

М 1430

**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**Ташкентский университет информационных технологий
имени Мухаммада аль-Хоразми и Совместный факультет
Белорусского государственного университета информатики и
радиоэлектроники**

КАФЕДРА ФИЗИКИ

**Методическое пособие по выполнению лабораторных работ по
курсу физики для направления БГУИР**

ЧАСТЬ I

ЭЛЕКТРОСТАТИКА И МАГНЕТИЗМ

Ташкент-2023

Авторы: О. О. Очиллова, Ш. И. Абдуллаева, И. И. Абсалямова,
А.К. Аширбаева

«Электростатика и магнетизм» часть I. Методическое пособие для выполнения лабораторных работ по предмету «Физика». – Ташкент: ТУИТ имени Мухаммада ал-Хоразмий. 2022г.

Методическое пособие разработано на основе учебной программы предмета «Физика» для студентов совместного факультета ТУИТ-БГУИР. В данном пособии представлены темы лабораторных работ, цель работы, необходимые оборудования, краткие теоретические сведения, порядок выполнения работы, необходимые формулы и понятия для выполнения математических расчётов, а также таблицы для ввода данных. Также включены вопросы по теоретическому материалу и список литературы для самостоятельного изучения.

Методическое пособие рекомендовано к публикации на заседании
совета ТУИТ имени Мухаммада ал-Хоразмий
(протокол № 10 (156) от «31» 05 2022 года)

ВВЕДЕНИЕ

Курс физики наряду с другими общеобразовательными дисциплинами составляет основу теоретической подготовки инженеров и играет роль фундаментальной базы, без которой невозможна успешная деятельность современного инженера любого профиля. Многие области современной техники, такие как электроника, электро- и радиотехника, приборостроение, машиностроение, технология радиоэлектронных средств и др., тесно связаны с физикой.

Изучение курса физики способствует развитию у студентов физического мышления, а также формированию у них научного мировоззрения, на основе которого складываются основные представления о современной физической картине мира. В ходе изучения курса физики находят отражение основные этапы сложного исторического развития физики как науки и используются все компоненты процесса научного познания: анализ и синтез, абстрагирование и идеализация, аналогия, формализация, обобщения и ограничения, индукция и дедукция, историческое и логическое. Все это имеет большое методологическое значение и создает основу для изучения специальных дисциплин.

ОРГАНИЗАЦИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторные работы выполняются группами студентов не более 3 человек, для чего в начале семестра студенты учебной группы разбиваются на несколько подгрупп, которые до конца семестра в этом составе выполняют работы. Последовательность выполняемых лабораторных работ соответствует последовательности, приведённой в оглавлении настоящего методического руководства.

Выполнение каждой лабораторной работы, входящей в практикум, предусматривает следующее:

1. Теоретическую подготовку.
2. Допуск к выполнению работы.
3. Проверку эксперимента, наблюдение и измерение.
4. Обработку результатов измерений.
5. Отчет о выполнении лабораторной работы.
6. Защиту выполненной работы

Теоретическая подготовка сводится к изучению соответствующих физических явлений и законов по учебнику и конспекту лекций для ответа на вопросы допуска и контрольные вопросы, изучению описания заданной лабораторной работы с целью ознакомления с методикой измерения и порядком выполнения работы. Подготовка проводится заранее, до выполнения лабораторной работы, так как аудиторские занятия

предназначены только для допуска к работе и на проведение измерений, их обработку и защиту работы.

Допуск к работе состоит в проверке теоретической подготовки студента к каждой работе, знания метода измерений и порядка выполнения работы.

Наблюдения и измерения - главная часть эксперимента. Они требуют от студента знания методов измерений, должного внимания и аккуратности при снятии отсчетов и записи результатов измерений

Обработка результатов измерений заключается в подстановке измеренных параметров в рабочие формулы и вычислении необходимых физических величин, проведении математической обработки результатов. Оценка погрешности и математическая обработка результатов будут рассмотрены в следующем параграфе.

Отчет о выполнении лабораторной работы. Отчет о работе оформляется индивидуально каждым студентом.

В отчете должно присутствовать следующее:

1. Цель работы.
2. Приборы и принадлежности.
3. Принципиальная схема или рисунок установки.
4. Рабочие (расчетные) формулы.
5. Таблица результатов измерений и вычисленных величин с учетом математической обработки погрешностей.
6. Графики.

7. Выводы по результатам работы.

Защита выполненной работы сводится к устному или письменному ответу на контрольные вопросы и самостоятельному выводу рабочих формул, которые используются в работе.

Одна лабораторная работа выполняется в течение 2-х занятий (4-х часов) по расписанию. Ниже приведён объём выполняемых студентом работ по часам.

- Первый час - получение у лаборантов методических пособий и подготовка студентов к допуску.
- Второй час - допуск студентов к выполнению лабораторной работы (проводится преподавателем, который ставит подпись в конспекте студента).
- Третий час - выполнение измерений (контролируется преподавателем и дежурным лаборантом). После окончания измерений и занесения их результатов в таблицы в конспекте студенты получают подпись преподавателя (графа измерения), и подпись лаборанта (графа установка).
- Четвертый час - самостоятельная обработка результатов и сдача преподавателю зачета по лабораторной работе (отметка о факте сдачи отчёта).

ЗАДАЧИ СТУДЕНТОВ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Цель выполнения лабораторных работ по физике — это закрепление полученных теоретических знаний, подготовка студентов к практическому применению законов физики в повседневной жизни и производстве, формирование навыков и умений измерения физических величин.

Поэтому все студенты обязаны выполнять лабораторные работы! Студенты полностью выполнившие и сдавшие лабораторные работы будут допущены к промежуточным и итоговым контролям по теоретическому курсу физики.

Требования к выполнению лабораторных работ:

1. Необходимо завести отдельную тетрадь для лабораторных работ. Студент должен приходить на лабораторные занятия подготовленным и без опоздания.

2. В начале студент подробно изучает описание лабораторной работы и необходимое оборудование. Далее после беседы с преподавателем студент получает допуск к выполнению лабораторной работы.

Студент, не знающий цели и порядка выполнения работы не допускается к выполнению лабораторной работы.

3. Подключение электрической цепи к источнику тока допускается только с разрешением преподавателя или лаборанта.

7. Выводы по результатам работы.

Защита выполненной работы сводится к устному или письменному ответу на контрольные вопросы и самостоятельному выводу рабочих формул, которые используются в работе.

Одна лабораторная работа выполняется в течение 2-х занятий (4-х часов) по расписанию. Ниже приведён объём выполняемых студентом работ по часам.

- Первый час - получение у лаборантов методических пособий и подготовка студентов к допуску.
- Второй час - допуск студентов к выполнению лабораторной работы (проводится преподавателем, который ставит подпись в конспекте студента).
- Третий час - выполнение измерений (контролируется преподавателем и дежурным лаборантом). После окончания измерений и занесения их результатов в таблицы в конспекте студенты получают подпись преподавателя (графа измерения), и подпись лаборанта (графа установка).
- Четвертый час - самостоятельная обработка результатов и сдача преподавателю зачета по лабораторной работе (отметка о факте сдачи отчёта).

ЗАДАЧИ СТУДЕНТОВ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Цель выполнения лабораторных работ по физике — это закрепление полученных теоретических знаний, подготовка студентов к практическому применению законов физики в повседневной жизни и производстве, формирование навыков и умений измерения физических величин.

Поэтому все студенты обязаны выполнять лабораторные работы! Студенты полностью выполнившие и сдавшие лабораторные работы будут допущены к промежуточным и итоговым контролям по теоретическому курсу физики.

Требования к выполнению лабораторных работ:

1. Необходимо завести отдельную тетрадь для лабораторных работ. Студент должен приходить на лабораторные занятия подготовленным и без опоздания.

2. В начале студент подробно изучает описание лабораторной работы и необходимое оборудование. Далее после беседы с преподавателем студент получает допуск к выполнению лабораторной работы.

Студент, не знающий цели и порядка выполнения работы не допускается к выполнению лабораторной работы.

3. Подключение электрической цепи к источнику тока допускается только с разрешением преподавателя или лаборанта.

4. Во время выполнения лабораторной работы студенты должны соблюдать тишину и не покидать место выполнения работы. Нельзя оставлять цепь подключённой к источнику тока!

5. После выполнения работы цепь отключается от источника тока.

6. На основании полученных результатов производятся расчёты. Данные представляются преподавателю и, если всё верно, получают подпись преподавателя.

7. После выполнения работы все приборы и оборудования сдаются лаборанту.

8. Преподавателю сдаётся отчёт по выполненной работе.

