

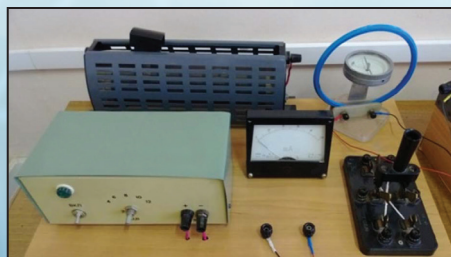
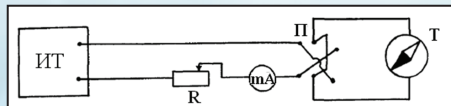
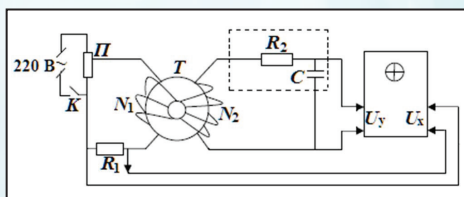
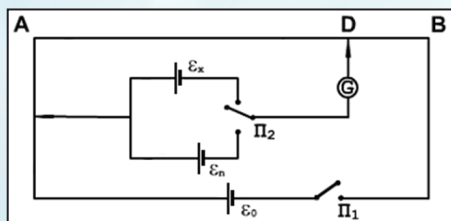


тольяттинский
государственный
университет

С.Н. Потемкина, В.А. Сарафанова,
И.С. Ясников

ОБЩАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Лабораторный практикум



Тольятти
Издательство ТГУ
2025

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет

С.Н. Потемкина, В.А. Сарафанова, И.С. Ясников

**ОБЩАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА.
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**

Лабораторный практикум

Тольятти
Издательство ТГУ
2025

УДК 537(075.8)

ББК 22.33я73

П641

Рецензенты:

канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры «Цифровое управление процессами в АПК» Саратовского государственного университета генетики, биотехнологии и инженерии

им. Н.И. Вавилова *А.В. Розанов*;

д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Общая и теоретическая физика» Тольяттинского государственного университета

А.П. Воленко.

П641 Потемкина, С.Н. Общая и экспериментальная физика. Электричество и магнетизм : лабораторный практикум / С.Н. Потемкина, В.А. Сарафанова, И.С. Ясников. — Тольятти : Издательство ТГУ, 2025. — 107 с. — ISBN 978-5-8259-1727-6.

В практикуме представлены методические указания к 10 лабораторным работам по разделу «Общая и экспериментальная физика. Электричество и магнетизм». Даются рекомендации по самостоятельной подготовке к лабораторным работам и их выполнению. Предлагаются вопросы для самоконтроля.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 44.03.05 «Педагогическое образование», направленность «Математика и физика», очной формы обучения.

УДК 537(075.8)

ББК 22.33я73

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

© Потемкина С.Н., Сарафанова В.А.,
Ясников И.С., 2025

ISBN 978-5-8259-1727-6

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет», 2025

Предисловие

Основной задачей высшего образования является формирование у студентов научного мировоззрения. Эту задачу решают все дисциплины, изучаемые в высшей школе. Однако ведущая роль принадлежит фундаментальным дисциплинам, к числу которых относится физика.

Лабораторный практикум по физике, предназначенный для студентов, обучающихся в Тольяттинском государственном университете по направлению подготовки 44.03.05 «Педагогическое образование», направленность «Математика и физика», поможет глубже осознать и усвоить основные физические закономерности, приобрести навыки самостоятельной экспериментальной работы, ознакомиться с измерительной аппаратурой, методами физических измерений и использовать полученные знания и умения в будущей профессиональной деятельности.

В соответствии с программой курса физики для педагогических специальностей высших учебных заведений России данный лабораторный практикум содержит раздел «Электричество и магнетизм».

Предлагаемый практикум составлен на основе лабораторного практикума по физике в трех частях, часть 2 «Электричество и магнетизм» авторов В.А. Сарафанова, С.Н. Потемкина, И.С. Ясников, изданного в ТГУ в 2016 году. Практикум является отражением многолетней работы учебной физической лаборатории при Тольяттинском государственном университете и составлен на базе лабораторных установок, имеющихся на кафедре «Общая и теоретическая физика». Авторы выражают благодарность всему коллективу кафедры «Общая и теоретическая физика» за создание физической лаборатории и постановку отдельных лабораторных работ.

Вводное занятие в лаборатории электрических и магнитных измерений

Цель работы: ознакомиться с правилами поведения в лаборатории электрических и магнитных измерений, правилами по технике безопасности, пожарной безопасности.

Общие сведения

1. Правила техники безопасности в лаборатории электрических и магнитных измерений

В учебной физической лаборатории электрических и магнитных измерений студенты при выполнении лабораторных работ имеют дело с различными электроустановками, источниками и электроизмерительными приборами, через которые в процессе работы протекает электрический ток различной силы.

Электрический ток, проходя через организм человека, может оказать следующие отрицательные воздействия:

- 1) термическое — ожоги, нагрев кровеносных сосудов и тканей организма;
- 2) электролитическое — разложение крови и других жидкостей организма;
- 3) биологическое — нарушение биологических процессов, приводящих к судорогам, фибрилляции и остановке сердца.

Степень поражения человека током зависит от величины силы тока и длительности его действия. Человек начинает ощущать ток силой 0,6–1,5 мА при частоте 50 Гц. Кратковременный ток 10–15 мА вызывает сильные и болезненные судороги мышц рук (невозможно разжать руку). Ток 25–50 мА распространяется на мышцы грудной клетки, что нередко приводит к затруднению дыхания и даже его остановке. Ток 100 мА оказывает непосредственное влияние на сердечную мышцу, что может вызвать фибрилляцию сердца и его остановку.

Сила тока I при неизменном напряжении U зависит от сопротивления R тела человека по закону Ома: $I = \frac{U}{R}$. Сопротивление не является величиной постоянной, а зависит от множества усло-

вий: от толщины и влажности кожи в месте контакта, площади контакта, температуры и влажности воздуха, от внутреннего состояния (например, нервного возбуждения человека и др.).

Поэтому хотя известны случаи, когда человек оставался в живых, попав под напряжение в несколько киловольт, нередко смертельным оказывалось напряжение 40–60 В.

Учитывая, что сопротивление тела человека колеблется в пределах от 1 до 10 кОм, значения напряжения выше 36 В следует считать опасными. При работе с такими напряжениями необходимо обязательное выполнение правил техники безопасности.

Прежде чем приступить к выполнению лабораторных работ по электричеству, следует ознакомиться с описанием работы, а во время ее выполнения быть внимательным и строго соблюдать правила техники безопасности.

Монтаж экспериментальной установки студент производит самостоятельно по принципиальной схеме. При этом необходимо помнить следующее.

1. Собирать и разбирать электрические схемы необходимо при отключенном источнике питания цепи.

2. Схема монтируется при помощи соединительных проводов. Контакты должны быть электрически плотными и механически прочными. Не допускается переплетение даже изолированных проводов.

3. Сборку схемы следует начинать от одной из клемм источника тока, подключая приборы в том порядке, в каком через них пойдет ток. Таким образом следует собрать весь замкнутый контур, дойдя до второй клеммы источника.

4. Вольтметры, как приборы, почти не потребляющие тока, следует подключать в последнюю очередь, когда все токовые контуры уже собраны.

5. Металлические корпуса электрических приборов, питающиеся от сети, должны быть заземлены.

6. Во избежание случайного поражения током при работе с электрической схемой или прибором не следует прикасаться к шинам заземления, водопроводным и газовым трубам, батареям отопления

и любой заземленной аппаратуре. В частности, нельзя открывать водопроводный кран, если другая рука прикасается к включенному электрическому прибору.

7. Если ток постоянный, а ноль шкалы измерительного прибора находится слева, то подключение прибора в цепь производится с соблюдением полярности.

8. Все реостаты, включаемые в цепь, должны быть установлены на максимум сопротивления.

9. Все ключи и коммутаторы при сборке цепи должны быть разомкнуты. Замыкать схему на источник питания без проверки схемы преподавателем или лаборантом строго **запрещается**.

10. Цепь подключается к источнику питания только на время измерений.

11. **Запрещается** производить переключения в схеме, находящейся под напряжением.

12. В электрической цепи, содержащей индуктивности, могут возникать мощные экстратоки в моменты её замыкания и размыкания. Поэтому даже низковольтные цепи с индуктивностями могут быть опасны.

13. Конденсаторы после выключения схемы несут на себе заряд, и их необходимо разряжать специальным разрядником перед тем, как к ним прикасаться.

14. **Запрещается** оставлять без наблюдения работающие электрические цепи.

15. Если замечено зашкаливание приборов, искрение, дым или другие опасные и непонятные явления, необходимо немедленно отключить источник питания и обратиться к дежурному инженеру в лаборатории.

16. После окончания работы необходимо отключить источник тока. Привести в порядок рабочее место.

17. При нарушении правил техники безопасности студент отстраняется от работы в лаборатории и допускается к ней только после дополнительного изучения и отчета по правилам техники безопасности в данной лаборатории.

2. Лабораторный практикум и порядок его выполнения

Лабораторный физический практикум представляет собой совокупность лабораторных работ, которые студент выполняет на лабораторных занятиях.

Каждое лабораторное занятие должно включать следующие этапы.

1. Получение допуска к лабораторной работе.
2. Проведение эксперимента.
3. Обработка результатов эксперимента.
4. Сдача зачета по теории.
5. Сдача оформленного отчета о лабораторной работе.

К лабораторному занятию студент готовится самостоятельно. Ему необходимо составить бланк отчета по лабораторной работе и подготовить устно или написать в рабочей тетради ответы на вопросы для самоконтроля.

В начале лабораторного занятия студент должен получить допуск к лабораторной работе. Для этого студенту необходимо знать цель работы, описание установки, измеряемые величины и представить преподавателю заготовленный бланк отчёта. Преподаватель после опроса студента на титульном листе бланка отчёта ставит подпись в графе «К работе допущен».

После получения допуска студент выполняет необходимые измерения. Преподаватель или инженер, в присутствии которого проводились измерения, проверяет их и, если измерения верны, ставит рядом с измерениями свою подпись и дату.

Далее студент обрабатывает результаты эксперимента: делает необходимые расчеты, строит графики, пишет вывод по лабораторной работе. После проверки полностью оформленного бланка отчета о лабораторной работе преподаватель на титульном листе бланка отчёта ставит подпись в графе «Работа выполнена».

Затем преподаватель проводит теоретический опрос студента и при положительных ответах ставит подпись в графе «Теория зачтена».

При наличии на титульном листе отчета трех подписей преподаватель ставит в своем журнале и на образовательном портале рейтинговый балл за выполненную лабораторную работу.

Если студент выполняет лабораторную работу с использованием персонального компьютера (ПК), то в начале занятия он должен пройти тест допуска-защиты. При 60 % правильных ответов на вопросы теста он допускается к выполнению эксперимента. После проведенных на ПК расчетов преподаватель проверяет работу. Если в бланке отсутствуют красные поля, то преподаватель засчитывает данную лабораторную работу.

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) приборы и принадлежности;
- 4) схему установки;
- 5) расчетные формулы;
- 6) результаты измерений;
- 7) расчеты, графики;
- 8) вывод.

3. Обработка результатов измерений физических величин

Физика исследует различные закономерные связи в природе. Закономерные связи между наблюдаемыми явлениями формулируются в виде физических законов, которые, как правило, записываются в виде равенств, связывающих различные физические величины.

Физическая величина — характеристика одного из свойств физического объекта, общая в качественном отношении многим физическим объектам, но в количественном отношении индивидуальная для каждого объекта.

Нахождение значений физических величин опытным путем с помощью специальных технических средств называется **измерением**.

Результат измерения физической величины состоит из двух частей: численного значения и единиц измерения. Например, 5,2 А; 10 В.

По способу получения числового значения физической величины различают прямые и косвенные измерения. При **прямом измерении** значение физической величины отсчитывают по показаниям средства измерения (измерение промежутка времени — секундоме-

ром, температуры — термометром, длины — масштабной линейкой и т. д.). Однако прямые измерения не всегда возможны. При **косвенном измерении** значение физической величины находят по известной зависимости между ней и непосредственно измеренными величинами (например, нахождение плотности тела по его массе и объему).

Любая физическая величина обладает **истинным значением**, то есть значением, идеально отражающим в качественном и количественном отношениях соответствующие свойства объекта.

Как правило, при любых измерениях получают не истинное значение измеряемой величины, а лишь ее приближенное значение. Это происходит в силу ряда объективных (несовершенство измерительной аппаратуры, неполнота знаний о наблюдаемом явлении) и субъективных причин (несовершенство органов чувств экспериментатора). Точные измерения можно произвести только в том случае, если исследуемая величина имеет дискретный характер: число атомов в молекуле; число электронов в атоме.

Отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины называется погрешностью измерения. По форме выражения различают абсолютные и относительные погрешности.

Абсолютная погрешность измерения — разность между результатом наблюдения и истинным значением измеряемой величины: $\Delta a = a - a_{\text{ист}}$. Она выражается в единицах физической величины.

Относительная погрешность измерения — это сопоставление величины погрешности с истинным значением измеряемой величины: $\varepsilon = \frac{\Delta a}{a_{\text{ист}}} \cdot 100\%$.

Значение физической величины, найденное экспериментально и настолько близкое к истинному значению, что для данной цели может быть использовано вместо него, называется **действительным значением** физической величины.

В качестве действительного значения используется **среднее арифметическое** $\langle a \rangle$, вычисленное из серии результатов наблюдения, полученных с одинаковой точностью: $\langle a \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i$. Поэтому в качестве абсолютной погрешности наблюдения используют величину $\Delta a = a - \langle a \rangle$, а в качестве относительной погрешности $\varepsilon = \frac{\Delta a}{\langle a \rangle} \cdot 100\%$.

Оценить погрешность измеряемой величины — это значит указать интервал $(\langle a \rangle - \Delta a; \langle a \rangle + \Delta a)$, внутри которого с заданной вероятностью P заключено истинное значение измеряемой величины. Такой интервал называется доверительным. При многократных измерениях доверительную вероятность принимают равной $P = 0,95$.

Обработка результатов прямых измерений физической величины

1. Погрешность прибора

Абсолютная погрешность физической величины определяется по прибору в случае однократного измерения или если в результате наблюдений получается ряд совершенно одинаковых значений измеряемой величины:

- 1) погрешность λ , которую вносит прибор, равна половине цены деления его шкалы: $\lambda = \frac{1}{2}$ ц.д. или целому делению $\lambda = \text{ц.д.}$, если положение указателя прибора трудно различимо в пределах одного деления;
- 2) при использовании приборов, содержащих дополнительную уточняющую шкалу нониуса, абсолютная погрешность берется равной цене деления шкалы нониуса: $\lambda = \text{ц.д.}$;
- 3) при использовании электроизмерительных приборов погрешность прибора рассчитывается по его классу точности: $\lambda = \frac{\gamma \cdot A}{100}$, где γ — класс точности прибора, A — предел измерения. Предел измерения A означает: для приборов с односторонней шкалой — верхний предел измерения; для приборов с двухсторонней шкалой — сумма пределов измерений по левой и правой частям шкалы.

2. Для многократных измерений абсолютная погрешность определяется по методу Стьюдента.

Вначале необходимо исключить *грубые погрешности*. Для этого надо:

- 1) произвести ранжирование результатов наблюдений (расположить их в возрастающем порядке): $a_1, a_2, a_3, \dots, a_N$;
- 2) найти размах (разность между наибольшим и наименьшим значениями): $R = a_N - a_1$;
- 3) рассчитать отношения: $Q_1 = \frac{a_2 - a_1}{R}$; $Q_N = \frac{a_N - a_{N-1}}{R}$;

- 4) определить для данного числа измерений табличное значение Q_m (табл. 1);
- 5) если полученное значение больше табличного $Q_i > Q_m$, то результат измерения, в котором содержится грубая погрешность, исключить из дальнейшей обработки.

Таблица 1

Коэффициенты для обработки результатов прямых измерений

Число наблюдений N	Доверительная вероятность $P = 0,95$	
	Q_m	коэффициент Стьюдента $t_{ст}$
3	0,941	4,30
4	0,765	3,18
5	0,642	2,78
6	0,560	2,57
7	0,507	2,45
8	0,468	2,37
9	0,437	2,31
10	0,412	2,26
11	0,392	2,23
12	0,376	2,20

Затем результаты измерений обрабатываются по методу Стьюдента. Для этого надо:

- 1) занести в таблицу результаты наблюдений:

№ п/п	a_i	$\Delta a_i = \langle a \rangle - a_i$	$(\Delta a_i)^2$
1			
2			
...			
N			
	$\langle a \rangle =$		$\sum (\Delta a_i)^2 =$

- 2) определить оценку среднего квадратичного отклонения резуль-

тата измерения:
$$S = \sqrt{\frac{\sum (\Delta a_i)^2}{N(N-1)}};$$

- 3) найти по табл. 1 коэффициент Стьюдента для данного числа наблюдений;
- 4) вычислить случайную погрешность: $\alpha = t_{\text{ст}} \cdot S$;
- 5) записать погрешность используемого прибора λ ;
- 6) рассчитать абсолютную погрешность: $\Delta a = \alpha + \lambda$.

3. Для констант абсолютную погрешность определяют как разность данного приближенного значения и более точного. Например, для числа $\pi = 3,14$ более точное значение $3,142$, тогда $\Delta\pi = 3,142 - 3,14 = 0,002$.

Если более точное значение неизвестно, то абсолютная погрешность принимается равной половине единицы разряда последней значащей цифры взятого числа. Например:

- для значения ускорения свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ абсолютная погрешность $\Delta g = 0,005 \text{ м/с}^2$;
- для значения гравитационной постоянной $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ абсолютная погрешность $\Delta G = 0,005 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$.

4. Для величин, имеющих дискретный характер, например, число атомов в молекуле, число электронов в атоме, абсолютная погрешность равна нулю: $\Delta a = 0$.

5. Для величины, определяемой из графика, абсолютная погрешность также находится из графика как изменение ординаты, вызванное изменением абсциссы на Δa : $\Delta f(a) = f(a + \Delta a) - f(a)$.

Обработка результатов косвенных измерений физической величины

При косвенных измерениях искомая величина является функцией одного или нескольких аргументов: $U = (a, b, c, \dots)$. Величины $a, b, c, \dots$ находятся непосредственно из эксперимента.

Сначала находят среднее значение и абсолютную погрешность каждого аргумента. Затем рассчитывают среднее значение искомой величины: $\langle U \rangle = (\langle a \rangle, \langle b \rangle, \langle c \rangle, \dots)$.

Величину абсолютной погрешности вычисляют по формуле

$$\Delta U = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a} \Delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b} \Delta b\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial c} \Delta c\right)^2 + \dots}$$

Запишем эту формулу для нескольких частных случаев:

$$\text{а) } U = a \pm b \pm c \pm \dots \quad \Delta U = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2 + \Delta c^2 + \dots};$$

$$\text{б) } U = a^k \cdot b^l \cdot c^m \quad \Delta U = \langle U \rangle \sqrt{\left(\frac{k\Delta a}{\langle a \rangle}\right)^2 + \left(\frac{l\Delta b}{\langle b \rangle}\right)^2 + \left(\frac{m\Delta c}{\langle c \rangle}\right)^2}.$$

Абсолютные погрешности более сложных функций приведены в табл. 2.

