

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

**Лабораторный практикум**  
**«ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ»**

Под редакцией В.Ф. Федорова

*Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологии»  
в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений*

Москва 2008

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

**Лабораторный практикум «ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ»:** Учебное пособие /  
Под ред. В.Ф. Федорова. — М.: МИФИ, 2008. — 220 с.

*Авторы:* Е.Н. Аксенова, Е.И. Бабаджан, И.В. Белова, Н.Н. Взоров, А.Н. Долгов, Е.Е. Земсков, К.А. Липатов, Ю.Д. Лысак, А.Ю. Матрончик, Б.Н. Мещерин, С.С. Муравьев-Смирнов, С.В. Облизина, В.М. Овсянкина, М.В. Пентегова, В.Д. Попов, Е.П. Потанин, В.И. Ростокин, В.В. Самедов, Т.А. Семенова, В.Б. Соколов, В.Ф. Федоров, Е.В. Хангулян, А.В. Шутов.

Пособие содержит описание 20 лабораторных работ по курсу «Электричество и магнетизм», выполняемых на новых модульных установках ЛКЭ. По сравнению с предыдущим в данный практикум добавлено девять новых работ. Работы модернизированы, дополнены новыми заданиями с использованием многофункциональных измерительных приборов. В описании лабораторных работ использована Международная система единиц СИ.

Лабораторные работы выполняются студентами МИФИ на третьем семестре.

Пособие подготовлено в рамках Инновационной образовательной программы.

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

ISBN 978-5-7262-0973-9

© *Московский инженерно-физический институт  
(государственный университет), 2008*

Редактор М.В. Макарова

Оригинал-макет изготовлен М.В. Макаровой

Подписано в печать 05.09.2008. Формат 60x84 1/16  
Печ.л. 13,75. Уч.-изд.л. 13,75. Тираж 1500 экз.  
Изд. № 3/67 Заказ № 1-2054

*Московский инженерно-физический институт  
(государственный университет).  
115409, Москва, Каширское ш., 31*

*Типография издательства «Тровант».  
г. Троицк Московской области*

---

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

---

Введение. Методические рекомендации .....	4
Лабораторный комплекс ЛКЭ-1. Описание.....	10
Работа 1а. Измерение характеристик электрических сигналов с помощью осциллографа .....	32
Работа 6а. Изучение термоэлектронной эмиссии и определение работы выхода .....	44
Работа 7а. Измерение заряда и удельного заряда электрона.....	52
Работа 8а. Изучение магнитного гистерезиса .....	65
Работа 9а. Исследование явления Холла в полупроводниках.....	80
Работа 11а. Исследование колебаний в простом колебательном контуре .....	87
Работа 12а. Изучение вынужденных колебаний в электрическом контуре .....	94
Работа 13а. Релаксационный генератор.....	101
Работа 14а. Вихревое электрическое поле .....	109
Работа 19а. Скин-эффект в переменном электромагнитном поле.....	116
Работа 20а. Изучение цепей переменного тока .....	122
Работа 21. Цепи постоянного тока.....	131
Работа 22. Вольт-амперные характеристики .....	137
Работа 23. Измерение стационарных магнитных полей с помощью компаса и катушки с током.....	154
Работа 24. Измерение магнитного поля индукционным датчиком.....	163
Работа 25. Исследование магнитных полей при помощи датчика Холла .....	173
Работа 26. Определение магнитной проницаемости магнетиков .....	183
Работа 27. Измерение диэлектрической проницаемости твердых тел .....	196
Работа 28. Изучение переходных процессов в цепи электрического тока .....	204
Работа 29. Анализ спектра периодических колебаний .....	211

---

## ВВЕДЕНИЕ. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

---

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

Основным требованием и при работе с модульными установками ЛКЭ в лаборатории «Электричества и магнетизма» остается требование соблюдения правил техники безопасности. При любых неполадках или коротком замыкании необходимо немедленно выключить источник тока (рубильник). Прежде чем приступить к выполнению работы, внимательно прочитайте приложение к лабораторной работе, находящееся на рабочем месте. Следуйте указаниям, содержащимся в приложениях.

Для измерения физических величин на установках ЛКЭ используются универсальные цифровые вольтметры, многофункциональные цифровые мультиметры и двухканальный осциллограф. Поэтому при подготовке к работе необходимо изучить описание лабораторного комплекса, обратив внимание на порядок работы с используемыми измерительными приборами. Приступая к сборке электрических схем, обратите внимание на соблюдение полярности в цепи постоянного тока. Сначала рассчитайте пределы изменения измеряемых величин, а затем установите соответствующие диапазоны измерения на приборах.

Начиная с третьего семестра, в лабораторном практикуме используются статистические методы обработки результатов физического эксперимента. Поэтому предварительно следует проработать и изучить руководство В.В. Светозарова «Основы статистической обработки результатов измерений». Необходимо научиться грамотно излагать результаты эксперимента и писать отчет о проделанной работе.

Напомним, что в отчете должны быть отражены следующие разделы: цель и задача работы, схема установки, содержание зада-

ний с необходимыми таблицами, расчет основных величин и погрешностей, графики и заключение по работе, оформленное по типу аннотации.

В заключении необходимо коротко описать суть изучаемого явления и методику эксперимента, указать основные результаты, изложить их обсуждение и дать анализ погрешностей.

При подготовке нужно уяснить цель и задачи лабораторной работы: что, каким методом и с использованием каких приборов будет измеряться; указать цель работы и дать краткое описание используемых приборов, а схему установки аккуратно начертить карандашом в лабораторном журнале.

Нужно тщательно продумать и начертить карандашом таблицы к каждому заданию, с учетом того что результаты эксперимента должны заноситься в таблицы непосредственно в делениях шкалы осциллографа, поэтому на каждую измеряемую величину в этом случае необходимо предусмотреть три графы в заготовленной таблице: 1 — измеряемая величина в делениях шкалы, 2 — цена деления прибора в данном эксперименте, 3 — измеряемая величина в физических единицах ее измерения.

Необходимо выписать основные расчетные формулы для обработки экспериментальных результатов и вывести формулы для расчета погрешностей. Если в работе предстоит измерять какую-либо табличную величину, например работу выхода электрона из данного материала, удельный заряд электрона и т.д., полезно заранее выяснить табличное значение измеряемой величины и записать его в журнале.

Для самоконтроля готовности к работе рекомендуется (устно) ответить на контрольные вопросы. Именно эти моменты проверяются преподавателем в первую очередь при допуске студента к лабораторной работе. При этом предполагается, что при подготовке к работе студент использует учебник по курсу общей физики и введение к данной работе.

Почти к каждой лабораторной работе по разделу «Электричество и магнетизм» должна быть составлена отдельная таблица, куда студенты в лаборатории заносят данные приборов, используемых в эксперименте, номинальные значения сопротивлений, индуктивностей и емкостей с указанием погрешностей. Наличие этих данных позволяет определить приборные погрешности, кото-

рые в большинстве случаев превышают статистические случайные погрешности.

Если же в работе существенным является и вклад случайных погрешностей, то для их расчета используется метод Стьюдента. Напомним последовательность расчета погрешностей и оформления результатов.

Измеряем и получаем значения случайной величины  $X_i$ . Сначала исключаем промахи, т.е. заведомо неверные результаты.

По оставшимся  $n$  значениям определяем среднее значение величины  $X$ :

$$\langle X \rangle = \sum_i X_i / n,$$

Вычисляем среднеквадратичную погрешность среднего значения  $X$ :

$$\sigma_{\langle X \rangle} = \left( \sum_i (X_i - \langle X \rangle)^2 / n(n-1) \right)^{0,5}.$$

Задаемся доверительной вероятностью  $\alpha$ . С помощью таблицы коэффициентов Стьюдента определяем по известным значениям числа измерений  $n$  и доверительной вероятности  $\alpha$  коэффициент Стьюдента  $t_{\alpha n}$ .

Находим случайную погрешность  $\Delta X_{\text{сл}}$ :

$$\Delta X_{\text{сл}} = t_{\alpha n} \sigma_{\langle X \rangle}.$$

Для цифровых измерительных приборов приборная погрешность  $\Delta X_{\text{пр}}$  определяется по паспортным данным, которой примерно соответствует доверительная вероятность  $\alpha = 0,99$ .

Если выбрано значение  $\alpha = 0,7$ , то значение  $\Delta X_{\text{пр}}$  следует уменьшить в 3 раза.

По значениям  $\Delta X_{\text{пр}}$  и  $\Delta X_{\text{сл}}$  находим абсолютную погрешность  $\Delta X$  прямого измерения величины  $X$ :

$$\Delta X = \sqrt{\Delta X_{\text{сл}}^2 + \Delta X_{\text{пр}}^2}.$$

Записываем результат с указанием доверительного интервала и доверительной вероятности:

$$X = (\langle X \rangle \pm \Delta X), \quad \alpha = \dots$$

При косвенных измерениях искомая величина  $X$  вычисляется по результатам прямых измерений величин  $a_i$ , связанных с искомой определенной математической зависимостью:  $X = X(a_1, a_2, \dots, a_n)$ .

В этом случае среднее значение  $\langle X \rangle$  определяется по средним значениям  $\langle a_i \rangle$ :

$$\langle X \rangle = X(\langle a_1 \rangle, \langle a_2 \rangle, \dots, \langle a_n \rangle).$$

Погрешность  $\Delta X$  при косвенных измерениях вычисляется по формуле:

$$\Delta X = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial X}{\partial a_i} \Delta a_i \right)^2},$$

где  $\Delta a_i$  — погрешности прямых измерений величин  $a_i$ , определенные по вышеизложенной методике для одного и того же значения  $\alpha$ ,  $\frac{\partial X}{\partial a_i}$  — частные производные функции  $X$  по переменным  $a_i$ .

Если математическая зависимость представляет произведение степенных функций  $X = a_1^p \cdot a_2^q \cdot a_3^r$ , то удобнее сначала вычислить относительную погрешность

$$\frac{\Delta X}{\langle X \rangle} = \sqrt{\left( p \frac{\Delta a_1}{\langle a_1 \rangle} \right)^2 + \left( q \frac{\Delta a_2}{\langle a_2 \rangle} \right)^2 + \left( r \frac{\Delta a_3}{\langle a_3 \rangle} \right)^2}.$$

Напомним, что погрешность  $\Delta X$  округляется до одной значащей цифры, если эта цифра не 1 (если 1, то погрешность может содержать две значащие цифры). Значащими цифрами называются все цифры в десятичном изображении числа, кроме нулей, стоящих в начале числа. Значение  $X$  округляется таким образом, чтобы его

последняя значащая цифра по порядку величины соответствовала погрешности.

Например, в результате расчетов получено:

$$\langle I \rangle = 456 \text{ A}, \quad \Delta I = 32 \text{ A}, \quad \alpha = 0,9.$$

В этом случае результат следует записать в виде

$$I = (4,6 \pm 0,3) \cdot 10^2 \text{ A}, \quad \alpha = 0,9.$$

Во многих работах требуется построить график зависимости одной полученной в работе величины  $Y$  от другой экспериментальной величины  $X$ , аппроксимировав  $Y(X)$  линейной функцией и вычисляя затем угловой коэффициент  $K$ . Если  $K$  представляет собой физическую величину, нахождение которой является одним из этапов или целей работы, то необходимо уметь определять погрешность  $\Delta K$ . Наиболее просто  $\Delta K$  можно рассчитать по графику (рис. В.1) следующим образом.

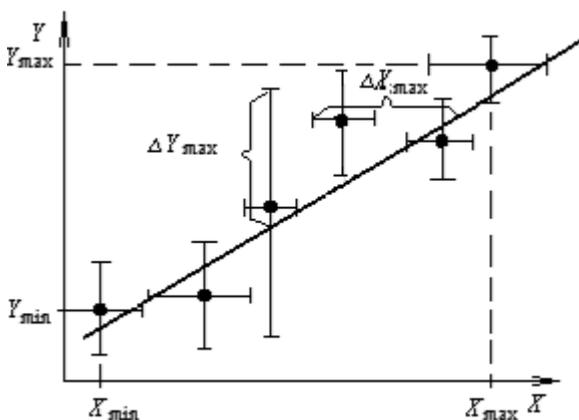


Рис. В.1. График определения погрешности  $\Delta K$

1. Найти относительную погрешность  $\Delta K/K$ , обусловленную погрешностью по вертикальной оси  $\Delta Y$ , для чего выбрать на графике точку, имеющую наибольшее отклонение от проведенной прямой. Вычислить отклонение этой точки вместе с ее погрешностью от гра-

фика прямой в миллиметрах, что составит  $\Delta Y_{\max}$ , и поделить его на измерительный интервал величины  $Y$ , измеренный в миллиметрах:

$$(\Delta K / K)_Y = \Delta Y_{\max} / (Y_{\max} - Y_{\min}),$$

где  $Y_{\max}$ ,  $Y_{\min}$  — наибольшее и наименьшее значения величины  $Y$ , отложенные на графике.

2. Аналогичным образом рассчитывается относительная погрешность  $(\Delta K / K)_X$ , обусловленная погрешностями точек вдоль оси  $X$ .

$$(\Delta K / K)_X = \Delta X_{\max} / (X_{\max} - X_{\min}).$$

3. Относительная погрешность:

$$(\Delta K / K) = \left( (\Delta K / K)_Y^2 + (\Delta K / K)_X^2 \right)^{1/2}.$$

4. Погрешность углового коэффициента равна произведению относительной погрешности  $\Delta K / K$  на  $K$ .

## **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.

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;
- контур «Модель прямого тока»;
- вольтметр универсальный типа VC-97;
- два мультиметра типа M-830B;
- блоки розеток сетевого питания 220 В/50 Гц.

На столике каркаса находятся:

- соленоид на стойках;
- плоский кольцевой индукционный датчик;
- блок модулей «Поле в веществе»;
- блок модулей «Электрические цепи»;
- длинный и короткий рельсы со шкалами, стойка-штырь для установки элементов.

Кроме этого, в состав комплекса входят электронный осциллограф «MATRIX MOS6XX» и генератор функциональный типа ГЗЧМ.

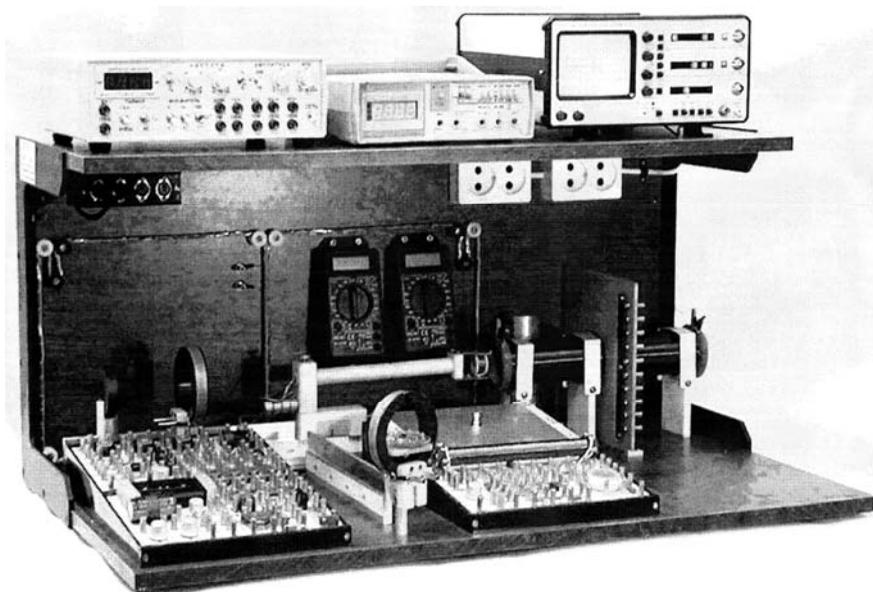


Рис. 1. Лабораторный комплекс ЛКЭ-1

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 (табл. 1).

Таблица 1

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»

## 1. БЛОК «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ»

### 1.1. Модуль M01 «Цепи постоянного тока»

Данный модуль показан на рис. 2.