9. Студенты получают задания на следующее занятие.

10. Если остаётся свободное время до конца пары студенты занимаются самообразованием.

ВИДЫ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Любое измерение всегда имеет погрешность. Эти погрешности делятся на два вида – систематические и случайные.

1. Систематическая погрешность присутствует всегда. Погрешность, связанная с не правильной установкой измерительного прибора (связанная с точностью измерения) и не правильным выбором методики измерений является систематической погрешностью. Эта погрешность может появиться в следствии некоторых внешних факторов, например, неравномерная градуировка линейки, несоответствие нуля градусов на термометре реальному нулю, неравномерность толщины капилляра термометра и т.д.

Не учитывать такие факторы как изменение объёма сосуда, содержащего жидкость или газ при нагревании, воздействие выталкивающей силы действующей на гири рычажных весов и теплообмен калориметра с окружающей средой, также возникает систематическая погрешность.

Систематические погрешности возникают и при округлении табличных данных (например, плотность, удельная теплоёмкость, модуль упругости и т.д.), а также постоянных входящих в формулы (π , e – основание натурального логарифма, ε и другие).

Например, если вместо $\pi = 3,14159265$ взять $\pi = 3$; $\pi = 3,1$;

$n = 3,142$, или для показателя преломления воды вместо $n = 1,333$ взять $n = 1,3$; $n = 1,33$, то возникает систематическая погрешность. Систематическая погрешность возникает вследствие ряда причин. Систематическая погрешность может присутствовать, если проведено несколько измерений или она может меняться по некоторой закономерности. Систематическую погрешность можно уменьшить, изменив методику измерений, откалибровав измерительные приборы, удалив воздействие систематических внешних воздействий.

2. Случайная погрешность – погрешность, возникающая вследствие случайных факторов, которые трудно предугадать, воздействие которых может по-разному проявляться при каждом измерении. Например, скачок напряжения в электрической цепи, неоднородность в толщине измеряемой пластины, недостаточная освещённость при измерении, несовершенство наших органов восприятия и т. д. приводят к возникновению случайных погрешностей. Из-за случайных погрешностей измеряя одну и ту же физическую величину можно получить различные значения.

Хотя в некоторых случаях нет возможности удалить случайную погрешность, с помощью математических теорий случайных процессов можно уменьшить влияние случайных погрешностей, и найти наиболее приемлемое выражение для расчёта величины погрешности. Для уменьшения случайной погрешности измерение проводят не один, а несколько раз. Если случайная погрешность

больше систематической, нужно уменьшить её величину до величины погрешности измерительного прибора методом многократных измерений.

Кроме систематических и случайных погрешностей существуют также грубые ошибки. Грубые ошибки возникают при неправильном выполнении и измерении. При вычислениях такие значения не должны учитываться. Такие ошибки возникают при не аккуратном использовании шкалы, при без разборного записывания значений. Для удаления таких ошибок нужно заново просмотреть записи и заново проделать измерения. Для того, чтобы не делать грубых ошибок нужно внимательно выполнять измерения по несколько раз и аккуратно записывать их.

**ПОГРЕШНОСТЬ НЕПОСРЕДСТВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.
СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН,
АБСОЛЮТНАЯ И ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ
ИЗМЕРЕНИЙ.**

Считая, что в процессе измерений были устранены систематические погрешности, связанные с измерительными приборами и грубые ошибки, рассмотрим непосредственно основные правила теории ошибок.

Если в результате измерений некоторой физической величины получены значения $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, то наиболее близкое к истинному значению будет определяться по формуле

$$x = \langle x \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

где n - количество измерений.

1. Значения, полученные при измерениях, будут отличаться друг от друга. Разность каждого значения от среднего называется абсолютной погрешностью.

$$\Delta x = |\langle x \rangle - x_i|.$$

Чем меньше получена абсолютная погрешность измерения, тем более точно выполнено измерение. Значения, сильно отличающиеся от среднего значения, не учитываются, так как имеют грубую ошибку.

Если в результате n количества измерений найдено $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3 \dots \Delta x_n$ абсолютных погрешностей, то средняя абсолютная погрешность равняется среднему арифметическому значению этих погрешностей.

$$\langle \Delta x \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n}$$

Естественно, истинное значение физической величины будет отличаться на $\pm \langle \Delta x \rangle$ от найденного среднего значения

$$x = \langle x \rangle \pm \langle \Delta x \rangle$$

2. Если во время эксперимента необходимо измерить несколько физических величин, для каждой из них нужно будет найти погрешность измерений. Однако нельзя сравнивать абсолютные погрешности полученных измерений, так как они не однородны, в таких случаях используется относительная погрешность.

Относительная погрешность равняется отношению среднего значения абсолютной погрешности $\langle \Delta x \rangle$ к средней измеренной величине $\langle x \rangle$, т.е. $\delta = \frac{\langle \Delta x \rangle}{\langle x \rangle}$ или если выразить в процентах,

$$\delta = \frac{\langle \Delta x \rangle}{\langle x \rangle} \cdot 100\%$$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.
ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА В
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Цель работы:

В результате выполнения лабораторной работы студент должен:

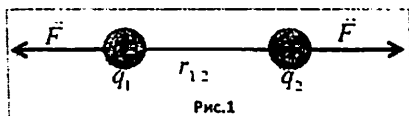
- знать смысл физических величин: потенциала, напряженности, градиента потенциала, циркуляции вектора напряженности \vec{E} ;
- уметь практически находить распределение потенциала для заданной системы электрических зарядов, теоретически связать напряженность электрического поля \vec{E} с потенциалом φ и определить напряженность \vec{E} для каждой точки поля по графику зависимости

Задание:

- Изучить устройство и работу макета лабораторной установки.
- Снять распределение потенциала между электродами и построить эквипотенциальные линии этого поля.
- Изобразить электрическое поле графически с помощью линий напряженности (силовых линий).
- Построить график изменения потенциала вдоль оси между электродами
- Графически найти напряженность в указанной точке.

Основные теоретические сведения и соотношения

Электрическое поле неподвижных зарядов называется электростатическим.



Силы взаимодействия заряженных тел подчиняются закону Кулона: сила электростатического взаимодействия двух точечных электрических зарядов, находящихся в вакууме, прямо пропорциональна произведению q_1 и q_2 этих зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними и направлена вдоль соединяющей их прямой.

В векторной форме закон Кулона выглядит так:

$$\vec{F}_{12} = \frac{kq_1q_2\vec{r}_{12}}{r^3}, \quad (1.1)$$

где \vec{F}_{12} – вектор силы, действующая на заряд q_1 со стороны заряда q_2 ; \vec{r}_{12} – единичный вектор, направленный от положительного заряда к отрицательному, $r = |\vec{r}_{12}|$ – модуль радиус-вектора, $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}$ – коэффициент пропорциональности, $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – электрическая постоянная, ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды ($\epsilon = 1$ в вакууме).

Закон Кулона можно записать в скалярной форме:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}. \quad (1.2)$$

Электростатическое поле является векторным и потенциальным. В каждой точке это поле можно характеризовать вектором силы, с которой поле действует на единичный положительный заряд, и величиной потенциальной энергии, которой обладает указанный заряд в этой точке поля.

Напряженностью в какой-либо точке электрического поля называется вектор \vec{E} , численно равный силе, с которой поле действует на единичный положительный заряд, помещенный в эту точку поля, и направленный в сторону действия силы

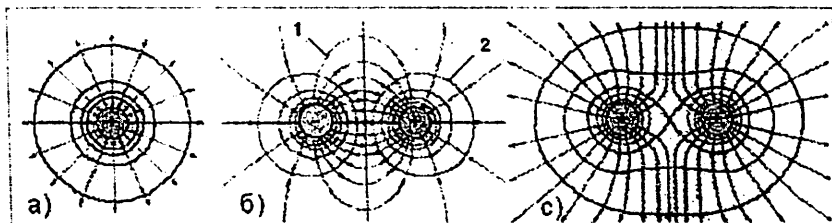
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (1.3)$$

Потенциалом данной точки электростатического поля называется отношение потенциальной энергии точечного заряда к величине заряда

$$\varphi = \frac{W_p}{q} \quad (1.4)$$

Графически электростатическое поле можно изображать с помощью линий напряженности (силовых линий) и эквипотенциальных поверхностей.

Силовой называется линия, касательные к которой в каждой точке пространства совпадают с направлением вектора напряженности в данной точке поля. Направление силовой линии совпадает с направлением вектора напряженности.