Таблица 2

Абсолютные погрешности сложных функций

№ п/п	Функция	Абсолютная погрешность	№ п/п	Функция	Абсолютная погрешность
1	x^k	$k < x >^{k-1} \Delta x$	7	$\frac{x}{1+x}$	$\frac{\Delta x}{(1 \pm \langle x \rangle)^2}$
2	$\sqrt[k]{x}$	$\frac{\Delta x}{k \sqrt[k]{\langle x \rangle^{k-1}}}$	8	$\frac{1}{x^k}$	$\frac{k \Delta x}{\langle x \rangle^{k+1}}$
3	$\ln x$	$\frac{\Delta x}{\langle x \rangle}$	9	$\sin kx$	$k \cos k \langle x \rangle \cdot \Delta x$
4	e^{kx}	$k e^{k \langle x \rangle} \Delta x$	10	$\cos kx$	$k \sin k \langle x \rangle \cdot \Delta x$
5	$\lg x$	$0,43 \frac{\Delta x}{\langle x \rangle}$	11	$\operatorname{tg} kx$	$\frac{k \Delta x}{\cos^2 k \langle x \rangle}$
6	a^{kx}	$k \ln a \cdot a^{k \langle x \rangle} \Delta x$	12	$\operatorname{ctg} kx$	$\frac{k \Delta x}{\sin^2 k \langle x \rangle}$

Абсолютная погрешность аргумента тригонометрической функции выражается в *радианах*.

В лабораторных работах приведены формулы для расчета абсолютных погрешностей искомых функций.

Запись окончательного результата измерений

Окончательный результат измерения должен быть представлен в стандартной форме. Для этого:

1) абсолютную погрешность измерения округляют до первой значащей цифры. При наиболее точных измерениях или если первая значащая цифра в абсолютной погрешности единица, абсолютную погрешность представляют в виде числа с двумя значащими цифрами;

2) результат измерения округляют до того разряда, до которого округлена абсолютная погрешность;

3) результат измерения должен содержать до запятой одну значащую цифру и быть выражен в системе единиц измерения СИ.

Например:

$$\Delta a = 0,000381 \approx 0,0004 \text{ см};$$

$$\langle a \rangle = 0,06243 \approx 0,0624 \text{ см};$$

$$\begin{aligned} a = (\langle a \rangle \pm \Delta a) &= (0,0624 \pm 0,0004) \text{ см} = \\ &= (6,24 \pm 0,04) \cdot 10^{-2} \text{ см} = (6,24 \pm 0,04) \cdot 10^{-4} \text{ м}. \end{aligned}$$

Построение графиков

1. Графики нужно строить на миллиметровой бумаге.

2. При построении графика следует заранее выбрать масштаб, нанести деления масштаба по осям координат. Значения независимого аргумента откладываются на оси абсцисс, а по оси ординат откладываются значения функции.

3. По координатным осям необходимо указать не только откладываемые величины, но и единицы измерения.

4. При выборе масштаба надо стремиться к тому, чтобы кривая занимала весь лист. Шкала для каждой переменной может начинаться не с нуля, а с наименьшего округленного значения и кончаться наибольшим значением.

5. После этого нанести на график экспериментальные точки. Экспериментальные точки соединяют между собой карандашом плавной кривой, без резких искривлений и углов.

6. Кривая должна охватывать как можно больше точек или проходить между ними так, чтобы по обе стороны от нее точки располагались равномерно.

7. Пользуясь кривой, можно производить интерполирование, то есть находить значения искомой величины для таких значений аргумента, которые непосредственно не наблюдались. Кроме того, можно определить значения одной величины, которые соответствуют максимальному или минимальному значению другой, хотя последняя и не определялась непосредственно.

Программа работы

1. Знакомство преподавателя со студентами.
2. Инструктаж по правилам поведения студентов в лаборатории, по технике безопасности и пожарной безопасности.
3. Ознакомление с порядком выполнения лабораторного практикума.
4. Ознакомление с системой оценки знаний студентов на лабораторном практикуме.
5. Повторение правил обработки результатов прямых и косвенных измерений физических величин.
6. Контроль знаний по правилам обработки результатов прямых и косвенных измерений физических величин.

Порядок работы

1. Представление преподавателя и лаборанта, закрепленных за данной группой. Их права, обязанности и требования к студентам.
2. Разбить студентов группы на маршруты по два-три человека для выполнения лабораторных работ.
3. Провести инструктаж студентов по технике безопасности и пожарной безопасности. Расписаться всем студентам и преподавателю в журнале по технике безопасности и пожарной безопасности.
4. Ознакомить студентов с порядком выполнения лабораторного практикума в лаборатории электрических и магнитных измерений.
5. Ознакомить студентов с системой оценки знаний на лабораторном практикуме.
6. Повторить правила обработки результатов прямых и косвенных измерений физических величин.
7. Провести контроль знаний по правилам обработки результатов прямых и косвенных измерений физических величин по билетам или с использованием персонального компьютера (ПК).

Вопросы для самоконтроля

1. Как производится сборка элементов электрической схемы?
2. Когда подключение электрического прибора в цепь производится с соблюдением полярности?
3. Что запрещается делать студентам в лаборатории электрических и магнитных измерений?
4. Что необходимо сделать, если замечено зашкаливание приборов, искрение, дым в лаборатории?
5. Какое измерение называется прямым?
6. Какое измерение называется косвенным?
7. Дать определение абсолютной и относительной погрешностей измерения.
8. Что значит оценить погрешность измеряемой величины?
9. Как определяется абсолютная погрешность физических констант?
10. Как вычисляется абсолютная погрешность прибора?
11. Как определяется абсолютная погрешность многократных измерений?
12. Как определяется абсолютная погрешность дискретных величин?
13. Как находится абсолютная погрешность величины, определяемой из графика?
14. Записать окончательный результат измерения, если:
 - а) $\langle t \rangle = 5,0075 \text{ с}$; $\Delta t = 0,051 \text{ с}$;
 - б) $\langle \rho \rangle = 2,785 \text{ кг/м}^3$; $\Delta \rho = 0,0074 \text{ кг/м}^3$;
 - в) $\langle q \rangle = 0,8134 \text{ нКл}$; $\Delta q = 0,0047 \text{ нКл}$;
 - г) $\langle A \rangle = 0,06382 \text{ кДж}$; $\Delta A = 0,00591 \text{ кДж}$;
 - д) $\langle Q \rangle = 0,005864 \text{ мДж}$; $\Delta Q = 0,00047 \text{ мДж}$;
 - е) $\langle l \rangle = 81,345 \text{ см}$; $\Delta l = 0,473 \text{ см}$;
 - ж) $\langle V \rangle = 28,038 \text{ м}^3$; $\Delta V = 0,13 \text{ м}^3$;
 - и) $\langle p \rangle = 234,786 \text{ Па}$; $\Delta p = 3,19 \text{ Па}$;
 - к) $\langle a \rangle = 348,51 \text{ мм/с}^2$; $\Delta l = 27,3 \text{ мм/с}^2$;
 - л) $\langle m \rangle = 9137,62 \text{ г}$; $\Delta m = 86,43 \text{ г}$.

15. Вывести формулу для вычисления абсолютной погрешности физической величины:

а) $V = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h}{4};$

е) $I = C \cdot \operatorname{tg} \alpha;$

б) $\varepsilon = \frac{4 \cdot h}{t^2 \cdot d};$

ж) $T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}};$

в) $\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2};$

и) $B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{2R \cdot \operatorname{tg} \alpha};$

г) $a = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 + m_2)} g;$

к) $V = 2\sqrt{g \cdot l} \cdot \sin \alpha;$

д) $J = \frac{m \cdot d^2}{8};$

л) $C = \frac{t}{4R \cdot \ln U}.$

Лабораторная работа Э1

Знакомство с электроизмерительными приборами

Цель работы: ознакомиться с устройством электроизмерительных приборов, принципами работы их механизмов, способами расширения их пределов измерения.

Приборы и принадлежности: электроизмерительный прибор; экспериментальная установка.

Краткие теоретические сведения

1. Виды средств электрических измерений

Средствами электрических измерений называют технические средства, используемые при электрических измерениях и имеющие нормированные метрологические характеристики. Различают следующие виды средств электрических измерений: меры и электроизмерительные приборы.

Мерами называют средства измерений, предназначенные для воспроизведения физической величины заданного размера. Различают однозначные меры, многозначные меры и наборы мер. Однозначная мера воспроизводит физическую величину одного размера. Многозначная мера воспроизводит ряд одноименных величин разного размера. Примером многозначных мер может служить конденсатор переменной емкости, вариометр для плавного изменения индуктивности и др. Набор мер представляет собой специально подобранный комплект мер, применяемых не только по отдельности, но и в различных сочетаниях с целью воспроизведения ряда одноименных величин различного размера. Примерами набора мер являются магазины сопротивлений, емкостей и др.

Электроизмерительными приборами называют средства электрических измерений, предназначенные для выработки сигналов измерительной информации, то есть сигналов, функционально связанных с измеряемыми физическими величинами, в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Они весьма разнообразны по своему принципу действия и конструктивному оформлению.

2. Классификация электроизмерительных приборов

Электроизмерительные приборы (ЭИП) могут быть классифицированы по различным признакам.

1. Классификация ЭИП по **основным признакам**:

- а) *по роду измеряемой величины*: амперметры, вольтметры, омметры, ваттметры, счетчики и др.;
- б) *по роду тока*: приборы постоянного тока, переменного тока и приборы постоянного и переменного тока;
- в) *по принципу действия их электроизмерительного механизма*: магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, индукционные, тепловые и др.;
- г) *по степени точности*: различают приборы восьми классов точности — 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4.

2. Классификация ЭИП по **характеру применения**:

- а) *стационарные*, то есть такие, корпуса которых приспособлены для жесткого крепления на месте установки;
- б) *переносные*, корпуса которых не предназначены для жесткого крепления.

3. Классификация ЭИП по **степени защищенности**:

- а) обыкновенные;
- б) пыле-, водо-, брызгозащищенные;
- в) герметические и др.

Кроме указанных классификаций существуют и другие.

3. Основные части электроизмерительного прибора

К основным частям электроизмерительного прибора относятся:

- | | |
|------------|----------------------------|
| 1) корпус; | 4) указательная стрелка; |
| 2) зажимы; | 5) измерительный механизм; |
| 3) шкала; | 6) винт корректора. |

Винт корректора служит для установки стрелки на нулевую отметку перед измерением.

На корпусе некоторых приборов расположены переключатель пределов измерения и арретир. Арретир служит для закрепления измерительного механизма при транспортировке.

Измерительные механизмы любой системы имеют ряд общих механических частей: спиральные пружины, оси или полуоси

с подпятниками, противовесы, корректор. Спиральные пружины препятствуют отклонению стрелки, благодаря чему она останавливается против определенной отметки на шкале. Каждый измерительный механизм имеет в своем устройстве успокоитель, который гасит колебания стрелки после отклонения. Различают воздушные и магнитоиндукционные успокоители.

Шкала прибора служит для отсчета значения измеряемой величины. Шкалы бывают равномерными и неравномерными.

Предел измерения прибора $A_{\text{пред}}$ — наибольшее значение, которое может быть измерено по шкале этого прибора. Для приборов с односторонней шкалой это верхний предел измерения прибора, для приборов с двухсторонней шкалой — сумма пределов измерений по левой и правой частям шкалы прибора.

Делением шкалы называется расстояние между двумя ближайшими друг к другу отметками на шкале.

Ценой деления C называется значение электрической величины, приходящееся на одно деление шкалы.

Чувствительностью прибора (S) называется величина, обратная цене деления:

$$S = \frac{1}{C}.$$

Например, имеется прибор, который может измерять напряжение от 0 до 250 В. Шкала этого прибора разделена на 50 делений. Тогда цена деления этого прибора $C = 250 : 50 = 5$ (В/дел), а чувствительность $S = 1 : 5 = 0,2$ (дел/В).

Разность между показанием прибора A и действительным значением измеряемой величины A_d (показание образцового прибора) называется абсолютной погрешностью прибора:

$$\Delta A = A - A_d.$$

Выраженное в процентах отношение абсолютной погрешности прибора ΔA к пределу измерения прибора $A_{\text{пред}}$ называется относительной приведенной погрешностью прибора γ :

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_{\text{пред}}} 100 \, \%.$$

Наибольшую допустимую относительную приведенную погрешность прибора называют классом точности этого прибора.

На шкале с помощью условных знаков дается подробная техническая характеристика прибора.

4. Техническая характеристика прибора

Наименование и буквенное обозначение прибора дается по наименованию единицы измеряемой величины, например, mA — миллиамперметр или μA — микроамперметр, V — вольтметр.

Класс точности прибора указывается в виде числа из двух значащих цифр, иногда обведенных окружностью, иногда подчеркнутых. Существует восемь классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4. Наиболее точными приборами являются приборы первого класса точности $\gamma = 0,05$. Приборы первых четырех классов точности применяют для точных лабораторных измерений.

Род тока: постоянный (—) или переменный ($\sim$), постоянный и переменный (— $\sim$).

Система измерительного механизма прибора обозначается на шкале специальным знаком, представляющим собой схематическое изображение основного узла, от которого зависит принцип действия прибора. Например, магнитоэлектрическая система  или электромагнитная система .

Положение прибора при измерениях: вертикальное — $\uparrow$ или $\perp$; горизонтальное — $\rightarrow$ или $\sqcap$; под углом — $\angle 30^\circ$.

Пробивное напряжение — величина напряжения, при котором была испытана прочность изоляции. Обозначение:  2 kV .

Иногда на шкалу прибора наносят условные знаки:

— степень защищённости от внешних магнитных полей обозначают римскими цифрами I, II, III, IV. Меньшая цифра означает лучшую защиту;

— условия работы прибора (диапазон температур и относительная влажность) обозначаются буквами:

А — от $-10^\circ C$ до $+35^\circ C$ и f до 80 %;

Б — от $-20^\circ C$ до $+50^\circ C$ и f до 80 %;

В — от $-40^\circ C$ до $+60^\circ C$ и f до 98 %;

— марка завода-изготовителя, заводской номер, год выпуска и тип прибора.

5. Обозначения электроизмерительных механизмов приборов

Наименование прибора	Условное обозначение измерительного механизма	Наименование прибора	Условное обозначение измерительного механизма
Прибор магнитоэлектрический с подвижной рамкой		Прибор электродинамический	
Логометр магнитоэлектрический		Прибор ферродинамический	
Прибор магнитоэлектрический с подвижным магнитом		Логометр электродинамический	
Логометр магнитоэлектрический с подвижным магнитом		Логометр ферродинамический	
Прибор электромагнитный		Прибор индукционный	
Прибор электромагнитный поляризованный		Логометр индукционный	
Логометр электромагнитный		Прибор электростатический	

6. Принцип действия основных электроизмерительных механизмов

При работе с электроизмерительным прибором необходимо знать систему измерительного механизма, так как от этого зависит способ его применения.

Магнитоэлектрическая система 

Принцип работы приборов магнитоэлектрической системы основан на взаимодействии магнитного поля тока, проходящего по обмотке рамки с магнитным полем постоянного магнита (рис. 1.1).

Когда по рамке идет ток, она поворачивается на угол α , пропорциональный измеряемому току (напряжению):

$$\alpha = K_1 \cdot I,$$

где K_1 — коэффициент пропорциональности.

Из этой зависимости видно, что шкала в таких приборах равномерна, а направление поворота рамки, а значит и стрелки, зависит от направления тока в рамке.

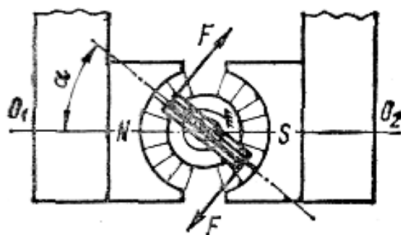


Рис. 1.1. Устройство электроизмерительного механизма прибора магнитоэлектрической системы (подвижная катушка в радиальном магнитном поле)

Основные достоинства: высокая точность, равномерность шкалы, хорошая защита от внешних магнитных полей.

Недостатки: этими приборами нельзя измерять переменный ток, сравнительно высокая стоимость.

Магнитоэлектрические измерительные механизмы с механическим противодействующим моментом используются главным образом в амперметрах, вольтметрах, гальванометрах, а также в некоторых типах омметров.

Электромагнитная система

Принцип действия приборов этой системы основан на взаимодействии магнитного поля тока, проходящего по обмотке катушки, с магнитным полем намагничивающего сердечника (рис. 1.2).

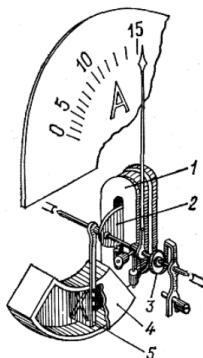


Рис. 1.2. Электромагнитная система

Сердечник имеет вид тонкой пластинки, жестко скреплённой с осью, на которой расположена указательная стрелка. При этом

сердечник втягивается внутрь катушки, благодаря чему указательная стрелка отклоняется. Угол отклонения стрелки α связан с током квадратичной зависимостью:

$$\alpha = K_2 \cdot I^2.$$

Шкала у таких приборов неравномерная. Приборы электромагнитной системы можно применять для измерений в цепях как постоянного, так и переменного токов. Класс точности этих приборов: 1,0; 1,5; 2,5.

При изменении направления тока в обмотке меняется полярность сердечника, поэтому при любом направлении тока сердечник втягивается внутрь катушки и стрелка отклоняется всегда в одну сторону.

Основные достоинства: простота устройства, невысокая стоимость, надёжность в работе, способны (из-за отсутствия токопроводов в подвижной части) выдерживать большие перегрузки, пригодны для измерения как переменного, так и постоянного токов.

Недостатки: невысокая точность, неравномерность шкалы, зависимость точности показаний от влияния внешних магнитных полей, сравнительно большое потребление электроэнергии.

Эту систему используют в амперметрах и вольтметрах.

Электродинамическая система

Принцип действия приборов этой системы заключается во взаимодействии магнитных полей токов, проходящих по двум обмоткам, одна из которых неподвижна, а другая может вращаться (рис. 1.3).

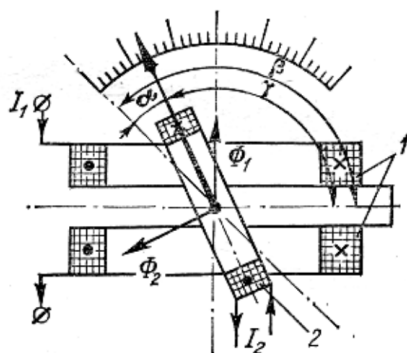


Рис. 1.3. Электродинамическая система

Обмотка неподвижной катушки называется токовой, имеет мало витков и включается в цепь последовательно. Обмотка подвижной катушки имеет много витков, включается в цепь параллельно и называется обмоткой напряжения.

Подвижная катушка поворачивается на угол α , пропорциональный произведению токов в каждой катушке, то есть вращающий момент пропорционален квадрату общего тока, протекающего через прибор.

$$\alpha = K_3 \cdot I_1 \cdot I_2.$$

Направление тока в обмотках может изменяться лишь одновременно. Поэтому независимо от направления тока подвижная катушка, а значит и стрелка, поворачивается в одну сторону. Электродинамические приборы в основном изготавливаются как переносные приборы классов точности 0,1; 0,2; 0,5 для измерений тока, напряжения и мощности в цепях постоянного и переменного токов, например, амперметры, вольтметры, ваттметры.

Достоинства: приборы имеют высокую точность и чувствительность.

Недостатки: высокая стоимость, влияние на показания внешних магнитных полей, малая устойчивость к перегрузкам.

Ферродинамическая система

Принцип действия такой же, как у приборов электродинамической системы, но здесь неподвижная обмотка помещена на магнитопроводе, благодаря чему повышается чувствительность прибора (рис. 1.4).

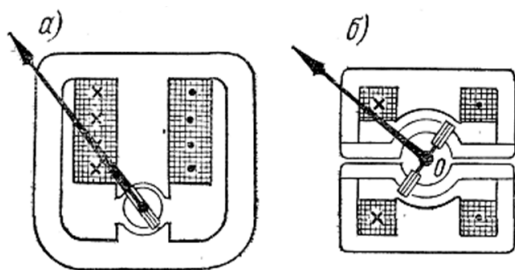


Рис. 1.4. Ферродинамические измерительные механизмы

Индукционная система

Принцип действия основан на взаимодействии токов, индуцируемых в подвижной части прибора, с магнитным потоком неподвижного магнита. Эта система используется, например, в счетчике электрической энергии.

