

Министерство образования и науки Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет
Институт математики, физики и информационных технологий
Кафедра «Общая и теоретическая физика»

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

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

В трех частях

Часть 2

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет», 2016

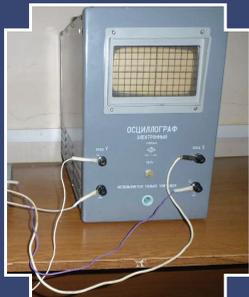
ISBN 978-5-8259-0993-6



УДК 53
ББК 22.3

Рецензенты:

канд. физ.-мат. наук, доцент Самарского государственного университета *В.И. Никонов*;
д-р физ.-мат. наук, профессор Тольяттинского государственного университета *В.А. Решетов*.

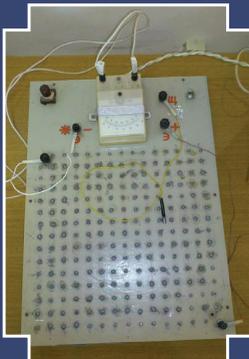


Сарафанова, В.А. Лабораторный практикум по физике. В 3 ч. Ч. 2. Электричество и магнетизм / В.А. Сарафанова, С.Н. Потемкина, И.С. Ясников. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2016. – 1 оптический диск.



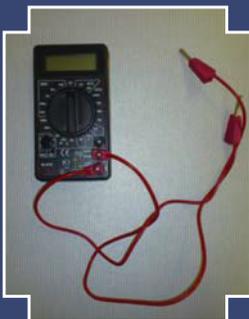
Во второй части практикума представлены методические указания к 17 лабораторным работам по разделу «Электричество и магнетизм». Даются рекомендации по самостоятельной подготовке к лабораторным работам и их выполнению. Предлагаются вопросы для самоконтроля.

Предназначено для студентов, обучающихся по техническим направлениям подготовки бакалавриата и специалитета.



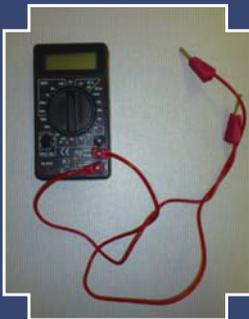
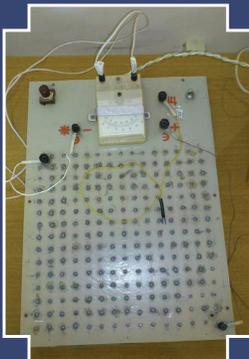
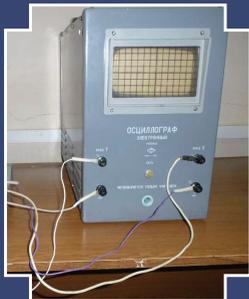
Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.



Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8; PIII 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; Adobe Acrobat Reader.

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет», 2016



Редактор *Т.Д. Савенкова*
Технический редактор *Н.П. Крюкова*
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*
Художественное оформление,
компьютерное проектирование: *Г.В. Карасева*

Дата подписания к использованию 16.09.2016.

Объем издания 15 Мб.

Комплектация издания: компакт-диск, первичная упаковка.

Заказ № 1-94-15.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. 8 (8482) 53-91-47, www.tltsu.ru

Содержание

Предисловие	5
Вводное занятие в лаборатории электрических и магнитных измерений	6
Лабораторная работа Э1. Знакомство с электроизмерительными приборами	19
Лабораторная работа Э2. Исследование электростатического поля методом зонда	34
Лабораторная работа Э3. Исследование электростатического поля методом аналоговой модели	41
Лабораторная работа Э4. Определение элементарного заряда	48
Лабораторная работа Э5. Определение емкости конденсатора по времени его разряда	55
Лабораторная работа Э6. Измерение сопротивления проводника с помощью моста Уитстона	62
Лабораторная работа Э7. Исследование зависимости сопротивления спирали лампы от температуры	68
Лабораторная работа Э8. Определение ЭДС методом компенсации	75
Лабораторная работа Э9. Исследование зависимости полезной мощности источника тока от сопротивления нагрузки	82
Лабораторная работа Э10. Исследование зависимости КПД источника тока от сопротивления нагрузки	90
Лабораторная работа Э11. Измерение индукции магнитного поля с помощью физического маятника	98
Лабораторная работа Э12. Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли	105
Лабораторная работа Э13. Индукционный метод измерения магнитной индукции	112
Лабораторная работа Э14. Исследование намагничивания ферромагнетика с помощью осциллографа	117
Лабораторная работа Э15. Определение точки Кюри	124
Лабораторная работа Э16. Измерение индуктивности и взаимной индуктивности катушек	129
Лабораторная работа Э17. Изучение явления взаимной индукции	138
Библиографический список	147
Приложение 1	148
Приложение 2	149

ПРЕДИСЛОВИЕ

Цель настоящего практикума – оказать помощь студентам инженерно-технических специальностей в изучении курса физики.

Лабораторный практикум по физике помогает глубже осознать и усвоить основные физические закономерности, приобрести навыки самостоятельной экспериментальной работы, ознакомиться с измерительной аппаратурой и методами физических измерений, научиться записывать и обрабатывать результаты измерений, давать оценку полученным результатам.

В данном лабораторном практикуме особая роль отводится научно-исследовательской работе студентов (НИРС). В настоящее время НИРС является обязательной составной частью подготовки специалистов высокой квалификации.

Научно-исследовательская работа студентов, если она возможна в рамках выполняемой лабораторной работы, представлена двумя уровнями.

НИРС 1-го уровня включает элементы исследования на данной лабораторной установке по методикам, не выходящим за пределы знаний, полученных при выполнении исходной лабораторной работы. Студент приобретает навык использования наработанных методик в рамках новых поставленных задач.

В рамках НИРС 2-го уровня студенту предлагаются оценочные задачи по теме лабораторной работы, которые требуют углубленного изучения дисциплины. Уметь оценить физическое явление, установить причинные связи, предложить адекватную модель, описывающую данное физическое явление, – вот те навыки исследовательской работы на младших курсах, которые позволят студенту перейти к реальной исследовательской работе в специализированных лабораториях.

Предлагаемый лабораторный практикум является отражением многолетней работы учебной физической лаборатории при Тольяттинском государственном университете и составлен на базе лабораторных работ, представленных в ней. Авторы выражают благодарность всему коллективу кафедры «Общая физика» Тольяттинского государственного университета за создание физической лаборатории и постановку отдельных лабораторных работ.

Лабораторный практикум состоит из трех частей. Здесь представлена часть вторая «Электричество и магнетизм», в которой 17 лабораторных работ. Даются рекомендации, как самостоятельно подготовиться к лабораторным работам и выполнить их.

ВВОДНОЕ ЗАНЯТИЕ В ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы — ознакомиться с правилами поведения в лаборатории электрических и магнитных измерений, правилами техники 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 вызвать 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, приводящее к судорогам, фибрилляции и остановке сердца.

Степень поражения человека током зависит от 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 его прекращению. 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 условий:

толщины и влажности кожи в месте контакта, площади контакта, температуры и влажности воздуха, от внутреннего состояния человека (например, нервного возбуждения) 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 1–10 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. Схема монтируется при помощи соединительных проводов. Контакты должны быть электрически плотными и механически прочными. Не допускается переплетение даже изолированных проводов. 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. Вольтметры как приборы, почти не потребляющие ток, следует подключать в последнюю очередь, когда все токовые контуры уже собраны.
2. Металлические корпуса электрических приборов, питающиеся от сети, должны быть заземлены.
3. 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.

4. Если ток постоянный, а нуль шкалы измерительного прибора находится слева, то подключение прибора в цепь производится с соблюдением полярности.
5. Все реостаты, включаемые в цепь, должны быть установлены на максимум сопротивления.
6. Все ключи и коммутаторы при сборке цепи должны быть разомкнуты. Замыкать схему на источник питания без проверки схемы преподавателем или лаборантом строго **запрещается**.
7. Цепь подключается к источнику питания только на время измерений.
8. **Запрещается** производить переключения в схеме, находящейся под напряжением.
9. В электрической цепи, содержащей индуктивности, могут возникать мощные экстратоки в моменты её замыкания и размыкания. Поэтому даже низковольтные цепи с индуктивностями могут быть опасны.
10. Конденсаторы после выключения схемы несут на себе заряд, и их необходимо разряжать специальным разрядником перед тем, как к ним прикасаться.
11. **Запрещается** оставлять без наблюдения работающие электрические цепи.
12. Если замечены зашкаливание приборов, искрение, дым или другие опасные и непонятные явления, необходимо немедленно отключить источник питания и обратиться к дежурному инженеру в лаборатории.
13. После окончания работы необходимо отключить источник тока и привести в порядок рабочее место.
14. 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 о лабораторной работе и написать в рабочей тетради ответы на вопросы для самоконтроля.

В начале лабораторного занятия студент должен получить допуск к лабораторной работе. Для этого ему 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, записывает выводы. После проверки полностью оформленного бланка отчета о лабораторной работе преподаватель на его титульном листе ставит подпись в графе «Работа выполнена».

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

Когда на титульном листе отчета стоят три подписи преподавателя, он проставляет в своем журнале и на образовательном портале Тольяттинского государственного университета 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:

- титульный лист (см. прил. 1);
- указание цели работы;
- описание приборов и принадлежностей;
- схему установки;
- расчетные формулы;
- результаты измерений;
- расчеты, графики;
- 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 м; 9,81 м/с².

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 – секундомером, 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*, 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 (несовершенство органов чувств экспериментатора) причин. 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 есть 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: $\varepsilon = \frac{\Delta a}{a_{\text{ист}}} \cdot 100\%$. Она выражается в процентах.

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 – 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 $P = 0,95$.

3.1. Обработка результатов прямых измерений физической величины

1. Погрешность прибора

Абсолютная погрешность физической величины определяется по прибору в случае однократного измерения, а также если в результате наблюдений получается ряд совершенно одинаковых значений измеряемой величины.

- Погрешность λ , которую вносит прибор, равна половине цены деления его шкалы: $\lambda = \frac{1}{2}$ ц. д. или целому делению $\lambda =$ ц. д., если положение указателя прибора трудноразличимо в пределах одного деления.

- При использовании приборов, содержащих дополнительную уточняющую шкалу нониуса, абсолютная погрешность берется равной цене деления шкалы нониуса: $\lambda =$ ц. д.

- 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 двусторонней шкалой – сумму 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_{cm}
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			
	$\langle a \rangle =$		$\Sigma(\Delta a_i)^2 =$

2) определить оценку среднего квадратичного отклонения результата измерения: $S = \sqrt{\frac{\Sigma(\Delta a_i)^2}{N(N-1)}}$;

3) найти по табл. 1 коэффициент Стьюдента t_{cm} для данного числа наблюдений;

4) вычислить случайную погрешность: $a = t_{cm} \cdot S$;

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 абсолютная погрешность $\Delta\pi = 3,142 - 3,14 = 0,002$.

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

3.2. Обработка результатов косвенных измерений физической величины

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

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

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:

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

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

Для более сложных функций абсолютная погрешность приведена в табл. 2.

Более сложные функции

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

Абсолютная погрешность аргумента тригонометрической функции выражается *в радианах*.

В лабораторных работах приведены формулы для расчета абсолютных погрешностей искомых функций, но студент должен уметь выводить их самостоятельно.

3.3. 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, то 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 выражаться в системе единиц измерения СИ.

Например:

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

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

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

3.4. 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.

Программа работы

1. Знакомство преподавателя со студентами.
2. Инструктаж о правилах поведения студентов в лаборатории, 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. Распределить 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. Порядок, который необходимо соблюдать при сборке 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. Как записывается окончательный результат измерения, если:
 - 1) $\langle t \rangle = 5,0075 \text{ с}; \Delta t = 0,051 \text{ с};$
 - 2) $\langle \rho \rangle = 2,785 \text{ кг/м}^3; \Delta \rho = 0,0074 \text{ кг/м}^3;$
 - 3) $\langle q \rangle = 0,8134 \text{ нКл}; \Delta q = 0,0047 \text{ нКл};$
 - 4) $\langle A \rangle = 0,06382 \text{ кДж}; \Delta A = 0,00591 \text{ кДж};$
 - 5) $\langle Q \rangle = 0,005864 \text{ мДж}; \Delta Q = 0,00047 \text{ мДж};$
 - 6) $\langle l \rangle = 81,345 \text{ см}; \Delta l = 0,473 \text{ см};$
 - 7) $\langle V \rangle = 28,038 \text{ м}^3; \Delta V = 0,13 \text{ м}^3;$
 - 8) $\langle p \rangle = 234,786 \text{ Па}; \Delta p = 3,19 \text{ Па};$
 - 9) $\langle a \rangle = 348,51 \text{ мм/с}^2; \Delta a = 27,3 \text{ мм/с}^2;$
 - 10) $\langle m \rangle = 9137,62 \text{ г}; \Delta m = 86,43 \text{ г}?$
15. Вывести формулу для вычисления абсолютной погрешности физической величины:

$$1) V = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h}{4};$$

$$6) I = C \cdot \operatorname{tg} \alpha;$$

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

$$7) T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}};$$

$$3) \gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2};$$

$$8) B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{2R \cdot \operatorname{tg} \alpha};$$

$$4) a = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 + m_2)} g;$$

$$9) V = 2\sqrt{g \cdot l} \cdot \sin \alpha;$$

$$5) J = \frac{m \cdot d^2}{8};$$

$$10) C = \frac{t}{4R \cdot \ln U}.$$

Лабораторная работа Э1 ЗНАКОМСТВО С ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ПРИБОРАМИ

Цель работы — знакомство с устройством электроизмерительных приборов, принципами работы их измерительных механизмов, способами расширения их пределов измерения.

Приборы и принадлежности: электроизмерительный прибор; экспериментальная установка.

Краткие теоретические сведения

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, функционально связанных с измеряемыми физическими величинами, в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Они весьма разнообразны по своему принципу действия и конструктивному оформлению.

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, приборы 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*, корпуса которых приспособлены для жесткого крепления на месте установки;
- б) *переносные*, корпуса которых не предназначены для жесткого крепления.

3. *По степени защищенности* приборы бывают:

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

Кроме указанных классификаций существуют и другие.

Основные части электроизмерительного прибора

К основным частям электроизмерительного прибора относятся:

- 1) корпус;
- 2) зажимы;
- 3) шкала;
- 4) указательная стрелка;
- 5) измерительный механизм;
- 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 под-

пятниками, 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 двусторонней 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 $A_{\text{д}}$ (показание образцового прибора) называется *абсолютной погрешностью прибора*:

$$\Delta A = A - A_{\text{д}}.$$

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.

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 (~), постоянный и переменный (— ~).

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

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

Пробивное напряжение – напряжение, при котором была испытана прочность изоляции. Обозначение: $\text{⚡} 2 \text{ кВ} \text{ ☆}$.

Иногда на шкалу прибора наносят условные знаки, обозначающие:

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

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

A – от -10°C до $+35^\circ\text{C}$ и f до 80 %;

B – от -20°C до $+50^\circ\text{C}$ и f до 80 %;

B – от -40°C до $+60^\circ\text{C}$ и f до 98 %;

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

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	

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 и направление поворота рамки (а значит, и стрелки) зависит от направления тока в рамке.

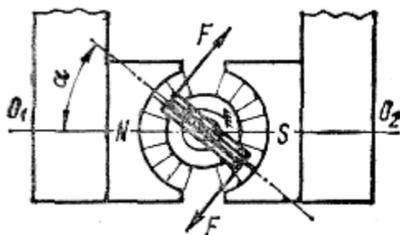


Рис. 1.1. Устройство электроизмерительного механизма прибора магнитоэлектрической системы (подвижная катушка в радиальном магнитном поле)

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).

Сердечник 1 имеет вид тонкой пластинки, жестко скрепленной с осью 2, на которой расположена указательная стрелка 3. При этом сердечник втягивается внутрь катушки 4, благодаря чему указательная стрелка отклоняется. Угол отклонения стрелки α связан с током квадратичной зависимостью:

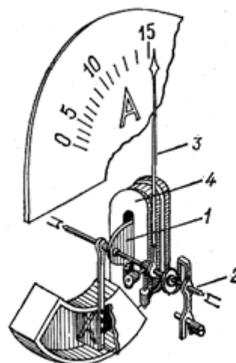


Рис. 1.2. Электромагнитная система: 1 – сердечник; 2 – ось; 3 – указательная стрелка; 4 – катушка

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

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 \equiv

Принцип действия приборов этой системы заключается во взаимодействии магнитных полей токов, проходящих по двум обмоткам, одна из которых неподвижна 1, а другая может вращаться 2 (рис. 1.3).

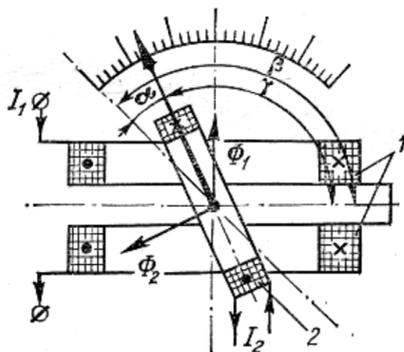


Рис. 1.3. Электродинамическая система

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, т. е. 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 внешних магнитных полей на показания приборов, 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).

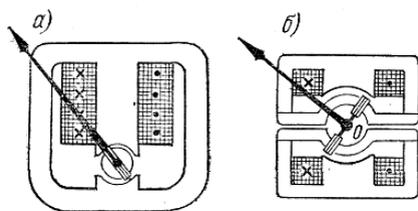


Рис. 1.4. Ферродинамические измерительные механизмы

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 \ddagger

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 искажения в исследуемую цепь, нечувствительны к внешним магнитным полям.

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

Амперметры, вольтметры, гальванометры

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

При измерениях амперметр включают в цепь последовательно на том участке, на котором измеряется величина силы тока (рис. 1.5). 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).

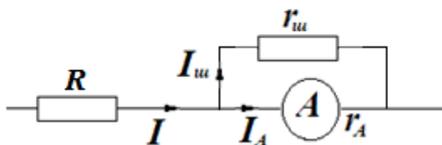


Рис. 1.5. Включение амперметра и шунта в цепь

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 связь между сопротивлением шунта и амперметра 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.

Вольтметрами 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.

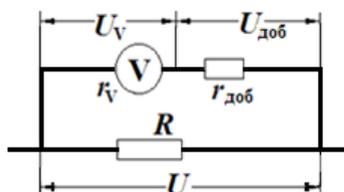


Рис. 1.6. Включение вольтметра и добавочного сопротивления в цепь

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). 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).

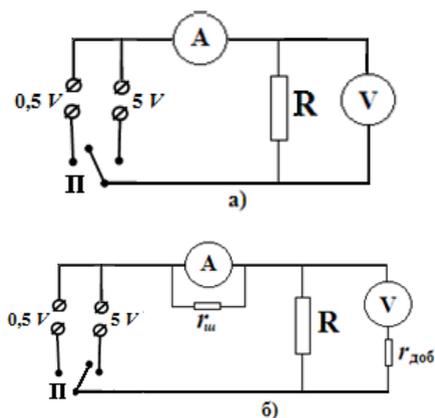


Рис. 1.7. Схема экспериментальной установки



Рис. 1.8. Внешний вид 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. Собрать электрическую схему установки согласно рис. 1.7, а, установив переключатель П в положение «0,5V». 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.

5. Используя значения класса точности этих приборов, рассчитать абсолютные погрешности силы тока, измеренной амперметром:

$$\Delta I = \frac{\gamma \cdot I_{\text{пред}}}{100}, \text{ и напряжения, измеренного вольтметром: } \Delta U = \frac{\gamma \cdot U_{\text{пред}}}{100}.$$

6. Записать окончательный результат проведенных измерений силы тока в цепи и напряжения на нагрузке.
7. Собрать электрическую схему лабораторной работы согласно рис. 1.7, б, установив переключатель в положение «5V». 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.
8. Рассчитать величину коэффициента изменения предела измерения амперметра по формуле $n_A = \frac{I_2}{I_1}$.
9. Записать значение сопротивления амперметра r_A (оно указано на установке).
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. Записать значение сопротивления вольтметра r_V (оно указано на установке).
13. Рассчитать величину добавочного сопротивления согласно расчетной формуле $r_{\text{доб}} = r_V(n - 1)$.
14. Сделать вывод.

Вопросы для самоконтроля

1. Как классифицируют измерительные приборы?
2. Перечислите основные части электроизмерительных приборов.
3. Как рассчитывается абсолютная погрешность электроизмерительного прибора?
4. Что называется классом точности прибора? Сколько существует классов точности приборов?