Эквипотенциальной поверхностью называется поверхность, во всех точках которой потенциал φ имеет одинаковое значение. Чем больше напряженность электрического поля, тем гуще силовые линии.

Важным свойством электрических полей является принцип суперпозиции (наложения) полей, состоящий в следующем: напряженность результирующего поля, созданного системой зарядов, равна векторной сумме напряженностей полей каждого заряда в отдельности

$$E = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i = \vec{E}_1 + \dots + \vec{E}_n \quad (1.5)$$

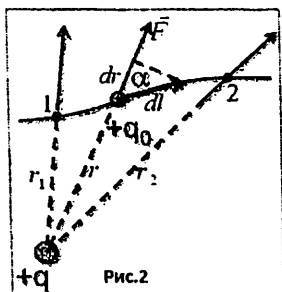


Рис.2

Из принципа суперпозиции полей вытекает закон алгебраического сложения потенциалов нескладывающихся полей

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i = \varphi_1 + \dots + \varphi_n \quad (1.6)$$

Работа, совершаемая силами электростатического поля при перемещении точечного заряда q_0 из точки с потенциалом φ_1 в точку с потенциалом φ_2 равна

$$A = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (1.7)$$

При изучении электростатических полей надо знать, разность потенциалов в каких-либо точках поля. Работа сил поля при малом перемещении $d\vec{l}$ заряда q равна:

$$\delta A = -dW_p = -q_0 d\varphi \quad (1.8)$$

С другой стороны,

$$\delta A = \vec{F} d\vec{l} = q_0 \vec{E} d\vec{l} = q_0 E_l dl \quad (1.9)$$

где $E_l = E \cos(\vec{E} d\vec{l})$ - проекция вектора \vec{E} на направление вектора перемещения. Из формулы (1.7) следует, что работа, совершаемая при перемещении заряда q_0 по замкнутому пути L равна нулю

$$\oint dA = 0 \quad (1.10)$$

Тогда из формулы (1.10) следует

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = \oint \vec{E}_l dl = 0 \quad (1.11)$$

Интеграл $\oint \vec{E} d\vec{l}$ называется циркуляцией вектора напряженности \vec{E} . Согласно (1.11) циркуляция вектора напряженности вдоль любого замкнутого контура равна нулю, из этого следует, что линии напряженности электростатического поля не могут быть замкнутыми.

Из сопоставления выражений (1.8) и (1.9) имеем

$$E = \frac{d\varphi}{dl} \text{ или } \vec{E}_l = -\text{grad}\varphi \quad (1.12)$$

Таким образом, напряженность электростатического поля равна по модулю и противоположна по направлению градиенту потенциала. Знак “минус” означает, что напряженность \vec{E} направлена в сторону убывания потенциала.

Проекция вектора напряженности электростатического поля на произвольное направление численно равна быстрой убывания потенциала на единицу длины в этом направлении. Если $d\vec{l}$ направлен по касательной к эквипотенциальной поверхности, то $\frac{d\varphi}{dl} = 0$ и, $\vec{E}_l = 0$ то есть $d\vec{l} \perp \vec{E}$.

Следовательно, линии напряженности перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.

Описание установки и метода измерений

В данной работе исследование электрического поля заряженных металлических электродов осуществляется путем моделирования этого поля, т.е. созданием другого, эквивалентного ему, поля. Таким эквивалентом является электрическое поле в электролите с плохой проводимостью, в который помещают увеличенную копию исследуемой электродной системы, а электроды подключают к делителю напряжения цепи источника

тока, подобрав нужные их потенциалы. Этот метод получил название метода электролитической ванны.

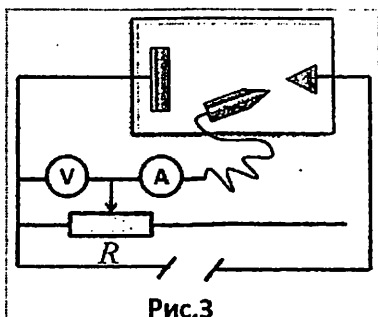


Рис.3

Он основан на том, что при слабых токах в электролите справедлив закон Ома ($\vec{j} = \sigma \vec{E}$), т.е. линии тока совпадают с линиями напряженности поля, а эквипотенциальные поверхности поля в электролитической ванне совпадают

с эквипотенциальными поверхностями моделируемого электростатического поля. Так как, зонд вводится в проводящую среду, то решается проблема стекания с него индуцированного заряда.

Надо, однако, выполнить следующие условия:

1. Электролит должен быть однородным и с большим омическим сопротивлением.
2. Вместо постоянного тока целесообразно использовать переменный ток небольшой частоты. Этим устраняется электролитическая поляризация электродов вследствие электролиза.

3. Для измерения потенциалов соответствующих эквипотенциальных поверхностей используется электрическая схема, напоминающая мостиковую схему, в которой реохорд заменен потенциометрическим реостатом с вольтметром,

измеряющим напряжения между подвижным контактом реостата и его концевой клеммой, присоединенной к электроду ванны, потенциал которого принят за нуль. Роль двух других плеч играют участки электролита по разные стороны от эквипотенциальной линии, на которой находится зонд при условии равновесия, т.е. когда он имеет потенциал подвижного контакта реостата, измеряемый вольтметром.

В макете лабораторной установки используется электролитическая ванна из оргстекла, которая позволяет изучать электрическое поле в одной плоскости. Электролитом служит водопроводная вода. Схема включения установки показана на рис.3. Зонд, изготовленный в виде острия на изолирующей ручке, подсоединен к клемме амперметра. Вольтметр, соединенный с делителем напряжения, измеряет его потенциал относительно одного из электродов (на рисунке электрод А). Вольтметр установлен внутри макета установки. Значения потенциалов, измеряемых вольтметром, в виде таблицы указаны на установке. Определение координат исследуемых точек поля и электродов производится с помощью координатной сетки.

Измерения и обработка результатов измерений

1. Заполняют ванну водой, регулируя её горизонтальность установленными винтами.

2. На листе миллиметровой или клетчатой бумаги в соответствующем масштабе наносят форму и расположение электродов.
3. Включают в сеть ванну.
4. Устанавливают переключатель делителя напряжения в крайнее положение, записывают соответствующее ему показание вольтметра, указанное в таблице на макете установки.
5. Водят зондом вдоль горизонтальной оси координатной сетки, пока не найдут положение, при котором стрелка амперметра установится на «0» (нуль). За потенциал зонда (и соответствующей точки поля) можно принять показание вольтметра. Отметив на миллиметровой бумаге найденную точку, ищут соседнюю точку, отстоящую на 1-2 см, и таким путем находят достаточное число точек для построения эквипотенциальной линии. Точки с одинаковым потенциалом соединяют линией.
6. Уменьшают показания вольтметра и, записав как потенциал следующей эквипотенциальной линии, находят таким же способом координаты точек с этим значением потенциала. Таким образом исследуется вся ванна.
7. После построения эквипотенциальных линий на графике наносятся силовые линии перпендикулярно к эквипотенциальным линиям и к поверхности электродов в точках входа и выхода

8. Зная распределение эквипотенциальных линий в электролитической ванне, можно определить значение напряженности поля в любой его точке. Например, найдем значение \vec{E} в произвольной точке $x = x_0$ при $y = 0$. Для этого на миллиметровой бумаге необходимо построить график зависимости $\varphi = \varphi(x)$. Поскольку $\vec{E}_x = -grad\varphi$ или $E = \frac{d\varphi}{dx}$, то напряженность поля \vec{E} можно найти графически как производную функции $\varphi(x)$ в точке x_0 . Численному значению вектора \vec{E} на графике $\varphi(x)$ соответствует тангенс угла наклона касательной к кривой $\varphi(x)$ в точке $x = x_0$. Если поле однородно или эквипотенциальные линии расположены так близко, что поле можно считать однородным, то

9.

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} \quad (1.13)$$

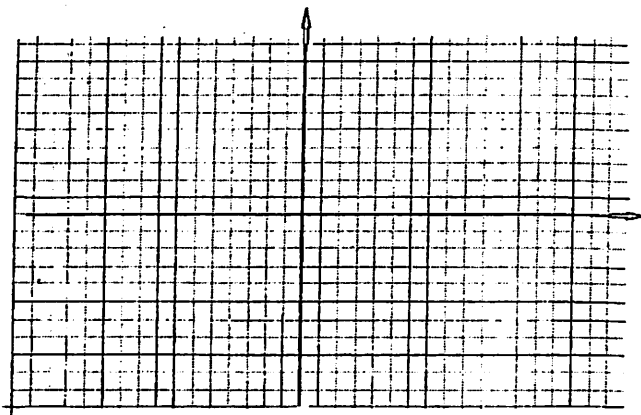
где φ_1 и φ_2 - потенциалы близких эквипотенциальных линий, d - расстояние между ними.