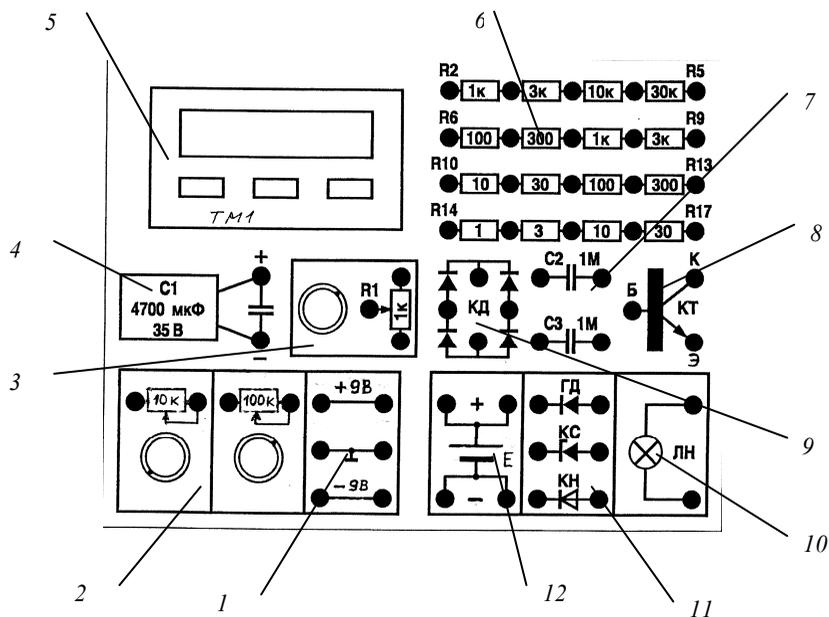


Рис. 2. Модуль M01 «Цепи постоянного тока»

Гнезда выводов источника питания 1 предназначены для подачи на элементы электрических схем постоянного напряжения. На панели имеются три пары выводов (табл. 2).

Таблица 2

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

Переменные сопротивления номиналом в 10 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 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 « $\leftrightarrow$ ».

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

**Внимание!** При включении в схему электролитического конденсатора необходимо **строго соблюдать полярность**, которая указана на клеммах конденсатора!

Неправильное включение приведет к выводу из строя конденсатора и короткому замыканию в схеме!

*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.).



Рис. 3. Часы-таймер

Управление таймером (см. рис. 2) осуществляется тремя кнопками. Кнопка «Режим» 1 — выбор режима работы. В режиме «Секундомер» мигает надпись в верхней части дисплея часов. Кнопка «Пуск/Стоп» 3 в режиме «Секундомер» поочередно запускает и останавливает отсчет времени. Если не сбрасывать отсчеты, то происходит суммирование измеряемых интервалов времени.

Кнопка «Запись/Сброс» 4, нажатая *в процессе отсчета* времени, фиксирует показания дисплея, но не останавливает отсчет времени. При повторном нажатии этой кнопки показания дисплея будут соответствовать продолжающемуся отсчету времени (измерение «текущего» времени).

Кнопка 4, нажатая *при остановленном отсчете* времени, сбрасывает (обнуляет) отсчет и показания дисплея. Кнопка 2 включает режим будильника.

*Набор сопротивлений (резисторов) 6* (см. рис. 2) состоит из четырех цепочек сопротивлений, соединенных 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.

На рис. 2 имеются *два конденсатора 7* номиналом по 1,0 мкФ каждый. Погрешность значения емкости 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 четырех диодов, соединенных в мостовую схему. Подавая на вход мостовой схемы (рис. 4) переменное напряжение, на выходе получают выпрямленное (пульсирующее, двухполупериодное) напряжение. Каждый из диодов можно использовать также по отдельности.

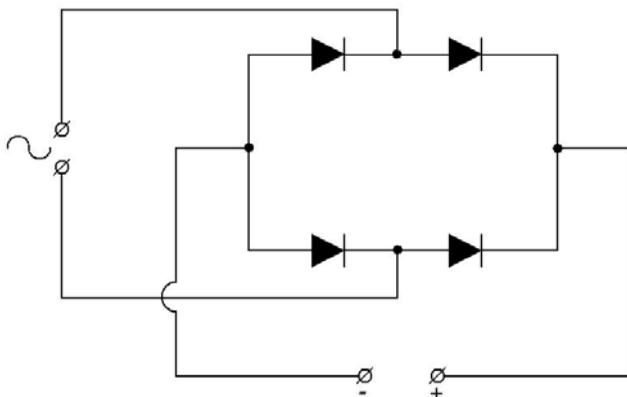


Рис. 4. Схема диодного моста

*Лампа накаливания 10* (см. рис. 2) имеет номинальное напряжение питания 12 В и 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.

## 1.2. Модуль М02 «Цепи переменного тока»

Данный модуль приведен на рис. 5.

*Гнёзда выводов источника питания 1* имеют параметры и маркировку, аналогичные выводам питания в модуле М01 «Цепи постоянного тока» (см. ранее).

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

*Комплект элементов 3* предназначен для построения схем на операционном усилителе. В комплект входят операционный усилитель (микросхема КР140УД608) и набор резисторов, подключенных к входам «+» и «-» микросхемы. Номиналы резисторов указаны на панели. Один из входов усилителя через сопротивление 10 кОм соединен с общим проводом ( $\perp$ ). Кроме того, в схему операционного усилителя включены (встречно-параллельно) два диода, предохраняющие микросхему от подачи на вход чрезмерно высокого напряжения.

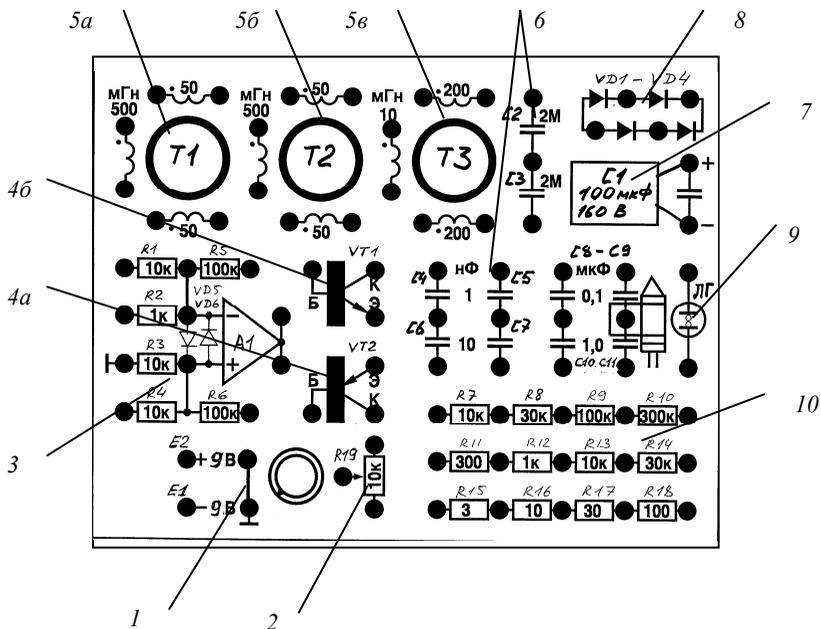


Рис. 5. Модуль M02 «Цепи переменного тока»

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

Трансформаторы — наборы индуктивностей (5а, 5б, 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). В табл. 3 приведены параметры обмоток трансформаторов. Погрешность значений индуктивности составляет 20 % от указанного номинала.

Наборы конденсаторов (ёмкостей) б 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 шт.). Погрешность емкости конденсаторов составляет 20 % от номинала.

Таблица 3

Трансформатор	Позиция	Обозначение обмотки на панели модуля*, мГн
Т1	5а	500
		50
		50
Т2	5б	500
		50
		50
Т3	5в	10
		200
		200

\* Начало каждой обмотки помечено точкой.

*Электролитический конденсатор 7* имеет номинальное значение емкости 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 приведет к выводу из строя конденсатора и короткому замыканию в схеме!

*Блок кремниевых диодов 8* состоит из четырех диодов типа КД102, соединенных в мостовую схему. Схема включения диодного моста показана на рис. 3 (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* состоит из трех цепочек сопротивлений, соединенных 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 M03 «Поле в веществе»

Гнезда выводов источника питания 1, потенциометр 2 — элементы по устройству и назначению полностью аналогичны тем, которые были описаны в составе модулей M01 «Цепи постоянного тока» и M02 «Цепи переменного тока» (см. ранее).

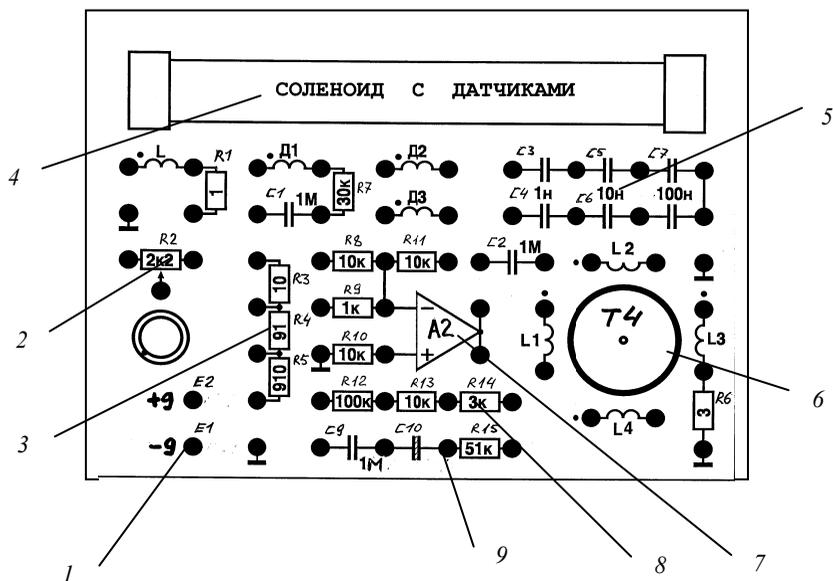


Рис. 6. Модуль M03 «Поле в веществе»

Набор сопротивлений 3 — три сопротивления, соединенные последовательно:

- 10 Ом — 91 Ом — 910 Ом (1,0 Вт).

Погрешность значений сопротивления составляет 10 % от указанного номинала.

Устройство соленоида со встроенными катушками-датчиками 4 показано на рис. 7. Основная обмотка L и три одинаковые обмотки датчиков намотаны на каркасе. Основная обмотка создает внутри соленоида магнитное поле, которое можно считать практически однородным. В табл. 4 приведены параметры обмотки соленоида и датчиков.

Таблица 4

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.

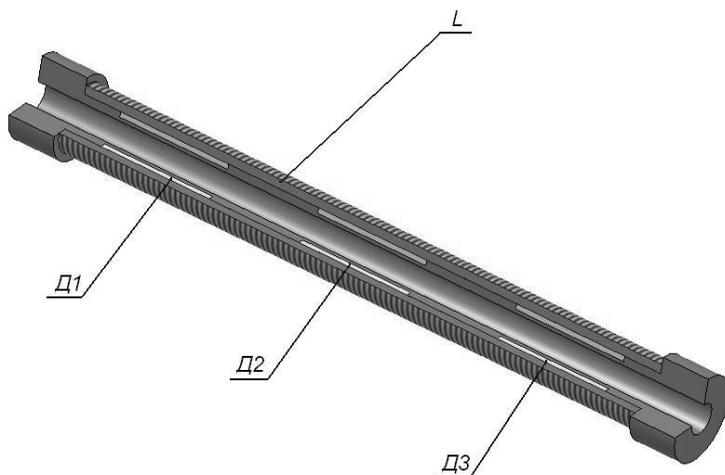


Рис. 7. Устройство соленоида

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 (емкостей) 5* состоит из трех пар конденсаторов:

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

Погрешность емкости конденсаторов составляет 20 % от номинала.

*Трансформатор — набор индуктивностей 6.* В качестве набора индуктивностей используются четыре обмотки трансформатора, выполненные на ферритовом кольцевом сердечнике (тип сердечника К32×20×6, феррит марки М2000НМ). В табл. 5 приведены основные параметры обмоток. Погрешность значений индуктивности составляет 20 % от указанного номинала.

Таблица 5

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

\* Начало каждой обмотки помечено точкой.

Обмотки трансформатора конструктивно разделены. Они занимают четыре секции кольцевого сердечника, сдвинутые друг от друга на  $90^\circ$ .

*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, соединенные последовательно:

- 3 кОм — 10 кОм — 100 кОм (0,5 Вт).

Ячейка RC (9) состоит из сопротивления номиналом 51 кОм и двух конденсаторов (табл. 6).

Таблица 6

Обозначение	Емкость, мкФ
1M	1,0
	100*

\* Неполярный электролитический конденсатор.

## 2.2. Модуль M04 «Конденсатор разборный»

Данный модуль приведен на рис. 8.

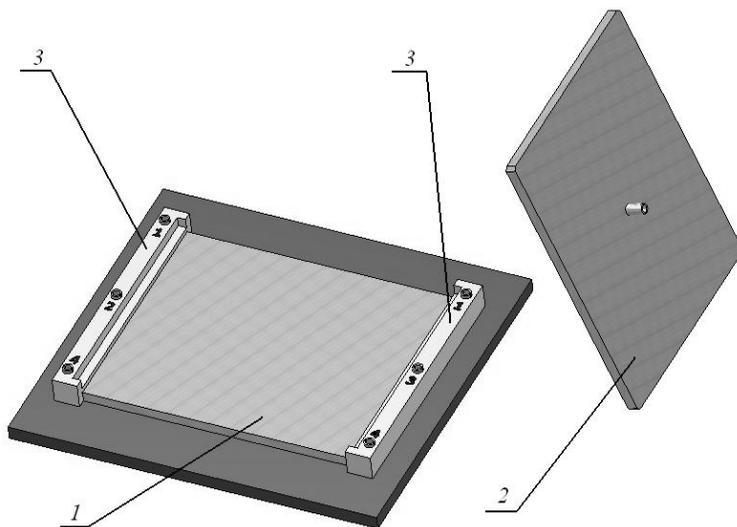


Рис. 8. Модуль M04 «Конденсатор разборный»

Конденсатор состоит из нижней пластины 1, смонтированной на плате 4, верхней съемной 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 диэлектриче-

ских материалов, толщиной  $d$ . В том случае, когда  $d > d_0$ , расстояние между проводящими пластинами будет определяться толщиной слоя диэлектрика.

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

Электрическая принципиальная схема модуля приведена на рис. 9. Резистор  $R_0$  подсоединен к гнездам 2 и 4, конденсатор — к гнездам 3 и 4, т.е. гнездо 4 является общим. Нижняя пластина конденсатора подсоединена к гнезду 1.

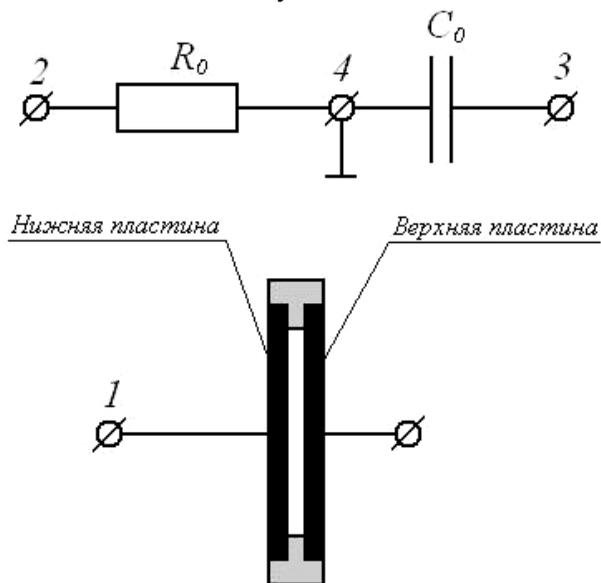


Рис. 9. Электрическая принципиальная схема модуля «Конденсатор разборный»

### 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 разъема типа СГ-1 2, имеющие пять контактных гнезд. На гнезда разъемов выведено постоянное напряжение +9 и -9 В относительно общего

провода, помеченного знаком « $\perp$ » на платах модулей. Назначение контактов разъема видно из табл. 7.

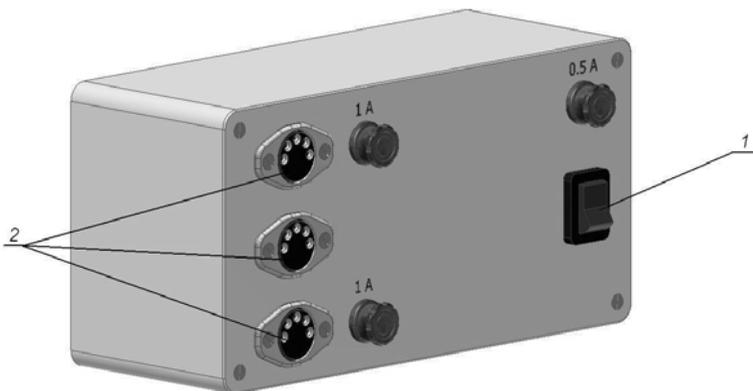


Рис. 10. Блок питания

Таблица 7

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

К разъемам 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 две клеммы 2. 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 остается только магнитное поле, создаваемое током, 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  $R = 9,0$  Ом;
- индуктивность  $L = 5,2$  мГн.