5. Какие условные обозначения наносят на шкалу прибора?
6. Что такое цена деления, чувствительность прибора?
7. Как определяется предел измерения прибора с односторонней шкалой, с двусторонней шкалой?
8. Какие типы электроизмерительных систем существуют?
9. Для каких измерений служит амперметр? Как амперметр включается в цепь? Почему?
10. Для каких измерений служит вольтметр? Как вольтметр включается в цепь? Почему?
11. Для каких измерений служит гальванометр?
12. Как расширить предел измерения амперметра?
13. Как расширить предел измерения вольтметра?
14. Проведите расчет шунтирующего сопротивления.
15. Проведите расчет добавочного сопротивления.

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: $r_{ш} =$
 добавочное сопротивление: $r_{доб} =$
6. Технический паспорт электроизмерительного прибора

№ п/п	Название характеристики	Характеристика прибора
1	Наименование прибора	
2	Условное обозначение	
3	Предел измерения	
4	Цена деления	
5	Чувствительность	
6	Класс точности	
7	Род тока	

№ п/п	Название характеристики	Характеристика прибора
8	Система и принцип действия измерительного механизма	
9	Основные достоинства измерительного механизма	
10	Основные недостатки измерительного механизма	
11	Положение прибора при измерениях	
12	Пробивное напряжение изоляции	
13	Абсолютная погрешность	

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 амперметра и вольтметра (нижняя шкала):

$\Delta I =$

$\Delta U =$

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 Э2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ ЗОНДА

Цель работы — построение эквипотенциальных поверхностей и силовых линий электростатического поля между электродами определенной конфигурации.

Приборы и принадлежности: блок питания, электролитическая ванна, два электрода, пантограф, вольтметр, гальванометр, реостат, миллиметровая бумага.

Описание установки и метода измерений

Для изучения распределения потенциала в исследуемую точку поля вводится зонд (тонкая металлическая проволока), который соединяется с прибором, измеряющим приобретенный зондом потенциал. При этом необходимо, чтобы зонд как можно меньше искажал своим присутствием исследуемое поле и принимал потенциал той точки, в которую он помещен. Эти требования трудноосуществимы при изучении электростатического поля, так как в непроводящей среде не может происходить автоматическое выравнивание потенциалов точки поля и введенного в нее зонда. Поэтому изучение электростатического поля заменяют изучением поля постоянного электрического тока. Оказывается, что при некоторых условиях распределение потенциалов в среде (вода, токопроводящая бумага), по которой течет ток между установленными в ней электродами, может быть тождественно распределению потенциалов между теми же электродами, когда между ними имеется электростатическое поле. Метод исследования электростатического поля путем создания эквивалентной модели поля называется моделированием. Практически модель электростатического поля можно получить в электролитической ванне с электродами, если на них подать не постоянное, а переменное напряжение, так как в этом случае устраняется вредное влияние электрической поляризации.

Установка для изучения картины электростатического поля (рис. 2.1) состоит из ванны с двумя электродами *A* и *B*, наполненной электролитом (вода с растворенными в ней солями). На дно ванны

нанесена координатная сетка с центральной осью X (рис. 2.2). Напряжение на электроды подается от понижающего трансформатора T .

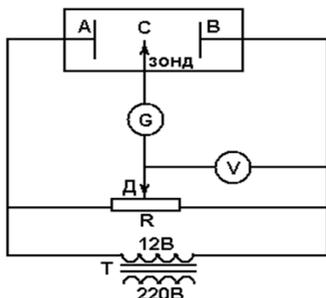


Рис. 2.1. Схема установки: A, B – электроды; C – зонд; G – гальванометр; V – вольтметр; R – потенциометр; T – понижающий трансформатор

Изучению подлежит электростатическое поле, создаваемое электродами A и B . Зонд C включается в диагональ моста Уитстона.

Пусть зонд установлен в некоторой точке поля C , потенциал которой необходимо определить. Перемещая движок потенциометра R , находят на нем такую точку D , чтобы ее потенциал был равен потенциалу точки C . В этом случае ток не проходит через гальванометр G . Значение потенциала исследуемой точки поля C можно определить с помощью вольтметра V (рис. 2.1). Для зарисовки эквипотенциальных линий на бумаге служит пантограф (рис. 2.2).

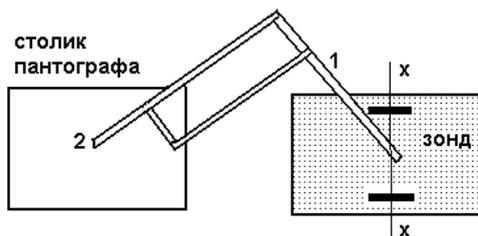


Рис. 2.2. Устройство пантографа

Схема рычагов пантографа устроена так, что все положения в ванне зонда, закрепленного рычагом 1, воспроизводятся фиксацией острия проволоки, прикрепленной к рычагу 2. При нажатии сверху

на острие проволоки пружина рычага 2 укорачивается и конец острия делает отметку на бумаге, закрепленной на столике пантографа.

Таким образом, процесс изучения исследуемого поля сводится к следующему: для каждого установленного значения потенциала находят путем перемещения зонда в ванне соответствующую эквипотенциальную линию и фиксируют ее с помощью пантографа.

Программа работы

1. Получить для заданных электродов картину эквипотенциальных линий.
2. Дополнить эту картину построением силовых линий.
3. Провести один или два элемента исследования (по усмотрению преподавателя).

Порядок работы

1. Ознакомиться с установкой и укрепленными в ванне электродами.
2. Закрепить на столике пантографа лист бумаги (для каждого студента свой лист). Обводя зондом электроды, зафиксировать их положение на листе бумаги.
3. Включить с разрешения дежурного инженера или преподавателя установку в сеть (установить тумблер в положение «вкл.»).
4. Установить измерительный зонд на центральной оси X вблизи первого электрода.
5. Перемещая движок потенциометра R , установить на гальванометре G ноль.
6. Отметить данное положение зонда в поле на бумаге, закрепленной на столике пантографа, нажимая сверху на острие пантографа.
7. Записать в таблицу результатов измерений потенциал данной точки по показанию вольтметра и координату x (положение зонда) по делениям координатной оси на дне ванны.
8. Сместить зонд влево от центральной оси приблизительно на 2 см. Не изменяя положение движка реостата, перемещением измерительного зонда выставить гальванометр на ноль и зафиксировать эту точку с помощью пантографа на бумаге. Аналогичными действиями найти еще 6–8 точек такого же потенциала, перемещая зонд влево и вправо от центральной оси.

9. Вычертить, соединив точки равного потенциала, эквипотенциальную линию и записать рядом с ней значение потенциала φ_1 .
Примечание. При определении линий равного потенциала необходимо учесть, что эквипотенциальные поверхности (в плоскости – линии) повторяют форму самих электродов.
10. Установить измерительный зонд C снова на центральной оси X , отступив на 1–2 деления от первоначального положения. Определить потенциал данной точки поля (п. 5–7).
11. Вычертить эквипотенциальную линию с потенциалом φ_2 согласно действиям, описанным в п. 8.
12. Получить 6–8 эквипотенциальных линий, повторяя действия, описанные в п. 10–11.
13. Записать все значения потенциалов для точек на оси X и значения их координат в таблицу результатов измерений.
14. Отключить установку.
15. Дополнить полученную на бумаге картину эквипотенциальных поверхностей силовыми линиями, пользуясь при этом свойством ортогональности (силовые линии перпендикулярны эквипотенциальной поверхности).
16. Оценить абсолютную погрешность измерения потенциала по классу точности вольтметра.
17. Построить на миллиметровой бумаге график зависимости потенциала от координаты $\varphi = f(x)$, используя результаты таблицы. Выбрать масштаб осей X и φ так, чтобы график занимал все поле рисунка. Показать на графике величину ошибки измерения потенциала для каждой точки.
18. Сделать вывод о характере поля (если график – прямая линия, то исследованное поле однородно, если кривая – неоднородно).

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. Какой метод используется при исследовании электростатического поля? В чем суть этого метода?

4. Как в лабораторной работе измерить потенциал определенной точки поля?
5. Как в лабораторной работе получить эквипотенциальную линию?
6. Какое поле называется электростатическим?
7. Что называется силовой линией электростатического поля?
8. Дать определение напряженности электростатического поля.
9. Дать определение потенциала электростатического поля.
10. Дать определение эквипотенциальной поверхности электростатического поля.
11. Вывести математическую связь между напряженностью и потенциалом.
12. Доказать ортогональность силовых линий к эквипотенциальной поверхности.
13. Изобразить на рисунке картину силовых линий и эквипотенциальных поверхностей для поля: а) точечного заряда; б) заряженной плоскости; в) заряженного цилиндра.
14. Вывести формулу работы по перемещению заряда в электростатическом поле.
15. Какой вывод можно сделать из анализа формулы работы по перемещению заряда: а) вдоль силовой линии; б) по эквипотенциальной поверхности?

Содержание отчета

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

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$\varphi, \text{В}$								
$x, 10^{-2} \text{ м}$								

6. График зависимости потенциала от координаты (на миллиметровой бумаге) $\varphi = f(x)$.

7. Картина полученных эквипотенциальных и силовых линий (приложить).
8. Вывод о характере поля.

Научно-исследовательская работа студентов (НИРС)

1 уровень

Рассчитать значения напряженности поля вдоль оси X и построить график зависимости $E(x)$.

Поскольку ось X совпадает с силовой линией электрического поля, в любой точке с координатой X вектор напряженности направлен вдоль оси X (в сторону убывания потенциала).

Необходимо воспользоваться формулой связи напряженности с потенциалом:

$$E_x = -\frac{d\varphi}{dx}.$$

Таким образом, для расчета значений напряженности в точках с координатой X необходимо определить значение производной потенциала по переменной X . Известно, что производная непрерывной функции по аргументу X в точке с координатой X равна тангенсу угла наклона касательной к графику зависимости $f(x)$ в этой точке (рис. 2.3).

Воспользовавшись графиком зависимости $\varphi(x)$, полученным в лабораторной работе, построить касательные к графику в точках с координатами x_1, x_2, \dots, x_N ($N = 7-10$) и определить углы наклона этих касательных $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ к оси X . Значения напряженности электростатического поля в точках с координатами x_1 и x_2 равны соответствующим значениям тангенса угла наклона, взятым с обратным знаком.

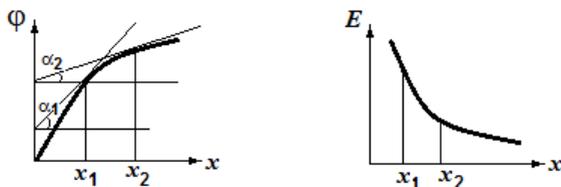


Рис. 2.3. Графики зависимостей $\varphi = (x)$ и $E(x)$

По вычисленным значениям напряженности поля построить график зависимости $E(x)$. Сделать вывод о результатах исследования.

2 уровень

Исследовать электростатическое поле с помещенным между электродами металлическим полым цилиндром. Закрепить на пантографе новый лист бумаги. По методике, описанной в основной части работы, получить картину распределения эквипотенциальных поверхностей и силовых линий. (Работать с зондом нужно осторожно, чтобы не сдвинуть цилиндр.) Определить потенциал внутри полого цилиндра и на его поверхности. Убедиться в том, что поверхность проводника является эквипотенциальной. Сделать вывод о значении напряженности поля внутри полого цилиндра.

Заменить цилиндр на равностороннюю треугольную призму (сечение – равносторонний треугольник) и получить картину распределения эквипотенциальных поверхностей и силовых линий вблизи вершин треугольной призмы. Проанализировать полученный результат с точки зрения электростатики, выяснив, как наличие острых поверхностей меняет картину электрического поля вблизи них. Найти зависимость напряженности электрического поля от расстояния до такой неоднородности, приближая ее форму к окружности. Оценить радиус закругления неоднородности, при котором вблизи нее возможен пробой в воздухе при подаче на нее потенциала 220 В (необходимая напряженность электрического поля для пробоя в воздухе ~ 13 кВ/см).

Лабораторная работа Э3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ АНАЛОГОВОЙ МОДЕЛИ

Цель работы – исследование электростатического поля от электродов произвольной конфигурации методом сеточных моделей.

Приборы и принадлежности: установка для исследования электростатического поля.

Описание установки и метода измерений

Исследование электростатического поля заключается в нахождении величины и направления напряженности в любой его точке, то есть в построении силовых линий поля. Так как вектор напряженности \vec{E} в каждой точке поля направлен по нормали к эквипотенциальной поверхности, то достаточно найти положения эквипотенциальных поверхностей, а затем построить силовые линии поля.

Для исследования распределения потенциала в электростатическом поле чаще всего используется тот факт, что создаваемое какими-либо заряженными проводниками (электродами) распределение потенциала идентично распределению потенциала между теми же электродами, помещенными в однородную проводящую среду.

Практически из соображений удобства измерений размеры системы электродов и потенциалов на них выбираются лишь подобными системе электродов и потенциалов в электростатическом поле, то есть увеличенными или уменьшенными в одинаковое число раз.

Такие модели называют аналоговыми. Они модулируют электрическое поле при помощи непрерывной проводящей среды. В качестве последней используются различные электролиты, токопроводящая бумага и ткань, проводящие слои краски, нанесенные на диэлектрик, и др. В этих случаях каждая точка прототипа может быть отождествлена с соответствующей точкой модели.

В настоящей работе для исследования распределения потенциала используется метод аналогий для сеточных моделей. Суть его в следующем. Пусть на плоскости XOY заданы положения электродов и их потенциалы (рис. 3.1).

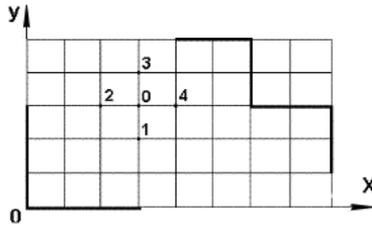


Рис. 3.1. Положение электродов

Нанесем на часть плоскости, ограниченную электродами, прямоугольную сетку и выберем пять рядом лежащих точек: расстояния между ними в простейшем случае должны быть равны стороне ячейки клетки.

Известно, что потенциал электростатического поля $\varphi(x, y)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению Лапласа:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} + \frac{d^2\varphi}{dy^2} = 0.$$

Составим сетку из одинаковых сопротивлений (рис. 3.2):

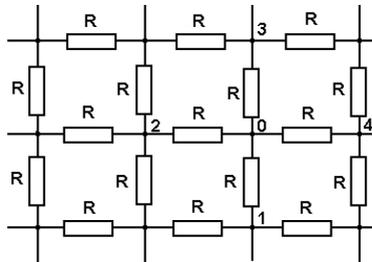


Рис. 3.2. Сетка из одинаковых сопротивлений

Потенциалы соседних точек сетки (0, 1, 2, 3, 4) связаны согласно первому закону Кирхгофа $\left(\sum_{i=1}^n I_i = 0 \right)$ уравнением:

$$\frac{\varphi_1 - \varphi_0}{R} + \frac{\varphi_2 - \varphi_0}{R} + \frac{\varphi_3 - \varphi_0}{R} + \frac{\varphi_4 - \varphi_0}{R} = 0. \quad (3.1)$$

Откуда $\varphi_0 = \frac{(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4)}{4}$.

Если теперь на сетке сопротивлений соединить узлы, соответствующие электродам, и подать на них те же потенциалы, которые имеют место в действительности, то распределение потенциала по

узлам сетки сопротивлений должно полностью соответствовать распределению потенциала электростатического поля в силу полной аналогии уравнения (3.1). Электрическая сетка, применяемая таким образом для моделирования распределения параметров, дает приближенное представление только о тех точках исходного поля, которые соответствуют узловым точкам модели.

Следовательно, чем больше мы возьмем ячеек в сеточной электрической модели, тем точнее получим результат. На таком же принципе работают современные аналоговые вычислительные машины.

Схема установки для исследования электростатического поля изображена на рис. 3.3, а ее внешний вид — на рис. 3.4.

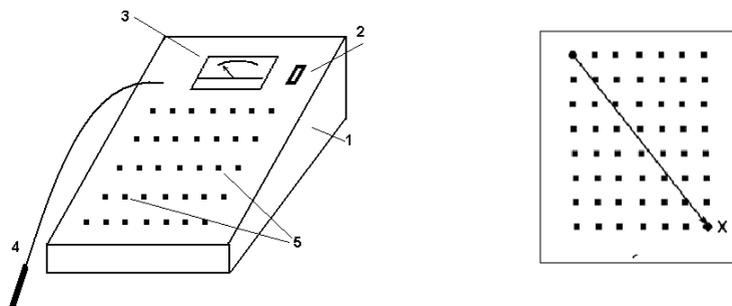


Рис. 3.3. Схема установки: 1 – корпус; 2 – выключатель сети; 3 – вольтметр; 4 – кабель со щупом; 5 – узловые клеммы



Рис. 3.4. Внешний вид установки

Программа работы

1. Измерить потенциалы каждого контакта сеточной модели.
2. Построить эквипотенциальные линии.
3. Построить силовые линии исследуемого электростатического поля.

Порядок работы

1. Зарисовать на листе бумаги все контакты сеточной модели, форму и расположение электродов.
2. Подать напряжение на электроды, включив установку в сеть 36 В.
3. С помощью вольтметра щупом измерить потенциалы каждого контакта сеточной модели и нанести их значения в соответствующие точки на листе бумаги. Вольтметр можно использовать на самой установке или для большей точности использовать цифровой вольтметр.

4. Отключить установку от сети.
5. Вычертить, соединив точки равного потенциала, эквипотенциальные линии и записать рядом с ними значение потенциала.

Примечание. При проведении линий с равным потенциалом необходимо учесть, что эквипотенциальные поверхности вблизи электродов описывают их форму. Число эквипотенциальных линий должно соответствовать числу контактов, лежащих на оси X , которая соединяет центры электродов (рис. 3.4).

6. Дополнить полученную на бумаге картину эквипотенциальных поверхностей силовыми линиями, пользуясь при этом свойством ортогональности.
7. Записать все значения потенциалов, соответствующих эквипотенциальным линиям, в таблицу (от меньшего потенциала к большему).
8. Построить на миллиметровой бумаге график зависимости потенциала от координаты $\varphi = f(x)$, используя результаты таблицы.
9. Сделать вывод о характере поля (если график — прямая линия, то исследованное поле однородно, если кривая — неоднородно).

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. Какой метод используется при исследовании электростатического поля? В чем суть этого метода?
4. Как в лабораторной работе получить эквипотенциальную линию?
5. Какова должна быть форма эквипотенциальных поверхностей или линий вблизи электродов?
6. Какое поле называется электростатическим?
7. Что называется силовой линией электростатического поля?
8. Дать определение напряженности электростатического поля.
9. Дать определение потенциала электростатического поля.
10. Дать определение эквипотенциальной поверхности электростатического поля.
11. Вывести математическую связь между напряженностью и потенциалом.
12. Доказать ортогональность силовых линий к эквипотенциальной поверхности.
13. Изобразить на рисунке картину силовых линий и эквипотенциальных поверхностей для поля: а) точечного заряда; б) заряженной плоскости; в) заряженного цилиндра.
14. Вывести формулу работы по перемещению заряда в электростатическом поле.
15. Какой вывод можно сделать из анализа формулы работы по перемещению заряда: а) вдоль силовой линии; б) по эквипотенциальной поверхности?

Содержание отчета

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

5. Результаты измерений:

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$\varphi, \text{В}$								
$x, 10^{-2} \text{ м}$								

6. График зависимости потенциала от координаты (на миллиметровой бумаге) $\varphi = f(x)$.
7. Картина полученных эквипотенциальных и силовых линий (приложить).
8. Вывод о характере поля.

Научно-исследовательская работа студентов (НИРС)

1 уровень

Исследовать электростатическое поле между электродами произвольной конфигурации. Для этого с помощью преподавателя или инженера установить на сеточной модели электроды соответствующей формы (рис. 3.5).

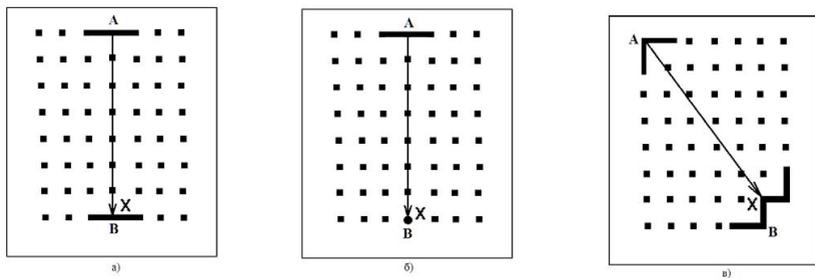


Рис. 3.5. Формы электродов:

a – два плоских; *b* – плоский и точечный; *v* – сложной конфигурации

По методике, описанной в основной части работы, получить картину распределения эквипотенциальных поверхностей и силовых линий. Объяснить их форму.

