

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

**Лабораторный практикум «ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ»**

Под редакцией Т. А. Семеновой и В. Ф. Фёдорова

*Рекомендовано к изданию УМО  
«Ядерные физика и технологии»*

Издание 2-е, исправленное

Москва 2019

УДК 537(076.5)+621.3.083(076.5)  
ББК 22.33я7+31.264я7  
Л12

**Лабораторный практикум «ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ».** Учебное пособие / Под ред. Т.А. Семеновской и В.Ф. Фёдорова. Изд. 2-е, испр. [Электронный ресурс]. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. 220 с.

*Авторы:* Н.Н. Взоров, Е.Е. Земсков, А.В. Кошелкин, К.А. Липатов, А.Ю. Матрончик, Б.Н. Мешерин, С.С. Муравьев-Смирнов, С.В. Облизина, Е.П. Потанин, В.И. Ростокин, В.В. Самедов, Т.А. Семенова, В.Ф. Федоров, Е.В. Хангулян, А.В. Шугов.

Пособие содержит описание 17 лабораторных работ по курсу «Электричество и магнетизм», выполняемых на модульных установках ЛКЭ. По сравнению с действующим практикумом добавлены новые работы. Действующие работы модернизированы, дополнены новыми заданиями с использованием многофункциональных измерительных приборов. В описании лабораторных работ применена Международная система единиц СИ.

Лабораторные работы выполняются студентами НИЯУ МИФИ в третьем семестре.

Рецензент д-р физ.-мат. наук, проф. В. Д. Борисевич

ISBN 978-5-7262-2609-5

© Национальный исследовательский  
ядерный университет «МИФИ», 2017, 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

Методические рекомендации-----	4
Лабораторный комплекс ЛКЭ-1. Описание-----	12
Работа 1а. Измерение характеристик электрических сигналов с помощью осциллографа-----	36
Работа 7а. Измерение заряда и удельного заряда электрона-----	50
Работа 7в. Измерение удельного заряда электрона с помощью катушек Гельмгольца-----	63
Работа 8а. Изучение магнитного гистерезиса-----	71
Работа 9в. Исследование явления Холла в полупроводниках-----	87
Работа 11а. Исследование колебаний в простом колебательном контуре-----	99
Работа 11б. Изучение колебаний в простом колебательном контуре с использованием компьютера-----	107
Работа 12а. Изучение вынужденных колебаний в электрическом контуре-----	120
Работа 13а. Релаксационный генератор-----	128
Работа 14а. Вихревое электрическое поле-----	137
Работа 19а. Скин-эффект в переменном электромагнитном поле-----	144
Работа 20а. Изучение цепей переменного тока-----	152
Работа 23. Измерение стационарных магнитных полей с помощью компаса и катушки с током-----	163
Работа 24. Измерение магнитного поля индукционным датчиком-----	173
Работа 26. Определение магнитной проницаемости магнетиков-----	186
Работа 27. Измерение диэлектрической проницаемости твёрдых тел-----	201
Работа 28. Изучение переходных процессов в цепи электрического тока-----	211

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Важную роль в изучении физики играет физический эксперимент, поскольку физика - наука экспериментальная. Поэтому лабораторным занятиям по физике следует уделять большое внимание.

Основным при работе с модульными установками ЛКЭ в лаборатории "Электричество и магнетизм" остаётся требование соблюдения правил техники безопасности. При любых неполадках или коротком замыкании необходимо немедленно выключить источник тока. Прежде чем приступить к выполнению работы, нужно внимательно прочитать приложение, находящееся на рабочем месте, и следовать указаниям, которые там содержатся.

В установках ЛКЭ использованы универсальные цифровые вольтметры, многофункциональные цифровые мультиметры и двухканальный осциллограф. Описание лабораторного комплекса ЛКЭ вынесено в отдельную главу. При подготовке к работе необходимо изучить описание комплекса, обратив внимание на порядок работы с используемыми измерительными приборами. Приступая к сборке электрических схем, необходимо соблюдать правильную полярность подключения приборов в цепях постоянного тока.

*Требования к оформлению работы.* Каждая лабораторная работа - аналог небольшой научной работы. Будете ли вы по окончании университета инженером, научным работником, разработчиком электронных систем или создателем программных пакетов, вам придётся планировать свою будущую работу, разрабатывать методику решения поставленных перед вами задач, решать задачи в соответствии с выбранной методикой, а затем писать научные статьи, научные отчёты, инструкции к разработанным системам и пакетам. Первичные навыки такого подхода вы получаете в физическом практикуме.

Поэтому очень важно выработать у себя привычку готовить очередную работу так, чтобы вам были совершенно ясны цели поставленной задачи, методика измерений и ожидаемые результаты. При подготовке работы обязательно нужно в тетради иметь теоретическое введение с формулами, описывающими изучаемое явление и ожидаемые результаты. Должны быть сделаны

рисунки установки, приведены рабочие электрические схемы, заготовлены и продуманы таблицы для результатов измерений. В частности, необходима таблица со списком используемых приборов и дополнительных деталей, в которую должны быть занесены все характеристики приборов и деталей до начала выполнения работы. Такая предварительная подготовка - аналог планирования вашего будущего эксперимента. Она же - аналог заготовки основного текста научной статьи или отчёта. Если вы продумали методику эксперимента и теоретические ожидания (или зависимости, которые следуют из новой гипотезы в настоящей научной работе), то в процессе эксперимента вы легко сможете контролировать правильность проведения эксперимента, и существенно сэкономить на этом время.

Завершается эксперимент обработкой результатов измерений и написанием заключения к работе (к научной статье). Публикация научной статьи (отчёта и т.д.) необходима для того, чтобы ознакомить как можно более широкий круг людей с результатами вашей работы. Поэтому заключение (в научных статьях часто - аннотация) должно быть кратким, но ёмким, содержательным, и абсолютно понятным любому читателю, работающему в данной области науки. Задача заключения (аннотации) - увлечь, заинтересовать читателя так, чтобы у него возникло желание прочитать работу (статью, отчёт) целиком. Отсюда следует, что в заключении не должно быть никаких формул, ссылок на таблицы и формулы, на номера графиков. Например, бессмысленна часто встречающаяся фраза в заключениях у студентов: «Результаты измерений занесены в таблицу». Занесение чисел в таблицу не является ни достижением, ни итогом исследования, это просто необходимый атрибут грамотного ведения эксперимента.

Заключение должно содержать:

- цель работы (что исследовалось и зачем, какие гипотезы проверялись);

- краткое описание методики исследования (ни в коем случае не нужно указывать промежуточные подробности, например, что и сколько раз измерялось, это все остаётся внутри основного текста работы);

- описание главных результатов работы; если результат измеренная мировая константа, то она должна быть приведена вместе с оценкой погрешности; если результаты представлены

графиками, следует выписать полное **словесное** название полученных зависимостей и обсудить, насколько эти зависимости соответствуют теоретическим предположениям (гипотезам).

- указать место полученных вами результатов в мировой практике. Если проверялись хорошо изученные ранее законы физики, сравнить ваши результаты с известными. Если измерялись важные константы - сравнить их с табличными. Следует высказать свою точку зрения на достоверность результатов. Очень важно обсудить возможные причины, по которым результаты не соответствуют известным ранее.

Следите за логикой изложения результатов: при обсуждении измеренной константы нужно её сразу выписать и сравнить с табличной; при обсуждении констант, найденных с помощью графиков, сначала обсудить графики, а потом, найденные из них константы, а не наоборот. Если в работе исследованы несколько закономерностей, необходимо обсудить одну из них от начала до конца и только потом переходить к обсуждению следующей.

Для большей глубины понимания изучаемого явления рекомендуется при подготовке прочитать контрольные вопросы, приведённые в конце каждой работы, и продумать ответы на них.

*Требования к обработке результатов измерений.* К третьему семестру студенты знакомы с распределением Гаусса на частном примере изучаемого в молекулярной физике распределения Максвелла. Распределение Гаусса часто называют **нормальным**, а сама статистика называется **нормальной** или **гауссовой**. Она обычно используется при обработке случайного разброса измеряемой величины при большом числе измерений.

Нормальная статистика хорошо работает с «большим» числом частиц и отражает «закон больших чисел». Основные формулы нормальной статистики (среднее арифметическое значение измеряемой величины, среднеквадратичное отклонение и др.) строго доказаны при числе измерений, стремящемся к бесконечности. Обратим внимание на то, что в распределении Максвелла мы имели дело с очень большим числом частиц - порядка  $10^{23}$  молекул в моле газа. При таком числе частиц нормальная статистика даёт хорошие результаты.

Строго говоря, все теоремы нормальной статистики доказаны для **генеральной совокупности** случайных величин, т.е. для

бесконечно большого объёма выборки – это законы «больших чисел».

1). Предполагается, что вероятность какого-либо события не зависит от вероятностей других событий и все события равновероятны.

2). Система, в которой проводятся измерения, изолирована и, следовательно, равновесна.

3). События считаются взаимно независимыми.

Ни в одном физическом эксперименте, особенно в учебных лабораториях, эти условия не соблюдаются. Ни одна установка, с которой работает студент, не является изолированной системой: возникают потоки воздуха, вибрация от проходящих мимо других студентов, других работающих установок, электрических помех от них, меняется температура и т.д. Нет уверенности в независимости измеряемых величин от каких-либо изменений в других частях системы, тем более нет уверенности в равной вероятности событий. Каждая установка – **открытая** система, и учесть влияние на нее параметров окружающей среды невозможно. Утверждать заранее, что все эти воздействия из-за их большого количества компенсируются, и потому распределение гауссово, неверно. Эти соображения важны, когда мы выбираем способ оценки погрешности результата. У нас нет никаких оснований использовать нормальное распределение при очень малых выборках в неравновесной открытой системе.

В лабораторном студенческом практикуме невозможно сделать много измерений за ограниченное время. Какие-то величины измеряются по три раза, какие-то по 5 – 6. В лучшем случае бывает 10, иногда 20 измерений. Будут ли измеренные столько раз величины подчиняться законам «больших» чисел, т.е. нормальной статистике? Приведём наглядный пример. Пусть в небольшой группе, состоящей из 11 работников каждый получает зарплату в 10 тыс. руб. в месяц, кроме 11-го, зарабатывающего 200 тыс. руб. в месяц. Средняя арифметическая зарплата по группе:  $300/11 \approx 27$  тыс. руб. Как утверждает нормальная статистика, средняя зарплата должна быть наилучшим приближением к «истинной». Однако из приведённого примера следует, что понятие среднего совсем не отражает состояния зарплаты в группе. Следовательно, утверждать заранее, что все полученные результаты в лаборатории распределены по гауссову закону, очень опасно. Вычисление

средних значений, а, следовательно, и среднеквадратичных отклонений может привести к грубым ошибкам. Поэтому прежде чем использовать формулы нормальной статистики, необходимо проверить, подчиняются ли полученные измерения распределению Гаусса. К сожалению, критерии нормальности, то есть способы проверки на нормальность распределения, довольно громоздки и мы их здесь приводить не будем.

Для оценки реальной физической величины и оценки интервала, которому она принадлежит, будем пользоваться другим методом. Введём дополнительные статистические понятия.

У физиков принято называть функцией распределения плотность вероятности обнаружения какой-либо физической величины в заданном интервале. В этом случае гауссова функция распределения величины  $x$  имеет вид

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где  $a$  – среднее значение величины:

$$a = \langle x \rangle = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right) dx;$$

$\sigma^2$  – дисперсия:

$$\sigma^2 = \langle (x - a)^2 \rangle = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} (x - a)^2 \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right) dx.$$

Величину  $\sqrt{\sigma^2} = \sigma$  – корень квадратный из дисперсии – называют среднеквадратичным отклонением.

Введём ещё одну характеристику распределения – **медиану**. Для любой непрерывной функции распределения, заданной на интервале  $(x_1, x_2)$ , медианой называется величина  $x_m$ , удовлетворяющая условию

$$\int_{x_1}^{x_m} f(x) dx = \int_{x_m}^{x_2} f(x) dx,$$

то есть прямая, проведённая параллельно оси ординат в точке  $x = x_m$ , делит площадь под функцией  $f(x)$  пополам. Измеряемая физическая величина обычно представляет собой набор дискретных величин. В этом случае, чтобы найти медиану распределения, располагают все числа в порядке возрастания. Легко видеть, что тогда медианой будет величина, слева и справа от которой находится одинаковое число измерений (одинаковая

частота событий, или одинаковая вероятность событий слева и справа). В приведённом выше примере с зарплатой медианой будет зарплата 10 тыс. руб., так как слева и справа от этой величины будет по пять измерений (из 11). Эта величина гораздо лучше описывает состояние группы, чем среднее значение.

Математики, как правило, работают не с плотностью вероятности  $f(x)$ , как физики, а используют интегральную функцию распределения  $F(x) = \int_{-\infty}^x f(x')dx'$

Функция  $F(x)=p(\xi < x)$  указывает вероятность  $p$  событий, имеющих значения  $\xi$  меньше значения  $x$  ( $0 \leq p \leq 1$ ).

Произвольная интегральная функция распределения  $F(x)$  изображена на рис. Вероятность событий с  $x < 0$  равна  $p = 0,5$ ; вероятность событий с  $\xi < p = 1$ .

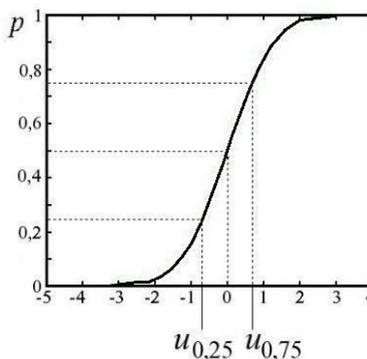


Рис. Интегральная функция распределения

**Квантилем** уровня  $p$  называется значение  $u_p$  переменной  $x$ , при котором значение функции  $F(u_p)$  равно  $p$ :  $F(u_p)=p$ . Слева от значения  $u_p$  лежит доля  $p$  точек распределения, или  $p\%$ . Медиана распределения  $x_m = u_{0,5}$  — квантиль уровня  $p = 0,5$ . Уровень  $p$  можно задать любым. Уровень  $p = 0,25$ , соответствующий вероятности событий  $\xi < 0,25$ , называется **нижним квантилем** (ниже него оказывается четверть

всех событий); уровень  $p = 0,75$ , соответствующий вероятности событий  $\xi < 0,75$ , называется **верхним квантилем** (выше него тоже оказывается четверть всех событий). На рис. 1 оба квантиля отмечены знаками  $u_{0,25}$  и  $u_{0,75}$ . Между верхним и нижним квантилями находятся 50% всех наблюдаемых значений случайной величины. Понятия медианы и квантилей можно использовать для **любо**х видов распределений.

Приведём пример обработки результатов измерений. Выпишем результаты шести измерений диаметра провода в порядке возрастания диаметра:

$d$ , мм: 1,79 1,80 1,81 1,83 1,86 1,88.

Найдём медиану. Поскольку число измерений чётное, примем за медиану среднее значение диаметра между 3-м и 4-м измерениями:  $d_m = 1,82$  мм. Найдём нижний и верхний квартили, т.е. одну четверть и три четверти от общего числа измерений:  $u_{0,25} = 6/4 = 1,5$  и  $u_{0,75} = 4,5$ . Из списка диаметров в соответствии со значениями квартилей уберём первое измерение и два последних. Окончательный результат запишем в виде

$d_m = 1,82$  мм; квартильный интервал (1,80 - 1,83) мм.

Из этой записи видно, что медиана расположена ближе к правому краю квартильного интервала, т.е. распределение сопротивлений асимметрично и уже поэтому не является гауссовым. В квартильный интервал входит 50 % всех измерений.

Таким образом, при проведении измерений и дальнейшей их статистической обработке нужно придерживаться следующих правил.

1. Каждое отдельное прямое измерение повторять не менее трёх раз. Если все три измерения одинаковы, можно остановиться на трёх и оценить приборную погрешность измерения.

2. Если первые три измерения разбросаны, сделать не менее пяти измерений величины (чем больше, тем лучше; ограничение числа измерений диктуется временем, отведённым на работу).

3. Расположить полученные величины в порядке возрастания, найти медиану и квартили

4. В случае, когда результатом работы должна быть величина, измеренная косвенно, необходимо рассчитать её для каждой медианы прямых измерений, снова расположить полученные значения в порядке возрастания, а затем найти медиану и квартили совокупности косвенных результатов измерений. Этот окончательный результат вместе с квартильным интервалом привести в заключении.

5. Для построения графиков делать измерения каждой точки графика не менее пяти раз, на график наносить медиану из пяти измерений, а в качестве отрезка погрешности указывать границы квартильного интервала. Очевидно, что верхний и нижний отрезки погрешности в данной точке не будут одинаковыми. Через медианы провести плавную кривую без изломов, аналогично можно провести пунктиром верхнюю и нижнюю кривые по границам верхних и нижних квартилей. Если графиков много, а времени мало, допускается делать по три измерения каждой точки. При

случайном разбросе график строить по медианам и в каждой точке указывать квантильный интервал  $u_1$ , то есть указать в каждой точке графика отрезки между медианой и двумя другими значениями измерения.

6. В случае, когда график представляет собой прямо пропорциональную зависимость и в работе требуется определить её угловой коэффициент, следует методом парных точек вычислить угловые коэффициенты прямых не менее, чем для пяти пар точек (чем больше, тем лучше). Найти медиану и квартильные интервалы угловых коэффициентов и использовать их для дальнейших расчётов.

7. Если по заданию на графике необходимо построить теоретическую зависимость, то её изображают сплошной плавной линией. В случае, когда теоретическая зависимость должна быть прямолинейной, не нужно для неё рассчитывать много точек. Достаточно взять два любых аргумента в пределах экспериментальных значений (лучше далёких друг от друга) и рассчитать для них теоретические значения функции. Затем провести сплошной линией прямую через эти две точки. Экспериментальные точки не следует соединять друг с другом. График станет наглядным, будет хорошо видно, как далеко от теоретической линии лежат экспериментальные точки вместе с их квартильными интервалами.

# ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ЛКЭ – 1

---

## ОПИСАНИЕ

Лабораторный комплекс ЛКЭ-1 предназначен для выполнения лабораторных работ по курсу «Электричество и магнетизм». Комплекс имеет гибкую блочно-модульную структуру, что позволяет, используя различные комбинации элементов и дополнительные модули расширения, реализовать большое количество разнообразных учебных экспериментов. В рамках данного курса на базе ЛКЭ-1 выполняются лабораторные работы по изучению цепей постоянного и переменного тока, электрических колебательных процессов, переходных процессов в электрических цепях, закономерностей распространения электрических и магнитных полей.

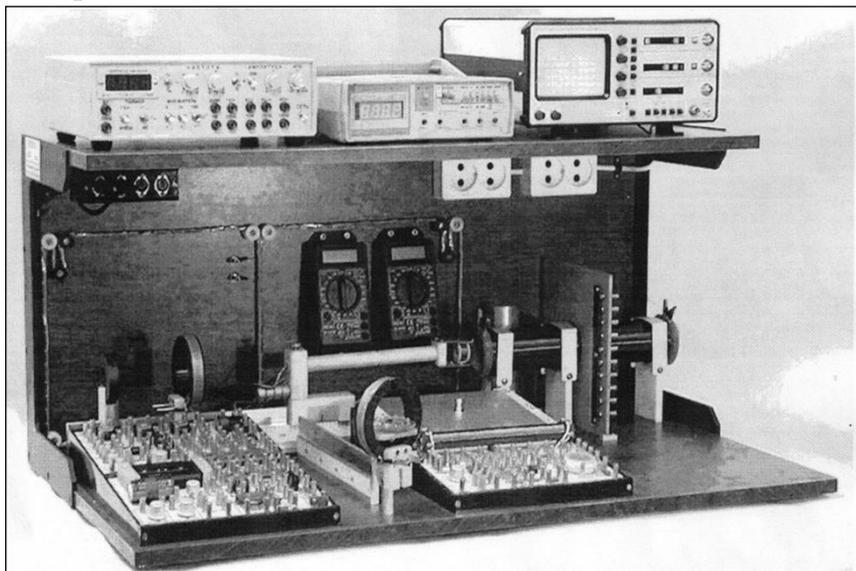


Рис. 1. Лабораторный комплекс ЛКЭ-1

Лабораторный комплекс ЛКЭ-1 (рис. 1) представляет собой каркас со столиком и полкой, на котором размещаются функциональные модули, приборы и объекты, используемые в работе.

На задней стенке каркаса смонтированы:

- Блок питания (1).
- Контур «Модель прямого тока» (2).
- Вольтметр универсальный типа VC-97 (3).
- Два мультиметра типа M-830B (4).
- Блоки розеток сетевого питания 220В/50Гц (5).

На столике каркаса смонтированы:

- Соленоид на стойках (6).
- Плоский кольцевой индукционный датчик (7).
- Блок модулей «Поле в веществе» (8).
- Блок модулей «Электрические цепи» (9).
- Длинный и короткий рельсы со шкалами, стойка-штырь для установки элементов (10).

Кроме этого, в состав комплекса входят электронный осциллограф «MATRIX MOS620» и генератор функциональный типа ГЗЧМ.

Функциональную основу комплекса составляют два блока: блок «Электрические цепи» и блок «Поле в веществе».

Каждый из этих блоков состоит, в свою очередь, из двух отдельных модулей:

## 1. Блок «Электрические цепи»

### 1.1 Модуль M01 «Цепи постоянного тока» (рис. 2).

*Гнёзда выводов источника питания (1)* предназначены для подачи на элементы электрических схем постоянного напряжения. На панели имеются 3 пары выводов:

*Переменные сопротивления номиналом в 10 кОм и 100 кОм (2)* предназначены для плавной регулировки силы тока в цепи (обычно включаются в цепь последовательно с нагрузкой).

*Потенциометр (3)* предназначен для подачи в схему

Блок «Электрические цепи»		Блок «Поле в веществе»	
Модуль M01 «Цепи постоянного тока»	Модуль M02 «Цепи переменного тока»	Модуль M03 «Поле в веществе»	Модуль M04 «Конденсатор разборный

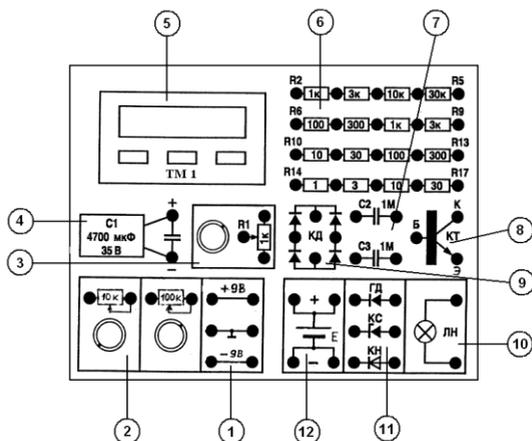


Рис. 2. Модуль M01 «Цепи постоянного тока»

регулируемого напряжения. Он представляет собой переменное сопротивление (номинал – 1 кОм), подключаемое параллельно к источнику питания. Регулируемое напряжение снимается с подвижного контакта, обозначаемого на схеме знаком « $\leftrightarrow$ ».

**Электролитический конденсатор (4).** Номинал конденсатора 4700 мкФ, рабочее напряжение – до 35 В. Электролитический конденсатор имеет сравнительно большую удельную ёмкость (т.е. большую электрическую ёмкость при относительно малых размерах). Однако из-за особенностей устройства, большинство конденсаторов этого типа можно включать в схему только с определённой полярностью (эта особенность, в частности, ограничивает применение электролитических конденсаторов в цепях переменного тока).

**ВНИМАНИЕ! ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ В СХЕМУ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО КОНДЕНСАТОРА НЕОБХОДИМО СТРОГО СОБЛЮДАТЬ ПОЛЯРНСТЬ, КОТОРАЯ УКАЗАНА НА КЛЕММАХ КОНДЕНСАТОРА!**

**НЕПРАВИЛЬНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ ПРИВЕДЁТ К ВЫВОДУ ИЗ СТРОЯ КОНДЕНСАТОРА И КОРОТКОМУ ЗАМЫКАНИЮ В СХЕМЕ!**

Обозначение	Напряжение относительно «земли» ( $\perp$ ), В
+9 В	+ 9
-9 В	- 9
$\perp$	0

**Набор сопротивлений (резисторов) (6).** Набор состоит из четырёх цепочек сопротивлений, соединённых последовательно:

- 1 Ом – 3 Ом – 10 Ом – 30 Ом (предельная мощность – 1,0 Вт)
- 10 Ом – 30 Ом – 100 Ом – 300 Ом (предельная мощность – 1,0 Вт)
- 100 Ом – 300 Ом – 1 кОм – 3 кОм (предельная мощность – 0,5 Вт)
- 1 кОм – 3 кОм – 10 кОм – 30 кОм (предельная мощность – 0,5 Вт)

При сборке схем, используя в различных сочетаниях резисторы из этого набора, можно получать необходимые значения сопротивлений. Погрешность значений сопротивления составляет 10% от указанного номинала.

**Два конденсатора (7),** номиналом по 1,0 мкФ каждый. Погрешность значения ёмкости составляет 0,2 мкФ (20%).

**Транзистор n-p-n типа КТ815 (8)** смонтирован на радиаторе. Буквами Б, К, Э на панели модуля обозначены, соответственно, база, коллектор и эмиттер транзистора.

**Блок кремниевых диодов КД212А (9)** состоит из четырёх диодов, соединённых в мостовую схему. Подавая на вход мостовой схемы (см. рис. 3) переменное напряжение, на выходе получают выпрямленное (пульсирующее, двухполупериодное) напряжение. Каждый из диодов можно использовать также по отдельности.

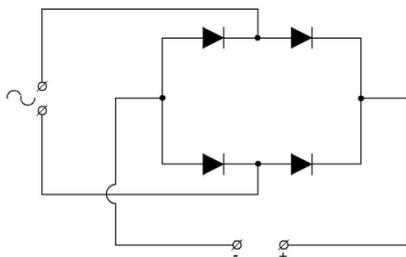


Рис. 4. Схема диодного моста

**Лампа накаливания (10).** Номинальное напряжение питания лампы – 12 В, мощность – 5 Вт.

**Набор нелинейных элементов (11)** включает: *германиевый диод ДЗ11, кремниевый стабилитрон КС147А, динистор КН102* (обозначены на панели, соответственно – *ГД, КС, КН*).

**Аккумулятор (12)** – щелочной аккумулятор типа Д-0,125.

**Часы – таймер (5)** предназначены для измерения интервалов времени с разрешением 0,01 с. Применяются при изучении медленных электрических процессов (например, заряд и разряд конденсатора, медленные колебания, и т.п.).

Управление таймером (рис. 3) осуществляется тремя кнопками.

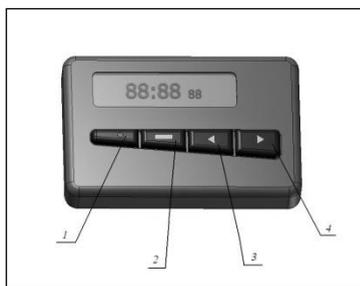


Рис. 4. Часы-таймер

Кнопка **«РЕЖИМ»** (1) – выбор режима работы. В режиме **«СЕКУНДОМЕР»** мигает надпись в верхней части дисплея часов. Кнопка **«ПУСК/СТОП»** (2) в режиме **«СЕКУНДОМЕР»** поочередно запускает и останавливает отсчёт времени. Если не сбрасывать отсчёты, то происходит суммирование измеряемых интервалов времени.

Кнопка **«ЗАПИСЬ/СБРОС»** (3), нажатая *в процессе отсчёта* времени, фиксирует показания дисплея, но не останавливает отсчёт времени. При повторном нажатии этой кнопки показания дисплея будут соответствовать продолжающемуся отсчёту времени (измерение «текущего» времени).

Кнопка (3), нажатая *при остановленном отсчёте* времени, сбрасывает (обнуляет) отсчёт и показания дисплея.

## 1.2 Модуль M02 «Цепи переменного тока» (рис. 5).

**Гнёзда выводов источника питания (1)** имеют параметры и маркировку, аналогичные выводам питания в модуле M01 «Цепи постоянного тока» (см. соответствующий пункт описания).

**Потенциометр (2)** (переменное сопротивление номиналом 10 кОм) также имеет аналогичное устройство и назначение.

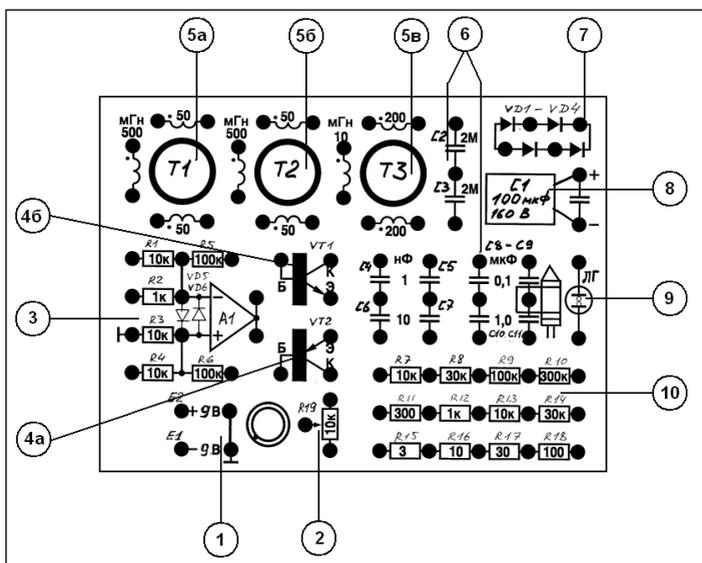


Рис. 5. Модуль M02 «Цепи переменного тока»

**Комплект элементов (3)** предназначен для построения схем на операционном усилителе. В комплект входят операционный усилитель (микросхема КР140УД608) и набор резисторов, подключённых к входам «+» и «-» микросхемы.

Номиналы резисторов указаны на панели. Один из входов усилителя через сопротивление 10 кОм соединён с общим проводом ( $\perp$ ). Кроме того, в схему операционного усилителя включены (встречно-параллельно) два диода, предохраняющие микросхему от подачи на вход чрезмерно высокого напряжения.

**Транзисторы p-n-p типа (4a) и n-p-n типа (4b).** Транзисторы p-n-p типа (КТ814) и n-p-n типа (КТ815) смонтированы на радиаторах. Схема разводки контактов транзисторов аналогична схеме, показанной на рис. 3. Буквами Б, К, Э на панели модуля обозначены, соответственно, база, коллектор и эмиттер транзистора.

**Трансформаторы – наборы индуктивностей (5a, 5b, 5в).** В качестве набора индуктивностей в состав модуля входят три трансформатора. Каждый трансформатор имеет по три обмотки, намотанные на кольцевых ферритовых сердечниках (тип

сердечника К20×12×6, феррит марки М3000НМ). Ниже в таблице (1) приводятся параметры обмоток трансформаторов.

Таблица 1

Трансформатор	Позиция (см. рис. 5)	Обозначение обмотки на панели модуля*
Т1	5а	500 мГн
		50 мГн
		50 мГн
Т2	5б	500 мГн
		50 мГн
		50 мГн
Т3	5в	10 мГн
		200 мГн
		200 мГн

\*Начало каждой обмотки помечено точкой.

Погрешность значений индуктивности составляет 20% от указанного номинала.

*Наборы конденсаторов (ёмкостей) (6)* предназначены для использования при сборке электрических схем. В набор входят конденсаторы с номиналами: 1 нФ, 10 нФ, 0,1 мкФ, 1,0 мкФ, 1 мкФ (2 штуки). Погрешность ёмкости конденсаторов составляет 20% от номинала.

*Электролитический конденсатор (8)* имеет номинальное значение ёмкости 100 мкФ, при диапазоне рабочих напряжений до 160 В. Особенности работы и подключения электролитического конденсатора описаны в соответствующем пункте описания модуля «Цепи постоянного тока».

**ВНИМАНИЕ! ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ В СХЕМУ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО КОНДЕНСАТОРА НЕОБХОДИМО СТРОГО СОБЛЮДАТЬ ПОЛЯРНОСТЬ, КОТОРАЯ УКАЗАНА НА КЛЕММАХ КОНДЕНСАТОРА!**

**ЗАПРЕЩАЕТСЯ ПОДАВАТЬ НА КОНДЕНСАТОР ПЕРЕМЕННОЕ НАПРЯЖЕНИЕ!**

**НЕПРАВИЛЬНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ ПРИВЕДЁТ К ВЫВОДУ ИЗ СТРОЯ КОНДЕНСАТОРА И КОРОТКОМУ ЗАМЫКАНИЮ В СХЕМЕ!**

**Блок кремниевых диодов (7)** состоит из четырёх диодов типа КД102, соединённых в мостовую схему. Схема включения диодного моста показана на рис. 4 (см. описание модуля «Цепи постоянного тока»). Каждый из диодов можно использовать также и по отдельности.

**Газоразрядная лампа (9)** – неоновая лампа типа ЛН-6.

**Набор сопротивлений (резисторов) (10).** Набор состоит из трёх цепочек сопротивлений, соединённых последовательно:

- 3 Ом – 10 Ом – 30 Ом – 100 Ом (предельная мощность – 1,0 Вт)
- 300 Ом – 1 кОм – 10 кОм - 30 кОм (предельная мощность – 1,0 Вт)
- 10 кОм - 30 кОм - 100 кОм - 300 кОм (предельная мощность – 0,2 Вт)

Погрешность значений сопротивления составляет 10% от указанного номинала.

## 2. Блок «Поле в веществе»

### 2.1 Модуль М03 «Поле в веществе» (рис. 6).

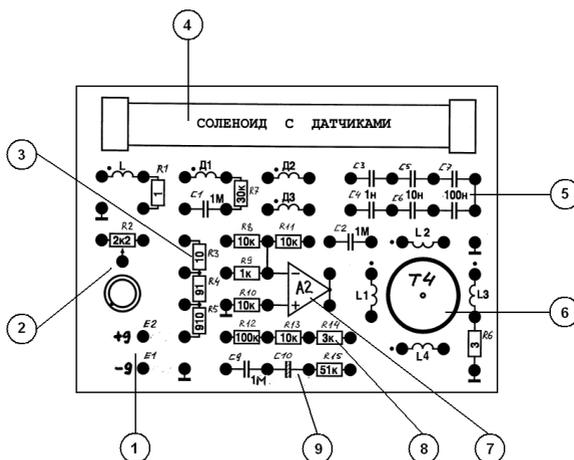


Рис. 6. Модуль М03 «Поле в веществе».

**Гнёзда выводов источника питания (1), потенциометр (2)** – эти элементы по устройству и назначению полностью аналогичны

тем, которые были описаны в составе модулей М01 «Цепи постоянного тока» и М02 «Цепи переменного тока» (см. соответствующие пункты описания).

**Набор сопротивлений (3).** Три сопротивления, соединённые последовательно:

- 10 Ом – 91 Ом - 910 Ом (1,0 Вт)

Погрешность значений сопротивления составляет 10% от указанного номинала.

**Соленоид со встроенными катушками-датчиками (4)**  
 Устройство соленоида показано на рис. 7. Основная обмотка L и три одинаковые обмотки датчиков намотаны на каркасе. Основная обмотка создаёт внутри соленоида магнитное поле, которое можно считать практически однородным. В таблице (2) приведены параметры обмотки соленоида и датчиков.

Таблица 2.

Обмотка (обозначение)	Число витков N	Средний диаметр витков, мм
Основная обмотка (L)	1700	15,5
Датчики 1 (Д1, Д2, Д3)	1000	11,5

Последовательно с датчиками Д1, Д2, Д3 включены токоограничивающие сопротивления номиналом по 300 Ом для предохранения обмоток от перегорания при случайном подключении к источнику питания.

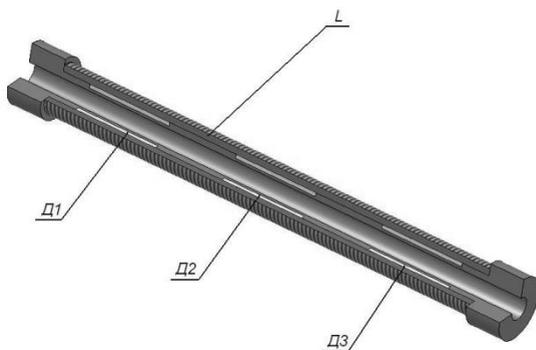


Рис. 7. Устройство соленоида с индукционными датчиками.

Начало каждой обмотки обозначено на панели модуля точкой. Последовательно с обмоткой соленоида включено сопротивление  $(1\pm 0,1)$  Ом, которое используется в качестве токового датчика.

К датчику Д1 последовательно подключены сопротивление номиналом  $(30\pm 3)$  кОм и конденсатор  $(1,0\pm 0,2)$  мкФ, образующие RC – ячейку.

**Набор конденсаторов (ёмкостей) (5)** Набор из 3 пар конденсаторов:

- $2\times 1$  нФ -  $2\times 10$  нФ -  $2\times 100$  нФ

Погрешность ёмкости конденсаторов составляет 20% от номинала.

**Трансформатор – набор индуктивностей (6).** В качестве набора индуктивностей используются 4 обмотки трансформатора, выполненные на ферритовом кольцевом сердечнике (тип сердечника K32 $\times$ 20 $\times$ 6, феррит марки M2000HM). В таблице (3) приводятся основные параметры обмоток.

Таблица 3.

Обозначение обмотки на панели модуля*	Число витков N
L1	100
L2	500
L3	100
L4	500

\*Начало каждой обмотки помечено точкой.

Погрешность значений индуктивности составляет 20% от указанного номинала.

Обмотки трансформатора конструктивно разделены. Они занимают 4 секции кольцевого сердечника, сдвинутые друг от друга на 90°.

**Блок операционного усилителя (7)** включает микросхему КР140УД608 и набор резисторов. Выводы питания микросхемы подключены к шинам питания «+9»В и «-9»В.

**Набор сопротивлений (8).** Три сопротивления, соединённые последовательно:

- $3$  кОм –  $10$  кОм -  $100$  кОм (0,5 Вт)

Погрешность значений сопротивления составляет 10% от указанного номинала.

**RC – ячейка (9)** состоит из сопротивления номиналом  $(51 \pm 5)$  кОм и двух конденсаторов.

Обозначение	Ёмкость, мкФ
1M	$1.0 \pm 0,2$
	100*

\*Неполярный электролитический конденсатор.

## 2.2 Модуль M04 «Конденсатор разборный».

Конденсатор (рис. 8) состоит из нижней пластины 1, смонтированной на плате 4, верхней съёмной пластины 2, и окантовки нижней пластины 3. Окантовка нижней пластины обеспечивает калиброванный воздушный зазор  $d_0$  между пластинами. Между пластинами конденсатора могут помещаться пластины из различных диэлектрических материалов, толщиной  $d$ . В том случае, когда  $d > d_0$  расстояние между проводящими пластинами будет определяться толщиной слоя диэлектрика.

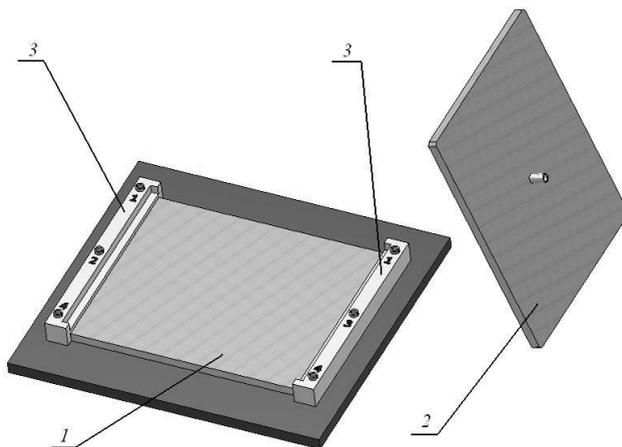


Рис. 8. Модуль M04 «Конденсатор разборный»

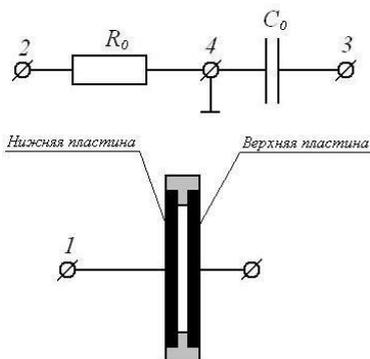


Рис. 9. Электрическая принципиальная схема модуля «Конденсатор разборный»

В состав модуля также входят эталонный резистор  $R_0$  и эталонный конденсатор  $C_0$ .

Электрическая принципиальная схема модуля приведена на рис. 9.

### 3. Описание отдельных функциональных блоков и устройств комплекса

**Блок питания (рис. 10)** расположен на задней стенке каркаса. На лицевой панели блока имеются сетевой тумблер (1) и три разъёма типа СГ-1 (2), имеющие 5 контактных гнезд. На гнезда разъёмов выведено постоянное напряжение  $+9\text{ В}$  и  $-9\text{ В}$  относительно общего провода, помеченного знаком «⊥» на платах модулей.

Назначение контактов разъёма видно из таблицы (4).



Рис. 10. Блок питания

Таблица 4.

Номер контакта	Напряжение, В
1	Свободный
2	0 (общий провод)
3	+9 В
4	Свободный
5	-9 В

К разъёмам питания подключены кабели питания блоков «Электрические цепи» и «Поле в веществе».

**Контур «Модель прямого тока»** (рис. 11) представляет собой прямоугольный контур (1), смонтированный на задней стенке каркаса. Для включения контура в цепь имеются 2 клеммы (2).

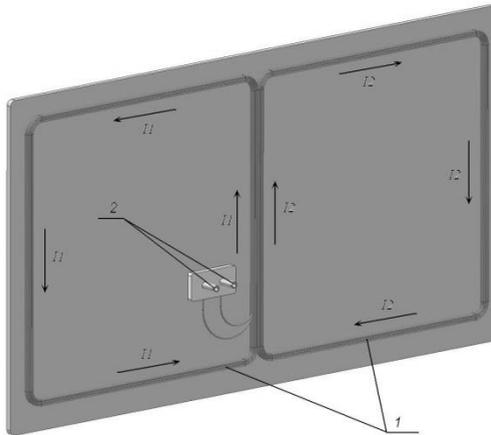


Рис. 11. Контур «Модель прямого тока».

Контур состоит из двух петель, расположенных симметрично относительно центральной части контура. Токи  $I_1$  и  $I_2$ , протекающие в каждой из петель, создают магнитные поля, взаимно компенсирующие друг друга. В результате, неуравновешенным остаётся только магнитное поле, создаваемое токами, протекающим в центральной части контура. Таким образом, моделируется магнитное поле, создаваемое как бы проводником бесконечной длины.

Контур выполнен из медной лакированной проволоки, и имеет следующие параметры:

- число витков  $N = 100$ ;
- активное сопротивление  $R = 9,0 \text{ Ом}$ ;
- индуктивность  $L = 5,2 \text{ мГн}$ .

**Соленоид на стойках (рис. 12)** состоит из двух соленоидов с небольшим зазором между ними. Поскольку ширина зазора много меньше эффективного диаметра соленоида, можно считать, что наличие зазора не влияет на форму силовых линий магнитного поля. Если соединить соленоиды последовательно, как показано на рис. 13, их можно рассматривать как один соленоид.

- Длина соленоида – 120 мм
- Средний (эффективный) диаметр – 52 мм

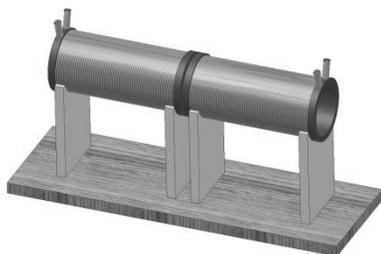


Рис.12. Соленоид

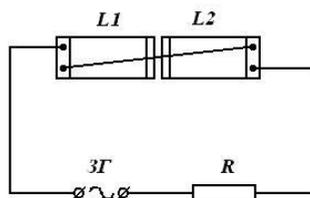


Рис. 13. Последовательное соединение двух соленоидов.

**Плоский индукционный датчик (рис. 14)** может быть введён в зазор соленоида для изучения распределения индукции магнитного поля по радиусу соленоида. Датчик имеет 9 кольцевых контуров, каждый из которых представляет собой 10 витков проводящей дорожки.

Номера клемм для соответствующих датчиков, указаны в таблице 5.

## 4. Описание измерительных приборов, входящих в состав комплекса

### 4.1 Электронный осциллограф «MATRIX MOS 620» (рис. 15)

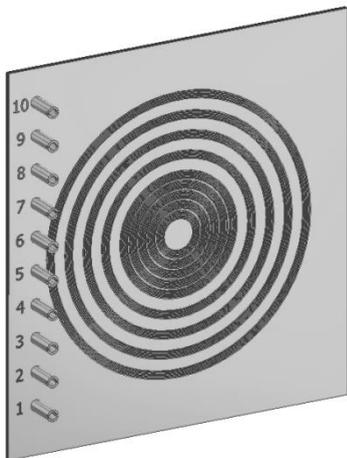


Рис. 14. Плоский индукционный датчик.

В комплект лабораторного комплекса ЛКЭ-1 входит электронно-лучевой осциллограф типа «MATRIX MOS 620». Осциллограф предназначен для наблюдения колебательных и импульсных электрических процессов, и для измерения амплитудно-временных параметров изучаемых сигналов.

На рис. 15 цифрами обозначены основные органы управления осциллографа.

Таблица 5.

Клеммы	Средний (эффективный) радиус датчика, мм
1 - 2	10
2 - 3	15
3 - 4	20
4 - 5	25
5 - 6	30
6 - 7	40
7 - 8	50
8 - 9	60
9 - 10	70

### Электронно-лучевая трубка

- Кнопка **POWER (1)** Включение/выключение прибора.

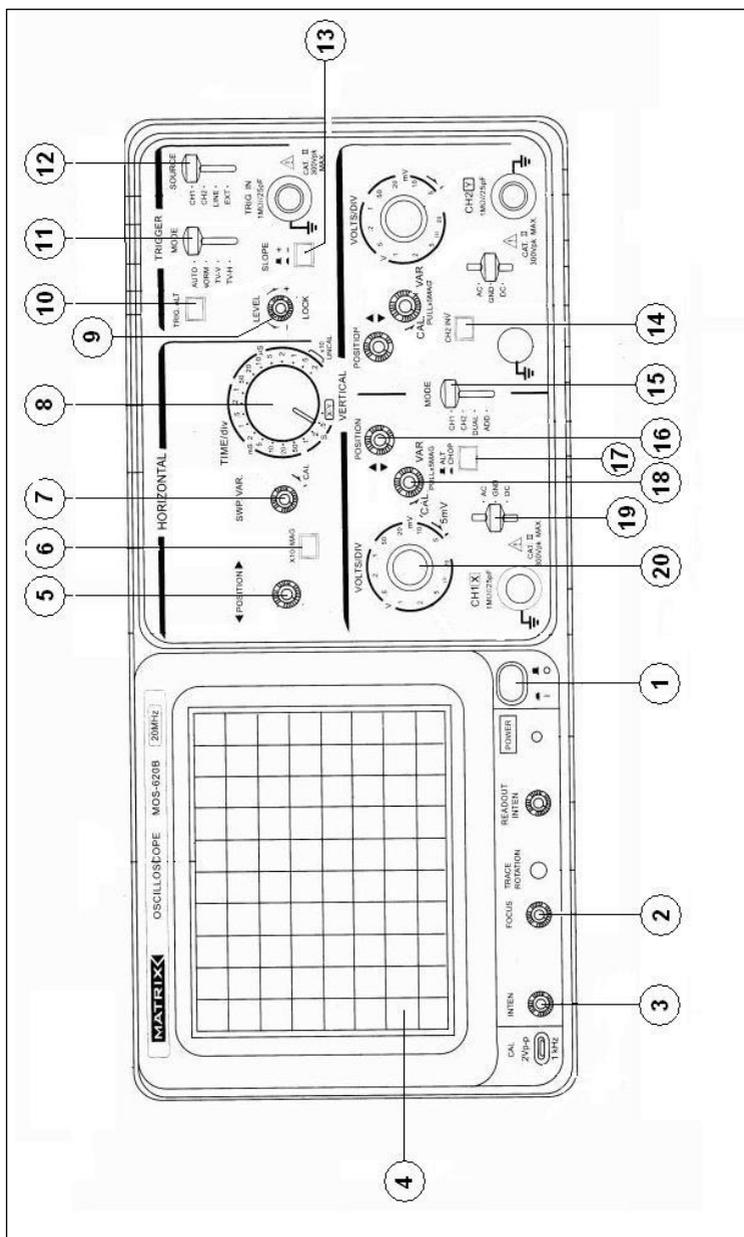


Рис. 15. Электронный осциллограф «MATRIX MOS620»

- Регулятор **INTEN (3)** Регулировка яркости точки или линии.
- Регулятор **FOCUS (2)** Регулировка фокусировки изображений.
- Экран ЭЛТ **(3)** с делениями измерительной сетки.