Электростатическая система

Принцип работы приборов данной системы заключается во взаимодействии электрически заряженных подвижных и неподвижных пластин. Под действием сил поля подвижные пластины втягиваются в пространство между неподвижными пластинами, а противодействующий момент создаётся спиральной пружиной.

Электростатические приборы измеряют постоянные и переменные напряжения до частот порядка 10^7 – 10^8 Гц, характеризуются очень большим входным напряжением, практически не вносят искажений в исследуемую цепь, нечувствительны к внешним магнитным полям.

Недостатки: малая чувствительность, неравномерность шкалы, опасность электрического пробоя между пластинами.

7. Амперметры, вольтметры, гальванометры

Амперметрами называют приборы, служащие для измерения силы тока в цепи.

При измерениях амперметр включают в цепь последовательно тому участку, на котором измеряется величина силы тока. Поэтому амперметры должны иметь очень малое собственное сопротивление, чтобы их включение не изменяло заметно величины тока в цепи. Для измерения малых токов применяют микро- и миллиамперметры. Для расширения пределов измерения амперметров к ним присоединяют шунт.

Шунт — это малое сопротивление $r_{ш}$, включенное в цепь параллельно сопротивлению амперметра, вследствие чего на амперметр ответвляется только малая часть из полного тока, текущего по магистральному проводу (рис. 1.5).

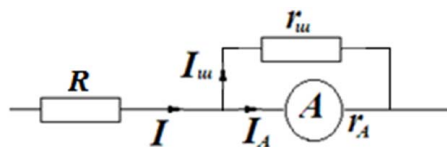


Рис. 1.5. Схема подключения шунта к амперметру

Введем коэффициент увеличения предела измерения амперметра:

$$n = \frac{I}{I_A},$$

где I — величина тока в магистральной цепи; I_A — величина тока, текущего через амперметр.

Если r_A — сопротивление амперметра, тогда между сопротивлением шунта и амперметра связь выражается соотношением

$$r_{ш} = \frac{r_A}{n - 1}.$$

Следовательно, чтобы измерить амперметром в n раз больший ток, чем тот, на который амперметр рассчитан, необходимо взять сопротивление шунта в $(n - 1)$ раз меньше сопротивления амперметра.

Вольтметры называют приборы, служащие для измерения напряжения (рис. 1.6). Вольтметр включается параллельно тому участку, на котором хотят измерить падение напряжения (разность потенциалов). Для того, чтобы включение вольтметра не сказывалось на режиме работы цепи, сопротивление вольтметра должно быть значительно больше, чем сопротивление участка, на котором производится измерение напряжения.

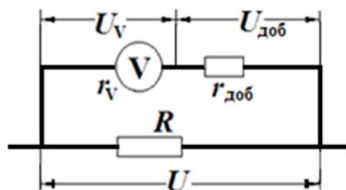


Рис. 1.6. Схема подключения к вольтметру добавочного сопротивления

Для расширения пределов измерения вольтметра последовательно с вольтметром включается добавочное сопротивление (рис. 1.6).

Коэффициент увеличения предела измерения вольтметра n :

$$n = \frac{U}{U_V},$$

где U — полное подводимое напряжение; U_V — падение напряжения, приходящееся на вольтметр.

Если необходимо измерить вольтметром в n раз большее напряжение, то последовательно к нему подключают добавочное сопротивление, величина которого связана с сопротивлением вольтметра соотношением

$$r_{\text{доб}} = r_V(n - 1),$$

где $r_{\text{доб}}$ — добавочное сопротивление; r_V — сопротивление вольтметра.

Гальванометрами называют чувствительные приборы, служащие для измерения весьма малых токов, напряжений и количества электричества. По принципу действия и устройству гальванометры бывают магнитоэлектрические с подвижным магнитом, струнные, термогальванометры и электродинамометры. Чаще всего гальванометры применяются для измерения тока и напряжения в цепях постоянного тока. Подсоединив к ним шунт или добавочное сопротивление, их превращают в амперметр или вольтметр с соответствующими пределами измерений.

Описание установки и метода измерений

К выходным гнездам источника тока подключена электрическая цепь, составленная из соединенных последовательно реостата (сопротивления нагрузки) и амперметра постоянного тока (рис. 1.7, 1.8). Параллельно сопротивлению нагрузки подключают лабораторный вольтметр. Для изменения диапазонов измерения электроизмерительных приборов к ним подключают либо шунт (параллельно амперметру), либо добавочное сопротивление (последовательно с вольтметром)

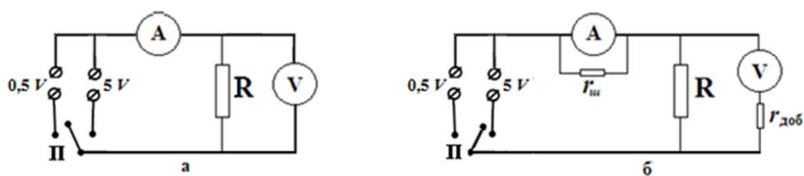


Рис. 1.7. Схема экспериментальной установки:
а – подключение источника с предельным значением $0,5\text{ V}$;
б – подключение источника с предельным значением 5 V



Рис. 1.8. Фото экспериментальной установки

Программа работы

1. Составить технический паспорт электроизмерительного прибора.
2. Измерить силу тока и напряжение на нагрузочном сопротивлении.
3. Рассчитать сопротивление шунта для амперметра и добавочное сопротивление для вольтметра.

Порядок работы

1. Получить у лаборанта или преподавателя электроизмерительный прибор.
2. Рассмотрев условные обозначения на шкале прибора, составить его технический паспорт.
3. Ознакомиться с экспериментальной установкой.

4. Записать значения сопротивлений амперметра r_A и вольтметра r_V (они указаны на установке).
5. Собрать электрическую схему установки согласно рис. 1.7, *а*, установив переключатель П в положение «0,5 В». После проверки электрической схемы лаборантом подключить её к сети с напряжением 36 В. Измерить *по нижней шкале амперметра* величину силы тока I_1 в цепи. Измерить *по нижней шкале вольтметра* величину напряжения на нагрузке U_1 . Занести их значения в бланк отчета. Отключить установку от сети.
6. Используя значения класса точности приборов, применяемых в экспериментальной установке, рассчитать абсолютные погрешности силы тока, измеренной по нижней шкале амперметра: $\Delta I_1 = \frac{\gamma \cdot I_{\text{пред}}}{100}$, и напряжения, измеренного по нижней шкале вольтметра: $\Delta U_1 = \frac{\gamma \cdot U_{\text{пред}}}{100}$.
7. Записать окончательный результат проведенных измерений силы тока $I_1 = (I_1 \pm \Delta I_1)$ и напряжения: $U_1 = (U_1 \pm \Delta U_1)$.
8. Собрать электрическую схему лабораторной работы согласно рис. 1.7, *б*, установив переключатель в положение «5 В». После проверки электрической схемы лаборантом снова подключить её к сети. Измерить *по верхней шкале амперметра* величину силы тока I_2 в цепи. Измерить *по верхней шкале вольтметра* величину напряжения на нагрузке U_2 . Занести их значения в бланк отчета. Отключить установку от сети.
9. Рассчитать величину коэффициента изменения предела измерения амперметра по формуле $n_A = \frac{I_2}{I_1}$.
10. Рассчитать величину шунтирующего сопротивления согласно расчетной формуле $r_{\text{ш}} = \frac{r_A}{n_A - 1}$.
11. Рассчитать величину коэффициента изменения предела измерения вольтметра по формуле $n_V = \frac{U_2}{U_1}$.
12. Рассчитать величину добавочного сопротивления согласно расчетной формуле $r_{\text{доб}} = r_V (n_V - 1)$.
13. Сделать вывод.

Вопросы для самоконтроля

1. Что называют электроизмерительными приборами?
2. Как классифицируют измерительные приборы?
3. Перечислите основные части электроизмерительных приборов.
4. Для чего служит винт корректора, арретир?
5. Как рассчитывается абсолютная погрешность электроизмерительного прибора?
6. Что называется классом точности прибора? Сколько существует классов точности приборов?
7. Какие условные обозначения наносят на шкалу прибора?
8. Что такое цена деления, чувствительность прибора?
9. Как определяется предел измерения прибора с односторонней шкалой, с двухсторонней шкалой?
10. Какие типы электроизмерительных систем вы знаете?
11. Для каких измерений служит амперметр? Как амперметр включается в цепь (показать на схеме)? Какое сопротивление должен иметь амперметр? Почему?
12. Для каких измерений служит вольтметр? Как вольтметр включается в цепь (показать на схеме)? Какое сопротивление должен иметь вольтметр? Почему?
13. Для каких измерений служит гальванометр?
14. Для чего служит шунт? Как шунт включается в цепь (показать на схеме)? Пояснить почему.
15. Для чего служит добавочное сопротивление? Как добавочное сопротивление включается в цепь (показать на схеме)? Пояснить почему.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.
5. Расчетные формулы:

коэффициент изменения предела измерения амперметра: $n_A =$
коэффициент изменения предела измерения вольтметра: $n_V =$

сопротивление шунта: $r_{\text{ш}} =$

добавочное сопротивление: $r_{\text{доб}} =$

6. Технический паспорт электроизмерительного прибора

№	Название характеристики	Характеристика амперметра	Характеристика вольтметра
1	Наименование прибора		
2	Условное обозначение		
3	Предел измерения		
4	Цена деления		
5	Чувствительность		
6	Класс точности		
7	Род тока		
8	Система измерительного механизма		
9	Положение прибора при измерениях		
10	Пробивное напряжение изоляции		
11	Степень защищённости от внешних магнитных полей		
12	Условия работы прибора		
13	Марка завода-изготовителя, заводской номер, год выпуска и тип прибора		

7. Заданные в работе величины:

внутреннее сопротивление амперметра $r_A =$

внутреннее сопротивление вольтметра $r_V =$

8. Результаты измерений:

ЭДС источника	$\varepsilon = 0,5 \text{ В}$	$\varepsilon = 5 \text{ В}$
Сила тока в цепи	$I_1 =$	$I_2 =$
Напряжение на нагрузке	$U_1 =$	$U_2 =$

Абсолютная погрешность (нижняя шкала): $\Delta I_1 =$ $\Delta U_1 =$

Стандартная запись результатов измерений:

$$I_1 =$$

$$U_1 =$$

9. Расчеты:

коэффициент изменения предела измерения амперметра: $n_A =$

шунтирующее сопротивление: $r_{ш} =$

коэффициент изменения предела измерения вольтметра: $n_V =$

добавочное сопротивление: $r_{доб} =$

10. Вывод.

Лабораторная работа Э2в

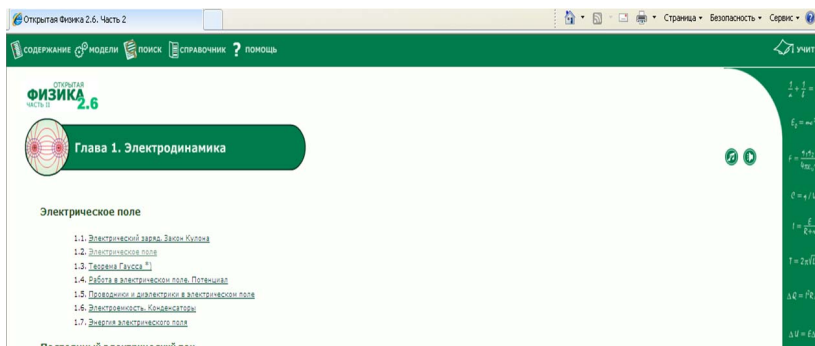
Исследование электрического поля точечных зарядов

Цель работы: познакомиться с моделированием электрического поля точечного заряда. Измерить характеристики электрического поля точечного заряда и системы зарядов.

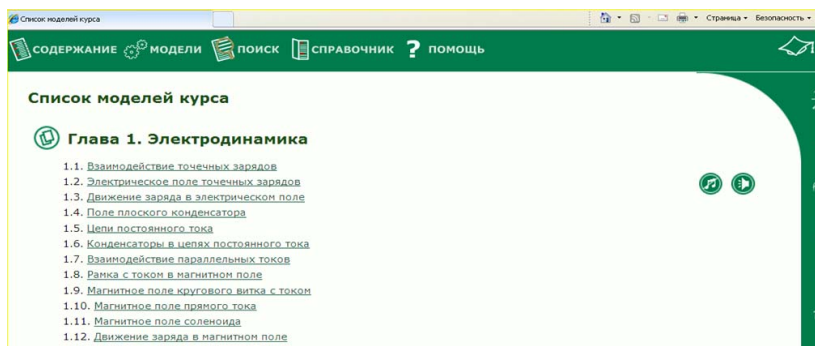
Приборы и принадлежности: мультимедийное учебное пособие «Открытая физика», версия 2.6, часть 2, модель 1.2. «Электрическое поле точечных зарядов».

Описание виртуальной модели и метода измерений

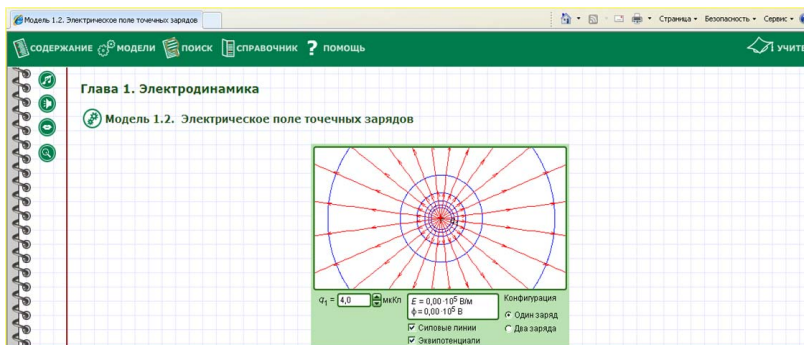
Запустить программу «Открытая физика 2.6, часть 2». Выбрать в содержании «Глава 1. Электродинамика».



Затем в главном меню программы выбрать пункт «Модели». Откроется список всех виртуальных моделей.



Из списка выбрать модель 1.2. «Электрическое поле точечных зарядов». Загрузится компьютерная модель электрического поля точечных зарядов с кратким описанием функционала модели и демонстрацией картины силовых и эквипотенциальных линий одного заряда или системы точечных зарядов.



Работая с этой моделью, можно изменять величины зарядов и их знаки, а также расстояние между зарядами. При установке указателя мыши в любой точке поля на дисплее высвечиваются значения модуля вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ и потенциала ϕ в данной точке.

Программа работы

1. Исследовать электростатическое поле точечных зарядов q_1 и q_2 .
2. Определить характеристики электрического поля положительного точечного заряда q_1 .
3. Исследовать электростатическое поле, созданное двумя точечными зарядами.

Порядок работы

1. Получить у преподавателя номер своего маршрута и выбрать соответствующие исходные данные для выполнения лабораторной работы (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Исходные данные

Маршрут	$q_1 \cdot 10^{-6}$, Кл	$q_2 \cdot 10^{-6}$, Кл	l , м
I	1	-1	2,0
II	2	-2	2,5
III	3	-3	3,0
IV	4	-4	3,5
V	5	-5	4,0

2. Загрузить виртуальную модель 1.2. Выбрать конфигурацию «один заряд», установить заданную в маршруте величину положительного заряда q_1 и выставить галочки для построения силовых линий и эквипотенциалей. Зарисовать вид силовых и эквипотенциальных линий, отображаемых на экране.

3. Изменить знак заряда и снова зарисовать вид силовых и эквипотенциальных линий для отрицательного заряда q_2 .

4. Для количественного исследования электрического поля надо вновь установить положительный заряд q_1 . Выбрать некоторую силовую линию поля этого заряда и перемещаться по ней от заряда. Установить курсор мыши в первой точке пересечения силовой и эквипотенциальной линий. Произвести измерения модулей вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ и потенциала φ в данной точке, нажав левую клавишу мыши. Результаты измерений занести в табл. 2.2.

5. Повторить действия п. 4 для других точек пересечения силовой и эквипотенциальной линий. Результаты измерений занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Результаты измерений и вычислений для поля
положительного заряда q_1

№ точки	1	2	3	4	5
E					
φ					
r					

6. Рассчитать расстояние от заряда до каждой измеренной точки по формуле $r = \frac{\varphi}{E}$. Внести результаты расчетов в табл. 2.2.

7. Построить на миллиметровой бумаге графики зависимостей $E = f(r)$; $\varphi = f(r)$.

8. Сделать вывод о характере поля точечного заряда.

9. Выбрать новую конфигурацию — «два заряда», установить заданные в маршруте величины зарядов q_1 и q_2 , выставить галочки для построения силовых линий и эквипотенциалей. Зарисовать вид силовых и эквипотенциальных линий, отображаемых на экране.

10. Нарисовать вектор напряженности $\vec{E}$ и вектор градиента потенциала $\text{grad } \varphi$ результирующего поля, созданного зарядами q_1 и q_2 в точке A , равноудаленной от каждого из зарядов на расстояние, равное расстоянию между зарядами.

11. Рассчитать модуль напряженности результирующего поля в точке A .

12. Сделать вывод по результатам лабораторной работы.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие физические явления и величины исследуются в данной лабораторной работе?
2. Для каких точек электростатического поля надо произвести измерения модулей вектора напряженности $\vec{E}$ и потенциала φ в данной лабораторной работе?
3. Какие величины рассчитываются по формуле в данной лабораторной работе?
4. В какой точке поля надо нарисовать векторы напряженности $\vec{E}$ и градиента потенциала $\text{grad } \varphi$?
5. Какие графики нужно построить в данной лабораторной работе?
6. Дать определение точечного электрического заряда.
7. Перечислите свойства электрического заряда.
8. Какое поле называется электростатическим?
9. Что называется силовой линией электростатического поля?
10. Дать определение напряженности электростатического поля. Записать ее формулу и единицу измерения.
11. Дать определение потенциала электростатического поля. Записать его формулу и единицу измерения.

12. Записать математическую связь между напряженностью и потенциалом.
13. Дать определение эквипотенциальной поверхности электростатического поля.
14. Сформулировать и записать принцип суперпозиции электрических полей.
15. Изобразить на рисунке картину силовых линий и эквипотенциальных поверхностей для поля: а) точечного заряда; б) системы двух зарядов, одинаковых по модулю и противоположных по знаку.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.
5. Расчетные формулы:

расстояние от точечного заряда до искомой точки:

модуль напряженности точечного заряда:

резльтирующая напряженность поля:

6. Картина силовых и эквипотенциальных линий электрического поля точечного заряда:

Вид силовых и эквипотенциальных линий ЭП точечного заряда $+q_1$	Вид силовых и эквипотенциальных линий ЭП точечного заряда $-q_2$

7. Результаты измерений и вычислений для электрического поля положительного заряда q_1 :

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8
E								
φ								
r								

8. Графики зависимостей $E = f(r)$; $\varphi = f(r)$.

График зависимости $E = f(r)$	График зависимости $\varphi = f(r)$

9. Вывод о характере поля точечного заряда.

10. Картина силовых и эквипотенциальных линий электрического поля, созданного двумя точечными зарядами q_1 и q_2 :

Вид силовых и эквипотенциальных линий ЭП двух точечных зарядов с изображением вектора результирующей напряженности $\vec{E}_A$ и вектора градиента потенциала $\text{grad } \varphi$

11. Расчет модуля напряженности результирующего поля в точке А:

$$E_A =$$

12. Вывод по результатам лабораторной работы.

Лабораторная работа ЭЗв

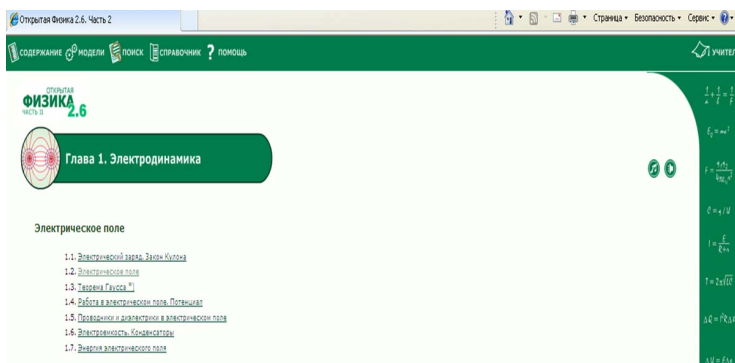
Движение заряда в электростатическом поле плоского конденсатора

Цель работы: познакомиться с моделированием движения заряда в электрическом поле. Исследовать закономерности движения точечного заряда в однородном электрическом поле.