2 уровень

Как известно из курса общей физики, поле плоского конденсатора сосредоточено только внутри самого конденсатора. Однако данное приближение верно, если размеры обкладок конденсатора много больше расстояния между ними. Что будет происходить, если это условие не выполняется, т. е. когда размеры обкладок конденсатора будут сравнимы с расстоянием между ними?

Соберите сеточную модель такого конденсатора и проверьте наличие электрического поля вблизи обкладок снаружи конденсатора. Объясните наблюдаемое явление. Попробуйте оценить, как влияет на ёмкость конденсатора наличие таких краевых эффектов. Увеличивается или уменьшается электрическая ёмкость по отношению к идеальному случаю? (Необходимо привлечь понятие объёмной плотности энергии электрического поля.)

Лабораторная работа Э4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНОГО ЗАРЯДА

Цель работы — знакомство с одним из методов определения элементарного заряда.

Приборы и принадлежности: сменная плата, укрепленная в универсальном лабораторном стенде с электронной лампой; цифровой вольтметр.

Описание установки и метода измерений

Заряд всех элементарных частиц (если он не равен нулю) одинаков по абсолютной величине. Его можно назвать *элементарным зарядом*. Под элементарными частицами понимают такие микрочастицы, внутреннюю структуру которых на современном уровне развития физики нельзя представить как объединение других частиц. К числу элементарных частиц принадлежат, в частности, электрон, несущий отрицательный заряд, и протон, несущий положительный заряд. Любой заряд складывается из элементарных зарядов одинаковой величины, т. е. обладает *дискретностью*.

Исследуя поведение металла, ученые обнаружили, что при температурах, отличных от абсолютного нуля, имеется некоторое количество электронов, энергия которых достаточна для того, чтобы преодолеть потенциальный барьер, имеющийся на границе металла. При повышении температуры количество таких электронов резко возрастает и делается вполне заметным. Испускание электронов нагретым металлом называется *термоэлектронной эмиссией*. В зависимости от способа сообщения энергии электронам различают термоэлектронную, фотоэлектронную, вторичную электронную и автоэлектронную эмиссии. В данной работе используется термоэлектронная эмиссия.

Исследование термоэлектронной эмиссии осуществляется с помощью схемы, изображенной на рис. 4.1. Основным элементом схемы является двухэлектродная лампа, называемая также вакуумным диодом. Она представляет собой вакуумный металлический или стеклянный баллон, внутри которого имеются два электрода — катод K и анод A .

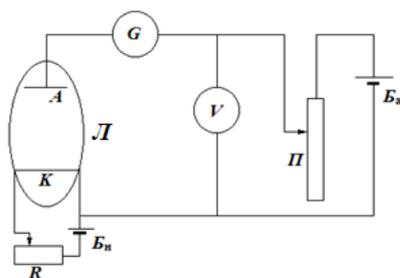


Рис. 4.1. Схема электрической установки: $Л$ – двухэлектродная лампа; $А$ – анод; $К$ – катод; R – реостат; G – гальванометр; V – вольтметр; $П$ – потенциометр; $Б_n$ – батарея накала; $Б_a$ – анодная батарея

Конструктивно электроды могут быть выполнены разными способами. В простейшем случае катод имеет форму тонкой прямой нити, анод – коаксиального с ней цилиндра (рис. 4.2).

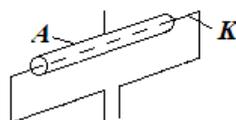


Рис. 4.2. Анод и катод двухэлектродной лампы

Катод нагревается током, создаваемым батареей накала $Б_n$. Температуру катода можно менять, регулируя с помощью реостата R силу тока накала. На электроды подается напряжение от анодной батареи $Б_a$. Изменение, в частности увеличение, этого напряжения, а также повышение температуры приведут к возрастанию скорости движения электронов к аноду в вакуумном диоде. Анодное напряжение U_a можно изменять с помощью потенциометра $П$ и измерять вольтметром V . Гальванометр G предназначен для измерения силы анодного тока I_a .

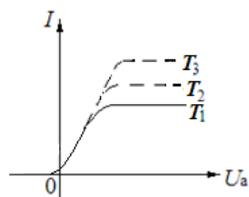


Рис. 4.3. Вольт-амперная характеристика диода

При постоянном токе накала катода кривая зависимости силы анодного тока I_a от анодного напряжения U_a имеет вид, показанный на рис. 4.3. Эта кривая называется *вольт-амперной характеристикой диода*.

Различные кривые соответствуют разным температурам катода. При малых значениях U_a эти кривые совпадают. С ростом U_a все большее число электронов отбрасывается электрическим полем к аноду, и наконец при определенном значении U_a электрон-

ное облако (отрицательный пространственный заряд, образованный вылетевшими из катода электронами при $U_a = 0$) полностью рассасывается и все вылетевшие из катода электроны получают возможность достигнуть анода. Дальнейший рост U_a не может увеличить силу анодного тока – ток достигает насыщения.

Из рис. 4.3 видно, что закон Ома для вакуумного диода не выполняется. Начальный участок кривой, соответствующий небольшим значениям напряжения, довольно хорошо следует полученному теоретически Ленгмюром и Богуславским *закону «три вторых»*. Согласно этому закону сила анодного тока I_a изменяется пропорционально анодному напряжению в степени «три вторых» $U_a^{3/2}$:

$$I_a = AU_a^{3/2},$$

где A – коэффициент, зависящий от форм, размеров, взаимного расположения электродов, а также от массы и заряда электрона.

В данной лабораторной работе определение элементарного заряда – заряда электрона – проводится при помощи вакуумного диода D , укрепленного на плате универсального лабораторного стенда, схема которого приведена на рис. 4.4.

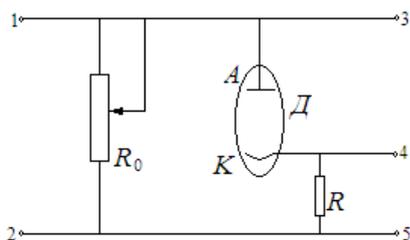


Рис. 4.4. Схема рабочей установки: D – диод; A – анод; K – катод; R – сопротивление; R_0 – потенциометр

Анодный ток I_a в цепи диода D определяют по падению напряжения U_R на измерительном сопротивлении R известной величины (согласно закону Ома):

$$I_a = \frac{U_R}{R}. \quad (4.1)$$

Напряжение U_R определяется при помощи цифрового вольтметра, подключаемого между точками 4 и 5 схемы (рис. 4.4).

Анодное напряжение U_a — напряжение между анодом и катодом диода — измеряют, подключая цифровой вольтметр к точкам 3 и 4 платы лабораторного стенда. Анодное напряжение U_a регулируют, изменяя положение движка потенциометра R_0 .

Представим закон «трех вторых» в виде $I_a^2 = BU_a^3$. Выделим из коэффициента пропорциональности B заряд электрона $B = \frac{e}{k}$, где e — заряд электрона; $k = \frac{81d^4m}{32\varepsilon_0^2S^2}$; ε_0 — электрическая постоянная; m — масса электрона; S — площадь электродов; d — расстояние между электродами. Для диода, который используется в данной лабораторной работе, $k = 1,82 \cdot 10^{-13} \frac{\text{Кл} \cdot \text{В}^3}{\text{А}^2}$.

Тогда заряд электрона можно рассчитать по формуле

$$e = k \frac{I_a^2}{U_a^3}. \quad (4.2)$$

Если представить закон «трех вторых» в виде $I^2 = \frac{e}{k}U^3$ и ввести обозначения $y = I^2$, $x = U^3$, то можно заметить, что зависимость $y = \frac{e}{k}x$ — линейная.

Таким образом, заряд электрона можно определить графически. Для этого надо построить график $I_a^2 = f(U_a^3)$, найти тангенс угла наклона этого графика $\text{tg } \alpha = \frac{\Delta I_a^2}{\Delta U_a^3}$ и рассчитать элементарный заряд по формуле

$$e = k \cdot \text{tg } \alpha. \quad (4.3)$$

Графическое нахождение заряда электрона более точное, чем нахождение по формуле (4.2).

Программа работы

1. Снятие вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода.
2. Определение заряда электрона по расчетной формуле (4.2).
3. Графическое определение заряда электрона.

Порядок работы

1. Изучить инструкцию по работе с цифровым вольтметром.
2. Включить лабораторный стенд и цифровой вольтметр в сеть и дать им прогреться 5–10 мин.

3. Записать значение сопротивления R (указано на установке). Оценить его абсолютную погрешность ΔR как погрешность константы.
4. Вывести потенциометр R_0 в крайнее левое положение.
5. Произвести измерение напряжения U_R на измерительном сопротивлении R . Для этого подключить вольтметр к точкам 4 и 5 платы.
6. Произвести измерение напряжения U_a между анодом и катодом лампы. Для этого подключить вольтметр к точкам 3 и 4 платы.
7. Повторить измерения, указанные в п. 5–6 при 8–10 других положениях движка потенциометра.
8. Результаты измерений внести в таблицу.
9. Рассчитать по формуле (4.1) значения анодного тока и занести их в таблицу.
10. Рассчитать по формуле (4.2) значения заряда электрона и занести их в таблицу.
11. Найти среднее значение заряда электрона.
12. Рассчитать абсолютную погрешность заряда электрона для первого измерения по формуле $\Delta e = \langle e \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta I_a}{I_a}\right)^2 + \left(\frac{3\Delta U_a}{U_a}\right)^2}$ и относительную погрешность $\frac{\Delta e}{\langle e \rangle} \cdot 100\%$. Записать окончательный результат: $e = (\langle e \rangle \pm \Delta e)$ Кл.
13. Построить на миллиметровой бумаге графическую зависимость $I_a^2 = f(U_a^3)$.
14. Найти из графика тангенс угла наклона $\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta I_a^2}{\Delta U_a^3}$. Для расчета тангенса выбирают участок графика, имеющий вид прямой линии.
15. Рассчитать по формуле (4.3) значение заряда электрона.
16. Сравнить полученные двумя способами значения заряда электрона.
17. 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 определения элементарного заряда используется в данной работе?
5. Запишите для вакуумного диода соотношение между анодным током и анодным напряжением, используемое в данной работе.
6. Как рассчитывается величина анодного тока I_a в данной работе?
7. В чем заключается суть закона «трех вторых»?
8. Как графически определить элементарный заряд?
9. Что называется термоэлектронной эмиссией?
10. Какие существуют виды электронной эмиссии? Какой вид эмиссии используется в данной лабораторной работе?
11. Что называется вольт-амперной характеристикой (ВАХ) диода?
12. Изобразите и объясните ВАХ диода.
13. Какой электрический заряд называется элементарным?
14. В чем заключается свойство дискретности электрического заряда?
15. Вывод расчетной формулы элементарного заряда.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.
5. Расчетные формулы:
 - заряд электрона: $e =$
 - абсолютная погрешность $\Delta e =$
 - анодный ток: $I_a =$
 - абсолютная погрешность $\Delta I_a =$
6. Заданные в работе величины:

сопротивление резистора: $R =$	$\Delta R =$	$\frac{\Delta R}{R} =$
коэффициент пропорциональности: $k =$	$\Delta k =$	$\frac{\Delta k}{k} =$

7. Результаты измерений и вычислений

№	$U_R, \text{В}$	$U_a, \text{В}$	$I_a, \text{А}$	$I_a^2, \text{А}^2$	$U_a^3, \text{В}^3$	$e, \text{Кл}$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

8. Расчет заряда электрона

$$\langle e \rangle =$$

$$\Delta e =$$

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

Окончательный результат: $e =$

9. График $I_a^2 = f(U_a^3)$ на миллиметровой бумаге (приложить).

10. Расчет элементарного заряда с помощью графика:

$$\text{tg } \alpha =$$

$$e =$$

11. Сравнение результатов.

12. Вывод.

Лабораторная работа Э5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА ПО ВРЕМЕНИ ЕГО РАЗРЯДА

Цель работы – определение емкости конденсатора по времени его разряда, исследование закона 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. 5.1. Ее внешний вид – на рис. 5.2.

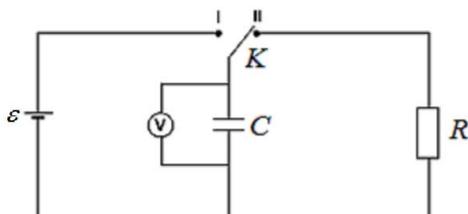


Рис. 5.1. Схема установки: ε – источник тока; V – вольтметр; R – резистор; C – конденсатор с неизвестной емкостью; K – ключ

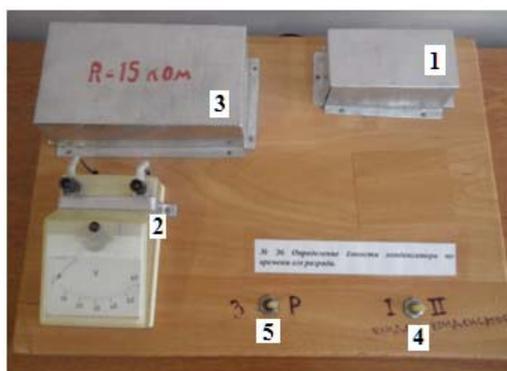


Рис. 5.2. Внешний вид установки: 1 – источник тока; 2 – вольтметр; 3 – резистор; 4 – переключатель конденсаторов; 5 – переключатель зарядки-разрядки конденсатора

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. 5.3) течет электрический ток.

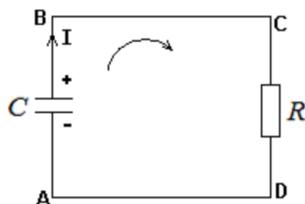


Рис. 5.3. Разряд конденсатора через сопротивление

Сила тока с течением времени меняется (уменьшается), но, учитывая, что скорость распространения тока равна скорости распространения электромагнитного поля и близка к значению 3×10^8 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:

$$q = q_0 e^{-\frac{1}{RC} t}. \quad (5.1)$$

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

$$U = U_0 e^{-\frac{1}{RC} t}. \quad (5.2)$$

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:

$$C = \frac{t}{R \cdot \ln \frac{U_0}{U}}. \quad (5.3)$$

Программа работы

1. Определение электроемкостей двух конденсаторов по времени разряда.
2. Исследование зависимости напряжения на конденсаторе с большей емкостью от времени его разряда $U = f(t)$.

Порядок работы

1. Собрать электрическую схему (рис. 5.1).
2. Записать значение сопротивления R (указано на установке). Оценить его абсолютную погрешность ΔR как погрешность константы.
3. Поставить переключатель 4 (рис. 5.2) в положение «I», подключив первый конденсатор.
4. Поставить ключ K в положение «З» (зарядка) и зарядить конденсатор от источника питания. Значение напряжения U_0 , до которого зарядится конденсатор, 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 на шкале вольтметра.
6. Переключить ключ в положение «P» (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 п. 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 (5.3) 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: $C = (\langle C \rangle \pm \Delta C) \text{ Ф}$.

11. Поставить переключатель 4 (рис. 5.2) в положение «II», подключив второй конденсатор.

12. Повторить п. 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, отличных друг от друга значений U . Измерения занести в таблицу. 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 каких величин 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. Описать устройство плоского конденсатора. Записать формулу емкости плоского конденсатора.
13. Изобразить параллельное соединение конденсаторов. Записать формулу полной емкости батареи параллельно соединенных конденсаторов.
14. Изобразить 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:
 электроёмкость 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						

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

8. Расчет емкости 1-го конденсатора:

$$\begin{aligned} \langle C_1 \rangle &= \\ \Delta C_1 &= \\ \frac{\Delta C_1}{\langle C_1 \rangle} \cdot 100 \% &= \end{aligned}$$

Окончательный результат: $C_1 =$

9. Результаты измерений для 2-го конденсатора:

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

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

время разряда конденсатора:

№	1	2	3	4	5	6
t, c						

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

10. Расчет емкости 2-го конденсатора:

$$\begin{aligned} \langle C_2 \rangle &= \\ \Delta C_2 &= \\ \frac{\Delta C_2}{\langle C_2 \rangle} \cdot 100 \% &= \end{aligned}$$

Окончательный результат: $C_2 =$

11. Исследование зависимости напряжения на конденсаторе с большей емкостью от времени его разряда

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

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

12. Вывод.

Научно-исследовательская работа студентов (НИРС)

1 уровень

Для того чтобы имелась возможность изменять не только емкость конденсатора, но и сопротивление резистора, добавить в используемую в лабораторной работе схему два или три резистора разного номинала.

Снять зависимость напряжения на конденсаторе от времени его разряда для различных резисторов. Представить эти зависимости в логарифмических координатах. Оценить все необходимые погрешности измерений.

Здесь важно понимание того, что время разряда конденсатора будет меняться не только при изменении его емкости – внутреннего параметра эксперимента, но и за счет сопротивления резистора – внешнего, управляемого параметра эксперимента.

2 уровень

Зарядить конденсатор и начать разряжать его через резистор одного номинала. В момент, когда напряжение на конденсаторе упадет примерно вдвое, переключить разрядку на резистор другого номинала. Измерить общее время разрядки конденсатора.

Повторить этот эксперимент, но теперь переключить разрядку конденсатора на другой резистор в тот момент, когда напряжение упадет не на половину, а на четверть от максимального значения. И снова определить общее время разрядки конденсатора. Сравнить полученные результаты.

Записать зависимость напряжения на конденсаторе от времени его разрядки для такого эксперимента в аналитическом виде. Здесь важно понимание того, как две экспоненты будут «сшиваться» в точке переключения. Это очень важный момент в исследовательской работе и обработке экспериментальных результатов, так как условия эксперимента изменяются непосредственно в ходе эксперимента.

Лабораторная работа Э6

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА С ПОМОЩЬЮ МОСТА УИТСТОНА

Цель работы – изучение мостовой схемы измерения физических величин; определение неизвестного сопротивления резистора с помощью моста Уитстона.

Приборы и принадлежности: источник тока, реохорд, гальванометр, резисторы, соединительные провода, мультиметр.

Описание установки и метода измерений

Измерительным мостом называется электрическая цепь, используемая для измерения физических величин методом сравнения с мерой пассивных параметров электрических цепей (сопротивления, индуктивности, емкости), а также величин, функционально с ними связанных.

Мост Уитстона представляет собой соединение четырех резисторов R_1 , R_2 , R_3 и R_4 , сопротивление одного из которых неизвестно и подлежит определению (рис. 6.1). Одна диагональ – AB четырехполюсника соединяется с источником тока (постоянного или переменного). В другую диагональ CD включают индикатор тока. Эту диагональ называют мостиком.

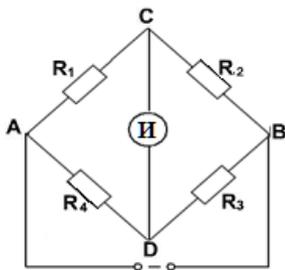


Рис. 6.1. Схема измерительного моста: R_1 , R_2 , R_3 , R_4 – резисторы; I – индикатор тока

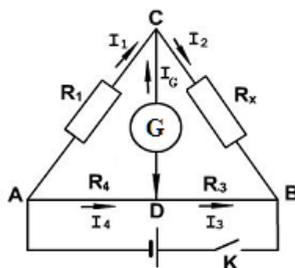


Рис. 6.2. Рабочая схема моста Уитстона: G – гальванометр; K – ключ; AB – реохорд; R_1 , R_x – резисторы; R_3 , R_4 – сопротивления плеч реохорда

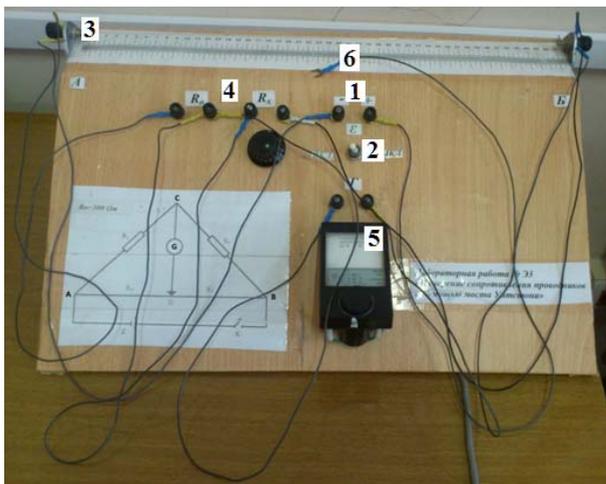


Рис. 6.3. Внешний вид установки: 1 – источник тока; 2 – тумблер (Вкл/Выкл); 3 – реохорд (калиброванная проволока); 4 – резисторы R_1, R_x ; 5 – гальванометр; 6 – ползунок

Рабочая схема моста Уитстона (рис. 6.2) отличается от приведенной на рис. 6.1 принципиальной схемы тем, что проводник AB представляет собой калиброванную проволоку из однородного материала с большим сопротивлением, натянутую на линейку с делениями и называемую *реохордом*. Контакт D – подвижный. В плечо AC включен резистор с известным сопротивлением, в плечо CB – с искомым сопротивлением R_x . Источник постоянного тока подключен к точкам A и B .