№	$\varphi_1 = \dots B$	$\varphi_2 = \dots B$	$\varphi_3 = \dots B$	$\varphi_4 = \dots B$	$\varphi_5 = \dots B$
Y	X	X	X	X	X
0					
+2					
-2					
+4					
-4					
+6					

-6					
+8					
-8					
+10					
-10					
+12					
-12					

Задание:

1. Начертить график зависимости $\varphi = \varphi(x)$.



Контрольные вопросы

1. Дайте определение напряженности электростатического поля, силовых линий и потока вектора напряженности.
2. В чем состоит принцип суперпозиции полей? Как вычисляют напряженность и электрическое смещение поля точечного заряда

в системе единиц СИ? Что утверждает теорема Гаусса для напряженности электрического поля и для электрического смещения?

3. Получите формулу, выражающую связь напряженности данной точки поля с разностью потенциалов. Чему равна циркуляция вектора напряженности электростатического поля? Дайте определение разности потенциалов, потенциала и единиц их измерения.
4. Какие поверхности называются эквипотенциальными, и как они расположены относительно силовых линий?
5. Как вычисляются потенциалы поля точечного заряда, системы точечных зарядов, равномерно заряженной сферы? В чем состоит условие равновесия зарядов на проводнике? Как связаны напряженность поля у поверхности проводника и поверхностная плотность заряда?
6. Как вычислить напряженность электростатического поля, если известен потенциал как функция координат?
7. Начертите схему установки и объясните схему моделирования поля в электролитической ванне.
8. Чем вызвано применение переменного напряжения в этом методе? Почему токи в электролитической ванне должны быть малыми, а удельное сопротивление электролита очень большим?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МОСТИКА УИТСТОНА

Цель работы:

В результате выполнения лабораторной работы студент должен:

- знать смысл физических величин: силы тока, плотности тока, напряжения, законов Ома, Джоуля-Ленца;
- уметь применять правила Кирхгофа для расчета цепей параллельного и последовательного соединения сопротивлений.

Задание:

1. Изучить схему мостика постоянного тока Уитстона.
2. Пользуясь собранной схемой мостика Уитстона, измерить два сопротивления, каждое в отдельности.
3. Измерить общее сопротивление при последовательном и параллельном соединении этих сопротивлений.
4. Результаты измерений п.3 сравнить с вычислениями по формулам последовательного и параллельного соединения и сделать соответствующее заключение.

Основные теоретические сведения и соотношения

Электрическим током в веществе называется упорядоченное движение имеющихся в нем свободных заряженных частиц. Силой тока называется скалярная физическая величина, численно равная

заряду, проходящему через поперечное сечение проводника в единицу времени

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (2.1)$$

Для неизменного по величине и по направлению тока (постоянного тока)

$$I = \frac{q}{t} \quad (2.2)$$

Единица силы тока - Ампер (А) - устанавливается из формулы Ампера для взаимодействия в вакууме параллельных токов.

Физическая величина, равная силе тока dI сквозь единицу площади поперечного сечения проводника, перпендикулярного направлению тока, называется плотностью тока

$$j = \frac{dI}{dS} \quad (2.3)$$

Плотность тока – вектор, ориентированный по направлению тока, то есть направление J совпадает с направлением упорядоченного движения положительных зарядов.

Напряжением (падением напряжения на участке “1-2” цепи тока) называется отношение работы, на этом участке всех сил по перемещению заряда, носителей тока к величине этого заряда

$$U = U_{12} = (A_{12 \text{ кул}} + A_{12 \text{ стор}}) \quad (2.4)$$

Отношение работы электрических (кулоновских) сил к величине перемещенного заряда называется разностью потенциалов

$$\varphi_1 - \varphi_2 = A_{12 \text{ кул}} / q \quad (2.5)$$

Для поддержания разности потенциалов на концах проводника его надо присоединить к полюсам источника тока (источника электродвижущей силы) либо непосредственно, либо при помощи других проводников. Источник тока характеризуется электродвижущей силой ε и внутренним сопротивлением r .

Электродвижущий силой (ЭДС) называется величина, численно равная работе сторонних (неэлектрических) сил по перемещению единичного положительного заряда

$$\varepsilon_{12} = A_{12 \text{ кул}} / q \quad (2.6)$$

Таким образом,

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12} \quad (2.7)$$

Если на участке не приложена ЭДС $\varepsilon_{12} = 0$, то

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (2.8)$$

Физик Г. Ом экспериментально установил, что сила тока, текущего по однородному проводнику пропорциональна напряжению на нем

$$I = \frac{U}{R} \quad (2.9)$$

Формула (2.9) выражает закон Ома для однородного участка цепи (не содержащего источника тока).

Коэффициент пропорциональности называют электропроводностью G этого участка. Обратную электропроводности величину называют электрическим сопротивлением

$$G = \frac{1}{R} \quad (2.10)$$

Сопротивление проводников зависит от формы, размеров и материала проводника. Для цилиндрического проводника сопротивление прямо пропорционально его длине l , обратно пропорционально площади его поперечного сечения S

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.11)$$

где ρ - удельное сопротивление, характеризующее материал проводника.

Обобщённый закон Ома для произвольного участка цепи

$$I = (\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12})/R \quad (2.12)$$

представляет собой закон Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме. Если электрическая цепь замкнута, то точки 1 и 2 совпадают, $\varphi_1 = \varphi_2$, тогда из (2.12) получаем закон Ома для замкнутой цепи

$$I = \frac{\varepsilon_{12}}{R} = \frac{\varepsilon_{12}}{R_{\text{вн}}} + r \quad (2.13)$$

где $R_{\text{вн}}$ - сопротивление внешней части, r - внутреннее сопротивление источника ЭДС.

Закон Ома для плотности тока (закон Ома в дифференциальной форме) выражается уравнением

$$j = \sigma E = \frac{1}{\rho E} \quad (2.14)$$

Величина σ называется удельной электропроводностью.

При прохождении электрического тока по проводнику он нагревается. Согласно закону Джоуля-Ленца количество теплоты δQ , выделяющееся в проводнике, пропорционально квадрату силы тока, электрическому сопротивлению проводника и времени прохождения тока

$$\delta Q = I^2 R t = I U t = \left(\frac{U^2}{R} \right) t \quad (2.15)$$

Количество теплоты, выделяющееся за единицу времени в единице объема, называется удельной тепловой мощностью тока w . Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме имеет вид:

$$w = jE = \sigma E^2. \quad (2.16)$$

Для расчета сложных разветвленных цепей применяют вытекающие из закона сохранения заряда и из закона Ома правила Киргхофа.

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

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 \quad (2.17)$$

Узлом называется точка разветвленной цепи, в которой сходится более двух проводников. Положительными считаются токи, входящие в узел, отрицательными - выходящие из узла (можно наоборот).

Второе правило Киргхофа: в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвлённой электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов I_i на сопротивление R_i соответствующих участков равна алгебраической сумме ЭДС в контуре

$$\sum I_i R_i = \sum \varepsilon_i \quad (2.18)$$

Описание установки и метода измерений

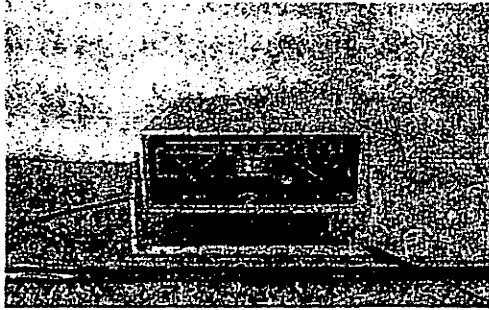


Рис.1.Общий вид установки

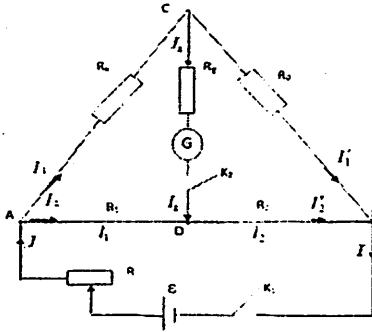


Рис.2. Принципиальная схема
мостика Уистона

К реохорду, представляющему собой калиброванную проволоку АВ, натянутую вдоль масштабной линейки между клеммами А и В и снабженную подвижным контактом, соединяют последовательно соединенные неизвестный и эталонные резисторы R_x и R_0 . Общую точку "С" соединяют через гальванометр G с

