешен. В этом случае ток в индикаторную диагональ не ответвляется и через резисторы R_1, R_2 протекает один и тот же ток I_1 , а через R_3, R_x – одинаковые токи I_2 . Так как разность потенциалов между точками A и B отсут-

стствует, то эти токи создают одинаковые падения напряжений на сопротивлениях $R_1 R_x$ и $R_2 R_3$, т.е.

$$I_1 R_1 = I_2 R_x, \quad I_1 R_2 = I_2 R_3,$$

откуда

$$R_x = R_1 R_3 / R_2. \quad (5)$$

Таким образом, измерение при помощи одинарного моста можно рассматривать как сравнение неизвестного R_x с образцовым сопротивлением R_3 при сохранении неизменным отношением R_1/R_2 . По этой причине плечо R_3 называют плечом сравнения, плечи R_1 и R_2 – плечами отношения.

Важным параметром моста для измерения сопротивления является его чувствительность. Чувствительность моста определяется величиной тока, протекающего через нуль-индикатор, при небольшом отклонении от состояния равновесия. Так, для моста Уитстона чувствительность максимальна, если сопротивления пары резисторов, расположенных на схеме моста выше нуль-индикатора, и сопротивления пары резисторов, находящихся ниже нуль-индикатора, одинаковы (попарное соответствие). Чувствительность измерительного моста можно увеличить, повышая напряжение питания. Также важным параметром измерительного моста является точность измерения. Точность измерений с помощью моста определяется почти исключительно точностью, с которой известны сопротивления (емкости...), входящие в состав моста, поскольку неизвестное сопротивление выражается через три других.

Оборудование и аппаратура

Лабораторный стенд, набор сопротивлений.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Задание 1. Измерение сопротивлений с помощью моста Уитстона.

Частный случай моста постоянного тока – мостик Уитстона, предназначенный для измерения сопротивлений (рис. 4). Из условия баланса моста искомое сопротивление:

$$R_x = \frac{R \cdot R''}{R'} \quad (2)$$

где $R_0 = R' + R''$.

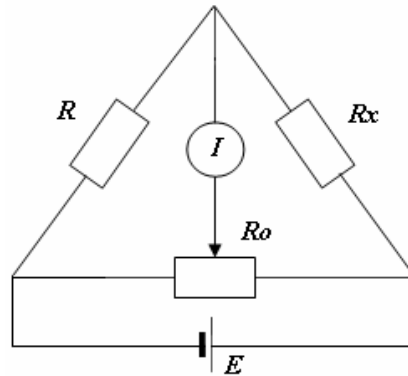


Рис. 4

Для проведения измерения сопротивления необходимо собрать схему по рис. 4. В качестве неизвестного сопротивления использовать резисторы R_1 , R_2 и R_3 , находящиеся на стенде. С помощью отчетного устройства добиться равновесия моста и произвести считывание показаний, которое соответствует соотношению R' и R'' ; зная R , R_0 вычислить значение R_1 , R_2 и R_3 .

Подсоединить к клеммам R'_x лабораторного стенда сопротивление из набора. Тогда неизвестное сопротивление моста R_x выражается

$$R_x = \frac{R'_x \cdot R_3}{R'_x + R_3} \quad (3)$$

Провести измерения для трех разных сопротивлений из набора и, используя обратную формулу для параллельного сопротивления, вычислить R'_x .

Контрольные вопросы и задания

1. Каким преимуществом обладает метод определения сопротивлений мостиком Уитстона по сравнению с методом амперметра и вольтметра?
2. Изменится ли условие равновесия моста, если источник тока и гальванометр поменять местами?

3. Почему гальванометр, применяемый в мостике Уитстона, имеет двустороннюю шкалу с нулём посередине?
4. Выведите условие равновесия, используя законы Кирхгофа.
5. Выведите формулу параллельного соединения сопротивлений.

Рекомендуемая литература

- Калашников С.Г. Электричество. М., 2003.
- Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3: Электричество. М., 2002.
- Евтихийев Н.Н и др. Измерение электрических и неэлектрических величин. М., 1990.
- Певчев Ю.Ф., Финогенов К.Г. Автоматизация физического эксперимента: учеб. пособие. М., 1986.
- Клаассен К.Б. Основы измерений: электронные методы и приборы в измерительной технике. М., 2000.

Лабораторная работа 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Цель работы

Исследовать температурную зависимость сопротивления электролитов.

Теоретические сведения

По электропроводности все вещества в природе условно делятся на проводники, полупроводники и диэлектрики. Вещества, которые проводят электрический ток, являются проводниками, которые не проводят – диэлектриками. Промежуточное место между проводниками и диэлектриками занимают полупроводники.

1. Проводники. Проводниками первого рода называются вещества, обладающие электронной проводимостью. Это означает, что носителями электричества в них являются свободные электроны. Если к участку проводника первого рода приложена разность потенциалов, то на хаотическое движение электронов накладывается их упорядоченное движение. Положительные ионы металла препятствуют движению электронов. С увеличением температуры колебательное движение ионов кристаллической решётки становится более интенсивным, поэтому сопротивление возрастает.

Если при 0°C сопротивление проводника равно R_0 , а при температуре t – R_t , то относительное изменение сопротивления прямо пропорционально изменению температуры:

$$(R - R_0)/R_0 = \alpha \cdot t \quad \text{или} \quad R = R_0(1 + \alpha t), \quad (1)$$

где α – температурный коэффициент сопротивления, R_0 – сопротивление при $t = 0^\circ\text{C}$.

Температурный коэффициент сопротивления определяется как относительное изменение сопротивления проводника при изменении его температуры на 1°C . Строго говоря, величина α за-

висит от температуры. Поэтому из уравнения (1) можно определить лишь среднее значение α в температурном интервале от 0°C до $t^\circ\text{C}$. Для чистых металлов α изменяется в температурном интервале настолько незначительно, что до температуры порядка 100°C его можно считать постоянным.

2. *Электролиты.* Вещества, в которых при прохождении электрического тока происходят химические превращения, называются проводниками второго рода, или электролитами. Электролитами являются растворы солей, щелочей или кислот в воде и некоторых других жидкостях, а также расплавы солей, которые в твердом состоянии являются ионными кристаллами.

Проводимость электролитов обусловлена электролитической диссоциацией – распадом на ионы в растворителе молекул растворенного вещества. Степенью диссоциации называется отношение числа диссоциированных молекул к общему числу молекул. Степень диссоциации зависит от температуры, концентрации раствора и диэлектрической проницаемости растворителя. С увеличением температуры она возрастает.

Ионы разных знаков, которые возникают при диссоциации, движутся хаотически и при встрече могут объединяться в нейтральные молекулы – рекомбинировать. Процессы диссоциации и рекомбинации происходят одновременно. При неизменных условиях в растворе устанавливается динамическое равновесие, при котором число молекул, диссоциирующих на ионы, равно числу пар ионов, которые за то же время рекомбинируют. При этом в любой момент времени оказывается диссоциированной только часть всех молекул. Степень диссоциации характеризуют коэффициентом диссоциации α :

$$\alpha = \frac{n'}{n},$$

где n – концентрация молекул растворенного вещества; n' – концентрация молекул, которые распались на ионы.

При включении электрического поля на хаотическое тепловое движение ионов электролитов накладывается упорядоченное движение положительных ионов в направлении поля к катоду, а отрицательных – к аноду. В результате возникает электрический ток. Плотность этого тока

$$j = n_+ |q_+| v_+ + n_- |q_-| v_-$$

где q_+ и q_- — заряды ионов, n_+ и n_- — концентрация положительных и отрицательных ионов, V_+ и V_- — их средние скорости направленного движения.

Концентрации положительных и отрицательных ионов одинаковы, поэтому

$$n_+ = n_- = \alpha n,$$

где α — коэффициент диссоциации, n — число молекул растворенного вещества в единице объема электролита. Если молекулы диссоциируют на два иона, то

$$|q_+| = |q_-| = q, \alpha q = Ne,$$

где $N = 1, 2, 3, \dots$, e — элементарный заряд (заряд электрона). Скорости ионов можно выразить через их подвижности b_+ и b_- :

$$v_+ = b_+ E, \quad v_- = b_- E.$$

Тогда

$$j = \alpha n q (b_+ + b_-) E \text{ или } j = \sigma E,$$

где $\sigma = \alpha n q (b_+ + b_-)$ — удельная электропроводность электролита.

Таким образом, для электролитов выполняется закон Ома.

Опыт показывает, что удельная электропроводность электролитов зависит от температуры. Это вызвано тем, что при повышении температуры возрастает степень диссоциации молекул и подвижность ионов.

Зависимость электропроводности электролитов от концентрации раствора имеет более сложный характер: при малых концентрациях электропроводность электролитов возрастает с увеличением концентрации, достигает максимума, а затем уменьшается. Это обусловлено тем, что при малых концентрациях, когда $\alpha \approx 1$, проводимость возрастает пропорционально концентрации раствора (подвижность ионов при этом изменяется мало). При дальнейшем увеличении концентрации, когда α начинает убывать, рост проводимости прекращается, а затем она постепенно уменьшается.