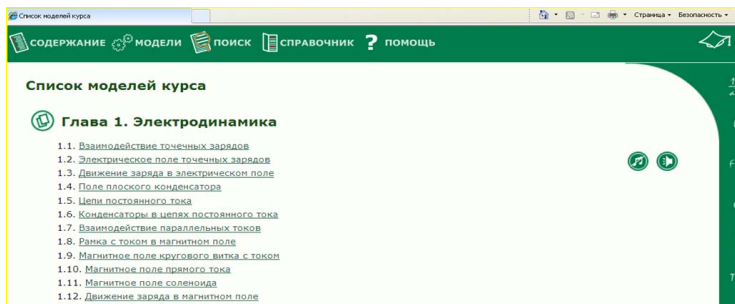
Приборы и принадлежности: мультимедийное учебное пособие «Открытая физика», версия 2.6, часть 2, модель 1.3 «Движение заряженной частицы в электрическом поле».

Описание виртуальной модели и метода измерений

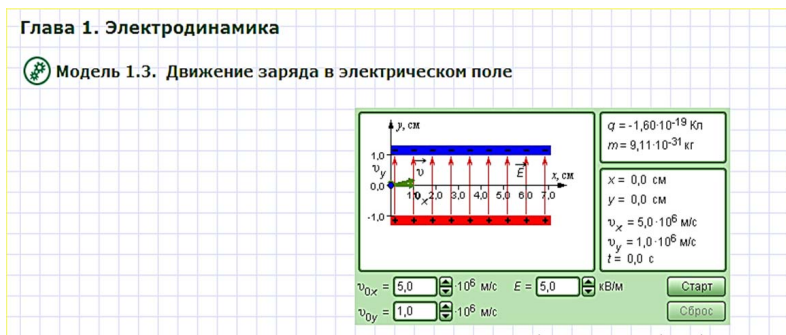
Запустить программу «Открытая физика 2.6, часть 2». Выбрать в содержании «Глава 1. Электродинамика».



Затем в главном меню программы выбрать пункт «Модели». Откроется список всех виртуальных моделей.



Из списка выбрать модель 1.3 «Движение заряда в электрическом поле». Загрузится компьютерная модель 1.3, которая иллюстрирует движение заряженной частицы (электрона) в электрическом поле плоского конденсатора.



Работая с этой моделью, можно изменять значения начальных составляющих скоростей V_{0x} и V_{0y} частицы, а также величину и знак напряженности поля конденсатора. На экране дисплея изображается траектория движения частицы и выводятся значения координат, времени движения и составляющих скорости частицы в любой момент времени.

В данной виртуальной модели используется плоский конденсатор, пластины которого расположены горизонтально. Заряженной частицей является электрон. Значения массы покоя и заряда электрона отображаются на экране дисплея.

Рассмотрим движение электрона, который влетает в однородное поле конденсатора с начальной скоростью $\vec{V}_0$. На электрон действуют сила тяжести $\vec{F}_{\text{тяж}}$ и электростатическая сила $\vec{F}_{\text{эл}}$. Так как масса электрона очень мала, то величиной силы тяжести ($F_{\text{тяж}} = m_e \cdot g = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 9,81 \text{ м/с}^2 = 89,3 \cdot 10^{-31} \text{ Н}$) можно пренебречь. Электрическая сила, а значит, и сообщаемое ею ускорение будут направлены вдоль оси Оу. Модуль ускорения, с которым электрон движется в поле заряженного конденсатора вдоль оси Оу, определяется по формуле

$$a_y = \frac{F_{\text{эл}}}{m_e} = \frac{q_e E}{m_e} = \text{const.}$$

Вдоль оси Ox электрон движется равномерно по закону: $x = V_{0x} t$. Когда электрон вылетит из поля конденсатора, то за время движения $t_{\text{дв}}$ он пройдет расстояние, равное длине пластин конденсатора $x = L$.

Тогда время движения

$$t_{\text{дв}} = \frac{L}{V_{0x}}.$$

Если вертикальная составляющая начальной скорости электрона $V_{0y} = 0$ и электрон влетает в конденсатор ровно посередине между пластинами, то за время движения он пройдет расстояние $\frac{d}{2}$. Используя уравнение пути равноускоренного движения $S = V_0 t + \frac{at^2}{2}$, получим:

$$\frac{d}{2} = a_y \frac{t^2}{2}, \quad \text{или} \quad \frac{d}{2} = \frac{q_e E}{m_e} \frac{L^2}{2V_{0x}^2}.$$

Отсюда горизонтальная составляющая начальной скорости

$$V_{0x} = L \sqrt{\frac{q_e E}{m_e d}}.$$

Тогда время движения электрона в поле конденсатора

$$t_{\text{дв}} = \frac{L}{V_{0x}} = \sqrt{\frac{m_e d}{q_e E}}.$$

Вертикальная составляющая скорости электрона в момент вылета из конденсатора будет иметь вид:

$$V_y = a_y t_{\text{дв}} = \frac{q_e E}{m_e} \sqrt{\frac{m_e d}{q_e E}} = \sqrt{\frac{q_e E d}{m}}.$$

Так как $\vec{V}_y \perp \vec{V}_{0x}$, то результирующую скорость вылета электрона из электростатического поля конденсатора найдем по теореме Пифагора:

$$V_{\text{выл}} = \sqrt{V_{0x}^2 + V_{yt}^2}.$$

Программа работы

1. Провести измерения параметров движения частицы в момент ее вылета из конденсатора.
2. Провести теоретический расчет параметров движения частицы.
3. Сравнить экспериментально измеренные и теоретически рассчитанные параметры.

Порядок работы

1. Согласно маршруту выполнения виртуальных работ получить исходные данные.

Таблица 3.1

Исходные данные

Маршрут	1	2	3	4	5
Напряженность поля между обкладками конденсатора E , кВ/м	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50

2. Загрузить виртуальную модель 1.3. Установить исходные числовые значения, указанные в табл. 3.1, согласно выданному маршруту.

3. Установить значение вертикальной составляющей начальной скорости электрона $V_{0y} = 0$. Это значение не изменяется во время работы.

4. Установить значение горизонтальной составляющей начальной скорости электрона $V_{0x} = 2,0 \cdot 10^6$ м/с.

5. Нажав кнопку «Старт», наблюдать движение частицы. Увеличивая V_{0x} каждый раз на $0,1 \cdot 10^6$ м/с, подобрать максимальное значение этой величины V_{0x} , при котором частица вылетает из конденсатора. Расстояние, пройденное заряженной частицей, должно быть равно длине обкладки конденсатора: $L = (7,0 \pm 0,1)$ см.

6. Записать экспериментально полученные параметры V_{0x} , $t_{дв}$, V_y с экрана монитора.

7. Используя экспериментально полученные значения составляющих скорости, вычислить скорость вылета электрона из конденсатора по формуле

$$V_{\text{выл}} = \sqrt{V_{0x}^2 + V_{yt}^2}.$$

8. Рассчитать теоретическое значение времени движения электрона в поле конденсатора по формуле

$$t_{дв} = \sqrt{\frac{m_e d}{q_e E}}.$$

9. Рассчитать горизонтальную составляющую начальной скорости электрона, который пролетел расстояние, равное длине обкладки конденсатора, по формуле

$$V_{0x} = L \sqrt{\frac{q_e E}{m_e d}}.$$

10. Рассчитать вертикальную составляющую скорости электрона в момент вылета из конденсатора по формуле

$$V_y = \sqrt{\frac{q_e E d}{m}}.$$

11. Используя экспериментально полученные значения составляющих скорости, вычислить скорость вылета электрона из конденсатора по формуле

$$V_{\text{выл}} = \sqrt{V_{0x}^2 + V_{yt}^2}.$$

12. Сравнить полученные экспериментально параметры V_{0x} , $t_{\text{дв}}$, V_y , $V_{\text{выл}}$ с расчетными.

13. Сделать вывод по результатам работы.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие физические явления, законы и величины исследуются в данной лабораторной работе?
2. Какие физические величины в работе записываются с экрана монитора?
3. Какие физические величины в работе рассчитываются по формуле?
4. Какой конденсатор используется в виртуальной модели данной лабораторной работы?
5. Какова траектория движения электрона в однородном поле конденсатора?
6. Какие устройства называются конденсаторами? Для чего они служат?
7. Описать устройство плоского конденсатора.
8. Что представляет собой электрическое поле?
9. Дать определение однородного электрического поля.
10. Дать определение силовой линии электрического поля.

11. Изобразить силовые линии электрического поля плоского заряженного конденсатора.
12. Каким является поле между пластинами заряженного плоского конденсатора?
13. Записать формулу электростатической силы, которая действует на электрон, движущийся в поле конденсатора.
14. Вывести расчетную формулу ускорения движения электрона в поле заряженного конденсатора.
15. Вывести формулу для расчета скорости вылета электрона из конденсатора $V_{\text{выл}}$.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Расчетные формулы:

время движения электрона в поле конденсатора: $t_{\text{дв}} =$
горизонтальная составляющая начальной

скорости электрона: $V_{0x} =$

вертикальная составляющая скорости электрона: $V_y =$

скорость вылета электрона из конденсатора: $V_{\text{выл}} =$

5. Исходные данные:

заряд электрона: $q_e =$

масса электрона: $m_e =$

длина обкладки конденсатора: $L =$

расстояние между обкладками конденсатора: $d =$

напряженность поля между обкладками конденсатора: $E =$

вертикальная составляющая начальной скорости: $V_{0y} =$

6. Результаты измерений:

$t_{\text{дв. эксп}} =$

$V_{0x \text{ эксп}} =$

$V_y \text{ эксп} =$

$V_{\text{выл. эксп}} =$

7. Расчеты:

$$t_{\text{дв}} =$$

$$V_{0x} =$$

$$V_y =$$

$$V_{\text{выл}} =$$

8. Сравнение экспериментальных и расчетных значений искомых величин.

9. Вывод.

Лабораторная работа Э4

Определение емкости конденсатора по времени его разряда

Цель работы: определить емкость конденсатора по времени его разряда, исследовать закон изменения напряжения на конденсаторе при его разряде.

Приборы и принадлежности: набор конденсаторов; источник тока; вольтметр; резистор; переключатель; секундомер.

Описание установки и метода измерений

Схема установки приведена на рис. 4.1. Ее изображение — на рис. 4.2.

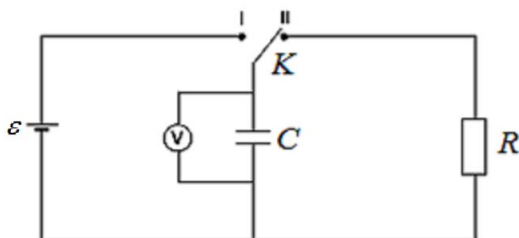


Рис. 4.1. Схема установки: ε — источник тока; V — вольтметр; R — резистор; C — конденсатор с неизвестной емкостью; K — ключ

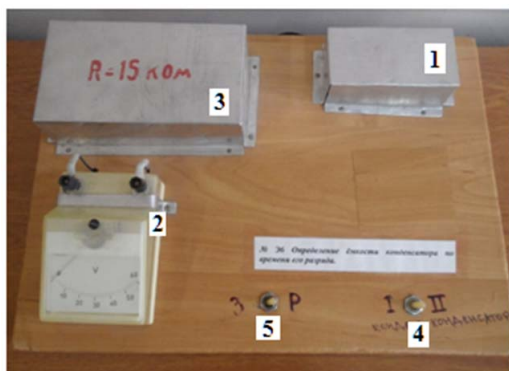


Рис. 4.2. Изображение установки: 1 — источник тока; 2 — вольтметр; 3 — резистор; 4 — переключатель конденсаторов; 5 — переключатель зарядки-разрядки конденсатора

Сначала конденсатор подключается к источнику тока с ЭДС ε и заряжается от него до напряжения U_0 . Затем конденсатор переключается на контур с резистором сопротивлением R . При этом происходит разряд конденсатора через сопротивление и в контуре $ABCD$ (рис. 4.3) течет электрический ток.

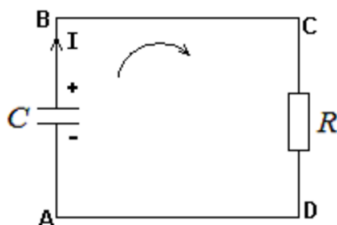


Рис. 4.3. Разряд конденсатора через сопротивление

Сила тока с течением времени меняется (уменьшается), но учитывая, что скорость распространения тока равна скорости распространения электромагнитного поля и близка к значению $3 \cdot 10^8$ м/с, можно считать, что мгновенные значения силы тока во всех точках цепи одинаковы, то есть ток квазистационарен. К такому току можно применять закон Ома и правила Кирхгофа.

Запишем второе правило Кирхгофа $\left(\sum_i U_i = \sum_k \varepsilon_k \right)$ для контура $ABCD$ и учтем, что источники тока в этом контуре отсутствуют, то есть $\sum_k \varepsilon_k = 0$,

$$U_C + U_R = 0.$$

Заменив напряжения на конденсаторе и резисторе соответствующими выражениями $U_C = \frac{q}{C}$; $U_R = IR$ и используя определение силы тока $I = \frac{dq}{dt}$, получим:

$$\frac{q}{C} + \frac{dq}{dt} R = 0.$$

Разделим переменные и возьмем интегралы от правой и левой частей: $\int_{q_0}^q \frac{dq}{q} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt$. Получим: $\ln \frac{q}{q_0} = -\frac{1}{RC} t$. Возьмем экспоненту от правой и левой частей равенства и получим закон изменения заряда на обкладках конденсатора при разряде:

$$q = q_0 e^{-\frac{1}{RC}t}. \quad (4.1)$$

Поделим обе части этого соотношения на емкость C и учтем, что $\frac{q}{C} = U$, получится закон изменения напряжения при разряде конденсатора:

$$U = U_0 e^{-\frac{1}{RC}t}. \quad (4.2)$$

Из этого закона видно, что с течением времени напряжение на конденсаторе убывает по экспоненциальному закону. Быстрота убывания определяется значениями сопротивления R резистора и емкости C конденсатора. Чем они больше, тем медленнее разряжается конденсатор.

Воспользуемся законом изменения напряжения и прологарифмируем его: $\ln \frac{U}{U_0} = -\frac{1}{RC}t$, откуда получим выражение для электроемкости конденсатора:

$$C = \frac{t}{R \cdot \ln \frac{U_0}{U}}. \quad (4.3)$$

Программа работы

1. Определение электроемкости первого конденсатора C_1 по времени его разряда через сопротивление.
2. Определение электроемкости второго конденсатора C_2 по времени его разряда.
3. Исследование зависимости напряжения на конденсаторе с большей емкостью от времени его разряда $U = f(t)$.

Порядок работы

1. Собрать электрическую схему (рис. 4.1).
2. Записать значение сопротивления R (указано на установке). Оценить его абсолютную погрешность ΔR как погрешность константы.
3. Поставить переключатель 4 (рис. 4.2) в положение «I», подключив первый конденсатор.
4. Поставить ключ K в положение «З» (зарядка) и зарядить конденсатор от источника питания. Значение напряжения, до которого зарядится конденсатор, U_0 измерить вольтметром.

5. Задать значение напряжения U , до которого будем разряжать конденсатор. Оно должно быть близким к нулю, но отличным от нуля. Будет удобно проводить измерения, если это значение будет соответствовать четкому делению по шкале вольтметра.

6. Переключить ключ в положение «Р» (разрядка) и измерить секундомером время разряда конденсатора от напряжения U_0 , до которого зарядился конденсатор, до заданного значения U .

7. Измерить время разрядки конденсатора не менее 6 раз, повторяя пп. 4–6.

8. Рассчитать среднее значение времени разрядки конденсатора $\langle t \rangle$. Оценить абсолютную погрешность измерения времени Δt по прибору.

9. Оценить абсолютную погрешность измерения напряжений U_0 и U по классу точности вольтметра: $\Delta U_0 = \Delta U = \frac{\gamma \cdot U_{\text{пред}}}{100}$.

10. Вычислить по формуле (3) емкость первого конденсатора. Рассчитать ее абсолютную погрешность по формуле

$$\Delta C = \langle C \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{\langle t \rangle}\right)^2 + \frac{\left(\frac{\Delta U_0}{U_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2}{\ln^2\left(\frac{U_0}{U}\right)}}$$

и относительную погрешность $\frac{\Delta C}{\langle C \rangle} \cdot 100 \%$. Записать окончательный результат: $C = (\langle C \rangle \pm \Delta C) \Phi$.

11. Поставить переключатель 4 (рис. 4.2) в положение «II», подключив второй конденсатор.

12. Повторить пп. 4–10 для конденсатора с другой емкостью.

13. Выбрать конденсатор с большей емкостью. Исследовать зависимость напряжения на этом конденсаторе от времени его разряда. Для этого каждый раз после зарядки конденсатора надо измерять время его разрядки t до определенных заранее и отличных друг от друга значений U . Измерения занести в табл. 3.1. Должно быть сделано 8–10 измерений времени разряда.

14. Построить (на миллиметровой бумаге) график зависимости напряжения на конденсаторе от времени его разряда $U = f(t)$.

15. Сделать вывод.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие физические явления, законы и величины исследуются в данной лабораторной работе?
2. Какие физические величины в работе измеряются прямыми методами измерения? Какими приборами проводятся их измерения?
3. Какие физические величины в работе измеряются косвенными методами измерения? Какие формулы используются для этого?
4. Какой метод используется при измерении емкости конденсатора? В чем суть этого метода?
5. От чего зависит время разряда конденсатора?
6. Записать закон изменения напряжения при разряде конденсатора.
7. Дать определение электроемкости проводника. От чего зависит электроемкость проводника? Записать единицу ее измерения.
8. Какие устройства называются конденсаторами? Для чего они служат?
9. Какие бывают виды конденсаторов?
10. Дать определение электроемкости конденсатора. От чего зависит электроемкость конденсатора? Записать единицу ее измерения.
11. Что называется пробивным напряжением конденсатора?
12. Плоский конденсатор. Записать формулу емкости плоского конденсатора.
13. Параллельное соединение конденсаторов. Записать формулу полной емкости батареи параллельно соединенных конденсаторов.
14. Последовательное соединение конденсаторов. Записать формулу полной емкости батареи последовательно соединенных конденсаторов.
15. Вывести расчетную формулу электроемкости конденсатора.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.

5. Расчетные формулы:

ёмкость конденсатора: $C =$

абсолютная погрешность: $\Delta C =$

6. Заданные в работе величины:

сопротивление резистора: $R =$ $\Delta R =$ $\frac{\Delta R}{R} =$

7. Результаты измерений для 1-го конденсатора:

напряжение зарядки: $U_0 =$ $\Delta U_0 =$ $\frac{\Delta U_0}{U_0} =$

напряжение при разряде $U =$ $\Delta U =$ $\frac{\Delta U}{U} =$

время разряда конденсатора:

№	1	2	3	4	5	6
t, c						

$\langle t \rangle =$ $\Delta t =$ $\frac{\Delta t}{t} =$

8. Расчет емкости 1-го конденсатора:

$\langle C_1 \rangle =$

$\Delta C_1 =$

$\frac{\Delta C_1}{\langle C_1 \rangle} \cdot 100 \% =$

Окончательный результат: $C_1 =$

9. Результаты измерений для 2-го конденсатора:

напряжение зарядки: $U_0 =$ $\Delta U_0 =$ $\frac{\Delta U_0}{U_0} =$

напряжение при разряде $U =$ $\Delta U =$ $\frac{\Delta U}{U} =$

время разряда конденсатора:

№	1	2	3	4	5	6
t, c						

$\langle t \rangle =$ $\Delta t =$ $\frac{\Delta t}{t} =$

10. Расчет емкости 2-го конденсатора:

$$\langle C_2 \rangle =$$

$$\Delta C_2 =$$

$$\frac{\Delta C_2}{\langle C_2 \rangle} \cdot 100 \% =$$

Окончательный результат: $C_2 =$

11. Построение графика разряда конденсатора большей емкости:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U, B										
t, c										

График $U = f(t)$ на миллиметровой бумаге (прилагается).