### Тракт вертикального отклонения (VERTICAL)

#### Канал 1 (CH 1) вертикального отклонения

- Переключатель **VOLTS/DIV (20)** канала 1 для выбора коэффициента вертикального отклонения канала 1.
- Регулятор **VAR (PULL x5 MAG) (18)** Плавная регулировка коэффициента отклонения до  $\geq 1/2,5$  от установленного дискретного значения. Если регулятор установлен в положение CAL, то коэффициент отклонения имеет калиброванное значение. Если ручку регулятора вытянуть на себя, (положение x5MAG), то значение коэффициента отклонения увеличится в 5 раз.
- Регулятор **POSITION (16)** Регулировка вертикального положения точки или линии осциллограммы.
- Переключатель **AC-GND-DC (19)** предназначен для выбора режима связи входа и вертикального усилителя.

#### Канал 1 (CH 1) вертикального отклонения

- Кнопка **CH2 INV (14)** При нажатии этой кнопки входной сигнал канала 2 инвертируется.

Остальные органы управления канала 2 аналогичны по назначению соответствующим органам управления канала 1.

#### Выбор режима работы каналов 1 и 2 (CH1 и CH2)

- Переключатель **VERT MODE (15)** служит для выбора режима работы каналов вертикального отклонения:
  - CH1 – осциллограф работает в одноканальном режиме канала CH1;
  - CH2 – осциллограф работает в одноканальном режиме канала CH2;
  - DUAL – осциллограф работает в двухканальном режиме каналов CH1 и CH2;

ADD – осциллограф отображает алгебраическую сумму или разность каналов CH1 и CH2.

- Кнопка ALT/CHOP (17) осуществляет выбор режима совместной работы каналов CH1 и CH2.

### **Блок горизонтальной развёртки (HORIZONTAL)**

- Переключатель TIME/DIV (8) Предназначен для выбора коэффициента горизонтальной развёртки. В положении (X-Y) переводит осциллограф в режим X-Y (двухкоординатная развёртка).
- Регулятор SWP.VAR (7) служит для плавного изменения коэффициента горизонтальной развёртки. Если регулятор установлен в положение CAL, то коэффициент развёртки имеет калиброванное значение.
- Регулятор POSITION (5) Для горизонтального перемещения осциллограммы или точки.
- Кнопка x10MAG (6) При нажатии этой кнопки происходит растяжка изображения сигнала в 10 раз.

### **Блок синхронизации (TRIGGER)**

- Переключатель SOURCE (12) служит для выбора одного из внутренних источников синхронизации (совместно с кнопкой TRIG.ALT (10)), или внешнего источника синхронизации.
- Регулятор LEVEL (9) предназначен для получения стабильного изображения формы сигнала. Устанавливает точку начала запуска развёртки относительно осциллограммы сигнала. В положении LOCK (повернуть ручку в крайнее положение по часовой стрелке, до щелчка) прибор будет автоматически поддерживать оптимальный уровень синхронизации независимо от амплитуды сигнала, не требуя ручной регулировки уровня синхронизации.
- Кнопка SLOPE (13) служит для выбора полярности запускающего сигнала.
- Переключатель TRIGGER MODE (11) служит для выбора требуемого режима синхронизации (обычно AUTO или NORM).

Более подробно назначение некоторых органов управления и порядок работы с осциллографом изложены в описании лабораторной работы 1а.

**Генератор функциональный ГЗЧМ (рис. 16)** служит в качестве источника периодических и импульсных сигналов в ЛКЭ-1 используется генератор функциональный ГЗЧМ. Описание основных функций и выходных параметров генератора также приведено в описании работы 1а.



Рис. 16. Генератор функциональный ГЗЧМ

#### 4.2 Вольтметр универсальный ВС – 97 (рис. 17).

Универсальный цифровой вольтметр типа ВС – 97 предназначен для измерения следующих величин:

- Постоянное напряжение
- Переменное напряжение
- Сопротивление
- Постоянный ток
- Переменный ток
- Ёмкость конденсаторов
- Частота гармонических колебаний

Таблица 6. Измеряемые физические величины и рабочие диапазоны измерения.

Величина	Условное обозначение	Единицы измерения	Диапазон измерений	Приборная погрешность
Постоянное напряжение	V=	мВ, В	400 мВ – 400 В	$\pm(0,005U_x+2D)$

			400 В – 1000 В	$\pm(0,01U_x+4D)$
Постоянный ток	$\mu\text{A}, \text{mA},$ 10A	мкА, мА	400 мкА – 400 мА	$\pm(0,008 I_x+6D)$
		А	400 мА – 10 А	$\pm(0,012 I_x+10D)$
Переменное напряжение (действующее значение)	V~	мВ, В	До 400 мВ	$\pm(0,015U_x +6D)$
			400 мВ – 400 В	$\pm(0,008 U_x +6D)$
			400 В – 750 В	$\pm(0,01U_x +6D)$
Переменный ток (действующее значение)	$\mu\text{A}, \text{mA},$ 10A	мкА, мА	400 мкА – 400 мА	$\pm(0,01 I_x +6D)$
		А	400 мА – 10 А	$\pm(0,02 I_x +15D)$
Сопротивление	$\Omega$	Ом, кОм, Мом	До 400 Ом	$\pm(0,008R_x+5D)$
			4 кОм – 4 МОм	$\pm(0,008 R_x +4D)$
			4МОм – 40 МОм	$\pm(0,12 R_x +5D)$
Ёмкость		нФ, мкФ	4 нФ – 40 нФ	$\pm(0,025 C_x +6D)$
			400 нФ – 40 мкФ	$\pm(0,035 C_x +8D)$
			200 мкФ	Не нормируется
Частота	30 MHz	Гц, кГц, МГц	100 Гц – 10 МГц	$\pm(0,005v_x+4D)$

$(U_x, I_x, R_x, C_x, v_x)$  – измеренное значение величины;

D – единица младшего разряда

### Порядок работы с универсальным вольтметром VC-97.

**ВНИМАНИЕ! ПРЕЖДЕ, ЧЕМ НАЧАТЬ РАБОТУ С ПРИБОРОМ, ВНИМАТЕЛЬНО ОЗНАКОМЬТЕСЬ СО СЛЕДУЮЩИМИ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯМИ:**

- Знак  рядом с гнездами предупреждает, что входное напряжение или ток не должны превышать указанных пределов!

- Всегда проверяйте, что используется именно требуемая функция измерения!
- Всегда проверяйте, что используются именно требуемые гнезда прибора!
- При измерении напряжения проверяйте, чтобы прибор не был включен в режим измерения токов, или сопротивлений, или диодного теста!
- Не превышайте максимально допустимых величин входных сигналов!

### Измерение напряжения.



Рис. 17.  
Вольтметр  
универсальный  
VC – 97.

1. Подключите чёрный щуп к входу «COM», а красный ко входу «V Ω Hz».

2. Установите переключатель режимов в положение «V» и подсоедините щупы к исследуемой схеме или устройству.

3. Прибор работает в режиме автоматического выбора диапазона измерения. Для установки диапазона измерения вручную нажимайте кнопку RANGE. Для возвращения в режим автоматического выбора диапазона удерживайте кнопку RANGE нажатой в течение 2 секунд.

**ПРИМЕЧАНИЕ.** При измерении *переменного напряжения* диапазон рабочих частот прибора VC – 97 составляет  $40 \div 400$  Гц. За пределами этого диапазона показания прибора *не будут соответствовать* действительному значению измеряемой величины.

### Измерение тока.

1. Подключите чёрный щуп к входу «COM», а красный ко входу «mA».
2. Установите переключатель функций на желаемый режим измерения постоянного или переменного тока.
3. Подсоедините щупы последовательно к исследуемой схеме или устройству.
4. При измерении токов от 400 мА до 10 А подключайте красный щуп к входу «10А».

- Для переключения в режим измерения переменных токов и обратно нажимайте кнопку «~/—».

**Измерение сопротивлений.**

- Подключите чёрный щуп к входу «COM», а красный ко входу «V  $\Omega$  Hz».
- Установите переключатель функций на желаемый режим измерения на режим измерения сопротивления « $\Omega$ ».
- Подсоедините щупы прибора к измеряемому сопротивлению.
- Для ручного выбора пределов измерения нажмите кнопку SELECT.
- ВНИМАНИЕ!** При измерении сопротивлений в схеме убедитесь, что схема обесточена, и все конденсаторы полностью разряжены.

**Функция «DATA HOLD».**

При нажатии кнопки «DATA HOLD» прекращается обновление показаний на дисплее (сохраняются показания, присутствовавшие в момент нажатия кнопки). Повторное нажатие кнопки возобновляет нормальную работу прибора.

**Режим автовыключения.**

Прибор оснащён устройством автовыключения. Если не производится никаких измерений, то через 15 мин. раздаётся звуковой сигнал, после чего вольтметр универсальный

### 4.3 Цифровой мультиметр М-830В (рис. 18).

Цифровой мультиметр М-830В представляет собой комбинированный прибор, позволяющий измерять различные электрические параметры. Ниже в таблице 7 приведён перечень измеряемых физических величин и рабочие диапазоны измерения.

Таблица 7

Величина	Условное обозначение	Единицы измерения	Диапазон измерений	Приборная погрешность
Постоянное напряжение	DCV	mV, V	До 200 мВ	$\pm(0,0025U_x + 2D)$
			2В – 1000 В	$\pm(0,005U_x + 2D)$

Постоянный ток	DCA	mA	200 мкА – 20 мА	$\pm(0,01 I_x + 2D)$
			До 200 мА	$\pm(0,012 I_x + 2D)$
Постоянный ток	DCA	A	До 10 A	$\pm(0,02 I_x + 2D)$
Переменное напряжение (действующее значение)	ACV	V	До 700 В	$\pm(0,012 U_x + 10D)$
Сопротивление постоянному току	$\Omega$	$\Omega, k\Omega$	200 $\Omega$ – 200 к $\Omega$	$\pm(0,008 R_x + 2D)$
			До 2000 к $\Omega$	$\pm(0,01 R_x + 2D)$

$(U_x, I_x, R_x)$  – измеренное значение величины;

D – единица младшего разряда

Кроме перечисленных, мультиметр может выполнять ещё ряд специальных функций – измерение температуры (с использованием выносного датчика - термопары), тестирование транзисторов и диодов, проверка целостности («прозвонка») электрических цепей и соединений.

Режим работы мультиметра и диапазон измерений выбираются с помощью многопозиционного переключателя. При этом на табло цифрового индикатора будет отображаться значение измеряемой величины в единицах, соответствующих выбранному диапазону. При измерении постоянного тока или напряжения на индикаторе отображается также знак «-» (знак «+» не показывается). В положении переключателя «Off» прибор выключен.



Рис. 18. Цифровой мультиметр М-830В

**ВНИМАНИЕ! ВКЛЮЧАТЬ МУЛЬТИМЕТРЫ СЛЕДУЕТ ТОЛЬКО НА ВРЕМЯ ИЗМЕРЕНИЙ. ПО ОКОНЧАНИИ РАБОТЫ С УСТАНОВКОЙ МУЛЬТИМЕТРЫ ДОЛЖНЫ БЫТЬ ВЫКЛЮЧЕНЫ!**

**Контактное гнездо «СОМ»** служит для подключения чёрного щупа («общего» провода). В режиме измерений постоянного тока или напряжения это гнездо соответствует знаку «-».

**Контактное гнездо «V/Ω/mA»** служит для подключения красного щупа в режиме измерения, соответственно, напряжения (постоянного или переменного), активного сопротивления, или постоянного тока (в диапазоне до 200 mA).

**Контактное гнездо 10A** служит для подключения красного щупа при измерении постоянного тока в диапазоне от 200 mA до 10 A.

**ПРИМЕЧАНИЕ.** При измерении *переменного напряжения* диапазон рабочих частот мультиметра М-830В составляет 45 ÷ 450 Гц. За пределами этого диапазона показания мультиметра *не будут соответствовать* действительному значению измеряемой величины.

## Работа 1а. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

---

*Цель:* приобретение навыков работы с осциллографом и определение с его помощью амплитудных и временных параметров периодических и импульсных сигналов.

*Оборудование:* осциллограф MOS — 620, генератор сигналов ГЗЧМ.

### ВВЕДЕНИЕ

Электронно-лучевой осциллограф (ЭО) — прибор для визуального наблюдения электрических сигналов и измерения их параметров. Современные осциллографы позволяют исследовать электрические напряжения в диапазоне частот от 0 Гц (постоянный ток) до нескольких гигагерц, а также измерять амплитуды и длительности исследуемых сигналов. Наличие периодической и ждущей развёртки даёт возможность исследовать периодические электрические процессы.

**Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ).** Основным узлом любого ЭО является электронно-лучевая трубка (рис. 1а.1), с помощью которой исследуемый сигнал преобразуется в видимое изображение на экране 7. Источником электронов служит нагреваемый оксидный катод 1, который помещён внутри управляющего электрода (модулятора) 2.

Для управления интенсивностью электронного пучка на модулятор подаётся отрицательный относительно катода потенциал  $U_{\text{упр}}$ . Изменяя его величину, можно менять яркость свечения пятна на экране, т.е. яркость изображения.

Фокусировка электронного пучка осуществляется первым анодом 3, на который подаётся положительное относительно катода фокусирующее напряжение  $U_{a1}$ . Для того чтобы электроны достигли экрана, их ускоряют при помощи второго анода 4, на который подаётся положительное напряжение  $U_{a2}$ . При попадании на экран электроны вызывают свечение особого вещества — люминофора, нанесённого на поверхность экрана.

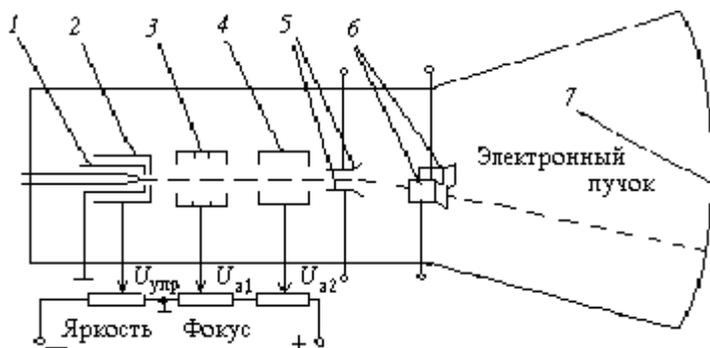


Рис. 1а.1. Схема питания ЭЛТ: 1 — катод; 2 — управляющий электрод (модулятор); 3 — первый анод; 4 — второй анод; 5 — вертикально отклоняющие пластины; 6 — горизонтально отклоняющие пластины; 7 — экран.

Пучок электронов проходит между двумя парами отклоняющих пластин 5 и 6. Отклонение луча зависит от напряжения, приложенного к пластинам, и скорости электронов.

Принцип получения развёрнутого во времени изображения исследуемого сигнала на экране ЭО показан на рис. 1а.2.

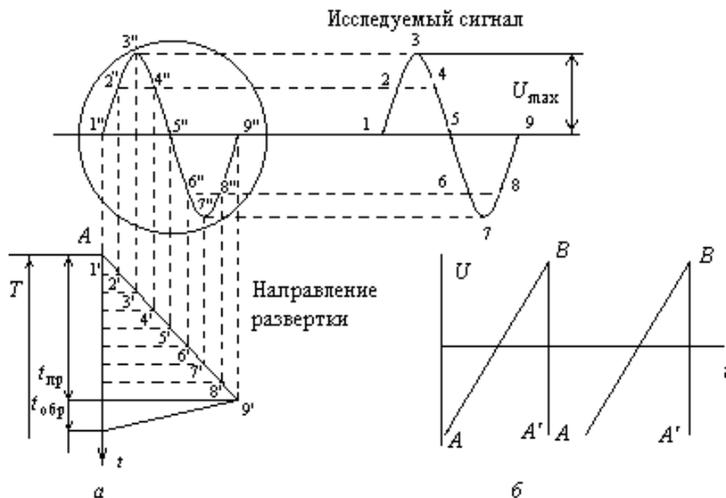


Рис. 1а.2. (а) — формирование изображения исследуемого сигнала на экране осциллографа; (б) — форма развёртывающего сигнала вырабатываемого генератором развёртки осциллографа.

Используемый сигнал подаётся через тракт вертикального отклонения луча на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ. Если на горизонтально отклоняющие пластины через канал горизонтального отклонения луча не подано напряжение, то электронный луч прочерчивает вертикальную линию. Для того чтобы луч перемещался в горизонтальном направлении, на эти пластины подаётся от генератора развёртки напряжение, нарастающее линейно.

Генератор развёртки может работать в периодическом и ждущем режимах.

**Линейная непрерывная развёртка.** Генератор развёртки вырабатывает линейно возрастающее напряжение (пилообразной формы), см. рис. 1а.2, а.

При минимальном значении развёртывающего напряжения  $U_{\min}$  (точка А на рис. 1а.2, а) луч находится на экране осциллографа в крайнем левом положении  $l''$ . По мере роста напряжения от А до В луч перемещается с постоянной скоростью слева направо по горизонтальной прямой (оси времени). Когда напряжение спадает от В до А, луч совершает обратный ход. Период линейной развёртки  $T = t_{\text{пр}} + t_{\text{обр}}$  ( $t_{\text{обр}} \ll t_{\text{пр}}$ ). Обратный ход на экране не виден, так как в осциллографе имеется устройство, гасящее луч во время обратного хода.

**Ждущая развёртка.** В этом случае развёртывающее пилообразное напряжение попадает на горизонтально отклоняющие пластины лишь тогда, когда исследуемый импульс поступает на вход осциллографа. После того как под действием развёртывающего напряжения луч совершает один цикл прямого и обратного ходов, развёртка прекращается и «ждёт» прихода нового импульса, запускающего её (см. рис. 1а.2, б).

**Синхронизация.** Для получения на экране трубки чёткого и неподвижного изображения необходимо правильно выбрать синхронизацию развёртки. Процесс синхронизации заключается в принудительном воздействии внешним сигналом на генератор развёртки. В результате генератор начинает выдавать сигнал с частотой, равной или кратной частоте воздействующего напряжения.

Осциллографы имеют два вида синхронизации: внутреннюю и внешнюю. Внутренняя синхронизация осуществляется

исследуемым сигналом, а внешняя — напряжением от внешнего источника.

**Измерение длительности сигнала.** В современных осциллографах длительность сигнала определяют по горизонтальному размеру его изображения на экране. Длительность равна произведению размера изображения в делениях на показания калиброванного переключателя частоты развёртки в секундах на деление (с/дел.).

**Измерение амплитуды сигнала.** Амплитуду сигнала определяют по вертикальному размеру его изображения на экране. Амплитуда (размах) сигнала равна произведению размера изображения в делениях на показания калиброванного переключателя чувствительности тракта вертикального отклонения луча в вольтах на деление (В/дел.).

### Параметры импульсов

На рис. 1а.3, а изображён одиночный прямоугольный импульс, на котором показаны его параметры (прямоугольным называют

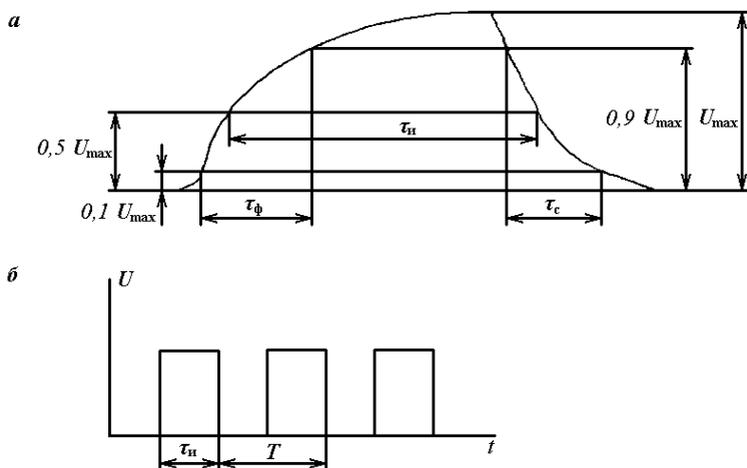


Рис. 1а.3. (а) — параметры прямоугольного импульса;  
(б) — повторяющийся прямоугольный импульс.

импульс, длительность плоской части вершины, которого составляет не менее 0,7 от длительности импульса  $\tau_{и}$ , отсчитываемой на уровне 0,5 амплитуды  $U_{max}$ ):  $U_{max}$  — высота (амплитуда)

прямоугольного импульса, определяемая путём продления плоской части вершины до пересечения с фронтом прямоугольного импульса;  $\tau_n$  — длительность прямоугольного импульса, отсчитываемая по уровню 0,5 амплитуды;  $\tau_\phi$  — длительность фронта прямоугольного импульса в интервале 0,1—0,9 амплитуды;  $\tau_c$  — длительность среза прямоугольного импульса в интервале 0,9 — 0,1 амплитуды.

Периодом повторения импульсов  $T$  называют отрезок времени между началом двух соседних однополярных импульсов (см. рис. 1а.3, б). Отношение  $Q = T/\tau_n$  называют скважностью импульсов, а отношение  $\tau_n/T$  — коэффициентом заполнения.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка состоит из осциллографа MOS — 620 и генератора сигналов ГЗЧМ. Осциллограф позволяет наблюдать сигналы и измерять:

- временные характеристики сигналов от долей микросекунды до десятков секунд;
- амплитуды сигналов от долей милливольт до десятков вольт.

В осциллографе имеется два независимых канала вертикального отклонения луча (канал 1 и канал 2), что позволяет одновременно наблюдать осциллограммы двух сигналов. Предусмотрен также режим сложения сигналов, например, для наблюдения биений.

Генератор развёртки может работать либо в автоматическом, либо в ждущем режиме. Предусмотрена как внутренняя, так и внешняя синхронизация. Канал горизонтального отклонения луча можно отключить от генератора развёртки и подключить к внешнему источнику напряжения, например для наблюдения сложения перпендикулярных колебаний, фазовых диаграмм и т. д.

Генератор ГЗЧМ вырабатывает сигналы с чистотой от 0,1 Гц до 100 кГц. Можно выбрать сигнал синусоидальной, пилообразной и прямоугольной формы. Амплитуда сигнала регулируется от долей вольт до 10 В. Генератор снабжён измерителем частоты (или периода) с выходом на цифровой индикатор — дисплей.

## ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении работы необходимо соблюдать общие требования "Инструкции по технике безопасности работы в лаборатории <<Электричество>>". Следите за тем, чтобы все штекеры проводов были вставлены в гнезда до отказа и не было оголённых участков штекеров.

## ПОДГОТОВКА УСТАНОВКИ К РАБОТЕ

**ВНИМАНИЕ!** Вероятнее всего ваш осциллограф готов к работе. Поэтому, найдя соответствующие ручки, переключатели, кнопки, просто проверьте правильность их положений. В случае сомнений обратитесь к преподавателю или дежурному сотруднику.

1. Включить осциллограф, нажав кнопку «POWER». Через 15 – 20 с. на экране должна появиться горизонтальная линия развёртки.

В блоке развёртки «HORIZONTAL» (далее «H») кнопка «\*10 MAG» должна быть в отжатом положении. При нажатии этой кнопки увеличивается в десять раз горизонтальная скорость движения луча по экрану за счёт увеличения в 10 раз размаха хода луча при неизменной частоте развёртки.

В блоке синхронизации «TRIGGER» («T»), ручка выбора режима синхронизации «MODE» в положении «AUTO» — автоматическая.

Переключатель источника сигнала синхронизации «SOURCE» в положении «CH2» (канал 2).

Переключатель «AC, GND, DC» канала 2 в положении «закрытый» вход «AC». В этом режиме вход пропускает только переменную составляющую входного сигнала. В положении «DC» — и переменную, и постоянную. В положении «GND» вход отключен.

Переключатель выбора режима «MODE», находящийся между каналами 1 и 2 — в положении «CH2».

Ручкой «INTEN» установить желаемую яркость изображения. Если изображение не появилось, позвать преподавателя или дежурного сотрудника.

Ручкой «FOCUS» добиться, чтобы линия была как можно тоньше.

Ручками «POSITION» («P») блока «H» и канала 2 расположить линию развёртки так, чтобы она занимала весь экран по горизонтали и проходила через среднюю горизонтальную линию измерительной сетки, нанесённой на экран.

Осциллограф готов к работе.

2. Включить генератор ГЗЧМ и получить изображение сигнала на экране осциллографа (выключатель находится на задней панели генератора).

Переключатель формы сигнала поставить в положение «~» (синусоидальный сигнал).

Кнопкой под дисплеем выбрать режим «частота», при этом загорится индикатор под надписью «частота».

Ручку регулировки выходного напряжения установить в промежуточное положение.

Переключатель диапазонов — в любую из позиций: «10», «100», «1к», «10к».

Генератор ГЗЧМ готов к работе.

3. Ручками ступенчатой и плавной регулировки усиления «VOLT/DIV» («V/D») канала 2 устанавливаются желаемый размах изображения на экране.

Ручкой «LEVEL» («L») блока «T» добиваются, чтобы изображение было неподвижным.

Ручками ступенчатой и плавной регулировки скорости «TIME/DIV» (T/D) и «SWP.VAR» блока «H» получают на экране изображение желаемого числа периодов синусоидального сигнала.

Положение изображения по вертикали и горизонтали выбирают ручками «P» канала 2 и блока «H».

Перед тем как приступить к измерительной части работы, следует «привыкнуть» к осциллографу и генератору, добиваясь хорошего качества изображения сигналов различных частот и амплитуд.

## **Задание 1. Измерение параметров синусоидального сигнала**

1. Измерить период синусоидального сигнала.

Ручку «SWP.VAR» блока «H» поставить в крайнее правое положение. С помощью переключателя «T/D» и ручки «L»

добиться, чтобы на экране возникло не больше двух периодов синусоиды. Ручкой «Р» канала 2 передвигают изображение так, чтобы максимумы синусоиды оказались на одинаковом расстоянии от средней горизонтальной линии сетки экрана. Ручкой «Р» блока «Н» передвигают изображение так, чтобы синусоида проходила через одну из точек пересечения средней горизонтальной линии сетки с одной из вертикальных линий сетки в левой части экрана (рис. 1а.4, а).

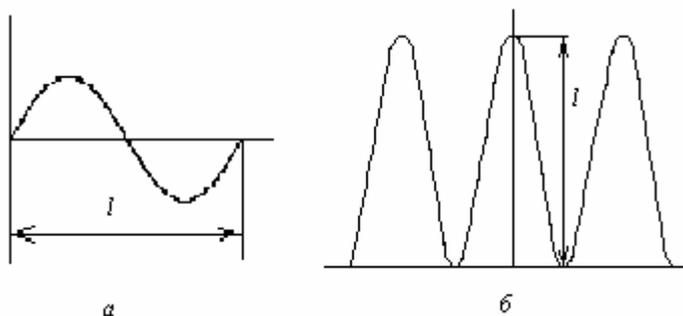


Рис.1а.4. Периодический сигнал (а), периодический сигнал в выбранном масштабе (б)

Период сигнала равен произведению числа больших делений на длине  $l$  на показания переключателя «Т/Д».

Сделать измерения частоты синусоидального сигнала генератора ГЗЧМ для диапазонов 10, 100, 1к, и 10к.

Число, соответствующее выбранному диапазону, указывает

Таблица 1а.1

№ п/п	Показания ГЗЧМ $\nu_0$ , Гц	Показания «Т/Д», с/дел.	Число делений	Период сигнала, с	Частота $\nu$ , Гц
1					
2					
.					
.					
.					

частоту нижней границы диапазона. Например, в положении переключателя «100» ручкой плавной регулировки перекрываются частоты от 100 Гц до 1 кГц. В каждом диапазоне измерения

проделать для пяти различных частот. При выборе частоты не стремитесь специально устанавливать значения, выражаемые круглыми цифрами, например 20,0; 50,0 и т. д., не следует также выбирать частоты, очень близкие к границам диапазона. Выбранные частоты должны более или менее равномерно распределяться по диапазону. Например, в диапазоне «10» можно выбрать 14,6; 32,4; 51,7; 73,5; 94,2.

Измерения занести в таб. 1а.1.

В процессе выполнения задания делать оценку частоты сигнала по одному – двум измерениям в каждом диапазоне.

2. Измерить амплитуду синусоидального сигнала.

Для одной из частот в диапазоне «100» получить неподвижное изображение сигнала на экране.

Ручку «V/D» плавной регулировки поставить в крайнее правое положение. Переключателем «V/D» установить размах сигнала по вертикали близким к вертикальному размеру экрана.

Ручкой «Р» канала 2 расположить синусоиду так, чтобы минимумы синусоиды оказались на уровне одной из нижних горизонтальных линий сетки экрана. Ручкой «Р» блока «Н» совместить максимум синусоиды со средней вертикальной линией сетки (см. рис. 1а.4, б). Посчитать число больших делений на длине  $l$ .

Таблица 1а.2

№ п/п	Показания ГЗЧМ, дел.	Показания переключателя «V/D», В	Число делений	Размах сигнала, В	Действующее напряжение, В
1					
2					
.					

Размах сигнала равен произведению числа делений на показания переключателя «V/D». Амплитуда сигнала равна половине размаха, действующее значение напряжения равно амплитуде, делённой на  $\sqrt{2}$ .

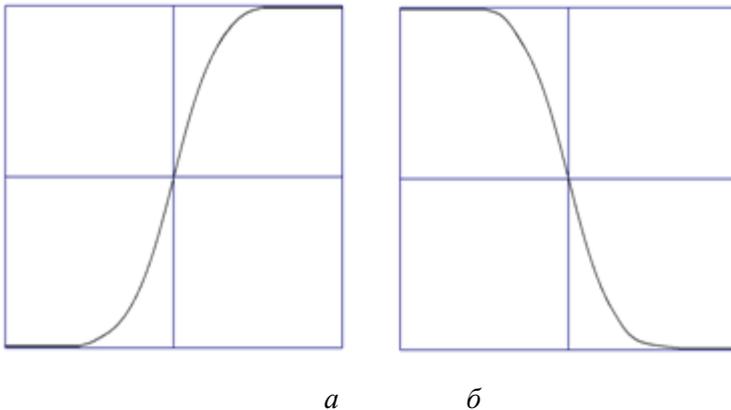


Рис. 1а.5. Подготовка изображения фронта и спада импульса к измерению.

Произвести градуировку шкалы ручки «Амплитуда» генератора ГЗЧМ. Прodelать не менее десяти измерений, результаты занести в таб. 1а.2.

### **Задание 2. Измерение параметров прямоугольного импульса**

На генераторе ГЗЧМ поставить переключатель выбора формы сигнала в положение “\_□\_” (третья слева позиция ручки переключения).

Выбрать частоту сигнала в диапазоне 5 — 25 кГц.

Ручку «Амплитуда» установить в промежуточное положение.

На экране осциллографа найти горизонтальные уровни, отмеченные в левой стороне экрана символами 0 %, 10 %, 90 %, 100 %. Ручками «V/D» (ступенчато и плавно) и «Р» канала 2 добиться, чтобы изображение сигнала вписывалось точно между уровнями 0 % и 100 % на экране осциллографа.

Ручкой «L» добиться неподвижного изображения импульсов на экране.

Переключателем «T/D» и ручкой «Р» блока «Н» установить на экране изображение не более двух полных импульсов.

Посчитав соответствующее число делений по средней горизонтальной линии сетки, определить  $T$  и  $\tau_{и}$  (см. рис. 1а.3. б).

Измерить  $\tau_{\phi}$  и  $\tau_c$  двумя способами<sup>1</sup>

**I. Способ.** Сдвинуть изображение ручкой «Р» блока «Н» немного вправо так, чтобы была видна точка начала развёртки изображения. Медленно вращая ручку «L», поднять эту точку до уровня 10 (0,8 деления по вертикали). При этом изображение должно оставаться устойчивым (неподвижным). Переключателем «Т/D» максимально растянуть по экрану изображение переднего (левого) фронта импульса. Удобно расположить изображение с помощью ручки «Р» блока «Н», посчитать число делений по горизонтали между уровнями 10 и 90.

Вычислить  $\tau_{\phi}$ .

Переключателем «Т/D» снова установить «нерастянутое» изображение. В блоке «Т» нажать кнопку «SLOPE» («S»), при этом генератор развёртки запускается задним фронтом (спадом) импульса.

С помощью ручки «L» добиваются, чтобы начало развёртки изображения находилось на уровне не выше уровня 90.

Действуя аналогично (см. выше), измерить  $\tau_c$ .

По окончании измерений вернуть кнопку «S» в исходную позицию.

**II. Способ.** С помощью переключателя «Т/D», ручек «Р» блока «Н» и «L» получить в центре экрана изображение переднего фронта импульса. Размер изображения по горизонтали должен составлять примерно одно деление (см. рис. 1.5 а).

Нажать кнопку « $\times 10$  MAG» блока «Н». Ручкой «Р» блока «Н»

Таблица 1а.3.

Параметр	Т	$\tau_{и}$	$\tau_{\phi}$	$\tau_c$	$\tau_{\phi}$	$\tau_c$
			I способ		II способ	
Число делений						
Время/дел., мкс/дел.						
Длительность, мкс						

<sup>1</sup> По техническим причинам может быть оставлен один из способов

удобно расположить растянутое изображение фронта на экране. Измерить число делений по горизонтали, расположенных между уровнями 10 и 90. Уровню 10 соответствует 0,8 деления по вертикали. Показания переключателя «Т/D» необходимо разделить на 10. Вычислить  $\tau_{\phi}$ .

Отжать кнопку « $\times 10 \text{ MAG}$ » аналогичным образом получить изображение спада импульса (рис. 1а.5, б). Снова нажать кнопку « $\times 10 \text{ MAG}$ » и, действуя аналогично, измерить  $\tau_c$ .

Результаты измерений занести в таб. 1а.3.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ.

По результатам измерений п. 1 задания 1 вычислить относительную среднеквадратичную погрешность измерения частоты в пределах каждого частотного диапазона:

$$\frac{\Delta v}{v} = \left( \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n \left( \frac{v_{0i} - v_i}{v_{0i}} \right)^2 \right) \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.1)$$

где  $n$  – число измерений в пределах каждого диапазона ( $n = 5$ );  $v_{0i}$  – частота генератора по показаниям дисплея;  $v_i$  – частота сигнала, измеренная с помощью осциллографа. Поскольку  $v = \frac{1}{T}$ ,

эта же величина является относительной погрешностью измерения по осциллографу, периода сигнала и вообще любой другой временной характеристики сигнала. По результатам пункта 2 задания 1 построить градуировочный график зависимости амплитуды синусоидального сигнала ГЗЧМ от показаний ручки «Амплитуда». Приборную погрешность измерения по осциллографу принять равной 3%; учесть также погрешность отсчёта по экрану ( $\sim 0,2$  деления).

По результатам задания 2 вычислить скважность импульса. Используя формулу (1.1) и замечания к формуле, оценить погрешности измерения характеристик импульса (в заключении привести параметры импульса с указанием погрешностей).

### **Выключение установки**

Выключить генератор ГЗЧМ. Ещё раз проверить положение органов управления осциллографа в соответствии с п. 1 задания 1. Выключить питание осциллографа кнопкой «POWER».

**Кабель от входа осциллографа не отсоединять!**

### **ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ**

Заключение к работе должно содержать следующую информацию:

1. относительные среднеквадратичные погрешности для каждого из диапазонов частот ГЗЧМ;
2. график зависимости амплитуды синусоидального сигнала ГЗЧМ от показаний ручки «Амплитуда»;
3. скважность прямоугольного импульса с погрешностью;
4. параметры прямоугольного импульса с погрешностями и выводом, какой из двух методов измерения фронтов точнее, обосновать этот вывод.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Объясните назначение различных элементов в схеме ЭЛТ.
2. Как осуществляется регулировка яркости и фокусировка луча?
3. Куда «стекают» электроны после попадания на экран?
4. Что такое развёртка, ждущая развёртка, синхронизация?
5. Как зависит точность измерения периода сигнала от количества периодов, умещающихся на экране, от количества делений измерительной сетки?
6. Как зависит точность измерения размаха сигнала от вертикального размера изображения на экране?
7. Перечислите параметры синусоидальных колебаний и напишите уравнение для гармонических колебаний?
8. Что такое скважность импульса, коэффициент заполнения?
9. Что такое действующее значение напряжения?
10. Как остановить «бегущее» изображение сигнала на экране осциллографа?

## ЛИТЕРАТУРА

### *Основная*

1. Калашников Н.П., Смондырев М.А. Основы физики. Т.1.М.: Дрофа.2007.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. М.: Кнорус.2009.

### *Дополнительная*

3. Лабораторный практикум «Электромагнетизм»: Учебное пособие/Под ред. В.Ф. Федорова.-М.: МИФИ.
4. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. Т. 3.М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.
5. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3. Электричество. М: Наука, 1990 г.
6. Парселл Э. Берклеевский курс физики. Т. 2. Электричество и Магнетизм, М. :Наука, 1971.
7. Матвеев А.Н. Электричество и Магнетизм, Т. 3. М. :Высшая школа. 1989.

## Работа 7а ИЗМЕРЕНИЕ ЗАРЯДА И УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

---

**Цель:** измерение отношения заряда электрона к его массе методом магнетрона и измерение абсолютной величины заряда электрона по дробовому шуму.

**Оборудование:** лабораторный комплекс ЛКЭ-3; лампа-магнетрон; динамик; соединительные провода.

### МЕТОД МАГНЕТРОНА

Магнетроном называют коаксиальный цилиндрический диод (двухэлектродную электронную лампу) в магнитном поле, направленном вдоль его оси (рис. 7а.1).

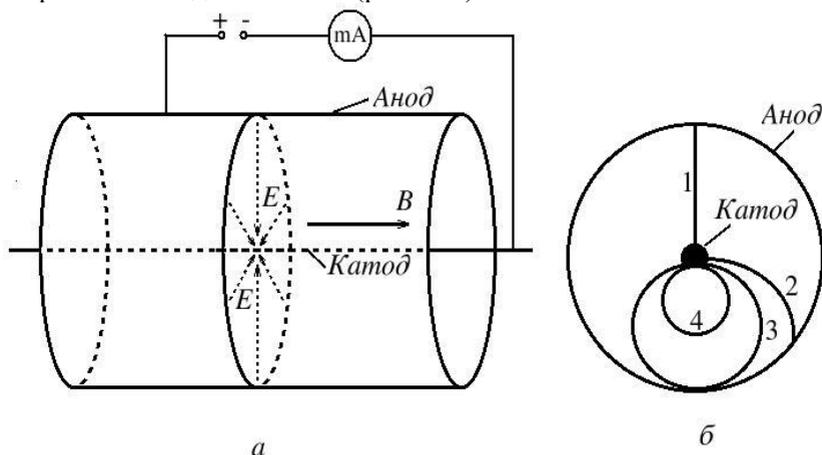


Рис. 7а.1. Схема магнетрона

Электрическое поле направлено по радиусу цилиндра от анода к катоду, и, таким образом, магнитное и электрическое поля в магнетроне взаимно перпендикулярны. Если магнитное поле отсутствует, то электроны, эмитированные катодом, под действием электрического поля движутся прямолинейно по радиусам (рис. 7а.1, б, кривая 1) и в анодной цепи возникает ток. Если приложить небольшое магнитное поле, то под действием этого

поля траектории электронов искривятся (рис.7.1а, б, кривая 2), но все электроны попадут на анод и в анодной цепи будет протекать такой же ток, как и в отсутствие магнитного поля. По мере увеличения магнитного поля радиусы кривизны траектории электронов будут уменьшаться, и при некотором значении индукции магнитного поля  $B_{кр}$  (критическое магнитное поле) траектории электронов будут касаться анода (рис.7а.1,б, кривая 3). При дальнейшем увеличении  $B$  радиусы кривизны траектории электронов будут уменьшаться (рис.7а.1,б, кривая 4) и анодный ток станет равным нулю. Таким образом, при  $B = B_{кр}$  анодный ток резко падает до нуля.

Зависимость анодного тока  $I_a$  от величины индукции магнитного поля  $B$  при постоянном напряжении на аноде и постоянном токе накала называется сбросовой характеристикой магнетрона (рис.7а.2). Резкий скачок анодного тока при  $B = B_{кр}$  (сплошные кривые) возможен, если все электроны покидают катод со скоростями, равными нулю. В реальных условиях электроны вылетают из катода с разными скоростями, поэтому вместо скачка на сбросовой характеристике анодный ток убывает плавно (пунктирная кривая).

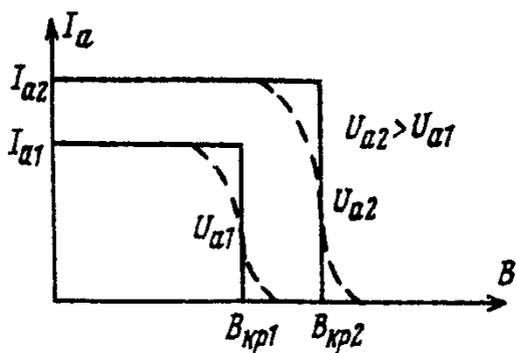


Рис.7а.2. Сбросовые характеристики магнетрона

Критическое поле  $B_{кр}$  есть некоторая функция анодного напряжения  $U_a$ . Найдём эту зависимость в предположении, что модуль скорости электрона не изменяется во время его движения и скорость перпендикулярна индукции  $B$ . В этом случае траектория

электрона – окружность. При  $B = B_{\text{кр}}$  радиус этой окружности  $R_a/2$  и  $R_a/2 = mv/(eB)$ , где  $R_a$  – радиус анода,  $m$  – масса,  $e$  – заряд и  $v$  – скорость электрона. С другой стороны,  $mv^2/2 = eU_a$ , и, исключив  $v$  из этих формул, получим

$$e/m = 8U_a/(R_a^2 B_{\text{кр}}^2). \quad (7a.1)$$

Строгое решение задачи о движении электрона приводит к тому же решению (7a.1), если радиус катода много меньше радиуса анода.

## ДРОБОВОЙ ЭФФЕКТ

*Дробовым эффектом* называют небольшие беспорядочные отклонения тока электровакуумных и полупроводниковых приборов от его среднего значения. Отклонения вызваны неравномерностью эмиссии электронов с катода лампы или инъекции носителей заряда в полупроводниках. Рассмотрим дробовой эффект на примере электронной лампы. При нагревании катода лампы увеличивается средняя скорость теплового движения электронов в металле катода. Часть электронов, обладающих достаточной кинетической энергией, покидает катод. Однако до вылета из катода электрон успевает совершить большое число столкновений с ионами, атомами и электронами внутри катода. В результате величина и направление скорости каждого электрона в момент вылета может быть произвольной, а вылет отдельных электронов происходит совершенно случайно и не зависит от вылета других электронов. Поэтому число электронов, вылетающих из катода за одинаковые малые промежутки времени  $\Delta t$  флуктуирует, то есть изменяется беспорядочно, и возникает, как говорят, *дробовой шум*. Промежутки времени между моментами вылета отдельных электронов при этом оказываются самыми различными и подчиняются законам случайных явлений (распределение Пуассона).

Будем многократно измерять количество электронов  $n_t$ , покидающих катод за одинаковые промежутки времени  $\Delta t$ , причём это число электронов от одного промежутка к другому изменяется случайным образом. Пусть в единицу времени катодом испускается в среднем  $n_0$  электронов. Тогда за время  $\Delta t$  среднее значения числа вылетающих электронов равно  $n_0 \Delta t$ . По определению, средний квадрат отклонений числа электронов от среднего:

$$\langle (\Delta n_\tau)^2 \rangle = \langle (n_\tau - n_0 \Delta \tau)^2 \rangle. \quad (7a.2)$$

В статистической физике показывается, что если дискретная величина  $n_\tau$  подвержена флуктуациям, а вероятность испускания отдельного электрона за промежуток  $\Delta \tau$  мала, то средний квадрат отклонений величины  $n_\tau$  равен среднему значению этой величины:

$$\langle (n_\tau - n_0 \Delta \tau)^2 \rangle = n_0 \Delta \tau. \quad (7a.3)$$

Если на аноде лампы создан положительный потенциал по отношению к катоду, за промежуток времени  $\Delta \tau$  через лампу протечёт анодный ток  $I_\tau = n_\tau e / \Delta \tau$ , где  $e$  – заряд электрона. Тогда среднее значение тока (или постоянный ток, протекающий через лампу в единицу времени) равно  $I_0 = n_\tau e \Delta \tau / \Delta \tau = n_0 e$ . Умножим обе части равенства (7a.3) на квадрат величины заряда электрона и поделим на  $(\Delta \tau)^2$ :

$$\langle (n_\tau - n_0 \Delta \tau)^2 \rangle e^2 / (\Delta \tau)^2 = n_0 \Delta \tau e^2 / (\Delta \tau)^2.$$

Получим

$$\langle (n_\tau e / \Delta \tau - n_0 e)^2 \rangle = (n_0 e) e / \Delta \tau.$$

В скобках слева стоит разность токов

$$\langle (I_\tau - I_0)^2 \rangle = I_0 e / \Delta \tau.$$

Введём обозначения  $I_\tau - I_0 = I_{ш}$ . Величину  $I_{ш}$  назовём *шумовым током*. Итак, средний квадрат шумового тока  $I_{ш}$  пропорционален заряду электрона:

$$\langle I_{ш}^2 \rangle = I_0 e / \Delta \tau. \quad (7a.4)$$

Чем меньше промежуток времени  $\Delta \tau$ , тем больше средний квадрат шумового тока.

Промежуток времени  $\Delta \tau$  это постоянная времени измерительного прибора, регистрирующего дробовой эффект. Он связан с частотной шириной полосы пропускания прибора соотношением:  $\Delta \tau = 1/(2\Delta f)$ . Заменяв в формуле (7a.4)  $\Delta \tau$

соответствующим частотным диапазоном, получим известную формулу Шоттки:

$$\langle I_{ш}^2 \rangle = 2I_0 e \Delta f.$$

При протекании анодного тока лампы через сопротивление  $R$  нагрузки напряжение на сопротивлении тоже флуктуирует, и средний квадрат шумового напряжения равен

$$\langle U^2 \rangle = I_0 e K,$$

где  $K$  – константа установки, зависящая от сопротивления нагрузки и полосы частот  $\Delta f$ . В данной работе константа  $K$  заранее измерена и равна  $K = 4,0 \cdot 10^{23}$  Ом<sup>2</sup>·Гц. Тогда заряд электрона можно определить из формулы

$$e = \langle U^2 \rangle / (KI_0). \quad (7a.5)$$

Дробовой эффект сопровождается любыми явлениями, связанными с эмиссией заряженных частиц, – термоэлектронную, фотоэлектронную, вторичную эмиссии, а также протекание тока через полупроводники.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Обе части работы выполняются на лабораторном комплексе ЛКЭ-3. Комплекс содержит каркас-стойку и функциональный блок, состоящий из соленоида, трёх основных модулей и четырёх измерительных приборов – мультиметров. В комплекс входят также осциллограф, пьезодинамик и соединительные провода и кабели. На рис. 7а.3 дан внешний вид функционального блока.