При увеличении напряженности поля (более 10 В/м) наблюдается отклонение от закона Ома. Вызвано это тем, что при увеличении скорости ионов их подвижности не остаются постоянными, а зависят от скорости движения ионов.

Итак, проводниками второго рода, или электролитами, называются вещества, прохождение тока через которые сопровождается выделением составных частей этих веществ на электродах. Их проводимость называется электролитической. В водных растворах происходит распад электролитов на отдельные ионы. Этот процесс называется электролитической диссоциацией. Степень диссоциации молекул зависит от температуры раствора и концентрации. С увеличением температуры степень диссоциации возрастает и, следовательно, увеличивается концентрация ионов, которые и являются носителями заряда. Электропроводность электролитов зависит не только от концентрации ионов, но и от их подвижности, а последняя обратно пропорциональна вязкости, убывающей при повышении температуры. Если сосуд с раствором электролита включить в электрическую цепь, то отрицательные ионы начнут двигаться к аноду, а положительные – к катоду. В результате установится электрический ток. Такую проводимость называют ионной.

При ионной проводимости прохождение тока связано с переносом вещества. На электродах происходит выделение веществ, входящих в состав электролита. Процесс выделения на электродах вещества, связанный с окислительно-восстановительными реакциями, называется электролизом.

Как было сказано, с увеличением температуры степень диссоциации молекул электролита возрастает, как следствие, возрастает число носителей электрического тока, т.е. уменьшается сопротивление. Зависимость сопротивления от температуры выражается равенством

$$R = R_0(1 - \alpha t), \quad (2)$$

где R – сопротивление электролита при $t = 0^\circ\text{C}$, α – термический коэффициент сопротивления (для электролитов $\alpha < 0$).

Так как коэффициент α не всегда может быть измерен, то для его определения поступают следующим образом. Измеряют R_1 при t_1 и R_2 при t_2 . На основании (2) можно записать:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_0 (1 - \alpha t_1); \\ R_2 &= R_0 (1 - \alpha t_2); \\ R_1(1 - \alpha t_2) &= R_2(1 - \alpha t_1) \\ \alpha &= (R_1 - R_2) / (R_1 t_2 - R_2 t_1). \end{aligned} \quad (3)$$

3. *Полупроводники.* Полупроводники – большой класс веществ, удельное сопротивление которых изменяется в широких пределах и очень сильно зависит от температуры.

В идеальном полупроводнике все электроны в кристалле связаны, свободных электронов нет. На месте ушедшего электрона образуется незавершённая связь, которая будет иметь избыточный положительный заряд. Вакантное место валентной связи получило название «дырки». В целом кристалл остаётся электронейтральным, так как каждому образовавшемуся положительному заряду «дырке» соответствует свободный электрон.

Поместим полупроводник в электрическое поле. Под его воздействием электроны начнут двигаться против поля. Вакантное место валентной связи «дырка» будет также перемещаться, но по направлению внешнего электрического поля, что равносильно перемещению по полю положительного заряда. Таким образом, в полупроводнике существуют электронная и дырочная проводимости. Увеличение температуры приводит к возрастанию числа разорванных валентных связей, а следовательно, к росту концентрации свободных электронов и дырок. Поэтому с увеличением температуры полупроводника его сопротивление уменьшается. Зависимость сопротивления полупроводника от температуры в определенных температурных интервалах описывается законом:

$$R = A e^{\Delta E/kT}, \quad (4)$$

где A – константа; k – постоянная Больцмана; ΔE – энергия активации; T – температура по шкале Кельвина.

Под энергией активации понимается энергия, которую необходимо затратить, чтобы перевести электрон из связанного состояния в свободное.

Для определения энергии активации строится график зависимости

$$\ln R = f(1/T).$$

Из уравнения (4) следует, что $\ln R = \Delta E/kT + \ln A$.

График представляет собой прямую, у которой тангенс угла наклона к оси X равен:

$$\operatorname{tg} \varphi = \Delta E/k. \quad (5)$$

Последнее отношение и является исходным для определения энергии активации.

Оборудование и аппаратура

Лабораторный стенд, U-образный сосуд с электролитом, калориметр, датчик температуры.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Задание 1. Изучение зависимости сопротивления электролитов от температуры.

Для определения термического коэффициента сопротивления α провести измерения сопротивления R от t и по графику зависимости $R = f(t)$ определить α . Для определения R при различных t U-образную трубку с электролитом помещают в калориметр. Жидкость в калориметре нагревается с помощью нагревателя, клеммы которого находятся на лабораторном стенде. Температура жидкости измеряется с помощью температурного датчика и выводится на ЖКИ лабораторного стенда. Для определения сопротивления электролита применяется мостовая, схема реализованная на лабораторном стенде. Первоначально измеряется сопротивление электролита при комнатной температуре. При нагревании электролита изменяется его сопротивление и нарушается равновесие моста. Изменяя сопротивление R , мост снова можно привести в равновесие, далее процесс повторяется. По полученным результатам строится график зависимости $R = f(t)$.

Порядок выполнения задания:

1. Собрать схему согласно рис. 1.
2. Подключить датчик температуры, измерительные и силовые провода от лабораторного стенда к калориметру.
3. После проверки схемы включить её в сеть.
4. Установить ручку сопротивления R на середину. С помощью сопротивления R_0 добейтесь, чтобы стрелка ноль – индикатора была вблизи ноля. Далее с помощью ручки сопротивления R добейтесь такого значения, при котором отклонение стрелки ноль-индикатора от «0» будет минимальным. Произвести считывание показаний, которое соответствует соотношению R' и R'' ,

вычислить сопротивление R_x по формуле (6), которое будет соответствовать начальной температуре t_0 , отображаемой на ЖКИ.

$$R_x = \frac{R_0 \cdot R''}{R'} , \quad (6)$$

где $R = R' + R''$.

5. Включить тумблер «Нагреватель», включив нагреватель калориметра.

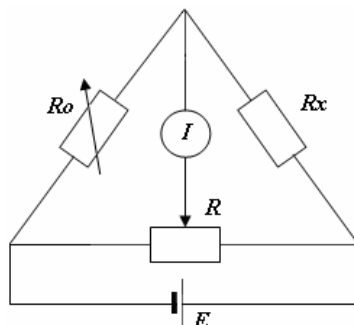


Рис. 1

6. В процессе нагрева будет изменяться сопротивление электролита, которое будет выражаться в разбалансировке моста. Для нового уравнивания необходимо ручкой сопротивления R плавно восстановить равновесие. По формуле (6) вычислить значение R_x при новой температуре t .

7. Через каждые 5°C определять сопротивление электролита указанным способом.

8. Получить 5 – 7 значений R_x и построить зависимость $R = f(t)$.

9. По формуле (3) вычислить несколько значений α , беря в качестве R_1 сопротивление при комнатной температуре, а в качестве R_2 – любое значение сопротивления при более высокой температуре.

10. Найти α_{cp} .

Контрольные вопросы и задания

1. Чем отличаются полупроводники от металлов и диэлектриков по своим электрическим свойствам?

2. Объясните механизм собственной и примесной проводимости полупроводников.

3. Как зависит проводимость полупроводников от температуры?
4. Что называется энергией активации?
5. Как определяется энергия активации экспериментально?
6. Объясните характер электрической проводимости электролитов.
7. Почему при измерении сопротивления электролитов используется переменный ток?
8. Выведите условие равновесия моста.

Рекомендуемая литература

- Калашников С.Г. Электричество. М., 2003.
- Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3: Электричество. М., 2002.
- Евтихийев Н.Н. и др. Измерение электрических и неэлектрических величин. М., 1990.

Лабораторная работа 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА САМОИНДУКЦИИ КАТУШКИ, ИЗУЧЕНИЕ РЕЗОНАНСА ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы

Научиться определять коэффициент самоиндукции катушки и емкости конденсатора.

Теоретические сведения

Если в катушке изменяется сила тока, то в ней возникает электродвижущая сила ЭДС самоиндукции пропорциональная изменению силы тока в единицу времени:

$$\varepsilon = -\frac{Ldi}{dt}. \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности L называется коэффициентом самоиндукции и зависит от формы и размеров проводника и от магнитной проницаемости окружающей среды. Если положить: $\varepsilon = 1$ В, $di/dt = 1$ А/с, то $L = 1$ Генри (Гн.).

Таким образом, самоиндукцией в 1 Гн обладает такой проводник, в котором изменение силы тока со скоростью 1А в 1с, вызывает ЭДС самоиндукции в 1В.