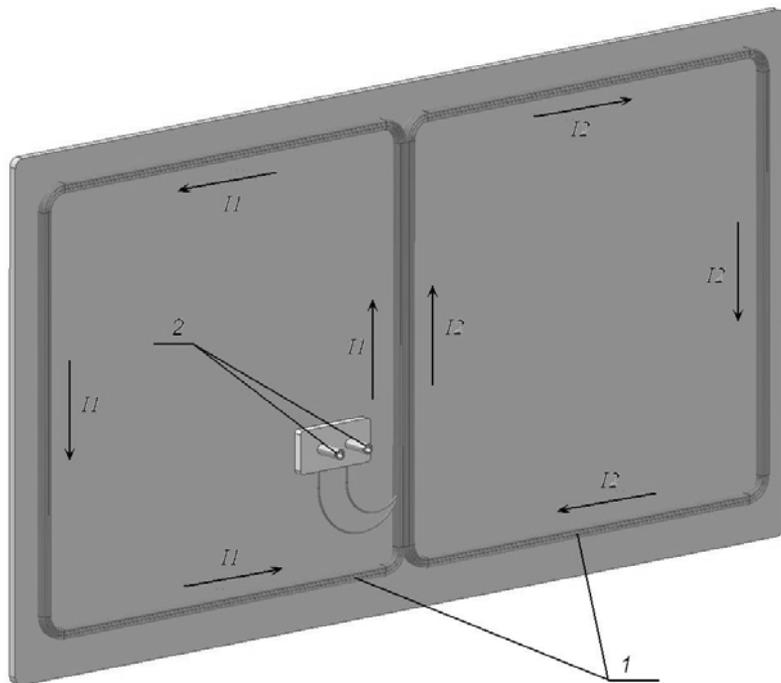


Рис. 11. Контур «Модель прямого тока»

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 включить соленоиды последовательно (соединив их клеммы накрест, как показано на рис. 13), их можно рассматривать как один соленоид. Приведем размеры соленоида в миллиметрах:

- длина — 120;
- средний (эффективный) диаметр — 52.

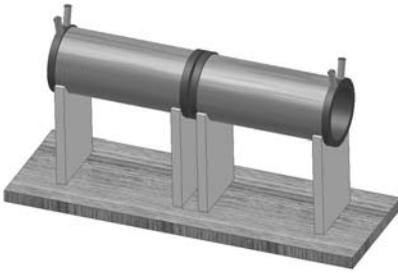


Рис. 12. Соленоид на стойках

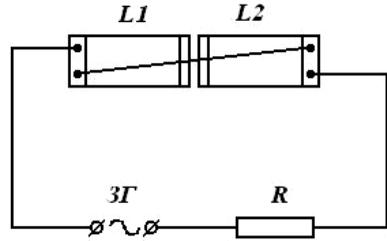


Рис. 13. Схема последовательного соединения соленоидов

*Плоский индукционный датчик* (рис. 14) может быть введен в зазор соленоида для изучения распределения электрического и магнитного полей по радиусу соленоида. Датчик имеет девять кольцевых контуров, каждый из которых представляет собой десять витков проводящей дорожки. Номера клемм для соответствующих датчиков, указаны в табл. 8.

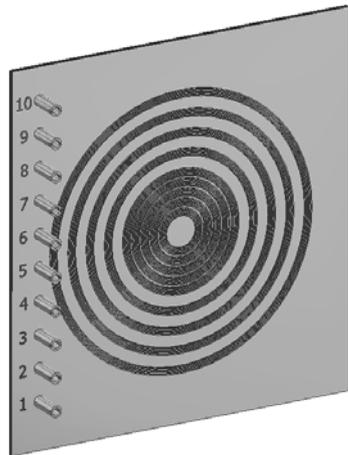


Рис. 14. Плоский индукционный датчик

Таблица 8

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

## 4. ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ, ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ КОМПЛЕКСА

### 4.1. Электронный осциллограф «MATRIX MOS 620» и генератор функциональный ГЗЧМ

В комплект лабораторного комплекса ЛКЭ-1 входит электронно-лучевой осциллограф типа MATRIX MOS620 (рис. 15). Осциллограф предназначен для наблюдения колебательных и импульсных электрических процессов, и для измерения амплитудно-временных параметров изучаемых сигналов. Назначение органов управления и порядок работы с осциллографом подробно изложены в описании лабораторной работы 1а.

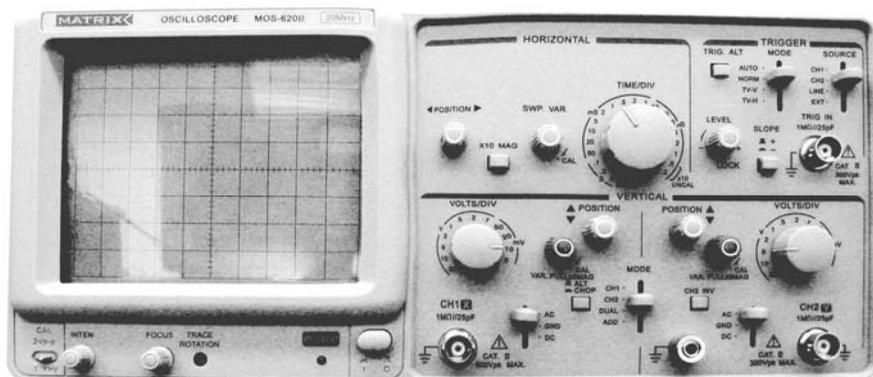


Рис. 15. Электронный осциллограф MATRIX MOS6XX



Рис. 16. Генератор функциональный ГЗЧМ

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

## 4.2. Вольтметр универсальный VC-97

Универсальный цифровой вольтметр типа VC-97 (рис. 17) предназначен для измерения следующих величин:

- постоянное напряжение;
- переменное напряжение;
- сопротивление;
- постоянный ток;
- переменный ток;
- емкость конденсаторов;
- частота гармонических колебаний.

В табл. 9 даны измеряемые физические величины и рабочие диапазоны измерения, где  $U_x$ ,  $I_x$ ,  $R_x$ ,  $C_x$ ,  $\nu_x$  — измеренные значения величин;  $D$  — единица младшего разряда



Рис. 17. Вольтметр универсальный VC-97

Таблица 9

Величина	Условное обозначение	Единицы измерения	Диапазон измерений	Приборная погрешность
Постоянное напряжение	V =	мВ, В	400 мВ — 400 В	$\pm(0,005U_x + 2D)$
			400 — 1000 В	$\pm(0,01U_x + 4D)$
Постоянный ток	$\mu\text{A}$ , mA, 10A	мкА, mA	400 мкА — 400 mA	$\pm(0,008I_x + 6D)$
		A	400 mA — 10 A	$\pm(0,012I_x + 10D)$
Переменное напряжение (действующее значение)	V ~	мВ, В	До 400 мВ	$\pm(0,015U_x + 6D)$
			400 мВ — 400 В	$\pm(0,008U_x + 6D)$
			400 — 750 В	$\pm(0,01U_x + 6D)$

Величина	Условное обозначение	Единицы измерения	Диапазон измерений	Приборная погрешность
Переменный ток (действующее значение)	$\mu\text{A}, \text{mA}, 10\text{A}$	мкА, mA	400 мкА — 400 mA	$\pm(0,01I_x + 6D)$
		A	400 mA — 10 A	$\pm(0,02I_x + 15D)$
Сопротивление	$\Omega$	Ом, кОм, МОм	До 400 Ом	$\pm(0,008R_x + 5D)$
			4 кОм — 4 МОм	$\pm(0,008R_x + 4D)$
			4 — 40 МОм	$\pm(0,12R_x + 5D)$
Емкость		нФ, мкФ	4 — 40 нФ	$\pm(0,025C_x + 6D)$
			400 нФ — 40 мкФ	$\pm(0,035C_x + 8D)$
			200 мкФ	Не нормируется
Частота	30 MHz	Гц, кГц, МГц	100 Гц — 10 МГц	$\pm(0,005V_x + 4D)$

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

**Внимание!** Прежде, чем начать работу с прибором, 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*

1. Подключите черный щуп к входу «СОМ», а красный ко входу «V  $\Omega$  Hz».

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

3. Прибор работает в режиме автоматического выбора диапазона измерения. Для установки диапазона измерения вручную нажмите кнопку «RANGE». Для возвращения в режим автоматического выбора диапазона удерживайте кнопку «RANGE» нажатой в течение двух секунд.

**Примечание.** При измерении **переменного напряжения** диапазон рабочих частот прибора VC-97 составляет 40 ÷ 400 Гц. За пределами этого диапазона показания прибора **не будут соответствовать** действительному значению измеряемой величины.

### *Измерение тока*

1. Подключите черный 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 «10A».

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

### *Измерение сопротивлений*

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

2. Установите переключатель функций на желаемый режим измерения на режим измерения сопротивления «Ω».

3. Подсоедините щупы прибора к измеряемому сопротивлению.

4. Для ручного выбора пределов измерения нажмите кнопку SELECT.

5. **Внимание!** При измерении сопротивлений в схеме убедиться, 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 оснащен устройством автовыключения. Если не производится никаких измерений, то через 15 мин раздается звуковой сигнал, после чего вольтметр универсальный выключается.

## 4.3. Цифровой мультиметр М-830В



Рис. 18. Цифровой мультиметр М-830В

Цифровой мультиметр М-830В (рис. 18) представляет собой комбинированный прибор, позволяющий измерять различные электрические параметры. В табл. 10 приведен перечень измеряемых физических величин и рабочие диапазоны измерения, где  $U_x$ ,  $I_x$ ,  $R_x$  — измеренные значения величин;  $D$  — единица младшего разряда.

Кроме перечисленных, мультиметр может выполнять еще ряд специальных функций — измерение температуры (с использованием выносного датчика термпары), тестирование транзисторов и диодов, проверку целостности («прозвонку») электрических цепей и соединений.

Таблица 10

Величина	Условное обозначение	Единицы измерения	Диапазон измерений	Приборная погрешность
Постоянное напряжение	DCV	mV, V	До 200 мВ	$\pm(0,0025U_x + 2D)$
			2 — 1000 В	$\pm(0,005U_x + 2D)$
Постоянный ток	DCA	mA	200 мкА — 20 мА	$\pm(0,01I_x + 2D)$
			До 200 мА	$\pm(0,012I_x + 2D)$
Постоянный ток	DCA	A	До 10 А	$\pm(0,02I_x + 2D)$
Переменное напряжение (действующее значение)	ACV	V	До 700 В	$\pm(0,012U_x + 10D)$
Сопротивление постоянному току	$\Omega$	$\Omega, k\Omega$	200 $\Omega$ — 200 к $\Omega$	$\pm(0,008R_x + 2D)$
			До 2000 к $\Omega$	$\pm(0,01R_x + 2D)$

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.

**Внимание!** Включать мультиметры следует только на время измерений. По окончании работы с установкой мультиметры должны быть выключены!

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

*Контактное гнездо «V/ $\Omega$ /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.*

### 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 развертки дает возможность исследовать периодические и импульсные электрические процессы.

**Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ).** Основным узлом любого ЭО является электронно-лучевая трубка (рис. 1.1), с помощью которой исследуемый сигнал преобразуется в видимое изображение на экране 7. Источником электронов служит нагреваемый оксидный катод 1, который помещен внутри управляющего электрода (модулятора) 2.

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

Фокусировка электронного пучка осуществляется первым анодом 3, на который подается положительное относительно катода фокусирующее напряжение  $U_{а1}$ . Для того чтобы электроны достиг-

ли экрана, их ускоряют при помощи второго анода 4, на который подается положительное напряжение  $U_{a2}$ . При попадании на экран электроны вызывают свечение особого вещества — люминофора, нанесенного на поверхность экрана.

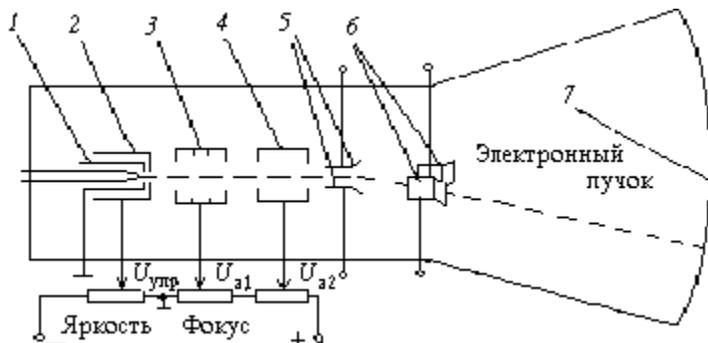


Рис. 1.1. Схема питания ЭЛТ: 1 — катод; 2 — управляющий электрод (модулятор); 3 — первый анод; 4 — второй анод; 5 — вертикально отклоняющие пластины; 6 — горизонтально отклоняющие пластины; 7 — экран

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

Принцип получения развернутого во времени изображения исследуемого сигнала на экране ОЭ показан на рис. 1.2. Используемый сигнал подается 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 подается от генератора развертки напряжение, нарастающее линейно.

Генератор развертки может работать в периодическом и ждущем режимах.

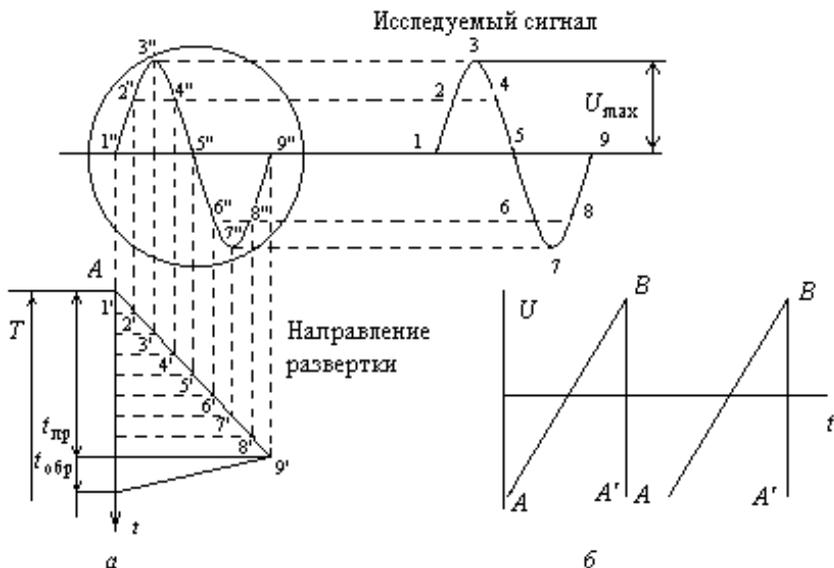


Рис. 1.2. Развертка сигнала во времени с помощью напряжения пилообразной формы

**Линейная непрерывная развертка.** Генератор развертки вырабатывает линейно возрастающее напряжение (пилообразной формы), см. рис. 1.2, *a*.

При минимальном значении развертывающего напряжения  $U_{\min}$  (точка *A* на рис. 1.2, *a*) луч находится на экране осциллографа в крайнем левом положении  $1''$ . По мере роста напряжения от *A* до *B* луч перемещается с постоянной скоростью слева направо по горизонтальной прямой (оси времени). Когда напряжение падает от *B* до *A*, луч совершает обратный ход. Период линейной развертки  $T = t_{\text{пр}} + t_{\text{обр}}$  ( $t_{\text{обр}} \ll t_{\text{пр}}$ ). Обратный ход на экране не виден, так как в осциллографе имеется устройство, гасящее луч во время обратного хода.

**Ждущая развертка.** В этом случае развертывающее пилообразное напряжение попадает на горизонтально отклоняющие пластины лишь тогда, когда исследуемый импульс поступает на вход осциллографа. После того как под действием развертывающего напряжения луч совершает один цикл прямого и обратного ходов, развертка прекращается и «ждет» прихода нового импульса, запускающего ее (см. рис. 1.2, *б*).

**Синхронизация.** Для получения на экране трубки четкого и неподвижного изображения необходимо правильно выбрать синхронизацию развертки. Процесс синхронизации заключается в принудительном воздействии внешним сигналом на генератор развертки. 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 развертки 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. 1.3, *a* изображен одиночный прямоугольный импульс, на котором показаны его параметры (прямоугольным называют 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 путем продления плоской части вершины до пересечения с фронтом прямоугольного импульса;  $\tau_{и}$  — длительность прямоугольного импульса, отсчитываемая по уровню 0,5 амплитуды;  $\tau_{ф}$  — длительность фронта прямоугольного импульса в интервале 0,1 ÷ 0,9 амплитуды;  $\tau_{с}$  — длительность среза прямоугольного импульса в интервале 0,9 ÷ 0,1 амплитуды.