**Блок питания** 1 находится в нижней левой части прибора. На панель этого блока выведены три ручки регулировки напряжения и переключатель рода работы «магнетрон–шум». Ручка  $U_C$  регулирует напряжение на обмотке соленоида в пределах от 0 до 24 В, при этом максимальный ток в обмотке равен 2 А. Ручкой  $U_H$  устанавливается ток накала ламп в пределах (0–6) В.

Регулятор  $U_A$  позволяет изменять напряжение на анодах ламп в пределах (0–90) В.

Переключатель – тумблер «магнетрон–шум» – в положении «МАГН» подключает источники питания  $U_A$  и  $U_H$  к блоку «Магнетрон». В положении «ШУМ» тумблер подключает источники  $U_A$  и  $U_H$  к блоку «Дробовой шум». При среднем положении «0» тумблера источники питания  $U_A$  и  $U_H$  отключены от блоков.

**Блок «Магнетрон»** предназначен для снятия сбросовых

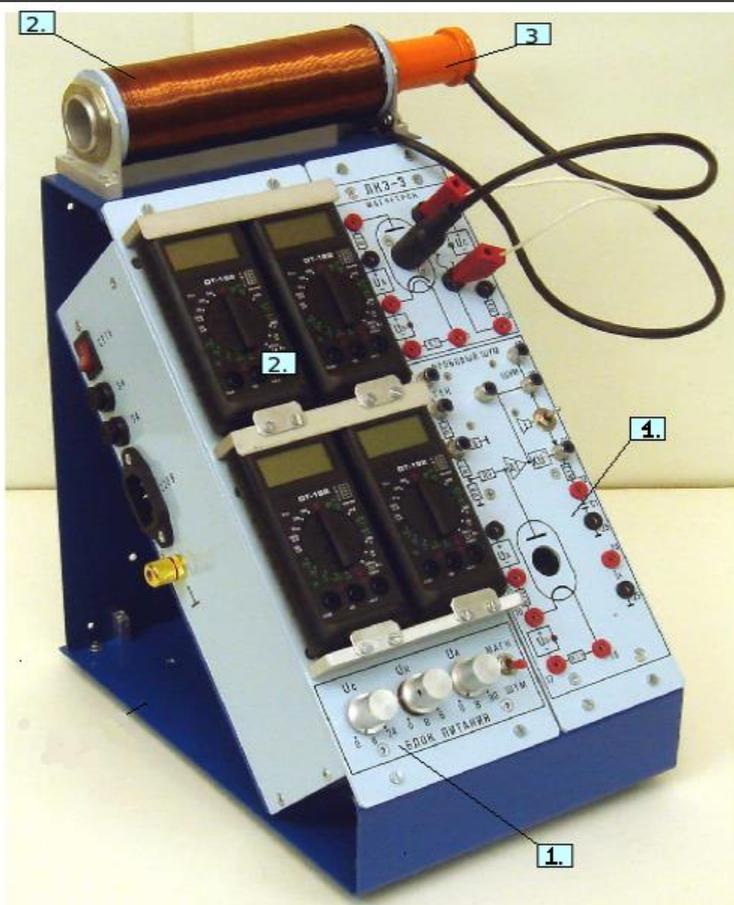


Рис. 7а.3. Внешний вид установки

характеристик лампы-магнетрона 3Ц18П. Электрическая схема блока изображена на его панели. Сама лампа помещена внутрь соленоида. Соленоид 2 и способ подключения лампы 3 к блоку показаны на рис.7а.3. Лампа имеет цилиндрический анод радиусом  $R_A = 5,0$  мм и коаксиальный с ним катод косвенного подогрева радиуса  $R_K = 0,4$  мм. Внутри катода расположена нить накала. Из приведённых размеров видно, что  $R_K \ll R_A$ , следовательно, справедлива формула (7а.1). Соленоид 2 через кабель с двумя штекерами подключается к гнездам 6 и 7 на панели блока «Магнетрон». Максимальная индукция в соленоиде

$$B \approx 38 \text{ мТл.}$$

Соответствие между током  $I_C$  в обмотке соленоида и индукцией магнитного поля внутри анода лампы, помещённой внутрь соленоида, устанавливается с помощью градуировочного графика, находящегося на рабочем месте.

Когда тумблер «Магнетрон–шум» находится в положении «МАГН», на панели блока «Магнетрон» загораются светодиодные индикаторы.

Ток анода лампы определяют по падению напряжения на сопротивлении  $R_1=10,0$  Ом.

Ток накала лампы определяют по падению напряжения на сопротивлении  $R_2=10,0$  Ом.

Ток соленоида определяют по падению напряжения на сопротивлении  $R_3=1,00$  Ом.

Анодное напряжение измеряют между гнездами 2 и 3.

Напряжение накала измеряют между гнездами 3 и 5.

**Блок «ДРОБОВЫЙ ШУМ» 4** предназначен для исследования шумовых характеристик вакуумного диода типа 1Ц11П, расположенного под панелью модуля. Лампа видна через окно в панели. Электрическая схема блока изображена на его панели. Когда тумблер «магнетрон–шум» находится в положении «ШУМ», источники питания  $U_A$  и  $U_H$  подключены к этому блоку, а наличие напряжения показывает светодиодный индикатор на панели блока.

Ток накала лампы определяют по падению напряжения на сопротивлении  $R_{11}=10,0$  Ом.

Ток анода лампы определяют по падению напряжения на сопротивлении  $R_{10}=10,0$  кОм.

Анодное напряжение измеряют между гнездами 14 и 15.

Напряжение накала измеряют между гнездами 16 и 18.

Все мультиметры DT-182 работают в режиме вольтметров.

Анод лампы подключен к входу усилителя А1 (рис.7а.4).  
Усилитель преобразует **переменный** входной (шумовой) ток  $I_{ш}$  в выходное напряжение  $U_{20}$  на гнезде 20 с коэффициентом пропорциональности  $Q$ :

$$U_{20} = QI_{ш},$$

где  $Q = 15 \text{ кВ/мкА} = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ В/А}$ .

С выхода усилителя сигнал поступает на квадратичный детектор, обозначенный на схеме как «КУ<sup>2</sup>» (см. рис.7а.4). Для построения квадратичного детектора применено электронное устройство – аналоговый перемножитель (микросхема 525ПС3). Напряжение на выходе этого перемножителя пропорционально произведению напряжений на двух его входах. Поэтому напряжение  $U_{21}$  на выходе преобразователя пропорционально квадрату напряжения  $U_{20}$  на входе:

$$U_{21} = K_0(U_{20})^2.$$

Выходной сигнал квадратичного преобразователя фильтруется RC-цепочкой  $R_{12}C_1$ , в результате на гнезде 22 (относительно гнезда 23) формируется напряжение, равное среднему значению выходного напряжения преобразователя, а значит, среднему квадрату тока:

$$U_{22} = \langle U_{21} \rangle = K_0 Q^2 \langle I_{ш}^2 \rangle.$$

При выполнении работы шумовое напряжение измеряется на ёмкости RC-цепочки (гнезда 22–23), а коэффициент  $K_0 Q^2$  учтён в величине коэффициента  $K$  формулы (7а.5).

## ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

На рис. 7а.4 крупным планом изображена передняя панель комплекса.

Соблюдайте полярность подключения мультиметров. На блоках схемы, нарисованных между клеммами, указана правильная полярность.

### Задание 1. Определение удельного заряда методом магнетрона

1. Поместить лампу – магнетрон внутрь соленоида.
2. Подсоединить соленоид и лампу к панели блока «Магнетрон» (см. рис.7а.3).
3. Тумблер «Магнетрон–шум» поставить в положение – «МАГН», должны загореться светодиоды на панели.
4. Подключить правый верхний вольтметр к гнездам 2–3 на панели «Магнетрон», этот вольтметр будет измерять анодное напряжение.
5. Установить анодное напряжение 80 В.
6. Подсоединить левый верхний вольтметр к гнездам 1–2, тогда он будет измерять анодный ток  $I_a = 0,1 U$ , где  $U$  – падение напряжения на сопротивлении  $R_1=10,0$  Ом.

Лампа 3Ц18П.  $U_a=60$  В.  $I_a = \underline{\hspace{2cm}}$  мА при токе накала  
 $I_H = \underline{\hspace{2cm}}$  мА.

$I_C, A$	0									
$B_A, мТл$	0									
$I_A, mA$										

**Обратите внимание:** в верхней части штекеров соединительных проводников сделаны два гнезда, позволяющие подсоединить два провода к одному гнезду.

7. Подключить левый нижний вольтметр к гнездам 4–5 для измерения тока накала  $I_H = 0,1 U$ , где  $U$  – напряжение на сопротивлении  $R_2=10,0$  Ом. Подобрать ручкой  $U_H$  на блоке питания напряжение накала так, чтобы анодный ток был равен 7–8 мА. Записать установленные токи и напряжения.

8. Не меняя напряжения накала, снять пять сбросовых характеристик для  $U_a = 40, 45, 50, 55$  и  $60$  В, занося измерения в таблицы вида:

## Задание 2. Измерение заряда электрона с помощью дробового шума

### 1. Наблюдение дробового шума

1. На панели блока питания все ручки повернуть против часовой стрелки до упора.

2. Тумблер «Магнетрон–шум» поставить в положение «ШУМ».

3. Подключить правый верхний вольтметр к гнездам 14–15 на панели «дробовой шум», этот вольтметр будет измерять анодное напряжение лампы.

4. Подсоединить левый верхний вольтметр к гнездам 15–16, тогда он будет измерять анодный ток  $I_a = 0,1 U$ , где  $U$  – падение напряжения на сопротивлении  $R_{10}=10,0$  Ом.

5. Подключить левый нижний вольтметр к гнездам 17–18 для измерения тока накала  $I_H = 0,1 U$ , где  $U$  – напряжение на сопротивлении  $R_{11}=10,0$  Ом.

6. Подключить правый нижний вольтметр к гнездам 22–23 для измерения среднего значения выходного напряжения квадратичного детектора  $U_{22}$ .

7. Наблюдение шума на осциллографе.

Соедините Y-вход осциллографа с гнездом 20 (выход усилителя А1) на панели прибора. Наблюдайте на экране шумовую дорожку. Оцените размах шума  $U_{20}$ . Затем соедините Y-вход осциллографа с гнездом 21 (выход квадратичного детектора). Сравните шумовую дорожку с предыдущей.

8. Наблюдение шума на слух.

Подключите динамик к выходу усилителя, включите тумблер, обозначенный на панели изображением динамика, – вы услышите слабый шумовой сигнал. Теперь включите **анодное** питание лампы (регулятор  $U_a$  вращаем по часовой стрелке) и при нулевом напряжении накала установите максимальное анодное напряжение (около 90 В). Шум почти не изменится.

Затем медленно увеличивайте ток накала регулятором  $U_H$ . Начиная со значения тока 100–120 мА, появится и будет увеличиваться анодный ток. Вместе с ним будет расти и шумовой сигнал – это и есть дробовый шум.

При токе анода более 20 мкА усилитель перегружается, и шум резко падает.

**ВНИМАНИЕ!** Ток анода зависит от механических колебаний элементов лампы (микрофонный эффект, обнаруживаемый при постукивании по корпусу прибора). Держите динамик дальше от лампы, чтобы не возникла генерация (проверьте).

Насладившись шумом лавины электронов, отключим динамик (он влияет на выходной сигнал усилителя) и приступим к измерениям.

*II. Измерение дробового шума. Определение заряда электрона.*

1. При нулевом напряжении накала и максимальном анодном напряжении измерьте «начальное» напряжение на гнездах 22–23 (на выходе фильтра):

$$U_{22}(0) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ.}$$

Это напряжение складывается с исследуемым дробовым шумом, и его нужно вычитать из показаний вольтметра при измерении дробового шума.

2. Снимите зависимость напряжения  $U_{22}$  на выходе фильтра от анодного тока. Требуемое значение анодного тока устанавливайте аккуратным подбором тока накала (для плавной регулировки тока накала потенциометр « $U_H$ » блока питания имеет двойную регулировку). Ток анода  $I_a$  измеряется по напряжению на сопротивлении  $R_{10} = 10 \text{ кОм}$  (гнезда 15–16, левый верхний вольтметр).

Занесите результаты в таблицу. Все измерительные приборы – вольтметры. Чтобы не запутаться при пересчёте напряжений в токи, рекомендуется следующая запись.

В первой строке таблицы даны рекомендуемые значения анодного напряжения, в четвертой строке разместите значения

$U_a$ , реком., мВ	0	5	10	15	20	25	30	50	70	100	150	190
Фактич. $U_a$ , мВ												
$I_a$ , мкА												
$U_H$ , мВ												
$I_H$ , мА												
$U_{22}$ , мВ												

напряжения накала, при которых удаётся получить анодные напряжения, близкие к рекомендуемым. В следующей пятой строке, запишите соответствующие токи накала, а полученные

реальные анодные напряжения и токи запишите, соответственно, во вторую и третью строки таблицы.

Постепенно и осторожно увеличивая  $U_H$ , подбирайте  $U_a$ , близкие к заданным.

3. С помощью формулы (7а.5), учитывая константу установки  $K = 4,0 \cdot 10^{23} \text{ Ом}^2 \cdot \text{Гц/В}$ , вычислите заряд электрона:

$$e = (\Delta U_{22} / \Delta I_a) / K = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Кл.}$$

Оцените приборные погрешности измерения заряда и удельного заряда электрона.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По таблице задания 1 постройте сбросовые характеристики  $I_a(I_C)$ . Определите по каждой характеристике значения критического тока соленоида и, используя градуировочный график, найдите критические значения индукции  $B_{кр}$ . По формуле (7а.1) определите удельный заряд электрона для каждого  $B_{кр}$ . В заключение выпишите медиану удельного заряда, укажите квартильный интервал. Сравните полученный результат с табличным значением удельного заряда.

2. По таблице задания 2 постройте график зависимости шумового напряжения  $U_{22}$  от анодного тока  $I_a$ . На линейном участке графика методом парных точек не менее, чем для пяти пар, рассчитайте угловые коэффициенты  $\Delta U_{22} / \Delta I_a$  в В/А.

С помощью формулы (7а.5), учитывая константу установки  $K = 4,0 \cdot 10^{23} \text{ Ом}^2 \cdot \text{Гц/В}$ , вычислите заряд электрона для каждого углового коэффициента. В заключение выпишите медиану значений заряда, укажите квартильный интервал. Сравните результат с табличным.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое магнетрон?
2. Как двигаются электроны в магнетроне?
3. Объясните характер сбросовой характеристики магнетрона.
4. Выведите формулу для радиуса кривизны траектории электрона, движущегося в однородном магнитном поле.

5. Почему в работе скорость электрона определяется по формуле  $mv^2/2 = eU$ ?

6. Зачем в работе предлагается снимать не менее пяти характеристик?

7. Объясните, как по сбросовой характеристике найти критическое значение тока соленоида.

8. Что такое дробовой шум?

9. Как связана постоянная времени измерительного прибора с шириной полосы частот, воспринимаемых прибором?

10. Какие еще методы определения заряда и удельного заряда электрона вам известны?

## ЛИТЕРАТУРА

### *Основная*

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. М.: Кнорус. 2009.

2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3. Электричество. М.: Физматлит. 2004.

3. Романов А.И., Семенова Т.А., Воронова Н.С. Распределение случайных величин и основы статистических методов обработки экспериментальных данных. Гл. 4. Элементы непараметрической статистики / Эл. книга. М.: НИЯУ МИФИ. 2016.

### *Дополнительная*

1. Электричество и магнетизм. Лабораторный практикум курса общей физики. М.: МИФИ. 2008. Работа 3.7б. Опыт Милликена. Работа 3.7в. Определение удельного заряда электрона с помощью катушек Гельмгольца.

2. Лабораторный практикум "Электрические и магнитные свойства вещества. Движение частиц в электромагнитном поле". М.: МИФИ. 2009. Работа 7. Измерение удельного заряда электрона.

3. Левич В.Г. Введение в статистическую физику. М.: Госиздат. 1954. С. 313–314.

**Работа 7в**  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА С**  
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАТУШЕК ГЕЛЬМГОЛЬЦА**

---

**Цель:** изучение движения заряженной частицы в электрическом и магнитном полях, определение удельного заряда электрона.

**Оборудование:** лабораторный стенд; блок питания; компьютер; датчик магнитного поля; веб-камера.

**ВВЕДЕНИЕ**

На электрон, движущийся со скоростью  $\vec{v}$  в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ , действует магнитная составляющая силы Лоренца, равная:

$$\vec{F} = -e_0 \left[ \vec{v}, \vec{B} \right], \quad (7в.1)$$

где  $e_0 = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – элементарный заряд. Если скорость  $\vec{v}$  перпендикулярна вектору магнитной индукции  $\vec{B}$ , то электрон будет двигаться по окружности радиуса  $R$ . Тогда, проецируя уравнение второго закона Ньютона на направление к центру окружности, получаем

$$e_0 v B = \frac{m v^2}{R}, \quad (7в.2)$$

где  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг – масса электрона.

Из уравнения (7в.2) находим:

$$v = \frac{e_0 B R}{m}. \quad (7в.3)$$

Для скорости электрона  $U$ , прошедшего разность потенциалов  $U$  и имевшего начальную скорость  $v_0$ , из закона сохранения энергии имеем

$$\frac{m v^2}{2} - \frac{m v_0^2}{2} = e_0 U. \quad (7в.4)$$

Начальная скорость электронов, эмитированных катодом,  $v_0 \propto \sqrt{kT/m}$ , где  $T$  – температура катода. При разности

потенциала  $U \propto 10^2 \div 10^4$  В, имеющей место в установке и характерных температурах катода  $T \propto 10^3$  К :

$$\frac{mv_0^2}{2} \propto kT \ll e_0 U. \quad (7в.5)$$

Тогда закон сохранения энергии (7в4) принимает вид

$$\frac{mv^2}{2} = e_0 U. \quad (7в.6)$$

Из уравнений (7в.3) и (7в.6) находим

$$\frac{1}{R^2} = \frac{e_0 B^2}{m 2U}. \quad (7в.7)$$

Согласно формуле (7в.7) зависимость обратного квадрата радиуса окружности, по которой движется электрон, от параметра  $B^2 / 2U$  является прямой, тангенс угла наклона которой – величина удельного заряда электрона.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Лабораторный стенд (рис.7в.1) представляет собой заключённую в непрозрачный кожух 1 систему катушек Гельмгольца 2, внутри которой установлена электронная лампа 3 с электронной пушкой. В установку входит блок питания электронной пушки и катушек Гельмгольца.

Катод 1 электронной пушки (см. рис.7в.2а и 7в.2б), подключённый к источнику питания, при пропускании по нему электрического тока, накаливается и, в результате термоэлектронной эмиссии, испускает электроны со средней кинетической энергией  $\propto kT$ . Между катодом и анодом приложена разность потенциалов  $U$ , ускоряющая электроны.

Анод 2 электронной пушки (рис.7в.2) - металлический конус с узким отверстием. Это отверстие выделяет тонкий пучок «монохроматических», т.е., обладающих практически одинаковыми по величине и направлению скоростями, электронов. Газ низкого давления, находящийся в стеклянной колбе лампы (рис. 7в. 3), под действием пучка электронов ионизируется и испускает заметное зеленоватое свечение в месте локализации пучка электронов.

Так устроенная электронная пушка (называемая ещё электронным прожектором) вместе с электронной лампой помещается в центр системы катушек Гельмгольца, создающих однородное магнитное поле, которое ориентировано перпендикулярно электронному пучку. В результате, электроны, двигаясь по окружности, ионизируют газ в лампе, что вызывает её свечение в виде концентрических колец.

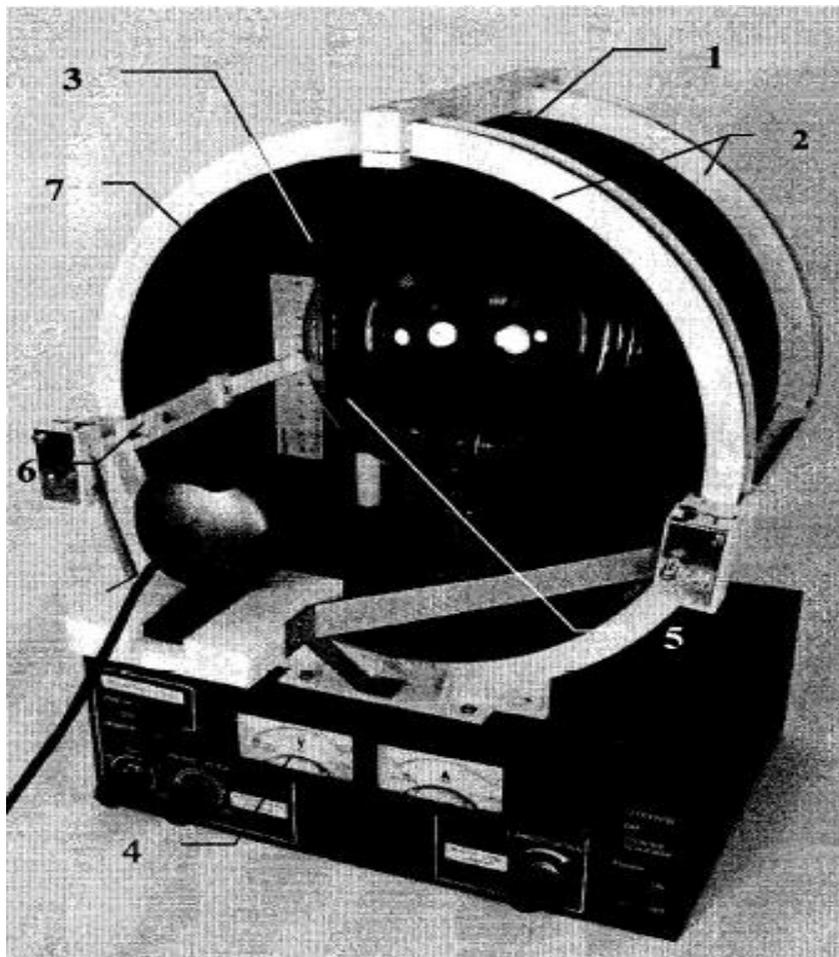


Рис. 7в. 1

Измеряя радиус кольца при различных значениях  $B$  и  $U$ , можно вычислить удельный заряд электрона.

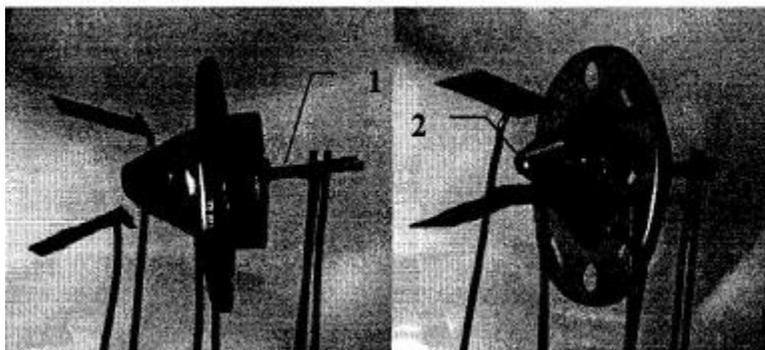


Рис. 7в. 2а

Рис. 7в. 2б

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включите прибор (переключатель «Power») и дайте ему прогреться в течение 5 минут. Убедитесь, что переключатель направления тока в катушках установлен в нейтральное положение.

2. Включите компьютер и запустите программу «Практикум по физике». На панели устройств выберите соответствующий сценарий про ведения эксперимента (Alt+C).

3. Установите нулевое значение тока в катушках Гельмгольца вращением соответствующей рукоятки против часовой стрелки до упора. В верхней части окна регистрации индукции магнитного поля нажмите кнопку  $>0<$  для установки нуля в калибровке датчика.

4. Направьте ток в катушках по часовой стрелке (переключатель направления тока-вверх) и установите максимальный ток в катушках, повернув регулятор тока на передней панели корпуса установки до упора

5. Приложите ускоряющее напряжение на электронную пушку, повернув соответствующий регулятор на передней панели корпуса установки.

6. Запустите измерения, выбрав на панели инструментов кнопку «Запустить измерения» (зелёная кнопка). На экране появится окно «Обработка».

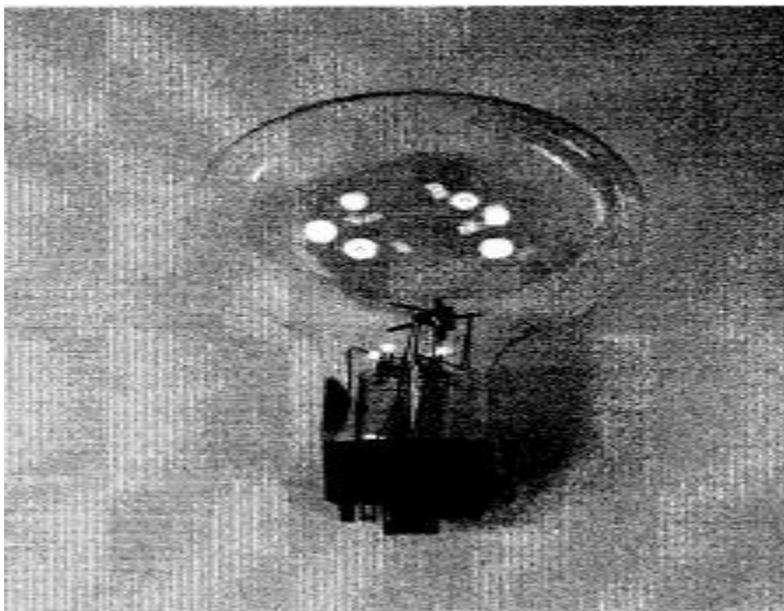


Рис. 7в. 3

7. Изменяя ускоряющее напряжение (от 250 до 100 В), сохраняйте фотографии траектории движения электронов, значение ускоряющего напряжения и индукции магнитного поля, нажимая на кнопку с символом «дискета» после каждого изменения ускоряющего напряжения. Все данные будут записываться в таблицу 1.

8. Повторите измерения ускоряющего напряжения и радиуса траектории движения электронов для различных значений магнитной индукции, уменьшая ток в катушках.

Таблица 7в.1

п/п	Ускоряющее напряжение $U$ , В	Магнитная индукция $B$ , мТл.	Радиус окружности $R$ , см	фото
1				
2				

9. По окончании эксперимента остановите измерения, нажав на кнопку «стоп».

10. Занесите результаты измерений в таблицу 7в.1

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Обработать фотографии, получив значения радиуса траектории движения электронов при различных значениях ускоряющего напряжения и магнитного поля.

Для этого:

1. Войти в режим работы с фотографией, кликнув три раза по необходимому ярлыку в столбце «фото» таблицы результатов.

2. Задать величину масштабного отрезка, сопоставив его со шкалой на изображении так, чтобы он совпадал с расстоянием 10 мм.

3. Выбрать на панели инструментов окна регистрации данных «Установку длины масштабного отрезка» (кнопка с изображением линейки) и ввести длину масштабного отрезка (1,0).

4. Аппроксимировать траекторию движения электронов окружностью, выбрав на панели инструментов соответствующую кнопку. Сопоставить окружность с траекторией электронов, при необходимости растягивая, удерживая курсор на окружности.

5. Подбрав наиболее подходящую окружность, перейти в таблицу результатов. Нажать ОК в верхнем правом углу окна «Камера».

6. Повторить п. 2 и пп. 5 - 6 для всех файлов в столбце «фото» таблицы результатов.

7. Построить график зависимости  $R^{-2} = f(B^2 / 2U)$ , используя таблицу данных 7в.1.

8. Методом парных точек рассчитать значение удельного заряда для всех возможных пар точек графика.

9. Найти медиану распределения полученных значений удельного заряда и указать величину выбранного вами квантильного интервала.

## ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

1. Перед выполнением работы получите инструктаж у лаборанта.

2. Соблюдайте общие правила техники безопасности работы в лаборатории "Физика".

3. Осторожно обращайтесь со стеклянной лампой.

4. Установка включается в сеть только лаборантом или преподавателем.

5. При неисправности установки её следует немедленно выключить и сообщить об этом лаборанту или преподавателю. Строго запрещается производить исправления неполадок установки самостоятельно.

6. Обязательно выполнение общих правил по технике безопасности при работе в лаборатории "Электричество".

## **ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ**

В заключении следует провести анализ построенного графика. Сравнить полученное значение удельного заряда с табличным. Указать возможные причины несоответствия.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Из каких элементов состоит экспериментальная установка?
2. Как устроена электронная пушка?
3. Как будут двигаться электроны в установке в отсутствие магнитного поля.
4. В результате, какого физического явления оказывается возможным наблюдать движение электронного пучка в проводимом эксперименте?
5. Как изменится направление движения электронного пучка, при изменении направления тока в катушках Гельмгольца?
6. Почему при обработке результатов измерений не учитывается начальная скорость электронов в пучке?
7. Как направлена сила Лоренца по отношению к скорости электронов?
8. Учтена ли работа магнитной составляющей силы Лоренца при вычислении удельного заряда?
9. Как определить радиус движения электрона в однородном магнитном поле?
10. Измерения, каких величин вносят наибольшую погрешность в полученный результат?

## ЛИТЕРАТУРА

1. И.Е. Иродов. Электромагнетизм. Основные законы. – Москва - Санкт-Петербург: Физматлит, Невский диалект, Лаборатория базовых знаний. 2000.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2.- М.: Астрель, 2004.
3. Светозаров В.В. Элементарная обработка результатов измерений. - М.: МИФИ, 2005.
4. Светозаров В.В. Основы статистической обработки результатов измерений. - М.: МИФИ, 2005.

## Работа 8а

### ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА

---

**Цель:** изучение явления гистерезиса, определение основных магнитных характеристик магнетика.

**Оборудование:** модуль М03 «ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ»; образцы магнитные: стержень ферритовый М400НМ; спица стальная; полоса из пермаллоя; генератор сигналов функциональный ГЗЧМ (или ГСФ-2); двухканальный электронно-лучевой осциллограф типа «MATRIX MOS 620».

#### ВВЕДЕНИЕ

Всякое вещество является *магнетиком*, т.е. способно под действием магнитного поля приобретать магнитный момент (намагничиваться). Степень намагничения вещества характеризуют магнитным моментом единицы объёма. Эту величину называют *намагниченностью* и обозначают  $\vec{J}$ . Намагниченность  $\vec{J}$  принято связывать с *напряжённостью* магнитного поля  $\vec{H}$ . Полагают, что в каждой точке изотропного магнетика

$$\vec{J} = \chi \vec{H}, \quad (8a.1)$$

где  $\chi$  – *магнитная восприимчивость*, безразмерная величина, характерная для каждого магнетика. Однако силовой характеристикой магнитного поля, определяющей его воздействие на движущиеся заряды, контуры с током и пр., является магнитная индукция  $\vec{B}$ . Соотношение между  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  для изотропного магнетика записывают в виде

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (8a.2)$$

где  $\mu = 1 + \chi$  – *магнитная проницаемость* среды,  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м – магнитная постоянная. Если в магнетике наблюдается нелинейная зависимость  $B$  от  $H$ , то полагают, что  $\chi = f(H)$

По своим магнитным свойствам все вещества можно подразделить на пять групп: *парамагнетики*, *диамагнетики*,

*ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики.* Парамагнетики и диамагнетики относятся к **слабмагнитным** веществам, а остальные к **сильномагнитным**.

**Диамагнетики** — вещества, у которых магнитная восприимчивость  $\chi < 0$  и постоянна. В таких веществах  $\vec{J} \uparrow \downarrow \vec{H}$ . К диамагнетикам относят инертные газы, водород, азот, углекислоту, воду, серебро, висмут и пр., большинство полупроводников (кремний, германий).

**Парамагнетики** — вещества, у которых  $\chi > 0$ . В таких веществах  $\vec{J} \uparrow \uparrow \vec{H}$ . К числу парамагнетиков относят кислород, алюминий, платину, хлористое железо ( $\text{FeCl}_3$ ) и т.д.

**Ферромагнетиками** называются твёрдые тела, которые могут обладать *спонтанной намагниченностью*, т.е. намагничены уже в отсутствие магнитного поля. К ферромагнетикам относят железо, кобальт, никель, редкоземельные элементы, их многочисленные сплавы и металлические соединения. Эти вещества обладают большой положительной магнитной восприимчивостью (до  $10^6$ ), которая сильно зависит от напряжённости магнитного поля и температуры. Для каждого ферромагнетика имеется определённая температура  $T_C$ , при которой вещество утрачивает ферромагнитные свойства. Эта температура называется **температурой** или **точкой Кюри**  $T_C$ . При температурах  $T > T_C$  ферромагнетик превращается в парамагнетик. При охлаждении ферромагнитные свойства восстанавливаются. Характерной особенностью ферромагнетиков является сложная нелинейная зависимость  $J(H)$  или  $B(H)$ . Кроме того, для них зависимость  $B$  от  $H$  (или  $J$  от  $H$ ) не однозначна, а определяется предшествующей историей намагничивания ферромагнитного образца. Такое явление называется **магнитным гистерезисом**.

Взаимодействие соседних атомов приводит к тому, что в ферромагнетике возникают области самопроизвольного намагничивания — *домены*, где магнитные моменты атомов устанавливаются параллельно друг другу.

**Антиферромагнетики** — вещества, в которых ниже некоторой температуры, называемой **антиферромагнитной точкой Кюри**

или *точкой Нееля*, спонтанно возникает антипараллельная ориентация электронных магнитных моментов соседних атомов. В простейшем случае (в отсутствие намагничивающего поля) эти моменты как бы образуют две пространственные подрешётки с противоположно направленными моментами, вставленные одна в другую. Если величина намагничивания обеих подрешёток одинакова, то кристалл в целом не обладает магнитным моментом. Антиферромагнетизм обнаружен у хрома, марганца и ряда редкоземельных элементов (Ce, Nd, Sm, Tm и др.). При низких температурах антиферромагнетики имеют ничтожно малую магнитную восприимчивость ( $\chi = 10^{-3} \div 10^{-5}$ ), которая увеличивается с повышением температуры. При достижении точки Нееля магнитное упорядочивание моментов разрушается, и антиферромагнетик превращается в парамагнетик.

**Ферримагнетики** представляют собой магнитные материалы, у которых спонтанная намагниченность доменов обусловлена *нескомпенсированным антиферромагнетизмом*, когда величина намагничивания обеих подрешёток неодинакова. Если при этом ферримагнетики обладают ещё и полупроводниковыми свойствами, то они называются *ферритами*. Их удельное сопротивление в  $10^3 \div 10^6$  раз больше удельного сопротивления металлических материалов, а потери на вихревые токи, соответственно, существенно меньше. К ферримагнетикам относят некоторые упорядоченные металлические и различные оксидные соединения, наибольший интерес среди которых представляют ферриты  $MnO \cdot Fe_2O_3$ ,  $BaO \cdot 6Fe_2O_3$ ,  $(NiO \cdot ZnO)Fe_2O_3$ ,  $Li_2O \cdot Fe_2O_3$  и др.

По своим магнитным свойствам они аналогичны ферромагнетикам. Это означает, что при намагничивании ферримагнетика в переменном магнитном поле также наблюдается **явление гистерезиса**.

Нелинейная и неоднозначная зависимость магнитной индукции ***B*** в образце от напряжённости ***H*** магнитного поля в ферро- и ферримагнетиках определяется доменной структурой этих веществ. Обычно ферромагнетик состоит из *доменов* - отдельных областей, каждая из которых содержит атомы с параллельными магнитными моментами и обладает некоторой спонтанной намагниченностью. Намагниченности различных доменов имеют разную ориентацию, так что намагниченность всего образца

в отсутствие поля равна нулю. Размеры и свойства доменов зависят от предыстории образца (например, от термической обработки) и его размеров. При включении внешнего магнитного поля домены, ориентированные по полю, растут за счёт доменов, ориентированных против поля, т.е. происходит смещение границ доменов. Такое смещение в слабых полях носит *обратимый характер*. В более сильных полях происходит переориентация магнитных моментов в пределах всего домена. Перемагничивание приобретает *необратимый характер* – появляются гистерезис и остаточное намагничивание.

График неоднозначной зависимости  $B(H)$  называется *петлёй гистерезиса* (рис.8а.1).

Нижняя ветвь петли соответствует возрастанию  $H$ , верхняя – убыванию. При достаточно больших  $H$  ( $H > H_s$ ) ферромагнетик намагничивается до значения  $J_s$ , называемого *намагниченностью насыщения*, а индукция  $B$  принимает значение  $B_s$ , называемое *индукцией насыщения*.

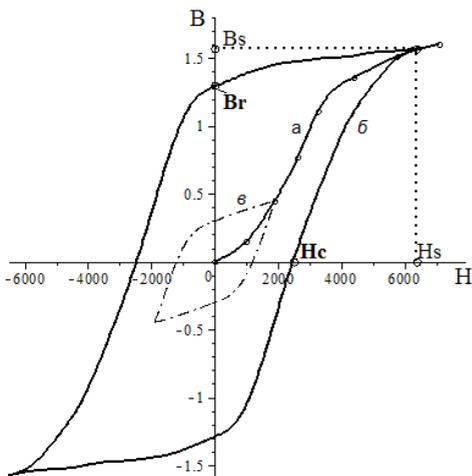


Рис.8а.1. Петля гистерезиса: а) - основная кривая намагничивания; б) - предельная петля гистерезиса; в) - частичная петля гистерезиса

При колебаниях  $H$  с амплитудой более  $H_s$  наблюдается *предельная петля гистерезиса* (кривая б), при меньшей амплитуде – *частичная петля* (кривая в на рис.8а.1)

По петле гистерезиса определяют характеристики ферромагнетика: *остаточную индукцию  $B_r$*  (значение  $B$  при  $H=0$ ) и *коэрцитивную напряжённость  $H_c$*

(напряжённость размагничивающего поля, при которой  $B$  становится равной нулю). Вещества, у которых  $H_c < 800$  А/м, условно относят к *магнитно-мягким материалам*, применяемым в основном в качестве магнитопроводов (сердечников) дросселей, трансформаторов,

электромагнитов и т.д.. К *магнитно-твёрдым материалам* относят вещества, у которых  $H_c > 4$  кА/м. Их используют главным образом для изготовления постоянных магнитов.

Площадь петли гистерезиса пропорциональна энергии, затраченной на один цикл перемагничивания. Эта энергия превращается во внутреннюю энергию ферромагнетика, вследствие чего он нагревается. Умножив площадь петли  $\sigma$  (в единицах  $B \cdot H$ ) на частоту  $\nu$  циклов перемагничивания, получим удельную мощность  $P_{уд}$  потерь при перемагничивании, т.е. отношение выделяющейся в ферромагнетике тепловой мощности  $P$  к объёму образца

$$P_{уд} = P/V = \sigma_{BH} \cdot \nu \quad (8a.3)$$

Если вначале ферромагнетик был размагничен ( $J = 0$ ,  $B = 0$ ,  $H = 0$ ), то при возрастании  $H$  получим *основную кривую намагничивания* (кривая “а” на рис.8a.1). В данной работе возможность размагничивания образца не предусмотрена. Вместо этого наблюдается набор частичных петель гистерезиса, соответствующих различным амплитудам переменного магнитного поля. При увеличении амплитуды поля вершина частичной петли гистерезиса перемещается по кривой, приблизительно соответствующей основной кривой намагничивания.

Вследствие гистерезиса для ферромагнетиков не существует однозначной и определённой магнитной проницаемости  $\mu$ , а в тех случаях, когда её можно ввести, она оказывается зависящей от величины и направления поля, процесса намагничивания, характера обработки ферромагнетика. Будем определять  $\mu$  по основной кривой намагничивания по формуле

$$B = \mu \mu_0 H, \quad \mu = B / (\mu_0 H), \quad (8a.4)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная,  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема установки, собираемая на модуле М03, приведена на рис.8а.2. Магнитное поле создаётся соленоидом  $L$  (описание на с.21–22), питаемым переменным током от источника питания ГЗЧМ (генератор звуковых частот — функциональный). Последовательно с соленоидом включён резистор  $R1$ , на котором по напряжению  $U_H$  определяют ток в обмотке соленоида (соответственно, напряжённость  $H$  магнитного поля в соленоиде). Электролитический конденсатор  $C10=100$  мкФ включён в цепь соленоида для того, чтобы отсечь постоянную составляющую сигнала, вырабатываемого источником. В соленоид помещён индукционный датчик Д1, используемый для измерения магнитного поля. Катушка датчика подключена к  $RC$ -ячейке, осуществляющей интегрирование возникающей в катушке ЭДС электромагнитной индукции. (Роль  $RC$ -ячейки объясняется в приложении А)

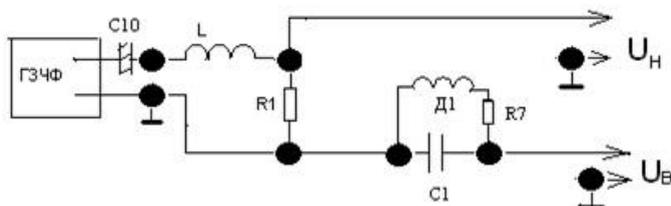


Рис.8а.2 Схема установки ( $R1=1$  Ом,  $R7=30$  кОм,  $C1=1$  мкФ,  $C10=100$  мкФ)

Напряжения  $U_H$  и  $U_B$  измеряют с помощью двухканального электронно-лучевого осциллографа типа «MATRIX MOS 620», подавая их, соответственно, на каналы  $X$  и  $Y$ . (Назначение органов управления и порядок работы с осциллографом подробно изложены в описании лабораторной работы 1а «Измерение характеристик электрических сигналов с помощью осциллографа»).

Прочитав значение  $k$  (в вольтах на деление) на переключателе «VOLTS/DIV» осциллографа, вычисляют напряжение по формуле

$$U=k \cdot h,$$

где  $h$  — размер изображения измеряемого сигнала в **крупных делениях** шкалы осциллографа. Значения  $h$  отсчитываются с точностью до 0,1 деления шкалы.

Для исследования зависимости  $B(H)$  образец помещается во внешнее магнитное поле  $H_0$ , создаваемое соленоидом  $L$ . Если образец представляет собой тонкий достаточно длинный стержень, параллельный внешнему полю  $\vec{H}_0$ , то из граничных условий для вектора  $\vec{H}$  следует, что поле внутри образца  $\vec{H} \approx \vec{H}_0$ . Зависимость  $B(H_0)$  для достаточно длинного образца даст зависимость  $B(H)$ , определяемую лишь свойствами материала образца. Критерием достаточно большой длины  $l$ , при которой  $H \approx H_0$ , является условие

$$\mu \ll (l/d)^2 \text{ или } \mu \ll l^2/S_0, \quad (8a.5)$$

где  $d$  — диаметр образца,  $S_0$  — площадь сечения образца.

При протекании по обмотке соленоида тока  $I$ , внутри соленоида создаётся магнитное поле напряжённостью

$$H(t) = \frac{N_c}{l_c} \cdot I(t),$$

где  $l_c$  — длина соленоида,  $N_c$  — число витков обмотки соленоида. Напряжение  $U_H$  на сопротивлении  $R_1$  пропорционально току  $I$ . Следовательно, по напряжению  $U_H$  можно определить значение напряжённости согласно формуле

$$H(t) = m_H \cdot U_H.$$

Если магнитное поле меняется во времени, то на зажимах катушки датчика **Д1** создаётся напряжение

$$U = d\Psi/dt = d\Phi/dt \cdot N,$$

где  $\Phi$  — поток вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  через площадь  $S$  витка датчика,  $N$  — число витков датчика. Площадь сечения образца  $S_0$  меньше средней площади витков катушки  $S$ , и часть магнитного потока, проходящего через катушку, не «захватывается» сечением образца. Строго говоря, магнитный поток  $\Phi$  равен сумме двух потоков  $\Phi = \Phi_B + \Phi_M$ , где  $\Phi_M = B \cdot S_0 = \mu \cdot \mu_0 \cdot H \cdot S_0$  — поток через сечение

образца (магнетика), а  $\Phi_B = B_B \cdot (S - S_0) = \mu_0 \cdot H \cdot (S - S_0)$  – поток через площадь витка, не занятую магнетиком.

У ферромагнетиков и ферритов магнитная проницаемость  $\mu \gg 1$ , поэтому поток  $\Phi_B$  можно не принимать во внимание. Тогда

$$U = N \cdot S_0 \cdot \frac{dB}{dt}$$

С датчика Д1 напряжение подаётся на вход RC-ячейки, осуществляющей интегрирование сигнала по времени и дающей на выходе напряжение

$$U_B = N \cdot S_0 \cdot B / \tau, \quad (8a.6)$$

где  $\tau = R7 \cdot C1$  – *постоянная RC-ячейки*.

Таким образом, магнитную индукцию внутри образца можно определить по напряжению на выходе RC-ячейки

$$B = m_B \cdot U_B, \quad (8a.7)$$

где  $m_B = \tau / (N \cdot S_0)$ .

Для наблюдения петли гистерезиса, т.е. зависимости  $B(H)$ , следует на вход X осциллографа подать напряжение  $U_H$ , а на вход Y – напряжение  $U_B$ .

## ПОДГОТОВКА УСТАНОВКИ К РАБОТЕ

1. Включите на прогрев осциллограф. Переключатель «Time/Div» на осциллографе установите в положение «X-Y». Регуляторы «VARIABLE» установите в положение «CAL». В этом положении коэффициент отклонения имеет калибровочное значение, установленное переключателем «VOLTS/DIV». Соберите схему согласно рис.8а.2, подав на вход X напряжение  $U_H$ , а на вход Y – напряжение  $U_B$ . Включите генератор напряжения ГЗЧМ, на выходе ГЗЧМ установите пилообразное или синусоидальное напряжение частотой  $\nu \approx 150 \div 200$  Гц. При изменении амплитуды тока на экране должна наблюдаться наклонная прямая линия.

2. Запишите параметры установки

### соленоид:

длина  $l = \underline{\hspace{2cm}}$  см,

число витков  $N_s = \underline{\hspace{2cm}}$  ;

сопротивление  $R_l = \underline{\hspace{2cm}}$  Ом ;

число витков датчика  $N = \underline{\hspace{2cm}}$  ;

RC-ячейка:  $C = \underline{\hspace{2cm}}$  мкФ,  $R = \underline{\hspace{2cm}}$  Ом ;

3. Запишите параметры исследуемых образцов:

**стальная спица:**

длина  $l_c = \underline{\hspace{2cm}}$  см, площадь сечения  $S_o = \underline{\hspace{2cm}}$  см<sup>2</sup>

**ферритовый стержень:**

длина  $l_\Phi = \underline{\hspace{2cm}}$  см, площадь сечения  $S_o = \underline{\hspace{2cm}}$  см<sup>2</sup>

**полоса из пермаллоя:**

длина  $l_\Pi = \underline{\hspace{2cm}}$  см, площадь сечения  $S_o = \underline{\hspace{2cm}}$  см<sup>2</sup>

## ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении работы необходимо соблюдать общие требования Инструкции по технике безопасности работы в лаборатории «Электричество». Следите за тем, чтобы все штекеры проводов были вставлены в гнезда до отказа и не было оголенных участков штекеров.

### **Задание 1. Снятие основной кривой намагничивания.**

*(Это задание выполняется для трёх магнитных образцов: ферритового стержня, стальной спицы и полосы пермаллоя.)*

Вставьте исследуемый образец в соленоид (**при выключенном токе соленоида!**). Изменяя амплитуду сигнала на выходе ГЗЧМ и манипулируя переключателями «VOLTS/DIV», проследите за частичными петлями вплоть до момента, когда на экране возникнет предельная петля гистерезиса с небольшими усами, занимающая бóльшую часть экрана (если усы не наблюдаются, то уменьшите частоту сигнала).