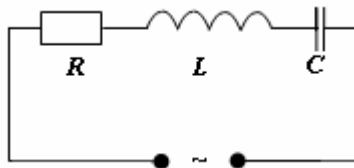


Рис. 1

У линейных проводников коэффициент самоиндукции мал. Большим коэффициентом обладают так называемые катушки индуктивности, состоящие из большого числа витков. Пусть сопротивление постоянному току проволоки, из которой намотана катушка, равно R . Это сопротивление называют часто активным. Если включить такую катушку в цепь переменного тока, то вследст-

вие периодического изменения силы тока возникает ЭДС самоиндукции, препятствующая приложенному напряжению. Это приводит к тому, что сопротивление катушки становится больше, чем активное. Иначе говоря, катушка индуктивности будет обладать не только активным, но и индуктивным (реактивным) сопротивлением R_L .

Если в цепь переменного тока включен конденсатор C , то вследствие периодического изменения тока происходит его перезарядка, что приводит к появлению емкостного сопротивления R_c .

Рассмотрим цепь, состоящую из последовательно соединенных сопротивлений R , индуктивности L и конденсатора C (рис.1). По второму закону Кирхгофа для замкнутого контура сумма падений напряжений равна сумме электродвижущих сил:

$$IR + q/C = \varepsilon_0 \sin \omega t - L dl/dt, \quad (2)$$

где IR – падение напряжения на активном сопротивлении;
 $q/C = \int Idt/C$ – падение напряжения на конденсаторе.

Произведя дифференцирование уравнения (2) по времени, после элементарных преобразований имеем:

$$L (d^2I/dt^2) + R(dl/dt) + (1/C) I = \varepsilon_0 \omega \cos \omega t. \quad (3)$$

Будем искать решение этого уравнения в виде

$$I = I_0 \sin (\omega t - \varphi), \quad (4)$$

где φ – разность фаз между приложенной ЭДС и силой тока. Подстановка значения I в уравнение (3) дает:

$$X I_0 \sin (\omega t - \varphi) - R I_0 \cos (\omega t - \varphi) = \varepsilon_0 \cos \omega t,$$

где $X = \omega L - 1/\omega C$.

Последнее соотношение тождественно выполняется в любой момент времени, в частности, при $\pi/2 = \omega t$, $2\pi = \omega t$, тогда

$$\begin{aligned} -X I_0 \cos \varphi - R I_0 \sin \varphi &= 0; \\ -X I_0 \sin \varphi + R I_0 \cos \varphi &= \varepsilon_0 \end{aligned} \quad (5)$$

из первого выражения найдем тангенс сдвига фаз $\operatorname{tg} \varphi = X/R = (\omega L - 1/\omega C)/R$. Поскольку

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= 1 / (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)^{1/2} = 1 / (1 + X^2/R^2)^{1/2}, \\ \sin \varphi &= \cos \varphi \operatorname{tg} \varphi = X/R [1 / (1 + X^2/R^2)^{1/2}], \end{aligned}$$

то, подставляя эти значения в выражение (4), находим амплитуду силы тока:

$$I_0 = \varepsilon_0 / [R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2]^{1/2}. \quad (6)$$

Величина $Z = [R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2]^{1/2}$ называется полным сопротивлением, если цепь состоит из источника ЭДС и емкости ($R = 0, L = 0$), то

$$Z = X_c = 1/\omega C. \quad (7)$$

Таким образом, емкостное сопротивление обратно пропорционально круговой частоте электрического тока ω и электрической емкости C . Если активное и емкостное сопротивления равны нулю, то $Z = X_L = \omega L$. Заметим, что полученное решение совпадает с решением уравнения для механических колебаний. Сопоставление решений дает возможность заключить, что величина L является аналогом массы и характеризует инерцию электрической цепи, активное сопротивление R , подобно трению, обуславливает необратимое превращение электрической энергии в теплоту.

В выражении (5) фигурируют амплитудные значения тока I_0 и ЭДС ε_0 . На практике обычные вольтметры и амперметры показывают не максимальные (амплитудные), а так называемые эффективные значения $I_{\text{эф}}$ и $U_{\text{эф}}$. Тогда мощность, выделяемая в цепи переменного тока за один период, равна

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int I d\varepsilon dt = \frac{1}{T} \int I_0 \varepsilon_0 \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) dt = \frac{1}{T} \int I_0 \varepsilon_0 [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] dt = \\ &= \frac{1}{2} I_0 \varepsilon_0 \cos \varphi = I_0 / (2)^{1/2} \varepsilon_0 / (2)^{1/2} \cos \varphi = I_{\text{эф}} \varepsilon_{\text{эф}} \cos \varphi \end{aligned} \quad (8)$$

Рассмотрим схему, состоящую из активного и индуктивного сопротивлений (рис. 2). Как следует из выражений (6) и (7), в этом случае

$$I_{\text{эф}} = \varepsilon_{\text{эф}} / [R^2 + \omega^2 L^2]^{1/2}.$$

Откуда:

$$L^2 = (Z_{\text{ср}}^2 - R^2) / \omega^2. \quad (9)$$

Таким образом, для определения коэффициента самоиндукции катушки необходимо знать ее полное сопротивление Z , омическое сопротивление R и круговую частоту переменного тока $\omega = 2\pi\nu$.

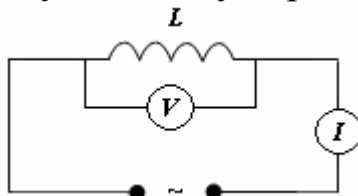


Рис. 2

Резонанс напряжения и тока. Пусть цепь (рис. 3) составленная из последовательно соединенных омического R , индуктивного $X_L = \omega L$ и емкостного $X_C = 1/\omega C$ сопротивлений, питается от источника переменного тока, где $\omega = 2\pi\nu$ – круговая частота, L – коэффициент самоиндукции, C – емкость конденсатора.

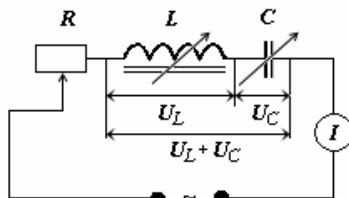


Рис. 3

Амплитудное (максимальное) значение силы переменного тока определяется из закона Ома:

$$I_0 = U_0 / [R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2]^{1/2}. \quad (10)$$

Ток оказывается сдвинутым по фазе на угол φ относительно напряжения, т.е. $I = I_0 \sin(\omega t - \varphi)$, где φ определяется из соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi = X/R = (\omega L - 1/\omega C)/R,$$

из формулы (10) видно, что если $\omega L = 1/\omega C$, то I достигает максимального значения. Это осуществляется при $\omega = 1/(LC)^{1/2}$. Сила тока достигает такого значения, как в цепи постоянного тока, если подаваемое напряжение U_0 , а емкостное X_C и индуктивное X_L сопротивления отсутствуют

$$I_0 = U_0/R. \quad (11)$$

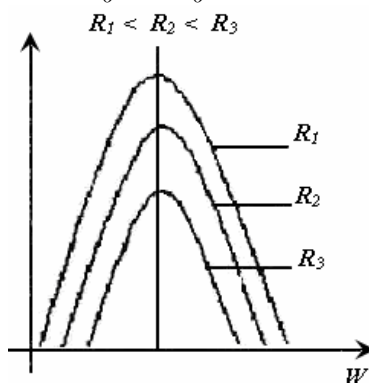


Рис. 4

На рис. 4 изображены кривые зависимости тока от частоты подаваемого напряжения при различных значениях сопротивле-

ния. Максимальное значение тока соответствует резонансу напряжений. Падение напряжение на омическом сопротивлении равно

$$U_R = IR = R I_0 \sin(\omega t - \varphi). \quad (12)$$

На индуктивном сопротивлении:

$$U_L = L di/dt = I_0 \omega L \sin(\omega t - \varphi). \quad (13)$$

На емкостном сопротивлении:

$$U_c = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int Idt = -\frac{I_0}{\omega C} \cos(\omega t - \varphi) = \frac{I_0}{\omega C} \cos[(\omega t - \varphi) + \pi]. \quad (14)$$

Из сопоставления выражений (4) и (5) вытекает, что U_L сдвинуто на π относительно U_c , т.е. напряжение на емкости и индуктивности имеют противоположные фазы. Поэтому суммарное напряжение $U_L + U_c$ равно разности абсолютных величин $|U_L| - |U_c|$.

Из уравнений (13) и (14) следует, что амплитудные значения напряжений на индуктивности L и емкости C равны соответственно

$$U_{0L} = I_0 \omega L \quad \text{и} \quad (15)$$

$$U_c = I_0 / \omega C. \quad (16)$$

В случае резонанса $I_0 = U_0/R$ уравнения (15) и (16) примут вид

$$U_{0L} = U_0 \omega L / R \quad \text{и} \quad (17)$$

$$U_c = I_0 / \omega C R. \quad (18)$$

Так как условием резонанса является равенство $\omega L = 1/\omega C$, т.е. напряжения на индуктивности и емкости одинаковы по величине, но противоположны по фазе, поэтому суммарное напряжение $U_L + U_c$ равно нулю. Если кроме условия резонанса имеет место соотношение $\omega L = 1/\omega C > R$, то, как следует из выражений (17) и (18), напряжение на емкости и индуктивности больше подаваемого. В цепи, состоящей из индуктивности, емкости и сопротивления, условие резонанса $\omega L = 1/\omega C$ может быть достигнуто тремя способами: *изменением частоты; изменением емкости; изменением индуктивности.*

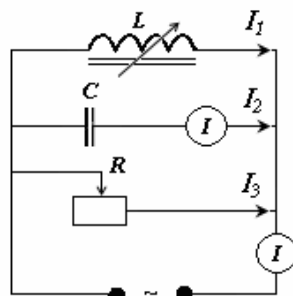


Рис. 5

Резонанс токов возникает при параллельном соединении индуктивного и емкостного сопротивлений. Рассмотрим цепь, изображенную на рис. 5.