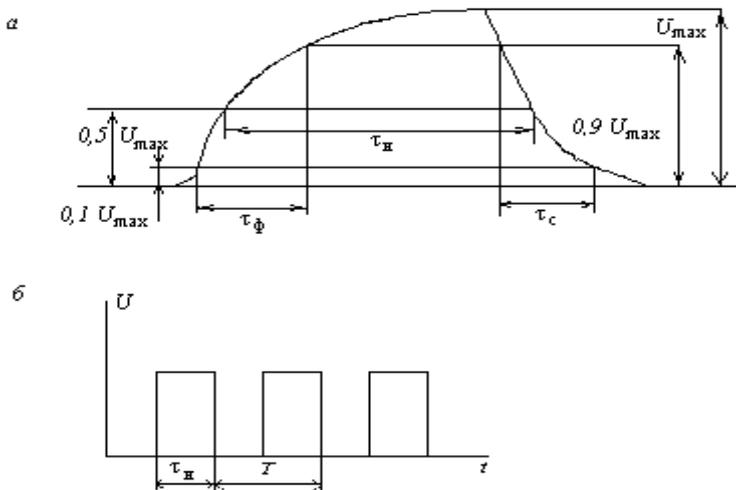


Рис. 1.3. Параметры импульсного сигнала

Периодом повторения импульсов  $T$  называют отрезок времени между началом двух соседних однополярных импульсов (см. рис. 1.3, 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 развертки может работать либо в автоматическом, либо в ждущем режиме. Предусмотрена как внутренняя, так и внешняя синхронизация. Канал горизонтального отклонения луча можно отключить от генератора развертки и подключить к внеш-

нему источнику напряжения, например для наблюдения сложения перпендикулярных колебаний, фазовых диаграмм и т. д.

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

## ЗАДАНИЯ

1. Включить в сеть и настроить осциллограф.

**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.

В блоке развертки «HORIZONTAL» (далее «Н») кнопка «x10 MAG» должна быть в отжатом положении. При нажатии этой кнопки увеличивается в десять раз горизонтальная скорость движения луча по экрану за счет увеличения в 10 раз размаха хода луча при неизменной частоте развертки. В блоке синхронизации «TRIGGER» («Т») 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, должен находиться в положении «CH2».

Включить осциллограф, нажав кнопку «POWER». Через 15 — 20 с на экране должна появиться горизонтальная линия развертки. 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» («Р») блока «Н» и канала 2 расположить линию развертки так, чтобы она занимала весь экран

по горизонтали и проходила через среднюю горизонтальную линию измерительной сетки, нанесенной 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».

Ручками ступенчатой и плавной регулировки усиления «VOLT/DIV» («V/D») канала 2 устанавливают желаемый размах изображения на экране. Ручкой «LEVEL» («L») блока «Т» добиваются, чтобы изображение было неподвижным. Ручками ступенчатой и плавной регулировки скорости «TIME/DIV» (T/D) и «SWP.VAR» блока «Н» получают на экране изображение желаемого числа периодов синусоидального сигнала. Положение изображения по вертикали и горизонтали выбирают ручками «Р» канала 2 и блока «Н».

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

3. Измерить период и частоту синусоидального сигнала.

Ручку «SWP.VAR» блока «Н» 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. 1.4, а).

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

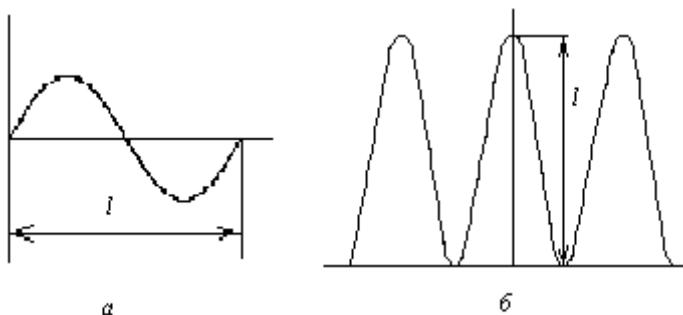


Рис. 1.4. Периодический сигнал (а),  
 периодический сигнал в выбранном масштабе (б)

Измерить периоды и частоты синусоидального сигнала генератора ГЗЧМ в диапазонах 10, 100, 1к, и 10к. Число, соответствующее выбранному диапазону, указывает 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 табл. 1.1.

Таблица 1.1

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

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

#### 4. 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 «P» канала 2 расположить синусоиду так, чтобы минимумы синусоиды оказались на уровне одной из нижних горизонтальных линий сетки экрана. Ручкой «P» блока «Н» совместить максимум синусоиды со средней вертикальной линией сетки (см. рис. 1.4, б). Посчитать число больших делений на длине  $l$ . Размах сигнала равен произведению числа делений на показания переключателя «V/D». Амплитуда сигнала равна половине размаха, действующее значение напряжения равно амплитуде, деленной на  $\sqrt{2}$ .

Произвести градуировку шкалы ручки «Амплитуда» генератора ГЗЧМ. Прodelать не менее десяти измерений, результаты занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

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

#### 5. Измерить параметры прямоугольного импульса.

На генераторе ГЗЧМ поставить переключатель выбора формы сигнала в положение « $\square$ » (третья слева позиция ручки переключения). Выбрать частоту сигнала не менее 60 кГц. Ручку «Амплитуда» установить в промежуточное положение. Ручками «V/D» (ступенчато и плавно) и «P» канала 2 добиться, чтобы изображение сигнала вписывалось точно между верхней и нижней линиями сетки на экране осциллографа. Ручкой «L» добиться неподвижного изображения импульсов на экране. Переключателем «T/D» и ручкой «P» 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. 1.4).

Измерить  $\tau_{ф}$  и  $\tau_{с}$  двумя способами\*.

**Способ 1.** Сдвинуть изображение ручкой «Р» блока «Н» немного вправо так, чтобы была видна точка начала развертки изображения. Медленно вращая ручку «L», опустить эту точку до уровня 0,1 (0,8 деления по вертикали). При этом изображение должно оставаться устойчивым (неподвижным). Переключателем «T/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 0,1 и 0,9 (см. рис. 1.4, а). Вычислить  $\tau_{ф}$ .

Переключателем «T/D» снова установить «нерастянутое» изображение. В блоке «Т» нажать кнопку «SLOPE» («S»), при этом генератор развертки запускается задним фронтом (спадом) импульса. С помощью ручки «L» добиваются, чтобы начало развертки изображения находилось на уровне не ниже 0,9. Действуя аналогично (см. выше), измерить  $\tau_{с}$ . По окончании измерений вернуть кнопку «S» в исходную позицию.

**Способ 2.** С помощью переключателя «T/D», ручек «Р» блока «Н» и «L» получить в центре экрана изображение переднего фронта импульса. Размер изображения по горизонтали должен составлять примерно одно деление (рис. 1.5, а). Нажать кнопку «x10 MAG» блока «Н». Ручкой «Р» блока «Н» удобно расположить растянутое изображение фронта на экране. Измерить число делений по горизонтали, расположенных между уровнями 0,1 и 0,9 (см. рис. 1.3, а). Уровню 0,1 соответствует 0,8 деления по вертикали. Показания переключателя «T/D» необходимо разделить на 10. Вычислить  $\tau_{ф}$ .

Отжать кнопку «x10 MAG», аналогичным образом получить изображение спада импульса (см. рис. 1.5, б). Снова нажать кнопку «x10 MAG» и, действуя аналогично, измерить  $\tau_{с}$ .

Результаты измерений занести в табл. 1.3.

---

\* По техническим причинам может быть оставлен один из способов.

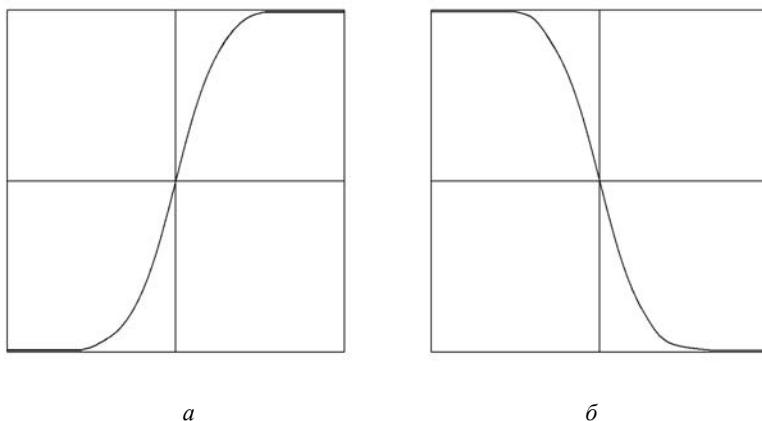


Рис. 1.5. Подготовка изображения фронта и спада импульса к измерению

Таблица 1.3

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

### 6. Обработка результатов измерений.

По результатам измерений задания 3 вычислить относительную среднеквадратичную погрешность измерения частоты в пределах каждого частотного диапазона:

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

где  $n$  — число измерений в пределах каждого диапазона ( $n = 5$ ).

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 задания 4 построить график зависимости амплитуды синусоидаль-

ного сигнала ГЗЧМ от показаний ручки «Амплитуда». Приборную погрешность измерения по осциллографу принять равной 3 %; учесть также погрешность отсчета по экрану ( $\sim 0,2$  дел.).

По результатам задания 5 вычислить скважность импульса. Используя формулу (1.1) и замечания к формуле, оценить погрешности измерения характеристик импульса (в заключении привести параметры импульса с указанием погрешностей).

7. Выключение установки.

Выключить генератор ГЗЧМ. Еще раз проверить положение органов управления осциллографа в соответствии с заданием 1. Выключить питание осциллографа кнопкой «POWER». Кабель от входа осциллографа не отсоединять!

### **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 развертка, ждущая развертка, 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. Что такое скважность импульса, коэффициент заполнения?

## Работа ба

# ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА

---

*Цель:* изучение термоэлектронной эмиссии и определение работы выхода электрона из металла.

## ВВЕДЕНИЕ

Термоэлектронная эмиссия (ТЭ) — испускание электронов, нагретыми твердыми (реже жидкими) телами. Для большинства веществ ТЭ наблюдается при температурах, значительно более высоких, чем комнатная. Например, для получения ТЭ заметной величины большинство тугоплавких металлов необходимо нагревать до температуры  $\sim 2000 \div 2500$  К.

Явление ТЭ можно объяснить с позиций современной теории о строении металлов. Металл представляет собой кристаллическое тело, в узлах решетки которого расположены положительно заряженные ионы. Между ионами находятся валентные электроны, способные свободно перемещаться внутри металла (электроны проводимости). Вблизи поверхности металла существует потенциальный барьер, препятствующий выходу электронов из металла, поэтому для удаления электрона из металла, нужно затратить некоторую энергию.

Можно считать, что потенциальная энергия электронов на границе «металл — вакуум» изменяется, как показано на рис. ба.1, где  $A$  — уровень потенциальной энергии электрона внутри металла. Потенциальная энергия электрона вне металла полагается равной нулю, следовательно, внутри металла она отрицательна.

Для того чтобы электрон мог покинуть металл, его кинетическая энергия должна быть больше глубины потенциальной ямы  $W_{p0}$ .

Распределение электронов по энергиям в металле подчиняется распределению Ферми — Дирака:  $dn/dW \sim 1/\{1 + \exp[(W - W_F)/(kT)]\}$  (рис. ба.2), где  $W$  — энергия электрона,  $T$  — абсолютная температура,  $dn$  — число электронов с энергией в интервале  $(W, W + dW)$ . Из распределения следует, что только незначительная часть электронов в металле обладает энергиями, большими некоторого значения  $W_F$ , называемого *уровнем Ферми* (обычно  $kT \ll W_F$ : при комнатной температуре  $kT \approx 1/40$  эВ,  $W_F$  — порядка нескольких электрон-вольт). Уровень Ферми является характеристикой данного металла, причем  $W_F < W_{p0}$ . Энергию, равную разности между глубиной потенциальной ямы  $W_{p0}$  и уровнем Ферми  $W_F$ , называют *работой выхода электрона из металла* и обозначают  $e\phi$  ( $e$  — заряд электрона,  $\phi$  — потенциал выхода). Обычно  $e\phi$  измеряется в электрон-вольтах.

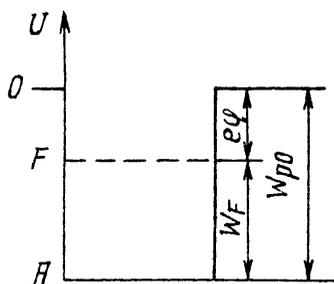


Рис. ба.1. Потенциальная энергия электрона в металле

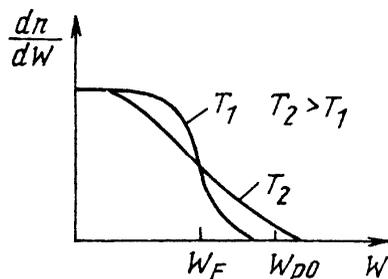


Рис. ба.2. Распределение электронов по энергиям в металле

При комнатной температуре количество электронов, обладающих энергией, достаточной для выхода из металла ( $> W_{p0}$ ), незначительно (кривая  $T_1$  на рис. ба.2). При нагревании металла количество таких электронов резко возрастает (кривая  $T_2$ ) и возникает ТЭ.

Прибором, с помощью которого изучается ТЭ, может служить электровакуумный диод. Схематическое устройство такого диода показано на рис. ба.3. Проволока из чистого металла или покрытая слоем исследуемого вещества (катод) окружена анодом и помеще-

на в вакуумный баллон. Проволока нагревается до требуемой температуры  $T$  током накала. Нагретый катод испускает электроны, которые образуют электронное облако около поверхности катода. Основная часть электронов не может совсем уйти из катода, так как на них действует кулоновская сила притяжения со стороны катода, оказавшегося положительно заряженным. Электроны вылетают и снова возвращаются на катод, так что устанавливается динамическое равновесие, подобное равновесию между жидкостью и ее насыщенным паром. Только наиболее «быстрые» электроны достигают анода, создавая слабый начальный ток в отсутствие внешнего электрического поля.

Если с помощью внешнего источника напряжения создать электрическое поле, напряженность которого направлена от анода к катоду, электронное облако около катода будет рассасываться, а электрический ток в цепи возрастать. Величина тока зависит от плотности электронного облака, т.е. от температуры катода, и напряженности электрического поля. Если напряженность поля выбрать такой, чтобы каждый электрон, вылетевший из катода, попал на анод, то величина анодного тока будет зависеть от температуры катода и установится ток насыщения.

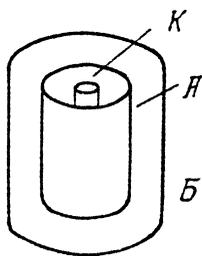


Рис. ба.3. Схематическое устройство электровакуумного диода:  $K$  — катод;  $A$  — анод;  $B$  — вакуумный баллон

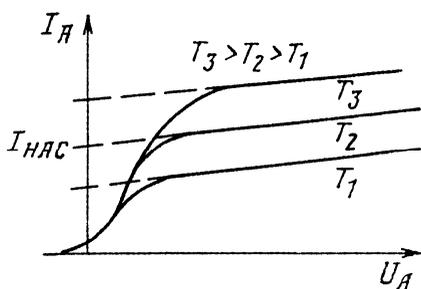


Рис. ба.4. Вольт-амперные характеристики электровакуумного диода

Кривую зависимости тока в диоде от анодного напряжения (напряжения между анодом и катодом) называют *вольт-амперной характеристикой диода*. На рис. ба.4 представлено семейство вольт-амперных характеристик для трех различных температур катода.

При увеличении анодного напряжения  $U_a$  анодный ток  $I_a$  увеличивается и достигает участка насыщения. На участке насыщения анодный ток возрастает лишь незначительно (эффект Шоттки) за счет электронов, вырываемых из металла самим электрическим полем. Для получения численного значения тока насыщения, обусловленного ТЭ, участок насыщения экстраполируется прямой до пересечения с осью ординат.

Плотность тока насыщения  $j_{\text{нас}}$  (ток с единицы площади поверхности катода) зависит от температуры катода  $T$  и от работы выхода электронов из металла  $e\varphi$ :

$$j_{\text{нас}} = AT^2 \exp(-e\varphi/(kT)), \quad (6a.1)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана. Формула (6a.1) называется *формулой Ричардсона — Дэйммена*. Постоянная  $A$  слабо зависит от материала катода. Так как ток насыщения  $I_{\text{нас}}$  пропорционален плотности тока насыщения  $j_{\text{нас}}$ , то формулу (6a.1) можно переписать в виде

$$I_{\text{нас}} = A'T^2 \exp(-e\varphi/(kT)).$$

Логарифмируя, получаем

$$\ln(I_{\text{нас}} / T^2) = C - \frac{1}{T} \frac{e\varphi}{k}, \quad (6a.2)$$

где  $C = \ln A'$ . Таким образом, зависимость  $\ln(I_{\text{нас}} / T^2)$  от  $(1/T)$  носит линейный характер (график — прямая линия), а угловой коэффициент этой прямой определяется работой выхода  $e\varphi$ .