подвижным контактом D. Для предохранения гальванометра включают сопротивление $R_g = 10^3 - 10^4$ Ом. Источник питания (гальванический элемент) подсоединяют к реохорду через ключ K_1 и реостат R. Если при замкнутых ключах K_1 и K_2 тока через гальванометр нет из-за равенства потенциалов точек C и D, то мост называют сбалансированным или уравновешенным. В этом случае $I_g = 0$, $I_1' = I_1$, $I_2' = I_2$, а также из-за $\varphi_c = \varphi_d$:

$$\begin{aligned} I_1 R_x &= I_2 R_1, \\ I_1 R_0 &= I_2 R_2 \end{aligned} \quad (2.19)$$

Деля одно равенство на другое, получим соотношение между сопротивлениями плеч сбалансированного моста

$$R_x / R_0 = R_1 / R_2 \quad (2.20)$$

Резисторы (20) называют «плечами» моста, потому что балансировка аналогична взвешиванию на рычажных весах. Если контакт D стоит точно в середине реохорда ($R_1 = R_2$), то балансировка осуществляется с помощью магазина сопротивлений « R_0 », на котором набирается $R_0 = R_x$ подобно подбору гирь при взвешивании на рычажных весах. Так как реохорд изготовлен из однородной проволоки постоянного сечения (калиброванный), то пользуясь формулой

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2.21)$$

можно заменить отношение сопротивлений отношением длин плеч реохорда и записать с расчетную формулу для реохордного моста в виде

$$R_x = R_0 \frac{l_1}{l_2}, \quad \text{и} \quad R_x = R_0 \frac{l_1}{l-l_1}, \quad (2.22)$$

Относительная погрешность измерений будет

$$\delta = \frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_0}{R_0} + \frac{\Delta l_1}{l_1} + \frac{\Delta l + \Delta l_1}{l-l_1} \quad (2.23)$$

Величина $\frac{\Delta R_0}{R_0}$ определяется классом точности магазина сопротивлений и составляет обычно десятитысячные доли. Погрешность будет минимальная, если общий знаменатель выражения (2.23), то есть $R_0 l_1 (l - l_1)$ будет максимальным. Приравнявая к нулю производную от этого выражения,

$$\frac{d}{dl_1} [R_0 l_1 (l - l_1)] = R_0 l - 2R_0 l_1 = 0, \quad (2.24)$$

находим условие минимума $l_1 = l/2$. Таким образом, погрешность минимальная, когда ползунок D стоит на середине реохорда.

Существует много типов мостов постоянного тока, но принципиальная схема их не отличается от схемы мостика Уитстона, хотя технические мосты редко изготавливаются реохордными. Технический мост собран в одном ящике, в котором содержатся три плеча моста R_0 , R_1 , R_2 , гальванометр и источник питания. Четвертое плечо - неизвестное сопротивление R_x присоединяется к специальным клеммам прибора. Измерения

сводятся к балансировке моста, и искомая величина определяется по формуле (2.21) В сбалансированном мосте текут токи, удовлетворяющие законам Кирхгофа (2.25)

$$\begin{cases} I_1 R_1 + I_x R_g - I_2 R_1 = 0 \\ I_1' R_0 - I_2' R_2 - I_x R_g = 0 \\ I_2 R_1 + I_2' R_2 + I R = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} I_1 + I_2 - I = 0 \\ I_1' + I_x - I_1 = 0 \\ I_2' - I_x - I_2 = 0 \end{cases} \quad (2.25)$$

Измерения и обработка результатов измерений

1. Собирают схему мостика Уитсона с реохордом. Для достижения максимальной точности измерений важно следить за чистотой контактов соединительных проводов и надежностью контакта движка с реохордом. Не следует на применяемом в данной работе мосте измерять сопротивление менее одного Ома, так как при этом начинается сказываться сопротивление соединительных проводов.
2. При работе с мостиком следует сначала замыкать цепь источника тока, а затем цепь гальванометра (размыкать в обратном порядке). Это требование связано с тем, что при замыкании и размыкании цепи появляется ЭДС самоиндукции, которая вызывает экстратоки замыкания и размыкания, могут быть опасными для гальванометра. Нужно держать мост под током в течение возможно малого промежутка времени для уменьшения нагревания резисторов и соответствующего изменения их сопротивлений.
3. При подборе баланса моста последовательно с гальванометром надо вводить ограничивающее сопротивление порядка 10^3 - 10^4 Ом.

После пробных измерений следует стремиться устанавливать величину R_0 , примерно равную предполагаемой величине R_x . Измерения следует повторять не менее трех раз, каждый раз записывая отсчет длины l_i при балансе моста. В формулу (2.22) подставляют среднее значение. Если результаты измерений повторяются, то за абсолютную ошибку отсчета принимают половину цены деления шкалы ($\Delta l_i = 0,5$ мм при миллиметровой шкале).

4. Пользуясь собранной схемой мостика Уитстона, надо измерить два сопротивления, каждое в отдельности, а также при их последовательном и параллельном соединении. Результаты последних измерений надо сравнить с вычислениями по формулам последовательного и параллельного соединения сопротивлений и сделать соответствующее заключение.

5. Результаты измерений и вычислений записывают в таблицу 1.

$$R_{\text{посл}}^T = \sum_{i=1}^n R_i \quad \text{и} \quad R_{\text{парал}}^T = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \quad (2.26)$$

Таблица 1

R_x (Ом)	R_0 (Ом)	l_1	l_1/l_2	R_x (Ом)	$\delta\%$	По формуле	Расхождение
R_x'		1					
		2					
		3					
		Среднее					
R_x''		1					
		2					
		3					
		Среднее					
последовательно		1				$R_x' + R_x''$	$\frac{R_{изм} - R_{см}}{R_{изм}}$
		2					
		3					
		Среднее					
параллельно		1				$\frac{R_x' \cdot R_x''}{R_x' + R_x''}$	$\frac{R_{изм} - R_{см}}{R_{изм}}$
		2					
		3					
		Среднее					

Контрольные вопросы

1. Дайте определение основных характеристик цепи постоянного тока: силы тока, разности потенциалов, ЭДС, напряжения и сопротивления. Дайте определение единиц измерения этих величин в системе СИ.
2. Напишите формулы законов Джоуля-Ленца и Ома для однородного и неоднородного участка цепи, а также для всей цепи.

3. Что такое плотность тока? Напишите закон Ома и закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме. Что такое удельное сопротивление и проводимость проводника? Как зависит сопротивление металлов от температуры?
4. Сформулируйте законы Кирхгофа и объясните их применение для расчета разветвленных цепей.
5. Чему равна мощность, выделяющаяся в источнике при коротком замыкании, и какова в сравнении с ней максимальная полезная мощность?
6. Начертите принципиальную схему мостика Уитстона с реохордом и выведите расчетную формулу из условия баланса моста. Напишите формулу для оценки точности измерения сопротивлений.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ АМПЕРА ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Цель работы:

В результате выполнения лабораторной работы студент должен:

- знать закон Ампера;
- уметь применять закон Ампера и определять индукцию магнитного поля.

Задание:

1. Ознакомиться с устройством макета лабораторной установки.
2. Определить значение силы Ампера из опытных данных.
3. Вычислить величину модуля индукции магнитного поля.

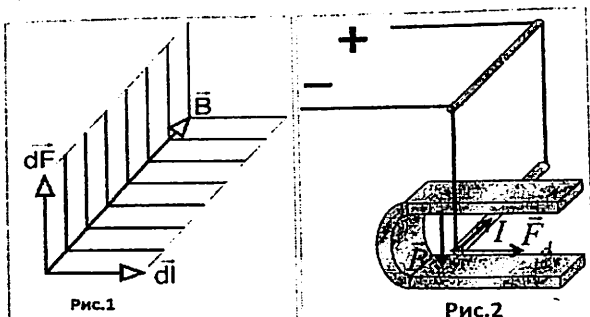
Основные теоретические сведения и соотношения

Магнитным полем называют поле, возникающее вокруг движущихся зарядов, проводников с током и вокруг постоянных магнитов. Обнаружить магнитное поле можно только по действию на движущиеся заряды, проводники с током и постоянные магниты.

На прямолинейный проводник с током в магнитном поле действует сила F_A , называемая силой Ампера.

Закон Ампера гласит: элементарная сила dF , действующая на малый элемент длины \vec{dl} проводника с током, находящегося в магнитном поле, прямо пропорциональна силе тока в проводнике и

векторному произведению элемента длины проводника \vec{dl} на индукцию магнитного поля \vec{B} ,



$$d\vec{F}_A = I[d\vec{l}, \vec{B}] \quad \text{или} \quad d\vec{F}_A = IBdl\sin(\vec{dl}, \vec{B}) \quad (3.1)$$

где \vec{dl} - вектор φ , совпадающий по направлению с током (рис. 1).