Очевидно

$$\varepsilon_0 \sin \omega t = I_R R = \int I_c dt / C = L dI_L / dt. \quad (19)$$

Откуда

$$I_R = (\varepsilon_0 / R) \sin \omega t. \quad (20)$$

$$I_c = \varepsilon_0 \omega C \cos \omega t. \quad (21)$$

$$I_L = -(\varepsilon_0 / \omega L) \cos \omega t = (\varepsilon_0 / \omega L) \cos (\omega t + \pi). \quad (22)$$

Общий ток в цепи равен

$$I = I_R + I_c + I_L = \varepsilon_0 [(1/R) \sin \omega t + (\omega L - 1/\omega C) \sin (\omega t + \pi/2)].$$

Пользуясь векторной диаграммой для сложения гармонических колебаний, легко получить:

$$I = \varepsilon_0 [(1/R)^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2]^{1/2} \sin \omega t.$$

Откуда

$$I = \varepsilon_0 [(1/R)^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2]^{1/2}.$$

При $\omega L - 1/\omega C = 0$, т.е. при равенстве индуктивного и емкостного сопротивлений, $\omega L = 1/\omega C$ общий ток минимален - условие резонанса. Если $\omega L = 1/\omega C > R$, то ток I_c меньше общего тока.

Оборудование и аппаратура

Лабораторный стенд.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Задание 1. Определение самоиндукции катушки.

1. Собрать схему (рис. 2).

2. Включить стенд и определить силу тока I , идущего через катушку, для трех различных значений напряжений $U_{эф}$ на ее концах. Определяют три соответствующих значения Z по формуле $Z = U_{эф}/I_{эф}$. Из трех полученных значений Z находят среднее значение и абсолютную погрешность ΔZ . Найденные величины Z подставляют в формулу (8) и определяют искомый коэффициент самоиндукции L в Генри.

Задание 2. Определение емкости конденсатора.

По закону Ома сила переменного тока через конденсатор связана с напряжением на нем следующим соотношением $I_{\text{эф}} = U_{\text{эф}}/(1/\omega C)$, откуда

$$C = 1/\omega I_{\text{эф}}/U_{\text{эф}} = 1/\omega Z.$$

В схеме задания 1 катушку индуктивности заменяют конденсатором. Измерения и вычисления производятся аналогично.

Задание 3. Резонанс при изменении индуктивности.

Схема измерения изображена на рис. 6. Вдвигают сердечник катушки, при этом указатель должен оказаться против конца шкалы.

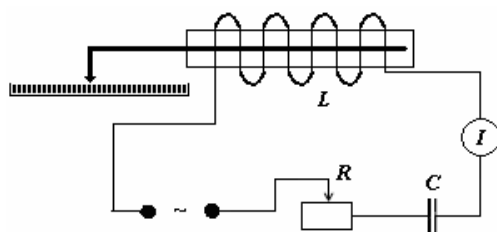


Рис. 6

1. Измерения проводят для двух значений омического сопротивления, выбирать их надо так, чтобы в первом случае миллиамперметр показывал ток 90 мА, а во втором – 100 мА. Выдвигать сердечник из катушки и через каждые 5 делений шкалы записывают показания миллиамперметра.

2. Строят графики, откладывая по оси абсцисс деления шкалы, а по оси ординат – соответствующие значения показаний миллиамперметра. Получают индуктивность катушки с сердечником в момент резонанса $L_{\text{рез}}$ из условия $\omega L_{\text{рез}} = 1/\omega C$, откуда при $\omega = 2\pi\nu$:

$$L_{\text{рез}} = 1/4\pi^2\nu^2 C.$$

3. Вдвигая сердечник в катушку, добиваются резонанса, при этом ток, проходящий через миллиамперметр – максимальный. Измеряют напряжение на зажимах источника U , U_L , U_C , $U_L + U_C$, записывают их значения, убеждаются в том, что при $R = 0$ $U_L \approx U_C > U$ и $U_L + U_C = 0$.

Задание 4. Резонанс при изменении частоты.

В данном задании индуктивность и емкость остаются постоянными, а изменяется частота. Собирают схему (рис. 7), включают

генератор и лабораторный стенд. Металлический сердечник должен быть вдвинут в катушку. Сопротивление R должно быть выведено на $\frac{1}{4}$ своей номинальной величины. Изменяя частоту генератора, через каждые 20 Гц записывают значения напряжения и соответствующей частоты. Строят график зависимости $U_L = f(L)$, откладывая по оси абсцисс значения частоты, а по оси ординат – соответствующие значения напряжения.

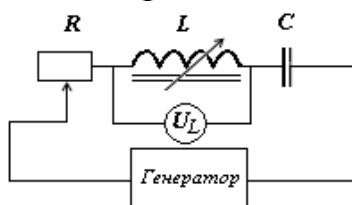


Рис. 7

Изменяя частоту генератора, добиваются резонанса. Измеряют вольтметром напряжение на индуктивности U_L , а затем на индуктивности и емкости $U_L + U_C$. Измеряют U , после чего находят отношение $U_{L_{рез}}/U$.

Задание 5. Резонанс токов.

Собирают схему рис. 5, измеряют индуктивность катушки, выдвигая сердечник, записывают показания миллиамперметров mA_1 и mA_2 . Строят графики, откладывая по оси абсцисс деления шкалы катушки, а по оси ординат – показания миллиамперметра в мА. Вычисляют индуктивность катушки с сердечником в момент резонанса по формуле

$$L_{рез} = 1/4\pi^2\nu^2C.$$

Контрольные вопросы и задания

1. В чем заключается явление самоиндукции?
2. Что такое Генри?
3. Как определить сдвиг фаз между током и напряжением?
4. Как зависит индуктивное сопротивление от частоты переменного тока?
5. Как зависит емкостное сопротивление от частоты переменного тока?

6. Покажите, что индуктивное и емкостное сопротивления не потребляют мощности.
7. Выведите формулы общего сопротивления конденсатора.
8. Сформулируйте закон Ома для переменного тока.
9. Как определить сдвиг фаз между током и напряжением?
10. Чему равна разность фаз между U_c и U_L ?
11. Сформулируйте условие резонанса.
12. При каком условии в случае резонанса U_c и U_L будут меньше U ?
13. Сформулируйте условие резонанса токов.

Рекомендуемая литература

- Калашников С.Г. Электричество. М., 2003.
- Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3: Электричество. М., 2002.
- Евтихийев Н.Н. и др. Измерение электрических и неэлектрических величин. М., 1990.

Лабораторная работа 5

ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА С ПОМОЩЬЮ МОСТА СОТТИ

Цель работы

Усвоить принцип работы моста Сотти, освоить методику измерения емкостей конденсаторов.

Теоретические сведения

Рассмотрим два проводника, между которыми существует электрическое напряжение, и предположим, что все силовые линии напряженности, исходящие из одного проводника, заканчиваются на другом. Такую пару проводников мы будем называть *простым конденсатором*, или просто *конденсатором*.

Простым конденсатором является шаровой конденсатор, состоящий из двух проводников в виде концентрических сфер, так как линии напряженности, исходящие из внутренней сферы, обязательно все заканчиваются на внешней сфере. Две параллельные проводящие пластины (плоский конденсатор) можно считать также простым конденсатором, если расстояние между пластинами мало по сравнению с их размерами. Простым конденсатором является и цилиндрический конденсатор, если длина цилиндров велика по сравнению с зазором между ними. Оба проводника, образующие конденсатор, называются его *обкладками*.

Так как линии напряженности начинаются и заканчиваются на электрических зарядах, то отсюда следует, что заряды, находящиеся на обкладках простого конденсатора, всегда равны по модулю и противоположны по знаку.

Напряженность поля в любой точке между обкладками конденсатора всегда пропорциональна заряду обкладок. Поэтому и напряжение U между обкладками всегда пропорционально заряду обкладок q :

$$q = CU. \quad (1)$$

Коэффициент C в этой формуле называют *электрической емкостью* конденсатора, или просто его *емкостью*.

Из (1) следует, что $q = C$ при $U = 1$. Это значит, что емкость конденсатора измеряется зарядом, находящимся на каждой из обкладок, если напряжение между обкладками равно единице.