Цель настоящей работы — определение работы выхода для вольфрама с добавками других металлов, уменьшающих хрупкость нити накала (катода). Определение  $e\varphi$  осуществляется по экспериментальным вольт-амперным характеристикам диода с оксидным катодом.

Температуру катода можно вычислить, воспользовавшись зависимостью сопротивления катода  $R_k$  от температуры  $T$ . В диапазоне температур 300 ÷ 2500 К эту зависимость можно приближенно счи-

тять линейной:  $R_k = \alpha(T - B)$ , где  $\alpha$  и  $B$  — константы. Для оксидного катода  $B = 50$  К. Измерив сопротивление  $R_{к0}$  при комнатной температуре  $T_0$  и сопротивление  $R_k$  при неизвестной температуре  $T$ , из приведенной выше зависимости находим:

$$T = B + R_k \frac{T_0 - B}{R_{к0}}. \quad (6a.3)$$

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

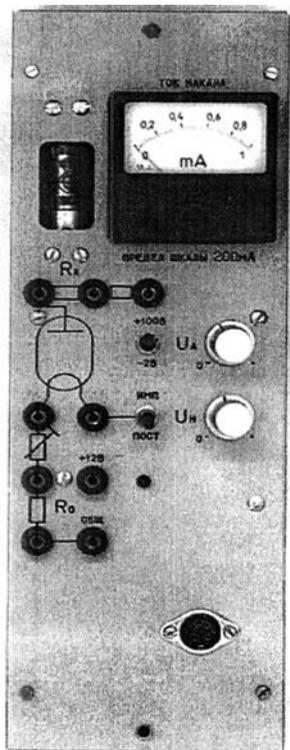
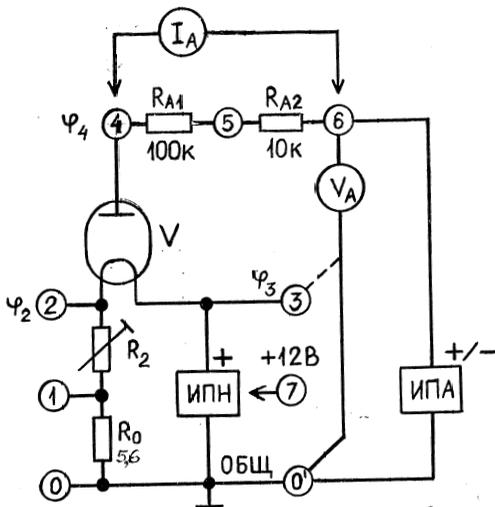


Рис. 6a.5. Панель модуля МРТ-2

Работа выполняется на модуле МРТ-2 (рис. 6a.5 и 6a.6), состоящем из лампы-диода (1Ц11П или 3Ц18П), стрелочного миллиамперметра для оценки тока накала  $I_n$ , источника питания накала ИПН и источника питания анода ИПА. Напряжение накала  $U_n$  (импульсное или постоянное) и анодное напряжение  $U_a$  (положительное или отрицательное) можно изменять по величине с помощью переменных резисторов, ручки от которых выведены на панель модуля (см. рис. 6a.5). Расположение контактов 0, 1, ..., 7 на схеме (см. рис. 6a.6) соответствует их расположению (в виде «гнезд») на панели модуля. Контакт 7 для внешнего источника напряжения (+12 В) в работе не участвует. Для измерения токов и напряжений используется цифровой прибор — мультиметр типа М-830В, смонтированный (в количестве одного или двух) в каркасе с модулем МРТ-2. Модуль снабжен сетевым блоком питания, к которому подключается с помощью специального разъема, что необходимо сделать перед выполнением задания.

Рис. 6а.6. Электрическая схема МРТ-2



## ЗАДАНИЯ

1. Определите сопротивление катода  $R_{к0}$  при комнатной температуре  $T_0$ .

Для этого измерьте мультиметром напряжение  $U_0$  на резисторе  $R_0$  (контакты 0 — 1) и напряжение  $U_k$  на катоде (контакты 2 — 3, см. рис. 6а.6). Измерения проводятся при токе  $I_n = 5 \div 10$  мА. Такой ток можно создать подключением катода к источнику анодного напряжения ИПА через резистор  $R_a$  (соединяют контакты 5 и 3), отключив ИПН (тумблер ИМП/ПОСТ — в среднем положении, рис. 6а.5). Величину анодного напряжения  $U_a$  устанавливают в пределах  $50 \div 100$  В (тумблер « $U_a$ » — в положении «+100 В»). Сопротивление катода вычисляется по формуле:

$$R_k = R_0 \frac{U_k}{U_0}, \quad (6а.4)$$

где  $R_0 = 5,6$  Ом.

Измерения проведите при трех значениях тока  $I_n$ , меняя анодное напряжение ручкой « $U_a$ » (рис. 6а.5) от максимального в сторону уменьшения. Величину тока  $I_n$  достаточно проконтролировать по стрелочному миллиамперметру. Напряжение  $U_a$  можно измерить

мультиметром между контактами 0 и 6 (см.  $V_a$  на рис. 6а.6). Окончательный результат для  $R_{к0}$  усредните по трем значениям. Запишите температуру  $T_0$  [К].

2. Проведите эксперимент по ТЭ.

Источник питания накала используется в режиме «ПОСТ» (см. тумблер на рис. 6а.5). Анодное напряжение (режим «+100 В») измеряется мультиметром между контактами 3 и 6 (см. вольтметр  $V_a$  на рис. 6а.6). Анодный ток также измеряется мультиметром между контактами 4 и 6 (см.  $I_a$  на рис. 6а.6):

а) в режиме амперметра на пределах от 200 мкА до 2 мА;

б) в режиме вольтметра при токе менее 10 мкА, по падению напряжения  $U_{Ra}$  на сопротивлении в цепи анода, т.е.  $I_A = U_{Ra}/R_a$ ,  $R_a = R_{a1} + R_{a2} = 110$  кОм.

Изменяя напряжение  $U_n$  и ток накала  $I_n$  резистором  $R_2$  (ручка « $U_n$ » на рис. 6а.5) устанавливают температуру катода. Для 6 — 7 значений температуры катода измерьте анодный ток насыщения  $I_{нас}$  [мкА] при максимальном анодном напряжении (эффектом Шоттки для используемых в модуле диодов можно пренебречь). Для каждой температуры измерьте также напряжения  $U_0$  и  $U_k$  (см. п. 1 задания). Определите ток накала:  $I_n = U_0/R_0$ . Все напряжения ( $U_a$ ,  $U_0$ ,  $U_k$ ) и токи ( $I_n$ ,  $I_{нас}$ ) занесите в таблицу.

3. Вычислите сопротивление катода (см соотношение (6а.4)) и определите температуру катода  $T$  [К] по формуле (6а.3) для всех токов накала. Рассчитайте величины  $1/T$  и  $\ln(10^6 \cdot I_{нас}/T^2)$ . Значения функции  $\ln(10^6 \cdot I_{нас}/T^2)$  удобнее для построения графика (см. п. 4 задания) с точки зрения его оптимального расположения на координатной плоскости. Все вычисленные значения для  $R_k$ ,  $T$ ,  $1/T$ ,  $\ln(10^6 \cdot I_{нас}/T^2)$  занесите в общую таблицу.

4. Постройте прямолинейный график  $\ln(10^6 \cdot I_{нас}/T^2) = f(1/T)$ .

5. Определите работу выхода  $e\phi$  [эВ] оксидного катода по угловому коэффициенту графика, умножив его на постоянную Больцмана  $k$  (см. формулу (6а.2)).

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется явлением ТЭ?
2. Почему поверхность металла представляет для электрона потенциальную яму?

3. Известна глубина потенциальной ямы  $W_{p0}$ . Какова должна быть кинетическая энергия электрона внутри металла, чтобы он мог покинуть металл?
4. Что такое уровень Ферми?
5. Дайте определение работы выхода и потенциала выхода электрона из металла.
6. Почему при увеличении температуры катода увеличивается  $I_{нас}$ ?
7. Объясните качественный ход вольт-амперной характеристики вакуумного диода.
8. Зачем в эксперименте по ТЭ в данной работе измеряются напряжения  $U_0$  и  $U_k$ ?
9. По какому графику и как вычисляется работа выхода в данной работе?

## 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.

### МЕТОД МАГНЕТРОНА

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

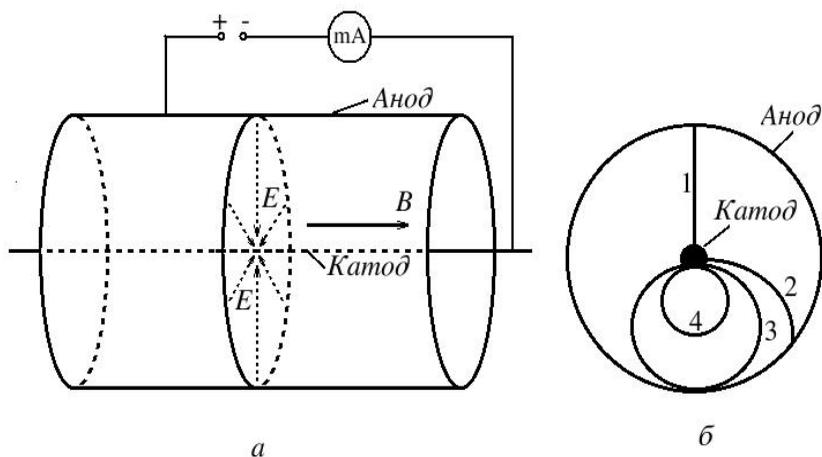


Рис. 7а.1. Схема магнетрона

Электрическое поле направлено по радиусу цилиндра от анода к катоду, и, таким образом, магнитное и электрическое поля в магне-

троне взаимно перпендикулярны. Если магнитное поле отсутствует, то электроны, эмитированные катодом, под действием электрического поля движутся прямолинейно по радиусам (см. 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 (см. 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 (см. рис. 7а.1, б, кривая 3). При дальнейшем увеличении  $B$  радиусы кривизны траектории электронов будут уменьшаться (см. 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).

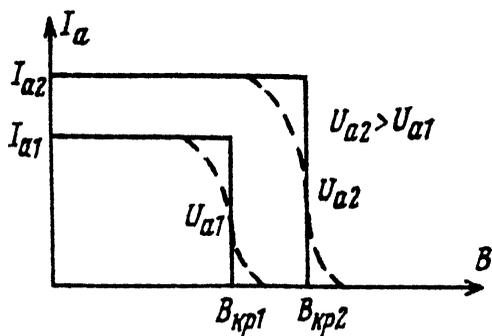


Рис. 7а.2. Сбросовые характеристики магнетрона

Критическое поле  $B_{\text{кр}}$  есть некоторая функция анодного напряжения  $U_a$ . Найдем эту зависимость в предположении, что модуль скорости электрона не изменяется во время его движения, и скорость перпендикулярна к  $B$ . 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 инжекции 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 могут быть произвольными, 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, т.е. 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  $n_\tau$ , покидающих катод за одинаковые промежутки времени  $\Delta\tau$ , причем 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  $\Delta\tau$  среднее значение числа вылетающих электронов равно  $n_0\Delta\tau$ . 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 промежутки  $\Delta\tau$  мала, то средний квадрат отклонений величины  $n_\tau$  равен среднему значению этой величины:

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

Если на аноде лампы создан положительный потенциал по отношению к катоду, то за промежуток времени  $\Delta\tau$  через лампу протечет 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)  $I_0 = n_\tau e \Delta\tau / \Delta\tau = n_0 e$ . Приравняем друг другу правые части уравнений (7a.2) и (7a.3):

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

Умножим обе части равенства на квадрат величины заряда электрона и поделим на  $(\Delta\tau)^2$ :

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

Откуда

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

В скобках слева стоит разность токов

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

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

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

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

Промежуток времени  $\Delta\tau$  — постоянная времени измерительного прибора, регистрирующего дробовой эффект. Он связан с частотной шириной полосы  $\Delta f$  пропускания прибора соотношением:  $\Delta\tau = 1/(2\Delta f)$ . Заменяя в формуле (7a.4)  $\Delta\tau$  соответствующим частотным диапазоном, получим известную формулу Шоттки:

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

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

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

где  $K$  — константа установки, зависящая от сопротивления нагрузки и полосы частот  $\Delta f$ . В данной работе константа  $K$  заранее измерена и равна  $K = 4,0 \cdot 10^{23} \text{ Ом}^2 \cdot \text{Гц}$ . 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 проводники.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Обе части работы выполняются на лабораторном комплексе ЛКЭ-3. Комплекс содержит каркас-стойку и функциональный блок, состоящий из соленоида, трех основных модулей и четырех измерительных приборов — мультиметров. В комплекс входит также

осциллограф, пьезодинамик и соединительные провода и кабели. На рис. 7а.3 дан внешний вид функционального блока.

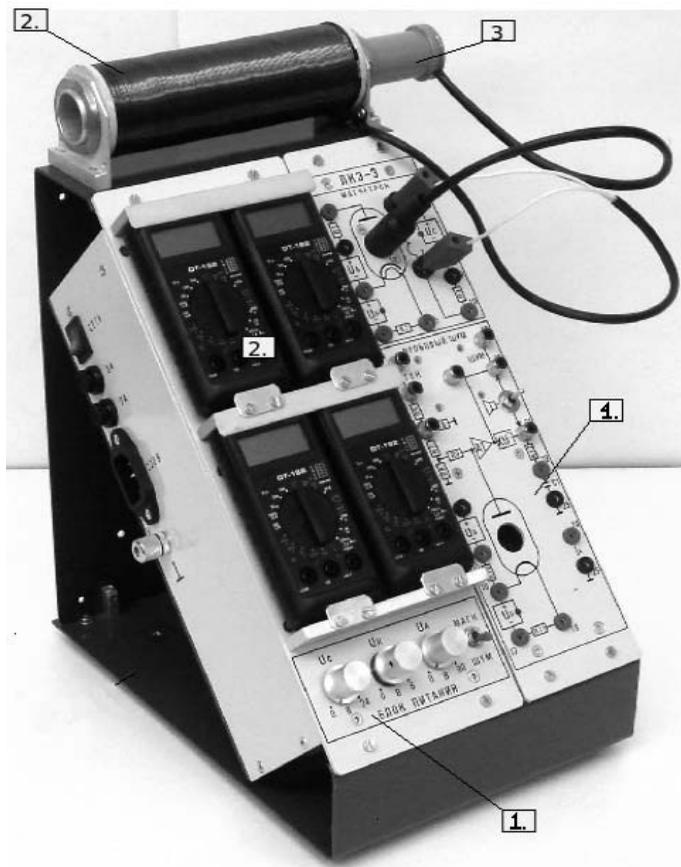


Рис. 7а.3. Внешний вид функционального блока

**Блок питания.** *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  $U_n$  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  $U_n$  к блоку «Магнетрон». В положении «Шум» тумблер подключает источники  $U_a$  и  $U_n$  к блоку «Дробовой шум». При среднем положении «0» тумблера источники питания  $U_a$  и  $U_n$  отключены от блоков.

**Блок «Магнетрон».** Блок предназначен для снятия сбросовых 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 радиусом  $R_k = 0,4$  мм. Внутри катода расположена нить накала. Из приведенных размеров видно, что при расчетах можно считать  $R_k \ll R_a$ , 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, помещенной 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 «Дробовой шум».** Блок 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  $U_n$  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 ДТ-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  $Q = 15$  кВ/мкА =  $1,5 \cdot 10^{10}$  В/А.