Сила Ампера F_A , действующая в магнитном поле на проводник с током конечной длины,

$$F_A = \int_0^d IBdl\sin\alpha \quad (3.2)$$

где интегрирование производится по всей длине проводника. В случае однородного ($\vec{B} = const$) магнитного поля и постоянного тока ($I = const$)

$$F_A = \int_0^d IBdl\sin\alpha \quad (3.3)$$

где α - угол между векторами \vec{dl} и \vec{B} .

Если $\vec{dl} \perp \vec{B}$, то направление силы $d\vec{F}_A$ находится по правилу левой руки: если расположить ладонь левой руки так, чтобы вектор магнитной индукции входил в ладонь, а четыре вытянутых пальца расположить по направлению электрического тока, то отставленный на 90° большой палец укажет направление силы, действующей на проводник с током, помещенный в магнитное поле.

В этом случае $\sin\alpha = 1$, и сила Ампера максимальна (рис. 2).

Закон Ампера позволяет дать определение силовой характеристики магнитного поля \vec{B} : индукцией магнитного поля называется физическая величина, численно равная максимальной силе Ампера, действующей на единичный элемент тока ($|\vec{dl}|$)

$$B = \frac{dF_{max}}{Idl} \quad (3.4)$$

Отсюда и определение единицы магнитной индукции – тесла (Тл). 1Тл – это магнитная индукция такого однородного магнитного поля, которое действует с силой в 1Н на каждый метр проводника, расположенного перпендикулярно направлению поля, если по этому проводнику течет ток в 1А:

$$1Тл = \frac{1Н \cdot 1м}{1А \cdot 1м^2} = \frac{1Н}{А \cdot м}$$

Теория метода и описание установки

Для проведения лабораторной работы используется метод наблюдения силы Ампера с помощью «качелей». «Качели» состоят из толстой медной проволоки, к которой с двух сторон припаяны два тонких проводника в эмаливой изоляции. «Качели» подвешивают на изолирующем стержне, закрепленном на штативе. Медный провод «качелей» помещают между полосами подковообразного магнита.

При пропускании медный провод под действием силы Ампера отклоняется на расстояние (рис. 3). В положении равновесия силы, действующие на проводник, скомпенсированы:

$$m\vec{g} + \vec{F}_A + \vec{F} = 0 \quad (3.5)$$

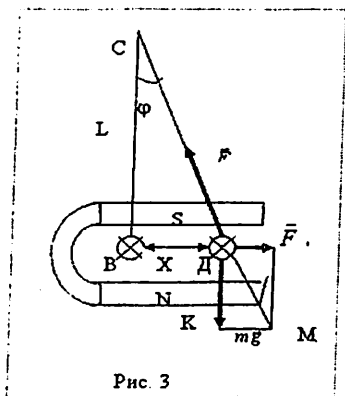
где $m\vec{g}$ – сила тяжести, действующая на медный провод, \vec{F}_A – сила Ампера, \vec{F} – сила натяжения подвеса.

Из рис. 3 видно, что для малых углов α из подобия треугольников КДМ и ВСД имеем

$$\frac{\vec{F}_A}{x} = \frac{m\vec{g}}{L}, \quad \text{отсюда} \quad \vec{F}_A = \frac{m\vec{g}x}{L}.$$

Измерив силу Ампера \vec{F}_A , можно вычислить величину индукции магнитного поля по формуле $\vec{B} = \frac{\vec{F}_A}{Il}$

Измерения и обработка результатов



1. Измеряют длину подвеса L и l - длину части медного провода, находящегося в магнитном поле (ее считают равной ширине магнита).

2. Включает источник постоянного тока, предварительно установив рукоятку регулятора на нуль.

Устанавливают силу тока и

определяют по линейке, насколько отклонился от первоначального положения медный провод «качелей» в магнитном поле.

3. Вычисляют силу Ампера по формуле

$$\vec{F}_A = \frac{m\vec{g}x}{L} \quad (3.5)$$

m - масса проводника (указана на установке).

Вычисляют индукцию магнитного поля по формуле

$$\vec{B} = \frac{\vec{F}_A}{Il} \quad (3.5)$$

где I – сила тока в цепи, определяется по амперметру.

- Повторяют опыт при 2-х других значениях силы тока (сила тока не должна превышать 2А).
- Опыт можно повторить, используя два сложенных вместе и одинаково расположенных магнита, если увеличить вдвое длину подводника, находящегося в магнитном поле.
- Результаты опыта записывают в таблицу.

Таблица 1

№	Длина оплеса L (м)	Длина проводника l (м)	Масса проводника m (кг)	Смещение x (м)	Сила тока I (А)	Сила Ампера F_A (Н)	Индукция магнитного поля B (Тл)	$\langle B \rangle$	ΔB	$\langle \Delta B \rangle$	$\delta\%$
1											
2											
3											
4											
5											

Контрольные вопросы:

- Что может являться источником магнитного поля? Чем создается магнитное поле в данной работе?
- Сформулируйте закон Ампера в векторной и скалярной форме. Как можно определить направление силы Ампера?
- Дайте определение индукции магнитного поля и единицы измерения индукции магнитного поля в СИ.

4. Напишите формулу Ампера для взаимодействия параллельных токов и дайте определение единицы силы тока (ампера).
5. Поясните порядок проведения измерений и расчетов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Цель работы:

В результате выполнения лабораторной работы студент должен:

- знать определение характеристик магнитного поля \vec{B} и \vec{H} и их связь; иметь представление о земном магнетизме;
- уметь применять закон Био-Савара-Лапласа для расчета индукции магнитных полей токов различных конфигураций.

Задание:

1. Измерить горизонтальную составляющую напряженности магнитного поля Земли с помощью тангенс-буссоли.
2. Определить погрешность измерений.

Основные теоретические сведения и соотношения

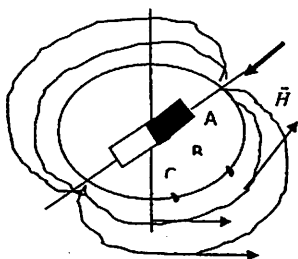


Рис.1

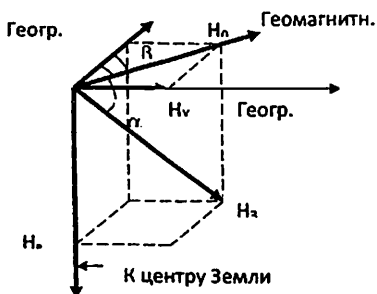
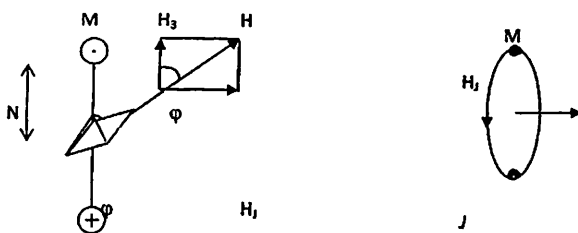


Рис.2

Земля представляет собой огромный магнит, полюса которого лежат вблизи географических полюсов: вблизи северного географического полюса расположен южный магнитный полюс S, а вблизи южного географического полюса – северный магнитный полюс N.

Магнитное поле Земли в первом приближении совпадает с магнитным полем диполя «AB» (рис.1), помещенного в центре Земли, под углом $11,5^\circ$ к оси вращения Земли. Эквивалентный геомагнитному магнитный поток можно получить, охватив Землю по экватору проводником и пропустив по нему ток в 660 миллионов ампер. По последним гипотезам, магнитное поле Земли связано с токами, циркулирующими по поверхности жидкого электропроводящего ядра Земли, а отчасти с намагниченностью горных пород и токами в радиационных поясах.

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 C).

Величину проекции напряженности земного магнитного поля на горизонтальную плоскость называют горизонтальной

составляющей магнитного поля Земли H_z . 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 магнитного наклона, а угол β между географическим и магнитным меридианами – углом магнитного склонения (рис.2). Магнитная стрелка, которая может вращаться лишь около вертикальной оси, будет отклоняться в горизонтальной плоскости только под действием горизонтальной составляющей магнитного поля Земли H_0 . Это свойство магнитной стрелки используется в тангенс - гальванометре для определения горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли H_0 .