12. Вывод.

Лабораторная работа Э5

Исследование зависимости сопротивления спирали лампы от температуры

Цель работы: исследовать зависимость сопротивления спирали лампы накаливания от температуры.

Приборы и принадлежности: источник питания; лампа накаливания; реостат; вольтметр; миллиамперметр; ключ; термометр; соединительные провода.

Описание установки и метод измерений

Схема установки показана на рис. 5.1. Экспериментальная установка представлена на рис. 5.2.

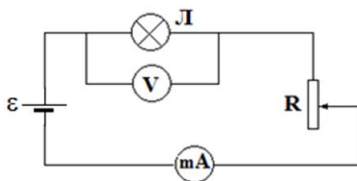


Рис. 5.1. Схема установки: V – вольтметр; mA – миллиамперметр; $Л$ – лампа накаливания; R – реостат; ε – источник

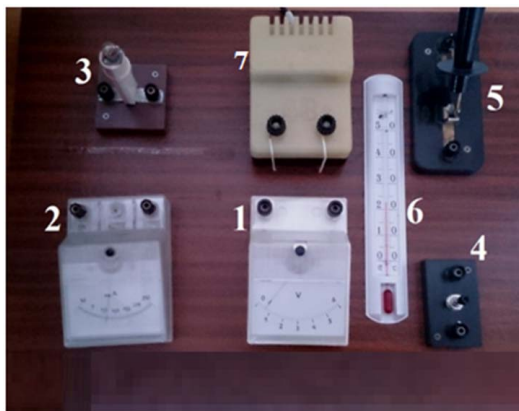


Рис. 5.2. Экспериментальная установка:
1 – вольтметр; 2 – миллиамперметр; 3 – лампа накаливания;
4 – реостат; 5 – ключ; 6 – термометр; 7 – источник питания

При изучении электрического тока мы сталкиваемся с понятием «электрическое сопротивление».

Электрический ток в металле возникает под действием внешнего электрического поля, которое вызывает упорядоченное движение электронов. Движущиеся под действием поля электроны рассеиваются на неоднородностях ионной решётки (на примесях, дефектах решётки, а также нарушениях периодической структуры, связанной с тепловыми колебаниями ионов). При этом электроны теряют импульс, а энергия их движения преобразуется во внутреннюю энергию кристаллической решётки, что и приводит к нагреванию проводника при прохождении по нему электрического тока.

Электрическим сопротивлением называется физическая величина, характеризующая свойства проводника препятствовать прохождению электрического тока.

Сопротивление проводника зависит от формы и размеров проводника, а также от свойств материала, из которого он изготовлен.

Для однородного цилиндрического проводника величина сопротивления рассчитывается по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (5.1)$$

где l — длина проводника; S — площадь его поперечного сечения; ρ — удельное сопротивление.

Удельное сопротивление ρ проводника определяется химической природой вещества и условиями, в частности температурой, при которых оно находится.

Для большинства металлов удельное сопротивление ρ проводника, а значит, и само сопротивление R с повышением температуры увеличивается. Это изменение может быть приближенно описано соотношениями:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0(1 + \alpha t), \\ R &= R_0(1 + \alpha t), \end{aligned} \quad (5.2)$$

где R_0 — сопротивление проводника при 0°C ; R — сопротивление проводника при температуре t ; α — температурный коэффициент сопротивления. Этот коэффициент α численно равен изменению сопротивления при нагревании проводника на 1°C , деленному на первоначальное сопротивление.

Согласно соотношению (2), сопротивление проводника с ростом температуры растет линейно.

При определенных низких температурах (порядка нескольких кельвин) у большой группы металлов и сплавов сопротивление скачком обращается в ноль. Это явление называется *сверхпроводимостью*. Оно было обнаружено в 1911 году Камерлинг-Оннесом для ртути.

В настоящей работе исследуется зависимость сопротивления спирали лампы накаливания от температуры.

Спираль лампы накаливания изготовлена из вольфрама. Для вольфрама температурный коэффициент сопротивления составляет $\alpha = 0,0048 \text{ град}^{-1}$.

Проволочная спираль лампы накаливания характеризуется определенным сопротивлением. Если через лампу накаливания пропускать электрический ток, то спираль будет нагреваться, то есть в ней будет происходить преобразование энергии электрического тока во внутреннюю энергию проводника. Увеличение внутренней энергии спирали лампы накаливания приводит к повышению ее температуры и сопротивления.

Начинать исследование будем от комнатной температуры. Тогда соотношение (2) будет иметь вид:

$$R = R_k(1 + \alpha \Delta t), \quad (5.3)$$

где R_k — сопротивление проводника при начальной комнатной температуре t_k ; R — сопротивление проводника при конечной температуре t .

Зная сопротивления «нагретого» и «холодного» проводника, а также температурный коэффициент сопротивления материала, из которого изготовлен проводник, определим приращение температуры проводника:

$$\Delta t = \frac{R - R_k}{\alpha R_k}. \quad (5.4)$$

Тогда конечная температура спирали лампы накаливания

$$t = t_k + \Delta t. \quad (5.5)$$

На рабочей установке (рис. 5.2) к выходным гнездам выпрямителя 7 подключена электрическая цепь, составленная из соеди-

ненных последовательно лампы накаливания 3, реостата 4 и миллиамперметра 2 постоянного тока. Параллельно лампе подключен вольтметр 1. Для изменения напряжения, приложенного к лампе, изменяют напряжение на реостате. Напряжение на реостате зависит от его сопротивления.

Обозначим напряжение выпрямителя U , напряжение на реостате U_p , напряжение на лампе U_l .

Напряжение на лампе равно разности выходного напряжения выпрямителя и напряжения на реостате: $U_l = U - U_p$.

Напряжение на выходе выпрямителя в ходе опыта не изменяется. Если напряжение на реостате максимально, то напряжение на лампе минимально. А если напряжение на реостате становится равным нулю, то напряжение на лампе достигает максимально возможного в условиях опыта значения и становится равным значению напряжения на выходе выпрямителя: $U_l = U$.

Исследуемое сопротивление спирали лампы накаливания рассчитывается из закона Ома для участка цепи:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (5.6)$$

Программа работы

1. Измерение напряжения и силы тока на лампе.
2. Расчет сопротивления и температуры спирали лампы накаливания.
3. Построение и анализ графика зависимости сопротивления спирали лампы накаливания от ее температуры $R(t)$.

Порядок работы

1. Ознакомиться с установкой.
2. Измерить термометром величину комнатной температуры t_k в лаборатории и занести ее значение в бланк отчета.
3. Вывести движок реостата в крайнее левое положение.
4. Замкнуть цепь. Измерить начальное напряжение на лампе. Оно будет минимальным ($\sim 0,2$ В). Измерить с помощью миллиамперметра силу тока, протекающего через лампу.

5. Занести начальные значения напряжения и силы тока в таблицу бланка отчета. Используя закон Ома, вычислить значение сопротивления спирали лампы при комнатной температуре

$$R_{\text{к}} = \frac{U_{\text{нач}}}{I_{\text{нач}}}.$$

6. Увеличивая напряжение на лампе (вращением движка реостата вправо) с интервалом 0,4 В до максимально возможного значения, измерять значения силы тока. Занести в таблицу значения напряжения и силы тока.

7. Рассчитать сопротивление спирали лампы $R = \frac{U}{I}$ для каждого из опытов.

8. Вычислить приращение температуры по формуле $\Delta t = \frac{R - R_{\text{к}}}{\alpha R_{\text{к}}}$.

9. Рассчитать значения температуры спирали лампы по формуле $t = t_{\text{к}} + \Delta t$.

10. Построить график зависимости сопротивления спирали лампы от ее температуры.

11. Проанализировать полученный график зависимости $R(t)$ и сделать вывод о характере изменения сопротивления спирали лампы при увеличении ее температуры.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие физические явления, законы и величины исследуются в данной лабораторной работе?
2. Какие физические величины в работе измеряются прямыми методами измерения? Какими приборами проводятся их измерения?
3. Какие физические величины в работе измеряются косвенными методами измерения? Какие формулы используются для этого?
4. Как в лабораторной работе регулируется значение напряжения на лампе?
5. Как в лабораторной работе рассчитывается сопротивление спирали лампы?
6. Вывести формулу конечной температуры спирали лампы накаливания.
7. Что называется электрическим сопротивлением? Чем оно обусловлено?

8. Как рассчитывается сопротивление цилиндрического проводника? От каких величин оно зависит? В каких единицах измеряется?
9. Что такое удельное сопротивление проводника? Чем определяется его значение? В каких единицах измеряется удельное сопротивление?
10. Какова зависимость сопротивления проводника от температуры?
11. Какова зависимость удельного сопротивления проводника от температуры?
12. Записать и сформулировать закон Ома для однородного участка цепи.
13. Для чего предназначены реостаты? Как изображается реостат на схемах?
14. Дать определение температурного коэффициента сопротивления.
15. В чем заключается суть явления сверхпроводимости?

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.
5. Расчетные формулы:

сопротивление спирали лампы $R =$

приращение температуры $\Delta t =$

температура спирали лампы $t =$

6. Результаты измерений и вычислений:

комнатная температура $t_k =$

№	Напряжение на лампе U , В	Сила тока, $I \cdot 10^{-3}$ А	Сопротивление спирали лампы, R , Ом	Приращение температуры Δt , °С	Температура спирали лампы t , °С
1					
2					
3					

№	Напряжение на лампе U , В	Сила тока, $I \cdot 10^{-3}$ А	Сопротивление спирали лампы, R , Ом	Прираще- ние темпе- ратуры Δt , °С	Температу- ра спирали лампы t , °С
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

7. График (на миллиметровой бумаге): $R = f(t)$.

8. Вывод.

Лабораторная работа Э6

Определение ЭДС методом компенсации

Цель работы: ознакомиться с одним из способов точных электрических измерений — методом компенсации и определить ЭДС неизвестного элемента.

Приборы и принадлежности: реохорд; гальванометр; источник тока; нормальный элемент; исследуемый элемент; переключатель; мультиметр.

Описание установки и метода измерений

Схема установки приведена на рис. 6.1, ее изображение — на рис. 6.2.

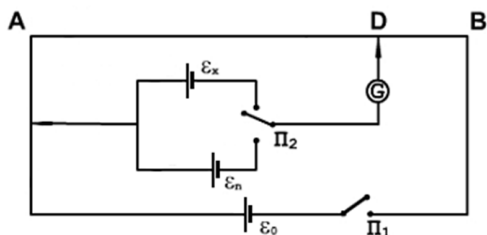


Рис. 6.1. Схема установки: ε_x — исследуемый источник тока; ε_n — нормальный элемент; ε_0 — дополнительный источник тока; АВ — реохорд; G — гальванометр; Π_1 , Π_2 — переключатели

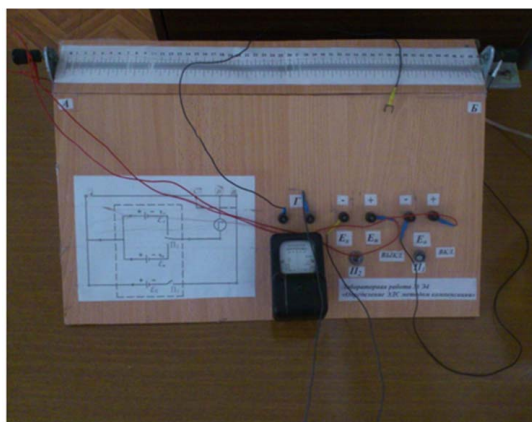


Рис. 6.2. Изображение экспериментальной установки

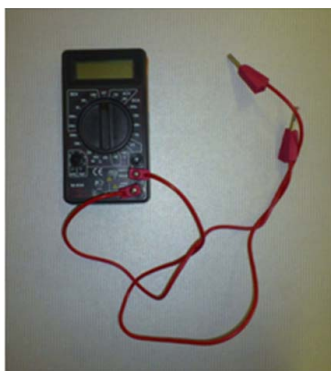
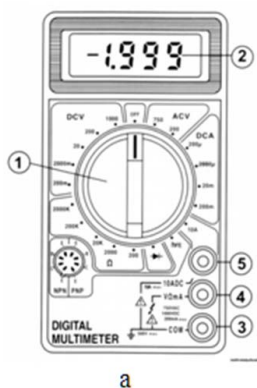


Рис. 6.3. Мультиметр: *а* – схема: 1 – переключатель рода работ и диапазонов; 2 – дисплей; 3 – разъём (гнездо) «COM» (общий); 4 – разъём «V, Ω , mA»; 5 – разъём «10 А» – для измерений токов на пределе 10 А; *б* – изображение

Метод компенсации является одним из основных методов точных лабораторных электрических измерений. Установка включает исследуемый источник тока с ЭДС ε_x , нормальный элемент с ЭДС ε_n , дополнительный источник тока с ЭДС ε_0 , гальванометр G , ключ Π_1 , переключатель Π_2 , реохорд. Реохорд представляет собой калиброванный провод, натянутый между контактами *A* и *B*, вдоль которого может перемещаться подвижный контакт *D*.

Сущность метода можно понять, анализируя принципиальную схему рабочей установки (рис. 6.4).

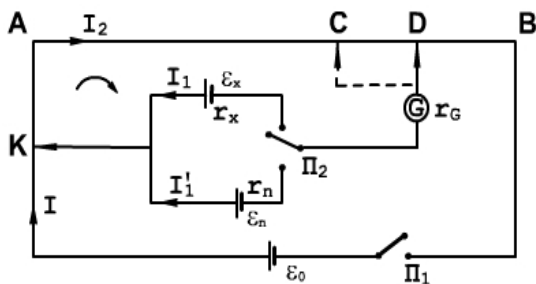


Рис. 6.4. Принципиальная схема рабочей установки

Если два элемента с различными ЭДС ε_0 и ε_x включены навстречу друг другу и $\varepsilon_x < \varepsilon_0$, то на калиброванной проволоке (реохорде) AB можно найти такую точку D , что ток в цепи гальванометра становится равным нулю. Применяя второе правило Кирхгофа для контура $ADG\varepsilon_x K$ (обход по часовой стрелке), получаем:

$$I_1(r_G + r_x) + I_2 R_{AD} = \varepsilon_x, \quad (6.1)$$

где r_G — сопротивление гальванометра; r_x — внутреннее сопротивление источника; R_{AD} — сопротивление реохорда на участке AD .

При отсутствии тока в цепи гальванометра, то есть при $I_1 = 0$, из уравнения (6.1) следует:

$$I_2 R_{AD} = \varepsilon_x. \quad (6.2)$$

Таким образом, падение напряжения на участке AD реохорда компенсирует значение электродвижущей силы ε_x .

Если вместо ε_x в схему включить нормальный элемент, ЭДС которого ε_n известна, то ток в цепи гальванометра будет равен нулю при положении контакта реохорда в некоторой точке C . Применяя второе правило Кирхгофа к контуру $ACG\varepsilon_n K$, получаем:

$$I'_1(r_G + r_n) + I'_2 R_{AC} = \varepsilon_n, \quad (6.3)$$

где r_n — внутреннее сопротивление нормального элемента; R_{AC} — сопротивление реохорда на участке AC .

Учитывая, что ток в цепи гальванометра равен нулю, то есть $I'_1 = 0$, получаем:

$$I'_2 R_{AC} = \varepsilon_n. \quad (6.4)$$

Таким образом, электродвижущая сила нормального элемента ε_n компенсируется падением напряжения на участке AC реохорда.

ЭДС нормального элемента очень мало меняется со временем и температурой. При температуре $t = 20^\circ \text{C}$ $\varepsilon_n = 1,0186 \text{ В}$.

Если $I_1 = 0$ и $I'_1 = 0$ (при отсутствии тока в гальванометре), то по первому правилу Кирхгофа ($\sum I_i = 0$) для точки K будем иметь: $I_2 = I$ и $I'_2 = I$, то есть $I_2 = I'_2$.

Разделив почленно соотношения (2) и (4), получим: $\varepsilon_x = \varepsilon_n \frac{R_{AD}}{R_{AC}}$. Сопротивления R_{AD} и R_{AC} вычислим по формуле

$$R_{AD} = \rho \frac{l_1}{S}, \quad R_{AC} = \rho \frac{l_2}{S},$$

где l_1 — длина AD реохорда; l_2 — длина AC реохорда. Тогда

$$\varepsilon_x = \varepsilon_n \frac{l_1}{l_2}. \quad (6.5)$$

Существенные достоинства метода компенсации перед другими методами измерения ЭДС следующие.

1. Сила тока через элементы, ЭДС которых ε_n и ε_x сравниваются, близка к нулю, поэтому падение напряжения внутри элементов, а также в проводах, соединяющих элементы, отсутствует и на результате определения ε_x не скажется.

2. Гальванометр работает как нулевой прибор, и градуировка его шкалы не отразится на точности измерений ε_x .

3. Величина ЭДС вспомогательной батареи ε_0 не входит в окончательный результат. Необходимо только, чтобы она с течением времени не изменялась.

4. Согласно соотношению (6.5), сравнение ЭДС двух элементов может быть практически сведено к сравнению двух сопротивлений (плеч реохорда), используемых при компенсационных измерениях.

Программа работы

1. Измерить плечо реохорда l_1 , падение напряжения на котором компенсирует ε_x .
2. Измерить плечо реохорда l_2 , падение напряжения на котором компенсирует ε_n .
3. Определить величину неизвестной ЭДС ε_x .
4. Измерить ЭДС ε_x мультиметром.

Порядок работы

1. Собрать схему (рис. 6.1).
2. После проверки схемы преподавателем или лаборантом включить электрическую цепь (ключ Π_1 перевести в положение «ВКЛ»).
3. Записать значение нормального элемента ε_n (оно указано на установке). Оценить абсолютную погрешность нормального элемента $\Delta\varepsilon_n$ как погрешность константы.

4. Подключить с помощью переключателя Π_2 неизвестный элемент с ЭДС ε_x . Перемещая подвижный контакт по калиброванной проволоке, найти на реохорде такую точку, чтобы ток через гальванометр стал равным нулю. Измерить длину плеча реохорда l_1 , падение напряжения на котором компенсирует ε_x .

5. Подключить с помощью переключателя Π_2 нормальный элемент с ЭДС ε_n . Перемещая подвижный контакт по калиброванной проволоке, найти на реохорде такую точку, чтобы ток через гальванометр стал равным нулю. Измерить длину плеча реохорда l_2 , падение напряжения на котором компенсирует ε_n .

6. Произвести измерения плеч реохорда (пп. 4–5) не менее шести раз.

7. Отключить установку от сети (ключ Π_1 перевести в положение «ВЫКЛ»).

8. Вычислить средние значения $\langle l_1 \rangle$ и $\langle l_2 \rangle$. Оценить по прибору их абсолютные погрешности $\Delta l_1 = \Delta l_2$.

9. Вычислить ЭДС ε_x исследуемого элемента по формуле (6.5). Рассчитать абсолютную погрешность по формуле

$$\Delta \varepsilon_x = \langle \varepsilon_x \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta \varepsilon_n}{\varepsilon_n} \right)^2 + \left(\frac{\Delta l_1}{\langle l_1 \rangle} \right)^2 + \left(\frac{\Delta l_2}{\langle l_2 \rangle} \right)^2}$$

и относительную погрешность: $\frac{\Delta \varepsilon_x}{\langle \varepsilon_x \rangle} \cdot 100 \%$. Записать окончательный результат: $\varepsilon_x = (\langle \varepsilon_x \rangle \pm \Delta \varepsilon_x) \text{ В}$.