Для определения сопротивления R_x мостик приводится в равновесие при помощи подвижного контакта D . Равновесие наступает тогда, когда потенциалы точек C и D становятся равными и ток I_G в гальванометре G отсутствует.

Применяя первое правило Кирхгофа к узлам C и D , получаем:

$$I_1 - I_2 + I_G = 0,$$

$$I_4 - I_3 - I_G = 0;$$

так как $I_G = 0$, то $I_1 = I_2$,
 $I_3 = I_4$.

Применим второе правило Кирхгофа к контурам $ACDA$ и $CBDC$. Выберем направление обхода контуров по часовой стрелке. Учитывая, что ЭДС в этих контурах равна нулю, имеем:

$$I_1 R_1 - I_G R_G - I_4 R_4 = 0 \text{ или при } I_G = 0 \Rightarrow I_1 R_1 = I_4 R_4; \quad (6.1)$$

$$I_2 R_x - I_3 R_3 + I_G R_G = 0 \text{ или при } I_G = 0 \Rightarrow I_2 R_x = I_3 R_3, \quad (6.2)$$

Разделив почленно уравнение (6.1) на уравнение (6.2), получаем

$$\frac{I_1 R_1}{I_2 R_x} = \frac{I_4 R_4}{I_3 R_3}.$$

Учитывая, что $I_1 = I_2$ и $I_3 = I_4$, получаем

$$\frac{R_1}{R_x} = \frac{R_4}{R_3},$$

откуда

$$R_x = R_1 \frac{R_3}{R_4}. \quad (6.3)$$

Сопrotивление цилиндрического проводника определяется по формуле $R = \rho \frac{l}{S}$, поэтому отношение сопротивлений $\frac{R_3}{R_4}$ можно заменить отношением длин плеч реохорда $\frac{l_3}{l_4}$, тогда формула (6.3) примет вид:

$$R_x = R_1 \frac{l_3}{l_4}, \quad (6.4)$$

где R_1 — сопротивление, величина которого задана.

Программа работы

1. Измерить длины плеч реохорда l_3 и l_4 .
2. Определить величину неизвестного сопротивления с помощью моста Уитстона.
3. Измерить неизвестное сопротивление с помощью мультиметра.

Порядок работы

1. Собрать схему моста Уитстона (рис. 6.2, 6.3).
2. Записать значение сопротивления R_1 (оно указано на установке).
Определить абсолютную ΔR_1 (как погрешность константы) и относительную погрешности этого сопротивления.
3. После проверки схемы лаборантом замкнуть цепь и уравновесить мост. Для этого нужно перевести тумблер 2 (рис. 6.3) в положение «Вкл» и, передвигая ползунок 6 по калиброванной проволоке (реохорду), найти такое положение ползунка (точка D), при котором стрелка гальванометра G установится на ноль.

4. Измерить длину плеча реохорда l_4 , равную отрезку AD .
5. Повторить опыт 5–6 раз. Найти среднее значение длины плеча реохорда $\langle l_4 \rangle$. Оценить абсолютную погрешность измерения длины плеча Δl_4 как погрешность прибора и ее относительную погрешность.
6. Найти среднее значение плеча реохорда l_3 : $\langle l_3 \rangle = AB - \langle l_4 \rangle$. Абсолютная погрешность измерений этого плеча $\Delta l_3 = \Delta l_4$. Рассчитать относительную погрешность.
7. Отключить установку (перевести тумблер 2 в положение «Выкл»). Снять все соединительные провода с клемм моста Уитстона.
8. Определить неизвестное сопротивление $\langle R_x \rangle$ по формуле (6.4). Рассчитать его абсолютную погрешность:

$$\Delta R_x = \langle R_x \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l_3}{\langle l_3 \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l_4}{\langle l_4 \rangle}\right)^2}$$

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

9. Взять у лаборанта мультиметр. Внимательно ознакомиться с устройством этого прибора.

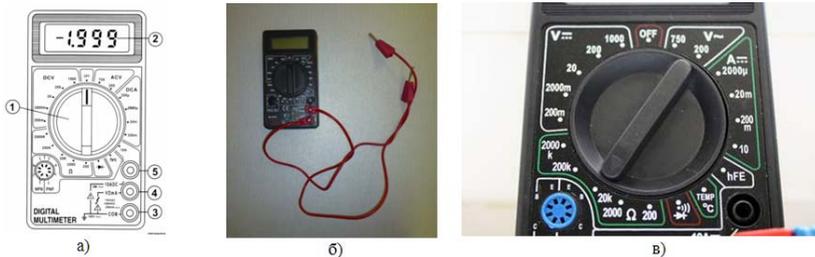


Рис. 6.4. Мультиметр: а) схема: 1 – переключатель рода работ и диапазонов; 2 – дисплей; 3 – разъём (гнездо) «COM» (общий); 4 – разъём «V, Ω, mA»; 5 – разъём «10 A» – для измерений токов на пределе 10 А; б) внешний вид; в) измерение сопротивления

10. Измерить исследуемое сопротивление R_x с помощью мультиметра, для чего черный щуп от разъема «COM» и красный щуп от разъема «V, Ω, mA» мультиметра подключить к клеммам неизвестного сопротивления R_x . Переключатель из положения «OFF» перевести на предел измерения предполагаемого сопротивления

(оно известно из измерений с помощью моста Уитстона). Если сомневаетесь в предварительных расчетах сопротивления, то, для того чтобы мультиметр не вышел из строя, переключатель желательно установить на максимально возможный предел измерений (2000 k), если показание при этом слишком мало, для получения более точного результата переключить на более низкий предел (200 k ; 20 k ; 2000 ; 200). После измерения переключатель перевести обратно в положение «OFF».

11. Сравнить результаты измерений двумя методами.
12. Сделать вывод по работе.

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. Каков принцип работы измерительного моста Уитстона?
5. Для чего служит нулевой индикатор? Какие приборы могут использоваться в качестве нулевого индикатора?
6. Какой прибор называется реохордом? Почему измерение сопротивлений R_3 и R_4 заменяют измерением плеч реохорда l_3 и l_4 ?
7. Что называется электрическим током? Какой электрический ток называется постоянным?
8. Что называется электрическим сопротивлением? От чего оно зависит? В каких единицах измеряется?
9. Как рассчитывается сопротивление цилиндрического проводника? От каких величин оно зависит?
10. Что такое удельное сопротивление, удельная электропроводность проводника? От чего они зависят? В каких единицах измеряются?
11. Какая цепь называется разветвленной?
12. Дать определение узла разветвленной цепи.
13. Сформулировать и записать первое правило Кирхгофа. Следствием какого закона оно является?

14. Сформулировать и записать второе правило Кирхгофа. Следствием какого закона оно является?
15. Вывести расчетную формулу.

Содержание отчета

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

неизвестное сопротивление резистора: $R_x =$

абсолютная погрешность: $\Delta R_x =$

6. Заданные в работе величины:

сопротивление: $R_1 =$ $\Delta R_1 =$ $\frac{\Delta R_1}{R_1} =$
 $\langle R_1 \rangle =$

7. Результаты измерений:

длина плеча реохорда l_4 :

№	1	2	3	4	5
$l_4, \text{ см}$					

$\langle l_4 \rangle =$ $\Delta l_4 =$ $\frac{\Delta l_4}{\langle l_4 \rangle} =$

длина плеча реохорда l_3 :

$\langle l_3 \rangle =$ $\Delta l_3 =$ $\frac{\Delta l_3}{\langle l_3 \rangle} =$

8. Расчет неизвестного сопротивления резистора:

$\langle R_x \rangle =$

$\Delta R_x =$

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

Окончательный результат: $R_x =$

9. Измерение неизвестного сопротивления резистора мультиметром:

$R_x =$

10. Сравнение результатов.

11. Вывод.

Лабораторная работа Э7

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ СПИРАЛИ ЛАМПЫ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы – исследование зависимости сопротивления спирали лампы накаливания от температуры.

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

Описание установки и метода измерений

Схема установки показана на рис. 7.1. Экспериментальная установка представлена на рис. 7.2.

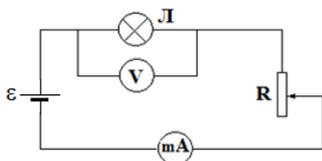


Рис. 7.1. Схема установки: V – вольтметр; mA – миллиамперметр; L – лампа накаливания; R – реостат; ε – источник

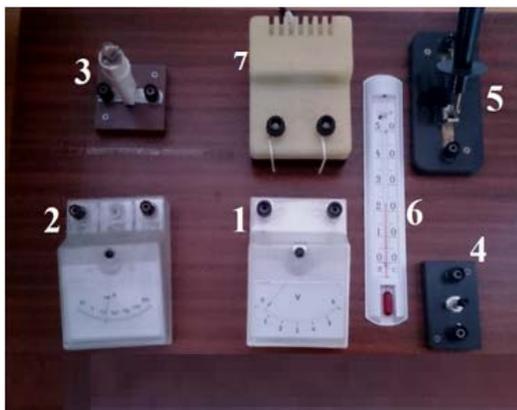


Рис. 7.2. Экспериментальная установка: 1 – вольтметр; 2 – миллиамперметр; 3 – лампа накаливания; 4 – реостат; 5 – ключ; 6 – термометр; 7 – источник питания

При изучении электрического тока мы сталкиваемся с понятием электрического сопротивления.

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

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (7.1)$$

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:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0(1 + \alpha t); \\ R &= R_0(1 + \alpha t), \end{aligned} \quad (7.2)$$

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 (7.2) 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 $\alpha = 0,0048 \text{ град}^{-1}$.

Проволочная спираль лампы накаливания характеризуется определенным сопротивлением. Если через лампу накаливания пропустить 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 (7.2) будет иметь вид:

$$R = R_k(1 + \alpha \Delta t), \quad (7.3)$$

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:

$$\Delta t = \frac{R - R_k}{\alpha R_k}. \quad (7.4)$$

Тогда конечная температура спирали лампы накаливания:

$$t = t_k + \Delta t. \quad (7.5)$$

На рабочей установке (рис. 7.2) к выходным гнездам выпрямителя 7 подключена электрическая цепь, составленная из соединенных последовательно лампы накаливания 3, реостата 4 и мил-

лиамперметра 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:

$$R = \frac{U}{I} \quad (7.6)$$

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 $R_k = \frac{U_{нач}}{I_{нач}}$.

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 $\Delta t = \frac{R - R_k}{\alpha R_k}$.
9. Рассчитать значения температуры спирали лампы по формуле $t = t_k + \Delta t$.
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 $U, \text{В}$	Сила тока, $I, \text{А}$	Сопротивление спирали лампы, $R, \text{Ом}$	Приращение температуры $\Delta t, \text{°C}$	Температура спирали лампы $t, \text{°C}$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

7. График зависимости сопротивления спирали лампы от ее температуры (на миллиметровой бумаге): $R = f(t)$.
8. Вывод.

Научно-исследовательская работа студентов (НИРС)

1 уровень

При выполнении данной лабораторной работы применяется методика, которая использует формулу линейной зависимости сопротивления лампы от температуры, что легко подтверждается экспериментом.

Предлагается рассчитать параметры эксперимента (сопротивление лампы и ее температуру) независимым образом. Для этого провести измерения напряжения на лампе и силу тока в ней. Определить сопротивление лампы по закону Ома. Одновременно с этим рассчитать мощность электрического тока. Затем оценить температуру лампочки, применяя формулу из раздела «Тепловое излучение» $P \sim \sigma T^4 S$, где σ – постоянная Стефана – Больцмана $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴); S – площадь поверхности спирали лампочки.

На данном этапе работы не нужно вдаваться в подробности, откуда взялась эта формула. Здесь важно, что при получении данных независимым друг от друга образом заранее линейная их зависимость не просматривается.

2 уровень

Усложнить 1-й уровень НИРС необходимостью посчитать площадь поверхности спирали лампочки. Эти спирали неоднократно рассматривались с помощью сканирующего электронного микроскопа. На изображениях есть масштабный отрезок. Применить математический аппарат для нахождения площади боковой поверхности не обычного, а весьма замысловато изогнутого цилиндра.

Важна именно оценка величины физического параметра, т. е. ее порядок, а не точное значение.

Лабораторная работа Э8 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ

Цель работы — знакомство с одним из способов точных электрических измерений — методом компенсации — и определение 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. 8.1, ее внешний вид — на рис. 8.2.

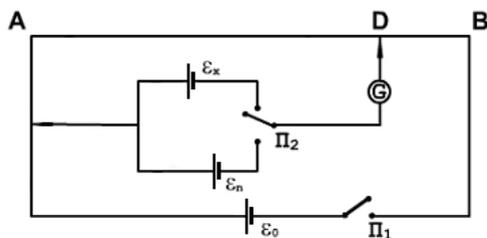


Рис. 8.1. Схема установки: ε_x — исследуемый источник тока; ε_n — нормальный элемент; ε_0 — дополнительный источник тока; AB — реохорд; G — гальванометр; Π_1 , Π_2 — переключатели

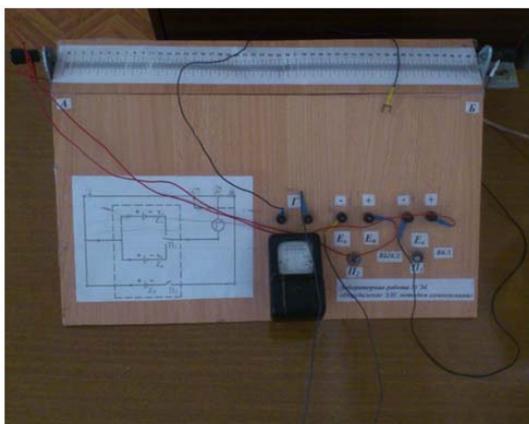
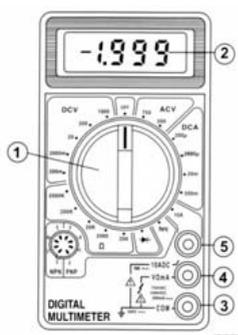
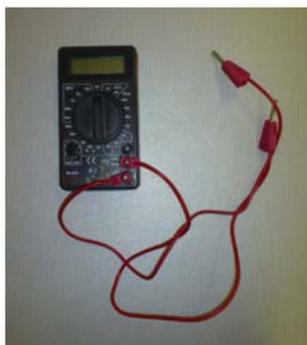


Рис. 8.2. Внешний вид экспериментальной установки



а)



б)

Рис. 8.3. Мультиметр: а) схема: 1 – переключатель рода работ и диапазонов; 2 – дисплей; 3 – разъем (гнездо) «СОМ» (общий); 4 – разъем «V, Ω, mA»; 5 – разъем «10 А» – для измерений токов на пределе 10 А; б) внешний вид

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. 8.4).

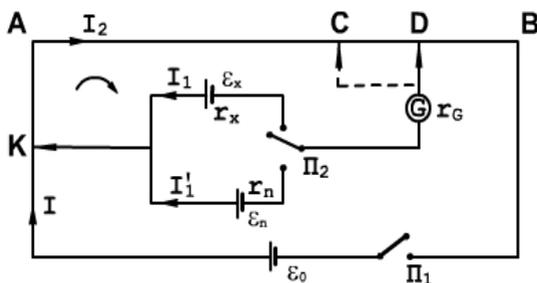


Рис. 8.4. Принципиальная схема рабочей установки

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:

$$I_1(r_G + r_x) + I_2 R_{AD} = \varepsilon_x, \quad (8.1)$$

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

При отсутствии тока в цепи гальванометра, т. е. при $I_1 = 0$, из уравнения (8.1) следует:

$$I_2 R_{AD} = \varepsilon_x. \quad (8.2)$$

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:

$$I'_1(r_G + r_n) + I'_2 R_{AC} = \varepsilon_n, \quad (8.3)$$

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

Учитывая, что ток в цепи гальванометра равен нулю, т. е. $I'_1 = 0$, получаем:

$$I'_2 R_{AC} = \varepsilon_n. \quad (8.4)$$

Следовательно, 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 $t = 20^\circ\text{C}$ $\varepsilon_n = 1,0186$ В.

Если $I_1 = 0$ и $I'_1 = 0$ (при отсутствии тока в гальванометре), то по первому правилу Кирхгофа ($\Sigma I_i = 0$) для точки K будет верно: $I_2 = I$ и $I'_2 = I$, т. е. $I_2 = I'_2$.

Разделив почленно соотношения (8.2) и (8.4), получим:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_n \frac{R_{AD}}{R_{AC}}.$$

Сопротивления R_{AD} и R_{AC} вычислим по формулам

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

где l_1 – длина AD реохорда; l_2 – длина AC реохорда.

Тогда

$$\varepsilon_x = \varepsilon_n \frac{l_1}{l_2}. \quad (8.5)$$

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 (8.5) 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. 8.1).
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 гальвано-

метр стал равным нулю. Измерить длину плеча реохорда l_1 , падение напряжения на котором компенсирует ε_x .

5. Подключить с помощью переключателя P_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 (п. 4–5) не менее шести раз.
7. Отключить установку от сети (ключ P_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 (8.5). 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: $\varepsilon_x = (\langle \varepsilon_x \rangle \pm \Delta \varepsilon_x)$ В.

10. Измерить ЭДС исследуемого элемента с помощью мультиметра (рис. 8.3), 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); 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 $\oint_l \vec{E}_{cm} d\vec{l} = \oint_l E_{l,cm} dl = ?$
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:

$$\langle \varepsilon_n \rangle =$$

$$\Delta \varepsilon_n =$$

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

Окончательный результат: $\varepsilon_x =$

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

10. Сравнение результатов.

11. Вывод.

Лабораторная работа Э9

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОЛЕЗНОЙ МОЩНОСТИ ИСТОЧНИКА ТОКА ОТ СОПРОТИВЛЕНИЯ НАГРУЗКИ

Цель работы – исследование зависимости 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. 9.1.

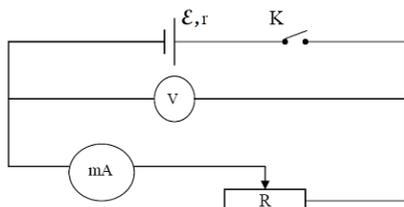


Рис. 9.1. Схема установки: V – вольтметр; mA – миллиамперметр; ε – источник тока; R – реостат с регулируемым сопротивлением; K – ключ



Рис. 9.2. Экспериментальная установка: измерительный блок АВ1, включающий цифровые вольтметр и амперметр, прибор комбинированный цифровой Щ4300, генератор напряжения ГН1, стенд с переменным сопротивлением

Экспериментальная установка представлена на рис. 9.2. 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. 9.3), а также стенда с переменным сопротивлением (рис. 9.4).