Описание установки и метода исследования

Тангенс – гальванометр (тангенс-буссоль) представляет собой плоскую вертикальную катушку радиуса r с числом витков n . В центре катушки в горизонтальной плоскости расположен компас. Магнитная стрелка при отсутствии тока в катушке будет расположена по магнитному меридиану Земли N-S (рис.3).

Поворотом катушки около вертикальной оси можно добиться совмещения плоскости катушки с плоскостью магнитного меридиана (M и K – сечения витков катушки).

Если после такой установки катушки по ней пропустить ток, то магнитная стрелка повернется на некоторый угол ϕ . Объясняется

это тем, что на магнитную стрелку будет действовать два поля: магнитное поле Земли (горизонтальная составляющая) H_0 и поле, созданное током H_1 . По принципу суперпозиции полей, напряженность результирующего магнитного поля H , действующего на магнитную стрелку, равна геометрической сумме векторов \vec{H}_0 и \vec{H}_1

$$\vec{H} = \vec{H}_0 + \vec{H}_1 .$$

Величина напряженности магнитного поля в центре кругового проводника, состоящего из n витков, намотанных на один каркас, вычисляется по формуле

$$H_1 = \frac{In}{2r} \quad (4.1)$$

где I – ток в каждом витке, r – радиус витка, n – число витков.

Формулу (4.1) легко можно получить из закона Био-Савара-Лапласа для напряженности магнитного поля элемента тока ($I\vec{dl}$)

$$d\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \frac{I[dl, \vec{r}]}{r^3} \quad \text{или} \quad dH = \frac{1}{4\pi} \frac{I[dl, \vec{r}]}{r^2}$$

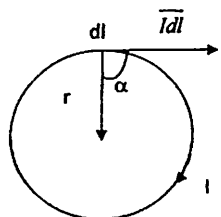


Рис. 5.

Для элемента dl кругового тока

$$\alpha = \frac{\pi}{2}, \sin\alpha = 1 \quad (\text{рис.5})$$

По принципу суперпозиции

$$H = \int dH = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{r^2} \int_0^{2\pi r} dl = \frac{I}{2r}$$

Для n числа витков

$$H_1 = \frac{In}{2r}$$

Вектор напряженности \vec{H}_j поля кругового тока лежит в плоскости, перпендикулярной плоскости витка (рис.4). Так как плоскость кругового витка с током расположена вертикально и совпадает с плоскостью магнитного меридиана, то, следовательно, вектор \vec{H}_j перпендикулярен вектору \vec{H}_0 .

Из рис.3 видно, что $\operatorname{tg} \varphi = \frac{H_j}{H_3}$ и, следовательно

$$\vec{H}_3 = \frac{\vec{H}_j}{\operatorname{tg} \varphi}. \quad (4.2)$$

Таким образом, из (4.1) и (4.2) следует расчетная формула горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли:

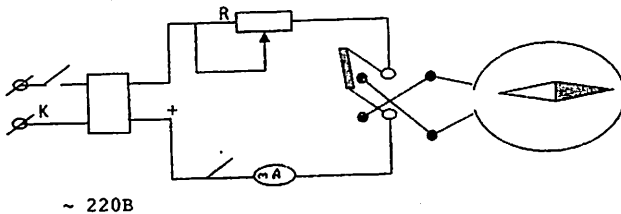


Рис 6.

$$H_0 = \frac{In}{2r \operatorname{ctg} \varphi} = \frac{In}{2r} \operatorname{ctg} \varphi \quad \left(\frac{\text{А}}{\text{м}} \right). \quad (4.3)$$

Горизонтальную составляющую вектора напряженности \vec{H}_0 определяют 3-5 раз при различных токах в катушке тангенс-буссоли, находят среднее значение $H_{3y} = \frac{\sum H_{3y}}{n}$ и среднее отклонение от него

$$\Delta H = \frac{\sum H_{3y}}{n}, \text{ где } \Delta H_{3i} = |H_{3y} - H_{3i}|. \quad (4.4)$$

Из-за возможного неточного совмещения острия стрелки с центром витка рекомендуется отсчеты делать и по северному (φ_N) и по южному (φ_S) концам стрелки. Чтобы уменьшить ошибку из-за не совсем точного совмещения плоскости витков с плоскостью магнитного меридиана, угол отклонения надо измерять дважды для каждого значения тока (φ^I и φ^{II}), изменяя переключателем «П» направление тока на противоположное. Электрическая схема установки и система отсчета углов φ даны на рис.6.

$$\varphi_1 = \frac{\varphi_{iN}^I + \varphi_{iS}^I + \varphi_{iN}^{II} + \varphi_{iS}^{II}}{4} \quad (4.5)$$

Измерения и обработка результатов измерений

1. Устанавливают тангенс-гальванометр так, чтобы плоскость витка совпала с плоскостью магнитного меридиана, в которой расположена магнитная стрелка.
2. Включают источник тока, замыкая ключ K (K') и переключатель Π . Переменным резистором R устанавливают такой ток, чтобы магнитная стрелка отклонялась на 30° - 50° . Записывают показания амперметра I_i и значения углов (φ_{iN}^I и φ_{iS}^I) отклонения стрелки при данном токе в таблицу
3. Переключателем Π изменяют направление тока на противоположное и записывают значения J_i^{II} и φ_{iN}^{II} , φ_{iS}^{II} .
4. Опыт повторяют 3 раза при различных значениях тока.
5. Вычисляют H_{0cp} , ΔH_{0cp} и представляют конечный результат измерений в виде

$$H_3 = H_{3cp} \pm \Delta H_{3cp} \quad \left(\frac{A}{M}\right)$$

$$\delta = \frac{\Delta H_{3cp}}{H_{3cp}} \cdot 100\%$$

Таблица 1.

№	J_i^I (A)	J_i^{II} (A)	J_i (A)	φ_{iN}^I	φ_{iS}^I	φ_{iN}^{II}	φ_{iS}^{II}	φ_i	H_{3i} $\left(\frac{A}{M}\right)$	$\langle \Delta H_{3i} \rangle$ $\left(\frac{A}{M}\right)$	ΔH_i $\left(\frac{A}{M}\right)$	δ
1.												
2.												
3.												

Контрольные вопросы;

1. Что называется индукцией магнитного поля и в каких единицах она измеряется?
2. Как определяется направление вектора \vec{B} ?
3. Как связаны напряженность магнитного поля и индукция?
4. Как графически представляют магнитные поля? В чем отличие в изображении электростатического и магнитного полей?
5. В чем заключается и где применяется принцип суперпозиции магнитных полей?
6. Запишите формулу закона Био-Савара-Лапласа (в векторной и скалярной форме) и дайте графическую интерпретацию этого закона.
7. Примените закон Био-Савара-Лапласа для расчета поля кругового тока.
8. Начертите схему, объясните метод (с выводом формулы) и порядок выполнения работы по определению горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- Знакомство с моделированием явления электромагнитной индукции (ЭМИ).
- Экспериментальное подтверждение закономерностей ЭМИ.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

Магнитный поток Φ через плоский контур площадью S в случае однородного магнитного поля выражается формулой

$$\Phi = BS\cos\alpha \text{ или } \Phi = B_n S, \quad (5.1)$$

где α - угол между векторами нормали \vec{n} к плоскости контура и вектором индукции \vec{B} , B_n - проекция вектора \vec{B} на нормаль \vec{n} ($B_n = B\cos\alpha$).

В случае неоднородного поля поток Φ вектора индукции выражается интегралом

$$\Phi = \int_S B_n dS, \quad (5.2)$$

где интегрирование ведется по всей площади S .

Электромагнитной индукцией называется явление возникновения электрического поля при изменении магнитного поля.

Закон ЭМИ: циркуляция электрического поля по замкнутому контуру пропорциональна скорости изменения магнитного

потока Φ через замкнутую поверхность S , ограниченную контуром l

$$\oint_l \vec{E} d\vec{l} = \frac{\partial}{\partial t} \oint_S \vec{B} d\vec{S}, \quad (5.3)$$

где знак «-» соответствует правилу Ленца.

В результате электромагнитной индукции возникают электрическое поле с ненулевой циркуляцией. Такое поле называется вихревым.

Если в таком поле находится проводник, то в нем возникает вихревой электрический ток, величина которого пропорциональна напряженности вихревого электрического поля. Такие токи называются токами Фуко.

Если проводник имеет форму замкнутого контура, тогда циркуляция электрического поля в нем определяет ЭДС, которая в случае ЭМИ называется ЭДС индукции. В этом случае электродвижущая сила ε_i , возникающая в замкнутом контуре, пропорциональна скорости $\frac{d\Phi}{dt}$ изменения магнитного потока со временем:

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt}, \quad (5.4)$$

где N – число витков контура.