С выхода усилителя сигнал поступает на квадратичный детектор, обозначенный на схеме как « $KU^2$ » (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:

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

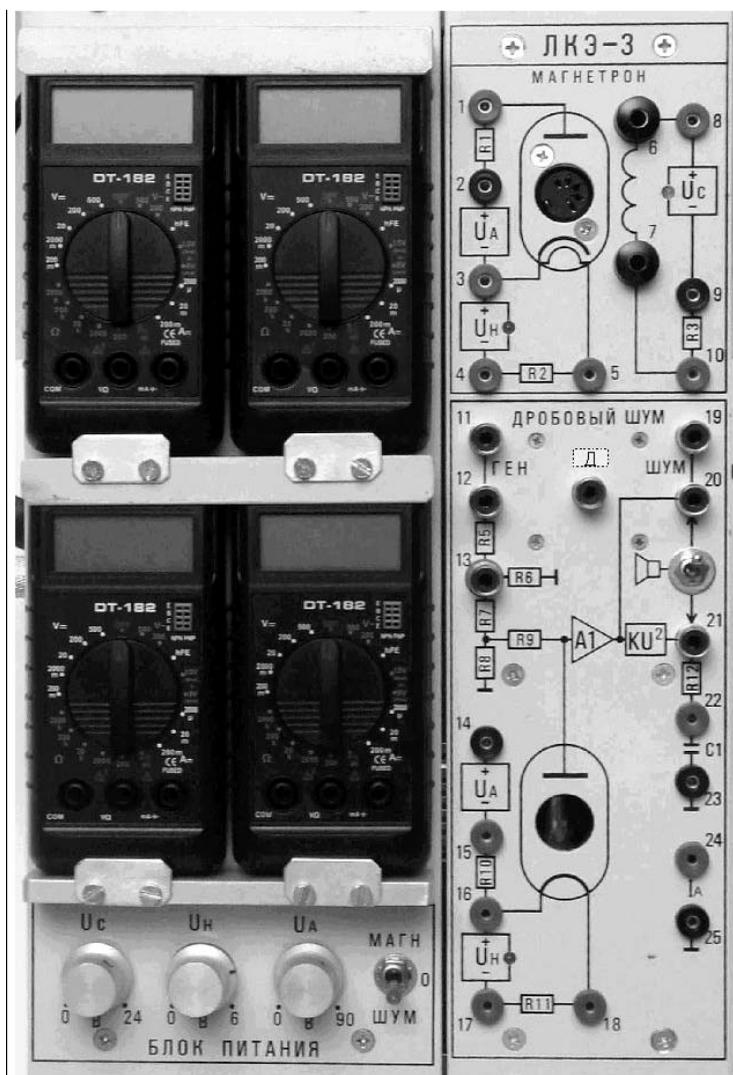


Рис. 7а.4. Передняя панель функционального блока

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

## ЗАДАНИЯ

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

### Задание 1. Определение удельного заряда электрона 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 клеммам 2 ÷ 3 на панели «Магнетрон», этот вольтметр будет измерять анодное напряжение.
5. Установить анодное напряжение 80 В.
6. Подсоединить левый верхний вольтметр к клеммам 1 ÷ 2, тогда он будет измерять анодный ток  $I_a = 0,1U$ , где  $U$  — падение напряжения на сопротивлении  $R_1 = 10,0$  Ом.

**Внимание!** В верхней части штекеров соединительных проводников сделаны два гнезда, позволяющие подсоединить два провода к одной клемме.

7. Подключить левый нижний вольтметр к клеммам 4 ÷ 5 для измерения тока накала  $I_n = 0,1U$ , где  $U$  — напряжение на сопротивлении  $R_2 = 10,0$  Ом. Подобрать ручкой  $U_n$  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 три сбросовые характеристики для  $U_a = 40, 50$  и 60 В, занося измерения в таблицы вида:

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

$I_c$ , А	0								
$V_a$ , мТл	0								
$I_a$ , мА									

9. Построить сбросовые характеристики  $I_a(I_c)$ . Определить по каждой характеристике значения критического тока соленоида и, используя градуировочный график, найти критические значения индукции  $B_{кр}$ . По формуле (7а.1) определить удельный заряд электрона.

## **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 клеммам 14 ÷ 15 на панели «Дробовой шум», этот вольтметр будет измерять анодное напряжение лампы.

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

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

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

7. Произвести 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. Произвести наблюдение шума на слух.

Подключите динамик к выходу усилителя, включите тумблер, обозначенный на панели изображением динамика, — 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  $U_n$ . Начиная со значения тока  $100 \div 120$  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  $22 \div 23$  (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 « $U_n$ » блока питания имеет двойную регулировку). Ток анода  $I_a$  измеряется по напряжению на сопротивлении  $R_{10} = 10$  кОм (гнезда  $15 \div 16$ , левый верхний вольтметр).

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

В первой строке таблицы даны рекомендуемые значения анодного напряжения, в четвертой строке разместите значения напряжения накала, при которых удастся получить анодные напряжения, близкие к рекомендуемым. В следующей (пятой) строке, запишите соответствующие токи накала, а полученные реальные анодные напряжения и токи запишите, соответственно, во второй и третьей

строках таблицы. Постепенно и осторожно увеличивая  $U_n$ , подберите  $U_a$ , близкие к заданным.

3. Постройте на графике зависимость шумового напряжения  $U_{22}$  от анодного тока  $I_a$ .

Найдите по графику среднее значение в области линейной зависимости:

$$\Delta U_{22}/\Delta I_a = \text{_____ В/мкА} = \text{_____ В/А}$$

$U_a$ , рекомен- дуемое, мВ	0	5	10	15	20	25	30	50	70	100	150	190
Факти- ческое $U_a$ , мВ												
$I_a$ , мкА												
$U_n$ , мВ												
$I_n$ , мА												
$U_{22}$ , мВ												

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

$$e = (\Delta U_{22}/\Delta I_a)/K = \text{_____ Кл.}$$

Оцените погрешности измерения заряда и удельного заряда электрона.

## 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:  $mv_e^2 / 2 = eU_a$  ?
6. Что такое дробовой шум?
7. Зачем в схеме используется квадратичный детектор « $KU^2$ »?

## Работа 8а

### ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА

---

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

#### ВВЕДЕНИЕ

Всякое вещество является *магнетиком*, т.е. способно под действием магнитного поля приобретать магнитный момент (намагничиваться). Степень намагничивания вещества характеризуют магнитным моментом единицы объема. Эту величину называют *намагниченностью* и обозначают  $J$ . Намагниченность  $\vec{J}$  принято связывать с *напряженностью* 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:

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

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 *слабомагнитным* веществам, а остальные — к *сильномагнитным* веществам.

*Диамагнетики* — вещества, у которых магнитная восприимчивость  $\chi < 0$  и постоянна. В таких веществах  $\vec{J} \uparrow \downarrow \vec{H}$ . К диамагнетикам относятся инертные газы, водород, азот, уголекислота, вода, 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, платина, хлористое железо ( $\text{FeCl}_3$ ) и т.д.

*Ферромагнетиками* называются твердые тела, которые могут обладать *спонтанной намагниченностью*, т.е. намагничены уже в отсутствие магнитного поля. К ферромагнетикам относятся: 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 напряженности магнитного поля и температуры. Для каждого ферромагнетика имеется определенная 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 между  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$ . Кроме того, для них зависимость  $B$  от  $H$  (или  $J$  от  $H$ ) не однозначна, а определяется предшествующей историей намагничивания ферромагнитного образца. Это 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.

*Антиферромагнетиками* являются 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 подрешетки с противоположно направленными моментами, вставленные одна в другую. Если величина намагничивания обеих подрешеток 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 магнитные материалы, у которых спонтанная намагниченность доменов обусловлена *нескомпенсированным антиферромагнетизмом*, когда величина намагничивания обеих подрешеток неодинакова. Если при этом ферримагнетики обладают еще полупроводниковыми свойствами, то они называются *ферритами*. Удельное сопротивление ферритов в  $10^3 \div 10^6$  раз больше удельного сопротивления металлических материалов, а потери на вихревые токи, соответственно, существенно меньше. К ферримагнетикам относятся некоторые упорядоченные металлические и различные оксидные соединения, наибольший интерес среди которых представляют ферриты  $\text{MnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $(\text{NiO} \cdot \text{ZnO})\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  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 напряженности  $H$  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 счет 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* — появляется гистерезис и остаточное намагничивание.

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

Нижняя ветвь петли соответствует возрастанию  $H$ , верхняя — убыванию. При достаточно больших  $H$  ( $H > H_S$ ) ферромагнетик намагничивается до насыщения ( $J = J_S$  — *намагниченность насыщения*), а индукция  $B$  принимает значение  $B_S$ , называемое *индукцией насыщения*. При колебаниях  $H$  с амплитудой более  $H_S$  наблюдается *предельная петля гистерезиса* (кривая  $b$ ), при меньшей амплитуде — *частичная петля гистерезиса* (кривая  $c$  на рис. 8а.1).

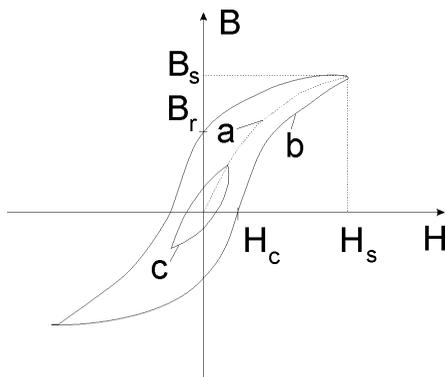


Рис. 8а.1. Петля гистерезиса:  $a$  — основная кривая намагничивания;  $b$  — предельная петля гистерезиса;  $c$  — частичная петля гистерезиса

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

поля, при которой  $B$  становится равной нулю). Вещества, у которых  $H_c < 800$  А/м, условно относят к *магнитно-мягким материалам*. Магнитно-мягкие материалы применяются в основном в качестве магнитопроводов (сердечников) дросселей, трансформаторов, электромагнитов и т.д. К магнитно-твердым материалам относят вещества, у которых  $H_c > 4$  кА/м, эти материалы используются 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 объему образца:

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

Если вначале ферромагнетик был размагничен ( $J=0$ ,  $B=0$ ,  $H=0$ ), то при возрастании  $H$  получим *основную кривую намагничивания* (кривая  $a$  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 определенной магнитной проницаемости  $\mu$ , а в тех случаях, когда ее 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 приведена на рис. 8а.2. Магнитное поле создается соленоидом  $L$ , питаемым переменным током от источника питания ГЗЧМ (генератор звуковых частот, функциональный). Последовательно с соленоидом включен резистор  $R1$ , по напряжению  $U_H$  на котором определяют ток в обмотке соленоида (и, соответственно, напряженность  $H$  магнитного поля в соленоиде). Электролитический конденсатор емкостью  $C_{10} = 100$  мкФ включен в цепь соленоида для того, чтобы отсечь постоянную составляющую сигнала, вырабатываемого источником. В соленоид помещен 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 прил. А.

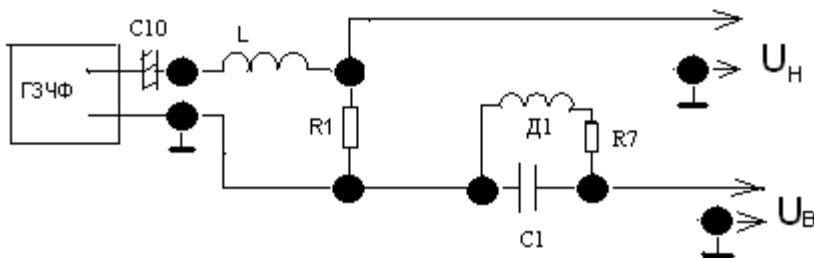


Рис. 8а.2. Схема установки ( $R_1 = 1$  Ом,  $R_7 = 30$  кОм;  $C_1 = 1,0$  мкФ,  $C_{10} = 100$  мкФ)

Напряжения  $U_H$  и  $U_B$  измеряют с помощью двухканального осциллографа, подавая их, соответственно, на каналы  $X$  и  $Y$ . Прочитав значение  $k$  (в вольтах на деление) на переключателе «VOLTS/DIV» осциллографа, напряжения вычисляют 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 об-

разец 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  $\vec{H}=\vec{H}_0$ . 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:

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

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

При протекании по обмотке соленоида тока  $I$  внутри соленоида создается магнитное поле напряженностью:

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

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

$$H(t) = m_n U_n, \quad \text{где} \quad m_n = \frac{N_c}{l_c R_1}. \quad (8a.6)$$

Если магнитное поле меняется во времени, то на зажимах катушки датчика Д1 создается 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  $\Phi_M = BS_0 = \mu\mu_0 HS_0$  — поток через сечение образца, а  $\Phi_B = B_B(S - S_0) = \mu_0 H(S - S_0)$  — 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

$$U = NS_0 \frac{dB}{dt}.$$

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

$$U = NSB / \tau,$$

где  $\tau$  — постоянная RC-ячейки,  $\tau = R_7 C_1$ .

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

$$B = m_B U_B, \quad \text{где} \quad m_B = \frac{\tau}{NS}. \quad (8a.7)$$

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

## ЗАДАНИЯ

**1. Подготовка установки к работе.** 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. 8a.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.

Запишите параметры установки и исследуемых образцов.

Длина соленоида  $l =$  \_\_\_\_\_ см.

Число витков обмотки соленоида  $N_c =$  \_\_\_\_\_.

Сопротивление  $R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$  Ом.

Число витков датчика  $N = \underline{\hspace{2cm}}$ .

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

Образцы:

стальная спица —

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

площадь сечения  $S_0 = \underline{\hspace{2cm}}$  см<sup>2</sup>;

ферритовый стержень —

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

площадь сечения  $S_0 = \underline{\hspace{2cm}}$  см<sup>2</sup>;

полоса из пермаллоя —

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

площадь сечения  $S_0 = \underline{\hspace{2cm}}$  см<sup>2</sup>.

**2. Снятие основной кривой намагничивания.** (Это задание выполняется для трех магнитных образцов: ферритового стержня, стальной спицы и полосы пермаллоя.)

Вставьте исследуемый образец в соленоид. Изменяя амплитуду сигнала на выходе ГЗЧМ и манипулируя переключателями «VOLTS/DIV» (изменяя коэффициенты отклонения  $k_X$  и  $k_Y$  луча осциллографа в каналах  $X$  и  $Y$ ), 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 ÷ 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

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

и определите значения

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

Вычислите значения магнитной проницаемости по формуле:

$$\mu = B / (\mu_0 H).$$

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

Таблица 8а.1

Образец \_\_\_\_\_

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

**3. Определение магнитных характеристик образцов.** Вставьте исследуемый образец в соленоид. Получите предельную петлю гистерезиса, подбирая  $k_X$  и  $k_Y$  так, чтобы петля занимала большую 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

Координата	$k_X$	$k_Y$	$x_S^+$	$x_S^-$	$y_S^+$	$y_S^-$	$y_r^+$	$y_r^-$	$x_c^+$	$x_c^-$
Феррит										
Пермаллой										
Сталь										

**4. Исследование предельной петли гистерезиса ферромагнетика (стальной спицы).** Получите предельную петлю гистерезиса для спицы (аналогично п. 3). 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  $x_i$ , 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 даны в прил. Б. Переведите значения  $x_i$  в значения  $H$  по формуле (8а.6), а значения  $y_i^+$  и  $y_i^-$  — в значения  $B^+$  и  $B^-$  по формулам (8а.7). Запишите результаты в табл. 8а.3.

Таблица 8а.3

$$k_X = \text{_____ В/дел.}; \quad k_Y = \text{_____ В/дел.}$$

$i$	$x_i$	$y_i^+$	$y_i^-$	$H$ , А/м	$B^+$ , Тл	$B^-$ , Тл	$\Delta B = B^+ - B^-$ , Тл
1	0	$y_r^+$	$y_r^-$				
...	...	...	...				
$i_{\max}$	$x_S^+$	$y_S^+$	$y_S^-$				

### 5. Оформление результатов работы.

1. 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 напряженности  $H$  магнитного поля; в отчете описать характер этой зависимости, указав максимальное значение проницаемости  $\mu_{\max}$  и значение  $H_m$ , при котором достигается  $\mu_{\max}$ ; проверить и прокомментировать выполнение условия (8а.5).

3. По данным табл. 8а.2 вычислите характеристики магнитных материалов —  $B_S, H_S, B_r, H_c, \mu_S$ , используя соотношения (8а.8):

$$B_S = m_B k_Y (y_S^+ - y_S^-) / 2; \quad H_S = m_H k_X (x_S^+ - x_S^-) / 2;$$

$$\mu_S = B_S / (\mu_0 H_S); \quad B_r = m_B k_Y (y_r^+ - y_r^-) / 2;$$

$$H_c = m_H k_X (x_c^+ - x_c^-) / 2 . \quad (8a.8)$$

Результаты представить в форме таблицы:

Характеристика	Феррит	Пермаллой	Сталь
Остаточная индукция $B_r$ , Тл			
Коэрцитивная напряженность $H_c$ , кА/м			
Напряженность насыщения $H_S$ , кА/м			
Индукция насыщения $B_S$ , Тл			
Магнитная проницаемость $\mu_s$			

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

4. Для стальной спицы построить предельную петлю гистерезиса в переменных  $(H, B)$ , достраивая левую, нижнюю половину симметрично правой, построенной по данным табл. 8a.3. На графике отметьте характеристики ферромагнетика:  $B_S, H_S, B_r$  и  $H_c$ .