10. Измерить ЭДС исследуемого элемента с помощью мультиметра (рис. 6.3), для чего черный щуп от разъема «СОМ» и красный щуп от разъема «V, Ω , mA» мультиметра подключить к клеммам неизвестного элемента с ЭДС ε_x . Переключатель из положения *OFF* перевести на предел измерения постоянного (*DCV*) напряжения. Для того, чтобы мультиметр не вышел из строя, переключатель желательно установить на максимально возможный предел измерений (1000 В), и только если показание при этом слишком мало, для получения более точного результата переключить на более низкий предел (200 В; 20 В; 2 В; 200 мВ). После измерения переключатель перевести обратно в положение *OFF*.

11. Сравнить результаты. Сделать вывод.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие физические явления, законы и величины исследуются в данной лабораторной работе?
2. Какие физические величины в работе измеряются прямыми методами измерения? Какими приборами проводятся их измерения?
3. Какие физические величины в работе измеряются косвенными методами измерения? Какие формулы используются для этого?
4. В чем суть метода компенсации?
5. В чем преимущества метода компенсации перед другими методами измерения ЭДС?
6. Что называется электрическим током? Каковы условия существования электрического тока?
7. Какие силы называются сторонними?
8. Что называется источником тока?
9. Дать определение электродвижущей силы источника тока. В каких единицах она измеряется?
10. Чему равна циркуляция напряженности поля сторонних сил вдоль всей цепи $\oint_l \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l} = \oint_l E_{l\text{ст}} dl = ?$
11. Сформулировать и записать первое правило Кирхгофа. Следствием какого закона оно является?
12. Сформулировать и записать второе правило Кирхгофа. Следствием какого закона оно является?
13. Что называется сопротивлением проводника? Записать единицу измерения сопротивления.
14. Записать формулу сопротивления цилиндрического проводника.
15. Вывести расчетную формулу в данной лабораторной работе.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.
5. Расчетные формулы:

ЭДС неизвестного элемента: $\varepsilon_x =$

абсолютная погрешность: $\Delta\varepsilon_x =$

6. Заданные в работе величины:

$$\text{ЭДС нормального элемента: } \varepsilon_n = \quad \Delta\varepsilon_n = \quad \frac{\Delta\varepsilon_n}{\varepsilon_n} =$$

7. Результаты измерений:

длина плеча реохорда l_1 :

№	1	2	3	4	5	6
l_1 , см						

$$\langle l_1 \rangle = \quad \Delta l_1 = \quad \frac{\Delta l_1}{\langle l_1 \rangle} =$$

длина плеча реохорда l_2 :

№	1	2	3	4	5	6
l_2 , см						

$$\langle l_2 \rangle = \quad \Delta l_2 = \quad \frac{\Delta l_2}{\langle l_2 \rangle} =$$

8. Расчет ЭДС неизвестного элемента:

$$\langle \varepsilon_x \rangle =$$

$$\Delta \varepsilon_x =$$

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

Окончательный результат: $\varepsilon_x =$

9. Измерение ЭДС неизвестного элемента мультиметром: $\varepsilon_x =$

10. Сравнение результатов. Вывод.

Лабораторная работа Э7

Исследование зависимости полезной мощности источника тока от сопротивления нагрузки

Цель работы: исследовать зависимость полезной мощности источника тока от сопротивления нагрузки.

Приборы и принадлежности: генератор напряжения ГН1; прибор комбинированный цифровой Щ4300; измерительный блок АВ1, содержащий вольтметр и амперметр; стенд с переменным сопротивлением; соединительные провода.

Описание установки и метода измерений

Принципиальная схема установки показана на рис. 7.1.

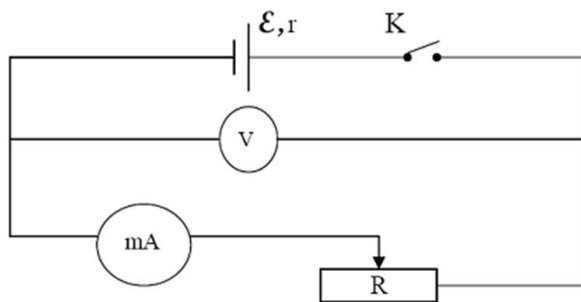


Рис. 7.1. Схема установки: V – вольтметр; mA – миллиамперметр; $\mathcal{E}$ – источник тока; R – реостат с регулируемым сопротивлением; K – ключ

Экспериментальная установка представлена на рис. 7.2. Она состоит из генератора напряжения ГН1, служащего источником тока, комбинированного цифрового прибора Щ4300 для измерения ЭДС, измерительного блока АВ1, включающего цифровые вольтметр и амперметр (рис. 7.3), а также стенда с переменным сопротивлением (рис. 7.4).



Рис. 7.2. Экспериментальная установка: измерительный блок АВ1, включающий в себя цифровые вольтметр и амперметр; прибор комбинированный цифровой Щ4300; генератор напряжения ГН1; стенд с переменным сопротивлением

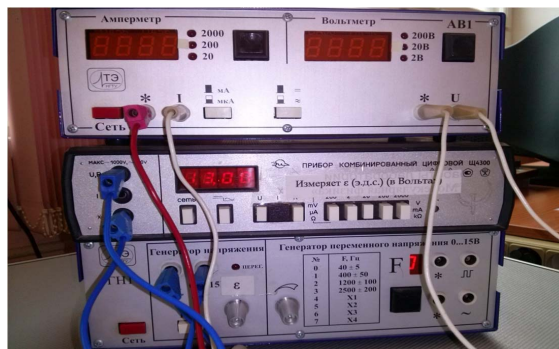


Рис. 7.3. Измерительный блок, включающий в себя цифровые вольтметр и амперметр; прибор комбинированный цифровой Щ4300; генератор напряжения ГН1

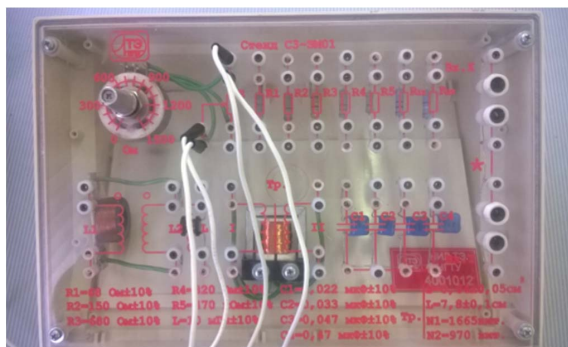


Рис. 7.4. Стенд с переменным сопротивлением

Для протекания в цепи электрического тока необходимо:

- наличие свободных носителей тока. Ими в проводящей среде могут быть электроны (в металлах) либо ионы (в электролитах);
- наличие электрического поля, энергия которого, каким-то образом восполняясь, расходовалась бы на упорядоченное движение заряженных частиц.

Если в цепи на носители тока действуют только силы электростатического поля, то происходит перемещение положительных зарядов от точек с большим потенциалом к точкам с меньшим потенциалом. В результате произойдет выравнивание потенциалов и ток прекратится.

Для поддержания в цепи постоянного тока необходимо иметь специальное устройство, способное создавать и поддерживать разность потенциалов. Подобное устройство называется *источником тока*. Силы, действующие на заряды в источниках тока, имеют не электростатическое происхождение и называются *сторонними*.

Эти силы могут быть обусловлены химическими процессами (гальванические элементы, аккумуляторы), диффузией носителей тока в неоднородной среде, электрическими полями, порождаемыми меняющимися во времени магнитными полями (генераторы) и т. д.

Характеристикой источника тока является электродвижущая сила ε , которая определяется как работа сторонних сил источника тока по перемещению единичного положительного заряда:

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q}. \quad (7.1)$$

Электродвижущая сила, сокращённо ЭДС, на самом деле силой не является. ЭДС — исторически сложившееся название этой величины, которая, как и потенциал, измеряется в вольтах.

Мощность, развиваемая источником, равна работе сторонних сил, совершаемой за единицу времени:

$$P = \frac{A_{\text{ст}}}{t} = \frac{\varepsilon q}{t} = \varepsilon I. \quad (7.2)$$

В замкнутой электрической цепи (рис. 7.5), содержащей источник тока и нагрузку, сила электрического тока рассчитывается по закону Ома для замкнутой цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (7.3)$$

где ε — ЭДС источника тока; r — внутреннее сопротивление источника; R — сопротивление внешнего участка цепи или сопротивление нагрузки.

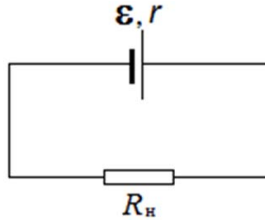


Рис. 7.5. Схема простейшей замкнутой электрической цепи

Тогда мощность, развиваемая источником, выражается:

$$P = \varepsilon I = \frac{\varepsilon^2}{(R + r)} = I^2 (R + r). \quad (7.4)$$

Из этой формулы видно, что мощность, развиваемая источником, выделяется на внутреннем сопротивлении источника r и на сопротивлении нагрузки R .

Полезной мощностью является мощность, выделяемая на нагрузочном сопротивлении R :

$$P_n = IU = I^2 R = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2}, \quad (7.5)$$

где U — внешнее напряжение или напряжение на нагрузке, которое рассчитывается по формуле

$$U = IR = \frac{\varepsilon R}{R + r}. \quad (7.6)$$

Из формул (7.3)–(7.6) видно, что при заданных значениях ε и r сила тока I , полная мощность P , полезная мощность P_n и внешнее напряжение U зависят от внешнего сопротивления в цепи (сопротивления нагрузки). Эти зависимости легко проанализировать теоретически.

С увеличением внешнего сопротивления от нуля $R = 0$ (короткое замыкание) до бесконечности $R = \infty$ (разомкнутая цепь):

1) ток в цепи (3) уменьшается от тока короткого замыкания до нуля:

$$I_{\text{кз}} = \frac{\varepsilon}{r}; \quad (7.7)$$

2) внешнее напряжение (6) возрастает от нуля до значения, равного ЭДС;

3) полная мощность (7.4) от своего максимального значения $P = I_2 r$ стремится к нулю при разомкнутой цепи;

4) полезная мощность P_n (7.5) равна нулю при коротком замыкании и стремится к нулю при увеличении сопротивления нагрузки до бесконечности. Таким образом, полезная мощность должна проходить через максимум. Чтобы выяснить условия, при которых полезная мощность достигает наибольшего значения, первую производную от (7.5) приравняем нулю:

$$\begin{aligned} \frac{dP_n}{dR} &= \frac{\varepsilon^2(R+r)^2 - 2\varepsilon^2 R(R+r)}{(R+r)^4} = \\ &= \frac{\varepsilon^2(R+r)(R+r-2R)}{(R+r)^4} = \frac{\varepsilon^2(R+r)(r-R)}{(R+r)^4} = 0. \end{aligned}$$

Это равенство выполняется при условии: $R = r$.

Таким образом, когда внешнее сопротивление цепи равно внутреннему сопротивлению источника тока, полезная мощность источника тока становится наибольшей.

Программа работы

1. Исследование зависимости силы тока от напряжения на нагрузке. Определение из графика $I = f(U)$ ЭДС источника и силы тока короткого замыкания $I_{\text{кз}}$. Расчет внутреннего сопротивления источника.
2. Исследование зависимости полезной мощности от сопротивления нагрузки. Определение из графика $P_n = f(R)$ значения сопротивления нагрузки, при котором полезная мощность максимальна.

Порядок работы

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой.
2. Установить на амперметре измерительного блока АВ1 предел измерения mA , на вольтметре задать род тока постоянный «=». Включить измерительный блок в сеть.
3. Прибор комбинированный цифровой Щ4300 подготовить к работе: род тока — постоянный «=»; режим работы — вольтметр « U »; предел измерения — «20». Подключить прибор к сети.
4. На генераторе напряжения ГН1 подключить сопротивление « $R_{вн}$ ». Включить в сеть.
5. Установить значение ЭДС источника тока из диапазона 10—18 В. Для этого подключить генератор напряжения ГН1 к прибору комбинированному цифровому Щ4300: одним проводом соединить гнезда «*», вторым проводом соединить гнездо «0...15» на генераторе с гнездом « U, R » на приборе Щ4300. Плавно поворачивая регулировочную ручку « ϵ » на генераторе напряжения (рис. 7.3), установить нужное значение ЭДС. Показания ЭДС отображаются на световом табло комбинированного цифрового прибора Щ4300. Записать значение ЭДС источника тока в отчет. Отсоединить от генератора ГН1 комбинированный цифровой прибор Щ4300.
6. Собрать схему в соответствии с рис. 7.1. Установить на стенде (рис. 7.3) минимальное значение сопротивления нагрузки — ручка плавной регулировки сопротивления должна находиться в крайнем левом положении.
7. После проверки правильности подключения элементов схемы инженером измерить величину силы тока I и напряжения U на нагрузке.
8. При измерении силы тока на амперметре подобрать такой диапазон «2000», «200» или «20» (с помощью большой чёрной кнопки переключения диапазонов), чтобы на табло амперметра высвечивалось три значащих цифры.
9. Аналогично при измерении напряжения выставить на вольтметре (с помощью большой чёрной кнопки переключения диапазонов) такой диапазон «200 В», «20 В» или «2 В», при котором измеряемое значение было бы представлено тремя значащими цифрами.

10. Плавнo изменяя переменное сопротивление нагрузки R (поворачивая ручку вправо), повторить измерения силы тока и напряжения не менее 10 раз. Данные занести в таблицу.

11. Построить график зависимости силы тока I от напряжения U .

12. Определить, экстраполируя график до пересечения с осями координат, ЭДС источника и силу тока короткого замыкания $I_{\text{кз}}$.

13. Рассчитать внутреннее сопротивление источника по формуле $r = \frac{\varepsilon}{I_{\text{кз}}}$.

14. Рассчитать значения сопротивления нагрузки по закону Ома для участка цепи: $R = \frac{U}{I}$.

15. Рассчитать значения полезной мощности по формуле $P_n = IU$.

16. Построить график зависимости полезной мощности от сопротивления нагрузки $P_n = f(R)$.

17. Определить из графика $P_n = f(R)$ сопротивление нагрузки, соответствующее максимальному значению полезной мощности.

18. Сравнить найденное из графика значение сопротивления нагрузки, соответствующее максимальному значению полезной мощности, с рассчитанным значением внутреннего сопротивления источника тока r .

19. Сделать вывод.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие физические явления, законы и величины исследуются в данной лабораторной работе?
2. Какие физические величины в работе измеряются прямыми методами измерения? Какими приборами проводятся их измерения?
3. Какие физические величины в работе измеряются косвенными методами измерения? Какие формулы используются для этого?
4. Как в лабораторной работе находится ток короткого замыкания?
5. Как в лабораторной работе определяется внутреннее сопротивление источника?
6. Что называется электрическим током? Каковы условия существования тока?

7. Какие силы называются сторонними?
8. Что называется источником тока?
9. Дать определение электродвижущей силы источника тока.
10. Дать определение мощности, развиваемой источником тока.
Записать ее формулу.
11. Дать определение полезной мощности. Записать ее формулу.
12. Вывести условие, при котором полезная мощность максимальна.
13. Записать закон Ома для однородного участка цепи и для замкнутой цепи.
14. Что называется током короткого замыкания?
15. Как рассчитать максимальное значение полезной мощности?

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.
5. Расчетные формулы:

полезная мощность источника тока: $P_n =$

сопротивление нагрузки: $R =$

внутреннее сопротивление источника тока: $r =$

6. Результаты измерений и вычислений:

ЭДС источника тока: $\varepsilon =$

№	U , В	I , А	R , Ом	P_n , Вт
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

7. График (на миллиметровой бумаге): $I = f(U)$.
8. Сила тока короткого замыкания: $I_{\text{кз}} =$
9. Расчет внутреннего сопротивления источника тока: $r =$
10. График (на миллиметровой бумаге): $P_n = f(R)$.
11. Сопротивление нагрузки, при котором полезная мощность максимальна: $R =$
12. Вывод.

Лабораторная работа Э8

Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли

Цель работы: измерить горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли с помощью тангенс-гальванометра и определить постоянную этого прибора.

Приборы и принадлежности: тангенс-гальванометр (тангенс-буссоль); источник постоянного тока; миллиамперметр, реостат со скользящим контактом; переключатель.

Описание установки и метода измерений

Основу экспериментальной установки (рис. 8.1, 8.2) составляет тангенс-гальванометр, представляющий собой плоскую вертикальную катушку, в центре которой помещена магнитная стрелка, способная вращаться вокруг вертикальной оси Z .

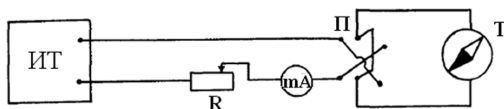


Рис. 8.1. Схема установки: ИТ — источник постоянного тока; R — реостат; П — переключатель; Т — тангенс-гальванометр; mA — миллиамперметр

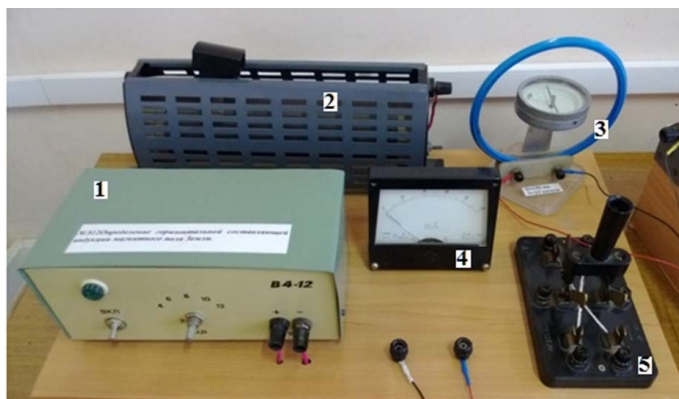


Рис. 8.2. Изображение установки: 1 — источник постоянного тока (выпрямитель В4-12); 2 — реостат со скользящим контактом; 3 — тангенс-гальванометр (тангенс-буссоль); 4 — миллиамперметр; 5 — переключатель

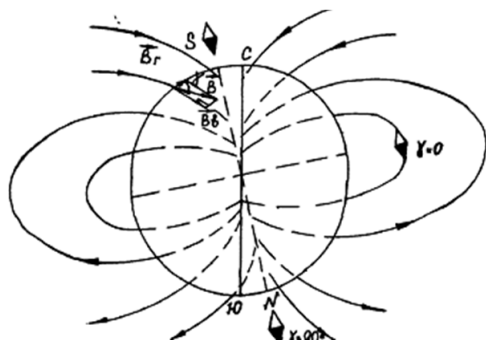


Рис. 8.3. Силовые линии магнитного поля Земли

Магнитное поле Земли практически совпадает с полем гипотетического стержнеобразного магнита, помещенного в центре земного шара и наклоненного к оси вращения примерно на 12° . В первом приближении силовые линии магнитного поля земного шара имеют вид, показанный на рис. 8.3, при этом у северного географического полюса находится южный магнитный полюс и наоборот. Геомагнитные полюса отстоят от географических на расстояние около 1200 км, причём с течением времени их положение несколько изменяется.

Природа земного магнетизма ещё до конца не выяснена, но установлено, что магнетизм Земли связан с процессами, проходящими в недрах самой планеты, например, с электрическими токами, циркулирующими внутри Земли.

Магнитное поле Земли защищает живую природу планеты от бомбардировки космическими частицами, образуя из них радиационные пояса. С магнетизмом Земли связаны также полярные сияния и другие явления, происходящие в околоземном пространстве.

Основными характеристиками магнитного поля Земли являются вектор магнитной индукции $\vec{B}$, который можно разложить на горизонтальную ($\vec{B}_r$) и вертикальную ($\vec{B}_\theta$) составляющие (рис. 8.3), а также магнитное склонение и магнитное наклонение γ .

Магнитным наклонением называется угол между вектором индукции магнитного поля Земли и горизонтальной плоскостью. На экваторе магнитное наклонение равно 0° , а на полюсах $\pm 90^\circ$.

Магнитное склонение — это угол между географическим и магнитным меридианами в данной области земного шара.

Горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли можно определить с помощью тангенс-гальванометра. Если плоскость катушки совпадает с плоскостью магнитного меридиана, то при отсутствии тока в катушке магнитная стрелка располагается в направлении магнитного меридиана и угол α равен 0 (рис. 8.4).

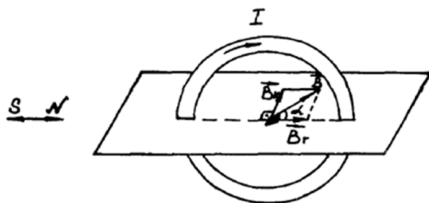


Рис. 8.4. Схема тангенс-гальванометра: SN — направление магнитного меридиана Земли; $\vec{B}_r$ — вектор горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли; I — ток в катушке тангенс-гальванометра; $\vec{B}_k$ — вектор индукции магнитного поля катушки с током; $\vec{B}$ — вектор индукции результирующего магнитного поля

При пропускании тока в катушке магнитная стрелка расположится под некоторым углом α к первоначальному положению. Это связано с тем, что катушка с током создает магнитное поле $\vec{B}_k$, которое накладывается на магнитное поле Земли $\vec{B}_r$. По принципу суперпозиции полей $\vec{B} = \vec{B}_r + \vec{B}_k$. Магнитная стрелка укажет направление результирующего поля $\vec{B}$.

Из схемы, показанной на рис. 8.4, следует, что $\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_k}{B_r}$, откуда:

$$B_r = \frac{B_k}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (8.1)$$

Индукция магнитного поля катушки радиусом R с числом витков N и током I находится по формуле

$$B_k = \frac{\mu_0 \mu I N}{2R}. \quad (8.2)$$

Подставив формулу (8.2) в отношение (8.1), получим:

$$B_r = \frac{\mu_0 \mu I N}{2R \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (8.3)$$

Измерив угол α , силу тока I и зная радиус катушки R и число витков в ней N , можно по формуле (8.3) определить горизонталь-

ную составляющую индукции магнитного поля Земли, которая для данной географической широты будет величиной постоянной.

Уравнение (8.3) можно представить в таком виде:

$$I = \frac{2B_r R}{\mu_0 \mu N} \operatorname{tg} \alpha. \quad (8.4)$$

Величина C , которая рассчитывается по формуле

$$C = \frac{2B_r R}{\mu_0 \mu N}, \quad (8.5)$$

называется постоянной тангенс-гальванометра.

С учётом этой замены соотношение (8.4) принимает вид:

$$I = C \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (8.6)$$

Таким образом, величина тока изменяется пропорционально тангенсу угла отклонения магнитной стрелки. Поэтому рассматриваемый прибор называется тангенс-гальванометром. Знание постоянной прибора C позволяет использовать тангенс-гальванометр в качестве амперметра.

Программа работы

1. Измерение углов отклонения магнитной стрелки при различных значениях силы тока в катушке.
2. Расчет горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли.
3. Определение постоянной тангенс-гальванометра.

Порядок работы

1. Ознакомиться с установкой.
2. Записать значения радиуса R и числа витков N катушки (указаны на установке) и абсолютную погрешность радиуса катушки ΔR .
3. Записать значения магнитной постоянной μ_0 , магнитной проницаемости воздуха μ и абсолютную погрешность магнитной постоянной $\Delta \mu_0$.
4. Подключить тангенс-гальванометр к соответствующим клеммам установки, предварительно установив ручку переключателя в вертикальное положение (цепь разомкнута) и выведя движок реостата в крайнее левое положение (рис. 8.2).

5. Установить плоскость катушки в плоскость магнитного меридиана, поворачивая тангенс-гальванометр до тех пор, пока конец магнитной стрелки не установится на 0° .

6. Замкнуть цепь переключателем П.

7. Установить, перемещая движок реостата, ток в катушке в диапазоне от 20 до 80 мА.

8. Определить по круговой шкале тангенс-гальванометра угол α_1 , соответствующий равновесному положению магнитной стрелки.

9. Изменить переключателем П направление тока в катушке. Определить угол отклонения магнитной стрелки α_2 , соответствующий другому направлению тока в катушке.

10. Рассчитать средний угол отклонения магнитной стрелки $\langle \alpha \rangle = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$.

11. Оценить по прибору абсолютную погрешность угла отклонения магнитной стрелки $\Delta\alpha$. Её следует выразить в радианах ($1^\circ = 1,75 \cdot 10^{-2}$ рад).

12. Вычислить по формуле (8.3) значение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли B_Γ . Рассчитать её абсолютную погрешность по формуле

$$\Delta B_\Gamma = \langle B_\Gamma \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta \mu_0}{\mu_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \alpha}{\sin \langle \alpha \rangle \cdot \cos \langle \alpha \rangle}\right)^2}$$

и относительную погрешность: $\frac{\Delta B_\Gamma}{\langle B_\Gamma \rangle} \cdot 100\%$. Записать окончательный результат: $B_\Gamma = (\langle B_\Gamma \rangle \pm \Delta B_\Gamma)$ Тл.

13. Определить по формуле (8.5) постоянную тангенс-гальванометра C . Рассчитать её абсолютную погрешность:

$$\Delta C = \langle C \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta \mu_0}{\mu_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta B_\Gamma}{\langle B_\Gamma \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2}$$

и относительную погрешность: $\frac{\Delta C}{\langle C \rangle} \cdot 100\%$. Записать окончательный результат: $C = (\langle C \rangle \pm \Delta C)$ А.

14. Установить, перемещая движок реостата, другое значение силы тока в катушке. Повторить действия, описанные в пп. 8–10. Рассчитать значение горизонтальной составляющей индукции маг-

нитного поля Земли B_{Γ} и постоянную тангенс-гальванометра C при другом значении силы тока.

15. Сравнить полученные результаты и сделать вывод.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие физические явления, законы и величины исследуются в данной лабораторной работе?
2. Какие физические величины в работе измеряются прямыми методами измерения? Какими приборами проводятся их измерения?
3. Какие физические величины в работе измеряются косвенными методами измерения? Какие формулы используются для этого?
4. Описать принцип работы тангенс-гальванометра.
5. Каков физический смысл постоянной тангенс-гальванометра?
6. Как располагается магнитная стрелка при отсутствии и при наличии тока в катушке? Ответ пояснить рисунками.
7. В чем суть принципа суперпозиции полей и как он применяется в данной работе?
8. Что представляет собой магнитное поле?
9. Дать определение основной характеристики магнитного поля. Записать единицу ее измерения.
10. Дать определение силовой линии магнитного поля. Каковы свойства силовых линий магнитного поля?
11. Что известно о природе земного магнетизма?
12. Как выглядит картина силовых линий магнитного поля Земли?
13. Какие характеристики определяют магнитное поле Земли?
14. Дать определение магнитного наклона и магнитного склонения.
15. Вывести рабочую формулу горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.
5. Расчетные формулы:

горизонтальная составляющая индукции магнитного поля Земли:

$$B_{\Gamma} =$$

$$\Delta B_{\Gamma} =$$

постоянная тангенс-гальванометра:

$$C =$$

$$\Delta C =$$

6. Постоянные величины, используемые в работе:

$$\text{магнитная постоянная } \mu_0 = \quad \Delta \mu_0 = \quad \frac{\Delta \mu_0}{\mu_0} =$$

магнитная проницаемость среды: $\mu =$

$$\text{радиус катушки: } R = \quad \Delta R = \quad \frac{\Delta R}{R} =$$

число витков в катушке: $N =$

7. Измерения:

сила тока в катушке:

$$I_1 = \quad \Delta I = \quad \frac{\Delta I}{I} =$$

угол отклонения магнитной стрелки:

$$\alpha_1 = \quad \alpha_2 = \quad \langle \alpha \rangle = \quad \Delta \alpha =$$

8. Расчет горизонтальной составляющей магнитного поля Земли:

$$\langle B_{\Gamma} \rangle =$$

$$\Delta B_{\Gamma} =$$

$$\frac{\Delta B_{\Gamma}}{\langle B_{\Gamma} \rangle} \cdot 100 \% =$$

Окончательный результат: $B_{\Gamma} =$

9. Расчет постоянной тангенс-гальванометра:

$$\langle C \rangle =$$

$$\Delta C =$$

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

Окончательный результат: $C =$

10. Измерения:

сила тока в катушке: $I_2 =$

угол отклонения магнитной стрелки:

$\alpha'_1 =$ $\alpha'_2 =$ $\langle \alpha' \rangle =$

11. Расчет горизонтальной составляющей магнитного поля
Земли и постоянной тангенс-гальванометра:

$\langle B_r \rangle =$

$\langle C \rangle =$

12. Вывод.

Лабораторная работа Э9в

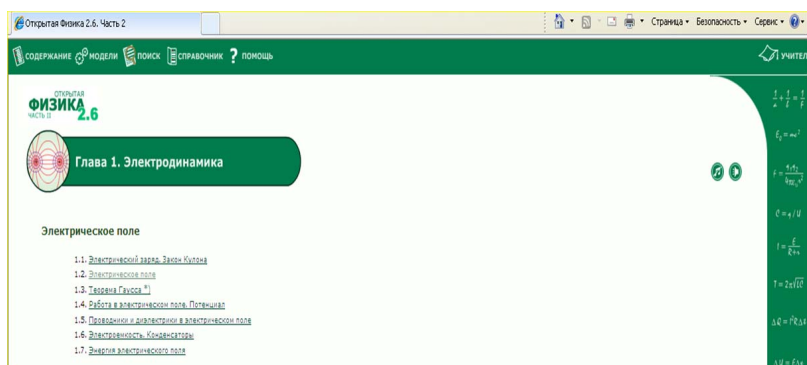
Изучение явления электромагнитной индукции

Цель работы: изучение явления электромагнитной индукции с помощью виртуальной модели. Экспериментальное подтверждение закономерностей явления электромагнитной индукции.

Приборы и принадлежности: мультимедийное учебное пособие «Открытая физика», версия 2.6., часть 2, модель 1.15 «Электромагнитная индукция».

Описание установки и метода измерений

Запустить программу «Открытая физика 2.6, часть 2». Выбрать в содержании «Глава 1. Электродинамика».



Затем в главном меню программы выбрать пункт «Модели». Откроется список всех виртуальных моделей.

Список моделей курса

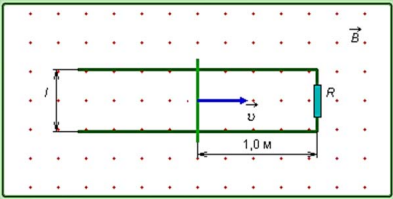
Глава 1. Электродинамика

- 1.1. Взаимодействие точечных зарядов
- 1.2. Электрическое поле точечных зарядов
- 1.3. Движение заряда в электрическом поле
- 1.4. Поле плоского конденсатора
- 1.5. Цепи постоянного тока
- 1.6. Конденсаторы в цепях постоянного тока
- 1.7. Взаимодействие параллельных токов
- 1.8. Рамка с током в магнитном поле
- 1.9. Магнитное поле кругового витка с током
- 1.10. Магнитное поле прямого тока
- 1.11. Магнитное поле соленоида
- 1.12. Движение заряда в магнитном поле
- 1.13. Масс-спектрометр
- 1.14. Селектор скоростей
- 1.15. Электромагнитная индукция
- 1.16. Опыты Фарадея
- 1.17. Генератор переменного тока
- 1.18. Конструктор гальванических элементов
- 1.19. Гальванический элемент

$\frac{1}{a} + \frac{1}{b}$
 $\epsilon_0 = \dots$
 $f = \frac{q}{4\pi}$
 $C = \dots$
 $I = \frac{R}{\dots}$
 $T = 2\pi$
 $\Delta Q = I$
 $\Delta U =$
 $f = 4\pi B$

Из списка выбрать модель 1.15. «Электромагнитная индукция». Загрузится компьютерная модель с кратким описанием функционала модели и демонстрацией явления электромагнитной индукции.

Модель 1.15. Электромагнитная индукция



$v = 5,0$ м/с $I = 0,50$ А $I = 0,000$ А
 $B = 0,05$ Тл $R = 2,00$ Ом $B = 0,000$ В
 $\Phi = 0,025$ Вб
 $t = 0,000$ с

Старт Сброс

Модель 1.15 «Электромагнитная индукция» является иллюстрацией закона электромагнитной индукции для случая, когда изменение магнитного потока вызывается перемещением участка проводящего контура в однородном и неизменном во време-

ни магнитном поле. Возникновение ЭДС индукции объясняется в этом случае действием силы Лоренца на электроны в движущемся проводнике.

В компьютерной модели можно изменять индукцию магнитного поля B , скорость движения проводника V , сопротивление контура R и длину l движущегося проводника.

На дисплее высвечиваются для любого момента времени значения ЭДС индукции $\delta_{\text{инд}}$, индукционного тока I , магнитного потока Φ и времени t , за которое проводник проходит расстояние 1 м.

Явление электромагнитной индукции было открыто в 1831 году английским физиком М. Фарадеем. Суть этого явления: в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока, охватываемого этим контуром, возникает электрический ток, получивший название индукционного.

Обобщая результаты своих многочисленных опытов, Фарадей пришел к количественному закону электромагнитной индукции. При изменении сцепленного с контуром магнитного потока в контуре возникает индукционный ток, а это указывает на наличие в цепи электродвижущей силы, которая получила название *ЭДС индукции*.

Закон Фарадея: ЭДС индукции в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi_B}{dt}.$$

Магнитный поток через элементарную площадку dS рассчитывается по формуле

$$d\Phi_B = \vec{B}d\vec{S} = B \cdot dS \cos \alpha = B_n dS,$$

где dS — площадка, которая пронизывается векторами магнитной индукции; $B_n = B \cos \alpha$ — проекция вектора $\vec{B}$ на направление нормали $\vec{n}$ к площадке; α — угол между $\vec{n}$ и $\vec{B}$.

Если площадку, пронизываемую векторами магнитной индукции, представить как $S = l \cdot x$ (рис. 9.1), где l — длина движущегося проводника; x — расстояние, которое проходит проводник, то магнитный поток через элементарную площадку dS можно записать в виде: $d\Phi_B = B_n dS = B_n d(l \cdot x) = B_n l \cdot dx$.

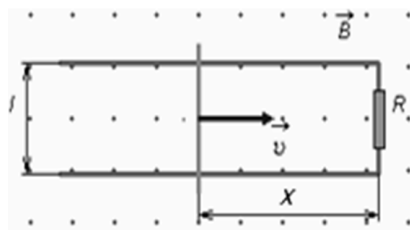


Рис. 9.1. Площадка, пронизываемая силовыми линиями магнитного поля

Тогда ЭДС индукции запишем:

$$\varepsilon_i = \frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{B_n l \cdot dx}{dt} = B_n l \cdot \frac{dx}{dt} = B_n l V,$$

где V – скорость движения проводника.

С другой стороны, используя закон Ома для замкнутой цепи, ЭДС можно записать: $\varepsilon_i = I_i R$.

Приравняем эти выражения: $I_i R = B_n l V$, отсюда получим

$$I_i = \frac{B_n l}{R} V.$$

По условию выполнения лабораторной работы величины: магнитная индукция поля B , длина движущегося проводника и сопротивление контура не изменяются. Изменяя в работе скорость движения перемычки, будем определять индукционный ток.

Построим график зависимости $I_i = f(V)$. Полученная зависимость должна быть линейная. Найдём тангенс наклона этой зависимости $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta I_i}{\Delta V}$. Этот тангенс наклона, найденный экспериментально, должен быть равен значению $\frac{B_n l}{R}$, которое найдём расчётом.

Таким образом, получили итоговое соотношение: $\frac{\Delta I_i}{\Delta V} = \frac{B_n l}{R}$.

Эта формула выражает закона Фарадея, описывающий явление электромагнитной индукции, в форме, удобной для проверки с помощью виртуальной модели.

Программа работы

1. Экспериментальное определение характеристик явления электромагнитной индукции: ЭДС индукции $\delta_{\text{инд}}$, индукционного тока I .
2. Проверка закона Фарадея для явления ЭМИ.

Порядок работы

1. Получить у преподавателя номер своего маршрута и выбрать соответствующие исходные данные для выполнения лабораторной работы.

Таблица 9.1

Исходные данные

Маршрут	R , Ом	B_1 , Тл	B_2 , Тл	B_3 , Тл	L , м	V , м/с
I и IV	1	0,030	0,050	0,070	0,7	2–10
II и V	2	0,040	0,060	0,080	0,8	2–10
III и VI	3	0,050	0,070	0,090	1,0	2–10

2. Загрузить виртуальную модель 1.15. Установить исходные числовые значения, указанные в табл. 9.1, согласно выданному маршруту.

3. Установить начальное значение скорости движения переключки $V = 2$ м/с. Нажать кнопку «Старт». По окончании движения переключки записать с экрана монитора значения ЭДС индукции E_i и индукционного тока I_i и занести эти значения в табл. 9.2.

Таблица 9.2

Результаты измерений при $B_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ Тл

V , м/с	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E_i , В									
I_i , мА									

4. Повторите измерения п. 2 для двух других указанных в маршруте значений индукции магнитного поля. Полученные результаты запишите в табл. 9.3 и 9.4.

Таблица 9.3

Результаты измерений при $B_2 = \underline{\hspace{1cm}}$ Тл

V , м/с	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E_i , В									
I_i , мА									

Таблица 9.4

Результаты измерений при $B_3 = \text{--- Тл}$

$V, \text{ м/с}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E_i, \text{ В}$									
$I_i, \text{ мА}$									

5. Постройте на миллиметровой бумаге графики зависимости индукционного тока от скорости движения переключки $I_i = f(V)$ для трех значений индукции магнитного поля.

6. Определите из графика тангенс угла наклона по формуле $\text{tg}(\varphi)_{\text{эксп}}$.

7. Вычислите для каждой прямой отношение $\frac{BL}{R}$.

8. Занесите полученные значения в табл. 9.5.

Таблица 9.5

Результаты расчетов

Номер измерения	$B, \text{ Тл}$	$\text{tg } \varphi = \frac{\Delta I_i}{\Delta V}, \text{ А} \cdot \text{ с/м}$	$\frac{BL}{R}, \text{ А} \cdot \text{ с/м}$
1			
2			
3			

9. Если тангенс угла наклона, определенный экспериментально, равен или близок по значению отношению $\frac{B_n l}{R}$, которое найдено расчетом, значит, в лабораторной работе экспериментально был подтвержден закон Фарадея.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие физические явления, законы и величины исследуются в данной лабораторной работе?
2. Какие физические величины надо выставить на виртуальной модели? Какие из этих величин в процессе работы остаются неизменными, а какие надо изменять?

3. Какие графики необходимо построить в данной лабораторной работе?
4. Какие физические величины в работе надо определить из графика?
5. Какие физические величины в работе рассчитываются по формуле?
6. Дать определение магнитного потока. Записать формулу.
7. Способы изменения магнитного потока.
8. Дать определение явления электромагнитной индукции.
9. Сформулировать и записать закон электромагнитной индукции.
10. Какое поле является вихревым?
11. Что такое ток Фуко?
12. Дать определение явления самоиндукции.
13. Сформулировать и записать закон самоиндукции.
14. Чем отличается электрическое поле, созданное точечным зарядом, от электрического поля, появляющегося при ЭМИ?
15. Вывести формулу ЭДС индукции, возникающей при движении проводника в магнитном поле.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.
5. Расчетные формулы:
6. Исходные данные:

Таблица 1

Исходные данные

Номер маршрута	R , Ом	B_1 , Тл	B_2 , Тл	B_3 , Тл	L , м	V , м/с

7. Результаты измерений:

Таблица 2

Результаты измерений при $B_1 = \text{___ Тл}$

$V, \text{ м/с}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E_i, \text{ В}$									
$I_i, \text{ мА}$									

Таблица 3

Результаты измерений при $B_2 = \text{___ Тл}$

$V, \text{ м/с}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E_i, \text{ В}$									
$I_i, \text{ мА}$									

Таблица 4

Результаты измерений при $B_4 = \text{___ Тл}$

$V, \text{ м/с}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E_i, \text{ В}$									
$I_i, \text{ мА}$									

8. Графики зависимости индукционного тока от скорости движения перемычки $I_i = f(V)$ для трех значений индукции магнитного поля (на миллиметровой бумаге).