Ток, который в этом случае появляется в контуре, называется индукционным. Используя закон Ома для полной цепи, получим выражение для тока индукции I_i

$$I_i = \frac{\varepsilon_l}{R}, \quad (5.5)$$

где R – сопротивление контура.

Разность потенциалов U на концах проводника длиной l , движущегося в однородном магнитном поле со скоростью v , выражается формулой

$$U = Blvsina, \quad (5.6)$$

где α – угол между направлением вектора скорости \vec{v} и вектора магнитной индукции \vec{B} .

Если имеется замкнутый контур с переменным током, тогда магнитное поле с изменяющимся потоком создается собственным током в этом контуре, и в соответствии с законом ЭМИ в контуре возникает дополнительная ЭДС, называемая ЭДС самоиндукции.

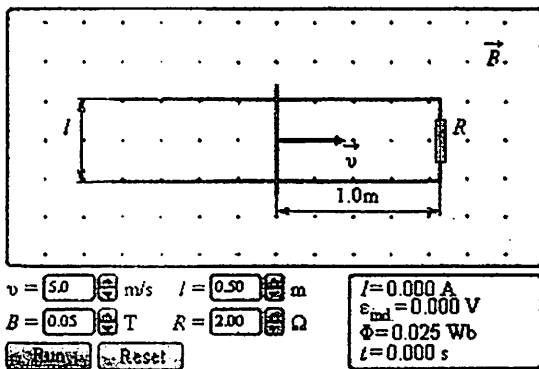
Явление самоиндукции вызывает возникновение ЭДС самоиндукции при протекании по проводнику переменного тока. ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна скорости изменения сила тока $\frac{di}{dt}$

$$\varepsilon_S = -L \frac{di}{dt}, \quad (5.7)$$

где L – индуктивность проводника.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

В данной лабораторной работе используется компьютерная модель, в которой изменяющийся магнитный поток возникает в результате движения проводящей перемычки по параллельным проводникам, замкнутым с одной стороны. Эта система изображена на рисунке:



Задача: Проводящая перемычка движется со скоростью v по параллельным проводам, замкнутым с одной стороны. Система проводников расположена в однородном магнитном поле, индукция которого равна B и направлена перпендикулярно плоскости, в которой расположены проводники. Найти ток в перемычке, если ее сопротивление R , а сопротивлением проводников можно пренебречь.

Решив задачу в черновике, получите уравнение для тока в общем виде.

Подготовьте таблицу 1, используя образец. Подготовьте также таблицы 3 и 4, аналогичные табл.1.

Результаты измерений $B = \underline{\hspace{2cm}}$ мТл

1-таблица

ν (м /с)	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10
ЭДС, В											
I, мА											

Таблица 2. Значения характеристик (не перерисовывать)

2-таблица

Бригады	R, Ом	B_1 , мТл	B_2 , мТл	B_3 , мТл
1 и 5	1	-30	40	90
2 и 6	2	-40	20	80
3 и 7	1	-50	10	70
4 и 8	2	-60	-20	100

Для бригад 1-4 $L = 1$ м, для бригад 5-8 $L = 0.7$ м.

ПОЛУЧИТЕ У ПРЕПОДАВАТЕЛЯ ДОПУСК ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ.

1. Запустите эксперимент, щелкнув мышью по кнопке «Run». Наблюдайте движение перемычки и изменение магнитного потока Φ (цифры внизу окна).

2. Зацепив мышью, перемещайте движки регуляторов

- l – расстояния между проводами,
- R – сопротивления перемычки,
- B_l – величины индукции магнитного поля

и зафиксируйте значения, указанные в таблице 2 и под ней для вашей

бригады.

2. Установив указанное в табл.1 значение скорости движения перемычки, нажмите левую кнопку мыши, когда ее курсор размещен над кнопкой «Start». Значения ЭДС и тока индукции занесите в табл.1. Повторите измерения для других значений скорости из табл.1.

3. Повторите измерения для двух других значений индукции магнитного поля, выбирая их из табл.2.Полученные результаты запишите в табл. 3 и 4.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

1.Постройте на одном листе графики зависимости тока индукции от скорости движения перемычки при трех значениях индукции магнитного

поля.

2. Для каждой прямой определите тангенс угла наклона по формуле

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{\Delta i}{\Delta v}$$

3. Вычислите теоретическое значение тангенса для каждой прямой по формуле $\operatorname{tg}(\varphi)_{\text{ТЕОР}} = \frac{Bl}{R}$.

4. Заполните таблицу результатов измерений

Номер измерения	$\operatorname{tg}(\varphi)_{\text{эксп}}$ (Ас/м)	$\operatorname{tg}(\varphi)_{\text{теор}}$ (Ас/м)

5. Сделайте выводы по графикам и результатам измерений.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что называется элементарным магнитным потоком?
2. Что называется магнитным потоком?
3. При каких условиях магнитный поток равен нулю?
4. При каких условиях магнитный поток равен произведению индукции магнитного поля на площадь контура?

5. Сформулируйте определение явления электромагнитной индукции.
6. Сформулируйте закон электромагнитной индукции.
7. Дайте определение циркуляции магнитного поля.
8. Запишите закон ЭМИ в расшифрованном виде.
9. Какое поле является вихревым?
10. Что такое ток Фуко?
11. Чем отличается электрическое поле, созданное точечным зарядом, от электрического поля, появляющегося при ЭМИ?
12. Сформулируйте закон ЭМИ для замкнутого проводящего контура.
13. При каких условиях возникает ЭДС самоиндукции?
14. Сформулируйте определение явления самоиндукции.
15. Сформулируйте словами закон самоиндукции.
16. Назовите все способы создания переменного магнитного потока.
17. Как изменяется со временем магнитный поток в данной работе?
18. Как выглядит поверхность, через которую формируется переменный магнитный поток в данной работе?
19. Какова зависимость магнитного потока от времени в данной работе?

ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Савельев, Курс физики. М. КноРус, 2009, т.2
2. К. П. Абдурахмонов, О. Э. Тигай, В. С. Хамидов. Курс мультимедийных лекций по физике, 2012, с.650
3. Тихомиров Ю.В. Лабораторные работы. По курсу физики с компьютерными моделями. Москва, 2002
4. Монахов В. В., Кожедуб А. В. Кафедра вычислительной математики СПбГУ, 2002.
5. Абдурахманов К. П., Тигай О. Э., Хамидов В. С. Курс мультимедийных лекций по физике, 2012, с.650.
6. Иродов И.Е. Физика макросистем. –М. Лаборатория базовых знаний, 2001. §§ 2.1, 2.2.
7. П.А. Типлер, Р.А. Ллуэллин Современная физика (Лучший зарубежный учебник в двух томах). (1том). М.: Мир, 2007.
8. П.А.Типлер, Р.А.Ллуэллин Современная физика (Лучший зарубежный учебник в двух томах). (2том). М.: Мир, 2007.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Задачи студентов при выполнении лабораторных работ.....	7
Виды погрешностей измерений физических величин.....	9
Погрешность непосредственных измерений, среднее значение физических величин, абсолютная и относительная погрешность измерений.....	12
Лабораторная работа №1. ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ.....	14
Лабораторная работа №2. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МОСТИКА УИТСТОНА.....	26
Лабораторная работа №3. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ АМПЕРА ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ.....	39
Лабораторная работа №4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ.....	46
Лабораторная работа № 5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ	54
Литература.....	62

3200

Методическое пособие к лабораторным занятиям по физике. «Электростатика и магнетизм». Часть I

Предназначена для студентов совместного факультета БГУИР и Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий

Рассмотрено и рекомендовано к публикации на заседании кафедры «Физика», (протокол №37 от 10.05.2022 года).

Рассмотрено и рекомендовано к публикации на заседании факультета ТТ (протокол № 8 от 12.05.2022 года).

Рассмотрено и рекомендовано к публикации на заседании Совета ТАТУ, (протокол № 10(159) от 31.05.2022 года).

Составители:

к.т.н. (PhD) доц. Очилова О.О.,
асс. Ш.И.Абдуллаева
асс. И.И. Абсалямова
асс. А.К. Аширбаева.

Рецензенты:

Ф.м.ф.д. Имамов Э.З.,
К.ф.д.Х.Н. Бахронов,

Ответственный редактор:

к.т.н. (PhD) доц. Очилова О.О.

Формат 60x84 1/16. Печ.лист 4.
Заказ № 35. Тираж 20.
Отпечатано в «Редакционно издательском»
отделе при ТУИТ.
Ташкент ул. Амир Темур, 108.