Запишите координаты  $h^+_x$  и  $h^+_y$  правой вершины и координаты  $h^-_x$  и  $h^-_y$  левой вершины этой предельной петли (в делениях шкалы, **с учетом знака**), а также значения коэффициентов отклонения  $k_x$

и  $k_Y$ . Уменьшая амплитуду сигнала ГЗЧМ, произведите аналогичные измерения для  $8 \div 10$  частичных петель, каждый раз выбирая масштабы по осям осциллографа так, чтобы фигура занимала бóльшую часть экрана (тогда можно измерить восприимчивость даже в слабых полях, значительно меньше насыщающих). Для каждой петли вычислите амплитуды

$$h_Y = (h_Y^+ - h_Y^-)/2; h_X = (h_X^+ - h_X^-)/2$$

и определите значения

$$B = m_B \cdot k_Y \cdot h_Y; H = m_H \cdot k_X \cdot h_X .$$

Вычислите значения магнитной проницаемости по формуле  $\mu = B / (\mu_0 \cdot H)$ .

Результаты прямых и косвенных измерений занесите в табл. 8а.1

Образец \_\_\_\_\_

Таблица 8а.1

$h_X^+$	$h_Y^+$	$h_X^-$	$h_Y^-$	$k_X$	$k_Y$	$h_X$	$h_Y$	$H$	$B$	$\mu$

## Задание 2. Определение магнитных характеристик образцов.

Вставьте исследуемый образец в соленоид (при выключенном токе соленоида!). Получите предельную петлю гистерезиса, подбирая  $k_X$  и  $k_Y$  так, чтобы петля занимала бóльшую часть экрана. Измерьте и запишите в табл. 8а.2 значения следующих величин:  $k_X$  и  $k_Y$ ;  $(x_s^+, y_s^+)$  и  $(x_s^-, y_s^-)$  — координаты правой и левой вершин петли;  $y_r^+$  и  $y_r^-$  — координаты пересечения верхней и нижней линий петли с осью  $Y$ ;  $x_c^+$  и  $x_c^-$  — координаты точек пересечения указанных линий с осью  $X$ .

Таблица 8а.2

	$k_X$	$k_Y$	$x_s^+$	$x_s^-$	$y_s^+$	$y_s^-$	$y_r^+$	$y_r^-$	$x_c^+$	$x_c^-$
Феррит										
Пермаллой										
Сталь										

### Задание 3. Исследование предельной петли гистерезиса ферромагнетика

Получите предельную петлю гистерезиса для спицы (аналогично пп. 1, 2). Запишите значения коэффициентов  $k_x$  и  $k_y$ . Расположите петлю симметрично относительно осей  $X$  и  $Y$ . На интервале  $0 \div x_s^+$  с шагом  $\Delta x \approx 0.5$  деления шкалы выберите  $8 \div 10$  значений  $x$ , включая концы интервала (в массиве  $x_i$  должно быть и значение  $x_c^-$ ). Для этих значений измерьте координаты  $y_i^+$  и  $y_i^-$  точек верхней и нижней ветвей правой половины петли (**с учетом знака!**). (Рекомендации по проведению измерений в приложении Б).

Переведите значения  $x_i$  в значения  $H$ , а значения  $y_i^+$  и  $y_i^-$  — в значения  $B^+$  и  $B^-$  по формулам (8а.7).

Занесите результаты в табл. 8а.3.

$k_x =$  \_\_\_\_\_ В/дел;  $k_y =$  \_\_\_\_\_ В/дел;

Таблица 8а.3

	$x_i$	$y_i^+$	$y_i^-$	$H$ , А/м	$B^+$ , Тл	$B^-$ , Тл	$\Delta B = B^+ - B^-$ , Тл
1.	0	$y_1^+$	$y_1^-$				
...	...	...	...				
$i_{\max}$	$x_s^+$	$y_s^+$	$y_s^-$				

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. На миллиметровой бумаге построить основную кривую намагничивания в переменных  $B$ ,  $H$  для каждого образца.

2. Для каждого образца построить график зависимости  $\mu = f(H)$  магнитной проницаемости  $\mu$  от напряжённости  $H$  магнитного поля.

3. По данным табл. 8а.2 вычислите характеристики магнитных материалов  $B_s$ ,  $H_s$ ,  $B_r$ ,  $H_c$  и  $\mu_s$ , используя соотношения

$$\begin{aligned}
 B_s &= m_B \cdot k_y \cdot (y_s^+ - y_s^-)/2; & H_s &= m_H \cdot k_x \cdot (x_s^+ - x_s^-)/2; \\
 B_r &= m_B \cdot k_y \cdot (y_r^+ - y_r^-)/2; & H_s &= m_H \cdot k_x \cdot (x_c^+ - x_c^-)/2; \\
 \mu_s &= B_s / (\mu_0 \cdot H_s).
 \end{aligned}
 \tag{8а.8}$$

4. Для стальной спицы построить предельную петлю гистерезиса в переменных  $(H, B)$ , достраивая левую, нижнюю половину симметрично правой, построенной по данным табл. 8а.3.

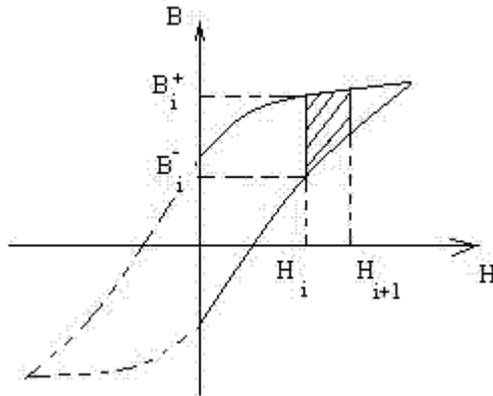


Рис. 8а.3

Оцените удельную энергию потерь за один цикл перемагничивания, вычислив площадь петли согласно приближенному численному интегрированию:

$$w = \oint B dH \approx \sum_{i=1}^{i_{\max}-1} (H_{i+1} - H_i) \times (\Delta B_{i+1} + \Delta B_i),$$

где суммирование проводится по точкам правой половины петли, см. рис. 8а.3.

Определите удельную мощность потерь энергии :  $p_{\text{уд}} = w \cdot \nu$ .

### ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Результаты работы представляются в виде графиков зависимостей  $B = f(H)$  и  $\mu = f(H)$  для каждого образца.
2. В отчёте нужно описать характер этих зависимостей, указав максимальное значение проницаемости  $\mu$  и значение  $H_m$ , при котором достигается  $\mu_{\max}$ . Проверить и прокомментировать выполнение условия (8а.5);
3. Результаты вычисления характеристик магнитных материалов представить (с указанием их погрешности) в форме табл. 8а.4.
4. Представить рисунок предельной петли гистерезиса для стали, отметив на нем характеристики ферромагнетика:  $B_s$ ,  $H_s$ ,  $B_r$  и  $H_c$ .

Определить: является образец магнитно-жестким веществом или магнитно-мягким.

Таблица 8а.4

Параметры	Феррит	Пермаллой	Сталь
<i>Остаточная индукция <math>B_r</math>, Тл</i>			
<i>Коэрцитивная напряженность <math>H_c</math>, кА/м</i>			
<i>Напряженность насыщения <math>H_S</math>, кА/м</i>			
<i>Индукция насыщения <math>B_S</math>, Тл</i>			
<i>Магнитная проницаемость <math>\mu_S</math></i>			

### Приложение А

RC-ячейка в данной установке служит для определения магнитной индукции по напряжению на конденсаторе  $C$ . Согласно закону электромагнитной индукции, переменный магнитный поток  $\Phi$  в образце создаст на зажимах датчика Д1 напряжение

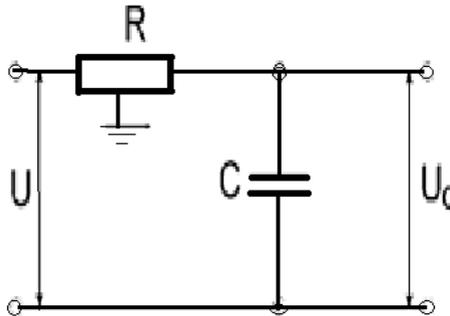


Рис. П.А.1. Схема RC-ячейки

$$U = \frac{d\psi}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt} = NS_0 \frac{dB}{dt}, \quad (\text{П.А.1})$$

пропорциональное  $dB/dt$ . Напряжение  $U$  подаётся на вход  $RC$ -ячейки (рис. П.А.1), для которой справедливы следующие соотношения ( $i$  — сила тока,  $q$  — заряд конденсатора):

$$U=U_R+U_C, \quad U_R=iR, \quad U_C=q/C, \quad i=dq/dt.$$

При выполнении условия

$$\omega \gg 1/(RC) \quad (\text{П.А.2})$$

напряжение  $U_C$  на конденсаторе оказывается малым в сравнении с напряжением  $U_R$  на сопротивлении, тогда  $i=U_R/R=U/R$  или  $dq/dt \approx U/R$ .

Отсюда

$$U_C = \frac{1}{C} \int \frac{U}{R} dt = \frac{1}{CR} \int U dt = \frac{1}{\tau} \int U dt, \quad (\text{П.А.3})$$

где  $\tau=RC$  — постоянная времени  $RC$ -ячейки. Подставляя  $U$  из (П.А.1), найдём

$$U_C = \frac{NS_0}{RC} \int dB = \frac{NS_0}{RC} B.$$

Таким образом, магнитную индукцию в образце можно определить по напряжению на выходе  $RC$ -ячейки:

$$B = m_B U_C, \quad m_B = \frac{RC}{NS_0} = \frac{\tau}{NS_0}. \quad (\text{П.А.4})$$

Напряжение на конденсаторе, пропорциональное  $B$ , будем обозначать как  $U_B$ .

### Приложение Б.

Петля гистерезиса той марки стали, из которой сделана исследуемая спица, имеет форму, близкую к форме параллелограмма. Верхняя ветвь петли на интервале от 0 до  $H_S$

имеет весьма малый наклон, что затрудняет исследование зависимости  $B(H)$  на этом участке. Поэтому определение координат ветвей правой половины петли можно выполнить следующим образом.

Для верхней ветви, определив значения  $y_r^+$  и  $y_s^+$ , вычисляем значения  $y_i^+$  согласно уравнению прямой линии:

$$y_l^+ = y_r^+ + \frac{y_s^+ - y_r^+}{x_s^+} \cdot x_i$$

Координаты нижней ветви удобно измерять в следующей последовательности: записав значение  $y_r^-$ , соответствующее  $x_1 = 0$ , сдвигаем петлю влево на интервал  $\Delta x = x_2$  и определяем значение  $y_2^-$ . Затем, сдвигая петлю на очередной  $i+1$ -тервал  $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$ , каждый раз записываем в табл. 8.A.2 значения  $x_{i+1}$  и  $y_{i+1}^-$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое намагничённость вещества?
2. Какая величина является силовой характеристикой магнитного поля?
3. На какие группы делятся вещества по своим магнитным свойствам? В чем отличие этих свойств?
4. Что такое магнитный гистерезис? Чем он обусловлен?
5. Какова зависимость  $B(H)$  и  $\mu(H)$  для ферромагнетиков?
6. Что такое остаточная намагничённость? Чем она обусловлена?
7. Что такое коэрцитивная сила? Как она находится в работе?
8. В чем отличие магнитно-твёрдых и магнитно-мягких материалов?
9. Из каких материалов изготавливают постоянные магниты?
10. Какие параметры установки определяют величину напряжённости магнитного поля в катушке с током?
11. Как получить напряжение  $U$ , пропорциональное магнитной индукции  $B$ ? Объяснить назначение  $RC$ -ячейки в схеме установки.

12. Когда можно считать, что поле внутри образца приблизительно равно внешнему магнитному полю?
13. Как определить масштаб осей  $X$  и  $Y$  осциллограммы петли гистерезиса?
14. Какова размерность удельной мощности потерь на перемагничивание?
15. Как влияет на петлю магнитного гистерезиса изменение частоты питающего напряжения ?

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы: учебное пособие для вузов – М. Бинوم. Лаборатория знаний, 2014
2. Савельев, И. В. Курс общей физики, т.2 , Электричество и магнетизм.. М. : Кнорус. 2009.
3. Поливанов, К.М. Ферромагнетики: Основы теории технического применения, М. Госэнергоиздат, 1957.

**Работа № 9в.**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ХОЛЛА В**  
**ПОЛУПРОВОДНИКАХ.**

---

**Цель:** экспериментальное исследование явления Холла в полупроводниках, определение концентрации и подвижности носителей тока в полупроводниковом образце.

**Оборудование:** измерительная сборка с полупроводниковым образцом и датчиком магнитной индукции, электромагнит, источники питания НУ1502D (2 шт.), датчики тока, напряжения и магнитной индукции, коммутирующие блоки, соединительные провода, персональный компьютер.

### ВВЕДЕНИЕ

Явлением Холла называют явление возникновения поперечной разности потенциалов при протекании тока по проводнику, помещённому в магнитное поле.

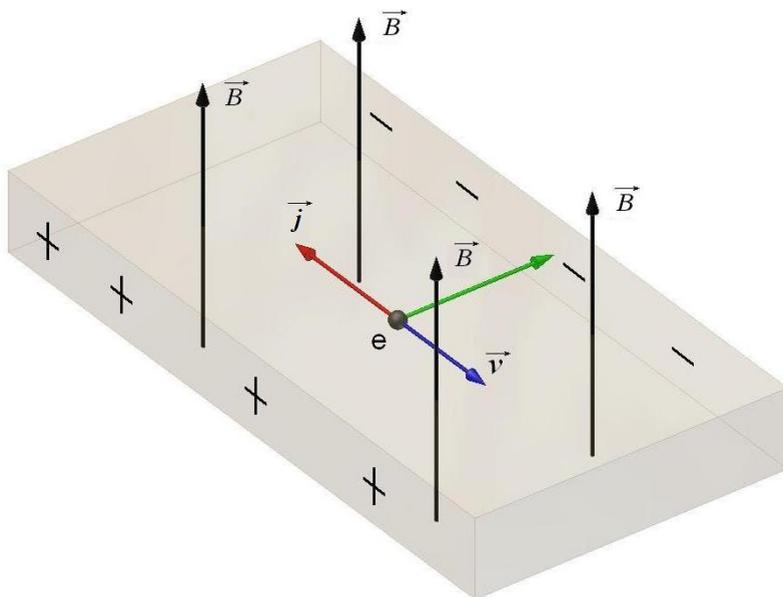


Рис. 9в.1. Возникновение разности потенциалов Холла.

Рассмотрим для определённости механизм возникновения поперечной разности потенциалов в полупроводниковом образце с преобладающим n-типом проводимости (рис.9в.1). Под действием внешней ЭДС электрон движется в образце со скоростью  $\vec{v}$  (поскольку носители заряда в данном случае имеют отрицательный заряд, то вектор плотности тока направлен в противоположную сторону). При взаимодействии движущихся носителей заряда с внешним магнитным полем с индукцией  $\vec{B}$  возникает сила Лоренца  $\vec{F} = e[\vec{v}, \vec{B}]$ .

Под действием силы Лоренца происходит смещение электронов к краю образца. Избыточная концентрация отрицательных носителей заряда у одной грани образца и, соответственно, пониженная их концентрация у противоположной грани, приводят к возникновению разности потенциалов  $U_H$  между боковыми гранями образца, называемой напряжением Холла. Смещение зарядов обуславливает возникновение электрического поля

$$\vec{E} = R_H [\vec{v}, \vec{B}] \quad (9в.1)$$

Величину  $R_H$  называют *постоянной Холла*. Смещение зарядов происходит до тех пор, пока кулоновская сила не уравнивает силу Лоренца:

$$e\vec{E} = e[\vec{v}, \vec{B}] \quad (9в.2)$$

или (в случае, когда  $\vec{v} \perp \vec{B}$ )

$$E = (vB) \quad (9в.3)$$

Поскольку плотность тока  $\vec{j} = ne\vec{v}$  (где  $n$  – концентрация носителей заряда), получим следующее выражение для постоянной Холла:

$$R_H = \frac{1}{en} \quad (9в.4)$$

Формула (9в.4) справедлива для чистых металлов. В полупроводниках же, в силу особенностей статистического распределения носителей тока по скоростям, уточнённое выражение для постоянной Холла имеет вид:

$$R_H = \left(\frac{3\pi}{8}\right) \frac{1}{en} \quad (9в.5)$$

В эксперименте постоянную Холла определяют, измеряя напряжение Холла в пластине при известной силе тока  $I$  и величине магнитной индукции  $B$ . Зная ширину  $b$  и толщину  $d$  пластины, можно записать следующие соотношения:

$$U_H = bE_H \quad (9в.6)$$

$$j = \frac{I}{(bd)} \quad (9в.7)$$

и, следовательно,

$$R_H = \frac{U_H}{(IB)} d \quad (9в.8)$$

Зная величину постоянной Холла, можно определить концентрацию носителей тока в веществе, и их знак. С другой стороны, постоянная Холла связана с удельным сопротивлением  $\rho$  вещества и подвижностью носителей тока  $m = \frac{v}{E}$ . Учитывая, что  $\vec{j} = ne\vec{v}$ , и, с другой стороны,  $\vec{j} = \frac{E}{\rho}$ , получим формулу для нахождения подвижности носителей тока:

$$m = \left(\frac{8}{(3\pi)}\right) \frac{R_H}{\rho} \quad (9в.9)$$

В свою очередь, удельное сопротивление  $\rho$  находим как:

$$\rho = \left(\frac{U_{обр}}{I_{обр}}\right) \frac{S}{l} \quad (9в.10)$$

где  $S$  и  $l$  – соответственно, площадь сечения и длина образца.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На рис. 9в.2 представлен общий вид экспериментальной установки для измерения напряжения Холла.

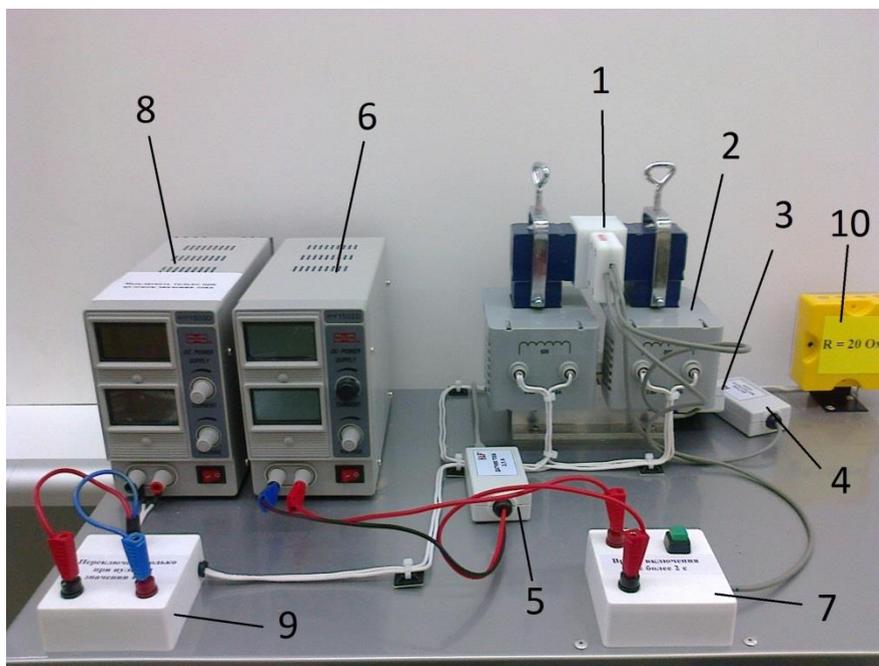


Рис. 9в.2. Общий вид экспериментальной установки.

Полупроводниковый (германиевый) образец совместно с датчиком магнитной индукции смонтированы в измерительной сборке 1. Сборка помещена между полюсами электромагнита (ЭМ) 2. Датчики 3, 4 и 5 служат для измерения величин, соответственно, напряжения Холла  $U_H$ , индукции магнитного поля  $B$  и силы тока через образец  $I_{обр}$ .

Блок питания 6 является источником тока образца. Образец включён в цепь питания через коммутирующий узел 7. Ток образца включается кратковременным (не более 2 секунд) нажатием кнопки на коммутирующем узле. Кроме того, посредством переплюсовки подводящих проводов, можно изменять направление тока в образце (направление тока считается положительным в том случае, когда штекеры включены в гнезда соответствующих цветов).

Блок питания 8 служит источником тока электромагнита (ЭМ). ЭМ подключен к источнику питания также через коммутирующий узел 9, позволяющий изменять направление тока ЭМ (по аналогии с узлом 7). Изменением силы и направления тока ЭМ регулируется величина и направление магнитной индукции в зазоре ЭМ.

Положительное направление магнитного поля также устанавливается при совпадении цвета штекеров и гнезд коммутирующего узла.

Балластный резистор 10 включён в схему питания ЭМ с целью защиты цепи от перегрузок при перекоммутации проводов.

Оба блока питания снабжены цифровыми индикаторами, отображающими значения выходного напряжения и силы тока через нагрузку.

Все измерения в данной работе выполняются с помощью персонального компьютера (ПК). С помощью датчиков 3, 4 и 5 значения измеряемых величин преобразуются в цифровую форму и передаются на ПК. Данные отображаются на мониторе ПК в графическом или числовом формате.

#### **Параметры полупроводникового образца:**

- **Материал:** германий
- **Длина:**  $l_{обр} = 12,0$  мм
- **Ширина:**  $b_{обр} = 4,0$  мм
- **Толщина:**  $d_{обр} = 1,3$  мм

#### **ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ**

1. Не прикасаться к неизолированным частям схемы при включённых источниках питания.
2. Изменять направление тока через образец и электромагнит только при отключённых источниках питания.
3. При работе с ПК необходимо соблюдать следующие требования:
  - Включение и выключение компьютера производится персоналом лаборатории.
  - Во время выполнения лабораторной работы ПК должен использоваться только для выполнения рабочих заданий.
  - Запрещается подключать к ПК какие-либо посторонние носители информации.
  - При неполадках в работе ПК обращаться к преподавателю или дежурному сотруднику.

## ЗАДАНИЯ

### Подготовка установки к работе.

Найдите на рабочем столе ПК программу «Практикум» и запустите её. При этом должно открыться окно регистрации данных (рис. 9в.3).

В окне со списком разделов лабораторного практикума откройте папку «Атомная физика». Выберите сценарий выполнения эксперимента «Эффект Холла в полупроводниках» и активируйте его двойным щелчком левой кнопки мыши. Открывшееся окно содержит три поля графиков (рис. 9в.4):

- график зависимости магнитной индукции  $B$  от времени
- график зависимости силы тока образца  $I_{обр}$  от времени
- график зависимости напряжения Холла  $U_n$  от времени

Извлеките сборку 1 из зазора ЭМ, и проведите коррекцию нуля датчика магнитного поля нажатием кнопки  $>0<$  в окне для измерения магнитной индукции. Затем верните сборку на место, соблюдая её ориентацию.

**ВАЖНО!** Следите за тем, чтобы при этих манипуляциях не изменилась ориентация сборки в зазоре ЭМ!

### Пробные измерения разности потенциалов Холла.

1.2.1 Запустите регистрацию данных нажатием кнопки «ПУСК» () на панели инструментов в окне регистрации данных на мониторе. Программа начнёт автоматическую регистрацию измеряемых величин ( $B$ ,  $I_{обр}$  и  $U_n$ ) в масштабе реального времени.

**ВНИМАНИЕ!** Перед включением источников питания 6 и 8 убедитесь, что ручки регулировки напряжения и силы тока стоят в нулевом положении (в крайнем против часовой стрелки).

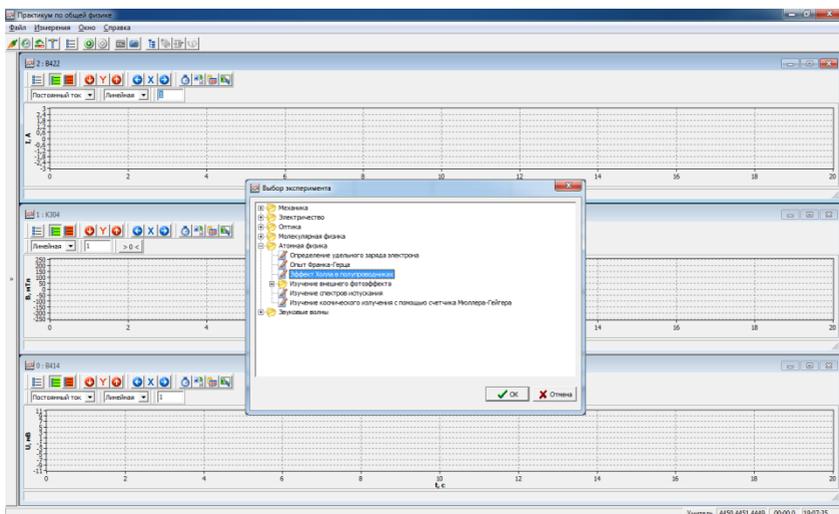


Рис. 9в.3. Окно регистрации данных и выбор сценария эксперимента.

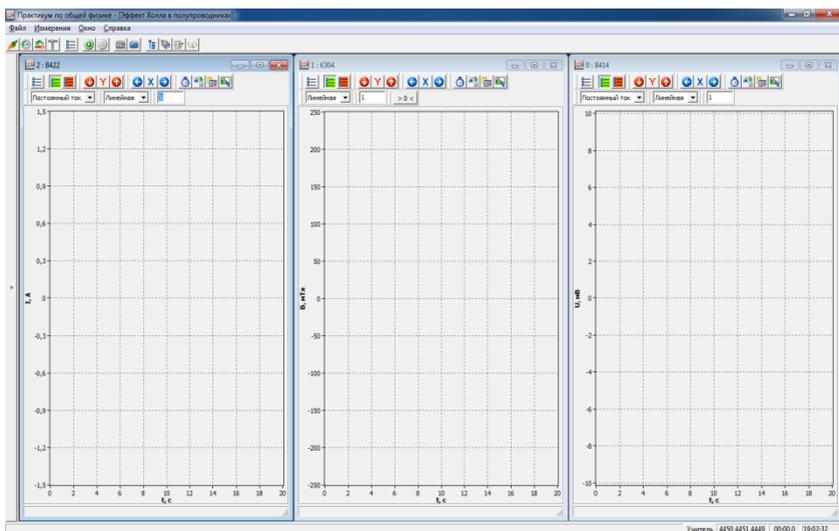


Рис. 9в.4. Рабочие поля графиков.

1.2.2. Включите в сеть источник питания электромагнита (8). Установите ручку регулятора напряжения «**VOLTAGE**» на максимум (в крайнее положение по часовой стрелке). Затем, плавно поворачивая ручку регулятора силы тока «**CURRENT**», наблюдайте за изменением значения магнитной индукции в окне

рабочего поля графика. Установите значение магнитной индукции 250 мТл.

**ПРИМЕЧАНИЕ.** При *положительном* направлении магнитного поля (см. описание установки) и правильной ориентации измерительной сборки в зазоре ЭМ, значение магнитной индукции также имеет *положительный* знак.

1.2.3. Включите в сеть источник тока через образец (6). Вращая ручку регулятора напряжения «**VOLTAGE**», установите напряжение 1,2 В, контролируя его по цифровому индикатору блока питания (ручка регулятора тока зафиксирована в положении, ограничивающем максимальный ток в цепи образца). Напомним, что ток через образец включается кратковременным (не более 2 секунд) нажатием кнопки на коммутирующем узле 7.

1.2.4. Нажмите кнопку коммутирующего узла 7. Удерживайте её в течение 1.5 – 2 секунд. Убедитесь, что изменения значений тока через образец и напряжения Холла отобразились на соответствующих графиках. Остановите регистрацию данных, нажав кнопку «СТОП» (  ) на панели инструментов в окне регистрации данных.

1.2.5. Установите маркёр на участок записи, соответствующий включённому току через образец. Для этого поместите курсор в нужную точку графика зависимости  $B(t)$ , и щёлкните левой кнопкой мыши. При этом на двух других графиках появятся маркёры, соответствующие тому же моменту времени. Сохраните полученные значения, нажав символ «+» в правом верхнем углу окна любого параметра. При этом на экране монитора появится таблица данных (рис. 9в.5).

Номер	t, с	B, мТл	I, А	U, мВ
1	6,9	249,2	0,9	6,3
2	9,6	200,5	0,9	5,1
3	18,2	150,4	0,9	3,8
4	7,4	97,9	0,0	-0,4
6	8,5	50,3	0,9	1,2
7	10,1	4,4	0,9	0,1
8	26,1	-50,7	0,9	-1,4
9	11,3	-99,2	0,9	-2,7
10	5,8	-149,9	0,9	-4,1
11	7,6	-199,9	0,9	-5,3
12	14,1	-250,0	0,9	-6,6

Рис. 9в.5. Таблица цифровых данных эксперимента.

### Снятие зависимости напряжения Холла от магнитной индукции.

1.3.1. Для продолжения измерений вновь нажмите кнопку «ПУСК». Предложение программы очистить таблицу данных следует отклонить.

1.3.2. Плавно вращая ручку «CURRENT» на блоке питания 8, уменьшайте величину магнитной индукции. Снимите зависимости напряжения Холла от магнитной индукции значение **B** в диапазоне от 250мТл до 0 с шагом 50мТл. Достигнув нулевого значения напряжения, установите на ноль ручку регулятора напряжения «VOLTAGE» (повернув её в крайнее положение против часовой стрелки). Поменяйте направление магнитного поля, изменив полярность подключения проводов на коммутирующем узле 9.

1.3.3. Вновь установите ручку регулятора напряжения «VOLTAGE» на максимум, и вращением ручки «CURRENT» задайте величину магнитной индукции -250мТл. Проведите измерения, аналогичные пункту 1.3.2 задания, в диапазоне от -250 до 0мТл.

1.3.4. Значения таблицы данных перенесите в заранее заготовленную таблицу в лабораторном журнале (в данном эксперименте целесообразно заносить в таблицу только значения (**B, мТл**) и (**U, мВ**)).

1.3.5. Измерения повторите не менее трёх раз. Старайтесь подбирать как можно более близкие значения **B**.

**Снятие зависимости напряжения Холла от силы тока через образец.**

1.4.1. Нажмите кнопку «ПУСК» и очистите таблицу данных перед началом нового эксперимента.

1.4.2. Проверьте, чтобы коммутация проводов в цепи питания ЭМ соответствовала положительному направлению магнитного поля (штекеры включены в гнезда, совпадающие по цвету). При необходимости переключите провода, **предварительно установив на «ноль»** регуляторы «**VOLTAGE**» и «**CURRENT**».

1.4.3. Вращая ручки «**VOLTAGE**» и «**CURRENT**» установите значение магнитной индукции равным 250 мТл.

1.4.4. На источнике тока образца через образец (6) установите значение выходного напряжения равное 1,2 В. По аналогии с разделом 1.3, выполните измерение напряжения Холла при данных параметрах установки, и сохраните полученное значение в таблице экспериментальных данных.

1.4.5. Изменяя напряжение на источнике питания (6) (и, соответственно, силу тока в цепи образца) в диапазоне от 1,2 В до -1,2 В с шагом 0,2 В, снимите зависимость напряжения Холла от силы тока в образце, фиксируя в лабораторном журнале значения напряжения источника питания. Изменение направления тока осуществляется посредством изменения полярности подключения токоведущих проводов на коммутирующем узле (7). Полученные данные перенесите в лабораторный журнал.

Измерения также повторите не менее трёх раз.

## **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ**

1. Усредните данные нескольких серий измерений  $B$  и  $U$  (см. п.1.3.5). Используя метод Корнфельда, оцените разброс значений  $B$  и  $U$ . На основе этих данных постройте график зависимости напряжения Холла  $U$  от магнитной индукции  $B$ . Методом парных точек определите угловой коэффициент наклона графика, и рассчитайте величину постоянной Холла  $R_H$  по формуле (9в.8), а также её погрешность  $\Delta R_H$ .

2. Аналогичным образом постройте график зависимости напряжения Холла  $U$  от силы тока  $I_{обр}$  в образце, и также рассчитайте значения  $R_H$  и  $\Delta R_H$ .

3. На основе данных, полученных в п.п. 1 и 2, используя формулу (9в.10), а также известные геометрические параметры образца, рассчитайте величину удельного сопротивления полупроводника  $\rho$  (в качестве  $U_{обр}$  принимаются значения напряжения на источнике питания). По формулам (9в.5) и (9в.9) определите значения, соответственно, концентрации носителей заряда  $n$  и подвижность носителей заряда  $m$  в полупроводниковом образце.

4. В заключение к лабораторной работе укажите значения  $R_H$  и  $\Delta R_H$ , полученные двумя способами, и сделайте вывод об их совпадении или различии. Приведите также значения  $\rho$ ,  $n$  и  $m$  с соответствующими погрешностями.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните механизм возникновения разности потенциалов Холла.

2. Напишите выражение для силы Лоренца.

3. Изменяется ли знак  $U_H$  и направления векторов  $\vec{v}$  и  $\vec{j}$  (см. рис. 9в.1), если в качестве образца использовать проводник с дырочным типом проводимости?

4. Какова размерность постоянной Холла в системе СИ?

5. Объясните физический смысл размерностей величин  $\rho$ ,  $n$  и  $m$  в системе СИ.

6. Почему важно соблюдать правильную ориентацию экспериментальной сборки в зазоре электромагнита?

7. Каково назначение датчиков 3, 4 и 5 (см. рис. 9в.2)?

8. Каково назначение коммутирующих узлов 7 и 9 (см. рис. 9в.2)?

9. Как изменить направление тока через образец? Какое направление тока считается положительным?

10. Как изменить направление магнитного поля? Какое направление магнитного поля считается положительным?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иродов. И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. – Москва - Санкт-Петербург: Физматлит, Невский диалект, Лаборатория базовых знаний. 2000.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2.- М.: Астрель, 2004.
3. Светозаров В.В. Элементарная обработка результатов измерений. - М.: МИФИ, 2005.
4. Светозаров В.В. Основы статистической обработки результатов измерений. - М.: МИФИ, 2005.

## Работа 11а ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ В ПРОСТОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

---

**Цель:** изучение затухающих электрических колебаний в простом колебательном контуре.

**Оборудование:** осциллограф MOS-620; генератор звуковой частоты ГЗЧМ; стенд ЛКЭ-5Р с модулем МОЗ «Поле в веществе» и мультиметрами.

### ВВЕДЕНИЕ

Простой колебательный контур состоит из последовательно соединённых элементов: ёмкости  $C$ , индуктивности  $L$  и активного сопротивления  $R$  (рис. 11а.1).

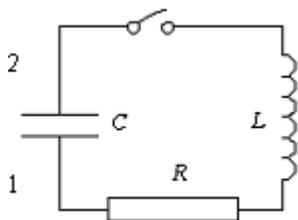


Рис. 11а.1. Схема простого колебательного контура

Если конденсатор зарядить, а затем замкнуть ключ, то в контуре возникнут электромагнитные колебания.

Действительно, при замыкании ключа конденсатор  $C$  начинает разряжаться — в контуре появляются нарастающий ток и пропорциональное ему магнитное поле. Изменение магнитного поля приводит к возникновению в контуре ЭДС самоиндукции  $\varepsilon_s = -Ldi/dt$ , которая сначала замедляет скорость разряда конденсатора, а после того как конденсатор полностью разрядится, начинает поддерживать ток в прежнем направлении. В результате происходит перезарядка конденсатора. Затем процесс разряда начинается снова, (но в обратном направлении), и т.д.

Во время разряда конденсатора его электрическая энергия превращается в энергию магнитного поля в контуре, и, наоборот: во время зарядки энергия магнитного поля превращается в энергию электрического поля.

Максимальные значения напряжения на конденсаторе  $U_{\max}$  и силы тока  $I_{\max}$  носят название амплитуд колебаний напряжения и тока. Так как контур всегда обладает некоторым активным сопротивлением  $R$ , то часть энергии электромагнитных колебаний превращается в тепло, вследствие чего амплитуда колебаний в контуре постоянно уменьшается. С увеличением  $R$  затухание

колебаний происходит быстрее, и, наконец, при достаточно большом  $R$  колебания вообще не возникают, наблюдается апериодический разряд конденсатора. Найдём уравнение, описывающее затухающие колебания в контуре. Согласно закону Ома для замкнутой цепи  $iR + U = \varepsilon_s$ . Используя известные соотношения  $q = CU$ ,  $i = dq/dt = CdU/dt$ , получаем

$$d^2U/dt^2 + 2\beta dU/dt + \omega_0^2 U = 0, \quad (11a.1)$$

где  $\beta = R/2L$ ,  $\omega_0^2 = 1/LC$ .

Из теории колебаний известно, что уравнение (11a.1) при условии  $\beta < \omega_0$  имеет следующее решение:

$$U(t) = U_{\max} e^{-\beta t} \sin(\omega t + \alpha), \quad (11a.2)$$

где  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ .

Период колебаний

$$T = 2\pi / \omega = 2\pi / \sqrt{(1/LC) - (R/2L)^2}. \quad (11a.3)$$

С увеличением коэффициента затухания  $\beta$  период колебаний растёт, стремясь к бесконечности при  $\beta \rightarrow \omega_0$ . Это означает, что колебательный процесс переходит в апериодический. Для контура с определёнными значениями  $L$  и  $C$  апериодический процесс, т.е. отрицательное выражение под корнем в формуле (11a.3) осуществляется при  $R \geq R_k = 2(L/C)^{1/2}$ . Для характеристики затухания колебаний часто пользуются логарифмическим декрементом затухания

$$\lambda = \ln(a(t) / a(t + T)) = \beta T, \quad (11a.4)$$

где  $a(t)$  — амплитуда колебаний напряжения или тока.

Для характеристики колебательного контура используется добротность

$$Q = \pi / \lambda = \pi / (\beta T) = \pi t_e / T = \pi N_e \quad (11a.5)$$

Добротность пропорциональна числу колебаний  $N_e$ , которое контур успевает совершить за время  $t_e$  уменьшения амплитуды в  $e$  раз.

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C} - \frac{R^2}{4}}. \quad (11a.6)$$

Апериодический процесс наступает при  $R = R_k$  или  $Q = 0$ , т.е. при этом не совершается ни одного полного колебания.

В ряде случаев колебательный процесс можно исследовать, изучая зависимость  $U$  от  $i$ . Кривая, изображающая эту зависимость, называется *фазовой кривой*. Ток в контуре

$$i = C \, dU / dt = U_{\max} \omega_0 C e^{-\beta t} \left[ \omega / \omega_0 \cos(\omega t + \alpha) - \beta / \omega_0 \sin(\omega t + \alpha) \right].$$

Если обозначить  $\beta / \omega_0 = \sin \gamma$ ,  $\omega / \omega_0 = \cos \gamma$ , то

$$i(t) = I_{\max} e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha + \gamma), \quad (11a.7)$$

где  $I_{\max} = U_{\max} \omega_0 C$ . Видно, что в случае затухающих колебаний ток опережает по фазе напряжение на угол, больший  $\pi/2$ . Возводя уравнения (11a.2) и (11a.7) в квадрат и складывая, получим

$$(U / U_{\max})^2 + (I / I_{\max})^2 = e^{-2\beta t} (1 + \beta / \omega_0 \sin(2\omega t + 2\alpha + \gamma)).$$

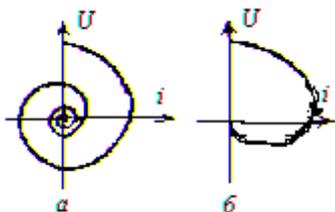


Рис.11a.2. Фазовые кривые:  
а)  $R < R_k$ ; б)  $R \geq R_k$

В отсутствие затухания  $\beta = 0$  фазовая кривая имеет форму эллипса. При наличии затухания фазовая кривая представляет собой скручивающуюся спираль. Её можно непосредственно наблюдать на экране осциллографа (рис. 11a.2).

## ОПИСАНИЕ СХЕМЫ

Исследование свободных затухающих колебаний проводится с помощью схемы, изображённой на рис. 11a.3.

В используемом модуле МОЗ есть только одна катушка индуктивностью  $L = 4,30$  мГн и сопротивлением  $R_L = 8,20$  Ом (измеряется мультиметром), которая пригодна для получения затухающих колебаний. Потенциометр  $R_2$  подключается в схему в качестве сопротивления  $R_n$  через нижний средний контакт и один

из крайних верхних (диапазон возможных сопротивлений измеряется мультиметром). На рис. 11а.3 это сопротивление  $R$ . Значение необходимой ёмкости  $C$  из набора модуля определяется в ходе планирования эксперимента (см. следующий раздел). Сигнал  $A$  подается на вход  $X$  (сн1), а сигнал  $B-Y$  (сн2) осциллографа. При

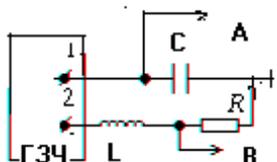


Рис. 11а.3. Принципиальная схема установки для исследования колебаний.

включённой горизонтальной развёртке будет наблюдаться кривая затухающих колебаний после каждого изменения напряжения генератора в виде прямоугольных импульсов. Ориентировочное сопротивление ГЗЧМ  $R_{Г} = 200$  Ом (определяется экспериментально).

При выключенной горизонтальной развёртке (нижнее положение переключателя  $X-Y$ ) сигнал  $Y$  подаётся на горизонтальную развёртку и на экране наблюдаются две спирали фазовых кривых. Выделив одну из них, получаем зависимость напряжения на конденсаторе от тока в контуре (см. рис. 11а.2).

## ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для того чтобы на элементах модуля МОЗ получить затухающие колебания, необходимо при подготовке к работе заранее рассчитать значение ёмкости  $C$ , которую нужно использовать в схеме. Значение  $C$  должно удовлетворять двум условиям: 1) добротность контура  $Q$  при минимальном сопротивлении  $R = R_{Г} + R_{L} + R_{П}$  должна быть больше единицы (порядка 1,5); 2) значение критического сопротивления  $R_{к}$  должно попадать во вторую половину диапазона сопротивлений потенциометра (ориентировочный диапазон  $R_{П} = 200 \div 1800$  Ом). В качестве ёмкости  $C$  использовать ближайшее к рассчитанному значению из набора ёмкостей модуля МОЗ.

Выписать рассчитанные значения  $C$ ,  $Q$ ,  $R_{к}$ .

## ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

После сборки схемы, представленной на рис. 11а.3 подавать на неё напряжение, т.е. включать её, только после проверки преподавателем или дежурным сотрудником лаборатории.

Любые изменения в схеме производить только при выключенном выходном напряжении генератора ГЗЧМ.

### ЗАДАНИЯ

#### Задание 1

Измерить мультиметром сопротивление  $R_L$  катушки индуктивности и диапазон сопротивлений потенциометра  $R_{\Pi}$ . Записать значения  $R_L$ ,  $R_{\Pi \text{ мин}}$ ,  $R_{\Pi \text{ макс}}$ .

#### Задание 2

1. Собрать схему, представленную на рис. 11а.3.
2. Включить осциллограф и ГЗЧМ на прямоугольные импульсы с частотой 1 кГц.

При большой длительности развёртки наблюдать процесс перезарядки конденсатора, сопровождающийся возбуждением затухающих колебаний в контуре.

Уменьшением длительности развёртки и увеличением чувствительности осциллографа выделить на экране одну из кривых затухающих колебаний.

Меняя  $R_{\Pi}$  проследить за характером изменения затухающих колебаний. В частности, провести наблюдение за переходом колебательного процесса в аperiodический.

Для трёх различных сопротивлений измерить период затухающих колебаний  $T$ . Значения  $R_{\Pi}$  измеряются мультиметром при отключённом питании контура. Длительность горизонтальной развёртки подбирается такой, чтобы период колебаний на экране имел наибольшую протяжённость. При этом регулятор SWP.VAR на осциллографе должен находиться в положении CAL.

Используя формулу (11а.3) рассчитать три значения сопротивления генератора, помня, что  $R = R_{\Gamma} + R_L + R_{\Pi}$ . Определить среднее значение  $R_{\Gamma}$  и оценить погрешность.

Определить значение критического сопротивления  $R_k$  в момент перехода процесса затухания в аperiodический (измеряя  $R_{\Pi}$  и вычисляя  $R$ ).

### Задание 3

1. Исследовать фазовые кривые. Для этого выключить генератор развёртки и проследить за изменениями осциллограммы при изменении  $R$  в пределе от  $R < R_k$  до  $R > R_k$ .

2. Определить с помощью фазовой кривой величину критического сопротивления  $R_k$  при фиксированных значениях  $L$  и  $C$ , при которой наступает аperiodический процесс (см. рис. 11а.2, б). Для большей точности наблюдения вести при максимальном вертикальном и горизонтальном усилении осциллографа, а также при достаточно малой яркости и тщательной фокусировке. Полученный результат сравнить с  $R_k$ , полученным в задании 2, и теоретическим.

### Задание 4

Определить по фазовым кривым зависимость логарифмического декремента затухания  $\lambda$  от  $R$ , измеряя радиусы двух соседних витков спирали  $a_1$  и  $a_2$ . Значения  $\lambda_{\text{экc}}$  определяются по формуле (11а.4). Для тех же значений  $R$  рассчитать значения  $\lambda_{\text{теор}}$  по формуле:

$$\lambda_{\text{теор}} = \beta T = 2\pi / \sqrt{4L / (CR^2) - 1},$$

где  $R = R_{\Gamma} + R_L + R_{\Pi}$  — общее сопротивление контура.

Построить график  $\lambda = \lambda(R)$ , на который нанести экспериментальные и теоретические значения.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Для трёх измеренных периодов затухающих колебаний рассчитать три значения сопротивления генератора, выразив его

значение из формулы (11a.3). По этим значениям оценить погрешность сопротивления  $R_r$ .

В момент перехода затухающих колебаний к аperiodическим измерить  $R_{\Pi}$  и оценить критическое сопротивление контура  $R$ .

Аналогичным образом оценить критическое сопротивление по фазовой кривой.

По измеренным значениям соседних амплитуд на фазовых кривых рассчитать  $\lambda_{\text{экс}}$  по формуле (11a.4) и определить погрешность, считая погрешность измерения амплитуд равной 5 процентам.

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

В заключение следует привести значения критических сопротивлений, полученных двумя методами, и рассчитанного по формуле  $R_k = 2(L/C)^{1/2}$ . Обсудить степень их совпадения.

Сравнить экспериментальный и расчётный теоретический графики логарифмического декремента затухания. Сделать выводы о совпадении или расхождении этих результатов и указать предположительные причины.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Нарисуйте принципиальную схему колебательного контура.

2. Напишите выражение для тока в контуре и напряжения на конденсаторе в зависимости от времени (изобразить графически).

3. Запишите уравнение, описывающее затухающие колебания в контуре.

4. Что такое фазовая кривая? Как получить фазовую кривую на экране осциллографа?

5. Какая будет картина на экране осциллографа: а) при включённом генераторе развёртки; б) при выключенном генераторе развёртки? Почему?

6. Чем определяется период собственных колебаний контура?

7. Что такое логарифмический декремент затухания? Какова размерность  $\lambda$ ?

8. Что такое критическое сопротивление?

9. Как экспериментально определить период колебаний контура?

10. Как экспериментально определить логарифмический декремент затухания контура?

11. Чем определяется активное сопротивление контура при известном значении сопротивления потенциометра?

## ЛИТЕРАТУРА

### *Основная*

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5-ти кн. Кн. 2. Электричество и магнетизм. М.: АСТ, 2007.

2. Светозаров В.В. Элементарная обработка результатов измерений: Учебное пособие. Изд. 2-е, перераб. М.: МИФИ, 2005.

### *Дополнительная*

1. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы: Учебное пособие. изд. 7-е. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009.

2. Светозаров В.В. Основы статистической обработки результатов измерений. Учебное пособие. Изд. 2-е, перераб. М.: МИФИ, 2005.

## Работа 116 ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ В ПРОСТОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРА

---

**Цель:** экспериментальное изучение процесса затухания колебаний в простом электрическом колебательном контуре.

**Оборудование:** лабораторный стенд (рис. 11б.1), выполненный в виде собираемой из пластиковых монтажных элементов схемы на магнитной основе и включающий в себя резисторы 3 на 1 Ом, 10 Ом и 1 кОм; переменный резистор 8 (680 Ом); конденсаторы 1и7 на 1 и 4,7 мкФ, катушка индуктивности 2 (7,4 мГн); источник ЭДС - сетевой адаптер; кнопки-выключатели 5 и 6 для замыкания цепи зарядки конденсатора и его разрядки; элементы для сборки электрической цепи; компьютер с программным обеспечением; двухканальный осциллографический датчик напряжения 4 для регистрации электрической разности потенциалов на активном сопротивлении, индуктивности или ёмкости; соединительный кабель для подключения датчика к компьютеру.