Единицей емкости служит фарад (Φ) — емкость такого единичного проводника, потенциал которого повышается на 1 В при сообщении заряда 1 Кл:

$$1 \Phi = 1 \text{ Кл} / 1 \text{ В} = 1 \text{ Кл/В}.$$

На практике применяют также более мелкие единицы емкости: 1 микрофарад ($\text{мк}\Phi$) = 10^{-6} Φ и 1 пикофарад ($\text{п}\Phi$) = 10^{-12} Φ .

Емкость конденсатора зависит от его размеров, формы, свойств среды, находящейся между его обкладками.

Пусть C_0 — емкость любого конденсатора, когда его обкладки находятся в вакууме. Практически мы получим ту же емкость, если между обкладками будет атмосферный воздух. Пусть далее C — емкость того же конденсатора, если все пространство между его обкладками заполнено каким-либо другим однородным диэлектриком. Отношение

$$C/C_0 = \varepsilon \quad (2)$$

называют *относительной диэлектрической проницаемостью* или просто *диэлектрической проницаемостью* диэлектрика. Диэлектрическая проницаемость ε есть величина, характеризующая электрические свойства вещества и зависящая от рода вещества и от его состояния (температуры, давления и т. д.).

Отметим, что величина, определяемая формулой (2), есть отношение абсолютной диэлектрической проницаемости данного вещества и вакуума. Как видно из (2), эта величина безразмерна.

Емкость конденсаторов простой формы можно вычислить. Для этого предполагают, что на каждой из обкладок находится некоторый заряд q , и вычисляют потенциал в электрическом поле рассматриваемого конденсатора $U(x, y, z)$. Если удастся решить эту задачу, то отсюда получается и значение напряжения

между обкладками конденсатора U . После этого емкость можно найти по формуле (1).

Плоский конденсатор представляет собой две параллельные плоские пластины, заряженные одинаковыми по абсолютному значению, но разноименными зарядами. Емкость плоского конденсатора

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 S/d, \quad (3)$$

где S – площадь каждой обкладки или меньшей из них;

d – расстояние между обкладками;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость вещества, заключенного между пластинами конденсатора;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Увеличение емкости достигается параллельным соединением конденсаторов в батарею (рис.1). При этом конденсаторы соединяются одноименно заряженными обкладками. Общая емкость батареи

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n. \quad (4)$$

При последовательном соединении конденсаторы соединяются разноименными обкладками (рис. 2). При этом складываются величины, обратные их емкостям:

$$1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots + 1/C_n. \quad (5)$$

И общая емкость батареи всегда меньше наименьшей емкости конденсатора, входящего в батарею.

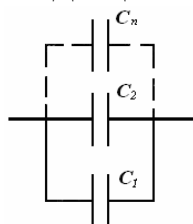


Рис. 2

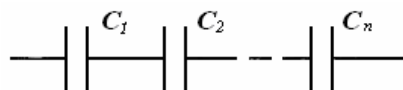


Рис. 3

Важным классом устройств, предназначенных для измерения параметров электрических цепей (сопротивления, емкости, индуктивности и др.) методом сравнения, являются устройства, реализующие мостовые методы. Это методы, при которых измеряемая величина сравнивается с величиной, воспроизводимой мерой. Мостовые методы сложны, но характеризуются высокой

точностью. Методы сравнения включают дифференциальный и нулевой методы, метод противопоставления, метод замещения и метод совпадений. Для определения емкости конденсаторов можно воспользоваться мостовой схемой (рис. 3).

Здесь C_0 – известный и C_x – неизвестный конденсатор, I – индикатор нуля.

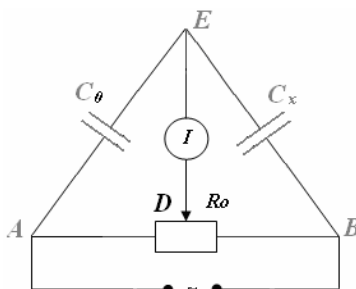


Рис. 4

Принцип измерения основан на нахождении такого положения переменного сопротивления R_0 , при котором ток через индикатор отсутствует ($V_D = V_E$). Выведем условие равновесия, учитывая, что переменное сопротивление делится $R' + R'' = R_0$. Количество электричества, прошедшего за время dt по ветви АЕ, равно

$$dq = I_1 dt, \quad I_1 = (V_A - V_E)/R'$$

Из определения емкости конденсатора следует, что

$$q = -C_0 (V_A - V_E),$$

следовательно:

$$(V_A - V_E)t/R' = -C_0 (V_A - V_E).$$

Аналогично для ветви ВЕ:

$$(V_E - V_B)t/R'' = -C_x (V_E - V_B),$$

из последних двух выражений, учитывая, что $V_D = V_E$, получим

$$C_x = C_0 R'/R'' . \quad (6)$$

Оборудование и аппаратура

Лабораторный стенд.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Задание 1. С помощью мостовой схемы измерить емкость отдельных конденсаторов.

1. Собрать и включить схему, показанную на рис. 3.
2. Передвигая ручку переменного сопротивления, добиться того, чтобы показания нуль-индикатора были ноль.
3. Записывают значения R'' , R' ; зная C_0 , по формуле (6) вычисляют C_x .
4. Повторяют измерения для второго и третьего неизвестных конденсаторов C_{x2} и C_{x3} .

Задание 2. Проверить схемы последовательного и параллельного включения конденсаторов.

1. Емкость 3 конденсаторов, определенных в 1 задании, подключить параллельно, снять общую емкость и сравнивают с емкостью, вычисленной по формуле (4).

2. Емкость 3 конденсаторов, определенных в 1 задании, подключить последовательно. Снимают общую емкость и сравнивают ее с емкостью, полученной по формуле (5).

3. Имеющиеся конденсаторы включить по смешанной схеме (2 конденсатора подключить параллельно, а 3-й – последовательно). Измерить емкость такой цепи и сравнить с вычисленными данными.

Контрольные вопросы и задания

1. Написать формулу емкости плоского конденсатора.
2. Что такое емкость, в каких единицах она измеряется?
3. Какие изменения в емкости батарей конденсаторов достигаются последовательным и параллельным их включением?

Рекомендуемая литература

- Калашников С.Г. Электричество М., 2003.
- Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3: Электричество. М., 2002.
- Евтихийев Н.Н. и др. Измерение электрических и неэлектрических величин. М., 1990.

Лабораторная работа 6

ИЗМЕРЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ ТАНГЕНС-БУССОЛЬЮ

Цель работы

Изучение характеристик магнитного поля и метода измерения слабых полей.

Краткое описание опыта и вывод расчетных формул

Тангенс-буссоль представляет собой короткую круглую катушку с магнитной стрелкой в центре. Катушку без тока устанавливают в вертикальном положении так, чтобы плоскость витков совпадала с магнитным меридианом, а следовательно, с осью магнитной стрелки и с горизонтальной составляющей напряженности поля земли H_3 (рис. 1).

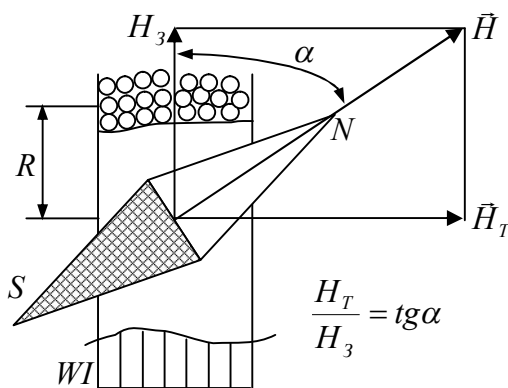


Рис. 1

После включения тока в катушке стрелка повернется на угол α и установится по направлению результирующей H векторов H_3 и H_T , так как на магнитную стрелку, помещенную в магнитное поле, будет действовать вращающий момент $M = P_M B \sin \varphi$, где P_M – магнитный момент стрелки, совпадающий с ее осью; B – индукция

магнитного поля; φ – угол между направлением магнитного поля и магнитным моментом.

Напряженность поля для W витков найдем по формуле $H_T = \frac{WI}{2R}$, но согласно рис. 1 $H_T = H_3 \operatorname{tg} \alpha$. Поэтому

$$H_3 = \frac{WI}{2R} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (1)$$

Конденсатор 3 периодически заряжается от источника напряжением U и разряжается через тангенс-буссоль 5. Переключение конденсатора с зарядки на разрядку осуществляется с помощью поляризованного реле 2, управляемого переменным током частотой ν от звукового генератора 1.