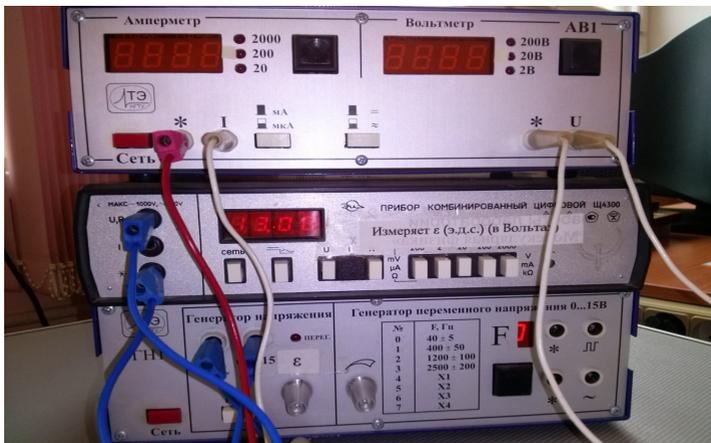


Рис. 9.3. Измерительный блок, включающий цифровые вольтметр и амперметр, прибор комбинированный цифровой Щ4300, генератор напряжения ГН1

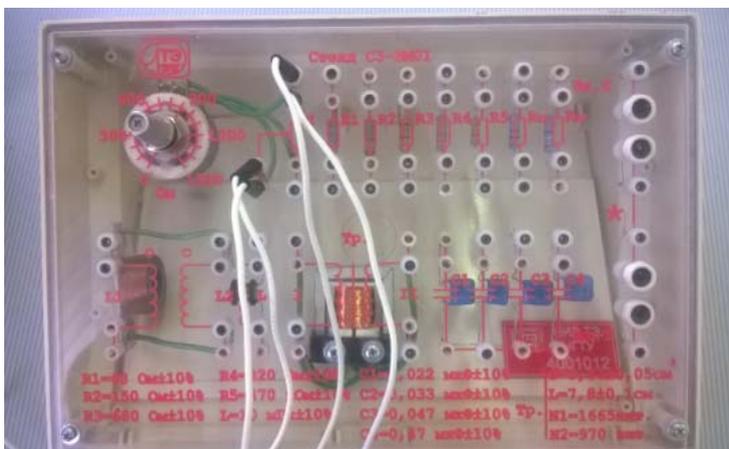


Рис. 9.4. Стенд с переменным сопротивлением

Для протекания в цепи электрического тока необходимы:

- 1) свободные носители тока, ими в проводящей среде могут быть электроны (в металлах) либо ионы (в электролитах);
- 2) электрическое поле, 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:

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q} . \quad (9.1)$$

Электродвижущая сила (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:

$$P = \frac{A_{\text{ст}}}{t} = \frac{\varepsilon q}{t} = \varepsilon I . \quad (9.2)$$

В замкнутой электрической цепи (рис. 9.4), содержащей источник тока и нагрузку, сила электрического тока рассчитывается по закону Ома для замкнутой цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} , \quad (9.3)$$

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

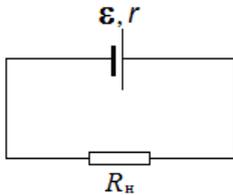


Рис. 9.4. Схема простейшей замкнутой электрической цепи

Тогда мощность, развиваемая источником, выражается:

$$P = \varepsilon I = \frac{\varepsilon^2}{(R+r)} = I^2(R+r). \quad (9.4)$$

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 :

$$P_n = IU = I^2 R = \frac{\varepsilon^2 R}{(R+r)^2}, \quad (9.5)$$

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

$$U = IR = \frac{\varepsilon R}{R+r}. \quad (9.6)$$

Из формул (9.3), (9.4), (9.5), (9.6) 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 (9.3) уменьшается от тока короткого замыкания до нуля:

$$I_{кз} = \frac{\varepsilon}{r}; \quad (9.7)$$

2) внешнее напряжение (9.6) возрастает от нуля до значения, равного ЭДС;

- 3) полная мощность (9.4) от своего максимального значения $P = Pr$ стремится к нулю при разомкнутой цепи;
- 4) полезная мощность P_n (9.5) 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 (9.5) приравняем нулю:

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

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 $I_{кз}$. 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 ком-

бинированному 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. 9.3), 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. 9.1. Установить на стенде (рис. 9.3) 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 высветились три значащие 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. Плавно 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 $I_{кз}$.
13. Рассчитать внутреннее сопротивление источника по формуле

$$r = \frac{\epsilon}{I_{кз}}.$$
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:

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

7. График зависимости силы тока от напряжения (на миллиметровой бумаге): $I = f(U)$.
8. Определение из графика:
силы тока короткого замыкания: $I_{\text{кз}} =$
ЭДС источника тока $\varepsilon =$
9. Расчет внутреннего сопротивления источника тока: $r =$
10. График зависимости полезной мощности от сопротивления нагрузки (на миллиметровой бумаге): $P_n = f(R)$.
11. Определение из графика сопротивления нагрузки, при котором полезная мощность максимальна: $R =$
12. Вывод.

Лабораторная работа Э10

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КПД ИСТОЧНИКА ТОКА ОТ СОПРОТИВЛЕНИЯ НАГРУЗКИ

Цель работы – исследование зависимости КПД 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. 10.1.

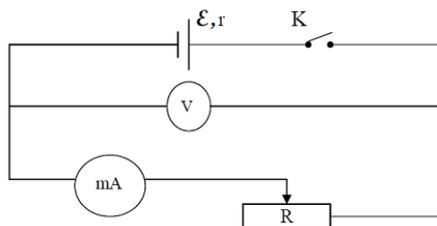


Рис. 10.1. Схема установки: V – вольтметр; mA – миллиамперметр; ε – источник тока; R – реостат с регулируемым сопротивлением; K – ключ



Рис. 10.2. Экспериментальная установка: измерительный блок АВ1, включающий цифровые вольтметр и амперметр, прибор комбинированный цифровой Щ4300, генератор напряжения ГН1, стенд с переменным сопротивлением

Экспериментальная установка представлена на рис. 10.2. 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. 10.3), а также стенда с переменным сопротивлением (рис. 10.4).

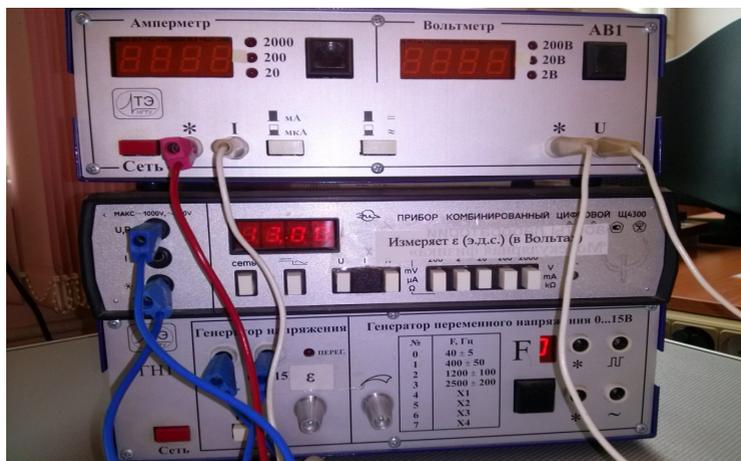


Рис. 10.3. Измерительный блок, включающий цифровые вольтметр и амперметр; прибор комбинированный цифровой Щ4300; генератор напряжения ГН1

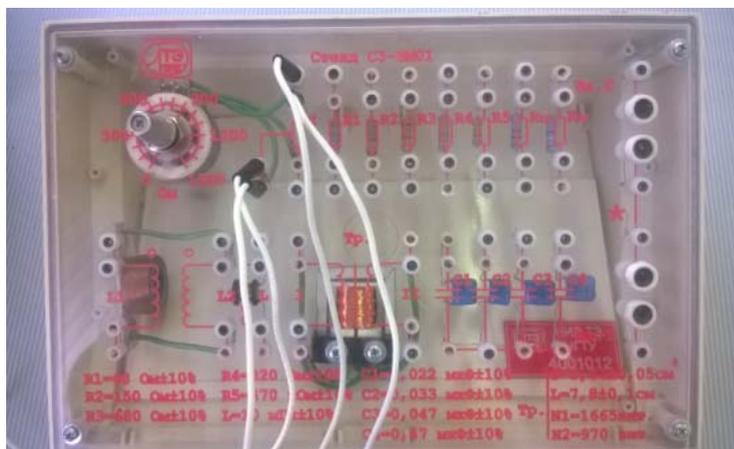


Рис. 10.4. Стенд с переменным сопротивлением

В данной лабораторной работе изучаются свойства источника электрического тока. Источник тока служит для создания и поддержания в цепи постоянного электрического тока. Силы, действующие на электрические заряды в источниках тока, имеют не электростатическое происхождение и называются сторонними.

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

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q}. \quad (10.1)$$

Электродвижущая сила (ЭДС) измеряется в вольтах.

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

$$P = \frac{A_{\text{ст}}}{t} = \frac{\varepsilon q}{t} = \varepsilon I. \quad (10.2)$$

В замкнутой электрической цепи, содержащей источник тока и нагрузку, сила электрического тока рассчитывается по закону Ома для замкнутой цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (10.3)$$

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

Тогда мощность можно представить формулой

$$P = I^2(R + r). \quad (10.4)$$

Анализ формулы (10.4) показывает, что мощность, развиваемая источником, выделяется на внутреннем сопротивлении источника r и на сопротивлении нагрузки R . Полезной является мощность, выделяемая на нагрузочном сопротивлении R :

$$P_n = IU = I^2 R = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2}. \quad (10.5)$$

Как видно из этой формулы, полезная мощность P_n зависит только от внешнего сопротивления в цепи (сопротивления нагрузки), так как ε и r являются постоянными величинами. Эту зависимость легко проанализировать теоретически. При коротком замыкании ($R = 0$) и при разомкнутой внешней цепи ($I = 0$) полезная мощность обращается в ноль. Таким образом, полезная мощ-

ность должна проходить через максимум. Чтобы выяснить условия, при которых полезная мощность достигает наибольшего значения, первую производную от (10.5) приравняем нулю:

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

Это равенство выполняется при условии $R = r$.

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

Коэффициентом полезного действия (КПД) источника тока называется физическая величина, определяющая степень совершенства устройства относительно совершения работы или преобразования энергии и равная отношению полезно используемой энергии (мощности) к общему количеству энергии (мощности), получаемой системой.

$$\eta = \frac{P_n}{P}. \quad (10.6)$$

Учитывая формулы (10.4) и (10.5), коэффициент полезного действия можно выразить:

$$\eta = \frac{P_n}{P} = \frac{I^2R}{I^2(R+r)} = \frac{R}{R+r}. \quad (10.7)$$

Из этого соотношения видим, что при максимальном значении полезной мощности (когда $R = r$) КПД достигает 50 %.

Но КПД можно выразить из формул (10.2) и (10.5):

$$\eta = \frac{P_n}{P} = \frac{UI}{\varepsilon I} = \frac{U}{\varepsilon}. \quad (10.8)$$

Следовательно, значение $\eta = 50\%$, при котором полезная мощность максимальна, будет при значении напряжения на нагрузке, равном половине ЭДС: $U = \frac{1}{2}\varepsilon$.

Найдем зависимость КПД источника от силы тока. Для этого запишем КПД в виде:

$$\eta = \frac{U}{\varepsilon} = \frac{IR}{\varepsilon} = \frac{\varepsilon - Ir}{\varepsilon}. \quad (10.9)$$

Анализ этой формулы показывает, что $\eta = 1$ при разомкнутой цепи $I = 0$. Увеличение тока сопровождается уменьшением η . КПД становится равным нулю при $\varepsilon = Ir$, т. е. при коротком замыкании источника тока ($R = 0$).

Программа работы

1. Измерение напряжения и силы тока при различных значениях сопротивления нагрузки.
2. Расчет сопротивления нагрузки, полезной мощности, полной мощности и КПД источника тока.
3. Построение и анализ графиков зависимостей $\eta = f(R)$; $\eta = f(I)$.

Порядок работы

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой.
2. Установить на амперметре измерительного блока АВ1 предел измерения mA , на вольтметре задать род тока – постоянный «= \Rightarrow ». Включить измерительный блок в сеть.
3. Прибор комбинированный цифровой Щ4300 подготовить к работе: род тока – постоянный «= \Rightarrow »; 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 комбинированному цифровому прибору 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. 10.3), 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. 10.1. Установить на стенде (рис. 10.3) 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 высветились три значащие 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. Плавно изменяя переменное сопротивление нагрузки R (поворачивая ручку вправо), повторить измерения силы тока и напряжения не менее 10 раз. Данные занести в таблицу. **Одно из измеренных значений напряжения должно равняться половине ЭДС, так как при этом напряжении полезная мощность максимальна.**
11. По измеренным значениям I и U рассчитать значения сопротивления нагрузки по закону Ома для участка цепи: $R = \frac{U}{I}$.
12. Рассчитать значения полезной мощности по формуле $P_n = IU$.
13. Рассчитать значения полной мощности по формуле $P = I\varepsilon$.
14. Рассчитать КПД источника тока по формуле $\eta = \frac{P_n}{P}$.
15. Результаты расчетов занести в таблицу.
16. Построить на миллиметровой бумаге по результатам вычислений графики зависимости $\eta = f(R)$ и $\eta = f(I)$.
17. 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. Проанализировав теоретически зависимость полезной мощности от сопротивления, установите, как должен выглядеть график $\eta = f(R)$.
5. Проанализировав теоретически зависимость полезной мощности от силы тока, определите, как должен выглядеть график $\eta = f(I)$.
6. Что называется источником тока?
7. Дать определение электродвижущей силы источника тока. В каких единицах измеряется эта величина?

8. Какие силы называются сторонними?
9. Записать закон Ома для однородного участка цепи и для замкнутой цепи.
10. Дать определение мощности, развиваемой источником тока. Записать ее формулу.
11. Где выделяется полезная, бесполезная, полная мощность?
12. Дать определение полезной мощности. Записать ее формулу.
13. Вывести условие, при котором полезная мощность максимальна.
14. Дать определение коэффициента полезного действия источника тока.
15. Чему равен КПД источника тока при максимальном значении полезной мощности?

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.
5. Расчетные формулы:
 сопротивление нагрузки: $R =$
 полезная мощность: $P_n =$
 полная мощность источника тока: $P =$
 КПД источника тока: $\eta =$
6. Результаты измерений и вычислений:
 ЭДС источника тока: $\varepsilon =$

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

7. График зависимости коэффициента полезного действия от сопротивления нагрузки (на миллиметровой бумаге): $\eta = f(R)$.
8. График зависимости коэффициента полезного действия от силы тока (на миллиметровой бумаге): $\eta = f(I)$.
9. Вывод.

Лабораторная работа Э11

ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Цель работы — измерение индукции магнитного поля между полюсами электромагнита.

Приборы и принадлежности: физический маятник, выпрямитель для питания цепи физического маятника, электромагнит, выпрямитель для питания цепи электромагнита, реостат, соединительные провода, секундомер.

Описание установки и метода измерений

Принципиальная схема установки приведена на рис. 11.1, внешний вид экспериментальной установки — на рис. 11.2.

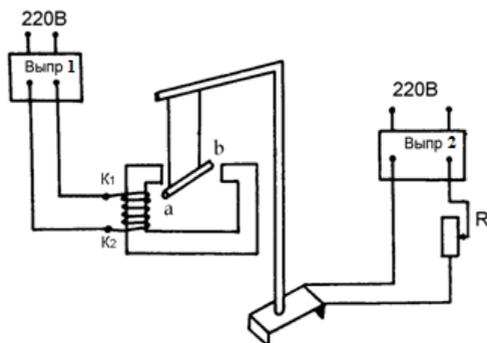


Рис. 11.1. Схема установки: Выпр. 1 — выпрямитель для питания цепи электромагнита; Выпр. 2 — выпрямитель для питания цепи физического маятника; R — реостат; ab — физический маятник

Основную часть установки составляет физический маятник, колеблющийся в магнитном поле между полюсами электромагнита (рис. 11.1, 11.2).

Физическим маятником называют твердое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания около неподвижной оси подвеса. В данной работе роль физического маятника выполняет проводник ab , подвешенный на двух токопроводящих нитях. Силу тока в цепи маятника можно изменять с помощью реостата R .

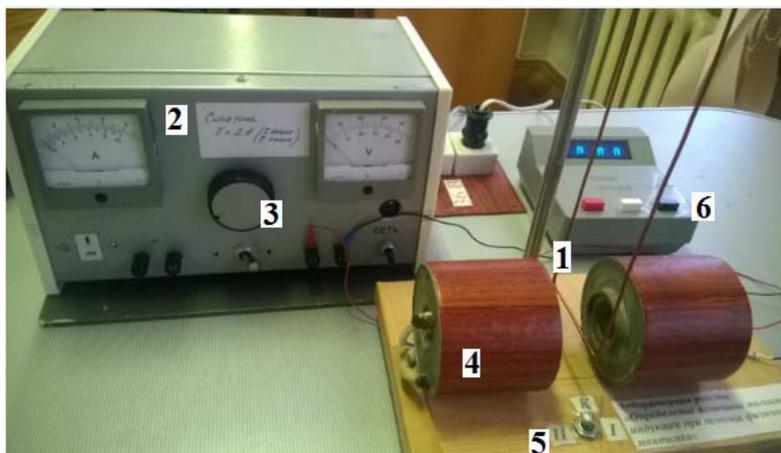


Рис. 11.2. Экспериментальная установка: 1 – физический маятник; 2 – источник тока; 3 – регулировочная ручка; 4 – электромагнит; 5 – ключ; 6 – электронный секундомер

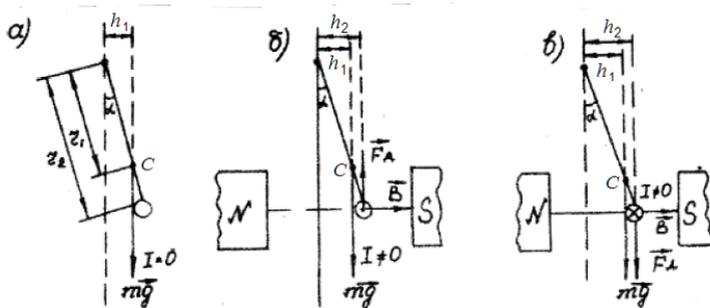


Рис. 11.3. Силы, действующие на физический маятник: а – без тока; б, в – при различных направлениях тока в проводнике ab

Если физический маятник (при отсутствии электрического тока в нем) отклонить от положения равновесия (рис. 11.3, а), то сила тяжести $m\vec{g}$, приложенная к центру масс маятника в точке C , создаст момент силы относительно оси подвеса, стремящийся вернуть маятник к положению равновесия:

$$M_0 = -mgh_1 = -mgr_1 \sin \alpha,$$

где h_1 – плечо силы тяжести; r_1 – расстояние от оси вращения до центра масс маятника C .

При малом угле α можно заменить $\sin \alpha \approx \alpha$ и тогда

$$M_0 = -mgr_1 \alpha.$$

Если маятник помещен в магнитное поле с индукцией \vec{B} и в проводнике ab течет электрический ток I , то на этот проводник начинает действовать сила Ампера \vec{F}_A , также создающая момент силы относительно оси подвеса маятника (рис. 11.3, \bar{b} , \bar{e}). Направление силы Ампера, определяемое по правилу левой руки, зависит от направления тока в физическом маятнике.

В случае, изображенном на рис. 11.3, \bar{b} , сила Ампера действует противоположно силе тяжести. Обе эти силы создают вращающий момент, определяемый соотношением:

$$\begin{aligned} M_1 &= -mgh_1 + F_A h_2 = -mgr_1 \sin \alpha + F_A r_2 \sin \alpha = \\ &= -(mgr_1 - F_A r_2) \sin \alpha \approx -(mgr_1 - F_A r_2) \alpha, \end{aligned}$$

где h_2 — плечо силы Ампера; r_2 — расстояние от оси подвеса до проводника ab .

Так как $M_1 < M_0$, то маятник будет медленнее возвращаться к положению равновесия, т. е. период его колебаний увеличится $T_1 > T_0$.

При изменении направления тока в маятнике (рис. 11.3, \bar{e}) изменяется направление силы Ампера, она начинает действовать в том же направлении, что и сила тяжести. Обе эти силы создают вращающий момент:

$$M_2 = -mgh_1 - F_A h_2 = -(mgr_1 + F_A r_2) \sin \alpha \approx -(mgr_1 + F_A r_2) \alpha.$$

В этом случае $M_2 > M_0$, т. е. маятник быстрее возвращается к положению равновесия и период его колебаний уменьшается $T_2 < T_0$.

Для получения расчетной формулы используем основной закон динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси:

$$J\epsilon = M,$$

где J — момент инерции маятника относительно оси подвеса; ϵ — угловое ускорение; M — вращающий момент.