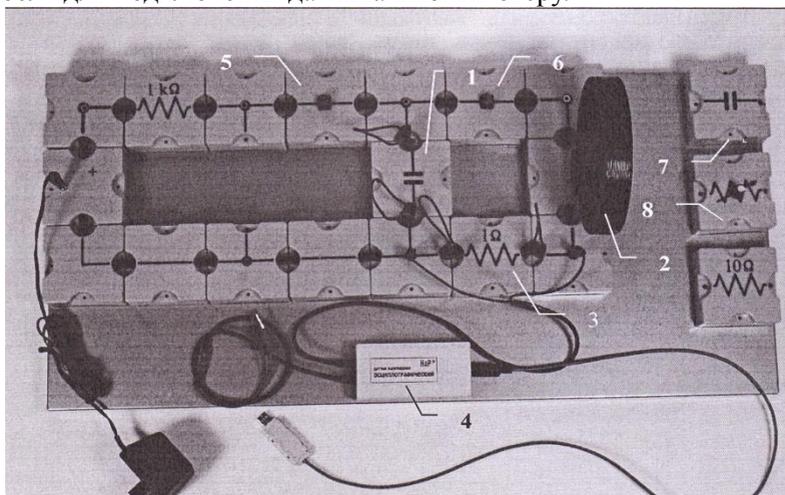


Рис. 11.б.1 Схема колебательного контура на лабораторном стенде

## ВВЕДЕНИЕ

Простой колебательный контур состоит из последовательно соединённых элементов: ёмкости  $C$ , индуктивности  $L$  и активного сопротивления  $R$  ( см. рис. 11а.1).

Конденсатор контура заряжается от источника постоянного тока. После размыкания цепи заряда и замыкания контура с индуктивностью в нем возникают свободные электрические колебания. Напряжения на конденсаторе либо активном сопротивлении через двухканальный осциллографический датчик выводятся на экран компьютера.

С теоретической частью необходимо ознакомиться по работе 11.а.

## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В состав лабораторной установки входит набор элементов, собранных в схему для исследования затухающих колебаний в электрическом контуре (см. рис. 11.б.1).

Ёмкость  $C$ , катушка индуктивности  $L$  и сопротивление  $R$  образуют исследуемый контур. Колебания в контуре наблюдаются с помощью осциллографического датчика напряжения, подключённого к компьютеру. Цепь заряда конденсатора содержит зарядный резистор сопротивлением  $R_2 = 1$  кОм и кнопку, при замыкании которой конденсатор соединяется с источником постоянного тока и заряжается. При замыкании кнопки разрядной цепи с индуктивностью, в контуре возникают свободные затухающие колебания, которые наблюдаются на экране компьютера.

## ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с устройством установки, её принципом действия.

Запрещается одновременно нажимать на кнопки зарядки и разряда конденсатора.

Запрещается вскрывать датчик и элементы электрической цепи, а также подвергать элементы установки ударным и силовым нагрузкам.

## ЗАДАНИЯ

### Задание 1

*Определение коэффициента затухания электрического контура.*

Соберите лабораторную установку в соответствии с рис. 11.б.1, установив конденсатор  $I$  емкостью  $C_1=4,7$  мкФ и сопротивление  $R_1=1$  Ом.

Подключите 1-й (красный) канал датчика напряжений к клеммам резистора (нижний выход на датчике).

С помощью соединительного кабеля подключите осциллографический датчик напряжений к USB-порту компьютера.

Включите источник питания в сеть.

1. Включите компьютер, запустите программу «Практикум» (иконка с кривыми). При загрузке программа должна идентифицировать присоединенные датчики и загрузить окно регистрации данных. Выберите сценарий «Электричество», затем «Изучение затухающих колебаний в колебательном контуре», нажав соответствующую кнопку на панели инструментов, а внутри него сценарий выполнения первой части работы «Определение коэффициента затухания»

2. Вызовите окно настройки параметров осциллографического датчика напряжений, нажав на кнопку, и проверьте установленные параметры датчика в соответствии с рис. 11б 2.

Для фиксации параметров нажмите кнопку «Сохранить» с «птичкой».

3. Запустите измерения.

4. Зарядите конденсатор, нажав на кнопку зарядки и удерживая её нажатой 1,0–1,5 с.

5. Разрядите конденсатор, кратковременно нажав на кнопку разрядки. После получения осциллографической картинки остановите измерения. При необходимости измените параметры настройки датчика (п 2) так, чтобы на экране помещалось 6–10 полных колебаний.

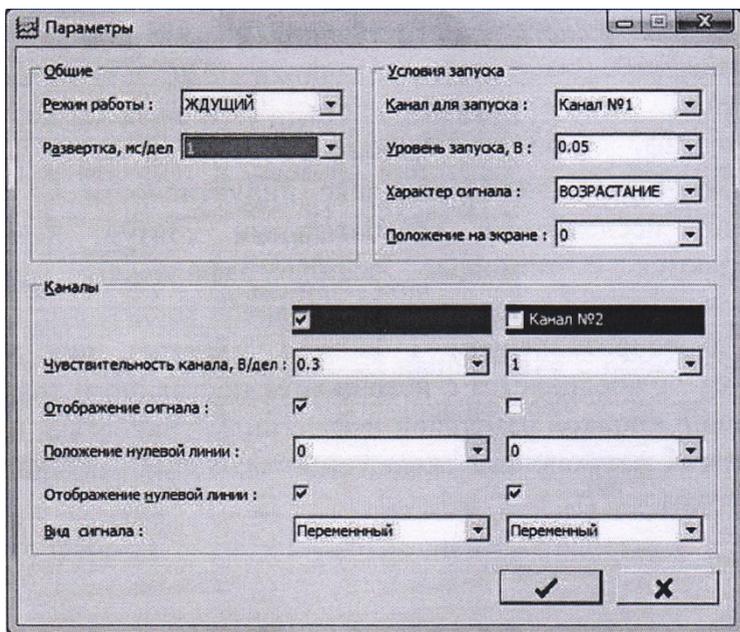


Рис. 11б.2. Измерение коэффициента затухания. Параметры датчика

## Обработка результатов измерений задания 1

1. Установите жёлтый маркёр левой кнопкой «мыши» на первый экстремум кривой затухающих колебаний. Перейдите в окно обработки, нажав на красную кнопку «плюс» в правом верхнем углу рабочего окна датчика. В открывшемся окне (клавиша «Таблица») автоматически зафиксируются данные о времени и амплитуде соответствующей точки на кривой.

2. Нажмите клавишу «промежуточные данные» и введите значение сопротивления, напряжение на котором измеряется с помощью датчика. Это необходимо для расчёта тока в таблице.

3. Установите окно обработки в удобное место экрана и последовательно, левой кнопкой «мыши», отметьте остальные экстремумы (минимумы и максимумы) кривой, подводя к ним жёлтый маркёр и каждый раз нажимая на красный «плюс». После автоматической фиксации временных

и амплитудных значений происходит пересчёт значений напряжения на резисторе в величину тока в контуре. Натуральный логарифм амплитуды затухающих колебаний  $\ln(A_0 e^{-\beta t})$  – это линейная функция, угловой коэффициент которой соответствует коэффициенту затухания.

4. После заполнения таблички нажмите клавишу «График». В окне отразятся точки графика логарифма амплитуды от времени. Слева в списке кривых аппроксимации выберите линейную функцию « $Y=AX+B$ ».

5. Нажмите кнопку аппроксимации по методу наименьших квадратов, и на экране появится запись линейной функции. Запишите в табл. 11б.2 значение коэффициента затухания  $\beta$ , соответствующее модулю коэффициента пропорциональности полученной функции. Размерность времени на графике в мс, а размерность  $\beta$  должна быть в  $\text{с}^{-1}$ .

6. Замените сопротивление  $R_1$  с номиналом 1 Ом на сопротивление в 10 Ом и повторите все пункты первого задания по измерению и обработки результатов. Сопоставьте коэффициенты затухания  $\beta$ , полученные для разных активных сопротивлений колебательного контура.

## Задание 2

### Определение периода затухающих колебаний в электрическом контуре

Верните в колебательный контур сопротивление 1 Ом. Аналогично заданию 1 проделайте все пункты с 1-го по 6-й, (только в первом пункте выберите сценарий «Определение периода затухающих колебаний»).

### Обработка результатов измерений задания 2

1. Выберите область на кривой затухающих колебаний, установив по краям выделенной области зелёный и жёлтый маркёры. Необходимо устанавливать левый край выделенной области (зелёный маркёр правой кнопкой мыши) к моменту начала колебательного процесса, а правый край (жёлтый маркёр левой кнопкой «мыши») через 5–7 полных колебаний. В обоих случаях кривая в этих точках проходит через ноль.

2. Перейдите в окно обработки, нажав на красную кнопку «плюс» в правом верхнем углу рабочего окна датчика. В открывшемся окне (клавиша «Таблица») автоматически зафиксируется интервал времени выделенного участка кривой.

3. Впишите в соответствующую ячейку таблицы значение числа полных колебаний. Для получения в правой ячейке таблицы периода колебаний  $T_1$  нажмите "Enter". Зафиксируйте его значение в итоговой табл. 11б.2.

4. Повторите все пункты задания 2 для конденсатора с ёмкостью 1 мкФ. Определите значение  $T_2$ . При этом в настройках осциллографического датчика необходимо установить развёртку 0,5 мс/дел.

5. Подсчитайте теоретические значения периодов колебаний  $T_{1T}$  и  $T_{2T}$  по формуле (11а.3), понимая под  $R$  полное сопротивление контура, и внесите значения периодов в табл. 11б.2.

### Задание 3

#### Определение критического сопротивления электрического контура

1. Замените активное сопротивление  $R_1$  на переменный резистор. Верните в цепь конденсатор ёмкостью 4,7 мкФ.

2. Выберите сценарий выполнения работы «Определение критического сопротивления» нажав соответствующую кнопку на панели инструментов и перейдя в меню сценариев.

3. Запустите измерения.

4. Установите рукоятку переменного резистора в среднее положение и проведите несколько записей процесса разряда конденсатора при различных положениях регулировочной ручки переменного резистора. В настройках должен быть установлен «ждущий» режим работы осциллографического датчика и поэтому не нужно перезапускать измерения в процессе подбора сопротивления переменного резистора, которое соответствует началу критического процесса в колебательном контуре. Выход сигнала за рамки экрана по амплитуде вполне допустимы, так как в этом случае интерес представляет поведение осциллограммы только вблизи нулевой линии, когда не происходит ее пересечение. Добейтесь установления критического режима сразу после колебательного. При необходимости скорректируйте настройки

датчика напряжений по чувствительности по чувствительности и скорости развёртки.

5. Не изменяя положение ручки переменного резистора, соответствующее началу критического процесса, произведите измерение сопротивления. Переменный резистор при этом отключается из колебательного контура и включается последовательно с зарядным сопротивлением  $R_2=1$  кОм.

6. Подключите к клеммам зарядного сопротивления 1-й (красный) канал, а к переменному резистору–2-й (синий) канал датчика напряжений.

7. Вызовите окно настройки параметров осциллографического датчика. Установите параметры датчика в соответствии с рис. 116.3 (режим работы–«АВТО», развёртка –20 мс/дел., чувствительность канала 1–20 В/дел.).

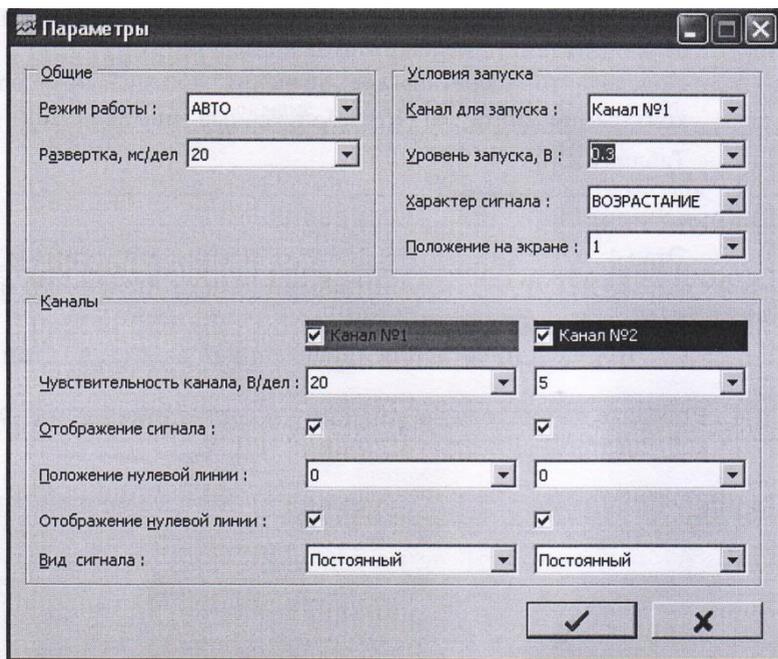


Рис. 116.3. Измерение критического сопротивления. Параметры датчика

8. Запустите измерения. На экране появится запись падений напряжений на исследуемых сопротивлениях.

9. Установите жёлтый маркёр в любую точку экрана, и в верхнем левом углу окна появятся данные о величинах напряжений на сопротивлениях .

### **Обработка результатов измерений задания 3**

1. Напряжение на последовательно соединённых сопротивлениях пропорционально величинам этих сопротивлений. Используя это, определите величину переменного резистора, а затем и величину критического сопротивления контура, добавив к определённому сопротивлению величину сопротивления катушки  $R_{1кр}$ .

2. Повторите пп. 3–9 для другой ёмкости в контуре  $L = 1$  мкФ. После замены ёмкости необходимо установить следующие параметры осциллографического датчика: режим – «ждущий», развёртка – 0.5 мс/дел., чувствительность 1-го канала – 5 В/дел. Второй канал следует отключить (снять галочку в окне «Канал 2»).

3. Подсчитайте теоретические значения критических сопротивлений контура по формуле

$$R_{кр} = 2(L/C)^{1/2}.$$

Полученные значения теоретических критических сопротивлений для двух ёмкостей конденсаторов запишите в табл. 2.

### **Задание 4**

#### **Определение добротности электрического контура с помощью фазовой диаграммы**

1. Верните схему в исходное состояние в соответствии с рис. 11б.1 с конденсатором 4,7 мкФ и сопротивлением 1 Ом.

2. Подключите 1-й канал (красный, выходы из датчика – нижние) датчика напряжений к клеммам резистора, а 2-й канал (синий) – к клеммам конденсатора.

3. Выберите сценарий выполнения работы «Построение фазовой кривой», нажав соответствующую кнопку на панели инструментов и перейдя в меню сценариев.

4. Вызовите окно настройки параметров осциллографического датчика напряжений. Установите первоначальные параметры датчика в соответствии с рис. 11б.4.

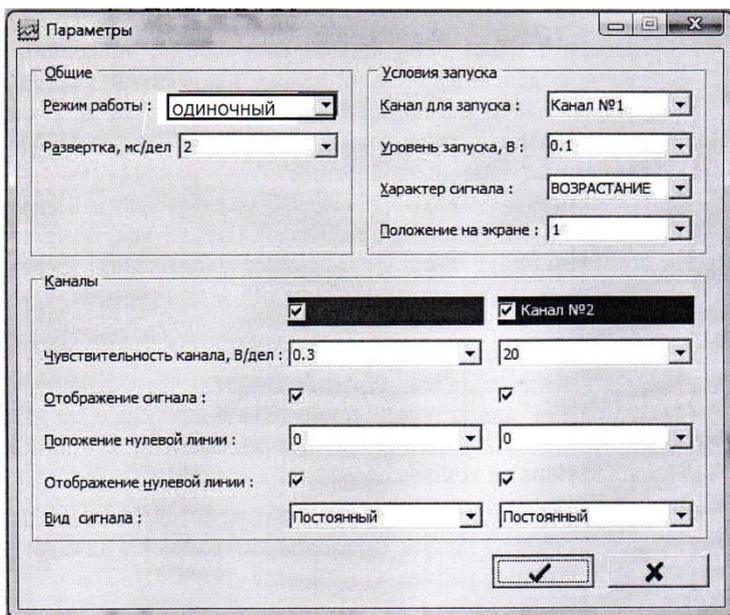


Рис. 11.6.4. Получение фазовой диаграммы. Параметры датчика

5. Запустите измерения.
6. Зарядите конденсатор, нажав на кнопку зарядки.
7. Разрядите конденсатор, кратковременно нажав на кнопку разрядки, и после получения двойной осциллографической картинки остановите измерения.
8. Выберите область на кривой затухающих колебаний, установив по краям выделенной области зелёный и жёлтый маркёры, причём левый край области в момент начала колебательного процесса, а правый – на конец записанного графика.
9. Перейдите в окно «Обработка», нажав на красный знак «+» в правом верхнем углу окна с графиками. На экране возникнет таблица, в которую будут введены значения напряжения, зарегистрированные первым каналом. Нажмите на синий знак «+» и добавьте в таблицу значения напряжений, измеренные вторым каналом.
10. При выборе вкладки «График U<sub>2</sub>(U<sub>1</sub>)» на экране появится фазовая диаграмма, в которой по оси абсцисс откладывается

напряжение на сопротивлении, а по оси ординат – напряжение на конденсаторе.

11. При необходимости можно экспортировать график в личный файл с отчётом о лабораторной работе.

### **Обработка результатов измерений задания 4**

1. С помощью графика фазовой диаграммы и таблицы с напряжениями найдите два последовательных значения через период амплитуд напряжений затухающих колебаний, например, на оси абсцисс (напряжение на конденсаторе) при нулевом значении оси ординат. Зафиксируйте эти значения:  $U_t =$  ,  $U_{t+T} =$  .

2. В соответствии с теорией при слабом затухании добротность определяется как:

$$Q = 2\pi \frac{W_e}{\Delta W_e} = 2\pi \frac{U_t^2}{U_t^2 - U_{t+T}^2} \approx \pi \frac{U_t}{U_t - U_{t+T}}.$$

Рассчитайте добротность по этой формуле и занесите в табл. 11б. 2.

Подсчитайте также значение добротности по теоретической формуле:

$$Q = \frac{\pi}{\lambda} = \frac{\pi}{\beta T_1},$$

где  $\beta$  и  $T_1$  – коэффициент затухания и период, определённые в первом и во втором заданиях.

### **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ**

Измерения обрабатываются на компьютере в ходе выполнения заданий, либо рассчитываются с использованием измеренных величин и параметров контура, представленных в табл. 11б. 1.

Параметры контура

Таблица 116.1.

Ёмкость конденсатора мкФ	Индуктивность мГн	Активное сопротивление катушки Ом	Сопротивление резисторов Ом	Переменный резистор Ом
$C_1=4,7$	$L$	$R_L$	$R_1$ 1 и 10	$R_{\Pi}$
$C_2=1,0$	7,4	2,0	$R_2 = 1$ кОм	0 – 470

### ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

В заключении к работе основные результаты должны быть представлены в табл.116.2.

Основные результаты

Таблица 116.2.

Коэффициент затухания $c^{-1}$	Период колебаний с	Критическое сопротивление Ом	Добротность Контура
$R_1=1$ Ом $C_1=4,7$ мкФ	$R_1=1$ Ом, $C_1=4,7$ мкФ	$R_1=1$ Ом, $C_1=4,7$ мкФ	$R_1=1$ Ом, $C_1=4,7$ мкФ
$\beta_1=$	$T_1=$ $T_{1T}=$	$R_{1кр}=$ $R_{1крT}=$	$Q=$
$R_2=10$ Ом $C_1=4,7$ мкФ	$R_1=1$ Ом, $C_2=1$ мкФ	$R_1=1$ Ом, $C_2=1$ мкФ	$Q_T=$
$\beta_2=$	$T_2=$ $T_{2T}=$	$R_{2кр}=$ $R_{2крT}=$	

Проанализируйте зависимость коэффициентов затухания от активных сопротивлений контура.

Также проанализируйте зависимость периодов колебаний от величин ёмкостей конденсаторов. Обсудить степень совпадения экспериментальных и теоретических значений.

Сравните значения критических сопротивлений, полученных экспериментально, и рассчитанного по формуле  $R_k = 2(L/C)^{1/2}$ . Обсудить степень их совпадения.

Сравнить экспериментальное и расчётное значения добротностей контура. Сделайте выводы о совпадении

или расхождении этих результатов и укажите предположительные причины.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Нарисуйте принципиальную схему колебательного контура.
2. Напишите выражение для тока в контуре и напряжения на конденсаторе в зависимости от времени (изобразить графически).
3. Запишите уравнение, описывающее затухающие колебания в контуре.
4. Что такое фазовая кривая? Как получить фазовую кривую на экране?
5. Что такое добротность контура и как она определяется при слабом затухании?
6. Чем определяется период собственных колебаний контура?
7. Что такое логарифмический декремент затухания? Какова размерность  $\lambda$ ?
8. Что такое критическое сопротивление?
9. Как экспериментально определить период колебаний контура?
10. Как экспериментально определить значение переменного сопротивления?
11. Чем определяется активное сопротивление контура при известном значении переменного сопротивления?

## ЛИТЕРАТУРА

### *Основная*

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5-ти кн. Кн. 2. Электричество и магнетизм. М.: АСТ, 2007.
2. Светозаров В.В. Элементарная обработка результатов измерений: Учебное пособие. Изд. 2-е, перераб. М.: МИФИ, 2005.

3. Практикум по физике. Изучение затухающих колебаний в колебательном контуре. Методическое руководство. Научные развлечения. М., 2013.

*Дополнительная*

1. Иродов И. Е. Электромагнетизм: Основные законы: Учебное пособие, изд. 7-е. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009.

2. Светозаров В. В. Основы статистической обработки результатов измерений: Учебное пособие. Изд. 2-е, перераб. М.: МИФИ, 2005.

## Работа 12а

# ИЗУЧЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КОНТУРЕ

---

*Цель:* исследование вынужденных электрических колебаний и явления резонанса.

*Оборудование:* лабораторный комплекс МО-2; звуковой генератор; осциллограф; три вольтметра; соединительные провода.

### ВВЕДЕНИЕ

В работе исследуются вынужденные колебания в контуре, состоящем из последовательно включённых ёмкости  $C$ , индуктивности  $L$ , активного сопротивления  $R$  и источника переменной электродвижущей силы (ЭДС) —  $\varepsilon$  (рис. 12а.1)

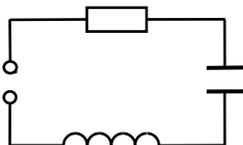


Рис. 12а.1. Последовательный LRC-контур

Если внешняя электродвижущая сила ЭДС изменяется по синусоидальному закону  $\varepsilon(t) = \varepsilon_m \sin \omega t$ , где  $\varepsilon_m$  — амплитуда ЭДС, то в контуре возникнут электрические колебания с частотой внешней ЭДС. Согласно закону Ома для замкнутой цепи, сумма падений напряжений на последовательных элементах равна ЭДС, действующей в контуре  $iR + U_C + U_L = \varepsilon$ . Следовательно,  $iR + q/C + Ldi/dt = \varepsilon_m \sin \omega t$ . Продифференцировав это уравнение по времени, используя соотношение  $i = dq/dt$ , получим

дифференциальное уравнение, которому должен удовлетворять ток в контуре:

$$L \cdot d^2 i / dt^2 + R \cdot di / dt + i / C = \varepsilon_m \omega \cos \omega t. \quad (12a.1)$$

Из теории вынужденных колебаний известно, что это уравнение для установившихся колебаний имеет решение  $I = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ , где

$$I_m = \varepsilon_m / Z, \quad (12a.2)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}. \quad (12a.3)$$

Величина  $Z$  называется полным сопротивлением цепи. Сдвиг фаз  $\varphi$  между внешней ЭДС и током в контуре определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \varphi = (\omega L - 1/\omega C) / R. \quad (12a.4)$$

Формулу (12a.2), связывающую амплитудные значения тока и внешней ЭДС, называют законом Ома для переменного тока. Из формул (12a.2) и (12a.3) следует, что при условии  $\omega L - 1/\omega C = 0$  амплитуда тока достигает максимального значения — наблюдается явление резонанса. При этом амплитуда тока при резонансной частоте

$$\omega_p = 1/\sqrt{LC} \quad (12a.5)$$

достигает значения  $I_{mp} = \varepsilon_m / R$ .

Напряжение на активном сопротивлении  $R$  равно

$$U_R = IR = I_m R \sin(\omega t - \varphi) = U_{Rm} \sin(\omega t - \varphi).$$

Максимальное значение амплитуды напряжения на активном сопротивлении

$$U_{Rmp} = I_{mp} R = \varepsilon_m, \quad (12a.6)$$

также достигается при частоте  $\omega_p$  (12a.5). График зависимости амплитуды напряжения на активном сопротивлении приведён на рис. 12a.2.

Напряжение на ёмкости изменяется по закону

$$U_C = q / C = (1/C) \int i \cdot dt = U_{Cm} \sin(\omega t - \varphi - \pi/2),$$

где  $U_{Cm} = I_m / \omega C = I_m X_C$  — амплитуда напряжения на ёмкости.

Величину  $X_C = 1/\omega C$  называют ёмкостным сопротивлением.

Напряжение на конденсаторе отстаёт от тока по фазе на  $\pi/2$ . График зависимости амплитуды напряжения на ёмкости приведён на рис 12а.2. Максимальное значение амплитуды напряжения на конденсаторе достигается при частоте  $\omega_{1p}$ , меньшей, чем  $\omega_p$ :

$$\omega_{1p} = \omega_p \sqrt{1 - \frac{R^2 C}{2L}}.$$

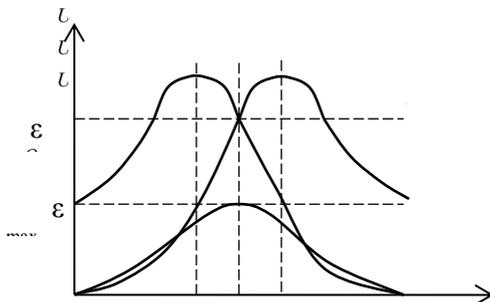


Рис. 12а.2. Резонансные кривые

Напряжение на индуктивности изменяется по закону

$$U_L = L \cdot di / dt = U_{Lm} \sin(\omega t - \varphi + \pi/2),$$

где  $U_{Lm} = I_m \cdot \omega L = I_m X_L$  – амплитуда напряжения на индуктивности. Величину  $X_L = \omega L$  называют индуктивным сопротивлением. Напряжение на индуктивности опережает ток по фазе на  $\pi/2$ . Максимальное значение амплитуды напряжения на индуктивности достигается при частоте  $\omega_{2p}$ , большей, чем  $\omega_p$ :

$$\omega_{2p} = \omega_p / \sqrt{1 - \frac{R^2 C}{2L}}.$$

Амплитуды напряжений на ёмкости и индуктивности при резонансе соответственно равны

$$U_{Cmp} = I_{mp} / \omega_p \cdot C = \varepsilon_m \cdot Q; \quad (12a.7)$$

$$U_{Lmp} = I_{mp} \cdot \omega_p L = \varepsilon_m \cdot Q, \quad (12a.8)$$

где  $Q$  – добротность контура

$$Q = (1/R)\sqrt{L/C}. \quad (12a.9)$$

Добротность контура показывает, во сколько раз амплитудные значения напряжений на реактивных элементах, т.е. на ёмкости и индуктивности, при резонансе больше, чем амплитудное значение внешней ЭДС (рис.12a.2,б):

$$Q = U_{Cmp} / \varepsilon_m = U_{Lmp} / \varepsilon_m. \quad (12a.10)$$

Напряжения на ёмкости и индуктивности сдвинуты по фазе на  $\pi$ , поэтому при резонансе сумма напряжений  $U_{Cmp}$  и  $U_{Lmp}$  равна нулю. При резонансе напряжение на активном сопротивлении равно внешней ЭДС. На рис. 12a.3 изображены векторные диаграммы напряжений в колебательном контуре в произвольном случае и при резонансе.

**Явление резонанса** в последовательном резонансном контуре заключается в том, что при определённой частоте внешней ЭДС, равной  $\omega_p$ , амплитуда тока в контуре достигает максимального значения. При резонансе полное сопротивление контура равно его активному сопротивлению  $R$ , сдвиг фаз  $\varphi$  между током в контуре и ЭДС равен нулю. Контур действует как активное сопротивление. В момент резонанса амплитудные значения напряжений на индуктивности и ёмкости равны и достигают значений, значительно превышающих амплитудное значение внешней ЭДС. Поэтому явление резонанса в последовательном контуре называют резонансом напряжений.

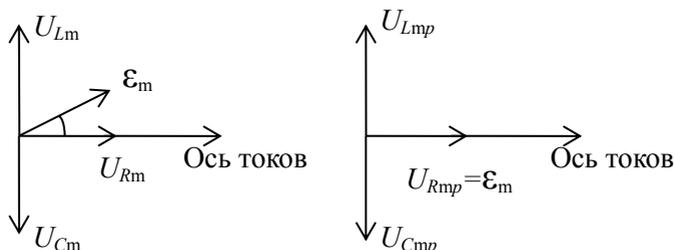


Рис. 12a.3. Векторные диаграммы.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

При исследовании явления резонанса напряжений в лабораторной работе используют модуль М02 «Цепи переменного тока», модуль М03 «Поле в веществе», звуковой генератор, осциллограф, три мультиметра, для измерения напряжений, соединительные провода.

Исследование резонанса напряжений производится с помощью принципиальной схемы, изображённой на рис. 12а.4.

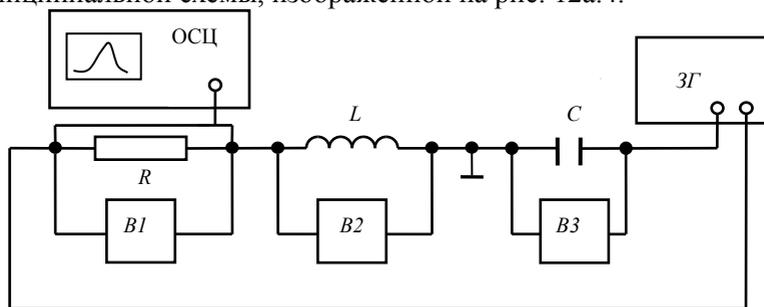


Рис. 12а.4. Принципиальная схема установки для исследования резонанса напряжений.

В схеме использованы следующие обозначения: ОСЦ осциллограф, ЗГ звуковой генератор, В-1, В-2 и В-3 вольтметры, В модуле МО-2 используют активное сопротивление контура  $R$ , ёмкость  $C$ , и индуктивность  $L$ . Вольтметром В-1 определяют напряжение на активном сопротивлении. Вольтметры В-2 и В-3 измеряют напряжения на индуктивности  $L$  и ёмкости  $C$ . Необходимо помнить, что вольтметр, измеряющий напряжение на элементе, включённом в цепь переменного тока, показывает действующее значение напряжения, которое связано с амплитудным значением соотношением  $U = U_{\max} / \sqrt{2}$ .

## ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении работы необходимо соблюдать общие требования Инструкции по технике безопасности работы в лаборатории «Электричество».

Необходимо следить за тем, чтобы все штекеры проводов были вставлены в гнезда до отказа, гарантируя отсутствие оголённых участков штекеров.

## ЗАДАНИЯ

1. Собрать схему (см. рис. 12а.4).

2. Для заданных значений  $L$  и  $C$  (см. приложение на рабочем месте) рассчитать значение  $\nu_p$ , для которого должен наблюдаться резонанс. Экспериментально убедиться в том, что для данных значений  $L$  и  $C$  (независимо от значения активного сопротивления контура) при заданном значении  $\nu_p$  будет наблюдаться резонанс. Для этого установить в цепи заданные значения  $L$ ,  $C$  и  $R_1$ .

Подать от звукового генератора напряжение с частотой  $\nu_p$ . Изменяя в небольших пределах частоту подаваемого напряжения и наблюдая за амплитудой напряжения на активном сопротивлении на экране осциллографа, при выключенном генераторе развёртке, определить резонансную частоту. Изменив значение сопротивления на  $R_2$ , снова измерить  $\nu_p$  и сравнить с рассчитанным значением.

3. Снять резонансные кривые  $U_{R_m} = U_{R_m}(\nu)$ ,  $U_{C_m} = U_{C_m}(\nu)$  и  $U_{L_m} = U_{L_m}(\nu)$  для двух значений активного сопротивления контура  $R_1$  и  $R_2$  при неизменном значении величины выходного напряжения ЗГ.

Записать значение выходного напряжения ЗГ  $\varepsilon_m$ , которое при дальнейших измерениях должно оставаться неизменным. Значения  $L$  и  $C$  берутся, как и в п. 2 задания. Резонансные кривые снимаются для 11—15 точек, причём максимальное количество точек должно быть в области максимума каждой из кривых.

Для каждого значения активного сопротивления внести измерения в таблицу:

Таблица 12а.1

$\nu$ , Гц	0						
$U_{Rm}$ , В	0						
$U_{Cm}$ , В	0						
$U_{Lm}$ , В	0						

### ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Построить график резонансных кривых  $U_{Rm} = U_{Rm}(\nu)$ , нанеся на него точки для двух значений активного сопротивления контура  $R_1$  и  $R_2$  (см. приложение на рабочем месте).

2. Построить два графика резонансных кривых  $U_{Rm} = U_{Rm}(\nu)$ ,  $U_{Cm} = U_{Cm}(\nu)$  и  $U_{Lm} = U_{Lm}(\nu)$ . На каждый график нанести точки  $U_{Rm} = U_{Rm}(\nu)$ ,  $U_{Cm} = U_{Cm}(\nu)$  и  $U_{Lm} = U_{Lm}(\nu)$  для каждого из двух значений активного сопротивления контура  $R_1$  и  $R_2$ .

Точки на графики наносятся с учётом погрешностей измерений.

3. По резонансным кривым, используя соотношение (12а.10), определить добротности контура соответствующее двум значениям активного сопротивления контура  $R_1$  и  $R_2$ . Оценить погрешности полученных результатов.

4. По формуле (12а.9) вычислить значение добротностей  $Q_1$  и  $Q_2$ , учитывая, что в активном сопротивлении контура необходимо учесть сопротивление индуктивности. Оценить погрешности полученных результатов.

5. Сравнить полученные значения со значениями, полученными в п. 4.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Нарисуйте принципиальную схему контура.

2. Зависимость тока от времени в контуре имеет следующий вид:  $i = I_{\max} \sin(\omega t - \varphi)$ . Какими параметрами контура определяются

частота, амплитуда тока и фаза вынужденных колебаний при резонансе?

3. Нарисуйте резонансные кривые для  $I_{\max}$ ,  $U_{R \max}$ ,  $U_{C \max}$  и  $U_{L \max}$ .

4. Нарисуйте векторную диаграмму напряжений в колебательном контуре при резонансе.

5. Что такое добротность контура?

6. Могут ли амплитудные значения напряжений на индуктивности и ёмкости быть больше амплитудных значений внешней ЭДС?

7. Что такое резонанс напряжений?

8. Чему равно полное сопротивление цепи при резонансе?

9. Чем можно характеризовать остроту резонансных кривых?

10. Что такое действующее значение напряжения?

11. Что такое ёмкостное сопротивление контура?

12. Что такое индуктивное сопротивление контура?

13. Что такое полное сопротивление контура?

14. Как экспериментально измерить добротность контура?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. М.: Кнорус, 2009.

2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3. Электричество. М.: Физматлит, 2004.

## Работа 13а РЕЛАКСАЦИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР

---

**Цель:** ознакомление с принципом действия простейшей автоколебательной системы, возбуждающей релаксационные колебания — генератором с неоновой лампой и определение его характеристик

**Оборудование:** генератор ГЗЧМ; 2 модульных блока; вольтметр VC97; вольтметр М-830В; осциллограф.

### ВВЕДЕНИЕ

Неоновая лампа — газоразрядный прибор, конструктивно выполненный в виде двух параллельных или коаксиальных электродов, помещённых в баллон, наполненный неоном при небольшом давлении. Характерной особенностью неоновой лампы является то, что она начинает проводить ток (“зажигается”) только при определённом “напряжении зажигания”  $U_3$ , которое зависит от расстояния между электродами, их формы, от давления газа и гаснет при меньшем “напряжении гашения”  $U_1$ .

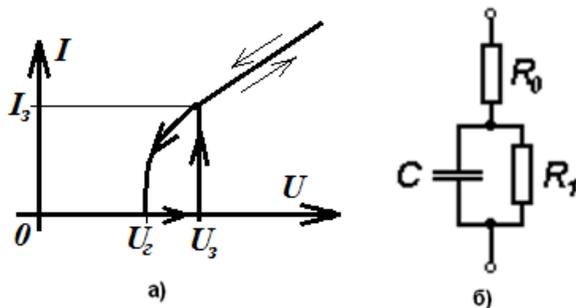


Рис. 13а.1 Вольтамперная характеристика (ВАХ) неоновой лампы (а); эквивалентная схема газоразрядной лампы(б).

Если напряжение на неоновую лампу подаётся со стабилизированного источника напряжения, то вольт-амперная характеристика (ВАХ) лампы будет иметь вид, представленный на рис. 13а.1,а.

Чтобы понять причины “гистерезиса” ВАХ неоновой лампы обратимся к её эквивалентной схеме (рис. 13а.1, б). Внутреннее активное сопротивление лампы  $R$  определяется суммой сопротивления газа в межэлектродном пространстве  $R_1$

и добавочного постоянного сопротивления  $R_0$ .  $C$  – ёмкость лампы. При малых напряжениях на электродах число носителей тока в газе, которыми являются главным образом эмиссионные электроны, мало. Ток через лампу практически равен нулю, поскольку сопротивление газа  $R_1$ , определяемое числом носителей тока, бесконечно велико. При повышении напряжения на электродах лампы эмиссионные электроны ускоряются до больших энергий, что позволяет им, начиная с напряжения зажигания, ионизировать молекулы газа при столкновениях с ними. При достижении напряжения зажигания  $U_3$  в лампе возникает тлеющий разряд: число носителей резко возрастает, так как появляются ионы и вторичные электроны, при этом сопротивление  $R_1$  скачком уменьшается до десятков-сотен Ом (в зависимости от типа лампы). При последующем увеличении напряжения в рабочем диапазоне лампы  $R_1$  практически не изменяется.

Сопротивление  $R_0$  является необходимым встроенным элементом газоразрядной лампы и подбирается таким образом, чтобы после зажигания лампы ток, текущий через лампу был бы меньше предельно допустимого, соответствующего переходу тлеющего разряда в дуговой, способный вызвать разрушение электродов.

При увеличении напряжения на электродах от  $U_3$  до  $U_d$  – предельно допустимого напряжения рабочего диапазона – ток в лампе линейно возрастает. Таким образом, внутреннее динамическое сопротивление лампы  $R_i$ , ( $R_i$  определяется по наклону кривой вольтамперной характеристики  $R_i = dU/dI$ ) является резко нелинейной функцией  $U$ . Так как сопротивление  $R_i$  определяется числом носителей в межэлектродном пространстве, то, уменьшая напряжение на горячей лампе, мы будем наблюдать падение тока через лампу до 0 при напряжении гашения  $U_g$ , меньшем  $U_3$ , так как при  $U_3$  в горячей лампе число носителей соответствует разряду, то есть предельно велико. В связи с инерционностью газоразрядной лампы напряжение гашения для динамических режимов работы лампы может быть немного ниже, чем в квазистатическом режиме.

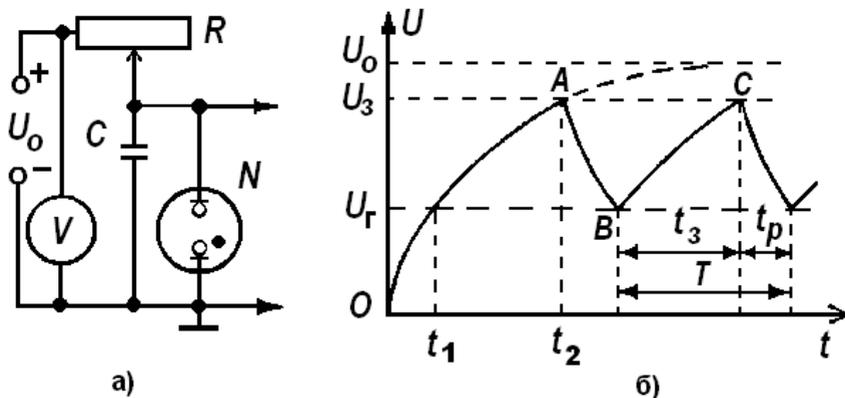


Рис. 13а.2. Электрическая схема включения неоновой лампы в режиме возбуждения релаксационных колебаний(а); форма получаемых релаксационных колебаний (б).

Итак, при увеличении напряжения  $U$  от 0 до  $U_3$ , внутреннее сопротивление лампы бесконечно. В области значений  $U > U_3$  - сопротивление лампы имеет конечное значение. При уменьшении напряжения внутреннее сопротивление остаётся конечным вплоть до  $U=U_r$ , при  $U < U_r$ , снова становится бесконечным.

Следует отметить, что если источник напряжения, питающий неоновую лампу не стабилизирован, то снятая с таким источником ВАХ лампы может иметь отличный от представленного на рис.13а.1,а вид. В этом случае резкое уменьшение сопротивления лампы может приводить к падению напряжения на ней. Однако гистерезисный характер ВАХ сохранится и в этом случае. Именно это свойство неоновой лампы позволяет собрать простейший генератор пилообразных сигналов на её основе.

Рассмотренные “гистерезисные” свойства неоновой лампы объясняют механизм возникновения колебаний в схеме, приведённой на рис.13а.2,а. При включении источника напряжения  $U_0$  вначале происходит зарядка конденсатора  $C$  через сопротивление  $R$  (неоновая лампа  $N$  не горит). Как видно из рис.13а.2,б, напряжение на ёмкости растёт и асимптотически стремится к значению  $U_0$  (кривая  $OA$  на рис.13а.2,б). Но раньше, чем  $U$  достигнет значения  $U_0$ , лампа загорается. Вспышка происходит при  $U=U_3$ . Если  $R$  настолько велико, что ток,

подводимый от источника, значительно меньше разрядного тока через лампу, то конденсатор  $C$  разряжается через лампу (кривая АВ). В тот момент, когда  $U$  станет равным  $U_{\Gamma}$ , лампа погаснет, и конденсатор снова начнёт заряжаться (кривая ВС). Как только  $U$  станет равным  $U_3$ , лампа снова зажётся. Далее процесс будет периодически повторяться. Следовательно, в схеме происходит чередование двух основных стадий — запасания в накопителе (ёмкости  $C$ ) энергии от источника напряжения  $U_0$  и релаксации, когда накопитель освобождается от значительной части энергии (она рассеивается в неоновой лампе). По форме колебания близки к пилообразным. Такие автоколебания, резко отличающиеся от синусоидальных, называются *релаксационными*.

Определим период релаксационных колебаний. Период колебаний  $T$  складывается из времени зарядки конденсатора  $t_3$  и времени его разрядки  $t_p$  (рис.13а.2,б)  $T=t_3+t_p$ . Причём  $t_3=t_2 - t_1$ , где  $t_2$  — время зарядки конденсатора до напряжения  $U_3$ ,  $t_1$  — время зарядки конденсатора до напряжения  $U_{\Gamma}$ . Известно, что напряжение на конденсаторе  $C$ , заряжающемся через сопротивление  $R$  от источника напряжения  $U_0$ , меняется со временем по закону

$$U = U_0 (1 - e^{-t/RC}). \quad (13a.1)$$

Величина  $RC$  называется постоянной времени цепи.

Используя эту формулу, можно получить значения  $U_3$  и  $U_{\Gamma}$ :

$$U_3 = U_0(1 - \exp(-t_2/RC)) \text{ и } U_{\Gamma} = U_0(1 - \exp(-t_1/RC)).$$

Получив из этих формул  $t_1$  и  $t_2$  и подставив их в выражение для времени зарядки конденсатора  $t_3 = t_2 - t_1$ , получим

$$t_3 = RC \ln( (U_0 - U_{\Gamma}) / (U_0 - U_3) ).$$

Таким образом, время зарядки конденсатора определяется постоянной времени  $RC$ .

Время разрядки  $t_p$  определяется постоянной  $R_i C$  ( $R_i$  — внутреннее сопротивление горячей неоновой лампы). Обычно  $R_i \ll R$ . В этом случае  $t_p \ll t_3$ , поэтому период

релаксационных колебаний прямо пропорционален сопротивлению  $R$  и ёмкости  $C$ :

$$T \approx t_3 = RC \ln( (U_0 - U_r) / (U_0 - U_3) ). \quad (13a.2)$$

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На модульном блоке 1 собрана схема, изображённая на рис.13а.3, которая подключается к генератору ГЗЧМ, образуя источник питания, способный выдавать постоянное напряжение  $U \leq 105B$ .

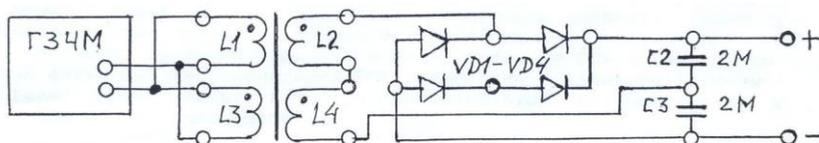


Рис.13а.3. Источник напряжения

На модуле 2 смонтированы: неоновая лампа  $N$ ; набор парных ёмкостей (по 1нФ, 2нФ, 10нФ, 100нФ и 1мФ); набор сопротивлений (1кОм, парные по 10кОм и 30кОм, 100 кОм, 300кОм, 3 Ом, 10 Ом, 30 Ом, 100 Ом) и другие, не используемые в данной работе электротехнические элементы. На основе этого модуля при выполнении работы собирается схема для снятия ВАХ неоновой лампы и релаксационный генератор.

Вольтметр  $V1(VC97)$  предназначен для измерения напряжения на лампе.

Вольтметр  $V2(M-830B)$  используется для измерения напряжения на последовательно включённом с лампой сопротивлении  $R2=10$  Ом. Это напряжение пересчитывается в ток лампы.

Оциллограф служит для наблюдения формы релаксационных колебаний и измерения параметров сигнала.

## ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении работы необходимо соблюдать требования «Инструкции по технике безопасности работы в лаборатории общей физики III семестра».

**Внимание:** сборку схемы и все изменения в ней необходимо проводить при отключённом питании. Перед включением схема должна быть проверена преподавателем или дежурным сотрудником. Категорически запрещается включать источники питания без разрешения преподавателя.

### Задание 1.

#### 1. Снятие вольт-амперной характеристики.

1.1 Собрать схему согласно рис.13а.4, используя модуль 2, содержащий неоновую лампу и сопротивления  $R1=30\text{ кОм}$  и  $R2=10\text{ Ом}$ .

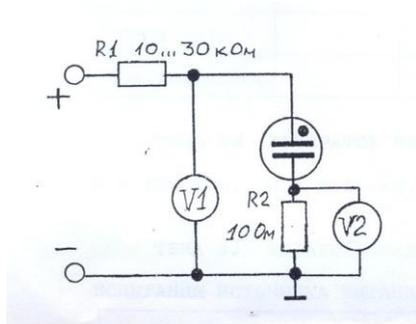


Рис.13а.4. Схема для измерения ВАХ неоновой лампы

1.2 Присоединить, соблюдая полярность, собранную по рис.13а.4 схему к источнику постоянного напряжения, выходы которого находятся на модуле 1, как показано на рис.13а.3. Выставить на генераторе ГЗЧМ частоту  $f=5,0\text{ кГц}$ . (Включение ГЗЧМ производится тумблером, находящимся на задней стенке прибора.)