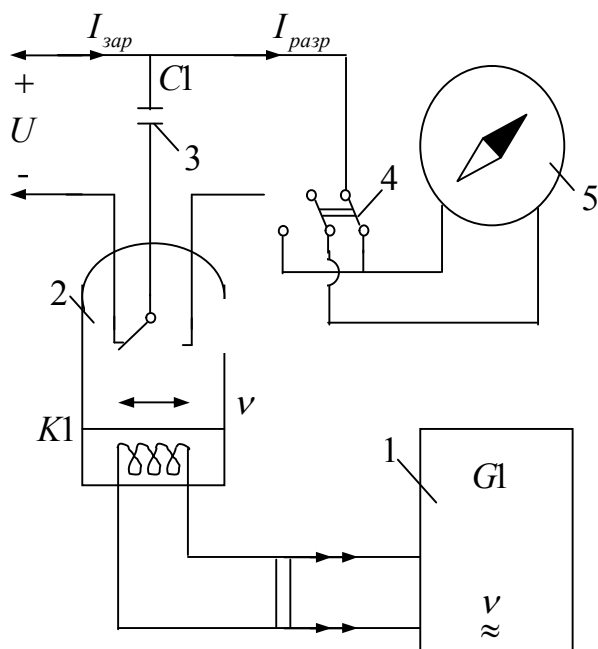


Рис. 2

той ν от звукового генератора 1. На рис. 2 изображена схема установки для случая зарядки.

Среднее значение тока, протекающего через тангенс-буссоль, $I = \frac{q}{T} = q\nu = cU\nu$, где c – емкость конденсатора; $T = 1/\nu$ – период управляемого переменного тока. Подставляя $I = cU\nu$ в формулу (1), найдем расчетное соотношение для определения искомой величины

$$H_3 = \frac{WcU\nu}{2Rtg\alpha}. \quad (2)$$

Обозначив

$$a = \frac{\nu}{tg\alpha}, \quad (3)$$

формулу (2) представим в виде

$$H_3 = \frac{WcU}{2R} a. \quad (4)$$

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с работой, устройством установки и в таблице записать значения постоянных W , c , U , R и их погрешностей.

2. При выключенном токе питания установить тангенс-буссоль в плоскости магнитного меридиана.

3. Установить первую из заданных преподавателем частот переключения реле ν_1 и включить ток заряда – разряда конденсатора. Установить постоянное значение напряжения U . Отсчитать угол α_1' отклонения стрелки в одну сторону. Переключить тумблер SI и отсчитать отклонение стрелки в другую сторону α_1'' .

4. Установить вторую частоту ν_2 и повторить измерения. Установить третью частоту ν_3 и снова повторить измерения (определить α_3' и α_3''). Результаты измерений записать в таблицу.

5. Найти средние значения для каждой пары измерений углов по формулам:

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_1' + \alpha_1''}{2}; \quad \alpha_2 = \frac{\alpha_2' + \alpha_2''}{2} \quad \text{и} \quad \alpha_3 = \frac{\alpha_3' + \alpha_3''}{2}.$$

Определить тангенсы углов α_1 , α_2 и α_3 и величины a_1 , a_2 , a_3 по формуле (3). Считая отклонения значений a_1 , a_2 и a_3 случайными, найти среднее значение

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum a_i = \frac{1}{3} \sum a_i,$$

среднее квадратичное отклонение

$$\Delta S = \pm \sqrt{\sum \frac{(a_i - \bar{a})^2}{n(n-1)}} = \pm \sqrt{\frac{\sum (a_i - \bar{a})^2}{6}},$$

доверительный интервал с надежностью 0,9 для трех измерений по формуле

$$\Delta a = \pm 2,92 \Delta S.$$

Результат записать по форме

$$a = \text{---} \pm \text{---} \quad \text{и} \quad \varepsilon(a) = \frac{\Delta a}{a}.$$

6. По формуле (4), подставив среднее значение a , рассчитать значение напряженности и оценить погрешность

$$\varepsilon(H_3) = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2} + \varepsilon^2(a); \quad \Delta H_3 = H_3 \varepsilon(H_3).$$

Общий результат записать по форме

$$H_3 = (\underline{\quad} \pm \underline{\quad}) \text{ А/м}, \varepsilon(H_3) = \pm \quad \%, \alpha = 0,9.$$

Результат сравнить со справочным значением.

| Постоянные | $W =$ ВИТКОВ, $c = (\dots \pm \dots) \text{ мкФ}$, $U = (\dots \pm \dots) \text{ В}$, $R = (\dots \pm \dots) \text{ М}$. | |
|------------------------|--|------------------------|
| $\nu_1 =$ Гц | $\nu_2 =$ Гц | $\nu_3 =$ Гц |
| $\alpha'_1 =$ | $\alpha'_2 =$ | $\alpha'_3 =$ |
| $\alpha''_1 =$ | $\alpha''_2 =$ | $\alpha''_3 =$ |
| $\alpha_1 =$ | $\alpha_2 =$ | $\alpha_3 =$ |
| $\text{tg} \alpha_1 =$ | $\text{tg} \alpha_2 =$ | $\text{tg} \alpha_3 =$ |
| $a_1 =$ | $a_2 =$ | $a_3 =$ |

Рекомендуемая литература

Калашников С.Г. Электричество. М., 2003.

Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3: Электричество. М., 2002.

Евтихийев Н.Н. и др. Измерение электрических и неэлектрических величин. М., 1990.

Лабораторная работа 7

ПРОВЕРКА ЗАКОНА БИО-САВАРА-ЛАПЛАСА ДЛЯ СОЛЕНОИДА КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ

Цель работы

Изучение характеристик магнитного поля и закона электромагнитной индукции.

Краткое описание опыта и вывод расчетных формул

Соленоидом называют катушку из проводника, длина L которой намного больше радиуса поперечного сечения R . Число витков катушки W . Ток I , протекающий по виткам соленоида, определяет магнитодвижущую силу, равную IW .

Для замкнутого соленоида (тора) по закону полного тока

$$\oint H_l dl = Hl = WI, \quad (1)$$

где H – напряженность магнитного поля тока I (рис.1 а).

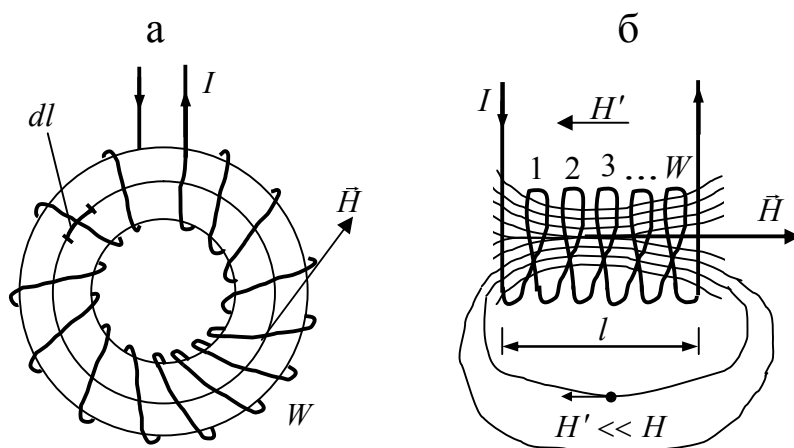


Рис. 1

Из формулы (1) следует, что напряженность магнитного поля тора

$$H = \frac{IW}{l}. \quad (2)$$

Формула (2) приближенно справедлива для

прямого соленоида длиной l , так как $H' \ll H$ (рис.1 б).

Для экспериментального определения напряженности на оси соленоида конечной длины используется измерительная катушка А сечением S , имеющая N витков (рис. 2). В магнитном поле со-

леноида каждый из витков измерительной катушки будет пронизывать магнитный поток

$$\Phi = BS = \mu\mu_0SH,$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; μ – относительная магнитная проницаемость (для воздуха $\mu = 1$).

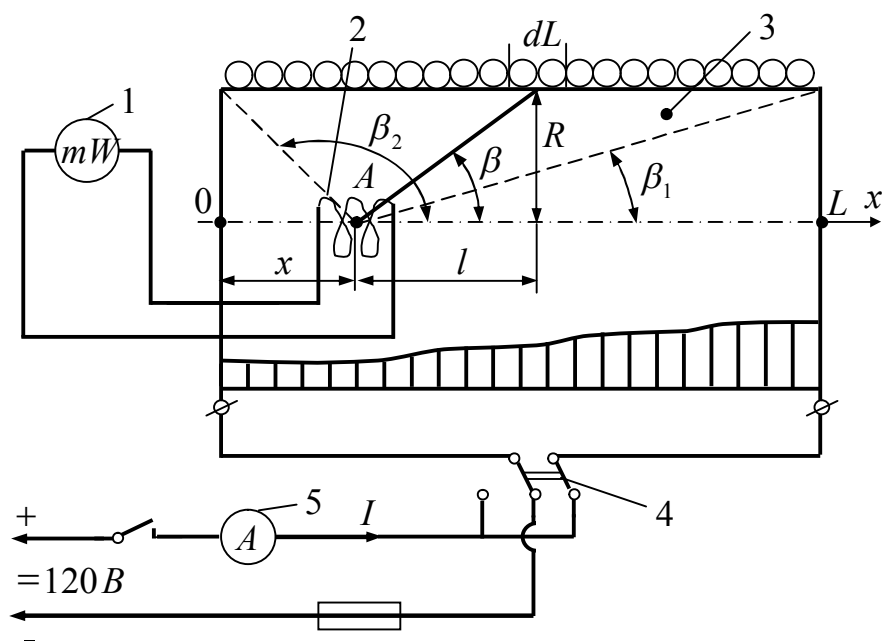


Рис. 2. Схема установки:

1 – милливольтметр; 2 – измерительная катушка; 3 – соленоид длиной больше радиуса ($L > R$); 4 – переключатель полярности напряжения электрического тока; 5 – амперметр

При включении тока в соленоид будет меняться величина напряженности магнитного поля соленоида, что приведет к изменению магнитного потока через измерительную катушку. Согласно закону электромагнитной индукции (закону Фарадея – Ленца) изменение магнитного потока вызовет появление ЭДС индукции в измерительной катушке, что используется для измерения напряженности на оси соленоида.