Подставляя вместо углового ускорения ϵ равное ему отношение $\epsilon = \frac{d^2\alpha}{dt^2}$, а вместо M моменты сил M_1 и M_2 , получаем:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = -(mgr_1 - F_A r_2) \alpha, \text{ или } \frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{mgr_1 - F_A r_2}{J} \alpha = 0; \quad (11.1)$$

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = -(mgr_1 + F_A r_2)\alpha, \text{ или } \frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{mgr_1 + F_A r_2}{J} \alpha = 0. \quad (11.2)$$

Сравним полученные соотношения (11.1) и (11.2) с дифференциальным уравнением гармонических колебаний: $\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \omega^2\alpha = 0$. Роль круговой частоты ω выполняют соотношения:

$$\omega_1^2 = \frac{mgr_1 - F_A r_2}{J}, \quad (11.3)$$

$$\omega_2^2 = \frac{mgr_1 + F_A r_2}{J}. \quad (11.4)$$

Вычитая почленно правые и левые части соотношений (11.3) и (11.4), получим: $\omega_2^2 - \omega_1^2 = \frac{2F_A r_2}{J}$, откуда сила Ампера

$$F_A = \frac{J}{2r_2} (\omega_2^2 - \omega_1^2).$$

Учитывая, что модуль силы Ампера определяется соотношением $F_A = IlB$, где l — длина проводника ab , а круговая частота ω связана с периодом колебаний T формулой $\omega = \frac{2\pi}{T}$, получим:

$$B = \frac{2\pi^2 J}{Ilr_2} \left(\frac{1}{T_2^2} - \frac{1}{T_1^2} \right). \quad (11.5)$$

Так как в условиях эксперимента момент инерции маятника J , длина проводника l , расстояние от оси вращения до проводника r_2 — постоянны, то определение индукции магнитного поля сводится к измерению силы тока и периодов колебаний T_1 и T_2 при различных направлениях тока в физическом маятнике.

Программа работы

1. Рассчитать период колебаний маятника при определенном направлении тока в нем.
2. Определить период колебаний маятника при токе противоположного направления.
3. Вычислить индукцию магнитного поля.

Порядок работы

1. Ознакомиться с установкой.
2. Установить, если это возможно, расстояние между полюсами электромагнита 4–5 см.

3. На источнике тока установить род тока «—» постоянный (тумблер переключить вправо).
4. Подключить источник тока к клеммам на установке.
5. Включить источник тока в сеть (на задней панели тумблер перевести в положение вверх, на передней панели включить тумблер «сеть»).
6. Установить с помощью регулировочной ручки 3 (рис. 11.2) ток в маятнике 1–2 А (по верхней шкале).
7. Перевести ключ K в положение «I».
8. Подключить электронный секундомер в сеть.
9. Определить период колебаний маятника T_1 для заданного направления тока в нем, измерив секундомером 6 раз время 5–10 полных колебаний и воспользовавшись формулой $T = t/N$, где t – время колебаний, N – количество колебаний.
10. Рассчитать среднее значение периода $\langle T_1 \rangle$. Определить абсолютную погрешность периода ΔT_1 как погрешность прибора.
11. Изменить направление тока в маятнике, переключив ключ K в положение «II».
12. Определить период T_2 колебаний маятника при другом направлении тока аналогично тому, как описано в п. 8.
13. Рассчитать среднее значение периода $\langle T_2 \rangle$. Записать абсолютную погрешность периода $\Delta T_2 = \Delta T_1$.
14. Вычислить по формуле (11.5) индукцию магнитного поля в зазоре электромагнита. Оценить её абсолютную погрешность по формуле

$$\Delta B = \langle B \rangle \sqrt{\left(\frac{2\Delta\pi}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta J}{J}\right)^2 + \left(\frac{\Delta r_2}{r_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \frac{(2T_1^{-3}\Delta T_1)^2 + (2T_2^{-3}\Delta T_2)^2}{(T_2^{-2} - T_1^{-2})^2}}$$

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

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. Каковы источники магнитного поля? Что служит источником магнитного поля в данной работе?
5. Какое магнитное поле называется однородным? Однородно ли магнитное поле в данной работе?
6. Какие силы создают вращательный момент относительно оси подвеса маятника в данной работе?
7. Что называется физическим маятником? Что в данной работе играет роль физического маятника?
8. Что называется периодом колебаний? Как измеряется период колебаний в данной работе?
9. Почему период колебаний маятника изменяется при изменении направления тока в нем?
10. Сформулировать и записать закон Ампера.
11. Как определяется направление силы Ампера?
12. Как проявляется действие закона Ампера в данной работе?
13. Что называется магнитной индукцией? В каких единицах она измеряется?
14. Как определить направление силовой линии и направление вектора магнитной индукции в конкретной точке пространства?
15. Вывести расчетную формулу для определения магнитной индукции в данной работе.

Содержание отчета

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

индукция магнитного поля: $B =$

абсолютная погрешность: $\Delta B =$

период колебаний $T =$

6. Постоянные и заданные в работе величины:

$$\pi = \quad \Delta\pi = \quad \frac{\Delta\pi}{\pi} =$$

$$\text{момент инерции маятника: } J = \quad \Delta J = \quad \frac{\Delta J}{J} =$$

$$\text{длина проводника: } l = \quad \Delta l = \quad \frac{\Delta l}{l} =$$

расстояние от оси вращения до проводника:

$$r_2 = \quad \Delta r_2 = \quad \frac{\Delta r_2}{r_2} =$$

$$\text{сила тока: } I = \quad \Delta I = \quad \frac{\Delta I}{I} =$$

7. Измерение периода колебаний для одного направления тока в маятнике:

$$N =$$

№	1	2	3	4	5	6
t, c						
T_1, c						

$$\langle T_1 \rangle = \quad \Delta T_1 =$$

8. Измерение периода колебаний для другого направления тока в маятнике:

$$N =$$

№	1	2	3	4	5	6
t, c						
T_2, c						

$$\langle T_2 \rangle = \quad \Delta T_2 =$$

9. Расчет магнитной индукции:

$$\langle B \rangle =$$

$$\Delta B =$$

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

$$\text{Окончательный результат: } B =$$

10. Вывод.

Лабораторная работа Э12

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Цель работы – измерение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли с помощью тангенс-гальванометра и определение постоянной этого прибора.

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

Описание установки и метода измерений

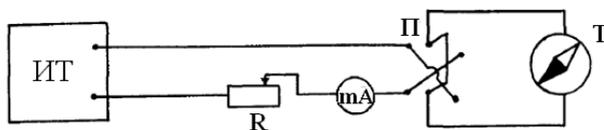


Рис. 12.1. Схема установки: *ИТ* – источник постоянного тока; *R* – реостат; *П* – переключатель; *T* – тангенс-гальванометр; *mA* – миллиамперметр



Рис. 12.2. Внешний вид установки: *1* – источник постоянного тока (выпрямитель В4-12); *2* – реостат со скользящим контактом; *3* – тангенс-гальванометр (тангенс-буссоль); *4* – миллиамперметр; *5* – переключатель

Основу установки составляет тангенс-гальванометр, представляющий собой плоскую вертикальную катушку, в центре которой помещена магнитная стрелка, способная вращаться вокруг вертикальной оси (*3* на рис. 12.2).

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. 12.3, 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.

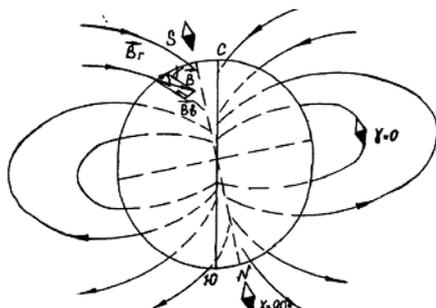


Рис. 12.3. Силовые линии магнитного поля Земли

Природа земного магнетизма ещё до конца не выявлена, 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}_v) составляющие (рис. 12.3), 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. 12.4).

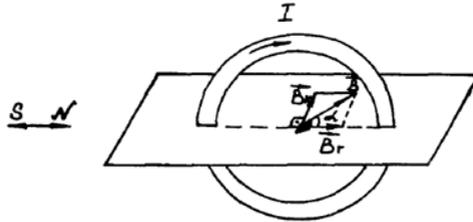


Рис. 12.4. Схема тангенс-гальванометра: SN — направление магнитного меридиана Земли; \vec{B}_r — вектор горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли; I — ток в катушке тангенс-гальванометра; \vec{B}_k — вектор индукции магнитного поля катушки с током; \vec{B} — вектор индукции результирующего магнитного поля

При пропускании тока в катушке магнитная стрелка окажется 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. 12.4, следует, что $\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_k}{B_r}$, откуда

$$B_r = \frac{B_k}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (12.1)$$

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

$$B_k = \frac{\mu_0 \mu I N}{2R}. \quad (12.2)$$

Подставив формулу (12.2) в отношение (12.1), получим:

$$B_r = \frac{\mu_0 \mu I N}{2R \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (12.3)$$

Измерив угол α , силу тока I , зная радиус катушки R и число витков в ней N , можно по формуле (12.3) определить горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли, которая для данной географической широты будет величиной постоянной.

Уравнение (12.3) можно представить в таком виде:

$$I = \frac{2B_1 R}{\mu_0 \mu N} \operatorname{tg} \alpha. \quad (12.4)$$

Величина C , которая рассчитывается по формуле

$$C = \frac{2B_1 R}{\mu_0 \mu N}, \quad (12.5)$$

называется постоянной тангенс-гальванометра.

С учётом этой замены соотношение (12.4) принимает вид:

$$I = C \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (12.6)$$

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 , 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. 12.2).
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 (12.3) 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 оконча-

тельный результат: $B_\Gamma = (\langle B_\Gamma \rangle \pm \Delta B_\Gamma)$ Тл.

13. Определить по формуле (12.5) 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 окончатель-

ный результат: $C = (\langle C \rangle \pm \Delta C)$ А.

14. Установить, перемещая движок реостата, другое значение силы тока в катушке. Повторить действия, описанные в п. 8–10. Рассчитать значение горизонтальной составляющей индукции магнитного 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 склонения 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: $B_{\Gamma} =$
абсолютная погрешность: $\Delta B_{\Gamma} =$

постоянная тангенс-гальванометра: $C =$

абсолютная погрешность: $\Delta C =$

6. Постоянные величины, используемые в работе:

магнитная постоянная: $\mu_0 =$ $\Delta\mu_0 =$ $\frac{\Delta\mu_0}{\mu_0} =$

магнитная проницаемость среды: $\mu =$

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

число витков в катушке: $N =$

7. Измерения:

сила тока в катушке: $I_1 =$ $\Delta I =$ $\frac{\Delta I}{I} =$

угол отклонения магнитной стрелки:

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

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. Расчет горизонтальной составляющей магнитного поля Земли и постоянной тангенс-гальванометра при другом значении силы тока:

$I_2 =$

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

$B_\Gamma =$

$C =$

11. Сравнение результатов.

12. Вывод.

Лабораторная работа Э13 ИНДУКЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Цель работы — знакомство с принципом работы милливеберметра и изучение зависимости индукции магнитного поля от силы тока в обмотке электромагнита.

Приборы и принадлежности: электромагнит с подвижными наконечниками, милливеберметр с измерительной катушкой, выпрямитель.

Описание установки и метода измерений

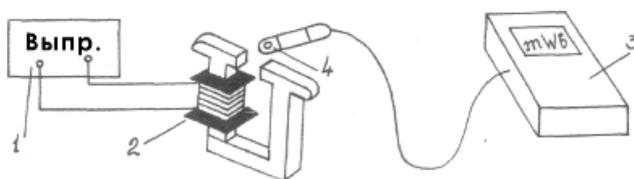


Рис. 13.1. Схема установки: 1 — выпрямитель; 2 — электромагнит; 3 — милливеберметр; 4 — измерительная катушка

Веберметр представляет собой баллистический гальванометр, используемый для измерения магнитного потока.

Гальванометры — это приборы, служащие для измерения слабых и кратковременных электрических токов.

Баллистический гальванометр является разновидностью гальванометра магнитоэлектрической системы, в котором лёгкая рамка при пропускании по ней тока поворачивается под действием силы Ампера в магнитном поле постоянного магнита, увлекая за собой стрелку прибора. Баллистический гальванометр отличается от обычного искусственным увеличением момента инерции его подвижной системы для быстрого затухания колебаний рамки. Так как при измерениях баллистическим гальванометром время протекания тока мало (меньше периода колебаний рамки), то можно считать, что рамка начинает свое движение уже после протекания тока, а первый отброс стрелки прибора пропорционален количеству электричества q , прошедшему через рамку.

Баллистический гальванометр (веберметр) включается в цепь измерительной катушки, помещаемой в исследуемое магнитное поле. В данной лабораторной работе веберметр помещается между полюсами электромагнита.

Полный магнитный поток (потокосцепление) через катушку, установленную перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, определится соотношением:

$$\Psi = N\Phi = NBS,$$

где S – сечение одного витка катушки; N – количество витков.

При изменении магнитного потока через измерительную катушку (например, выключением тока в цепи электромагнита или поворотом катушки) в ней возникает ЭДС индукции:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Psi}{dt},$$

а следовательно, и индукционный ток:

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R}.$$

Поскольку сила этого тока не постоянна $I_i \neq \text{const}$, то в цепи измерительной катушки и рамки гальванометра возникает ЭДС самоиндукции:

$$\varepsilon_S = -L \frac{dI}{dt}.$$

По второму правилу Кирхгофа

$$IR = \varepsilon_i + \varepsilon_S, \text{ или } IR = -\frac{d\Psi}{dt} - L \frac{dI}{dt},$$

где R – активное сопротивление катушки и рамки гальванометра.

Интегрируя последнее соотношение и учитывая, что $Idt = dq$, $I_{\text{нач}} = 0$, $I_{\text{кон}} = 0$, получаем:

$$\Delta\Psi = R \int_0^{\tau} Idt + L(I_{\text{кон}} - I_{\text{нач}}) = Rq,$$

т. е. количество протекшего через катушку и рамку гальванометра электричества (заряда q) пропорционально изменению магнитного потока через витки измерительной катушки.

Отброс стрелки баллистического гальванометра, пропорциональный количеству протекшего через него электричества, будет пропорционален изменению магнитного потока через витки измерительной катушки, соединенной с гальванометром:

$$\Delta\Psi = C(\alpha - \alpha_0), \quad (13.1)$$

где α_0 — начальное положение стрелки веберметра; α — отброс стрелки при включении тока в цепи электромагнита; C — постоянная веберметра.

При выключении тока в электромагните магнитный поток уменьшится до нуля и тогда изменение магнитного потока

$$\Delta\Psi = BSN. \quad (13.2)$$

Из соотношений (13.1) и (13.2) получаем:

$$BSN = C(\alpha - \alpha_0),$$

откуда

$$B = \frac{C(\alpha - \alpha_0)}{SN}. \quad (13.3)$$

Итак, измерение индукции магнитного поля сводится к измерению отброса стрелки веберметра α при выключении тока в цепи электромагнита. Значения C , S и N приведены на установке.

Программа работы

1. Измерить с помощью веберметра индукцию магнитного поля при разных значениях тока в цепи электромагнита.
2. Построить график зависимости $B = f(I)$.

Порядок работы

1. Собрать электрическую цепь (рис. 13.1).
2. Установить между плоскими наконечниками электромагнита зазор 1–2 см.
3. Поместить измерительную катушку в зазор между полюсами электромагнита.
4. Включить ток в цепи электромагнита I_1 и определить установившееся значение α_0 по шкале милливеберметра. Записать значение α_0 .
5. Выключить ток в электромагните и измерить максимальный отброс стрелки веберметра α .
6. Оценить абсолютную погрешность измерений $\Delta\alpha_0 = \Delta\alpha$ как погрешность прибора и выразить ее в радианах ($1^\circ = 1,75 \cdot 10^{-2}$ рад).

7. Рассчитать по формуле (13.3) индукцию магнитного поля B_1 , соответствующую току I_1 . Определить её абсолютную погрешность:

$$\Delta B_1 = \langle B_1 \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \frac{\Delta \alpha^2 + \Delta \alpha_0^2}{(\langle \alpha \rangle - \langle \alpha_0 \rangle)^2}}$$

и относительную погрешность: $\frac{\Delta B}{\langle B_1 \rangle} \cdot 100 \%$. Записать окончательный результат: $B_1 = (\langle B_1 \rangle \pm \Delta B_1)$ Тл.

8. Повторить действия (п. 3–5) для других значений тока в цепи электромагнита (8–10 значений) и занести результаты в таблицу. Рассчитать по ним значения магнитной индукции B .
9. Построить по полученным результатам на миллиметровой бумаге график зависимости $B = f(I)$.
10. 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 действия веберметра.
5. Описать суть индукционного метода измерения магнитной индукции в данной работе.
6. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
7. Сформулировать и записать закон Фарадея, описывающий явление электромагнитной индукции.
8. В чем заключается явление самоиндукции? Записать формулу ЭДС самоиндукции.
9. Как формулируется правило Ленца?
10. Дать определение магнитной индукции поля.
11. Дать определение магнитного потока.
12. Что называется потокоцеплением? Записать формулу полного магнитного потока соленоида.

13. Как рассчитывается изменение магнитного потока в данной работе?
14. Как будет изменяться магнитная индукция с возрастанием тока цепи электромагнита?
15. Вывод расчетной формулы магнитной индукции.

Содержание отчета

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

$$\text{индукция магнитного поля: } B =$$

$$\Delta B =$$

6. Исходные данные:

$$\text{количество витков катушки } N =$$

$$\text{площадь витка катушки } S = \Delta S =$$

$$\text{постоянная веберметра } C = \Delta C =$$

7. Измерения:

$$I_1 =$$

$$\alpha_0 = \Delta \alpha_0 =$$

$$\alpha = \Delta \alpha =$$

8. Расчет магнитной индукции:

$$\langle B_1 \rangle = \Delta B_1 = \frac{\Delta B}{\langle B_1 \rangle} \cdot 100 \% =$$

$$\text{Окончательный результат: } B_1 =$$

9. Таблица результатов измерений и вычислений

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$I, \text{ А}$								
α_0								
α								
$B, \text{ Тл}$								

10. График зависимости магнитной индукции от силы тока (на миллиметровой бумаге) $B = f(I)$.

11. Вывод.

Лабораторная работа Э14 ИССЛЕДОВАНИЕ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКА С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

Цель работы – исследование петли 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. 14.1, внешний вид экспериментальной установки приведен на рис. 14.2.

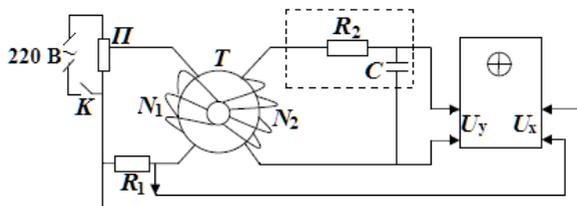


Рис. 14.1. Схема установки: Π – потенциометр; T – тороид; R_2C – интегрирующая цепочка; R_1 – низкоомный резистор; K – ключ



Рис. 14.2. Внешний вид экспериментальной установки

Исследование кривых гистерезиса, определение коэрцитивной силы и остаточной индукции осуществляются 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. 14.1). 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

$$U_x = U_1 = I_1 R_1. \quad (14.1)$$

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

$$H = I_1 \frac{N_1}{l} = I_1 n_1, \quad (14.2)$$

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

Из выражений (14.1) и (14.2) следует:

$$U_x = \frac{H}{n_1} R_1. \quad (14.3)$$

Значение электродвижущей силы, индуцируемой во вторичной обмотке,

$$\varepsilon = -\frac{d\psi}{dt} = N_2 S \frac{dB}{dt}, \quad (14.4)$$

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 (14.4) видно: 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:

$$U_y = U_c = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int I_2 dt, \quad (14.5)$$

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

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

$$I_2 = \frac{\varepsilon}{R_2 + R_c + R_{\text{обм}}} = \frac{\varepsilon}{R}, \quad (14.6)$$

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

Тогда, подставив выражения (14.6) и (14.4) в формулу (14.5), окончательно получим:

$$U_y = \frac{1}{C} \int \frac{N_2 S}{R} \frac{dB}{dt} dt = \frac{N_2 S}{RC} B. \quad (14.7)$$

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

Из приведенных рассуждений ясно: 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 $B = f(H)$, т. е. 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 индукции B , соответствующие координатам a_x и a_y , можно выразить из соотношений (14.3) и (14.7), представленных в виде:

$$H = \frac{n_1}{R_1} U_x; \quad B = \frac{RC}{N_2 S} U_y. \quad (14.8)$$

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

$$U_x = j_x a_x; \quad U_y = j_y a_y, \quad (14.9)$$

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

С учетом формул (14.9) выражения (14.8) для определения напряженности магнитного поля H и индукции B будут иметь вид:

$$H = \frac{n_1}{R_1} j_x a_x = k_1 a_x; \quad B = \frac{RC}{N_2 S} j_y a_y = k_2 a_y, \quad (14.10)$$

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

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}. \quad (14.11)$$

Программа работы

1. Получение на экране осциллографа петли магнитного гистерезиса.
2. Определение основных характеристик ферромагнетика (H_c , B_p , $\mu_{\text{пред}}$).
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. 14.2, 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 максимально-го. 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 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

- Титульный лист.
- Цель работы.
- Приборы и принадлежности.
- Схема установки.
- Расчетные формулы:
напряженность магнитного поля: $H =$
магнитная индукция: $B =$
магнитная проницаемость: $\mu =$
- Постоянные величины, используемые в работе:
 $k_1 =$
 $k_2 =$
- Измерения для предельной петли гистерезиса:
 $a_x =$ $a_y =$
 $a_{xc} =$ $a_{yr} =$
- Расчеты для предельной петли гистерезиса:
напряженность магнитного поля: $H_1 =$
магнитная индукция: $B_1 =$
магнитная проницаемость: $\mu_1 =$
коэрцитивная сила: $H_c =$
остаточная индукция: $B_r =$
- 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								

- График зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля (на миллиметровой бумаге) $B = f(H)$.
- График зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля (на миллиметровой бумаге) $\mu = \mu(H)$.
- Вывод.