1.3 Меняя  $U_0$  с помощью ручки «Амплитуда» ГЗЧМ, снять прямую и обратную ветви вольт-амперной характеристики неоновой лампы. Измеряемые значения напряжений занести в заранее подготовленные таблицы. При подготовке таблиц учесть, что прямая и обратная ветви ВАХ должны содержать не менее 15 точек каждая, а также необходимость вычисления тока по измеренному напряжению на сопротивлении  $R2$ . Определить  $U_3$  и  $U_Г$ .

#### 2. Наблюдение релаксационных колебаний.

2.1. Собрать схему согласно рис.13а.5. и присоединить её, соблюдая полярность к источнику напряжения. Выбрать значение ёмкости в диапазоне 5- 100 нФ, сопротивление  $R=100$  кОм.

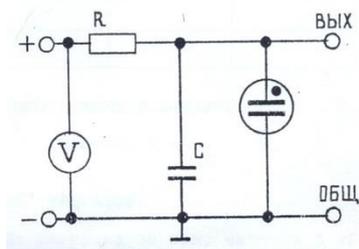


Рис.13а.5. Релаксационный генератор

2.2. Присоединить параллельно лампе осциллограф. Получить на экране осциллографа устойчивую картину колебаний и зарисовать её в рабочий журнал. Измерить с помощью осциллографа амплитуду колебаний.

2.3. Исследовать зависимости периода  $T$  и амплитуды  $\Delta U$  колебаний от ёмкости конденсатора  $C$  при фиксированных: выходном напряжении  $U_0=100$  В и сопротивлении  $R=100$ кОм.

Для этого при подготовке к работе рассчитать и изобразить в лабораторном журнале схемы включения имеющихся в наличии конденсаторов для получения шести различных ёмкостей  $C$  в диапазоне от 5-500 нФ (например: последовательное соединение двух конденсаторов 100 нФ каждый даст новую ёмкость 50 нФ). Заготовить таблицу для записи результатов.

Измерить с помощью осциллографа для шести различных ёмкостей  $C$  из означенного диапазона период релаксационных колебаний и их амплитуду. Результаты измерений занести в таблицу.

2.4. Снять зависимость периода релаксационных колебаний  $T$  от выходного напряжения  $U_0$ , изменяющегося в диапазоне 90-100 В, при фиксированных  $R=100$ кОм и  $C=100$  нФ.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Построить график вольт-амперной характеристики неоновой лампы.

2. Построить графики зависимости  $\Delta U = \Delta U(C)$ ,  $T = T(C)$ ,  $T = T(U_0)$ . На этих же графиках построить теоретические зависимости периодов, используя формулу (13а.2).

### ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. В разделе «Заключение» кратко изложите методику измерений и основные результаты работы.

2. Приведите значения напряжений зажигания и гашения.

3. Проведите сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей  $T(C)$ ,  $T = T(U_0)$ .

4. Проведите анализ погрешностей.

5. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое релаксационные колебания?
2. Расскажите об особенностях вольт-амперной характеристики неоновой лампы.
3. Что такое внутреннее сопротивление лампы и как его найти по вольт-амперной характеристике?
4. Расскажите о принципе действия релаксационного генератора, изображённого на рис. 13а.2а.
5. Какую форму имеют релаксационные колебания в данной работе?
6. Каким должно быть соотношение между сопротивлением  $R$  и внутренним сопротивлением горячей и не горячей неоновой лампы, чтобы период колебаний определялся формулой (13а.2)?
7. Каким способом можно менять период колебаний?
8. Каким образом можно изменить амплитуду колебаний?
9. Из каких соображений выбирается  $U$  в генераторе?
10. Какую форму колебаний имеет генератор развёртки в осциллографе? Можно ли в качестве генератора развёртки

использовать релаксационный генератор? Как искажается при этом форма исследуемого сигнала и почему?

## ЛИТЕРАТУРА

### *Основная*

1. Калашников Н.П., Смондырев М.А. Основы физики. Т.1. М.: Дрофа. 2007.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. М.: Кнорус. 2009.  
*Дополнительная*
3. Фейнмановские лекции по физике. Электричество и магнетизм. Т.5. М.: Мир, 1977.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. Т.3. М.: Физматлит, 3006.
5. Калашников С.Г. Электричество. М.: Физматлит, 2004.
6. Лабораторный практикум курса общей физики. Раздел «Электричество и магнетизм». М.: НИЯУ МИФИ, 2011.

## Работа 14а

### ВИХРЕВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

---

**Цель:** изучение свойств вихревого электрического поля.

**Оборудование:** генератор ГИ импульсов специальной формы; осциллограф ЭО; соленоиды; измерительная плата.

#### ВВЕДЕНИЕ

Из уравнений Максвелла следует, что изменяющееся со временем магнитное поле порождает электрическое. Соответствующее уравнение записывается в виде

$$[\nabla \mathbf{E}] = -\partial \mathbf{B} / \partial t, \quad (14a.1)$$

где  $\mathbf{E}$  — вектор напряжённости электрического поля,  $\mathbf{B}$  — вектор магнитной индукция. Это же уравнение в интегральном виде применительно к соленоиду с использованием цилиндрической системы координат выглядит так

$$\oint_L E_\varphi dl = -\int_S \frac{\partial B_z}{\partial t} dS, \quad (14a.2)$$

где  $E_\varphi$  — круговая (по углу  $\varphi$ ) компонента напряжённости электрического поля;  $B_z$  — осевая (по оси соленоида) компонента магнитной индукции, а интегралы берутся по замкнутому контуру  $L$  и поверхности  $S$ , опирающейся на этот контур.

В работе используется вихревое электрическое поле соленоида, по которому течёт переменный электрический ток. Измерения вихревого электрического поля производятся в перпендикулярном к оси соленоида сечении, проходящем через его середину. Длина соленоида существенно больше его диаметра, поэтому в первом приближении можно считать, что мы имеем дело с бесконечно длинным соленоидом.

Известно, что магнитное поле внутри бесконечного соленоида однородно и его магнитная индукция определяется по формуле

$$B_z = \mu \mu_0 n I, \quad (14a.3)$$

где  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость вещества (для воздуха  $\mu = 1,0000004$ );  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м — магнитная постоянная;  $n$  — число витков соленоида, приходящихся на единицу

его длины,  $I$  — сила тока в соленоиде (рассматривается квазистационарный ток). Вне соленоида магнитная индукция пренебрежимо мала.

Уравнение (14а.2) существенно упрощается, если в качестве поверхности  $S$  взять круг радиусом  $r$ , центр которого находится на оси соленоида, а плоскость перпендикулярна к этой оси. В этом случае  $L$  — это окружность радиусом  $r$ . Так как величина  $\partial B_z/\partial t$  одинакова внутри бесконечного соленоида и практически равна нулю вне его, то правый интеграл равен

$$\begin{cases} \frac{\partial B_z}{\partial t} \pi r^2 & r < R; \\ \frac{\partial B_z}{\partial t} \pi R^2 & r \geq R, \end{cases}$$

где  $R$  — радиус соленоида.

Интеграл в левой части уравнения (14а.2) в силу осевой симметрии задачи равен  $E_\phi \cdot 2\pi r$ . В результате после несложных преобразований получим для модуля напряжённости вихревого электрического поля следующее выражение:

$$E = \begin{cases} \frac{r}{2} \left| \frac{\partial B_z}{\partial t} \right|, & r < R \\ \frac{R^2}{2r} \left| \frac{\partial B_z}{\partial t} \right|, & r \geq R \end{cases} \quad (14а.4)$$

Поскольку  $\partial B_z/\partial t$  не зависит от  $r$ , то напряжённость вихревого электрического поля пропорциональна расстоянию  $r$  от оси соленоида при  $r < R$  и обратно пропорциональна  $r$  при  $r \geq R$ .

В случае, когда ток соленоида меняется по синусоидальному закону

$$I = I_{\max} \cos \omega t,$$

для магнитной индукции в соленоиде ( $\mu = 1$ ) имеем

$$B_z = \mu_0 n I_{\max} \cos \omega t. \quad (14а.5)$$

Соответственно, для модуля напряжённости вихревого электрического поля получим выражения:

$$E = \begin{cases} \frac{\mu_0 n I_{\max}}{2} r \omega |\sin \omega t|, & r < R \\ \frac{\mu_0 n I_{\max}}{2} \frac{R^2}{r} \omega |\sin \omega t|, & r \geq R \end{cases} \quad (14a.6)$$

Из формулы (14a.6) следует, что амплитуда напряжённости вихревого электрического поля пропорциональна круговой частоте переменного тока, проходящего через соленоид, и расстоянию от оси соленоида при  $r < R$  и обратно пропорциональна этому расстоянию при  $r > R$ .

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В работе используются лабораторный комплекс ЛКЭ-5 “Электромагнитные явления”, звуковой генератор импульсов (ГИ) и осциллограф (ЭО) для измерения напряжения. Установка состоит из двух последовательно соединённых соленоидов L1 (рис.14a.1,14a.2), в узкий зазор между которыми вставлена измерительная плата. На измерительной плате в виде колец различных диаметров намотано по  $N=10$  витков тонкой проволоки каждого диаметра (L2). Таким образом, длина проводника, вдоль которого действует вихревое электрическое поле напряжённостью  $E_{\varphi}(r)$ , равна  $2\pi r N$  и, соответственно, на концах его возникает напряжение

$$U(r) = E(r) 2\pi r N. \quad (14a.7)$$

Это напряжение измеряется с помощью осциллографа ЭО. Источником тока для соленоида служит генератор ГИ импульсов специальной формы.

Принципиальная схема и схема соединения соленоидов приведены на рис.14a.1 и 14a.2, где L1 — контур, создающий магнитное поле (два соленоида, соединённые последовательно, причём последовательному соединению соответствует перекрёстное соединение одинаковых клемм соленоидов), R1 — датчик тока (сопротивление  $R=3$  ом), L2 — индукционный датчик электромагнитного поля (одно из колец измерительной платы; всего 10 колец по  $N=10$  витков с радиусами  $r = 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70$  и  $80$  мм). Схема подключения колец показана на рис.14a.3.

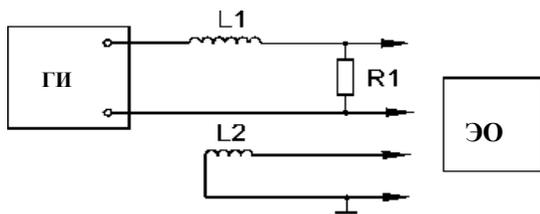


Рис.14а.1. Принципиальная схема

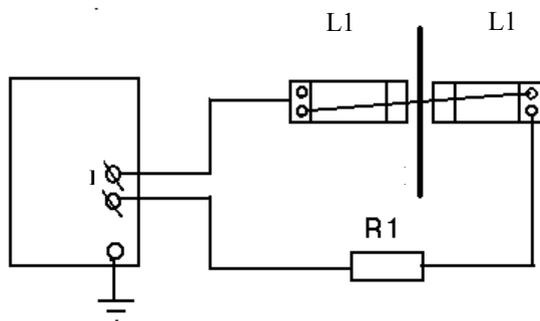


Рис.14а.2. Схема соединения соленоидов

Напряжение  $U(r)$ , измеряемое осциллографом, позволяет определить напряжённость поля в каждом контуре

$$E(r) = U(r)/(2\pi rN) \quad (14a.8)$$

### ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении работы необходимо соблюдать требования “Инструкции по технике безопасности при работе в лаборатории”.

## ЗАДАНИЯ

1. Исследовать временную зависимость напряжённости вихревого электрического поля от характера изменения магнитного поля:

а) Подать пилообразный сигнал от генератора на элементы схемы рис.14а.1 с частотами следования в интервале 300-900 Гц.

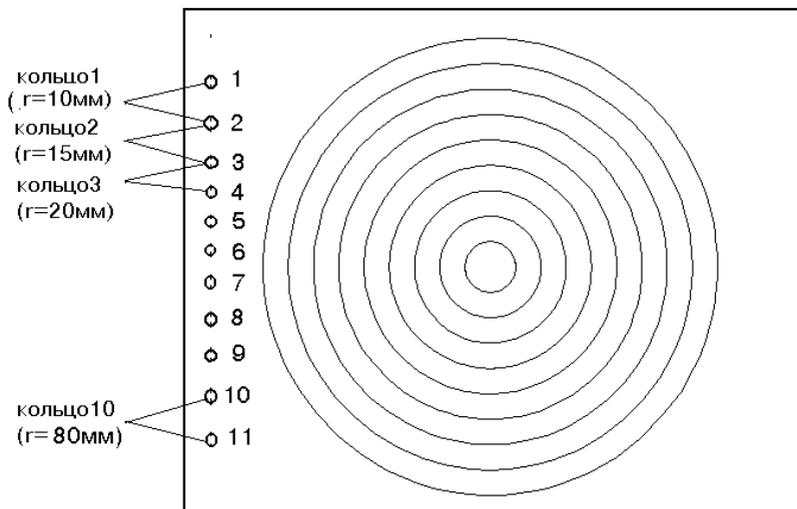


Рис 14а3. Схема подключения колец

Вход II осциллографа подключить к клеммам с кольца радиусом 15 мм, а на вход I подать напряжение с сопротивления R1. В этом случае входом I осциллографа будет измеряться напряжение, пропорциональное индукции магнитного поля  $B_z$  внутри соленоида, а входом II — напряжением, пропорциональное напряжённости вихревого электрического поля на расстоянии 15 мм от оси соленоида.

б) Получить на экране осциллографа устойчивые изображения сигналов по обоим входам.

в) Зарисовать на миллиметровке качественную зависимость напряжений  $U_2(t)$  с кольца, вдоль которого действует вихревое электрическое поле, и  $U_1(t)$ , которое пропорционально индукции магнитного поля  $B_z$  в соленоиде.

г) Аналогичные исследования выполнить и для синусоидального сигнала и построить соответствующие зависимости.

д) Отразить в заключении степень согласия с теорией [см. формулу (14а.4)].

2. Исследовать зависимость напряжённости вихревого электрического поля от скорости изменения магнитного поля. (Для удобства дальнейших измерений сигнал входа I вывести из поля зрения):

а) Для пилообразного сигнала зарисовать (на одном и том же рисунке) зависимости  $U_2(t)$  с кольца  $r = 15$  мм для трёх различных частот следования:  $\nu_1 = 300$  Гц;  $\nu_2 = 600$  Гц;  $\nu_3 = 900$  Гц. Обратить внимание на зависимость амплитуды  $U_2$  от частоты.

б) Для синусоидального сигнала с помощью осциллографа произвести измерения амплитуды напряжения  $U_2$  для кольца радиусом  $r = 15$  мм и десяти различных частот в интервале от 100 Гц до 1000 Гц.

3. Исследовать зависимость напряжённости вихревого электрического поля от расстояния до оси соленоида. Для этого с помощью осциллографа произвести измерения амплитуды напряжения  $U_{max}(r)$  для синусоидального сигнала на частоте  $\nu = 1000$  Гц для всех колец измерительной платы.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По формуле (14а.8) определить значение амплитуды напряжённости вихревого электрического поля  $E_{max}$  при  $r = 15$  мм для всех использованных значений частоты  $\nu$ .

2. Вычислить амплитуду напряжённости вихревого электрического поля  $E_{max}$  по формуле (14.8) при  $\nu = 1000$  Гц для всех колец измерительной платы.

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Построить график зависимости  $E_{max}(\nu)$ . Сравнить характер этой зависимости с тем, что предсказывает теория [см. формулу (14а.6)].

2. Построить график зависимости  $E_{\max}(r)$ . Сравнить характер этой зависимости с тем, что предсказывает теория (см. формулу (14а.6)), если  $R=26$  мм.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Показать направление вектора напряжённости вихревого электрического поля относительно направлений тока в соленоиде для двух случаев: при увеличении тока (по модулю) и при его уменьшении.

2. Как зависит напряжённость вихревого электрического поля от расстояния до оси соленоида?

3. Как будет зависеть от времени напряжённость вихревого электрического поля, если магнитная индукция зависит от времени: а) линейно, б) пилообразно?

4. Получить формулу (14а.7).

5. Почему напряжённость магнитного поля в месте нахождения измерительной платы можно определять по формуле (14а.3), описывающей напряжённость магнитного поля внутри соленоида, хотя плата находится вне соленоида?

6. Каким магнитное поле будет в месте расположения измерительной платы, если соленоиды соединить не перекрёстно?

7. Можно ли при исследовании временной зависимости напряжённости вихревого электрического поля от характера изменения магнитного поля в случае использования пилообразного сигнала от генератора подавать пилообразный сигнал с высокими частотами следования (много больше рекомендуемых)?

8. Как изменится показание вольтметра, если удельное сопротивление провода, из которого сделано кольцо на измерительной плате, существенно увеличится?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 2. Электричество и магнетизм. М.: АСТ, 2007.

2. Иродов И.Е. Электромагнетизм: Основные законы. Учебное пособие. Изд. 7-ое М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009.

## Работа 19а

### СКИН-ЭФФЕКТ В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

---

*Цель:* изучение вихревого электрического поля и скин-эффекта в металлах. определение эффективной глубины скин-слоя.

**Оборудование:** лабораторный комплекс ЛКЭ-5Р «Электромагнитное поле»; звуковой генератор; осциллограф.

#### ВВЕДЕНИЕ

Из уравнений Максвелла следует, что изменяющееся во временем магнитное поле порождает вихревое электрическое:

$$[\nabla \mathbf{E}] = -\partial \mathbf{B} / \partial t = -\mu_0 \mu \partial \mathbf{H} / \partial t. \quad (19a.1)$$

В работе исследуется вихревое электрическое поле двух соединённых последовательно соленоидов, по которым течёт переменный электрический ток при наличии внутри соленоидов металлических сердечников. Измерения электрического поля проводятся с помощью многоконтурного плоского датчика, размещённого в зазоре между соленоидами.

В случае, когда ток  $I$  соленоида меняется по гармоническому закону  $I = I_m \cos(\omega t)$  и отсутствует проводящий сердечник, для магнитной индукции в соленоиде имеем

$$B_z = \mu_0 n I_m \cos(\omega t), \quad (19a.2)$$

где  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м — магнитная постоянная,  $n$  — число витков соленоида, приходящихся на единицу его длины,  $I_m$  — амплитуда силы тока в соленоиде. Известно, что вне бесконечного соленоида магнитная индукция обусловлена токами смещения и для рассматриваемых частот пренебрежимо мала.

Отметим, что в отсутствие проводников, используя теорему Стокса, получаем из (19a.1) с учётом (19a.2) соотношения для амплитуды напряжённости электрического поля:

$$E_{m1} = \mu_0 n I_m \omega / 2 \begin{cases} r, & r < r_0; \\ r_0^2 / r, & r > r_0, \end{cases} \quad (19a.3)$$

где  $r_0 = 0,026$  м — радиус соленоида.

Из формулы (19a.3) следует, что в отсутствие проводников амплитуда напряжённости вихревого электрического поля пропорциональна круговой частоте  $\omega$  переменного тока, проходящего через соленоид, и расстоянию  $r$  от оси соленоида при  $r < r_0$  и обратно пропорциональна этому расстоянию при  $r > r_0$ .

При помещении проводника в переменное электромагнитное поле возникают индукционные токи, приводящие к ослаблению электромагнитного поля внутри проводника. *Скин-эффект* заключается в затухании электромагнитных волн по мере распространения вглубь проводников, в результате которого переменный ток сосредоточивается главным образом вблизи поверхности проводника и почти не проникает вглубь проводника. Для объяснения скин-эффекта воспользуемся уравнениями Максвелла. Запишем дополнительно к (19a.1) уравнение, связывающее напряжённости электрического и магнитного полей  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  в среде с постоянными удельным сопротивлением  $\rho$  и магнитной проницаемостью  $\mu$ :

$$[\nabla \mathbf{H}] = \mathbf{j} = \mathbf{E} / \rho, \quad (19a.4)$$

где  $\mathbf{j}$  — плотность тока проводимости. В правой части уравнения (19a.4) опущено слагаемое  $\partial \mathbf{D} / \partial t$  (плотность тока смещения), так как в проводниках ток проводимости во много раз превышает ток смещения.

Применим операцию *rot* к уравнению (19a.1). Воспользуемся тем, что  $[\nabla[\nabla \mathbf{E}]] = \nabla(\nabla \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}$  и  $\nabla \mathbf{E} = 0$ , тогда  $[\nabla[\nabla \mathbf{E}]] = -\nabla^2 \mathbf{E}$ . Исключим *rot H* с помощью уравнения (19a.4), и в результате получаем

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \mu (1 / \rho) (\partial \mathbf{E} / \partial t). \quad (19a.5)$$

Рассмотрим бесконечно длинный соленоид, заполненный проводящей средой. Введём цилиндрическую систему координат с осью  $z$  вдоль оси соленоида, в которой поле  $\mathbf{E}$  имеет лишь компоненту  $E_\varphi$  и зависит только от расстояния до оси  $r$ . Для периодического поля с частотой  $\omega$  получаем из (19а.5) уравнение

$$1/r \partial/\partial r (r \partial E_\varphi / \partial r) + \alpha^2 \cdot E_\varphi = 0, \quad (19а.6)$$

где  $\alpha = (\mu_0 \mu \cdot i\omega / \rho)^{1/2}$ .

Решение уравнения (19а.6), ограниченное при  $r \rightarrow 0$ , записывается в виде  $E_\varphi = E_0 J_1(\alpha r) e^{-i\omega t}$ , где  $J_1$  — функция Бесселя,  $E_0$  — постоянная. Запишем  $\alpha$  в виде

$$\alpha = \pm (\mu_0 \mu \omega / 2\rho)^{1/2} (1 + i) = \pm (1 + i) / r_s$$

где

$$r_s = (2\rho / \mu_0 \mu \omega)^{1/2} = (\rho / \pi \mu_0 \mu \nu)^{1/2}. \quad (19а.7)$$

Функция Бесселя упрощается в предельных случаях. В случае малых частот  $r_0 / r_s \ll 1$  можно ограничиться первыми членами разложения функции Бесселя:

$$E_\varphi = E_{01} r (1 - i(r/r_s)^2 / 4 - 1/48 (r/r_s)^4) \cdot e^{-i\omega t}, \quad r < r_0.$$

В предельном случае больших частот ( $r_0 / r_s \gg 1$ ) решение уравнения (19а.6) упрощается к виду

$$E_\varphi = E_{02} \exp(-(r_0 - r)/r_s + i((r_0 - r)/r_s - \omega t)), \quad r < r_0. \quad (19а.8)$$

Как следует из (19а.8), амплитуда напряжённости электромагнитного поля убывает при удалении от поверхности проводника вглубь при сильном скин-эффекте по экспоненте:

$$E_m = E_{02} \exp(-(r_0 - r)/r_s). \quad (19a.9)$$

Эту зависимость, полученную, по сути для проводника бесконечных размеров, будем использовать для анализа скин-эффекта и в данной работе. Однако в выражении для  $r_s$ , в отличие от идеализированного случая (19a.7), введём поправочный коэффициент  $a \sim 1$ :

$$r_s = a(\rho / \pi \mu_0 \mu \nu)^{1/2}. \quad (19a.10)$$

Отметим, что аналогичную экспоненциальную зависимость имеет и амплитуда плотности тока  $j_m$ . Магнитное поле примерно по тому же закону также вытесняется из проводящей области.

Величина  $r_s$  называется *эффективной глубиной скин-слоя*. Глубина скин-слоя  $r_s$  равна расстоянию, отсчитываемому от поверхности вглубь проводника, на котором амплитуда поля уменьшается в  $e = 2,72$  раза.

Если  $r_s$  много меньше размеров проводника, то электромагнитное поле вытеснено из всего объёма проводника. Если  $r_s$  больше размеров проводника, то скин-эффект почти не проявляется.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В работе используются лабораторный комплекс ЛКЭ-5Р «Электромагнитное поле» (рис.19a.1), звуковой генератор гармонических сигналов и осциллограф для измерения напряжения.

Схема эксперимента приведена на рис.19a.2, где ЗГ — звуковой генератор, L1 — контур, создающий магнитное поле (два соленоида, соединённые последовательно, причём последовательному соединению соответствует перекрёстное соединение одинаковых клемм соленоидов), R1 — датчик тока, L2 — индукционный датчик электромагнитного поля (один из кольцевых контуров плоского индукционного датчика, всего 9

контуров,  $N = 50$ , радиусы  $r = 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70$  мм). Сигналы с датчиков подаются на осциллограф (ЭО). Схемы последовательного соединения соленоидов и расположения клемм кольцевых датчиков приведены во введении к работе 14а. Напряжение  $U_2$ , измеряемое осциллографом, позволяет определить напряжённость поля в каждом контуре:

$$E_{m2} = U_2 / 2\pi r N \quad (19a.11)$$

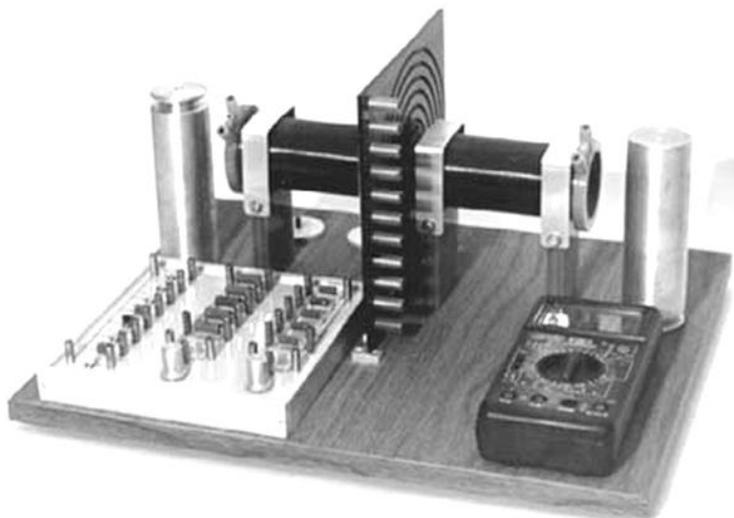


Рис.19а.1. Комплекс ЛКЭ-5М «Электромагнитное поле»

## ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторной работы следует соблюдать общие правила техники безопасности.

Перед включением питания схемы, необходимо проверить правильность её монтажа, правильность начальных положений соответствующих регулировок и переключателей.

Все переключения в схеме выполнять при выключенном источнике питания.

Выполнив измерения, выключить установку и разобрать схему.

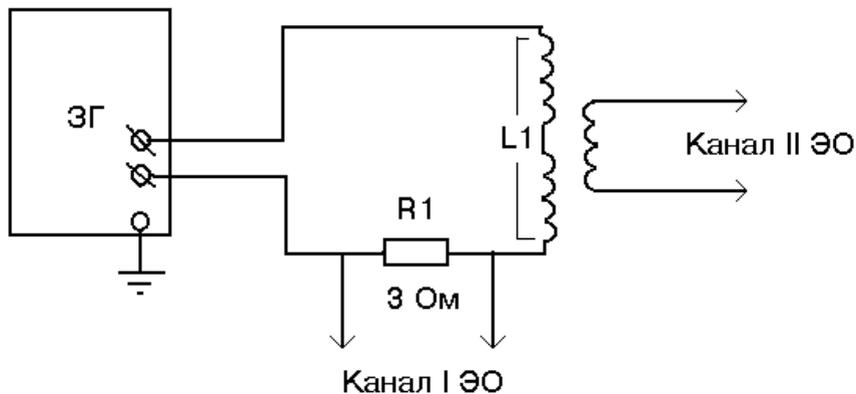


Рис.19а.2. Принципиальная схема эксперимента

## ЗАДАНИЯ

В соленоиды вставить вплотную к датчику два алюминиевых сердечника. Измерить для нескольких значений частот  $\nu$  звукового генератора зависимость от расстояния  $r$  напряжения  $U_2$  внутри соленоида и определить амплитуды напряжённости электрического поля  $E_{2m}$  по формуле (19а.11) внутри проводника. Для сравнения для тех же расстояний и частот рассчитать по формуле (19а.3) амплитуду напряжённости  $E_{1m}$  в отсутствие сердечников. Амплитуду тока определить, измеряя напряжение на активном сопротивлении  $R1=3$  Ом. Результаты занести в заранее подготовленную таблицу. Построить графики  $E_{1m}(r), E_{2m}(r)$  для фиксированной частоты, при которой наиболее сильно проявляется скин-эффект. В случае сильного скин-эффекта зависимость амплитуды напряжённости электрического поля от расстояния до оси соленоида существенно отличается от линейной.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Для случая сильного скин-эффекта оценить по формуле (19а.9) эффективную глубину скин-слоя. Для этого построить графики

$\ln(E_{2m}/E_0)$  как функции  $x = r_0 - r$  для нескольких частот. Постоянная  $E_0$  подбирается из соображений удобства, например, так, чтобы все значения  $\ln(E_{2m}/E_0)$  были положительными. Поскольку согласно формуле (19а.9) зависимость  $E_{2m}(x)$  носит экспоненциальный характер, график  $\ln E_{2m}(x)$  будет прямолинейным:  $\ln E_{2m} = -x/r_s + \text{const}$ . Определить величину  $r_s$  по каждому графику. Построить график зависимости  $r_s$  от частоты  $\nu^{-1/2}$ .

С помощью формулы (19а.10) оценить по графику зависимости  $r_s$  от  $\nu^{-1/2}$  значение коэффициента,  $a$  по известному удельному сопротивлению алюминия  $\rho = 25$  нОм·м.

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

В заключении следует указать значения эффективной глубины скин-слоя, рассчитанные для случая сильного скин-эффекта. Необходимо провести анализ построенных графиков и полученного значения коэффициента  $a$ . Провести анализ погрешностей.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление скин-эффекта?
2. Каков физический смысл эффективной глубины скин-слоя  $r_s$ ?
3. Как глубина скин-слоя зависит от частоты тока, от удельного сопротивления проводника?
4. Какие элементы комплекса «Электромагнитное поле» использованы в данной работе?
5. Каково назначение соленоида в данной работе?
6. В чем особенности сильного скин-эффекта?
7. Какова зависимость от расстояния  $r$  индукции магнитного поля в сердечнике в случае сильного скин-эффекта?
8. Какова зависимость плотности тока проводимости от расстояния  $r$  при наличии проводящего сердечника внутри соленоида?

9. Почему коэффициент  $a$  в реальном случае отличен от 1?  
10. Какие погрешности следует учитывать в данной работе?

## ЛИТЕРАТУРА

### *Основная*

1. Калашников Н.П., Смондырев М.А. Основы физики. Т.1. М.: Дрофа. 2007.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. М.: Кнорус. 2009.

### *Дополнительная*

1. Фейнмановские лекции по физике. Электричество и магнетизм. Т.5. М.: Мир, 1977.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. Т.3. М.: Физматлит., 3006.
3. Калашников С.Г. Электричество. М.: Физматлит, 2004.
4. Лабораторный практикум курса общей физики. Раздел «Электричество и магнетизм». М.: НИЯУ МИФИ, 2011.

## Работа 20а

### ИЗУЧЕНИЕ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

---

**Цель:** исследование цепей переменного тока; определение индуктивности, ёмкости, изучение работы трансформатора.

**Оборудование:** лабораторные комплексы ЛКЭ-1 (N100) и ЛКЭ-2 (N71) (модуль «Цепи переменного тока»); генератор сигналов ГЗЧМ; цифровой мультиметр типа VC97.

#### ВВЕДЕНИЕ

В работе исследуются характеристики цепей переменного тока в контурах, состоящих из ёмкости  $C$ , индуктивности  $L$ , активного сопротивления  $R$  и источника переменной ЭДС  $\varepsilon$ .

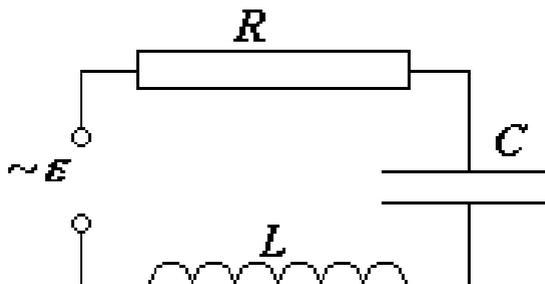


Рис 20а.1. Последовательный  $RLC$  - контур

Положим, что внешняя ЭДС изменяется во времени по гармоническому закону с круговой частотой  $\omega$  и напряжение на входе равно  $U = U_{\max} \cos(\omega t)$ . В этом случае в так называемом последовательном  $RLC$  - контуре (рис 20а.1) могут при определённых условиях возникнуть вынужденные установившиеся электрические колебания с частотой внешней ЭДС. Согласно закону Ома

$$U_L + U_c + iR = U, \quad (20а.1)$$

где  $i$  – ток,  $U_c$  – напряжение на конденсаторе,  $U_L$  – напряжение на индуктивности. Если принять, что индуктивность катушки не зависит от тока, уравнение (20а.1) можно записать в виде

$$L \frac{di}{dt} + \frac{q}{C} + iR = U_m \cos(\omega t). \quad (20a.2)$$

Используя соотношение  $i = \frac{dq}{dt}$ , получим дифференциальное уравнение, которому должна удовлетворять зависимость от времени заряда  $q(t)$  на конденсаторе:

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = U_m \cos(\omega t). \quad (20a.3)$$

Уравнение (20а.3) в случае установившихся колебаний имеет решение, которое запишем для тока  $i$  в виде

$$i = \frac{dq}{dt} = I_m \cos(\omega t - \varphi), \quad (20a.4)$$

где

$$I_m = \frac{U_m}{Z}; \quad (20a.5)$$

$$Z = (R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2)^{1/2}. \quad (20a.6)$$

Здесь  $Z$  — полное сопротивление цепи. Сдвиг фаз  $\varphi$  между внешней ЭДС и током в контуре определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{(\omega L - 1/\omega C)}{R}. \quad (20a.7)$$

Формулу (20а.5), связывающую амплитудные значения тока и внешней ЭДС, называют законом Ома для переменного тока.

Напряжение на активном сопротивлении равно

$$U_R = iR = U_{Rm} \cos(\omega t - \varphi), \quad (20a.8)$$

где  $U_{Rm} = I_m R$  — амплитуда напряжения на активном сопротивлении. С изменением частоты внешней ЭДС изменяется напряжение на ёмкости и индуктивности. Напряжение на конденсаторе

$$U_c = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int i dt = U_{C_{\max}} \cos(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}), \quad (20a.9)$$

где  $U_{C_{\max}} = I_m / \omega C = I_m X_C$  — амплитуда напряжения на ёмкости. Величину  $X_C = 1 / \omega C$  называют ёмкостным сопротивлением. Напряжение на конденсаторе отстаёт от тока по фазе на  $\pi/2$ .

Напряжение на индуктивности

$$U_L = L \frac{di}{dt} = U_{L_{\max}} \cos(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}), \quad (20a.10)$$

где  $U_{Lm} = I_m \omega L = I_m X_L$  — амплитуда напряжения на индуктивности. Величину  $X_L$  называют индуктивным сопротивлением. Напряжение на индуктивности опережает ток по фазе на  $\pi/2$ .

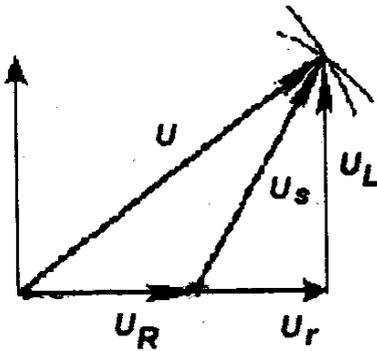


Рис. 20а.2. Векторная диаграмма

Отметим, что обычно при изучении переменного тока, помимо амплитудных значений напряжения или тока ( $I_m$ ,  $U_m$  и т.д.), вводятся так называемые действующие значения ( $I_d = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ ,  $U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$  и т.д.), которые регистрируют амперметры и вольтметры переменного тока. В дальнейшем нижний индекс  $d$  в обозначении

действующего тока или напряжения будем опускать.

Как следует из (20а.6), при некоторой круговой частоте  $\omega$  (величину  $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$ , измеряемую в герцах, будем называть просто частотой), которую можно назвать резонансной и обозначать  $\omega_r$ , ток в последовательном  $RLC$ -контуре достигает максимального значения. При резонансе тока индуктивное сопротивление равно ёмкостному, и полное сопротивление цепи равно активному. Явление резонанса может быть использовано для определения неизвестной ёмкости или индуктивности (катушка, соленоид с сердечником). Изменяя частоту генератора, определяют такое её значение, при котором действующее значение напряжения на активном сопротивлении  $R$  достигает максимального значения. Если параметры контура подобраны таким образом, что резонанс является резко выраженным, то возможно достаточно точно

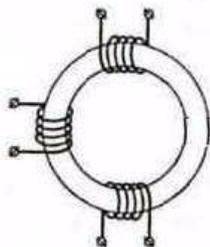


Рис. 20а.3. Схема трансформатора

определить величину  $\nu_r = \frac{\omega_r}{2\pi}$ .

На основе анализа описанных выше фазовых соотношений между напряжениями  $U, U_C, U_L$  и  $U_R$  можно построить так называемую векторную диаграмму напряжений (рис. 20а.2). Величины  $U_s$  и  $U_r$  на диаграмме – полное напряжение на соленоиде и его активном сопротивлении.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Работа выполняется с помощью лабораторного комплекса ЛКЭ -1 или 2 “Электромагнитные явления и устройства”. В качестве источника переменного напряжения используется генератор сигналов ГЗЧМ. Его выходное напряжение изменяется в пределах 1–10 В. Блок–схема «Цепи переменного тока» приведена на рис. 20а.4 (Описания ЛКЭ - 1). На этом рисунке слева вверху установлены три трансформатора с клеммами обмоток. Катушки этих трансформаторов в принципе могут быть использованы

в качестве магазина индуктивностей. Однако кольцевые сердечники трансформаторов изготовлены из ферритов, веществ с особыми ферромагнитными свойствами, позволяющими, в частности, увеличивать индуктивность катушки. В общем случае ферриты, используемые в качестве сердечника, приводят к зависимости индуктивности катушки от тока (через напряжённость магнитного поля). Тем не менее, в случае малых напряжённостей магнитного поля этой зависимостью можно пренебречь. Ферромагнитные свойства, таким образом, накладывают ограничение на используемые токи, а следовательно, и входные напряжения контура. Отметим, что номинал, указанный на ней (например, 50 мГн), может не совпадать с реальной индуктивностью катушки. Электромагнитный комплекс позволяет не только определить индуктивность и ёмкость элементов цепи переменного тока, но и исследовать работу трансформатора.

Отметим, что трансформатором переменного тока называется устройство, осуществляющее увеличение или уменьшение напряжения в несколько раз практически без потери мощности. Трансформатор состоит из замкнутого сердечника, на котором намотаны две или более катушек. Одна из обмоток называется первичной и подключается к источнику переменного напряжения. Другие обмотки, к которым присоединяют так называемую нагрузку, т.е. приборы, потребляющие электроэнергию, называют вторичными. На рис. 20а.3 показана схема такого трансформатора.

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При прохождении переменного тока по первичной обмотке в сердечнике появляется переменный магнитный поток, который возбуждает ЭДС индукции в каждой обмотке. Сердечник из феррита концентрирует магнитное поле, так что поток магнитной индукции  $\Phi$  существует практически только внутри сердечника и одинаков во всех его сечениях. Мгновенное значение ЭДС индукции в любом витке обмоток одинаково. В первичной обмотке, имеющей  $N_1$  витков, полная ЭДС (с учётом потокосцепления) согласно закону Фарадея равна

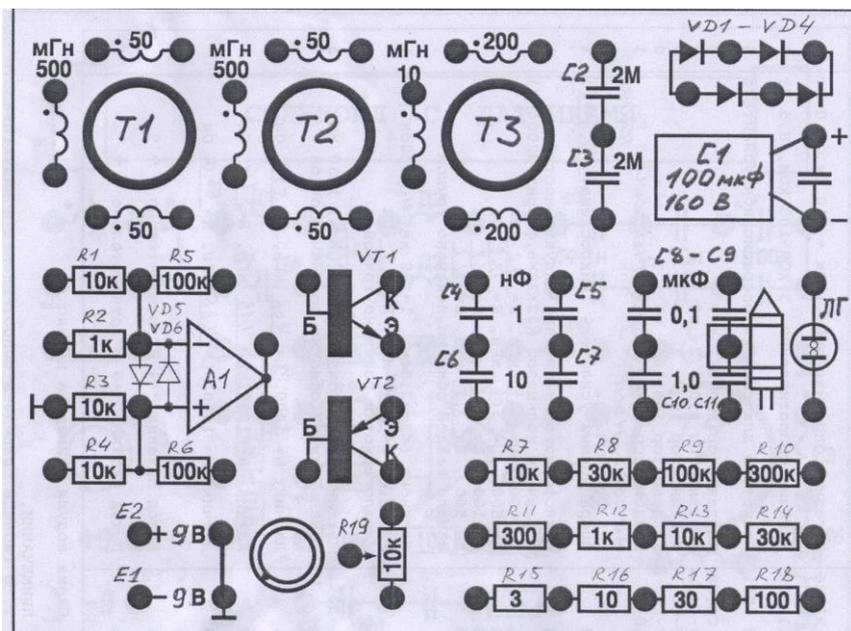


Рис. 20а.4. Схема модуля «Цепи переменного тока».

$$\varepsilon_1 = N_1 \varepsilon_m \cos(\omega t), \quad (20a.11)$$

где  $\varepsilon_m = \omega \Phi_m$ ,  $\Phi_m$  – амплитуда потока магнитной индукции.

В одной из вторичных обмоток с числом витков  $N_2$  полная ЭДС равна

$$\varepsilon_2 = N_2 \varepsilon_m \cos(\omega t), \quad (20a.12)$$

Обычно активное сопротивление обмоток трансформатора мало и им можно пренебречь. Отношение ЭДС во вторичной обмотке к ЭДС в первичной, равное  $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ , можно назвать

коэффициентом трансформации  $K$

$$K = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{N_2}{N_1} \cong \frac{U_2}{U_1}, \quad (20a.13)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  – соответствующие напряжения.

Для измерения напряжений используется цифровой мультиметр типа VC97. Генератор ГЗЧМ обеспечивает напряжение на выходе не более 10 В.

### ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

1. Включает в себя все требования ТБ, с которыми студент ознакомлен на вводной беседе.

2. Прежде чем включить питание схемы, необходимо проверить правильность её монтажа, правильность начальных положений различных регулировок, а также подготовиться к проведению измерений.

#### Задание 1. Определение ёмкости конденсатора

(Использовать комплекс ЛКЭ-1(N100) или ЛКЭ-2 (N71)).

Сигнал от генератора подаётся на исследуемый конденсатор, соединённый последовательно с известным активным сопротивлением (рис. 20а.5)

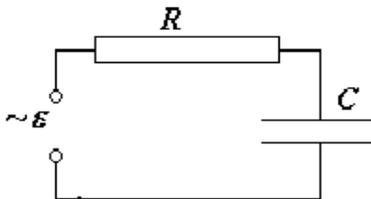


Рис. 20а.5. Последовательный  $RC$  - контур

С помощью вольтметра измеряют действующие значения напряжений на конденсаторе  $U_C$  и на активном сопротивлении  $U_R$ . Измерения повторить несколько раз. При известной частоте сигнала ёмкость определяется по формуле

$$C = U_R / (2\pi\nu R U_c). \quad (20a.14)$$

Повторить измерения для пяти значений частоты и напряжения  $U$  генератора. Вычислить медиану и квартильный интервал.

## Задание 2. Определение индуктивности соленоида

В качестве неизвестной индуктивности рекомендуется использовать одну из обмоток (нижнюю) левого трансформатора, представляющего соленоид с сердечником. На рис. 20а.4 этот трансформатор обозначен Т1. Собрать цепь, состоящую из активного сопротивления, конденсатора и соленоида (см. рис. 20а.1). Методом резонанса оценить индуктивность. Для этого, меняя частоту генератора, подобрать такое её значение  $\nu_r$ , при котором напряжение на активном сопротивлении  $U_R$  достигнет максимального значения. Индуктивность определяется по известным значениям ёмкости и резонансной частоты, совпадающей с собственной частотой контура по формуле

$$L = \frac{1}{4\pi^2\nu_r^2 C} \cdot \quad (20a.15)$$

Рекомендуемые значения параметров:  $R = 100$  Ом,  $C = 1$  мкФ,  $R = 100$  Ом,  $C = 0,1$  мкФ, значения выходного напряжения ГЗЧМ меньше 0.2 мВ.

## Задание 3. Определение индуктивности соленоида методом векторной диаграммы

Собрать цепь, состоящую из резистора  $R$  и индуктивности  $L$  (рис. 20а.6). В качестве индуктивности использовать тот же соленоид, что и в задании 2 (нижняя обмотка левого трансформатора Т1). Следует учитывать, что активное сопротивление контура складывается из активных сопротивлений резистора  $R$  и катушки  $r$ .

Измерить амплитуды напряжений на резисторе  $U_R$ , соленоиде  $U_S$  и генераторе  $U$ . Построить с помощью циркуля векторную диаграмму для этого случая. По векторной диаграмме оценить напряжение  $U_L$ . Индуктивность соленоида рассчитать по формуле  $L = RU_L / (2\pi\nu U_R)$ ;

Провести сравнение полученного значения индуктивности с результатом задания 2.

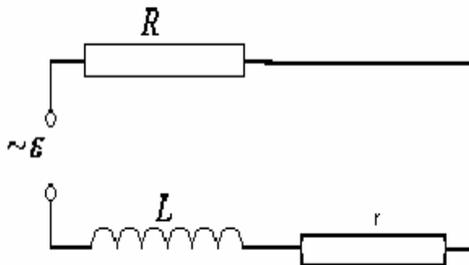


Рис. 20а.6. Последовательный  $RL$  - контур

#### **Задание 4. Определение коэффициента трансформации**

Подайте на нижнюю катушку трансформатора Т1 с генератора сигналов ГЗЧМ напряжение  $U_1$  в диапазоне 1–3 В с частотой порядка 1000 Гц. Измерить напряжение  $U_2$  на верхней вторичной обмотке трансформатора. Определить коэффициент трансформации  $K_1$  по формуле (20а.13). Аналогичным образом определить коэффициент трансформации  $K_2$ . Провести пять измерений коэффициента трансформации. Вычислить медиану и квартильный интервал.

#### **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ**

Вычислить погрешности измерений электрической ёмкости конденсатора. Определить погрешности измерений индуктивности катушки, выполненных различными методами резонанса и векторной диаграммы.

#### **ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ**

1. Результаты, полученные в задании 1, рекомендуется представить в следующей Табл.20а.1.

Таблица 20а.1

$R, \text{Ом}$			
$U_R, \text{В}$			
$\nu, \text{Гц}$			
$U_c, \text{В}$			
$C, \text{мкФ}$			

2. По измеренной в задании 2 резонансной частоте рассчитать индуктивность катушки  $L$ .

3. Результаты, полученные в задании 3, рекомендуется представить в табл.20а.2

Таблица 20а.2

$\nu, \text{Гц}$	$U, \text{В}$	$U_R, \text{В}$	$U_s, \text{В}$	$U_r, \text{В}$	$U_L, \text{В}$	$L, \text{мГн}$

Сравнить значения индуктивности, полученные обоими методами.

4. Сравнить значения экспериментального и расчётного коэффициента трансформации.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Нарисуйте принципиальную схему контура.
2. Что такое действующее значение напряжения?
3. Что такое ёмкостное сопротивление контура?
4. Что такое индуктивное сопротивление контура?
5. Что такое полное сопротивление контура?
6. Как строится векторная диаграмма для цепи, состоящей из катушки индуктивности, имеющей активное сопротивление, и резистора?
7. Как можно измерить неизвестную индуктивность?
8. Как можно измерить неизвестную ёмкость?

9. Как определить индуктивность методом резонанса?
10. Как устроен трансформатор переменного тока?
11. Что такое потокосцепление?