На принципиальной схеме установки (рис. 2) измерительная катушка A подключена к баллистическому прибору (веберметру) и помещена внутри соленоида, магнитное поле которого нужно измерить.

Вдоль оси соленоида ОХ можно перемещать измерительную катушку A , в которой возникает ЭДС индукции, если включать или выключать ток в соленоиде.

Если число витков измерительной катушки N , то потокосцепление Ψ их с магнитным потоком соленоида Φ , пронизывающим катушку, определяется выражением

$$\Psi = N\Phi = N\mu\mu_0SH, \quad (4)$$

где S – сечение катушки; μ_0 – магнитная постоянная; H – напряженность магнитного поля.

При включении (или выключении) тока I в соленоиде потокосцепление изменяется от 0 до Ψ или на величину $\Delta\Psi = \Psi$ за время $\Delta\tau$, малое по сравнению с периодом собственных колебаний катушки милливольтметра, возбуждая в измерительной катушке среднюю ЭДС индукции по величине, равную

$$|\varepsilon| = \frac{\Delta\Psi}{\Delta\tau} = N\mu\mu_0S \frac{H}{\Delta\tau}.$$

В измерительной цепи с сопротивлением R_0 ЭДС ε возбуждает ток i , среднее значение которого равно ε/R_0 . Ток I переносит заряд $q = i \Delta\tau$. Так как

$$\left\{ \begin{array}{l} q = i\Delta\tau, \quad i = \varepsilon/R_0 \\ \varepsilon \Delta\tau = N\mu\mu_0HS \end{array} \right\}, \text{ то } q = \frac{N\mu\mu_0SH}{R_0}. \quad (5)$$

Согласно формулам (6) и (7), милливольтметр можно градуировать в единицах магнитного потока Φ или в единицах заряда q , протекающего в измерительной цепи за время включения или выключения тока I в соленоиде. Поэтому измеренное значение напряженности магнитного поля равно

$$H_U = \frac{\Phi}{\mu\mu_0S} = \frac{\Psi}{N\mu\mu_0S} = \frac{Cn_\delta}{N\mu\mu_0S}, \quad (6)$$

или

$$H_U = \frac{qR_0}{N\mu\mu_0S}, \quad (7)$$

где C – постоянная милливольтметра, указанная на установке; N – число витков на измерительной катушке; S – площадь сечения на измерительной катушке; n_δ – отброс милливольтметра.

Выбор формулы для определения измеренного значения H_U в точке соленоида, где расположена измерительная катушка, оп-

ределяется градуировкой шкалы по потоку (6) или разряду (7), обеспечивающему баллистический отброс стрелки прибора.

В той же точке, например A на рис. 2, напряженность магнитного поля можно рассчитать. Используя закон Био – Савара – Лапласа, можно определить напряженность магнитного поля на оси кругового тока. Участок dL соленоида, имеющего $n = W/L$ витков на единицу длины, при токе I можно рассматривать как круговой ток $In dL$, для которого напряженность магнитного поля dH_T в точке A равна

$$dH_T = \frac{nIR^2}{2(R^2 + l^2)^{3/2}} dL = \frac{nI}{2} \sin \beta d\beta, \quad (8)$$

так как

$$l = R \operatorname{ctg} \beta, \quad dL = -R \frac{d\beta}{\sin^2 \beta}, \quad R^2 + l^2 = \frac{R^2}{\sin^2 \beta}.$$

Чтобы найти теоретическое значение напряженности магнитного поля H_T в точке A от всех элементов тока нужно проинтегрировать уравнение (8) в пределах углов между осью OX и направлениями от точки A на левый конец соленоида β_2 и на правый – β_1 , т.е.

$$H_T = \frac{In}{2} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \beta d\beta = \frac{IW}{2L} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2), \quad (9)$$

где I – ток в соленоиде; W – число витков; L – длина соленоида.

Порядок выполнения работы

1. Изучить правила пользования вебберметром.
2. Устанавливая измерительную катушку в пяти точках оси соленоида, включая ток (или переключая направление тока) в нем, измерить напряженности поля в этих точках с подсчетом по формулам (6) или (7) соответственно. Замерить расстояние выбранных пяти точек от точки 0 на оси соленоида (рис.2).
3. Рассчитать в этих же точках теоретическое значение напряженностей по формуле (9). Построить графики $H(x)$ измеренных и расчетных значений в одной системе координат. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.

| Постоянные $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$, $W =$ ВИТКОВ, $S = \text{м}^2$, $R = \text{м}$. | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|
| Номер точки | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Величины | | | | | |
| $x, \text{ м}$ | | | | | |
| $\Psi, \text{ Вб}$ | | | | | |
| $H_U, \text{ А/м}$ (измеренное) | | | | | |
| $-\cos \beta_2 = \frac{x}{\sqrt{x^2 + R^2}}$ | | | | | |
| $\cos \beta_1 = \frac{L-x}{\sqrt{(L-x)^2 + R^2}}$ | | | | | |
| $H_T, \text{ А/м}$ Расчет по (9) | | | | | |

Контрольные вопросы

1. Что называется соленоидом?
2. Что называется магнитным потоком? В каких единицах он измеряется?

Рекомендуемая литература

- Калашников С.Г. Электричество М., 2003.
- Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3: Электричество. М., 2002.
- Евтихийев Н.Н. и др. Измерение электрических и неэлектрических величин. М., 1990.

Лабораторная работа 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНФИГУРАЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИК ДВУМЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель работы

Изучение характеристик электрического поля и их взаимосвязи.

Вывод расчетных соотношений

Электрическим полем называется физическое пространство, возбужденное (индуцированное) зарядом и непрерывно распределенное во всей его окрестности. Заряды взаимодействуют между собой через электрическое поле.

Электрический заряд q является мерой интенсивности источника электрического поля и в международной системе единиц (СИ) его измеряют в кулонах (Кл). Любой заряд (любое количество электричества) кратен наименьшему известному (элементарному) заряду e , которым обладают основные структурные частицы вещества – протоны («положительный» заряд $+e$) и электрон («отрицательный» заряд $-e$), т.е.

$$q = Ne,$$

где $N = 1, 2, 3 \dots$; $e = 1,60210 \cdot 10^{-19}$ Кл

Напряженность поля \bar{E}_A – силовая характеристика поля в данной точке А, измеряемой силой, с которой поле действует на единичный положительный заряд, помещенный в этой точке, т.е.

$$\bar{E}_A = \frac{\bar{F}_A}{q_A}. \quad (1)$$

Потенциал электрического поля является энергетической характеристикой поля в данной точке, измеряемой работой против сил поля по переносу единичного положительного заряда из бесконечности в данную точку, т.е.

$$\Pi_A = \frac{A_{A,\infty}}{q_A}, \quad \text{или} \quad d\Pi = \frac{dA}{q}, \quad (2)$$

где $dA = F_{\text{вн}} dr = -F dr$, если внешние силы $F_{\text{вн}}$, а силы поля $F = -F_{\text{вн}}$.

Так как пробный заряд $(+q)$ всегда отталкивается от положительного и притягивается к отрицательному заряду, то потенциал увеличивается по направлению к положительному и убывает к отрицательному заряду (рис. 1). Вектор, модуль которого равен возрастанию потенциала на единицу длины направления r , по которому возрастание потенциала максимально, называют градиентом потенциала (обозначение: $\text{grad } \Pi$). На рис. 1 показано, что градиент потенциала везде направлен навстречу вектору напря-

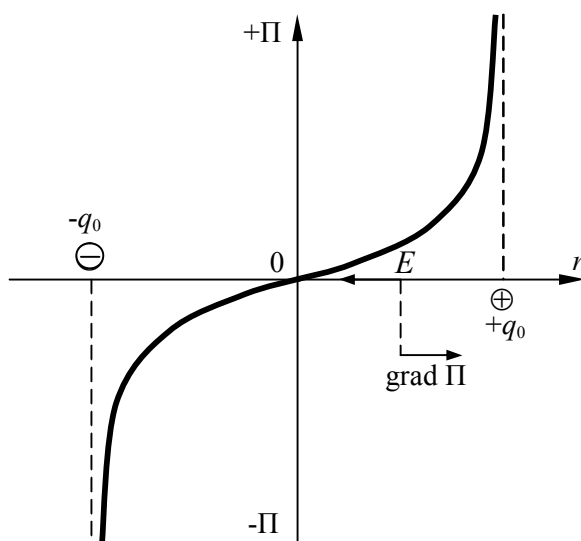


Рис. 1. График зависимости $\Pi(r)$

женности, т.е. от отрицательного $(-e)$ к положительному заряду $(+e)$. В рассматриваемом случае $\text{grad}\Pi = \frac{d\Pi}{dr}$. Так как

$$\left\{ \begin{array}{l} dA = -Fdr \\ d\Pi = \frac{dA}{q}, F = qE \end{array} \right\}, \text{ то } E = -\frac{d\Pi}{dr} \quad (3)$$

или в общем случае $\vec{E} = -\text{grad}\Pi$.