9. Результаты вычислений:

Таблица 5

Результаты вычислений

Номер измерения	$B, \text{ Тл}$	$\text{tg } \varphi = \frac{\Delta I_i}{\Delta V}, \text{ А} \cdot \text{ с/м}$	$\frac{BL}{R}, \text{ А} \cdot \text{ с/м}$
1			
2			
3			

10. Сравнение результатов.

11. Вывод.

Лабораторная работа Э10

Исследование намагничивания ферромагнетика с помощью осциллографа

Цель работы: исследовать петлю гистерезиса ферромагнитного образца тороидальной формы.

Приборы и принадлежности: установка с исследуемым образцом; осциллограф; источник питания переменного тока частотой 50 Гц.

Описание установки и метода измерений

Принципиальная схема установки дана на рис. 10.1, изображение экспериментальной установки приведено на рис. 10.2.

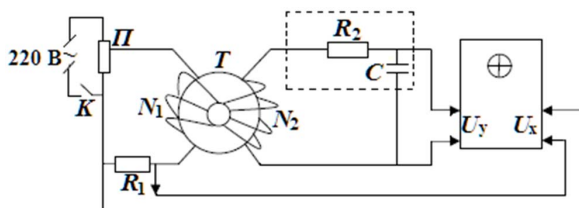


Рис. 10.1. Схема установки: П — потенциометр; Т — тороид; R_2C — интегрирующая цепочка; R_1 — низкоомный резистор; К — ключ



Рис. 10.2. Изображение экспериментальной установки

Исследование кривых гистерезиса, определение коэрцитивной силы и остаточной индукции осуществляется в работе с помощью осциллографического метода. Осциллографический метод измерений характеристик ферромагнетика основан на наблюдении петли гистерезиса на экране осциллографа.

Для получения петли гистерезиса необходимо подать на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа напряжение, пропорциональное напряженности H магнитного поля в образце, а на вертикально отклоняющие пластины — напряжение, пропорциональное магнитной индукции B .

Исследуемым веществом в лабораторной работе является железо, из которого изготовлен сердечник тороида T (рис. 10.1). Первичная обмотка тороида с числом витков N_1 питается от сети переменного тока частотой 50 Гц. С помощью потенциометра Π можно задавать величину напряжения. На горизонтально отклоняющие пластины осциллографа (вход X) подается напряжение $U_1 = U_x$ с низкоомного сопротивления резистора R_1 . Это напряжение пропорционально напряженности поля H в образце. Если сила тока первичной цепи равна I_1 , то величина напряжения определяется по формуле

$$U_x = U_1 = I_1 R_1, \quad (10.1)$$

В то же время напряженность магнитного поля H в тороиде прямо пропорциональна числу ампер-витков первичной обмотки:

$$H = I_1 \frac{N_1}{l} = I_1 n_1, \quad (10.2)$$

где l — длина образца; n_1 — число витков на единицу длины тороида.

Из выражений (1) и (2) следует:

$$U_x = \frac{H}{n_1} R_1. \quad (10.3)$$

Значение электродвижущей силы, индуцируемой во вторичной обмотке:

$$\varepsilon = - \frac{d\psi}{dt} = N_2 S \frac{dB}{dt}, \quad (10.4)$$

где потокосцепление по определению: $\psi = BS N_2$; B — индукция магнитного поля тороида; N_2 — число витков вторичной обмотки; S — площадь поперечного сечения тороида.

Из выражения (10.4) видно, что если сразу подать напряжение, возникающее на вторичной обмотке, на вертикально отклоняющие пластины осциллографа (вход Y), то это напряжение U_y будет пропорционально не индукции B , а изменению индукции $\frac{dB}{dt}$. Поэтому во вторичную цепь включается интегрирующая R_2C -цепочка, состоящая из конденсатора C и высокоомного сопротивления R_2 . В этом случае напряжение, подаваемое на вход Y осциллографа с конденсатора емкостью C , будет равно:

$$U_y = U_c = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int I_2 dt, \quad (10.5)$$

где q — заряд конденсатора; I_2 — сила тока во вторичной цепи.

Величину силы тока I_2 можно выразить исходя из 2-го правила Кирхгофа:

$$I_2 = \frac{\varepsilon}{R_2 + R_C + R_{\text{обм}}} = \frac{\varepsilon}{R}, \quad (10.6)$$

где R_2 — высокоомное сопротивление; R_C — сопротивление конденсатора; $R_{\text{обм}}$ — сопротивление вторичной обмотки; R — общее сопротивление вторичной цепи.

Тогда, подставив выражения (6) и (4) в формулу (5), окончательно получим:

$$U_y = \frac{1}{C} \int \frac{N_2 S}{R} \frac{dB}{dt} dt = \frac{N_2 S}{RC} B. \quad (10.7)$$

Следовательно, напряжение, подаваемое с конденсатора C на вход Y осциллографа, пропорционально индукции B в образце.

Из приведенных рассуждений ясно, что если подать напряжение U_1 с сопротивления R_1 на вход X осциллографа, а напряжение U_c конденсатора на вход Y , то след электронного луча за один период синусоидального напряжения опишет на экране в соответствующем масштабе кривую $B = f(H)$, то есть полную петлю гистерезиса, а в каждый следующий период в точности ее повторит. Поэтому на экране будет видна неподвижная петля гистерезиса. Изменяя силу тока в первичной цепи с помощью потенциометра Π , получим на экране осциллографа последовательный ряд (семейство) различных петель гистерезиса, координаты вершин a_x и a_y которых необходимо фиксировать в работе. Значения напряженности H и ин-

дукции B , соответствующие координатам a_x и a_y , можно выразить из соотношений (10.3) и (10.7), представленных в виде:

$$H = \frac{n_1}{R_1} U_x, \quad B = \frac{RC}{N_2 S} U_y. \quad (10.8)$$

Величины напряжений U_x и U_y можно определить, зная величину напряжений j_x и j_y , вызывающих отклонение электронного луча на одно деление в направлении осей X и Y при данном усилении (j_x, j_y чувствительности) осциллографа. Тогда

$$U_x = j_x a_x; \quad U_y = j_y a_y, \quad (10.9)$$

где a_x и a_y — координаты осей X и Y соответственно.

С учетом формул (10.9) выражения (10.8) для определения напряженности магнитного поля H и индукции B будут иметь вид:

$$H = \frac{n_1}{R_1} j_x a_x = k_1 a_x, \quad B = \frac{RC}{N_2 S} j_y a_y = k_2 a_y, \quad (10.10)$$

где $k_1 = \frac{n_1}{R_1} j_x$ и $k_2 = \frac{RC}{N_2 S} j_y$ — коэффициенты, размерности которых

$[k_1] = \frac{\text{А}}{\text{м} \cdot \text{дел}}; [k_2] = \frac{\text{Тл}}{\text{дел}}$. Численные значения этих коэффициентов приведены на установке.

Магнитная проницаемость рассчитывается по формуле

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}. \quad (10.11)$$

Программа работы

1. Получение на экране осциллографа петли магнитного гистерезиса.
2. Определение основных характеристик ферромагнетика (H_c , B_r , $\mu_{\text{пред}}$).
3. Построение графика зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля $B = f(H)$.
4. Построение графика зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля $\mu = \mu(H)$.

Порядок работы

1. Ознакомиться с приборами, предназначенными для выполнения данной лабораторной работы: осциллографом и потенциометром.

2. Записать числовые значения коэффициентов k_1 и k_2 . Они приведены на установке.

3. Собрать схему установки согласно рис. 10.2, подключив входные гнезда «X» и «Y» на осциллографе к соответствующим клеммам на потенциометре.

4. Установить регулировочную ручку потенциометра в крайнее правое положение.

5. После проверки схемы лаборантом или преподавателем включить осциллограф и потенциометр в сеть 220 В.

6. На экране осциллографа должна высветиться петля гистерезиса.

7. Если на передней панели осциллографа имеются регулировочные ручки «усиление по вертикали» и «усиление по горизонтали», то постараться увеличить размер петли гистерезиса до максимального размера. Петля должна занимать большую часть экрана. После регулировки осциллографа изменять усиление по обеим осям в течение всех последующих измерений нельзя!

8. Перенести полученную петлю с экрана на миллиметровую бумагу.

9. Определить и записать в таблицу координаты a_x и a_y вершины предельной петли гистерезиса в делениях сетки на экране осциллографа.

10. Вычислить напряженность H магнитного поля и магнитную индукцию B по формулам: $H = k_1 a_x$; $B = k_2 a_y$.

11. Определить и записать в таблицу координату точки, соответствующей значению коэрцитивной силы. Вычислить коэрцитивную силу по формуле $H_c = k_1 a_{xc}$.

12. Определить и записать в таблицу координату точки, соответствующей значению остаточной индукции. Вычислить остаточную индукцию B_r по формуле $B_r = k_2 a_{yr}$.

13. Уменьшить значение напряженности магнитного поля в тороиде, поворачивая плавно регулировочную ручку потенциометра немного влево. Определить координаты вершин наблюдаемой новой петли гистерезиса и записать их в таблицу.

14. Получить на экране осциллографа еще 6–8 петель гистерезиса, уменьшая каждый раз размер петли, пока петля не стянется в точку. Необходимо тщательно определять координаты вершин всех наблюдаемых петель гистерезиса и записывать их в таблицу.

15. Вычислить по соответствующим формулам напряженность H магнитного поля и индукцию B по координатам вершин a_x и a_y для всех полученных петель. Результаты занести в таблицу.

16. Построить на миллиметровой бумаге по данным таблицы основную кривую намагничивания $B = B(H)$.

17. Рассчитать по данным таблицы магнитную проницаемость для всех значений напряженности магнитного поля по формуле

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

18. Построить на миллиметровой бумаге график зависимости $\mu = \mu(H)$.

19. Сравнить график зависимости $B = B(H)$ для ферромагнетика с полученным экспериментально в ходе лабораторной работы.

20. Сравнить график зависимости $\mu = \mu(H)$ для ферромагнетика с полученным экспериментально в ходе лабораторной работы.

21. Сделать вывод.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие физические явления, законы и величины исследуются в данной лабораторной работе?
2. Какие физические величины в работе измеряются прямыми методами измерения? Какими приборами проводятся их измерения?
3. Какие физические величины в работе измеряются косвенными методами измерения? Какие формулы используются для этого?
4. Какой метод используется в лабораторной работе для исследования ферромагнетика? Описать суть этого метода.

5. Как определяются напряженность и индукция магнитного поля при осциллографическом методе исследования?
6. Каков физический смысл магнитной индукции в магнетике?
7. Объяснить, как происходит намагничивание ферромагнетиков?
8. В чем заключается суть явления гистерезиса? Что такое петля гистерезиса?
9. Почему значение магнитной проницаемости для ферромагнетиков велико?
10. Что называется остаточной индукцией? Как можно объяснить остаточную индукцию?
11. Что такое коэрцитивная сила?
12. Что такое точка Кюри?
13. Какими способами можно размагнитить образец?
14. Как выглядит график зависимости $B = f(H)$ для ферромагнетика? Проанализируйте его.
15. Как выглядит график зависимости $\mu = \mu(H)$ для ферромагнетика? Проанализируйте его.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.
5. Расчетные формулы:

напряженность магнитного поля: $H =$

магнитная индукция: $B =$

магнитная проницаемость: $\mu =$

6. Постоянные величины, используемые в работе:

$k_1 =$

$k_2 =$

7. Измерения и вычисления для предельной петли гистерезиса:

$a_x =$

$a_y =$

$a_{xc} =$

$a_{yr} =$

8. Расчеты:

напряженность магнитного поля: $H_1 =$

магнитная индукция: $B_1 =$

магнитная проницаемость: $\mu_1 =$

коэрцитивная сила: $H_c =$

остаточная индукция: $B_r =$

9. Таблица результатов измерений и вычислений:

№	1	2	3	4	5	6	7	8
a_x , дел								
a_y , дел								
H , А/м								
B , Тл								
μ								

10. График $B = f(H)$ на миллиметровой бумаге (прилагается).

11. График $\mu = \mu(H)$ на миллиметровой бумаге (прилагается).

12. Вывод.

Библиографический список

1. Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для инженерно-технических специальностей вузов / Т. И. Трофимова. — 24-е изд., стер. — Москва : Академия, 2020. — 557, [1] с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-4468-0333-1.
2. Трофимова, Т. И. Справочник по физике для студентов и абитуриентов / Т. И. Трофимова. — Москва : Астрель [и др.], 2005. — 400 с. — ISBN 5-17-028261-3.
3. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 4 томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по техническим направлениям и специальностям / И. В. Савельев ; под общ. ред. В. И. Савельева. — 2-е изд., стер. — Москва : КноРус, 2012. — 570 с. — ISBN 978-5-406-02589-5.
4. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. В 5 томах. Том 3. Электричество : учеб. пособие для вузов / Д. В. Сивухин. — Изд. 5-е, стер. — Москва : Физматлит, 2006. — 654 с. — ISBN 5-9221-0673-2.
5. Детлаф, А. А. Курс физики : учеб. пособие для студентов вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. — 10-е изд., стер. — Москва : Академия, 2015. — 719, [1] с. — (Высшее образование).
6. Яворский, Б. М. Справочник по физике : для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, А. К. Лебедев. — 8-е изд., перераб. и испр. — Москва : Оникс [и др.], [2008]. — 1054 с. — ISBN 978-5-488-01477-0. — ISBN 978-985-16-4694-0.
7. Чертов, А. Г. Физические величины : (терминология, определения, обозначения, размерности, единицы) : [справочное пособие] / А. Г. Чертов. — Москва : Высшая школа, 1990. — 334, [1] с. — ISBN 5-06-001011-2.
8. Кортнев, А. В. Практикум по физике / А. В. Кортнев, Ю. В. Рублев, А. Н. Куценко. — Изд. 3-е, доп. и перераб. — Москва : Высшая школа, 1965. — 568 с.
9. Лабораторный практикум по физике : учеб. пособие для вузов / А. С. Ахматов, В. М. Андреевский, А. И. Кулаков [и др.] ; под ред. А. С. Ахматова. — Москва : Высшая школа, 1980. — 360 с.

10. Физический практикум : Механика и молекулярная физика : [для университетов] / сост.: А. Г. Белянкин [и др.] ; под ред. В. И. Иверновой. — 2-е изд., перераб. — Москва : Наука, 1967. — 352 с.
11. Сарафанова, В. А. Лабораторный практикум по физике. В 3 частях. Часть 2. Электричество и магнетизм : для студентов, обучающихся по техническим направлениям подготовки бакалавриата и специалитета / В. А. Сарафанова, С. Н. Потемкина, И. С. Ясников ; Тольяттинский государственный университет. — Тольятти : Издательство ТГУ, 2016. — 150 с. — URL: dspace.tltsu.ru/xmlui/handle/123456789/2934 (дата обращения: 02.11.2024). — ISBN 978-5-8259-0993-6.

Образец оформления титульного листа бланка отчета

Тольяттинский государственный университет
Кафедра «Общая и теоретическая физика»

Группа _____
Студент _____
Преподаватель _____

ОТЧЕТ
о лабораторной работе № _____
Название лабораторной работы

Допуск к работе:
Работа выполнена:
Теория зачтена:

Тольятти, 2025

1. Математические формулы:

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta \pm \cos \alpha \cdot \sin \beta;$$

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha;$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta \mp \sin \alpha \cdot \sin \beta;$$

$$\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha;$$

$$\frac{d}{dx}(x^n) = nx^{n-1};$$

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{1}{x}\right) = -\frac{1}{x^2};$$

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{1}{x^n}\right) = -\frac{n}{x^{n+1}};$$

$$\frac{d}{dx}(e^x) = e^x;$$

$$\frac{d}{dx}(\ln x) = \frac{1}{x};$$

$$\frac{d}{dx}(\operatorname{tg} x) = \frac{1}{\cos^2 x};$$

$$\frac{d}{dx}(\sin x) = \cos x;$$

$$\frac{d}{dx}(\cos x) = -\sin x;$$

$$\int u dv = uv - \int v du;$$

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} \quad (n \neq -1);$$

$$\int \frac{dx}{x} = \ln x;$$

$$\int \frac{dx}{x^2} = -\frac{1}{x};$$

$$\int \sin x dx = -\cos x;$$

$$\int \cos x dx = \sin x;$$

$$\int e^x dx = e^x;$$

$$\int_0^{\infty} x^n e^{-x} dx = n!;$$

$$\int_0^{\infty} x^n e^{-ax} dx = \frac{n!}{a^{n+1}};$$

$$\int_0^{\infty} x e^{-ax^2} dx = \frac{1}{2a};$$

$$\int_0^{\infty} x^3 e^{-ax^2} dx = \frac{1}{2} a^{-2};$$

$$\int_0^{\infty} \frac{x dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^2}{6};$$

$$\int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15}.$$

2. Десятичные приставки к названиям единиц

Т — тера (10^{12})

д — деци (10^{-1})

н — нано (10^{-9})

Г — гига (10^9)

с — санти (10^{-2})

п — пико (10^{-12})

М — мега (10^6)

м — милли (10^{-3})

ф — фемто (10^{-15})

к — кило (10^3)

мк — микро (10^{-6})

а — атто (10^{-18})

3. Внесистемные величины

1 ч = 3600 с

1 сут = 86 400 с

1 год = 365,25 сут = $3,16 \cdot 10^7$ с

$1^\circ = 1,75 \cdot 10^{-2}$ рад

$1' = 2,91 \cdot 10^{-4}$ рад

$1'' = 4,85 \cdot 10^{-6}$ рад

1 мм рт. ст. = 133,3 Па

1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж

4. Основные физические постоянные

Атомная единица массы	$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Гравитационная постоянная	$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$
Комптоновская длина волны электрона	$\lambda_c = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$
Магнетон Бора	$\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Молярная газовая постоянная	$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{моль})$
Нормальное ускорение свободного падения	$g = 9,81 \text{ м/с}^2$
Первый боровский радиус	$a_0 = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ м}$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Постоянная Вина	$b = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ $\hbar = h / 2\pi = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Ридберга	$R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ $R' = 1,10 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$
Постоянная Стефана — Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Скорость света в вакууме	$c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Удельный заряд электрона	$e/m_e = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ $k = 1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}$
Элементарный заряд	$e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$

Содержание

Предисловие	3
Вводное занятие в лаборатории электрических и магнитных измерений	4
Лабораторная работа Э1. Знакомство с электроизмерительными приборами	18
Лабораторная работа Э2в. Исследование электрического поля точечных зарядов	34
Лабораторная работа Э3в. Движение заряда в электростатическом поле плоского конденсатора	40
Лабораторная работа Э4. Определение емкости конденсатора по времени его разряда	47
Лабораторная работа Э5. Исследование зависимости сопротивления спирали лампы от температуры	54
Лабораторная работа Э6. Определение ЭДС методом компенсации	61
Лабораторная работа Э7. Исследование зависимости полезной мощности источника тока от сопротивления нагрузки	68
Лабораторная работа Э8. Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли	77
Лабораторная работа Э9в. Изучение явления электромагнитной индукции	85
Лабораторная работа Э10. Исследование намагничивания ферромагнетика с помощью осциллографа	93
Библиографический список	101
Приложение 1	103
Приложение 2	104

Учебное издание

***Потемкина Светлана Николаевна,
Сарафанова Валентина Александровна,
Ясников Игорь Станиславович***

**ОБЩАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА.
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**

Лабораторный практикум

**Редактор *Т.М. Воропанова*
Технический редактор *Н.П. Крюкова*
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*
Дизайн обложки: *И.И. Шишкина***

**В оформлении обложки использовано
изображение от kjpgargeter на сайте ru.freepik.com**

Подписано в печать 04.04.2025. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 6,21.

Тираж 100 экз. Заказ № 1-38-24.

**Издательство Тольяттинского государственного университета
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. 8 (8482) 44-91-47, www.tltsu.ru**