## **ЛИТЕРАТУРА**

### *Основная*

1. Н.П.Калашников, Смондырев М.А. Основы физики, М.: Дрофа, Т.2, 2007
2. И.В.Савельев, Курс общей физики, Электричество и магнетизм, АСТ Астрель, 2008, 336 с.
3. Светозаров В.В., Основы статистической обработки результатов измерений, Учебное пособие, МИФИ, 2005.
4. Аксенова Е.Н., Гасников Н.К., Калашников Н.П. Методы оценки погрешностей результатов прямых и косвенных измерений в лабораториях физического практикума, МИФИ, 2009.

### *Дополнительная*

3. И.Е.Иродов, Электромагнетизм: Основные законы: Учебное пособие для студентов физических специальностей вузов, 2006, Лаборатория Базовых Знаний, Физматлит, 319с.

## Работа 23

### ИЗМЕРЕНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ КОМПАСА И КАТУШКИ С ТОКОМ

**Цель:** ознакомление с прибором тангенс-буссоль и применение его для измерения постоянных во времени (стационарных) магнитных полей.

**Оборудование:** географический компас; кольцевая катушка; источник постоянного тока; реостат; мультиметр; постоянный магнит в форме кольца; соединительные провода.

#### ВВЕДЕНИЕ

Тангенс-буссоль. Обыкновенный магнитный компас широко используется для ориентирования на местности или на море: его стрелка самоустанавливается в направлении горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли в том месте, где он находится. Если же компас совместить с кольцевой катушкой, по которой может протекать электрический ток, то появляется возможность определить и величину магнитной индукции. Соответствующий прибор называется тангенс-буссоль. Его действие основано на том, что магнитный дипольный момент  $\vec{p}$  (стрелка компаса) в скрещенных магнитных полях находится в равновесии при условии равенства нулю моментов сил, приложенных к диполю (рис.23.1).

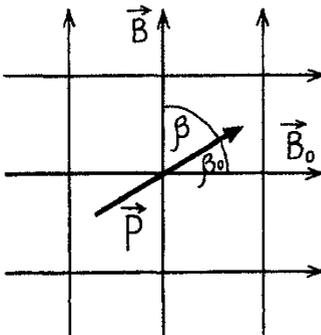


Рис. 23.1. Принцип действия тангенс-буссоли.



Столик 2 с компасом 3 вставлен в катушку так, что центры компаса и катушки совпадают. В корпус компаса залит глицерин для быстрого гашения колебаний стрелки около положения равновесия. Кроме этого в нём плавает небольшой пузырёк воздуха, который даёт возможность установить столик горизонтально, что необходимо для нормальной работы компаса. Лимб компаса с ценой деления  $5^\circ$  используется для измерения угла поворота магнитной стрелки относительно плоскости катушки.

На основании установки расположен лимб 4 с ценой деления  $2^\circ$  для определения направления вектора магнитной индукции в лабораторной системе отсчета; измерение соответствующего угла производится с помощью указателя 5.

Координатные оси  $X$  и  $Y$  представляют собой измерительные линейки с ценой деления 0,5 см, точка  $O$  пересечения осей имеет координаты  $x_0 = -6,5$  см,  $y_0 = +25,5$  см. Ось  $Z$  представляет собой вертикальный штырь 6, на который насаживается тангенс-буссоль, он находится на оси  $X$  в точке с координатой  $x_B = +27,5$  см.

Схема подключения прибора к источнику тока показана на рис. 23.3.

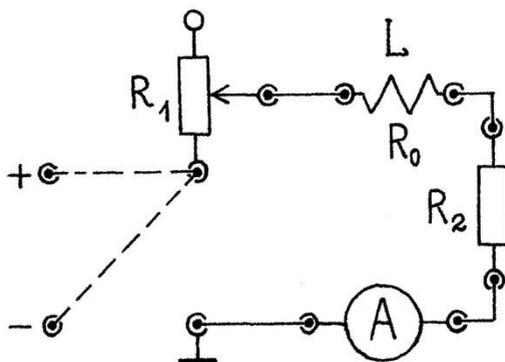


Рис. 23.3. Принципиальная электрическая схема подключения тангенс-буссоли к источнику тока

Кольцевая катушка  $L$  (рис. 23.2 позиция 1) подключается к клеммам «+» или «--» и «земля» источника ЭДС через переменный резистор (реостат)  $R_1$ , который служит для плавного изменения силы тока в катушке, резистор  $R_2$ , ограничивающий ток в цепи (его сопротивление не меньше сопротивления катушки  $R_0$ ,

плюс остаточное сопротивление реостата) и амперметр  $A$ . В качестве амперметра используется мультиметр M830B в режиме измерения тока в четырех диапазонах: от 0 до 2000 мкА с абсолютной приборной погрешностью  $(2+I/100)$  мкА; от 0 до 20 мА с погрешностью  $(0,02+I/100)$  мА; от 0 до 200 мА с погрешностью  $(0,2+1,2 \cdot I/100)$  мА; от 0 до 10 А с погрешностью  $(0,02+2 \cdot I/100)$  А. Все эти диапазоны могут понадобиться в работе. На схеме контактные гнезда показаны кружочками « $\circ$ », соединительные провода – отрезками « $\bullet$ — $\bullet$ », пунктиром показан один и тот же провод, с помощью которого можно изменять направление тока в катушке. Источник тока снабжён выключателем (на схеме не показан), напряжение источника ЭДС между клеммами «+» или «-» и «земля»  $\approx 9$  В, а между клеммами «+» и «-»  $\approx 18$  В.

После того, как тангенс-буссоль установлена на своё место и подключена к источнику тока, прибор готов к измерениям. В этой работе измеряются геомагнитное поле и поле постоянного магнита.

### ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

1. Не нарушать изоляцию соединительных проводов и контактных соединений.
2. Изменять направление тока в цепи питания катушки тангенс-буссоли следует при выключенном источнике ЭДС.

### ЗАДАНИЯ

При подготовке к работе: 1) вычислить коэффициент пропорциональности  $K$  в мкТл/мА, который нужен во всех заданиях для определения неизвестной индукции по формуле (23.1) и вписать его и те величины, значения которых упомянуты в описании, в таблицы лабораторного журнала; 2) вывести формулу для вычисления индукции  $B_{м,о}$  в центре постоянного магнита, т.е. ответить на контрольный вопрос № 10.

## Задание 1.

### Измерение горизонтальной составляющей индукции геомагнитного поля

1. Руководствуясь рис. 23.2, собрать тангенс-буссоль и поставить её на штырь (позиция б).

2. По рис. 23.3 собрать схему питания катушки  $L$  и подключить её к источнику ЭДС, который при этом должен быть выключен. **Внимание!** Перед проведением опыта удалите постоянные магниты не менее чем на 2 м от катушки и положите их плашмя. Убедитесь, что поле магнита не влияет на отклонение стрелки компаса.

3. Дайте стрелке компаса занять равновесное положение. Сориентируйте катушку так, чтобы стрелка оказалась в плоскости катушки, при этом стрелка и указатель 5 (см. рис. 23.2) должны быть сонаправлены. Сделайте отсчёт угла  $\alpha_{\oplus}$  по лимбу 4 и запишите его в табл. 23.1 с погрешностью: этот угол задаёт направление индукции геомагнитного поля  $\mathbf{B}_{\oplus}$  в лабораторной системе координат (символ " $\oplus$ ") общепринят в астрономии для обозначения нашей планеты).

4. Присоедините провод от реостата к клемме «+» источника ЭДС. Включите мультиметр в режим измерения тока в диапазоне до 20 мА. Включите источник тока и, регулируя ток в катушке реостатом, получите отклонение магнитной стрелки по лимбу компаса на  $45^\circ$  относительно её положения при отсутствии тока в катушке. Запишите в табл. 23.1 соответствующее значение силы тока  $I_+$  без знака. Выключите источник тока, пересоедините провод от реостата к клемме «-» и включите источник. Повторите предыдущее измерение и результат его  $I_-$  внесите без знака в ту же таблицу.

Таблица 23.1. Геомагнитное поле

$K =$		мкТл/мА		$\alpha_{\oplus} =$	
Ток в буссоли, мА		Магнитная индукция, мкТл			
$I_+$	$I_-$	$B_+$	$B_-$	$B_{\oplus}$	$\Delta B_{\oplus}$

По формуле (23.1) вычислите  $B_+$  и  $B_-$  и их полусумму запишите как  $B_{\oplus}$ . Используя модуль погрешности, приборную погрешность силы тока и относительную погрешность индукции из-за отсчёта угла по лимбу компаса  $\approx 7\%$ , найдите  $\Delta B_{\oplus}$ .

В заключении к работе сравните  $B_{\oplus}$  с табличным значением для Москвы.

## Задание 2.

### Измерение поля постоянного магнита

Основной целью этого задания является не измерение магнитного поля самого по себе, а установление на его основе параметров магнита: магнитного дипольного момента  $\mathbf{p}$ , намагниченности  $\mathbf{J}$  и тока намагничивания  $I'$ . Постоянный магнит представляет собой кольцо из магнитножесткого ферромагнетика, однородно намагниченное вдоль его геометрической оси, с внутренним диаметром  $d_1 = 23,7$  мм, внешним диаметром  $d_2 = 60,9$  мм, толщиной  $h = 9,05$  мм и объёмом  $V = (22,4 \pm 0,2)$  см<sup>3</sup>.

Магнитный дипольный момент такого магнита  $\mathbf{p} = \mathbf{J} \cdot V$ . Магнитное поле, которое он создаёт на расстояниях  $r \gg d_1, d_2, h$ , является полем магнитного диполя:

$$\mathbf{B} = (\mu_0/4\pi) [3(\mathbf{pr})\mathbf{r} - \mathbf{pr}^2]/r^5,$$

где  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор точки относительно центра магнита, в которой индукция равна  $\mathbf{B}$ . Из общей формулы следуют два частных случая, используемые в этом задании для определения  $\mathbf{p}$ :

поле на оси диполя

$$\mathbf{B} = (\mu_0/4\pi) \cdot 2\mathbf{p}/r^3, \quad (23.2)$$

поле в точках плоскости, перпендикулярной оси и проходящей через центр диполя,

$$\mathbf{B} = -(\mu_0/4\pi)\mathbf{p}/r^3. \quad (23.3)$$

В этом задании необходимо учитывать влияние геомагнитного поля на результаты измерений. Рис. 23.4 поясняет способ учёта магнитного поля Земли путём дополнительных измерений.

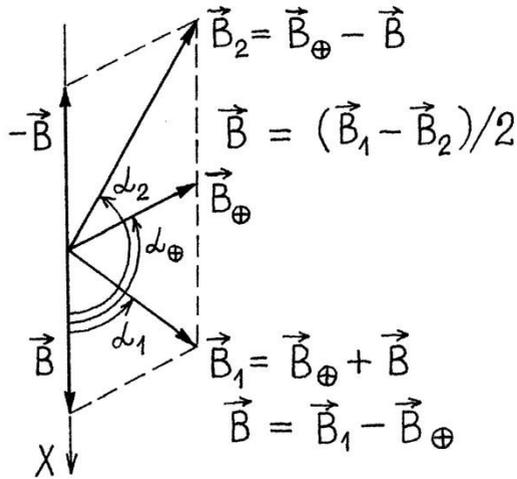


Рис. 23.4. Учёт магнитного поля Земли при измерении поля постоянного магнита.

На рисунке показано поле на оси постоянного магнита, которая совпадает с осью  $X$ . Вначале измеряется поле  $B_1$  и угол  $\alpha_1$ , затем магнит разворачивается на  $180^\circ$  и измеряется  $B_2$  и  $\alpha_2$ . После этого поле магнита вычисляется по формуле

$$B_M = |B_1 \cos \alpha_1 - B_2 \cos \alpha_2| / 2, \quad (23.4)$$

если определяется поле в плоскости кольца магнита, то оно параллельно оси  $Y$ , и расчётная формула несколько изменяется:

$$B_M = |B_1 \sin \alpha_1 - B_2 \sin \alpha_2| / 2. \quad (23.5)$$

Измерения полностью аналогичны 1-му заданию, другим может оказаться только подходящий диапазон для силы тока в катушке.

1. Установить постоянный магнит на вертикальный штырь, который находится на оси  $X$  в точке с координатой  $x_M = -2,5$  см. При этом расстояние между магнитом и bussолью  $r_M = 30$  см, что примерно в 10 раз больше радиуса магнита! Повернуть магнит так, чтобы его ось совпала с осью  $X$ . Измерить  $B_1$  и  $\alpha_1$ , результаты записать в табл. 23.2.

2. Повернуть магнит на  $180^\circ$ , измерить  $B_2$  и  $\alpha_2$ , результаты занести в ту же таблицу. По формуле (23.4) вычислить  $B_m$  и по формуле (23.2) найти дипольный момент  $p$  магнита и оценить погрешность.

Таблица 23.2. Поле постоянного магнита

$p \parallel X$		Ток в буссоли, мА		Магнитная индукция, мкТл			
$i$	$\alpha_i$	$I_+$	$I_-$	$B_+$	$B_-$	$B_i$	$\Delta B_i$
1							
2							
$r_m =$ см		$B_m =$ мкТл		$p =$		$A \cdot m^2$	

3. Магнит повернуть так, чтобы его ось стала параллельна оси  $Y$  и проделать необходимые измерения, как в п. п. 1, 2. Результаты внести в такую же таблицу, которую в лабораторной тетради можно просто присоединить к табл. 23.2 и написать в левом верхнем углу  $p \perp X$ . По формуле (23.5) вычислить  $B_m$  и по формуле (23.3) найти дипольный момент  $p$  с погрешностью.

По результатам измерений вычислить дипольный момент магнита как среднее из значений, полученных в п. п. 2, 3 и оценить погрешность. Определить намагниченность  $J$ , поверхностный ток намагничивания  $I' = Jh$  и магнитную индукцию  $B_{m,0}$  в центре постоянного магнита.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

В работе должны быть рассчитаны следующие физические величины и их погрешности:

- 1) коэффициент пропорциональности  $K$  в формуле (23.1) в мкТл/мА;
- 2) горизонтальная составляющая индукции магнитного поля Земли  $B_\oplus$  в мкТл;
- 3) дипольный момент  $p$  постоянного магнита в  $A \cdot m^2$ ;
- 4) намагниченность  $J$  ферромагнетика, из которого изготовлен магнит, в А/м;

- 5) поверхностный ток намагничивания  $I'$  ( в А) на внешней и внутренней цилиндрических поверхностях магнита;
- 6) магнитная индукция  $B_{m,0}$  в центре магнита в Тл.

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Заключение к работе должно содержать следующую информацию:

- 1) горизонтальную составляющую индукции геомагнитного поля и сравнение ее с табличным значением для Москвы;
- 2) магнитный дипольный момент постоянного магнита;
- 3) вывод о влиянии магнитного поля Земли на измерения магнитного поля постоянного магнита во втором задании;
- 4) намагниченность ферромагнетика, из которого изготовлен магнит;
- 5) поверхностный ток намагничивания;
- 6) магнитную индукцию в центре магнита.

Естественно, что все физические величины, найденные по результатам измерений, должны приводиться с погрешностями.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое индукция  $\mathbf{B}$  магнитного поля по определению?
2. Как направлен магнитный дипольный момент стрелки географического компаса?
3. Напишите формулу для вычисления результирующего момента  $\mathbf{N}$  сил Ампера, приложенных к магнитному дипольному моменту  $\mathbf{p}$ , помещённому в магнитное поле с индукцией  $\mathbf{B}$ .
4. Как найден вклад 7% в погрешность магнитной индукции (см. текст за табл. 23.1)?
5. Дайте определение магнитного дипольного момента  $\mathbf{p}$  контура с током.
6. Изобразить на рисунке с помощью линий вектора  $\mathbf{B}$  примерную картину магнитного поля в осевом сечении кругового витка с электрическим током.
7. Что такое намагниченность  $\mathbf{J}$  магнетика по определению?
8. Вывести формулу для вычисления силы поверхностного тока намагничивания  $I'$ .

9. Выведите формулы (23.2) и (23.3) из общего выражения для поля магнитного диполя.

10. Как вычислить магнитную индукцию  $B_{m,0}$  в центре постоянного магнита?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Калашников Н.П., Смондырев М.А. Основы физики. Т.1. Учебник для вузов. Изд. 3-е, стереотип. М.: Дрофа, 2007.
2. Савельев И.В. Учебное пособие в 5 т.т. Изд. 5-е, испр. - СПб.: Издательство «Лань», 2011. Том 2 «Электричество и магнетизм».
3. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. – М.: 2004 г.

## Работа 24

### ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИНДУКЦИОННЫМ ДАТЧИКОМ

---

**Цель:** изучение методов создания магнитного поля и измерение индукции этого поля с помощью индукционного эталонного датчика.

**Оборудование:** Лабораторный комплекс ЛКЭ-1, электронный осциллограф «MATRIX MOS620», генератор функциональный типа ГЗЧМ, контур «Модель прямого тока», соленоид на стойках, набор сопротивлений на блоке модулей «Электрические цепи», плоский индукционный датчик, пара катушек Гельмгольца, соединительные провода, мультиметр типа М-830В.

#### ВВЕДЕНИЕ

**Методы создания магнитного поля.**

**Поле прямого проводника с током.** Простейшим устройством, создающим магнитное поле, является проводник с током (рис. 24.1, а). В пространстве вокруг него существует поле, индукция которого (в случае прямого бесконечно длинного проводника) на расстоянии  $r$  от него определяется формулой

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{r}, \quad (24.1)$$

где  $I$  – сила тока в проводнике,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная. Поле проводника с током неоднородно.



Рис. 24.1. Индукция магнитного поля, создаваемого: а – прямым проводником с током; б – круговым проводником с током.

**Поле кругового проводника с током.** Если проводник согнуть в кольцо радиуса  $r$  (рис. 24.1, б), поле в центре кольца будет иметь индукцию

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi I}{r}. \quad (24.2)$$

Это поле также неоднородно при смещении вдоль оси кольца.

**Соленоид.** Если провод намотать на цилиндрический каркас, то получится устройство, называемое соленоидом (рис. 24.2).

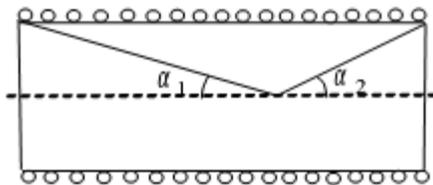


Рис. 24.2. Устройство соленоида.

Индукция магнитного поля на оси соленоида вычисляется по формуле

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 n I (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2), \quad (24.3)$$

где  $n$  – число витков на единицу длины,  $I$  – сила тока в обмотке соленоида,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы, под которыми видны концы соленоида из точки на его оси, к которой относится величина  $B$  (рис. 24.2). В случае достаточно длинного соленоида (длина которого значительно превосходит его радиус), для точек на оси соленоида в его середине углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  близки к нулю и индукцию в этой области объёма соленоида можно вычислять по формуле:

$$B = \mu_0 n I, \quad (24.4)$$

Радиальная неоднородность поля в середине соленоида незначительна. Простые соленоиды позволяют получать поля с индукцией до 0,2 Тл. Соленоиды с охлаждением обмотки позволяют получать поля до 10 Тл. Есть соленоиды, через обмотки которых пропускается ток силой в десятки килоампер, а расход воды для охлаждения составляет сотни кубометров в секунду. Сверхпроводящие соленоиды обеспечивают получение полей с индукцией несколько десятков тесла.

**Катушки Гельмгольца.** Система двух одинаковых катушек, расположенных соосно, носит название катушек Гельмгольца. Две соосные катушки, соединённые между собой последовательно и разнесённые на расстояние, равное их радиусу, создают почти однородное магнитное поле в области, сравнимой по размерам с радиусом катушек.

**Использование индукционного эталонного датчика для измерения индукции магнитного поля.** В основе принципа измерения магнитного поля индукционным датчиком лежит закон электромагнитной индукции. Эталонный датчик магнитного поля имеет подвижную часть измерительную катушку, параметры которой (число витков и диаметр) заранее известны. Измерительную катушку датчика помещают в область пространства, где необходимо измерить величину индукции. Пусть эта катушка содержит  $N$  витков при площади поперечного сечения  $S$ . Пусть в момент времени  $t_1$  индукция была  $B_1$ , а в момент времени  $t_2$  индукция стала  $B_2$ . Приращение магнитного потока  $\Delta\Phi$  через измерительную катушку при этом

$$\Delta\Phi = (B_2 - B_1) \cdot S = \Delta B \cdot S.$$

Приращение потокосцепления измерительной катушки

$$\Delta\Psi = \Delta\Phi \cdot N = \Delta B \cdot S \cdot N.$$

В течение времени  $\Delta t = t_2 - t_1$  в измерительной катушке будет наводиться ЭДС индукции, среднее значение которой равно

$$\langle \varepsilon \rangle = - \frac{\Delta\Psi}{\Delta t}. \quad (24.5)$$

В цепи измерительной катушки потечет ток, сила которого  $i$  определяется уравнением

$$\varepsilon = i \cdot R + L \frac{di}{dt}, \quad (24.6)$$

где  $L$  – индуктивность катушки,  $R$  – активное сопротивление катушки. С учетом (24.5) уравнение (24.6) принимает вид

$$- \frac{d\Psi}{dt} = i \cdot R + L \frac{di}{dt}.$$

Проинтегрируем его по времени в пределах от  $t_1$  до  $t_2$ :

$$\Delta\Psi = R \int_{t_1}^{t_2} i \cdot dt + L \cdot [i(t_1) - i(t_2)].$$

Пусть при  $t=t_1$  через измерительную катушку начал протекать ток, а при  $t=t_2$  ток кончился. Тогда при  $t=t_1$  и при  $t=t_2$  имеет место  $i=0$ , поэтому

$$\Delta\Psi = R\Delta Q,$$

где  $\Delta Q$  – заряд, прошедший через катушку за время  $\Delta t$ .

Отсюда получим величину этого заряда

$$\Delta Q = \frac{\Delta\Psi}{R} = \frac{\Delta B \cdot S \cdot N}{R}.$$

Таким образом, при изменении индукции на величину  $\Delta B$  через измерительную катушку ЭДС электромагнитной индукции будет равна:

$$\varepsilon = -NS \frac{dB}{dt}.$$

Изменение индукции  $\Delta B$  можно получить, изменив ток в системе, создающей магнитное поле (в проводящем контуре, соленоиде, электромагните и т.п.). В работе измерения магнитного поля проводятся при переменном токе синусоидальной формы. Если катушку быстро вывести из области магнитного поля, магнитный поток через неё изменится так же, как при изменении тока от  $I$  до 0.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Назначение отдельных блоков и устройств приведено в описании Лабораторного комплекса ЛКЭ-1. Для измерения магнитного поля используется индукционный эталонный (с заранее известными параметрами) датчик. Датчик представляет собой измерительную катушку из  $N_0=250$  витков диаметром 18 мм (площадь витка  $S_0=2,5 \text{ см}^2$ ), закреплённую на кронштейне в стойке на рейтере, который может перемещаться по рельсу. Под рельсом закреплена линейка, для отсчёта координат у метки, нанесённой на рейтере. Расстояние между вертикальной осью измерительной катушки и меткой датчика составляет около 18 см. Эту поправку необходимо учесть для корректного определения координаты у точки, в которой производится измерение.

Так как датчик регистрирует составляющую магнитного поля  $B$ , параллельную оси катушки, подвижную измерительную катушку следует ориентировать на максимум ЭДС.

Схема регистрации магнитного поля индукционным методом приведена на рис. 24.3.

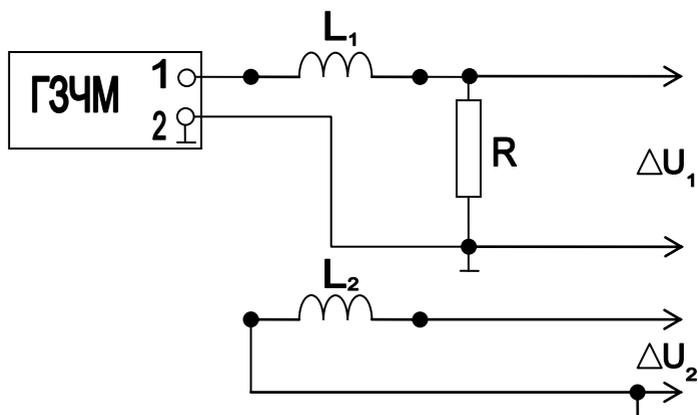


Рис. 24.3. Индукционный метод регистрации магнитного поля.

На рис. 24.3 показаны  $L_1$  – контур, создающий магнитное поле,  $R$  – датчик тока,  $L_2$  – индукционный эталонный датчик. Сигналы с датчиков поступают на два входа электронного осциллографа (ЭО) «MATRIX MOS620» или на вход мультиметра.

Источником тока служит генератор импульсов ГЗЧМ (Генератор Звуковой Частоты/Метроном). Измерения проводятся на синусоидальном сигнале генератора. Рабочее значение частоты генератора выбирается в диапазоне от 1 до 100 кГц.

В зависимости от измерительных приборов ЭО (или мультиметр), измеряют:

- размах напряжения  $\Delta U_1$  на экране ЭО от датчика тока или эффективное напряжение на датчике тока;
- размах индукционного напряжения  $\Delta U_2$  на экране ЭО от эталонного датчика. Размах напряжения равен удвоенной амплитуде сигнала. Конструкция этого датчика не позволяет проводить измерения мультиметром.

Указанный диапазон частот ГЗЧМ выходит за пределы рабочих частот мультиметра М-830В, поэтому измерения мультиметром в работе не производятся.

## ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

1. Запрещается включение питания схемы без её проверки преподавателем или дежурным сотрудником.
2. Все изменения в схеме производить после предварительного уменьшения напряжения.
3. При работе с установкой не касаться оголённых участков схемы.
4. Не оставлять установку включённой без присмотра.

## ЗАДАНИЯ

**Подготовить установку к измерениям.** Чёрный провод подсоединить к гнезду , красный (сигнал) к  на передней панели ГЗЧМ.

Ручку выбора формы сигнала установить в крайнее левое положение ”~”.

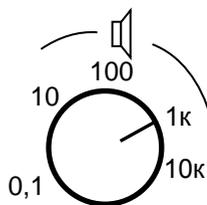
Кнопкой под дисплеем выбрать режим «частота», при этом загорится индикатор под надписью «частота».

Частота устанавливается ступенчато ручкой выбора диапазонов и плавно.

Выходное напряжение установить в диапазоне 6 – 10 В.

Включить питание электронного осциллографа «MATRIX MOS620» кнопкой POWER.

В блоке синхронизации «TRIGGER» установить ручку выбора режима синхронизации «MODE» в положении «AUTO» - автоматическая. Переключатель источника сигнала синхронизации «SOURCE» в положении «CH1» (канал 1). Переключатель выбора



режима «MODE», находящийся между каналами 1 и 2 – в положении «DUAL». Разъем CH1 подсоединить к эталонному датчику, разъем CH2 к датчику тока.

### Задание 1. Измерение индукции магнитного поля прямого тока.

Собрать схему в соответствии с рис.24.3. В качестве  $L_1$  – контур «Прямой ток» с числом витков  $N_1 = 100$ . На блоке модулей «Электрические цепи» выбрать сопротивления  $R = 100$  Ом. Установить частоту генератора ГЗЧМ 11 кГц.

Вначале катушку эталонного датчика придвинуть вплотную к плоскости контура, измерить координату  $y$  и размах  $\Delta U_2$ . Затем отодвинуть катушку на 10 мм от плоскости контура и измерить размах  $\Delta U_2$  в следующей точке. Провести так 6 - 8 измерений, отодвигая датчик от контура с шагом 10-20 мм. Результаты измерений занести в таб. 24.1.

Таблица 24.1

Рабочие параметры: $v=$ Гц, $R=$ Ом			
№ измерения	1	2	...
$\Delta U_1$ , мВ			
Координата метки датчика $y$ , см			
Число делений, дел			
Показание переключателя «VOLT/DIV», мВ/дел			
$\Delta U_2$ , мВ			
$(B_m)_{\text{расч}}$ , мТл			
$(B_m)_{\text{экс}}$ , мТл			

### Задание 2. Измерение индукции магнитного поля длинного соленоида.

Собрать схему в соответствии с рис.24.3, где  $L_1$  – два однослойных соленоида (длиной 120 мм каждый) на стойках, соединённых последовательно. Средний (эффективный) диаметр составляет 52 мм, число витков «длинного» соленоида – 779. Выбрать сопротивления  $R = 100$  Ом на блоке модулей

«Электрические цепи» и частоту генератора ГЗЧМ, равную 11 кГц. Перед началом измерений, перемещая датчик вдоль оси соленоида, убедиться в том, что внутри соленоида поле практически однородно, а вблизи концов – уменьшается. Если на стыке соленоидов отмечается резкое падение поля, это означает, что соленоиды включены встречно. Тогда нужно поменять местами подключение двух клемм одного из соленоидов.

Снять зависимость величины индукции магнитного поля длинного соленоида от координаты точки на его оси, для которой производится измерение. Начальное положение катушки датчика – у края соленоида. Выполнив измерение амплитуды сигнала  $\Delta U_2$  на экране ЭО для этой точки, перемещать измерительную катушку внутри соленоида с шагом 2 см вплоть до достижения противоположного конца соленоида. Продолжить эти измерения вне соленоида, передвигая датчик вдоль всей длины рельса. В итоге должно получиться около 20 измерений. Результаты занести в таблицу, аналогичную таб. 24.1.

*Задания 3-4 являются факультативными. Объем этих заданий может быть уменьшен по согласованию с преподавателем.*

### **Задание 3. Измерение индукции магнитного поля кольца с током.**

Конструкция установки такова, что для измерения поля кольца необходимо ввести в зазор соленоида плоский индукционный датчик. Устройство этого датчика можно найти в описании основных приборов. На плате плоского индукционного датчика в виде колец различных диаметров намотано по десять витков тонкой проволоки. В данном задании «плоский датчик» является устройством, создающим магнитное поле. Соленоид при этом не используется.

Собрать схему в соответствии с рис.24.3, где  $L_1$  – один из девяти кольцевых контуров платы плоского датчика. Установить эталонный датчик на длинном рельсе. Убедиться в соосности расположения датчиков. Сигналы с датчиков подаются на ЭО. Вход I осциллографа подключить к клеммам выбранного на плате кольца.

**Внимание!!!** Установить значение сопротивления  $R = 1 \text{ кОм}$  на блоке модулей «Электрические цепи». Установить частоту

ГЗЧМ 75 кГц. Для проверки схемы пригласить преподавателя или дежурного сотрудника!

### Задание 3.а. Поле на оси кольца.

Снять зависимость распределения поля кольца, перемещая эталонный датчик с шагом 1-2 см по рельсу. Результаты измерений занести в таб. 24.2.

Таблица 24.2

$\nu = 75 \text{ кГц}$ , $R = 1 \text{ кОм}$				
№ измерения	1	2	...	10
№ клемм				
Параметр ( $r$ или $N$ )				
Показание переключателя "VOLT/DIV", мВ/дел				
Число делений, дел				
$\Delta U_2$ , мВ				
$B$ , мТл				

### Задание 3.б. Поле кольца в зависимости от его радиуса.

Установить эталонный датчик так, чтобы измерительная катушка располагалась вплотную к плоскости индукционного датчика. Провести измерения, попеременно включая в схему рис.24.3 две соседние клеммы на плате плоского датчика: сначала клеммы 1 и 2, затем - 2 и 3, затем 3 и 4 и т.д. Результаты измерений занести в таб. 24.2.

### Задание 3.в. Поле кольца в зависимости от числа витков.

Не меняя положения эталонного датчика, исследовать магнитное поле, изменяя число витков, включённых в схему рис.24.3. Для этого необходимо подсоединить к схеме рис.24.3 клеммы 1 и 2, затем 1 и 3, затем 1 и 4 и т.д. Результаты измерений в таб. 24.2.

#### **Задание 4. Измерение индукции магнитного поля катушек Гельмгольца.**

Средний (эффективный) диаметр катушек Гельмгольца составляет 70 мм, число витков каждой катушки  $N = 400$ .

Собрать схему в соответствии с рис.24.3, где  $L_1$  – две катушки Гельмгольца.

**Внимание!!!** Установить значение сопротивления  $R = 10$  кОм на блоке модулей «Электрические цепи». Установить частоту ГЗЧМ 7,5 кГц. Для проверки схемы пригласить преподавателя или дежурного сотрудника!

#### **Задание 4.а Поле пары катушек, соединённых последовательно.**

Установить на длинном рельсе две катушки с расстоянием 70 мм между метками их рейтеров и соединить их последовательно, таким образом, чтобы токи в обмотках имели одно и то же направление. Измерить эталонным датчиком величину поля вдоль оси катушек с шагом 1 см. Результаты измерений занести в таб. 24.1.

#### **Задание 4.б Поле пары катушек при их встречном включении.**

Выполнение этого задания аналогично заданию 4.а. Достаточно поменять местами подключение двух клемм одной из катушек. Измерить эталонным датчиком распределение поля вдоль оси катушек с шагом 1 см. Результаты измерений занести в таб. 24.1.

#### **Задание 4.в Поле одной катушки.**

Выполнение этого задания аналогично заданию 4.а. При этом необходимо оставить в схеме, см. рис.24.3, одну катушку. Измерить эталонным датчиком распределение поля вдоль оси катушки с шагом 1 см. Результаты измерений занести в таб. 24.1.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментально амплитуда магнитной индукции определяется так:

$$B_m = \frac{\Delta U_2}{4\pi\nu NS} \quad (24.7)$$

**Задание 1.** Вычислить значение магнитной индукции по формуле

$$B_m = \frac{\mu_0 N_1 \Delta U_1}{4\pi r R} \quad (24.8)$$

Расчётное значение (24.8) амплитуды магнитной индукции обратно пропорционально расстоянию от проводника с током до датчика. Сравнить (24.8) с экспериментальным (24.7). Поскольку неизвестна координата датчика, при которой  $r = 0$  (измерительную катушку невозможно совместить с плоскостью контура), построить график зависимости  $1/B_m$  от координаты  $y$  или от расстояния  $r$ . Учесть поправку на координату, равную расстоянию между вертикальной осью катушки и меткой датчика. Вычислить угловой коэффициент.

Построить на одном рисунке экспериментальный и расчётный графики и сравнить их угловые коэффициенты.

**Задание 2.** Индукция магнитного поля длинного соленоида рассчитать по формуле:

$$B_m = \frac{\mu_0 N I_m}{l} = \frac{\mu_0 N \Delta U_1}{l R}, \quad (24.9)$$

где  $l = 120$  мм – длина одного соленоида,  $N$  – число витков в одном соленоиде.

При гармоническом сигнале частотой  $\nu$  напряжение  $U_2$  на индукционном датчике и напряжение на датчике тока  $R$  связаны соотношением:

$$U_2 = U_1 \frac{2\pi\nu\mu_0 N N_0 S_0}{l R}. \quad (24.10)$$

Построить график зависимости магнитного поля соленоида от расстояния от его торцов. Отразить в заключении влияние зазора в конструкции составного соленоида на однородность магнитного поля.

**Задание 3.** Индукцию магнитного поля кольца с числом витков  $N$  и током  $I$  на его оси рассчитать по формуле

$$B = \mu_0 \frac{NIr^2}{2(r^2 + y^2)^{3/2}} = \frac{B_0}{\left(1 + \frac{y^2}{r^2}\right)^{3/2}}, \quad (24.11)$$

где  $r$  – средний радиус кольца,  $y$  – расстояние от плоскости кольца до точки, в которой определяется поле,  $B_0$  – поле в центре кольца.

Действующее значение индукции поля при гармоническом сигнале частоты  $\nu$  определяется по формуле:

$$B = \frac{U_2}{2\pi^2 \nu N_0 R^2} \quad (24.12)$$

Полученные зависимости  $B(y)$ ,  $B(r)$ ,  $B(N)$  представить графически.

**Задание 4.** Построить зависимости  $B(y)$  для измерений, проведённых с катушками Гельмгольца.

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Сравнить расчётные значения и данные эксперимента. В заключении сделать вывод о характере зависимостей магнитного поля исследованных в работе токовых систем от различных параметров. Провести анализ погрешностей.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое напряжённость магнитного поля, индукция магнитного поля? В каких единицах они измеряются?

2. Сделать расчёт магнитной индукции  $B$  прямого бесконечно длинного проводника с током  $I$  на расстоянии  $r$  от него.

3. Чем определяется поле кругового проводника с током, поле соленоида?

4. Написать выражение для индукции магнитного поля в центре кольца с числом витков  $N$ .

5. Нарисовать силовые линии магнитного поля соленоида.

6. Что такое поток магнитной индукции, потокоцепление?

7. В чем заключается индукционный метод измерения магнитного поля?

8. Почему при измерении индукции магнитного поля кольца с током требуется включение в схему сопротивления  $R = 1$  кОм, а при измерении индукции магнитного поля прямого тока (или соленоида) достаточно  $R = 100$  Ом?

9. В каком соотношении находятся диаметр катушек Гельмгольца и расстояние между ними для создания однородного магнитного поля? Как при этом они должны быть соединены?

10. Показать, что электростатический вольтметр пригоден для измерения как постоянного, так и переменного напряжения.

11. Почему в работе нецелесообразно использовать мультиметр и все измерения необходимо проводить только с помощью осциллографа?

## ЛИТЕРАТУРА

### *Основная*

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Книга 3. Электричество и магнетизм. М.: Астрель. 2004.

2. Калашников Н.П., Смондырев М.А., Основы физики. Т.1. – М.: Дрофа. 2003.

### *Дополнительная*

3. Лабораторный практикум курса общей физики. Раздел «Электричество и магнетизм»: Учебное пособие / Под ред. В.Ф. Федорова. М.: НИЯУ МИФИ, 2011.

4. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. Изд. 4, исправленное. Москва "Бином". 2003.

## Работа 26

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАГНЕТИКОВ

---

*Цель:* изучение методов определения магнитной проницаемости веществ в слабых магнитных полях.

*Оборудование:* модуль М03 блока «Поле в веществе» лабораторного комплекса ЛКЭ-1, на котором расположены генератор электрических сигналов ГЗЧМ; индукционный датчик магнитного поля; операционный усилитель; соленоид; конденсаторы; резисторы; образцы в форме длинных стержней.

#### ВВЕДЕНИЕ

Всякое вещество способно намагничиваться под действием магнитного поля, то есть является магнетиком.

Количественно интенсивность намагничивания вещества характеризуется объёмной плотностью магнитного момента магнетика  $J$ . Для изотропных магнетиков

$$J = \chi H, \quad (26.1)$$

где  $\chi$  – магнитная восприимчивость (безразмерная величина, зависящая от рода магнетика и его состояния).

При наличии магнетика напряжённость магнитного поля

$$H = B/\mu_0 - J, \quad (26.2)$$

( $\mu_0$  – магнитная постоянная).

Подставив соотношение (26.1) в (26.2), получаем

$$B = \mu_0 \mu H,$$

где  $\mu = 1 + \chi$  – относительная магнитная проницаемость вещества, или просто магнитная проницаемость.

Магнитные свойства веществ определяются магнитными моментами элементарных частиц (электронов, протонов и нейтронов), входящих в состав каждого атома. Но в большинстве случаев теория учитывает только магнитные моменты электронов, так как они значительно превышают суммарный магнитный

момент ядра, определяемый магнитными моментами протонов и нейтронов. В зависимости от характера взаимодействия частиц-носителей магнитного момента с внешним магнитным полем, т.е. в зависимости от механизма намагничивания, магнетики делятся на:

- диамагнетики,
- парамагнетики,
- ферромагнетики,
- антиферромагнетики,
- ферримагнетики.

Диамагнетиками называются вещества, для которых  $\mu < 1$ ; соответственно, для них  $\chi < 0$ . Так как  $\chi$  является небольшой отрицательной величиной (от  $10^{-9}$  до  $10^{-4}$ ), то  $\mu$  диамагнетиков чуть меньше единицы. У этих материалов вектор намагниченности  $J$  направлен противоположно намагничивающему полю, в результате чего диамагнетики выталкиваются из области наибольшей напряжённости. Диамагнетизм присущ всем веществам, но зачастую он маскируется пара- и ферромагнетизмом.

В чистом виде диамагнетизм наблюдается у веществ, результирующий магнитный момент атомов которых равен нулю. При внесении образца диамагнетика во внешнее магнитное поле движение электронов меняется – возникает ларморова прецессия электронной орбиты внутри атома вокруг оси, совпадающей с направлением магнитного поля. В результате в атоме возникает круговой ток, который образует левовинтовую систему с направлением вектора внешнего магнитного поля. Дополнительная индукция магнитного поля, создаваемая этим круговым током, направлена навстречу вектору  $H$  внешнего магнитного поля. Таким образом, порождаемое диамагнетиком поле направлено против внешнего поля и ослабляет его.

В соответствии с теорией, полностью подтверждённой экспериментальными исследованиями, магнитная восприимчивость диамагнетиков не зависит ни от температуры, ни от напряжённости магнитного поля.

К диамагнетикам относится ряд металлов (например, Cu, Ag, Au), вода, газообразный водород, инертные газы и многие органические соединения.

Парамагнетики намагничиваются во внешнем магнитном поле в направлении поля, и втягиваются в область максимальной

напряжённости. Магнитная проницаемость парамагнетиков  $\mu > 1$ , а магнитная восприимчивость  $\chi > 0$ , причём, как и у диамагнетиков, она имеет весьма небольшие значения: от  $10^{-6}$  до  $10^{-3}$ . Так как магнитная проницаемость близка к единице, то, как и диамагнетики, парамагнетики намагничиваются очень слабо. Кроме того, магнитная восприимчивость парамагнетиков существенно зависит от температуры в соответствии с законом Кюри:

$$\chi \sim 1/T.$$

Парамагнетиками являются вещества, атомы которых имеют некомпенсированный магнитный момент, обусловленный спиновыми или орбитальными магнитными моментами электронов. Существует также ядерный парамагнетизм. В отсутствие внешнего магнитного поля самопроизвольная намагниченность в парамагнетиках отсутствует, так как магнитные моменты дезориентированы тепловым движением – магнитный момент вещества, равный векторной сумме отдельных моментов, близок к нулю, следовательно, оно не намагничено. При внесении парамагнетика в магнитное поле появляются преимущественная ориентация отдельных магнитных моментов в направлении поля и соответствующая намагниченность. Так как направления индуцированного и внешнего магнитного полей совпадают, то парамагнетик усиливает внешнее магнитное поле.

Парамагнетизм наблюдается у широкого круга материалов: у металлов (Al, Pt), ряда солей Fe, Co, Ni и редкоземельных металлов, у жидкостей (кислород) и газов (воздух, кислород).

Ферромагнетики, в отличие от диа- и парамагнетиков, способны намагничиваться весьма значительно, так как магнитная проницаемость этих материалов при комнатной температуре может иметь значения  $\mu = 10^2-10^6$  (очевидно, что и  $\chi \gg 1$ ). Кроме того, они имеют ряд других характерных особенностей:

зависимость между индукцией  $B$  и напряжённостью магнитного поля  $H$  имеет сложный нелинейный характер, а их магнитная проницаемость  $\mu$  существенно зависит от величины напряжённости (см. лаб. раб.8а). Соответственно, магнитная восприимчивость ферромагнетиков также непостоянна и зависит от  $H$ ;

величина индукции в ферромагнетиках существенно зависит от предыдущих состояний намагничивания наблюдается своеобразное отставание изменения индукции  $B$  от изменений напряжённости магнитного поля  $H$  – так называемый гистерезис (см. лаб. раб. 8а);

все ферромагнетики в магнитном отношении анизотропны. Но если образец имеет поликристаллическую структуру, так что отдельные кристаллики в нем расположены беспорядочно, то анизотропия не проявляется, и намагниченность не будет зависеть от направления поля;

способность ферромагнетиков намагничиваться, различна при разных температурах. При повышении температуры гистерезис ослабляется, магнитная проницаемость и восприимчивость падают при любом значении  $H$  и при температуре, называемой температурой Кюри, ферромагнетики переходят в парамагнитное состояние.

Ответственными за магнитные свойства ферромагнетиков являются собственные магнитные моменты электронов. При определённых условиях в кристаллах возникают так называемые обменные силы (которые могут быть описаны только в рамках квантовой теории), в результате чего эти магнитные моменты стремятся ориентироваться в одном общем направлении. Но так как образцу это энергетически невыгодно, то он разбивается на малые области спонтанного (самопроизвольного) намагничивания – домены. Каждый домен намагничен в определённом направлении до насыщения, но направление этих моментов в соседних доменах различно, и поэтому суммарный момент всего образца равен нулю. При появлении и увеличении напряжённости магнитного поля  $H$  рост намагниченности ферромагнетика происходит сначала из-за обратимого смещения границ и поворотов граничных стенок. Дальнейшее увеличение  $H$  приводит к необратимой, скачкообразной переориентации собственных магнитных моментов электронов в пределах энергетически невыгодных доменов (имеющих большой угол между вектором спонтанной намагниченности и направлением приложенного поля), а перед насыщением происходит изменение направления намагниченности внутри остальных доменов. В результате наблюдается полное совпадение направлений

суммарного магнитного момента доменов и внешнего магнитного поля – насыщение.

Ферромагнетиками являются многие металлы (Fe, Co, Ni и др.), их сплавы и соединения, а также ряд соединений Cr, Mn и U. Вариации составов и термических обработок обеспечивают большое разнообразие магнитных свойств этих материалов и их широкое использование в современной технике.

Антиферромагнетизм наблюдается в тех случаях, когда энергетически выгодными являются антипараллельные ориентировки собственных магнитных моментов соседних атомов.

Эту ситуацию удобно рассматривать как одновременное существование двух подрешёток, которые спонтанно намагничены в противоположных направлениях с одинаковой интенсивностью. При этом суммарный магнитный момент равен нулю. Наложение внешнего поля  $H$  приводит к небольшой намагничённости образцов, соответствующей крайне малой восприимчивости  $\chi > 0$ , т.е. антиферромагнетики ведут себя как очень слабые парамагнетики. При повышении температуры до температуры Нееля антиферромагнетики переходят в парамагнитное состояние.

К антиферромагнетикам относится ряд редкоземельных элементов и карбонаты таких металлов, как Fe и Ni.

Ферриты (или ферримангнетики) во внешнем магнитном поле ведут себя аналогично ферромагнетикам – в частности обладают спонтанной намагничённостью. Но, в отличие от ферро-, ферримангнетики имеют чрезвычайно малую электропроводность, что позволяет широко использовать их в радиотехнике. При температуре выше температуры Нееля ферриты переходят в парамагнитное состояние.

У ферримангнетиков спонтанный магнитный момент, существующий в отсутствие внешнего магнитного поля, создаётся за счёт того, что магнитные моменты вышеуказанных магнитных подрешёток кристаллов взаимно не скомпенсированы (некомпенсированный антиферромагнетизм).

Ферриты представлены широким рядом соединений типа  $MeO \cdot Fe_2O_3$ , где Me – один (или смесь) из двухвалентных катионов Mn, Co, Ni, Cu, Mg, Zn, Cd, Fe.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В работе используется модуль М03 блока «Поле в веществе» лабораторного комплекса ЛКЭ-1 (см. описание комплекса ЛКЭ-1).

Определение магнитной проницаемости ферро- и ферримагнетиков в слабых магнитных полях (в отсутствие гистерезиса), а также слабомагнитных веществ, характеризующихся однозначной зависимостью намагниченности  $J$  от напряжённости магнитного поля  $H$ , может быть проведено одним из следующих методов.

### 1. Индукционный метод

Схема, используемая для реализации индукционного метода, представлена на рис. 26.1, где ГЗЧМ – генератор сигналов;

L – соленоид модуля (параметры соленоида указаны в описании ЛКЭ-1);

Д1 – индукционный датчик магнитного поля (параметры датчика указаны в описании ЛКЭ-1);

R1 – сопротивление (1,0 Ом) датчика тока, составляющее последовательную цепь с обмоткой соленоида;

C – неполярный электролитический конденсатор ёмкостью 100 мкФ, подключённый на выходе генератора ГЗЧМ.