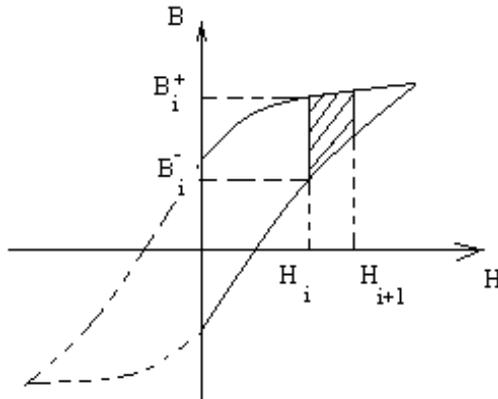


Рис. 8a.3. Кривая намагничивания в переменных  $B$  и  $H$

Оцените удельную энергию потерь за один цикл перемагничивания, вычислив площадь петли (рис. 8a.3) согласно приближенному численному интегрированию:

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

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

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

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

В данной установке  $RC$ -ячейка 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

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

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

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

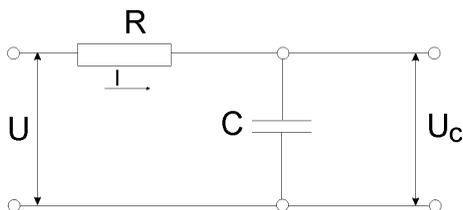


Рис. П.А.1. Схема  $RC$ -ячейки

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

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

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

$$U_C = \frac{N S_0}{RC} \int dB = \frac{N S_0}{RC} B.$$

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

$$B = m_B U_C, \quad m_B = \frac{RC}{N S_0} = \frac{\tau}{N S_0}. \quad (\text{П.А.4})$$

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  $0 \div H_S$  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:

$$y_i^+ = y_r^+ + \frac{y_S^+ - y_r^+}{x_S^+} x_i.$$

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 интервал  $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$ , каждый раз записываем в табл. 8а.2 значения  $x_{i+1}$  и  $y_{i+1}^-$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. На какие группы делятся вещества по своим магнитным свойствам? В чем отличие этих свойств?
2. Какова зависимость  $B(H)$  и  $\mu(H)$  для ферромагнетиков?
3. Что такое магнитный гистерезис?
4. Как получить напряжение  $U$ , пропорциональное магнитной индукции  $B$ ? Объяснить назначение  $RC$ -ячейки в схеме установки.
5. Как определить масштаб осей  $X$  и  $Y$  осциллограммы петли гистерезиса?
6. Какова размерность удельной мощности потерь на перемагничивание?
7. Перечислите основные характеристики ферромагнетиков и укажите, как они определяются в работе.
8. Как влияет на петлю магнитного гистерезиса изменение частоты питающего напряжения?
9. В чем заключается отличие магнитно-твердых и магнитно-мягких материалов? Из каких материалов изготавливают постоянные магниты?

## Работа 9а

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

---

*Цель:* экспериментальное исследование эффекта Холла в полупроводниках, определение концентрации и подвижности носителей заряда.

### ВВЕДЕНИЕ

Эффектом Холла называется явление возникновения поперечного электрического поля  $\vec{E}$  в проводнике или полупроводнике, по которому проходит электрический ток плотности  $\vec{j}$  при помещении проводника в магнитное поле  $\vec{B}$ , перпендикулярное к направлению тока. Напряженность холловского электрического поля в изотропном однородном проводнике и в слабом магнитном поле описывается формулой:

$$\vec{E} = R[\vec{B}, \vec{j}], \quad (9a.1)$$

где  $R$  — постоянная Холла. Величина  $R$  существенно зависит от структуры энергетических зон твердого тела и характера носителей заряда. Простейшая микроскопическая теория эффекта Холла основана на представлении о свободных носителях — электронах. При этом критерием слабости магнитного поля служит условие малости угла закручивания траектории электрона в поле  $\vec{B}$  за среднее время  $\tau$  между двумя соударениями:  $(eB/m)\tau \ll 1$ . Для измерения эффекта Холла обычно используют прямоугольную пластинку (рис. 9а.1). При протекании тока плотности  $\vec{j} = -en\vec{v}$  вдоль оси  $X$  электроны подвергаются отклоняющему действию магнитного поля, направленного вдоль оси  $Z$ , и смещаются против оси  $Y$ . В

результате смещения электронов на боковых поверхностях пластинки образуется избыток зарядов, и возникает поперечное электрическое поле  $\vec{E}$ , которое препятствует дальнейшему смещению электронов. Накопление зарядов происходит до тех пор, пока сила Лоренца  $\vec{F}$  не станет равной нулю:

$$\vec{F} = -e\left(\vec{E} + [\vec{v}\vec{B}]\right) = 0. \quad (9a.2)$$

Сравнивая (9a.1) и (9a.2), получаем:

$$R = -1/ne. \quad (9a.3)$$

Рассмотрение эффекта Холла (рис. 9a.1), основанное на решении кинетического уравнения в металлах и полупроводниках с использованием распределения Ферми — Дирака, по-прежнему для  $R$  дает выражение (9a.3). Тогда как в случае так называемых невырожденных полупроводников, подчиняющихся статистике Больцмана, более строгое рассмотрение дает:

$$R = -r/ne, \quad (9a.4)$$

где  $r = \overline{\tau^2}/\tau^2$  — безразмерный численный коэффициент, который зависит от механизма рассеяния носителей заряда. При рассеянии электронов на колебаниях кристаллической решетки  $r = 3\pi/8$ . Если в полупроводнике преобладает дырочная проводимость, то в тех же предположениях:  $R = 1/pe$ , или точнее:

$$R = r/pe, \quad (9a.5)$$

где  $p$  — концентрация дырок. В случае полупроводников со смешанной проводимостью выражение для  $R$  усложняется:

$$R = \frac{3\pi}{8e} \frac{\mu_p^2 p - \mu_n^2 n}{(\mu_p p + \mu_n n)^2}, \quad (9a.6)$$

$\mu_p$ ,  $\mu_n$  — подвижности носителей заряда, равные  $e\tau/m$ , где  $m$  — эффективные массы носителей.

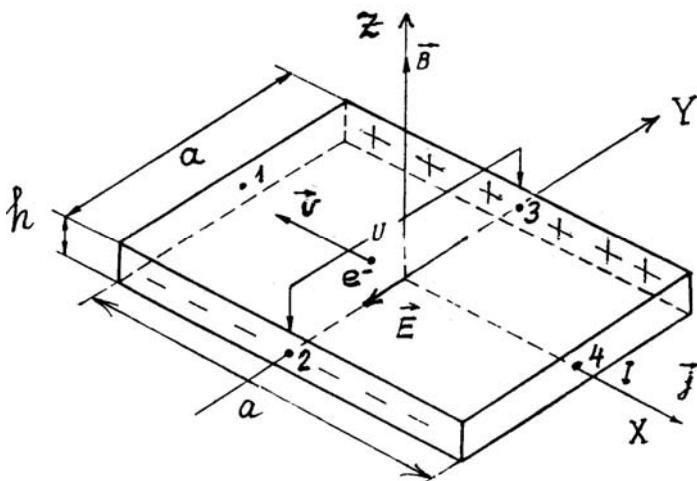


Рис. 9а 1. Схема, поясняющая возникновение эффекта Холла

В случаях:  $n \gg p$  и  $p \gg n$  справедливы формулы (9а.4) и (9а.5). Если же  $n$  и  $p$  незначительно отличаются друг от друга, то, найдя  $R$  из эксперимента и рассчитав концентрацию носителей заряда по формуле (9а.4) или (9а.5), можно получить лишь «приведенную» величину  $n$  или  $p$ .

Зная постоянную Холла и удельное сопротивление полупроводника  $\rho$ , можно найти подвижность носителей заряда, которая определяется как отношение средней скорости  $v$  дрейфа носителей в результате действия электрического поля к напряженности этого поля  $E_0$ :  $\mu = v/E_0$ . Используя закон Ома в дифференциальной форме для изотропной среды:  $j = E_0/\rho$ , и выражение для плотности тока:  $j = nev$  или  $pev$ , легко получить выражение для расчета подвижности носителей заряда

$$\mu = (8/3\pi)|R|/\rho. \quad (9а.7)$$

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для изучения эффекта Холла используется промышленный датчик Холла типа ДХК-0,5, являющийся одним из элементов автоматики,

радиоэлектроники и измерительной техники. Внешний вид датчика вместе с устройствами крепления и подводки питания приведен на рис. 9а.2а (где 1 — чувствительный элемент (собственно датчик Холла), 2 — кронштейн, 3 — рукоятка, 4 и 5 — два двужильных кабеля с номерными выводами), электрическая схема датчика и его вид со стороны стрелки «В» приведены на рис. 9а.2б и 9а.2в.

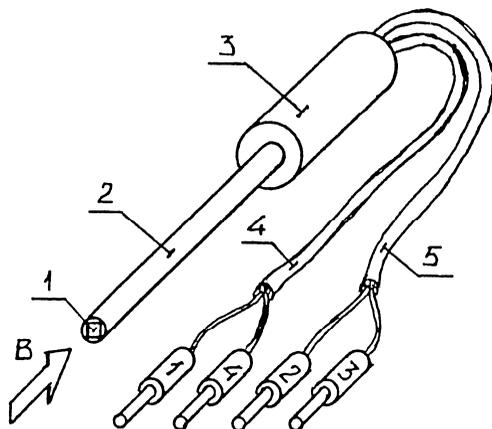


Рис. 9а.2а. Датчик Холла

Проводящая пленка датчика Холла (ДХ) изготавливается из полупроводников (Si, Ge, InSb, InAs) и монтируется на подложке из диэлектрика. Через контакты 1 и 4 пленки пропускают ток  $I$ . При наличии магнитного поля индукции  $\vec{B}$ , направленного по внешней нормали к плоскости пленки (см. рис. 9а.2а и 9а.2б), между контактами 2 и 3 должна возникать разность потенциалов  $U$ , пропорциональная току и индукции магнитного поля (эффект Холла):

$$U = RIB/h . \quad (9а.8)$$

Найдя  $R$ , можно рассчитать концентрацию носителей заряда, а по знаку возникающей холловской ЭДС определить знак заряда. Когда вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  направлен вдоль оси  $Z$  — внешней нормали к плоскости пленки (см. рис. 9а.1), значение напряжения на контактах 2 ÷ 3 будет отрицательным для тока носителей отрицательного заряда (электронов) и положительным для

тока носителей положительного заряда (дырок). Дальнейшее изучение свойств материала датчика достигается путем определения его удельного сопротивления:

$$\rho = U_0 bh / Ia = R_{ДХ} bh / a, \quad (9a.9)$$

где  $U_0$  — напряжение на образце (между контактами 1 и 4),  $a = b = 0,5$  мм,  $h = 12$  мкм.

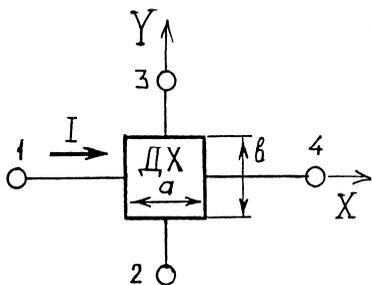


Рис. 9a.2б. Схема датчика Холла

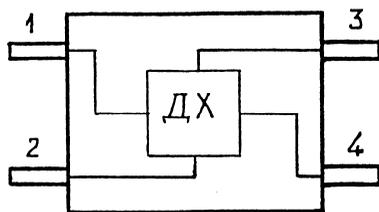


Рис. 9a.2в. Конструкция датчика Холла

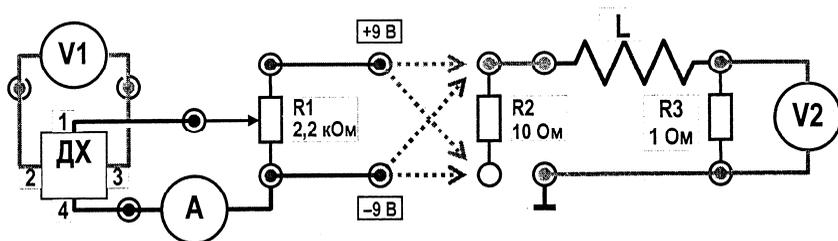


Рис. 9a.3. Включение датчика Холла и контура для создания магнитного поля

Электрическая схема для исследования эффекта Холла собирается на модуле МОЗ «Поле в веществе». Схема включения ДХ приведена на рис. 9a.3. Для создания тока используется питание, подведенное к клеммам (+9 В и -9 В). Ток в ДХ регулируется потенциометром  $R1$  и измеряется амперметром  $A$ . Катушка  $L$  одним концом через сопротивление  $R3$  подключается к общему проводу модуля. Второй конец катушки подключается к клемме «+9» или «-9» либо непосредственно, либо через сопротивление  $R2$ . Таким образом, можно реализовать четыре различных соединения, показанные

на рис. 9а.3 стрелками, и получить в катушке по два различных значения тока для двух противоположных направлений.

Холловская ЭДС измеряется вольтметром  $V1$ . Ток в катушке  $L$  измеряется вольтметром  $V2$  по падению напряжения на сопротивлении  $R_3 = 1$  Ом. Для создания магнитного поля используется длинный соленоид модуля МОЗ — катушка  $L$ , в которую помещается продольный датчик Холла. Два мультиметра М-8308 из состава комплекса используются в качестве  $V1$  и  $V2$ , а в качестве амперметра  $A$  можно использовать VICTOR VC 97.

## ЗАДАНИЯ

1. Собрать схему в соответствии с рис. 9а.3.
2. Определить диапазоны изменения тока через ДХ, тока в соленоиде и разности потенциалов Холла и установить соответствующие пределы на измерительных приборах. Для этого измерить мультиметром сопротивление ДХ, учесть, что сопротивление соленоида равно 8,2 Ом, а ЭДС Холла не превышает 10 мВ.
3. Исследовать зависимость разности потенциалов Холла от тока через ДХ. Установить наибольший ток в катушке  $L$  и измерить напряжение  $U_{23}$  между контактами  $2 \div 3$  для десяти значений тока  $I$  через ДХ. Учесть, что из-за неточности установки холловских контактов на противоположных гранях пластинки, при протекании тока через ДХ, кроме холловской разности потенциалов, может возникать дополнительное падение напряжения  $\Delta U$ , которое можно найти, если после первичного измерения напряжения  $U_{23}$  отключить ток в соленоиде или вынуть ДХ из соленоида и снова измерить напряжение на контактах  $2 \div 3$ , значение которого будет соответствовать  $\Delta U$ . Тогда значение разности потенциалов Холла будет  $U = U_{23} - \Delta U$ .
4. Исследовать зависимость разности потенциалов Холла от тока в катушке  $L$ . Установить наибольший ток через ДХ с помощью потенциометра  $R1$  и измерить напряжение между контактами  $2 \div 3$  с помощью вольтметра  $V1$  для четырех возможных различных значений тока в катушке  $L$ . Установить истинное значение  $U = U_{23} - \Delta U$ .
5. На основе данных, полученных в п. 3, построить график зависимости разности потенциалов Холла  $U$  от тока  $I$  через ДХ и, опре-

делив коэффициент наклона графика к оси абсцисс, найти постоянную Холла  $R$ . Магнитную индукцию  $\vec{B}$  рассчитать по формуле:  $B = \mu_0 NI/l$ , где  $N = 1710$ ,  $l = 160$  мм.

6. На основе данных, полученных в п. 4, построить график зависимости  $U(B)$ , где  $B$  рассчитывается по формуле из п. 5, и найти постоянную Холла  $R$  по угловому коэффициенту полученной прямой. Найти удельное сопротивление ДХ с помощью формулы (9а.9).

7. Определить направление магнитного поля по отношению к поверхности ДХ и, таким образом, найти знак заряда носителей. По формулам (9а.4) или (9а.5) вычислить концентрацию, а по формуле (9а.7) вычислить подвижность носителей заряда. Оценить погрешности найденных величин.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается эффект Холла?
2. Какова размерность постоянной Холла в системе единиц СИ?
3. Чем отличаются полупроводники  $n$ - и  $p$ -типа?
4. Что такое подвижность носителей заряда?
5. Если изменилось направление тока через ДХ, изменятся ли направления  $\vec{v}$ ,  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  и знак  $U$ ?
6. Если изменилось направление тока в катушке  $L$ , изменятся ли направления  $\vec{v}$ ,  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  и знак  $U$ ?

## Работа 11а

# ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ В ПРОСТОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

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

### ВВЕДЕНИЕ

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

Если конденсатор зарядить, а затем замкнуть ключ, то в контуре возникнут электромагнитные колебания. Действительно, при замыкании ключа конденсатор  $C$  начинает разряжаться — в контуре появляется 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 то-

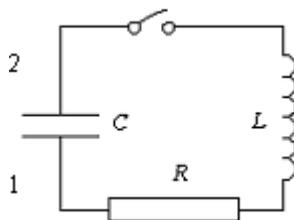


Рис. 11а.1. Схема простого колебательного контура

ка. 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 аperiодический разряд конденсатора. Найдем 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 растет, стремясь к бесконечности при  $\beta \rightarrow \omega_0$ . Это означает, что колебательный процесс переходит в аperiодический. Для контура с определенными значениями  $L$  и  $C$  аperiодический 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  $R_k$  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. Ток в контуре

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

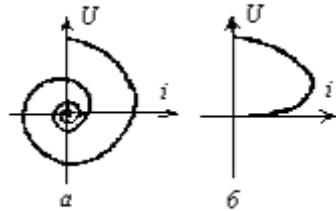
Если обозначить  $\beta / \omega_0 = \sin \gamma$ ,  $\omega / \omega_0 = \cos \gamma$ , то

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

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.5) 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)  $R < R_x$ ; б)  $R \geq R_x$



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

## ОПИСАНИЕ СХЕМЫ

Исследование свободных затухающих колебаний проводится с помощью схемы, изображенной на рис. 11а.3.