Лабораторная работа Э15 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ

Цель работы — определение точки Кюри ферромагнитного образца.

Приборы и принадлежности: ферромагнитный образец, электрическая печь, термопара с милливольтметром, микроамперметр, градуировочный график.

Описание установки и метода измерений

Метод определения точки Кюри, применяемый в данной работе, основан на явлении электромагнитной индукции и называется индукционным методом. Для определения точки Кюри применяется установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 15.1.

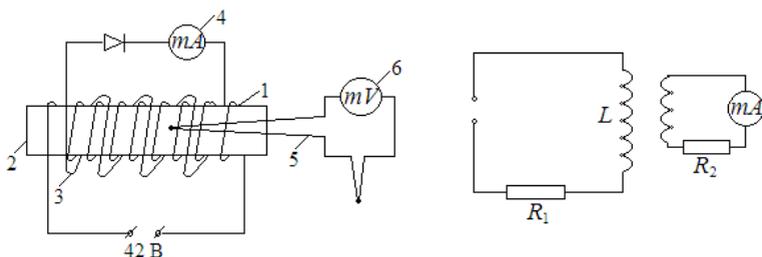


Рис. 15.1. Схема установки: 1 — печь; 2 — ферромагнитный образец; 3 — вторичная обмотка; 4 — миллиамперметр; 5 — термопара; 6 — милливольтметр

В печь 1, представляющую собой спираль из нихрома, помещается ферромагнитный образец 2. При протекании тока через спираль в ней выделяется тепло, которое идет на нагревание образца. Кроме того, во вторичной обмотке 3 индуцируется ЭДС. Температура образца определяется с помощью термопары 5, один спай которой помещен в печь, а другой находится в воздухе при комнатной температуре. Численное значение температуры определяется по градуировочной кривой термопары с использованием показаний милливольтметра 6. График градуировочной кривой термопары прилагается к установке. При достижении температуры Кюри магнитные свойства образца изменяются, вследствие чего ЭДС индук-

ции во вторичной обмотке резко падает, что отмечается микроамперметром 4.

Причина такого изменения ЭДС заключается в наличии у нагревательной спирали как индуктивного, так и омического сопротивлений (рис. 15.1 справа). Поэтому падение напряжения в первичной обмотке

$$U_1 = U_{R_1} + U_L,$$

где $U_{R_1} = I_1 R_1$ — падение напряжения на омическом сопротивлении; $U_L = -\varepsilon'_{\text{инд}}$ — падение напряжения на индуктивном сопротивлении, численно равное ЭДС индукции, возникающей в первичной цепи. Коэффициент самоиндукции первичной обмотки зависит от ее параметров и материала сердечника.

Таким образом, $U_1 = I_1 R_1 - \varepsilon'_{\text{инд}}$, отсюда $\varepsilon'_{\text{инд}} = I_1 R_1 - U_1$.

С другой стороны, по закону Фарадея

$$\varepsilon'_{\text{инд}} = -N_1 \frac{d\Phi_1}{dt},$$

где Φ_1 — магнитный поток, проходящий через один виток; N_1 — число витков первичной обмотки.

Такой же магнитный поток Φ_1 пронизывает каждый виток вторичной обмотки. Тогда ЭДС во вторичной обмотке

$$\varepsilon''_{\text{инд}} = -N_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi_1}{dt} = \frac{N_2}{N_1} \varepsilon'_{\text{инд}}.$$

Подставив значение $\varepsilon'_{\text{инд}}$, получим

$$\varepsilon''_{\text{инд}} = \frac{N_2}{N_1} (I_1 R_1 - U_1).$$

Из этой формулы следует, что при $U_1 = I_1 R_1 \Rightarrow \varepsilon''_{\text{инд}} = 0$.

Равенство $U_1 = I_1 R_1$ выполняется лишь в том случае, когда индуктивное сопротивление в цепи первичной катушки равно нулю. При приближении температуры образца к точке Кюри коэффициент самоиндукции, а следовательно, и индуктивное сопротивление первичной обмотки резко уменьшается и практически становится равным нулю. Поэтому $\varepsilon''_{\text{инд}} \approx 0$, значит, и ток во вторичной обмотке отсутствует. На этом основан метод определения точки Кюри ферромагнетиков.

Программа работы

1. Построить графики зависимостей тока во вторичной обмотке и температуры ферромагнитного образца от времени.
2. Определить точку Кюри.

Порядок работы

1. Собрать схему установки согласно рис. 15.1.
2. Включить установку и печь с разрешения лаборанта или преподавателя.
3. Регистрировать каждые 15 секунд показания микроамперметра и милливольтметра. Когда ток во вторичной обмотке начнет уменьшаться, снимать показания приборов каждые 5 секунд.
4. Зафиксировать показания милливольтметра, когда ток во вторичной обмотке упадет до нуля.
5. Выключить установку и печь.
6. Занести результаты измерений тока и напряжения в таблицу.
7. Определить значения температуры, соответствующие показаниям милливольтметра, по градуировочному графику и занести их в таблицу.
8. Построить графики зависимости тока во вторичной обмотке от времени $I = f(t)$ и температуры ферромагнитного образца от времени $T = f(t)$. (Графики строят друг под другом, по оси X откладывают время, а по оси Y – показания миллиамперметра и значения температуры.)
9. Определить абсолютные погрешности показаний микроамперметра и милливольтметра по классу точности электроизмерительных приборов $\Delta U = \frac{\gamma \cdot U_{\text{пред}}}{100}$; $\Delta I = \frac{\gamma \cdot I_{\text{пред}}}{100}$.
10. Определить точку Кюри Θ_K . Ей будет соответствовать показание температуры ферромагнитного образца при значении тока во вторичной обмотке, равном нулю.
11. Оценить по графику абсолютную погрешность точки Кюри и записать окончательный результат.

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 определения точки Кюри? На каком явлении он основан?
5. Как в данной работе измеряется температура магнетика?
6. Как в лабораторной работе определяется точка Кюри?
7. Что называется точкой Кюри?
8. Почему ЭДС индукции во вторичной обмотке резко уменьшается при достижении образцом точки Кюри?
9. Как классифицируются магнетики?
10. Как зависят от температуры магнитные свойства диамагнетика, парамагнетика и ферромагнетика?
11. Почему при определенной температуре ферромагнетики изменяют свои магнитные свойства?
12. Объяснить явление ферромагнетизма.
13. Что называется доменом?
14. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
15. Сформулировать и записать закон Фарадея, описывающий явление электромагнитной индукции.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.
5. Таблица результатов измерений

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$t, \text{с}$								
$I, \text{мкА}$								
$U, \text{мВ}$								
$T, \text{°C}$								

6. График зависимости тока во вторичной обмотке от времени

$$I = f(t).$$

7. График зависимости температуры от времени $T = f(t)$.

8. Определение точки Кюри

$$\Theta_K =$$

$$\Delta\Theta_K =$$

$$\frac{\Delta\Theta_K}{\Theta_K} =$$

9. Окончательный результат: $\Theta_K =$

10. Вывод.

Лабораторная работа Э16 ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ И ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ КАТУШЕК

Цель работы — изучение явления самоиндукции и взаимоиндукции, измерение индуктивности и взаимной индуктивности двух катушек.

Приборы и принадлежности: источник напряжения, вольтметр, миллиамперметр, исследуемые катушки.

Описание установки и метода измерений

Электрическая схема рабочей установки (рис. 16.1) предусматривает возможность подключения катушек с помощью переключателя 2 к источнику постоянного или переменного напряжения.

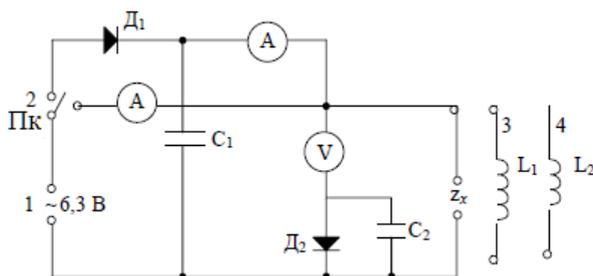


Рис. 16.1. Схема установки:

1 — источник тока; 2 — переключатель; 3, 4 — катушки

Если катушка включена в цепь постоянного тока, то ее сопротивление току (активное сопротивление) зависит от материала, длины и сечения провода, из которого намотана катушка:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (16.1)$$

Величину этого сопротивления можно найти по закону Ома:

$$R = \frac{U^-}{I^-}, \quad (16.2)$$

где U^- и I^- — напряжение и сила тока в цепи постоянного тока.

В цепи переменного тока катушка оказывает току не только активное, но и реактивное сопротивление X_L , зависящее от частоты тока и индуктивности катушки:

$$X_L = \omega L. \quad (16.3)$$

Действительно, напряжение на катушке равно ЭДС самоиндукции:

$$U_L = \varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}. \quad (16.4)$$

Ток в цепи изменяется по гармоническому закону:

$$I = I_0 \cos \omega t. \quad (16.5)$$

Подставив соотношение (16.5) в формулу (16.4), получим:

$$U_L = I_0 \omega L \sin \omega t = U_0 \sin \omega t,$$

где $U_0 = I_0 \omega L$.

По закону Ома произведение ωL выполняет роль сопротивления переменному току, которое называется реактивным индуктивным сопротивлением и обозначается X_L .

Сопротивления активное R и реактивное X_L складываются векторно с учетом сдвига по фазе на соответствующих сопротивлениях. Полное сопротивление катушки переменному току определяется соотношением

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (16.6)$$

Его можно найти по закону Ома для цепи переменного тока:

$$I \sim = \frac{U \sim}{Z}.$$

Откуда

$$Z = \frac{U \sim}{I \sim}, \quad (16.7)$$

где $U \sim$ и $I \sim$ — напряжение и сила тока в цепи переменного тока, измеренные вольтметром и амперметром.

Из соотношения (16.6) следует: $Z^2 = R^2 + \omega^2 L^2$. Отсюда

$$L = \sqrt{\frac{Z^2 - R^2}{\omega^2}} = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z^2 - R^2},$$

где $\omega = 2\pi\nu$; $\nu = 50$ Гц — частота переменного тока.

Окончательно формула для расчета индуктивности катушки будет иметь такой вид:

$$L = \frac{1}{2\pi\nu} \sqrt{Z^2 - R^2}. \quad (16.8)$$

Формула (16.8) может быть положена в основу экспериментального определения индуктивности каждой катушки и системы последовательно соединенных катушек.

Если катушки соединены последовательно, то индуктивность системы двух катушек определится потокосцеплением ψ :

$$\psi = LI, \quad (16.9)$$

где I – сила тока в катушках.

Суммарный магнитный поток (потокосцепление) равен алгебраической сумме всех потоков, пронизывающих витки первой и второй катушек:

$$\psi = \psi_{11} + \psi_{22} + \psi_{21} + \psi_{12}, \quad (16.10)$$

где ψ_{11} и ψ_{22} – собственные магнитные потоки через витки 1-й и 2-й катушек со стороны магнитных полей этих же катушек; ψ_{21} и ψ_{12} – «чужие» магнитные потоки через 1-ю и 2-ю катушки со стороны магнитного поля соседней катушки.

Собственные магнитные потоки положительны и определяются индуктивностями катушек:

$$\psi_{11} = L_1 I; \quad (16.11)$$

$$\psi_{22} = L_2 I. \quad (16.12)$$

«Чужие» магнитные потоки могут быть как положительными, так и отрицательными в зависимости от направления индукции магнитного поля в каждой из катушек. Их численные значения определяются взаимной индуктивностью катушек:

$$\psi_{21} = \pm MI; \quad \psi_{12} = \pm MI. \quad (16.13)$$

Если направления токов в катушках совпадают и их магнитные поля сонаправлены (рис. 16.2, а), то «чужие» потоки положительны. Подставив соотношения (16.9, 16.11, 16.12, 16.13) в формулу (16.10), получим: $L^+ I = L_1 I + L_2 I + 2MI$. Отсюда

$$L^+ = L_1 + L_2 + 2M. \quad (16.14)$$

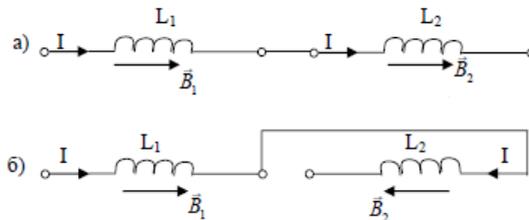


Рис. 16.2. Различные способы последовательного соединения катушек

Если же направления токов в катушках противоположны (рис. 16.2, б) и магнитные поля направлены навстречу друг другу, то получим: $L^{-}I = L_1I + L_2I + 2MI$. Отсюда

$$L^{-} = L_1 + L_2 + 2M. \quad (16.15)$$

Вычитая почленно из соотношения (16.14) соотношение (16.15), получим формулу для расчета коэффициента взаимной индукции:

$$M = \frac{L^{+} - L^{-}}{4}, \quad (16.16)$$

где L^{+} – индуктивность системы катушек, соединенных так, чтобы токи в них совпадали; L^{-} – индуктивность системы катушек, соединенных так, чтобы токи в них имели противоположные направления.

Значения индуктивностей L^{+} и L^{-} определяются по формуле (16.8).

Программа работы

1. Измерить индуктивности 1-й и 2-й катушек, включая их в цепь постоянного и переменного тока.
2. Измерить индуктивность системы двух катушек с сонаправленными токами и с токами противоположных направлений.
3. Рассчитать взаимную индуктивность катушек.

Порядок работы

1. Ознакомиться с установкой (рис. 16.3).



Рис. 16.3. Внешний вид установки: электронный амперметр и вольтметр в едином корпусе; лабораторный стенд

2. Собрать цепь. Подключить клеммы вольтметра « V » на стенде к клеммам «*» и « U » на электронном вольтметре. Соединить клеммы миллиамперметра « mA » на стенде с клеммами «*» и « I » на электронном амперметре.
3. Установить на электронном амперметре единицу измерения тока мА (отжатая кнопка \blacksquare) и предел измерения 2000 (черной кнопкой).
4. Подключить электронный вольтметр к розетке 220 В и нажать кнопку «Сеть». Установить на стенде переключатель в положение «Выкл» и подключить стенд к розетке 220 В.
5. Подключить на стенде к клеммам « Z_x » катушку с индуктивностью L_1 , соблюдая полярность («+» к «+» и «-» к «-»).
6. Установить на стенде переключатель рода тока в положение «-» (постоянный ток).
7. Установить на электронном амперметре переключатель рода тока в положение «=» постоянный ток (отжатая кнопка \blacksquare).
8. После проверки лаборантом схемы установить на стенде переключатель в положение «Вкл».
9. Измерить значения силы тока I и напряжения U и записать в таблицу.
10. Отключить стенд, установив переключатель в положение «Выкл».
11. Перевести на стенде переключатель рода тока в положение «~» (переменный ток).
12. Установить на электронном амперметре переключатель рода тока в положение «≈» переменный ток (кнопка нажата \blacksquare).
13. Подключить стенд, установив переключатель в положение «Вкл».
14. Измерить значения силы тока I и напряжения U и записать в таблицу.
15. Отключить стенд, установив переключатель в положение «Выкл».
16. Отсоединить катушку с индуктивностью L_1 от клемм « Z_x ».
17. Подключить к клеммам « Z_x » катушку с индуктивностью L_2 , соблюдая полярность, и повторить действия, указанные в п. 6–15.
18. Соединить катушки с индуктивностями L_1 и L_2 так, чтобы токи в них были направлены одинаково, для чего замкнуть клемму «+» одной катушки с клеммой «-» другой, а оставшиеся клеммы «-» и «+» подключить к « Z_x », соблюдая полярность.

19. Повторить действия, указанные в п. 6–15, и результаты занести в строку L^+ таблицы.
20. Соединить катушки с индуктивностями L_1 и L_2 так, чтобы токи в них имели разное направление, для чего клемму «+» одной катушки замкнуть с клеммой «+» другой, а оставшиеся клеммы «-» и «-» подключить к « Z_x ».
21. Повторить действия, указанные в п. 6–15, и результаты занести в строку L^- таблицы.
22. Вычислить по формулам (16.2), (16.7), (16.8), (16.16) величины R , Z , L , M и записать результаты в таблицу.
23. Оценить абсолютные погрешности измерения силы тока I и напряжения U , используя класс точности приборов:

$$\Delta I^- = \frac{\gamma I_{\max}^-}{100}; \quad \Delta I^+ = \frac{\gamma I_{\max}^+}{100}; \quad \Delta U^- = \frac{\gamma U_{\max}^-}{100}; \quad \Delta U^+ = \frac{\gamma U_{\max}^+}{100}.$$

24. Для 1-й катушки с индуктивностью L_1 рассчитать абсолютную погрешность измерения активного сопротивления по формуле

$$\Delta R = \langle R \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta U^-}{U^-}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I^-}{I^-}\right)^2}$$

и абсолютную погрешность измерения полного сопротивления по формуле

$$\Delta Z = \langle Z \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta U^-}{U^-}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I^-}{I^-}\right)^2}.$$

25. Рассчитать абсолютную погрешность измерения индуктивности 1-й катушки по формуле

$$\Delta L_1 = L_1 \sqrt{\left(\frac{\Delta \pi}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2 + \frac{(2R\Delta R)^2 + (2Z\Delta Z)^2}{4(Z^2 - R^2)^2}}$$

и относительную погрешность по формуле $\frac{\Delta L_1}{L_1} 100\%$.

Записать окончательный результат: $L_1 = (\langle L_1 \rangle \pm \Delta L_1)$ Гн.

26. Абсолютные погрешности катушек и их соединений принять равными друг другу $\Delta L_1 = \Delta L_2 = \Delta L^+ = \Delta L^-$.

27. Рассчитать абсолютную погрешность измерения взаимной индуктивности двух катушек по формуле $\Delta M = \sqrt{(\Delta L^+)^2 + (\Delta L^-)^2}$. Записать окончательный результат: $M = (\langle M \rangle \pm \Delta M)$ Гн.

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 определения индуктивности и взаимной индуктивности двух катушек?
5. В чем заключается явление самоиндукции? Как записывается формула для ЭДС самоиндукции?
6. Что называется индуктивностью? От чего она зависит и в каких единицах измеряется?
7. В чем заключается явление взаимной индукции? Как записывается формула для ЭДС взаимной индукции?
8. Что называется взаимной индуктивностью? От чего она зависит?
9. Как формулируется правило Ленца?
10. Что называется магнитным потоком и потокоцеплением? В каких единицах они измеряются?
11. Какое сопротивление оказывает катушка постоянному току? От чего оно зависит?
12. Как определяется реактивное индуктивное сопротивление X_L ?
13. Как определяется полное сопротивление катушки переменному току?
14. Как рассчитываются активное R и полное Z сопротивления в данной работе?
15. Как рассчитываются индуктивность катушки и взаимная индуктивность двух катушек в данной работе?