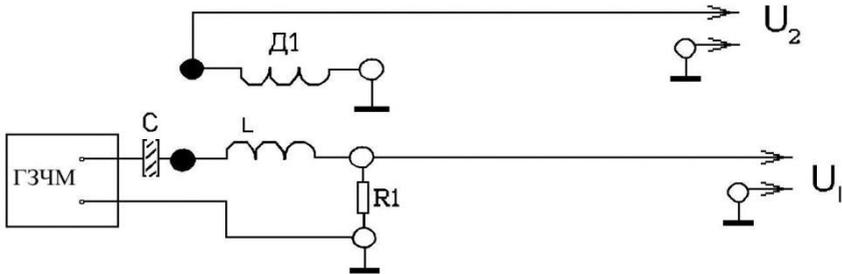


Рис. 26.1

При протекании через обмотку длинного соленоида тока  $I_1$  внутри соленоида создаётся магнитное поле напряжённостью

$$H = NI / l = NU_1 / (lR),$$

где  $l$  – длина соленоида;  $N$  – число витков обмотки соленоида;  $U_1$  – напряжение на сопротивлении  $R=R1$ .

В отсутствие внутри соленоида магнетика размах напряжения (т.е. разность между максимальным и минимальным значениями) на выходе датчика равен

$$U_{20} = 8 \mu_0 H_m v N_0 S_0,$$

где  $H_m$  – амплитуда напряжённости;  $N_0$  – число витков обмотки датчика;  $S_0$  – площадь витка обмотки датчика;  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Если в соленоид вставить образец в форме длинного стержня, то (*при неизменном токе соленоида*) магнитный поток в датчике изменится на величину

$$\Delta\Phi_{\text{дон}} = \mu_0 J N_0 S,$$

где  $J = \chi H$  – намагничённость образца;  $S$  – площадь поперечного сечения стержня (параметры образцов указаны в приложении на лабораторном столе). Стержень считается длинным, если  $\frac{l^2}{S} \geq \mu$ . Если это соотношение не выполняется, то результат существенно искажается фактором размагничивания, и можно лишь утверждать, что истинная магнитная проницаемость образца больше значения полученного в опыте.

Размах напряжения на датчике изменится при этом на величину

$$\Delta U = U_2 - U_{20} = 8 \mu_0 J_m v N_0 S.$$

Измерив, размах напряжений с образцом ( $U_2$ ) и без образца ( $U_{20}$ ), можно найти магнитную восприимчивость  $\chi$  и магнитную проницаемость  $\mu$  образца:

$$\chi = \frac{J_m}{H_m} = \frac{U_2 - U_{20}}{U_{20}} \cdot \frac{S_0}{S}, \quad \mu = 1 + \chi. \quad (26.3).$$

## 2. Индукционный дифференциальный метод

Этот метод используется в тех случаях, когда магнитная восприимчивость образца настолько мала, что изменение  $U_2 - U_{20}$  сигнала почти незаметно на фоне большого исходного сигнала  $U_{20}$ .

Суть метода заключается в компенсации большого исходного сигнала  $U_{20}$  сигналом другого датчика, для чего датчики Д2 и Д3, регистрирующие магнитную индукцию в соленоиде, соединяются последовательно. При этом полярность их включения подбирается так, чтобы обеспечить взаимную компенсацию исходных напряжений датчиков (рис. 26.2).

В отсутствие образца напряжение на выходе системы из двух датчиков будет  $U_{\text{нач}} \approx 0$  и его изменение  $\Delta U = U_{\text{кон}} - U_{\text{нач}}$  после помещения образца в магнитное поле в области одного из датчиков легко заметить и измерить.

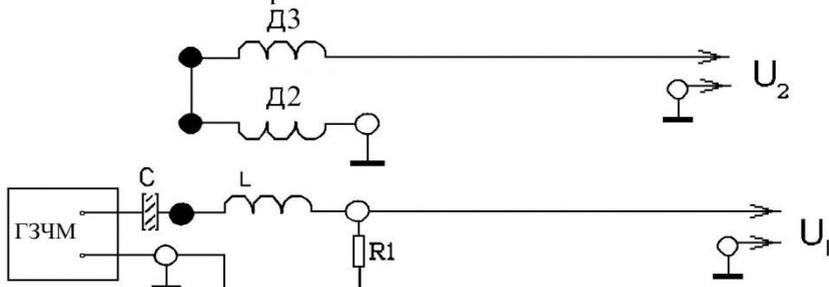


Рис. 26.2

Магнитная восприимчивость в этом случае рассчитывается по формуле:

$$X = \frac{J_m}{H_m} = \frac{|U_{\text{кон}} - U_{\text{нач}}| \frac{S_0}{S}}{U_{20}}, \quad \mu = 1 + \chi. \quad (26.4)$$

### 3. Генераторный метод

Частота колебаний – одна из наиболее просто и точно измеряемых в физике величин. Поэтому зачастую измерения различных физических величин сводят к измерениям частоты колебаний.

Так, например, в предлагаемом методе по изменению частоты колебаний в электрическом контуре, содержащем соленоид, при размещении внутри него магнетика, можно определить магнитную проницаемость образца.

Схема генератора электрических колебаний, используемого в работе, показана на рис. 26.3.

Все указанные на схеме элементы расположены на плате модуля МОЗ, где А2 – операционный усилитель; L – соленоид; C1, C2 – конденсаторы ёмкостью по 100 нФ каждый; R1, R2, R3 – резисторы по 10 кОм каждый.

При подаче питания на усилитель на выводах соленоида появляется гармонический сигнал, а на выходе усилителя (точка «А» на рис. 26.3) – сигнал, близкий к прямоугольному.

Частота колебаний напряжения в контуре при малом активном сопротивлении равна

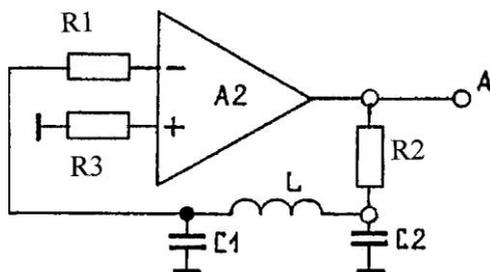


Рис. 26.3

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ где } C = \frac{C1 \cdot C2}{C1 + C2}.$$

Индуктивность длинного соленоида без магнетика:

$$L = \mu_0 n^2 V,$$

где  $n = \frac{N}{l}$  – линейная плотность числа витков; V – объем, занятый магнитным полем при условии, что это поле считается однородным, а объемом обмотки можно пренебречь.

Если в соленоид поместить образец с магнитной проницаемостью  $\mu$  в форме длинного стержня объемом  $V_1$ , то его индуктивность станет равной

$$L = \mu\mu_0 n^2 V_1 + \mu_0 n^2 (V - V_1).$$

Измерив частоты  $\nu$  и  $\nu_1$ , можно определить магнитную проницаемость и магнитную восприимчивость магнетика:

$$\mu = 1 + (v^2/v_1^2 - 1)I/V_1, \quad \chi = \mu - 1. \quad (26.5)$$

## ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

1. При выполнении работы необходимо строго соблюдать требования по технике безопасности и охране труда, установленные на рабочем месте студента в лаборатории электромагнетизма.

2. Все переключения в схеме выполнять при выключенном источнике питания. После сборки схемы необходимо убедиться, что все штекеры вставлены в гнезда до отказа и нет оголённых участков проводов и штекеров.

3. Нельзя прикасаться к оголённым участкам проводов.

4. Нельзя оставлять установку включённой без присмотра.

5. В случае нарушения общего заземления или нештатной работы приборов (искрения, повышенного шума, вибрации) следует немедленно позвать преподавателя или дежурного сотрудника.

### Задание 1. Определение магнитных характеристик с помощью индукционного метода

1. Собрать схему согласно рис. 26.1. На вход “X” осциллографа MATRIX MOS-620B подать сигнал  $U_1$ , на вход “Y” – сигнал  $U_2$ .

2. Включить осциллограф и генератор сигналов ГЗЧМ на прогрев (время прогрева не менее 10 мин).

3. Записать в предварительно созданную таблицу длину  $l$  и площадь поперечного сечения  $S$  ферритового стержня и стальной спицы (см. приложение на лабораторном столе).

4. Установить частоту генерируемого сигнала пилообразной формы в пределах 300–500 Гц и записать её значение в таблицу.

5. Установить ручку «Амплитуда» генератора ГЗЧМ в положение 1.

6. Регулятор “SWP.VAR” осциллографа поставить в положение “CAL”, а переключатель “VERT MODE” – в режим “DUAL” (для наблюдения одновременно сигналов  $U_1$  и  $U_2$ ). Манипулируя регуляторами “Position”(“▲▼”), разделить сигналы по высоте

и определить их принадлежность входам ‘Y’ или ‘X’ путём поочерёдного отключения их от контуров. С помощью переключателя “TIME/DIV” добиться, чтобы на экране умещалось не более четырёх периодов сигнала.

7. В отсутствие образца в соленоиде установить размах сигнала  $U_1$  в пределах, указанных в приложении. Измерить размах сигналов  $U_1$  и  $U_2$  (в делениях шкалы), смещая по вертикали один из них за пределы экрана и оставляя на экране другой. При каждом измерении необходимо заносить в таблицу значения коэффициентов усиления осциллографа по осям  $X$  и  $Y - K_x$  и  $K_y$ , которые должны быть установлены с учётом того, что точность измерений тем больше, чем большую часть экрана занимает сигнал.

8. Вставить образец в соленоид. Если размах  $U_1$  изменится, установить его прежнее значение, меняя амплитуду ГЗЧМ. Измерить полученное значение  $U_2$  размаха сигнала с датчика Д1 в делениях шкалы, не забывая каждый раз фиксировать в таблице соответствующее значение  $K_y$ . Кроме того, при размещении в соленоиде ферромагнитного образца необходимо контролировать неизменность формы сигнала  $U_2$ , а в случае выявления её существенных изменений, уменьшить амплитуду тока в соленоиде, уменьшив амплитуду сигнала ГЗЧМ (это обеспечит соблюдение условия определения магнитной проницаемости в слабом магнитном поле).

9. Прodelать измерения пп. 7–8 для пяти различных значений амплитуды сигнала ГЗЧМ в диапазоне  $U_1$ , указанном для каждого из исследуемых образцов в приложении (в выбранных пределах магнитная проницаемость соответствующего образца практически не меняется).

10. В заключение следует убедиться в том, что размещение в соленоиде материала с малой величиной магнитной проницаемости (магнитного порошка, засыпанного в пенал) практически не меняет сигнала на датчике Д1. Это будет свидетельствовать о недостаточной чувствительности данного метода при определении магнитной восприимчивости  $\chi < 1$ .

## **Задание 2. Определение магнитной проницаемости вещества с малым $\chi$**

1. Собрать схему, представленную на рис. 26.2.
2. Записать в таблицу параметры пенила с исследуемым магнитным порошком (см. приложение).
3. Выполнить п. 4 задания 1.
4. В отсутствие образца в соленоиде установить размах сигнала  $U_1$ , равный одному из его значений, установленных в п. 7 задания 1 (это позволит использовать в расчётах по формулам 26.4 значения  $U_{20}$ , полученные там же). Измерить размах сигнала  $U_{\text{нач}}$  в делениях шкалы, зафиксировав коэффициент усиления осциллографа по оси  $Y - K_y$  и занести результаты в таблицу
5. Вставить образец в соленоид так, чтобы он попал только в зону измерения одного из датчиков Д2 или Д3, иначе будет скомпенсировано не только  $U_{20}$ , но и  $U_{\text{кон}} - U_{\text{нач}}$  (это условие обеспечивается, когда образец вставлен в соленоид не больше, чем на половину длины). Если размах  $U_1$  изменился, то следует установить его прежнее значение, меняя амплитуду сигнала ГЗЧМ.
6. Измерить полученное значение  $U_{\text{кон}}$ . При этом следует обратить внимание на то, что если в процессе размещения образца в соленоиде значение измеряемого напряжения переходит через ноль (смена знака отчётливо прослеживается на экране осциллографа в процессе продвижения образца в соленоиде), то значению  $U_{\text{кон}}$  надо приписать отрицательный знак. В этом случае в расчётную формулу (26.4) войдёт модуль суммы измеренных напряжений.
7. Меняя величину сигнала с ГЗЧМ, поделав измерения п.п. 4–6 для пяти разных значений амплитуды  $U_1$  (каждый раз выставляя амплитуду равной одному из её значений в п. 7 задания 1.

## **Задание 3. Определение магнитных свойств магнетиков генераторным методом**

1. Собрать схему генератора электрических колебаний согласно рис. 26.3.
2. Включить блок питания модуля МО-3 (см. раздел 3 описания ЛКЭ-3). С помощью цифрового мультиметра VC-97 (см. раздел 4

описания ЛКЭ-3) проверить наличие напряжения на клеммах “+9” и “-9” (т.е. на входе усилителя).

3. Сигнал с выхода усилителя (точка “А”) подать на Y-вход осциллографа. Переключатель “VERT MODE” перевести в положение “CH2”. На экране появятся прямоугольные импульсы. С помощью переключателя “TIME/DIV” растянуть один из импульсов на весь экран.

4. Измерить длительность (период) импульса  $T$  и вычислить частоту  $\nu$  колебаний.

5. Вставить в соленоид образец из магнетика. Измерить период  $T_1$  и определить частоту  $\nu_1$ . Для каждого из исследуемых образцов провести указанные измерения не менее пяти раз.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По результатам задания 1, используя формулы (26.3), вычислить значения магнитных восприимчивости и проницаемости ферромагнетика и феррита (диаметр витка обмотки датчика указан в описании модуля МОЗ ЛКЭ-3) и проверить выполнение соотношения  $\frac{l^2}{S} \geq \mu$ .

2. По результатам задания 2 вычислить значения  $\chi$  и  $\mu$ , используя формулы (26.4), и проверить выполнение соотношения  $\frac{l^2}{S} \geq \mu$  для вещества с малым  $\chi$ .

3. По результатам задания 3, используя формулу (26.5), найти магнитную проницаемость  $\mu$  и восприимчивость  $\chi$  всех изученных магнетиков. При вычислениях принять  $V = 30 \text{ см}^3$ ;  $V_1$  вычислить самостоятельно).

4. Для результатов каждого из заданий вычислить медианы и квартили.

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Заключение должно быть оформлено в соответствии с методическими рекомендациями введения к учебному пособию.

2. Окончательные результаты определения  $\mu$  и  $\chi$  ферромагнетиков и магнетиков следует представить в виде медиан с указанием соответствующих квартильных интервалов.

Необходимо сопоставить результаты, полученные различными методами.

3. Представить медианы и квартильные интервалы  $\mu$  и  $\chi$  для магнитного порошка, сравнить результаты, полученные различными методами.

4. Обсудить выполнение соотношения  $\frac{l^2}{S} \geq \mu$  для всех образцов и применимость использованных методов определения магнитных характеристик в зависимости от величины  $\mu$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление диамагнетизма?
2. Каковы основные свойства парамагнетиков?
3. Перечислите наиболее характерные особенности ферромагнетиков.
4. В чем суть явления антиферромагнетизма?
5. Что такое ферриты и в чем заключается их отличие от других магнетиков?
6. Для каких магнетиков используется индукционный дифференциальный метод определения магнитных параметров?
7. Какой из предлагаемых методов целесообразно использовать для контроля магнитных свойств материалов с  $\mu \gg 1$ ?
8. В чем состоит генераторный метод определения магнитной проницаемости магнетиков?
9. В каких случаях исследуемый стержень считается длинным?
10. Чему равна индуктивность бесконечно длинного соленоида?

## ЛИТЕРАТУРА

### *Основная*

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 2. Электричество и магнетизм. М.: Астрель. 2004.
2. Калашников Н.П., Смондырев М.Ф. Основы физики. Т. 2. М.: Дрофа. 2004.

3. Калашников С.Г. Электричество. М.: Физматлит. 2004.
4. Романов А.И., Семенова Т.А., Воронова Н.С. Распределение случайных величин и основы статистических методов обработки экспериментальных данных. Гл. 4. Элементы непараметрической статистики / Эл. книга. М.: НИЯУ МИФИ. 2016.

*Дополнительная*

1. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. М.: Издательский дом «Оникс 21 век». 2005.
2. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. М.: Физматлит. 2004.

## Работа 27

### ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

---

**Цель:** изучение диэлектрических свойств твёрдых тел, измерение ёмкости плоского конденсатора с диэлектриком в переменном электрическом поле, исследование зависимости поляризованности различных тел от напряжённости электрического поля, определение диэлектрической проницаемости пластин.

**Оборудование:** разборный конденсатор из лабораторного комплекса ЛКЭ-1 или ЛКЭ-5Р; звуковой генератор гармонических сигналов; осциллограф для измерения напряжений.



Рис. 27.1 Вид установки (на столе – лабораторный комплекс с разборным конденсатором; на полке: слева – звуковой генератор, справа – осциллограф)

### ВВЕДЕНИЕ

Диэлектрики – вещества, плохо проводящие ток. Это главная черта диэлектриков, отличающая их от проводящих материалов. Проводники обладают резко выраженной электропроводностью,

в связи с чем существование в них сильных электрических полей невозможно (иначе они просто разрушаются под действием джоулева тепла). Электропроводность диэлектриков примерно составляет  $10^{-8} - 10^{-15} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$ , электропроводность металлов около  $10^7 (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$ . В диэлектриках свободных носителей заряда очень мало, поэтому в них можно накапливать огромную электрическую энергию.

Частицы (атомы, молекулы, ионы) диэлектрика под действием электрического поля превращаются в диполи вследствие раздвижения положительных и отрицательных зарядов, из которых построены эти частицы. Неравномерность распределения заряда в диэлектрике, вызванная перемещением заряженных частиц в ограниченных областях под действием поля, равнозначна образованию диполей. Наконец, под действием поля происходит ориентация полярных молекул, если таковые содержатся в диэлектрике. Результат ориентации можно рассматривать как образование в диэлектрике диполей, оси которых расположены по направлению поля. Дипольный момент каждого такого диполя должен быть равен проекции дипольного момента полярной молекулы на направление поля.

Таким образом, действие всех разнообразных типов поляризации диэлектрика можно свести, в конечном итоге, к образованию в диэлектрике некоторого числа диполей, оси которых расположены по направлению поля. При этом положительные полюсы всех этих диполей оказываются сдвинутыми в направлении вектора напряжённости электрического поля, а отрицательные – в противоположном направлении.

В связи с этим целесообразно характеризовать поляризованный диэлектрик некоторой векторной величиной, связанной с дипольным моментом каждого диполя и с плотностью диполей. Эта величина, равная сумме всех дипольных моментов, образованных в диэлектрике под действием электрического поля, в единице объёма диэлектрика, называется электрическим дипольным моментом единицы объёма диэлектрика или поляризованностью:

$$\mathbf{P} = \sum_{i=1}^n \mathbf{p}_i, \quad (27.1)$$

где  $\mathbf{p}_i$  – элементарный  $i$ -й дипольный момент, образованный под действием поля в диэлектрике;  $n$  – число диполей в единице объёма диэлектрика.

Наиболее общей для всех диэлектриков является поляризация, связанная со смещением зарядов в атомах, ионах или молекулах, из которых построен диэлектрик. Такая поляризация может иметь место вследствие, во-первых, смещения наиболее слабо связанных (валентных) электронов в атоме или ионе и, во-вторых, за счёт смещения ионов в молекуле. В тех случаях, когда диэлектрик построен из ионов (ионный кристалл), поляризация имеет место также и за счёт смещения положительных ионов относительно отрицательных. Поляризация устанавливается быстро. Время установления электронной поляризации сравнимо с периодом световых колебаний и составляет  $10^{-15} - 10^{-14}$  с, а время установления ионной поляризации сравнимо с периодом собственных колебаний иона в положении равновесия и составляет  $10^{-13} - 10^{-12}$  с.

Полярными называются такие молекулы, которые обладают собственным дипольным моментом. Если полярные молекулы свободны, то под действием электрического поля они ориентируются по направлению поля в той мере, в какой эта ориентация допускается тепловым движением. Тепловое движение является фактором дезориентации свободных полярных молекул. В тех случаях (для некоторых твёрдых диэлектриков), когда полярные молекулы сильно связаны между собой, под действием поля они могут поворачиваться лишь на малые углы. Время установления поляризации упруго связанных полярных молекул порядка  $10^{-13}$  с.

В заключение укажем, что поляризация, возникающая в диэлектрике под действием электрического поля, имеет обычно сложный характер, являясь совокупностью отдельных простейших видов поляризации. Электрический момент единицы объёма реального диэлектрика подсчитывается как сумма дипольных моментов, обусловленных различными видами поляризации. Согласно изложенному, простейшие виды поляризации можно объединить в два основных класса: поляризация, связанная со смещением зарядов, почти не зависящая от температуры,

и поляризация, обусловленная переориентацией полярных молекул, зависящая от температуры.

Линейными называются диэлектрики, для которых в слабых полях характерна линейная зависимость поляризованности от напряжённости внешнего поля.

$$P = \varepsilon_0 \chi E = \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) E \quad (27.2)$$

где  $\chi$  – диэлектрическая восприимчивость,  $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды. Диэлектрическая проницаемость характеризует способность поляризоваться и численно равна отношению ёмкости конденсатора с данным диэлектриком к ёмкости такого же по размеру конденсатора, если между обкладками – вакуум.

Диэлектрическая проницаемость вещества часто определяется по величине ёмкости конденсатора, между обкладками которого находится исследуемый диэлектрик. При этом измерение ёмкости удобно проводить, накладывая на конденсатор переменное электрическое поле. Для того чтобы диэлектрическая проницаемость не зависела от частоты электрического поля, время изменения поля должно быть много больше собственных периодов движений частиц диэлектрика. Для частот в несколько килогерц это соотношение хорошо выполняется.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Работа выполняется с помощью разборного конденсатора из лабораторного комплекса ЛКЭ-1 или ЛКЭ-5Р, звукового генератора гармонических сигналов и осциллографа для измерения напряжений. Схема конденсатора приведена на рис. 27.2. Конденсатор состоит из нижней пластины 1, соединённой с гнездом «1», и верхней съёмной пластиной 2 с гнездом для подключения кабеля с помощью штекера. Окантовка 3 нижней пластины обеспечивает постоянный воздушный зазор  $d_0$  между пластинами. Если на нижнюю пластину плотно положить диэлектрик толщиной  $d > d_0$ , то расстояние между пластинами конденсатора равно толщине диэлектрика. К гнездам «2» и «4»

подключён эталонный резистор  $R_0$ , а к гнездам «3» и «4» - эталонный конденсатор  $C_0$ .

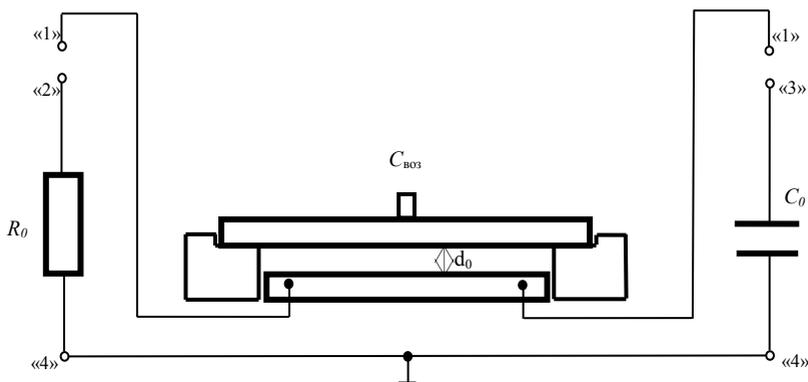


Рис. 27.2 Схема разборного конденсатора

Ёмкость разборного конденсатора с воздушным зазором в данной работе находится двумя способами. В первом способе последовательно с исследуемым конденсатором соединяют эталонное сопротивление (рис. 27.3). Получается цепь переменного тока из последовательно включённых ёмкости, активного сопротивления и источника переменного напряжения. В такой цепи устанавливаются вынужденные колебания с известными параметрами. В качестве вольтметров  $V_1$  и  $V_2$  используется осциллограф. Тогда амплитуда синусоидального сигнала, полученного на экране осциллографа, равна переменному напряжению на исследуемом элементе. Ёмкость воздушного конденсатора находится по формуле

$$C_{\text{воз}} = \frac{U_{R_0}}{2\pi\nu R_0 \sqrt{U^2 - U_{R_0}^2}}, \quad (27.3)$$

где  $U$  – напряжение на генераторе,  $U_{R_0}$  – напряжение на эталонном сопротивлении,  $\nu$  – частота генератора.

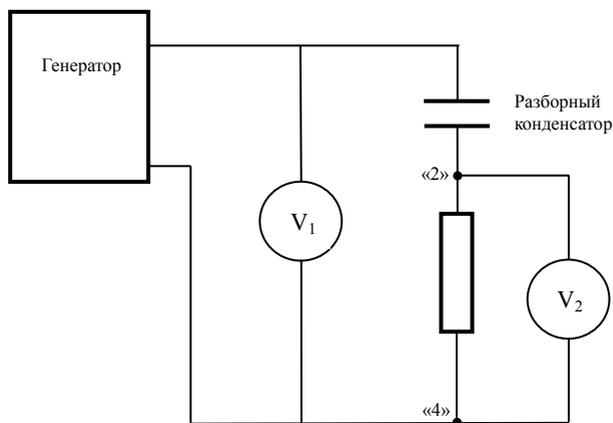


Рис. 27.3 Цепь с разборным конденсатором

Во втором способе последовательно с исследуемым конденсатором соединяют эталонный конденсатор (рис. 27.4). В этой цепи переменного тока вместо активного сопротивления используется второй конденсатор. Тогда ёмкость разборного конденсатора находится по формуле

$$C_{\text{воз}} = C_0 \frac{U_{C_0}}{U - U_{C_0}}, \quad (27.4)$$

где  $U_{C_0}$  – напряжение на эталонном конденсаторе.

Если в разборном конденсаторе находится твёрдый однородный диэлектрик толщиной  $d$ , то напряжённость электрического поля в нем рассчитывается по формуле

$$E = \frac{U - U_{C_0}}{d} \quad (27.5)$$

Тогда модуль поляризованности диэлектрика находится так:

$$P = \varepsilon_0 \left( \frac{C_0}{C_{\text{воз}}} \frac{U_{C_0}}{d_0} - \frac{U - U_{C_0}}{d} \right) \quad (27.6)$$

В ЛКЭ-1 используются три диэлектрические пластины: стекло, оргстекло и текстолит.

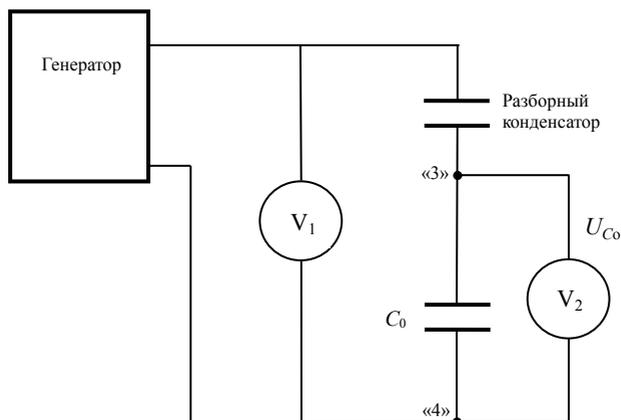


Рис. 27.4 Цепь с разборным конденсатором

## ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении работы необходимо соблюдать общие требования «Инструкции по технике безопасности работы в лаборатории Электричество». Следите за тем, чтобы все штекеры проводов были вставлены в гнезда до отказа и не было оголённых участков штекеров. Не дотрагиваться до верхней пластины разборного конденсатора, подключённого к звуковому генератору.

## ЗАДАНИЯ

1. Определить ёмкость плоского конденсатора с воздушным зазором  $C_{\text{воз}}$ . Плотно установить верхнюю обкладку разборного конденсатора в окантовку нижней пластины, обеспечивая необходимый воздушный зазор толщины  $d_0$ . Подать

синусоидальный сигнал частотой  $\nu$  около 2–3 кГц (гнездо 4 «земля» и гнездо на верхней обкладке конденсатора). Выбранную частоту генератора поддерживать постоянной во время всех измерений.

Измерить напряжение  $U$  на генераторе с помощью осциллографа. Для этого с помощью кабеля со штекерами соединить гнездо 4 «земля» и гнездо на верхней обкладке конденсатора с первым или вторым каналом осциллографа. Установить амплитуду сигнала 10 В на генераторе. Получить на экране осциллографа синусоиду с максимальной амплитудой. Измерить эту амплитуду с помощью разметки на экране. Погрешность измерения по осциллографу принять равной 5 %. Погрешность отсчёта равна половине малого деления вертикальной шкалы.

Соединить гнезда 1 и 2. Подключив кабель к эталонному сопротивлению  $R_0$ , измерить напряжение  $U_{R_0}$  на нем.

Соединить гнезда 1 и 3. Подключив кабель к эталонному конденсатору  $C_0$ , измерить напряжение  $U_{C_0}$  на нем.

2. Определить зависимость модуля поляризованности диэлектрика  $P$  от напряжённости электрического поля  $E$ . На нижнюю обкладку разборного конденсатора плотно установить одну из трёх диэлектрических пластин. Накрыть её верхней обкладкой и подать сигнал с генератора. Соединить гнезда 1 и 3. Измерять напряжение на генераторе  $U$  и эталонном конденсаторе  $U_{C_0}$  для 5 – 10 значений амплитуды сигнала на генераторе в диапазоне от 0 до 10 В. Занести данные в таблицу. Провести такие же измерения для двух других диэлектриков. По формулам (27.5) и (27.6) рассчитать значения модуля поляризованности и напряжённости электрического поля. Построить графики зависимости  $P(E)$  для каждого диэлектрика (на вертикальной оси вместо  $P$  удобно откладывать кратную величину  $P/\epsilon_0$ ).

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

*К заданию 1.* Используя значение эталонного сопротивления  $R_0$  и измеренные напряжения  $U$  и  $U_{R_0}$ , рассчитать ёмкость

плоского конденсатора с воздушным зазором  $C_{\text{воз}}$  по формуле (27.3).

Используя ёмкость эталонного конденсатора  $C_0$  и измеренные напряжения  $U$  и  $U_{C_0}$ , рассчитать ёмкость плоского конденсатора с воздушным зазором  $C_{\text{воз}}$  по формуле (27.4).

Также рассчитать  $C_{\text{воз}}$  по формуле

$$C_{\text{воз}} = \frac{\epsilon_0 S}{d_0},$$

где  $S$  – площадь обкладки конденсатора.

Найти среднее значение  $C_{\text{воз}}$ .

*К заданию 2.* По формулам (27.5) и (27.6) рассчитать значения модуля поляризованности и напряжённости электрического поля. Построить графики зависимости  $P(E)$  для каждого диэлектрика (на вертикальной оси вместо  $P$  удобно откладывать кратную величину  $P/\epsilon_0$ ). Методом парных точек получить набор угловых коэффициентов для каждой зависимости. Найти медиану и квантили диэлектрической проницаемости для каждого диэлектрика. Сравнить полученные значения с табличными.

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

В заключении к работе следует привести значение ёмкости плоского конденсатора с воздушным зазором.

Представить экспериментальные значения диэлектрической проницаемости для каждого диэлектрика. Привести также их табличные значения. Сделать выводы о совпадении или расхождении этих значений. В последнем случае указать возможные физические причины такого расхождения.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие бывают виды поляризации твёрдых диэлектриков?
2. Каковы методы измерения диэлектрической проницаемости?
3. Выведите формулу (27.3)?
4. Выведите формулу (27.4)?
5. Как определяется поляризованность диэлектрика?

6. Выведите формулу( 27.6)?
7. Каков характер зависимости поляризованности от напряжённости электрического поля?
8. Каков характер зависимости диэлектрической проницаемости от напряжённости электрического поля?
9. Зачем необходимо плотно прижимать диэлектрическую пластину к нижней обкладке конденсатора?
10. Как зависит диэлектрическая проницаемость пластин от частоты сигнала генератора?

## **ЛИТЕРАТУРА**

### *Основная*

1. Калашников Н.П., Смондырев М.А. Основы физики.Т. 1.М.: Дрофа.2007.
2. Савельев И.В.. Курс общей физики. В 5-ти кн. Кн.2. Электричество и магнетизм. М.: АСТ, 2007.
3. Светозаров В.В. Элементарная обработка результатов измерений. Учебное пособие. Изд. 2-е , М.: МИФИ, 2005.

### *Дополнительная*

1. Иродов И.Е. Электромагнетизм: Основные законы. Учебное пособие.Изд. 7-е М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009.
2. Светозаров В.В.. Основы статистической обработки результатов измерений. Учебное пособие. Изд. 2-е. М.: МИФИ, 2005.
3. Щербаченко Л.А. Физика диэлектриков. Методическое пособие. Иркутск: ИГУ, 2005.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3. Электричество. М.: Физматлит, 2004.

## Работа 28

### ИЗУЧЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

---

*Цель:* изучение процессов в  $RC$ - и  $RL$ - цепях, определение времени релаксации и параметров цепи.

*Оборудование:* лабораторный комплекс ЛКЭ-1 «Электромагнитное поле»; осциллограф; звуковой генератор.

#### ВВЕДЕНИЕ

Переходный процесс в электрической цепи – процесс установления нового режима в электрической цепи, возникающий в момент ее коммутации. Коммутацией называются любые скачкообразные переключения пассивных элементов цепи, её ветвей или источников энергии. Переходный процесс является промежуточным между прежним, установившимся процессом, существовавшим до коммутации, и новым, установившимся в цепи теоретически через бесконечно большое время после коммутации. Практически значения токов и напряжений в переходных процессах становятся близкими к установившимся через конечные промежутки времени. Физическая причина переходных процессов – перераспределение энергии в реактивных элементах цепи (катушках индуктивности и конденсаторах), происходящее вследствие переключения. При анализе линейных цепей обычно применяют классический метод.

Классический метод анализа основан на решении дифференциальных уравнений для исследуемой цепи. Полученные уравнения сводят к линейному неоднородному уравнению. Далее, по начальным условиям, используя непрерывность тока в катушке индуктивности и напряжения на конденсаторе (эти величины не могут меняться скачком при переключении элементов цепи), определяют амплитуды составляющих.

Чтобы выяснить, от чего зависит продолжительность импульса рассмотрим цепь, подключённую к источнику ЭДС –  $U_{\Gamma}$  и содержащую, последовательно соединённые конденсатор  $C$ , индуктивность  $L$  и активное сопротивление  $R$  (рис.28.1, а).

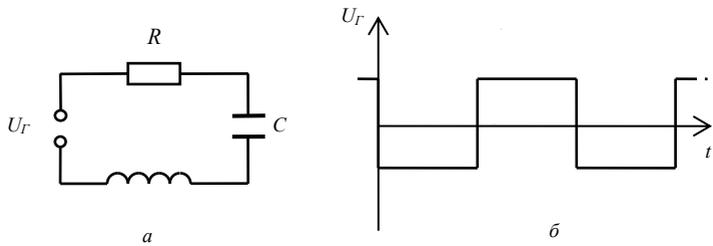


Рис. 28.1

Положим, что внешняя ЭДС изменяется со временем по закону (рис.28.1,б). В этом случае в контуре возникнут электрические колебания с частотой внешней ЭДС. По закону Ома уравнение колебаний в контуре

$$IR + q/C + Ldi/dt = U_T(t). \quad (28.1)$$

Разделив это уравнение на  $L$ , учитывая, что  $I = dq/dt$ , а также приняв во внимание, что величина обратная  $LC$  равна квадрату собственной частоты контура  $\omega_0^2 = 1/LC$  и введя обозначение для коэффициента затухания  $\beta = R/2L$ , уравнению можно придать вид

$$d^2q/dt^2 + 2\beta dq/dt + \omega_0^2 q = U_T/L. \quad (28.2)$$

Общее решение такого уравнения в случае  $\beta > \omega_0$  записывается в виде

$$q(t) = q_1 \exp(-(\beta - \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2})t) + q_2 \exp(-(\beta + \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2})t) + q_{\text{частн}}(t),$$

где частное решение  $q_{\text{частн}}(t)$  определяется по виду зависимости  $U_T(t)$  (рис. 28.1, б). Используя начальные условия  $q(0) = q_0$ ,  $dq/dt = I_0$  можно найти и постоянные  $q_1$  и  $q_2$ .

Исследуем для рассматриваемой цепи предельные случаи для промежутка времени  $0 < t < T/2$ :

1. Пусть индуктивность контура стремится к нулю  $L \rightarrow 0$  (рис.28.2, а). Принимая во внимание  $U_T = -U_0$ , уравнение (28.1) примет вид

$$Rdq/dt + q/C = -U_0. \quad (28.3)$$

Используя начальное условие  $q(0) = U_0 C$ , получим изменение заряда на конденсаторе

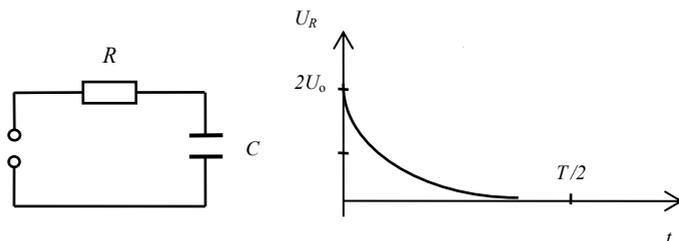


Рис. 28.2

$$q(t) = U_0 C (2 \exp(-t/\tau_1) - 1),$$

где  $\tau_1 = RC$  – постоянная времени или время релаксации  $RC$  - цепи. Эта величина характеризует скорость убывания заряда или тока. Для постоянной времени  $\tau_1 \ll T$  напряжение на конденсаторе будет меняться по закону:

$$U_C(t) = U_0 (2 \exp(-t/\tau_1) - 1), \quad (28.4)$$

здесь  $U_0$  – предельное значение напряжения на конденсаторе, а напряжение на сопротивлении –

$$U_R(t) = 2U_0 \exp(-t/\tau_1), \quad (28.5)$$

где  $U_R = \varphi_2 - \varphi_1$  разность потенциалов на участке 1 – 2. График зависимости  $U_R(t)$  представлен на рис.28.2, б.

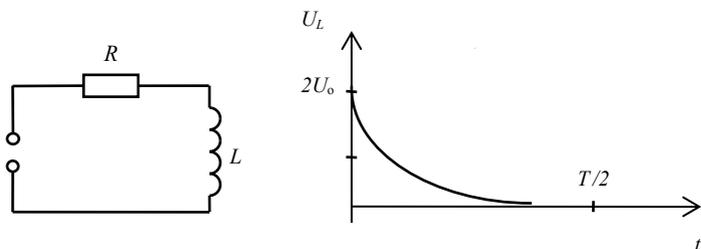


Рис. 28.3

2. Теперь рассмотрим случай, когда коэффициент затухания много больше собственной частоты контура  $\beta \gg \omega_0$  (рис.28.3,а). Уравнение (28.1) примет вид

$$IR + LdI/dt = -U_0. \quad (28.6)$$

С учётом начального условия  $I(0) = U_0/R$  для того же промежутка времени  $0 < t < T/2$  получим зависимость изменения силы тока от времени:

$$I(t) = U_0/R (2\exp(-t/\tau_2) - 1), \quad (28.7)$$

где  $\tau_2 = L/R$  – время релаксации  $RL$ - цепи. Из (28.7) следует, что  $\tau_2$  есть время, за которое сила тока уменьшается в  $e = 2,718$  раз. Чем больше значение  $\tau_2$ , тем медленнее уменьшается ток. Напряжение на сопротивлении и индуктивности меняется по законам

$$U_R(t) = U_0(2\exp(-t/\tau_2) - 1), \quad (28.8)$$

$$U_L(t) = 2U_0\exp(-t/\tau_2), \quad (28.9)$$

здесь  $U_L = \varphi_3 - \varphi_2$  – разность потенциалов на участке 2 – 3. График зависимости  $U_L(t)$  представлен на рис.28.3,б.

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В работе используется лабораторный комплекс – ЛКЭ-1,2 блок «Электрические цепи» (рис. 28.1), звуковой генератор сигналов

ГЗЧМ и осциллограф для измерения напряжения и параметров импульсов.

## ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторной работы следует соблюдать общие правила техники безопасности.

Перед включением питания схемы необходимо проверить правильность её монтажа, правильность начальных положений соответствующих регулировок и переключателей.

Все переключения в схеме выполнять при выключенном источнике питания.

Выполнив измерения, выключить установку и разобрать схему.

## ЗАДАНИЯ

### Задание 1. Изучение последовательного *LRC* - контура.

1. Получить развёртку прямоугольного импульса на экране осциллографа (рис.28.1,б).

Подключить ГЗЧМ к осциллографу с помощью кабеля. Штекер «земляного» (чёрного) провода должен быть соединён с гнездом «⊥» ГЗЧМ, а второй штекер «сигнального» провода – с гнездом «♂». Переключатель рода работ «Форма» установить в положение «□». Ручка «АМПЛИТУДА» управляет величиной сигнала.

2. Зарисовать полученную осциллограмму  $U_T(t)$ . Определить значение напряжения  $U_0$ , подаваемое с генератора. **В процессе выполнения всех заданий напряжение генератора  $U_0$  не менять.**

### Задание 2. Изучение процессов заряда и разряда конденсатора прямоугольного сигнала на выходе генератора для *RC* - цепи.

1. Определить время релаксации для частоты звукового генератора по согласованию с преподавателем. Для этого сигнал от генератора подать на исследуемый конденсатор, соединённый последовательно с известным активным сопротивлением

(рис.28.4,а). Получить на экране осциллографа устойчивое изображение исследуемого импульса (рис.28.4,б). Полученную осциллограмму  $U_C(t)$  зарисовать. Добиться с помощью переключателей «Time/DIV» и «Volts/DIV», чтобы исследуемая часть импульса занимала как можно большую часть экрана.

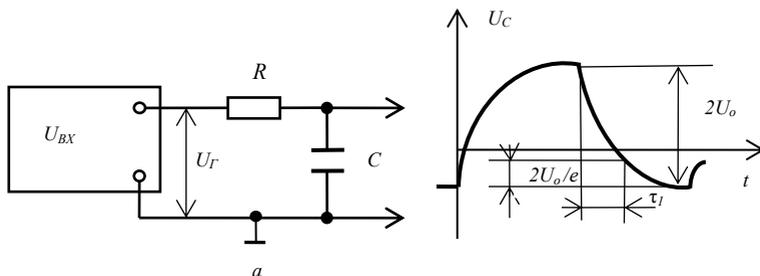


Рис. 28.4

Измерить время релаксации  $\tau_1$ , за которое напряжение на конденсаторе уменьшается в  $e$  раз.

2. Аналогично определить время релаксации для схемы, приведённой на рис.28.5.

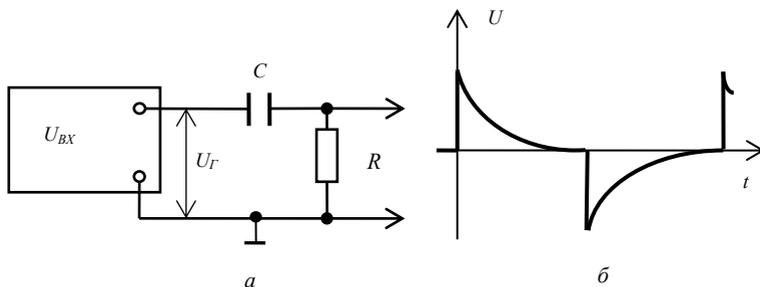


Рис. 28.5

### Задание 3. Изучение последовательного $LR$ - контура.

1. Определить время релаксации  $\tau_2$   $RL$  - цепи. Для этого собрать схему (рис.28.6). Значения сопротивления  $R$  и индуктивности  $L$  согласовать с преподавателем. Для частоты

звукового генератора  $\nu_r \ll \beta$  получить на экране осциллографа и зарисовать исследуемый импульс  $U_L(t)$ . Убедиться, что период импульса  $T=1/\nu_r$  много больше  $\beta^{-1}$  ( $1/\nu_r \gg 1/\beta$ ). Измерить по осциллографу время релаксации  $\tau_2$ .

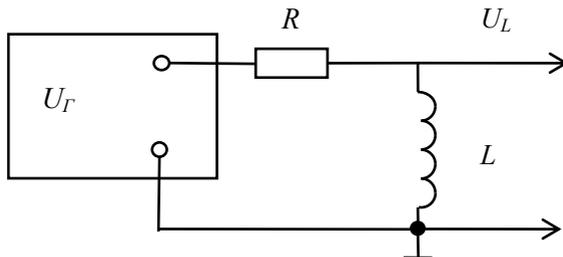


Рис. 28.6

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Измерения времени релаксации сравнить с расчётными значениями по формуле  $\tau_{\text{теор}}=RC$ . Определить погрешность измерения  $\tau_1$ .

2. Построить теоретическую зависимость  $U_C(t)$  для промежутка времени  $0 < t < T/2$ , используя полученное в задании 1 значение напряжения  $U_0$ .

3. Проверить закон сохранения энергии для  $RC$  - цепи. Вычислить работу генератора по формуле:  $A_G = U_G \Delta q = 2U_0^2 C$ . По закону Джоуля - Ленца  $Q = \int I^2(t) R dt = \int U_R^2(t) / R dt$ , используя формулу (28.5) получить выражение и рассчитать количество тепла выделяемого на сопротивлении за время  $0 < t < T/2$ .

4. Оценить индуктивность контура, используя формулу  $\tau_2=L/R$ . Катушка индуктивности намотана на кольцевом ферритовом сердечнике. Следовательно, индуктивность зависит от амплитуды тока, поэтому указанное на блоке (плате) модулей номинальное значение индуктивности является ориентировочным и может отличаться от фактического значения. Построить теоретическую зависимость  $U_L(t)$  для промежутка времени  $0 < t < T/2$ , используя полученное в задании 1 значение напряжения  $U_0$ .

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. В разделе «Заключение» кратко изложите методику измерений и основные результаты работы.
2. Сравните экспериментальные и теоретические значения времени релаксации для  $RC$  - контура.
3. Представьте рисунки исследуемых в работе импульсов  $U_C(t)$  и  $U_L(t)$ , а также их теоретические зависимости.
4. Проведите анализ погрешностей.
5. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое переходный процесс?
2. Что такое время релаксации  $RC$ -,  $RL$  - цепи?
3. Чем определяется предельное значение напряжения на конденсаторе?
4. Как экспериментально измерить время релаксации для  $RC$ - и  $RL$  - цепей?
5. Что такое полное сопротивление контура?
6. Как экспериментально определить неизвестную индуктивность в контуре?
7. Как вычислить работу, совершаемую источником при перезарядке конденсатора?
8. Как вычислить количество теплоты, выделяемое в сопротивлении за время перезарядки конденсатора?
9. Чему равно приращение энергии конденсатора при его перезарядке?
10. Какие погрешности следует учитывать в работе?

## ЛИТЕРАТУРА

### *Основная*

1. Калашников Н.П., Смондырев М.А. Основы физики. Т.1. М.: Дрофа. 2007.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. М.: Кнорус. 2009.

*Дополнительная*

3. Фейнмановские лекции по физике. Электричество и магнетизм. Т.5. М.: Мир, 1977.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. Т.3. М.: Физматлит, 3006.
5. Калашников С.Г. Электричество. М.: Физматлит, 2004.
6. Лабораторный практикум курса общей физики. Раздел «Электричество и магнетизм». М.: НИЯУ МИФИ, 2011.

**Лабораторный практикум  
«Электромагнетизм»**

Под редакцией  
Т.А. Семенов и В.Ф. Федорова

Издание 2-е, исправленное

Редактор Е. Г. Станкевич

Подписано в печать 21.10.2019. Формат 60x84 1/16  
Печ. л. 13,75. Уч.-изд. л. 13,75. Изд. № 053-1.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
115409, Москва, Каширское ш.,31