Напряженность поля численно равна градиенту потенциала, но направлена в противоположную ему сторону.

Для поля точечного заряда q_0

$$E = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}$$

$$d\Pi = -E dr \text{ и } d\Pi = -\frac{q_0 dr}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2},$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды;
 $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

Откуда

$$\Pi = \frac{q_0}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r}.$$

Работу сил поля по перемещению заряда q из r_1 в r_2 можно определить по формуле (3). Поэтому

$$A = \int_{r_1}^{r_2} dA = q \left(\frac{q_0}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r} - \frac{q_0}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1} \right) = q(\Pi_2 - \Pi_1).$$

Разность потенциалов между точками 1 и 2 называют электрическим напряжением между этими точками ($U_{12} = \Pi_2 - \Pi_1$). Следовательно, работа сил поля $A_{12} = qU_{12}$.

Потенциал и напряжение в СИ измеряют в вольтах:

$$1 \text{ Дж/Кл} = 1 \text{ вольт} = (1 \text{ В}).$$

По определению 1 В есть потенциал такой точки электрического поля, в которой положительный заряд в 1 Кл обладает потенциальной энергией в 1 Дж.

Единица измерения напряженности поля E определена по формуле связи напряженности с потенциалом (3):

$$1 \text{ Вольт/метр} = 1 \text{ В/м}.$$

Линиями напряженности электрического поля называют линии, в каждой точке которых вектор напряженности поля направлен по касательной. Поверхности равного потенциала называют эквипотенциальными. В плоскости, пересекающей источник поля, след от каждой эквипотенциальной поверхности называют эквипотенциальной линией. Система силовых и эквипотенциальных линий на плоскости образует двумерное поле (рис. 2).

В данной работе экспериментально определяют расположение ряда эквипотенциальных линий двумерного поля, по которым строят систему силовых линий (рис. 2) и по соотношению (3) определяют напряженность поля в нескольких точках.

Порядок выполнения работы

После включения напряжения U между электродами 4 возникает электрическое поле, вдоль силовых линий которого будут двигаться заряды, имеющиеся в веществе электропроводящей бумаги 1. Силовые линии поля и линии тока во всех точках

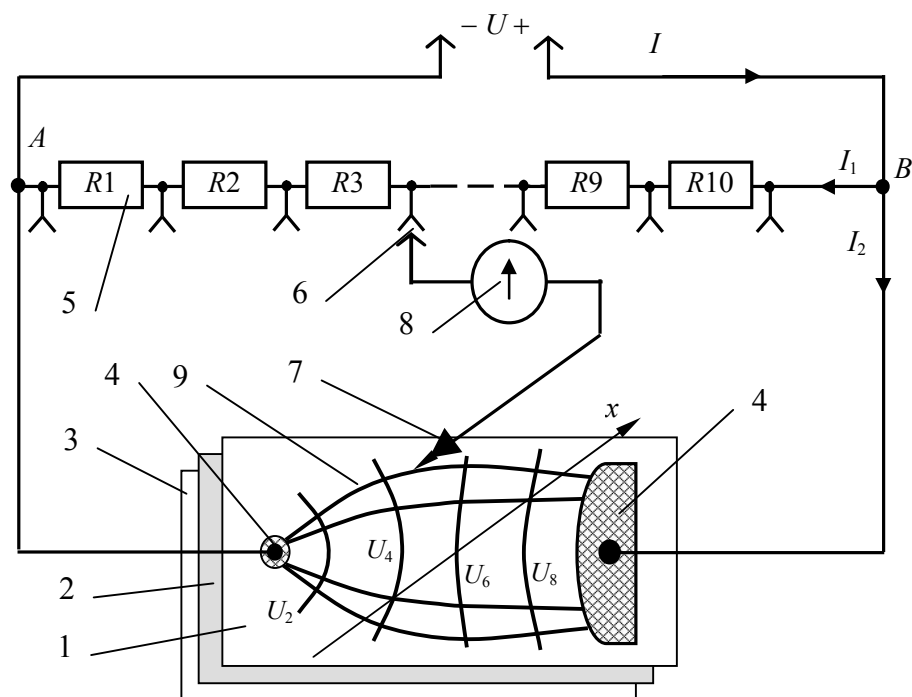


Рис. 2. Принципиальная схема установки:

1 – лист электропроводящей бумаги; 2 – копировальная бумага; 3 – лист писчей бумаги; 4 – электроды, прижатые к электропроводящей бумаге; 5 – делитель напряжения из одинаковых резисторов $R1 \div R10$; 6 – штепсель с вилкой; 7 – щуп; 8 – гальванометр с нулем посередине; 9 – линии тока

перпендикулярны к эквипотенциальным линиям, например, U_2 ; U_4 ; U_6 ; U_8 . Сумма всех токов через бумагу равна току I_2 , ответственному в точке В. Из этой же точки В ответвляется I_1 , проходящий через делитель напряжения 5. На каждом резисторе делителя падение напряжения составляет $0,1U$. Принимая потенциал в точке А равным нулю, получаем на гнездах делителя десять значений потенциалов ($U_1 = 0,1U$; $U_2 = 0,2U$ и т.д.).

Включая вилку 6 гальванометра 8 в одно из гнезд делителя щупом 7, определяют на электропроводящей бумаге положение точек с тем же потенциалом, что и на выбранном гнезде делителя. Когда потенциалы вилки и щупа гальванометра равны, тогда стрелка гальванометра не отклоняется от нуля. Слегка нажимая на щуп, посредством копировальной бумаги 2 отмечают на листе 3 положение точек, соответствующих эквипотенциальной линии.

Другие эквипотенциальные линии определяют и наносят на бумагу аналогично.

После определения всех эквипотенциальных линий электроды снимают, на листе 3 проводят силовые линии поля.

Лабораторные задания

1. Вдоль заданного преподавателем направления ОХ (рис. 2) определить зависимость потенциала от X и построить график $U(x)$.

2. По формуле (3) найти 10 значений напряженности поля E в разных точках оси ОХ и построить график $E(x)$.

3. Проанализировать ход эксперимента и сформулировать вывод о характеристиках двумерного поля.

Контрольные вопросы и задания

1. Что называется электрическим полем?

2. Что называется напряженностью электрического поля?

3. Что называют силовыми линиями электрического поля? Каковы их основные свойства?

4. Что называется эквипотенциальными линиями электрического поля?

5. Что называется потенциалом электрического поля?

6. Доказать взаимную перпендикулярность силовых и эквипотенциальных линий электрического поля.

7. Какова связь между напряженностью и потенциалом электрического поля?

8. Вывести формулу потенциала и напряженности электрического поля точечного заряда.

9. Найти работу перемещения точечного заряда в электрическом поле.

10. Указать в некоторой точке поля взаимное расположение силовых и эквипотенциальных линий, векторов \vec{E} и $\text{grad}\varphi$.

Рекомендуемая литература

Калашников С.Г. Электричество М., 2003.

Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3: Электричество. М., 2002.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| <i>Лабораторная работа 1. Измерение физических величин с помощью осциллографа.....</i> | 4 |
| <i>Лабораторная работа 2. Измерение сопротивлений мостовым методом.....</i> | 13 |
| <i>Лабораторная работа 3. Исследование температурной зависимости сопротивления электролитов.....</i> | 22 |
| <i>Лабораторная работа 4. Определение коэффициента самоиндукции катушки, изучение резонанса тока и напряжения.....</i> | 30 |
| <i>Лабораторная работа 5. Измерение емкости конденсатора с помощью моста Сотти.....</i> | 39 |
| <i>Лабораторная работа 6. Измерение горизонтальной составляющей магнитного поля земли тангенс-буссолью.....</i> | 44 |
| <i>Лабораторная работа 7. Проверка закона Био-Савара-Лапласа для соленоида конечной длины.....</i> | 48 |
| <i>Лабораторная работа 8. Определение конфигурации и характеристик двумерного электрического поля.....</i> | 53 |

Учебное издание

Матвиенко Геннадий Иванович
Исаев Владислав Андреевич
Григорьян Леонтий Рустемович

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Лабораторный практикум

Подписано в печать 11.07.2011. Печать цифровая.
Формат 60×84 1/16. Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 3,75. Тираж 100 экз. Заказ №

Кубанский государственный университет
350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149

Издательско-полиграфический центр КубГУ
350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149