Содержание отчета

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

5. Расчетные формулы:

активное сопротивление: $R =$
 абсолютная погрешность: $\Delta R =$
 полное сопротивление: $Z =$
 абсолютная погрешность: $\Delta Z =$
 индуктивность катушки: $L =$
 абсолютная погрешность: $\Delta L =$
 взаимная индуктивность: $M =$
 абсолютная погрешность: $\Delta M =$

6. Постоянные величины, используемые в работе:

частота переменного тока: $\nu =$ $\Delta \nu =$ $\frac{\Delta \nu}{\nu} =$
 $\pi =$ $\Delta \pi =$ $\frac{\Delta \pi}{\pi} =$

7. Таблица результатов измерений и вычислений

	U^-	I^-	U^+	I^+	R	Z	L	M
L_1								
L_2								
L^+								
L^-								
M								

8. Расчет погрешностей измерений:

$\Delta I^- =$ $\Delta U^- =$
 $\Delta I^+ =$ $\Delta U^+ =$
 $\Delta R_1 =$
 $\Delta Z_1 =$
 $\Delta L_1 =$
 $\Delta M =$

9. Окончательные результаты:

$L_1 = (L_1 \pm \Delta L) =$
 $L_2 = (L_2 \pm \Delta L) =$
 $M = (M \pm \Delta M) =$

10. Вывод.

Научно-исследовательская работа студентов (НИРС)

1 уровень

Соединить катушки с индуктивностями L_1 и L_2 параллельно, для чего замкнуть клеммы «+» «-» одной катушки с соответствующими клеммами «+» «-» другой катушки и эти соединенные клеммы подключить к « Z_x ».

Повторить действия, указанные в п. 6–15 предыдущего раздела.

Рассчитать индуктивность $L_{\text{парал}}$ системы параллельно соединенных катушек по формуле (16.8).

Сравнить полученный результат с индуктивностями L_1 , L_2 , L^+ , L^- и сделать вывод.

Лабораторная работа Э17

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ВЗАИМНОЙ ИНДУКЦИИ

Цель работы – изучение явления взаимной индукции, определение коэффициента взаимной индукции двух катушек.

Приборы и принадлежности: функциональный генератор (ФГ-100), цифровой вольтметр, осциллограф, две катушки, сопротивление, скамья с измерительной линейкой.

Описание установки и метода измерений

Установка состоит из двух электрически изолированных контуров: в первый контур входят генератор стандартных сигналов, катушка L_1 , резистор R и подключенный параллельно к нему цифровой вольтметр; во второй – катушка L_2 и осциллограф.

Генератор генерирует в первом контуре переменное напряжение $U_1 = U_0 \cdot \cos(\omega \cdot t)$, которое можно менять по частоте ω и амплитуде U_0 , следовательно, через первую катушку проходит переменный электрический ток $I_1 = I_0 \cdot \cos(\omega \cdot t)$, который индуцирует в ней переменный магнитный поток. Катушки L_1 и L_2 находятся на близком расстоянии, поэтому магнитный поток будет пронизывать и вторую катушку. Согласно закону взаимной индукции, ЭДС индукции во второй катушке будет равна

$$\varepsilon_2 = -M_{21} \cdot \frac{dI_1}{dt} = M_{21} \cdot I_0 \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (17.1)$$

где M_{21} – коэффициент взаимной индукции; $I_0 = \frac{U_0}{Z}$ – амплитуда силы тока в первой катушке; $Z = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}$ – сопротивление переменному току; L – коэффициент индуктивности первой катушки; $\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота; ν – частота переменного тока.

Из представленных формул следует, что амплитуда силы тока в катушке L_1 является величиной, зависящей от частоты подаваемого тока, что является нежелательным при выполнении данной работы, поэтому последовательно к катушке подключен резистор R , который обладает только активным сопротивлением. По двум последовательно соединенным элементам, как известно, протекает одинаковый ток, поэтому цифровой вольтметр подключен к рези-

сторы, следовательно, $I_0 = \frac{U_0}{R}$ – амплитуда силы тока на резисторе и, соответственно, в первой катушке, R – сопротивление резистора, U_0 – амплитуда напряжения на резисторе.

ЭДС индукции во второй катушке подчиняется также гармоническому закону

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{2,0} \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (17.2)$$

где $\varepsilon_{2,0}$ – амплитуда ЭДС индукции во второй катушке.

Сопоставляя формулы (17.1) и (17.2), получим

$$\varepsilon_{2,0} = \frac{2\pi\nu \cdot M_{21} \cdot U_0}{R}. \quad (17.3)$$

В данной формуле величины M_{21} , U_0 , R являются постоянными, поэтому из формулы (17.3) следует прямо пропорциональная зависимость между амплитудой ЭДС индукции во второй катушке и частотой переменного тока, подаваемого на первую катушку.

Формула для расчёта коэффициента взаимной индукции следует из выражения (17.3):

$$M_{21} = \frac{\varepsilon_{2,0} \cdot R}{2\pi\nu \cdot U_0}. \quad (17.4)$$

Величина коэффициента взаимной индукции в силу вышесказанного остаётся постоянной при неизменном расположении катушек.

Во время выполнения лабораторной работы при фиксированном расстоянии между катушками на катушку L_1 подаются переменные токи с частотами ν_1 и ν_2 , при этом на экране осциллографа фиксируются два амплитудных значения ЭДС индукции $\varepsilon_{2,1}$ и $\varepsilon_{2,2}$, т. е.

$$\begin{cases} \varepsilon_{2,1} = \frac{2\pi\nu_1 \cdot M_{21} \cdot U_0}{R} \\ \varepsilon_{2,2} = \frac{2\pi\nu_2 \cdot M_{21} \cdot U_0}{R} \end{cases} \quad (17.5)$$

Отсюда выразим коэффициент взаимной индукции двух катушек:

$$M_{21} = \frac{(\varepsilon_{2,2} - \varepsilon_{2,1}) \cdot R}{2\pi \cdot (\nu_2 - \nu_1) \cdot U_0}. \quad (17.6)$$

Измерение коэффициента взаимной индукции будет проводиться на установке, схема которой приведена на рис. 17.1, общий вид представлен на рис. 17.2, отдельные элементы – на рис. 17.3, 17.4.

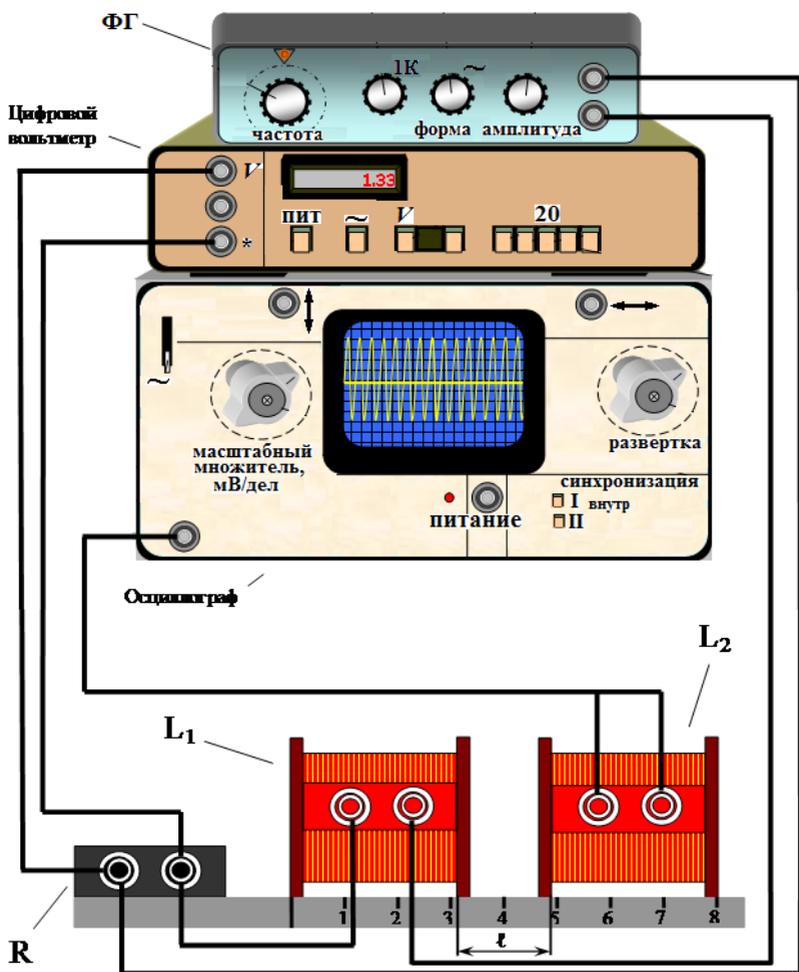


Рис. 17.1. Схема установки



Рис. 17.2. Общий вид установки



Рис. 17.3. Генератор сигналов и цифровой вольтметр

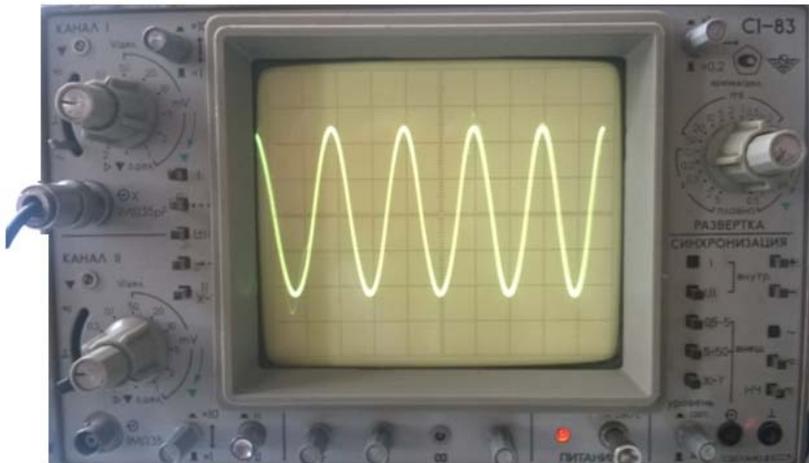


Рис. 17.4. Осциллограф

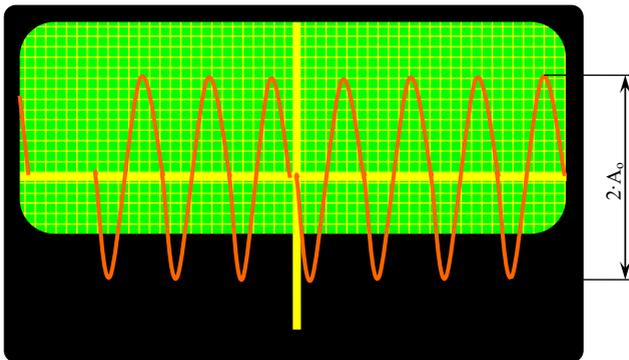


Рис. 17.5. Измерение размаха синусоиды

На дюралевой скамье с метрической линейкой расположены две катушки: первичная катушка L_1 зафиксирована, а вторичную катушку L_2 можно перемещать вдоль стержня, изменяя тем самым расстояние между катушками и, следовательно, меняя коэффициент взаимной индукции.

Последовательно к L_1 подключён резистор R , с которого с помощью цифрового вольтметра снимаются амплитудные значения переменного напряжения. На первичную катушку подаётся синусоидальный переменный ток с генератора сигналов ФГ-100. На вто-

ричной катушке генерируется переменная ЭДС индукции, которая выводится на экран осциллографа.

Амплитудное значение ЭДС индукции вычисляется по формуле

$$\varepsilon_{2,i} = A_{0,i} \cdot n_i, \quad (17.7)$$

где $A_{0,i}$ – амплитудное значение синусоиды на экране осциллографа; n_i – калибровочный множитель, определяемый по показанию рукоятки регулировки калибровки, $i = 1, 2$.

Программа работы

1. Измерение ЭДС индукции вторичной катушки (амплитуда синусоидального сигнала) при различных частотах с помощью осциллографа.
2. Расчет коэффициента взаимной индукции катушек.
3. Построение графика зависимости коэффициента взаимной индукции от расстояния между катушками $M_{21} = f(l)$.

Порядок работы

1. Ознакомиться с установкой (рис. 17.2–17.4).
2. Записать значение сопротивления резистора R . Оно указано на установке.
3. Соединить элементы цепи согласно схеме (рис. 17.1).
4. На дюралевой скамье с метрической линейкой расположить подвижную вторичную катушку L_2 вплотную к неподвижной первичной катушке L_1 .
5. Подсоединить все приборы к розеткам напряжением 220 В.
6. Включить генератор сигналов ФГ-100 тумблером, который находится на задней его панели. Установить на генераторе (рис. 17.3) регулятором частоты выходного сигнала (ручка «частота») начальное значение $\nu_1 = 4$ Гц или любое другое значение из диапазона (4–9 Гц). Переключатель диапазона частот выходного сигнала установить в положение «1К», переключатель формы выходного сигнала (ручка «форма») должен быть установлен в положении «~». С помощью ручки «амплитуда» регулируется амплитудное значение выходного напряжения U_0 генератора.
7. Прибор комбинированный цифровой (рис. 17.3) работает в качестве вольтметра, поэтому резистор подключается к клеммам «*» и

- «V». На передней панели должны быть включены (нажаты) кнопки: питание «пит.», подсветка «*», переменный ток «~», вольтметр «V», диапазон измерений «20».
8. С помощью регулировочной ручки «амплитуда» на генераторе сигналов установить на вольтметре напряжение $U_0 = 0,8$ В или любое другое из диапазона (0,6–0,9 В). Это значение в процессе эксперимента не изменяется!
 9. Осциллограф (рис. 17.4) включить, отжав кнопку «питание». Установить рычажок переключения рода исследуемого тока в положение «~» (переменный ток). С помощью ручек «развертка» и «синхронизация» добиться устойчивой картины на экране осциллографа. С помощью регуляторов вертикального « \updownarrow » и горизонтального « \leftrightarrow » перемещения изображения на экране добиться симметричного расположения синусоиды относительно оси «OX». Подобрать такое значение калибровочного множителя («50», «20», «10», «5» мВ/дел), чтобы синусоида занимала всю площадь экрана. Записать это значение калибровочного множителя n_1 в таблицу.
 10. Произвести измерение размаха синусоиды $2A_0$ (рис. 17.5) в делениях шкалы, вычислить величину амплитуды $A_{0,1}$ и занести её в таблицу.
 11. Установить расстояние между катушками $l = 1$ см, перемещая вдоль дюралевой скамьи катушку L_2 , и повторить пункт 9.
 12. Произвести измерения амплитуды при расстоянии между катушками 2, 3, 4, 5, 6 см (отодвигая каждый раз катушку на 1 см).
 13. Вернуть подвижную вторичную катушку L_2 в исходное положение (вплотную к неподвижной первичной катушке L_1).
 14. Установить на генераторе (рис. 17.3) регулятором частоты выходного сигнала (ручка «частота») другое значение $\nu_2 = 8$ Гц или любое другое значение, отличное от первого, из диапазона 4–9 Гц.
 15. Снова подобрать такое значение калибровочного множителя («50», «20», «10», «5» мВ/дел), чтобы синусоида занимала всю площадь экрана. Записать это значение калибровочного множителя n_2 в таблицу.
 16. Произвести измерения амплитуды $A_{0,2}$ при таком положении катушек и при расстояниях между ними от 1 до 6 см, отодвигая каждый раз катушку на 1 см.

17. Вычислить амплитудное значение ЭДС индукции по формуле (17.7).
18. Рассчитать коэффициент взаимной индукции по формуле (17.6).
19. Построить на миллиметровой бумаге график зависимости коэффициента взаимной индукции от расстояния между катушками $M_{21} = f(l)$.
20. 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 определения взаимной индуктивности двух катушек?
5. Какой график нужно построить в лабораторной работе?
6. В чем заключается явление взаимной индукции?
7. Сформулировать и записать закон Фарадея, описывающий явление взаимной индукции.
8. Что называется взаимной индуктивностью? От чего она зависит?
9. Что называется активным сопротивлением? От чего оно зависит?
10. Что называется реактивным сопротивлением? От чего оно зависит?
11. Как рассчитать полное сопротивление переменному току?
12. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
13. Записать и сформулировать закон Фарадея, описывающий явление электромагнитной индукции.
14. Сформулировать правило Ленца.
15. Что называется магнитным потоком, потокосцеплением? В каких единицах они измеряются?

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.

4. Схема установки.

5. Расчетные формулы:

амплитудное значение ЭДС индукции: $\varepsilon_{2,i} =$

коэффициент взаимной индукции: $M_{21} =$

6. Параметры установки и начальные данные:

сопротивление резистора $R =$

амплитудное значение выходного напряжения генератора $U_0 =$

частота сигнала: $\nu_1 =$

частота сигнала: $\nu_2 =$

7. Таблица результатов измерений

№	Расстояние между катушками l , см	Амплитуда $A_{0,1}$, дел. при ν_1	Калибровочный множитель n_1 , В/дел	Амплитуда $A_{0,2}$, дел. при ν_2	Калибровочный множитель n_2 , В/дел
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					

8. Таблица результатов вычислений

№	Расстояние между катушками l , см	Амплитуда ЭДС индукции $\varepsilon_{2,1}$, В при ν_1	Амплитуда ЭДС индукции $\varepsilon_{2,2}$, В при ν_2	Коэффициент взаимной индукции M_{21} , Гн
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

9. График зависимости коэффициента взаимной индукции от расстояния между катушками (на миллиметровой бумаге) $M_{21} = f(l)$.

10. Вывод.

Библиографический список

1. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. — М. : Академия, 2012. — 557 с.
2. Трофимова, Т.И. Справочник по физике для студентов и абитуриентов / Т.И. Трофимова. — М. : Астрель, 2005. — 400 с.
3. Савельев, И.В. Курс общей физики. В 4 т. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика : учеб. пособие / И.В. Савельев. — М. : Кнорус, 2009. — 521 с.
4. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. 3. Электричество : учеб. пособие / Д.В. Сивухин. — М. : Физматлит, 2006. — 654 с.
5. Детлаф, А.А. Курс физики : учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. — М. : Академия, 2008. — 720 с.
6. Яворский, Б.М. Справочник по физике : для инженеров и студентов вузов / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф, А.К. Лебедев. — М. : ОНИКС, 2008. — 1054 с.
7. Чертов, А.Г. Физические величины (Терминология, определения, обозначения, размерности, единицы) : справ. пособие / А.Г. Чертов. — М. : Высш. школа, 1990. — 335 с.
8. Кортнев, А.В. Практикум по физике / А.В. Кортнев, Ю.В. Рублев, А.Н. Куценко. — М. : Высш. школа, 1965.
9. Лабораторный практикум по физике : учеб. пособие для студентов вузов / А.С. Ахматов [и др.] ; под ред. А.С. Ахматова. — М. : Высш. школа, 1980. — 360 с.
10. Физический практикум / под ред. В.И. Ивероновой. — М. : Высш. школа, 1967.

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:
Теория зачтена:
Работа выполнена:

Тольятти 20____

1. Математические формулы

$$\begin{aligned} \sin(\alpha \pm \beta) &= \sin \alpha \cdot \cos \beta \pm \cos \alpha \cdot \sin \beta; & \sin 2\alpha &= 2\sin \alpha \cdot \cos \alpha; \\ \cos(\alpha \pm \beta) &= \cos \alpha \cdot \cos \beta \mp \sin \alpha \cdot \sin \beta; & \cos 2\alpha &= \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha; \\ \frac{d}{dx}(x^n) &= nx^{n-1}; & \frac{d}{dx}\left(\frac{1}{x}\right) &= -\frac{1}{x^2}; & \frac{d}{dx}\left(\frac{1}{x^n}\right) &= -\frac{n}{x^{n+1}}; \\ \frac{d}{dx}(e^x) &= e^x; & \frac{d}{dx}(\ln x) &= \frac{1}{x}; & \frac{d}{dx}(\operatorname{tg} x) &= \frac{1}{\cos^2 x}; \\ \frac{d}{dx}(\sin x) &= \cos x; & \frac{d}{dx}(\cos x) &= -\sin x; & \int u dv &= uv - \int v du; \\ \int x^n dx &= \frac{x^{n+1}}{n+1} \quad (n \neq -1); & \int \frac{dx}{x} &= \ln x; & \int \frac{dx}{x^2} &= -\frac{1}{x}; \\ \int \sin x dx &= -\cos x; & \int \cos x dx &= \sin x; & \int e^x dx &= e^x; \\ \int_0^\infty x^n e^{-x} dx &= n!; & \int_0^\infty x^n e^{-ax} dx &= \frac{n!}{a^{n+1}}; & \int_0^\infty x e^{-ax^2} dx &= \frac{1}{2a}; \\ \int_0^\infty x^3 e^{-ax^2} dx &= \frac{1}{2} a^{-2}; & \int_0^\infty \frac{x dx}{e^x - 1} &= \frac{\pi^2}{6}; & \int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1} &= \frac{\pi^4}{15}. \end{aligned}$$

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 час = 3600 с
1 сут = 86400 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
1эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж

4. Физические постоянные

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