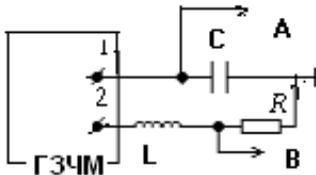


Рис. 11а.3. Принципиальная схема установки для исследования колебаний

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

В используемом модуле МОЗ есть только одна катушка индуктивности  $L = 4,30$  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). Значение необходимой емкости  $C$  из набора модуля определяется в ходе планирования эксперимента (см. следующий раздел). Сигнал  $A$  подается на вход  $X$  (CH1), а сигнал  $B$  —  $Y$  (CH2) осциллографа. При включенной горизонтальной развертке будет наблюдаться кривая затухающих колебаний после каждого изменения напряжения на прямоугольных импульсах генератора. Ориентировочное сопротивление ГЗЧМ  $R_r = 200$  Ом (определяется экспериментально).

При выключенной горизонтальной развертке (нижнее положение переключателя  $X$  —  $Y$ ) сигнал  $Y$  подается на горизонтальную развертку 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 емкости  $C$ , которую нужно использовать в схеме. Значение  $C$  должно удовлетворять двум условиям: 1) добротность контура  $Q$  при минимальном сопротивлении  $R = R_r + R_L + R_n$  должна быть больше единицы (порядка 1,5); 2) значение критического сопротивления  $R_k$  должно попадать во вторую половину диапазона сопротивлений потенциометра (ориентировочный диапазон  $R_n = 200 \div 1800 \text{ Ом}$ ). В качестве емкости  $C$  использовать ближайшее к рассчитанному значению из набора емкостей модуля МОЗ.

Выписать рассчитанные значения  $C$ ,  $Q$ ,  $R_k$ .

### ЗАДАНИЯ

1. Измерить мультиметром сопротивление  $R_L$  катушки индуктивности и диапазон сопротивлений потенциометра  $R_n$ . Записать значения  $R_L$ ,  $R_{n \text{ min}}$ ,  $R_{n \text{ max}}$ .

2. Собрать схему.

3. Включить осциллограф и ГЗЧМ на прямоугольные импульсы с частотой 1 кГц.

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

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

Меняя  $R_n$  проследить за характером изменения затухающих колебаний. В частности, провести наблюдение за переходом колебательного процесса в апериодический.

Для трех различных сопротивлений измерить период затухающих колебаний  $T$ . Значения  $R_n$  измеряются мультиметром при отключенном питании контура. Длительность горизонтальной развертки подбирается такой, чтобы период колебаний на экране имел наибольшую протяженность. При этом регулятор SWP.VAR на осциллографе должен находиться в положении CAL.

5. Используя формулу (11а.3) рассчитать три значения сопротивления генератора, помня, что  $R = R_r + R_L + R_n$ . Определить среднее значение  $R_r$  и оценить погрешность.

6. Определить значение критического сопротивления  $R_k$  в момент перехода процесса затухания в аperiodический (изменяя  $R_n$  и вычисляя  $R$ ).

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

8. 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 сопротивлением  $R_k$ , найденным в п. 6, и с теоретическим.

9. Определить по фазовым кривым зависимость логарифмического декремента затухания  $\lambda$  от  $R$ , измеряя радиусы двух соседних витков спирали  $a_1$  и  $a_2$ . Значения  $\lambda_{\text{экс}}$  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  $R = R_r + R_L + R_n$  — общее сопротивление контура.

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

## 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 включенном генераторе развертки; б) при выключенном генераторе развертки? 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?

## Работа 12а

# ИЗУЧЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КОНТУРЕ

---

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

### ВВЕДЕНИЕ

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

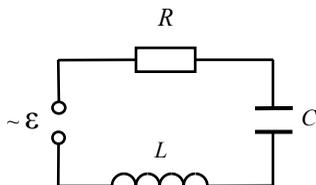


Рис. 12а.1. Последовательный LRC — контур

Положим, что внешняя ЭДС изменяется по синусоидальному закону  $\varepsilon(t) = \varepsilon_m \sin \omega t$ , где  $\varepsilon_m$  — амплитуда ЭДС, действующей в контуре. В этом случае в контуре возникнут электрические колебания с частотой внешней ЭДС. Согласно закону Ома  $iR + U_C + U_L = \varepsilon$ . Следовательно,  $iR + q/C + Ldi/dt = \varepsilon_m \sin \omega t$ . Дифференцируя это уравнение по времени и 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 такое уравнение в случае установившихся колебаний имеет решение  $I = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ , где

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

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

Здесь  $Z$  — полное сопротивление 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  $I_{m p} = \varepsilon_m / R$ .

Напряжение на активном сопротивлении  $R$  равно:

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

Максимальное значение амплитуды напряжения на активном сопротивлении

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

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

С изменением частоты внешней ЭДС изменяется напряжение на емкости и на индуктивности. Напряжение на конденсаторе

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

где  $U_{Cm} = I_m / \omega C = I_m X_C$  — амплитуда напряжения на емкости. Величину  $X_C = 1 / \omega C$  называют емкостным сопротивлением. Напряжение на конденсаторе отстает от тока по фазе на  $\pi / 2$ . График зависимости амплитуды напряжения на емкости приведен на рис. 12а.2. Максимальное значение амплитуды напряжения на конденсаторе достигается при частоте  $\omega_{1p}$ , меньшей, чем  $\omega_p$ :

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

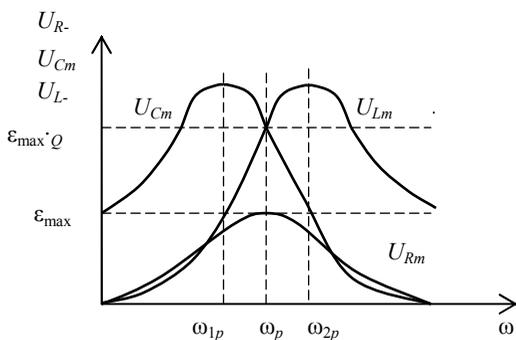


Рис. 12а.2. Резонансные кривые

### Напряжение на индуктивности

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

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  $\pi / 2$ . График зависимости амплитуды напряжения на индуктивности приведен на рис. 12а.2. Максимальное значение амплитуды напряжения на индуктивности достигается при частоте  $\omega_{2p}$ , большей, чем  $\omega_p$ :

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

Амплитуды напряжений на емкости и индуктивности при резонансе соответственно равны

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

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

где  $Q$  — добротность контура:

$$Q = \sqrt{L/CR^2 - 1/4}. \quad (12a.9)$$

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

$$Q = U_{C\ m\ p} / \varepsilon_m = U_{L\ m\ p} / \varepsilon_m. \quad (12a.10)$$

Напряжения на емкости и индуктивности сдвинуты по фазе на  $\pi$ , поэтому при резонансе сумма напряжений  $U_{C\ m\ p}$  и  $U_{L\ m\ p}$  равна нулю и напряжение на активном сопротивлении равно внешней ЭДС. На рис. 12a.3, *a* представлена векторная диаграмма напряжений в колебательном контуре. На рис. 12a.3, *б* дана векторная диаграмма при резонансе.

Итак, явление резонанса в последовательном резонансном контуре заключается в том, что при определенной частоте внешней ЭДС, равной  $\omega_p$ , амплитуда тока в контуре достигает максимального значения. При резонансе полное сопротивление контура равно его активному сопротивлению  $R$  и сдвиг фаз  $\varphi$  между током в контуре и ЭДС равен нулю. Контур действует как активное сопротивление. В момент резонанса амплитудные значения напряжения на индуктивности и емкости равны и достигают значения, которое может быть значительно больше амплитудного значения внешней ЭДС. Поэтому явление резонанса в последовательном контуре называют резонансом напряжений.

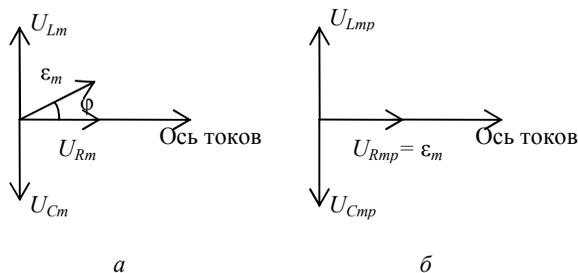


Рис. 12а.3. Векторные диаграммы

Если в контуре  $LCR$  один из параметров ( $L$  или  $C$ ) неизвестен, то, сняв резонансную характеристику контура, определяют по ней резонансную частоту, и из соотношения

$$\nu_p = \omega_p / 2\pi = 1 / (2\pi\sqrt{LC}) \quad (12а.8)$$

определяют неизвестную величину.

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Исследование явления резонанса напряжений проводится с помощью схемы (рис. 12а.4).

Используемые приборы: звуковой генератор ЗГ, осциллограф ОСЦ, вольтметры В-1, В-2 и В-3, модуль МО-2, на котором используются активное сопротивление контура  $R$ , емкость  $C$  и индуктивность  $L$ . Вольтметром В-1 определяют напряжение на активном сопротивлении. Вольтметрами В-2 и В-3 измеряют напряжения на  $L$  и  $C$ . Необходимо помнить, что вольтметры, измеряющие напряжения на элементах, включенных в цепь переменного тока, показывают действующие значения, которые связаны с амплитудными значениями следующими соотношениями:  $U = U_{\max} / \sqrt{2}$ .

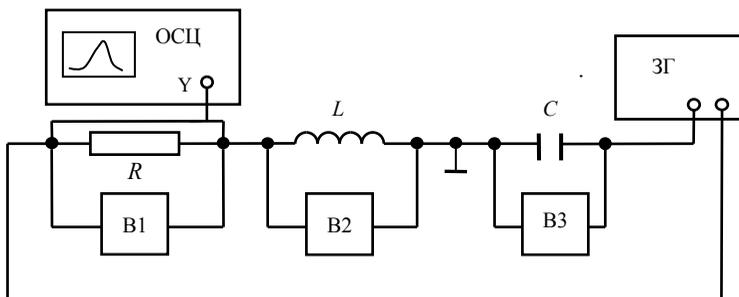


Рис. 12а.4. Принципиальная схема установки для исследования резонанса напряжений

## 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 развертке, определить резонансную частоту. Изменив значение сопротивления на  $R_2$ , снова измерить  $\nu_p$  и сравнить с рассчитанным значением.

3. Снять резонансные кривые  $U_{Rm} = U_{Rm}(\nu)$ ,  $U_{Cm} = U_{Cm}(\nu)$  и  $U_{Lm} = U_{Lm}(\nu)$  для двух значений активного сопротивления контура  $R_1$  и  $R_2$  при неизменном значении величины выходного напряжения ЗГ. Значения  $L$  и  $C$  берутся такие же, как и в п. 2 задания. Резонансные кривые снимаются для 11 — 15 точек, причем максимальное количество должно быть в области максимума каждой из кривых.

4. Построить резонансные кривые  $U_{Rm} = U_{Rm}(v)$ ,  $U_{Cm} = U_{Cm}(v)$  и  $U_{Lm} = U_{Lm}(v)$  для двух значений активного сопротивления контура  $R_1$  и  $R_2$ . По резонансным кривым, используя соотношение (12а.10), определить добротности контура, соответствующее двум значениям активного сопротивления контура  $R_1$  и  $R_2$ .

5. По формуле (12а.9) вычислить значение добротностей  $Q_1$  и  $Q_2$ , учитывая, что в **полном активном сопротивлении** контура необходимо также учесть активное сопротивление катушки индуктивности. 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 емкости 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 емкостное сопротивление контура?
12. Что такое индуктивное сопротивление контура?
13. Что такое полное сопротивление контура?
14. Как экспериментально измерить добротность контура?
15. Как можно измерить неизвестную индуктивность?
16. Как можно измерить неизвестную емкость?

## Работа 13а

### РЕЛАКСАЦИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР

---

*Цель: ознакомление с принципом действия простейшей автоколебательной системы, возбуждающей релаксационные колебания — генератором с неоновой лампой и определение его характеристик.*

#### ВВЕДЕНИЕ

Неоновая лампа — газоразрядный прибор, конструктивно выполненный в виде двух параллельных или коаксиальных электродов, помещенных в баллон, наполненный неоном при небольшом давлении. Характерной особенностью неоновой лампы является то, что она начинает проводить ток («зажигается») только при определенном «напряжении зажигания»  $U_z$ , которое зависит от расстояния между электродами, их формы и от давления газа, и гаснет при меньшем «напряжении гашения»  $U_r$ . Если напряжение на неоновую лампу подается со стабилизированного источника напряжения, то вольт-амперная характеристика (ВАХ) лампы будет иметь вид, представленный на рис. 13а.1а.

Чтобы понять причины «гистерезиса» ВАХ неоновой лампы обратимся к ее эквивалентной схеме (рис. 13а.1б). Внутреннее активное сопротивление лампы  $R$  определяется суммой сопротивления газа в межэлектродном пространстве  $R_1$  и добавочного постоянного сопротивления  $R_0$ ,  $C$  — емкость лампы. При малых напряжениях на электродах число носителей тока в газе, которыми являются главным образом эмиссионные электроны, мало. Ток через лампу практически равен нулю, так как 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.

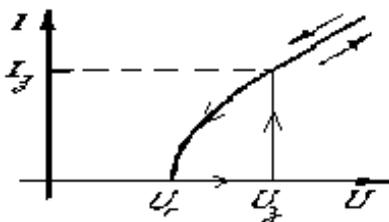


Рис.13а.1а. ВАХ неоновой лампы

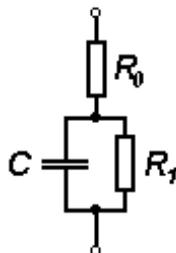


Рис.13а.1б. Эквивалентная схема неоновой газоразрядной лампы

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 ВАХ 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, будем наблюдать падение тока через лампу до нуля при напряжении гашения  $U_r$ , меньшем  $U_3$ , так как при  $U_3$  в горячей лампе число носителей соответствует разряду, т.е. предельно велико. В связи с инерционностью газоразрядной лампы напряжение гашения для динамических режимов работы лампы может быть немного ниже, чем в квазистатическом режиме.

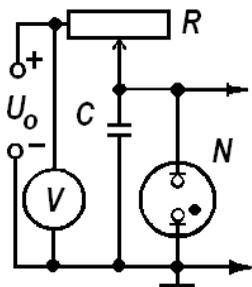


Рис. 13а.2а. Электрическая схема включения неоновой лампы в режиме возбуждения релаксационных колебаний

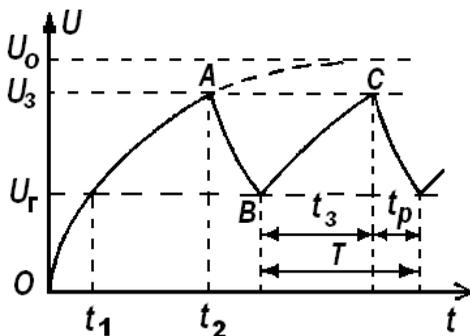


Рис. 13а.2б. Форма получаемых релаксационных колебаний

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 остается конечным вплоть до  $U = U_T$ , при  $U < U_T$  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.1а 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 ее основе.

Рассмотренные «гистерезисные» свойства неоновой лампы объясняют механизм возникновения колебаний в схеме, приведенной на рис. 13а.2а. При включении источника напряжения  $U_0$  вначале происходит зарядка конденсатора  $C$  через сопротивление  $R$  (неоновая лампа  $N$  не горит). Как видно из рис. 13а.2б, напряжение на емкости растет и асимптотически стремится к значению  $U_0$  (кривая  $OA$  на рис. 13а.2б). Но раньше, чем  $U$  достигнет значения  $U_0$ , лампа зажигается. 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  $AB$ ). В тот момент, когда  $U$  станет равным  $U_r$ , лампа погаснет, и конденсатор снова начнет заряжаться (кривая  $BC$ ). Как только  $U$  станет равным  $U_3$ , лампа снова зажжется. Далее процесс будет периодически повторяться. Следовательно, в схеме происходит чередование двух основных стадий — стадии запасаения в накопителе (емкости  $C$ ) энергии от источника напряжения  $U_0$  и стадии 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  $t_p$  (см. рис. 13а.2.б)  $T = t_3 + t_p$ . Причем  $t_3 = t_2 - t_1$ , где  $t_2$  — время зарядки конденсатора до напряжения  $U_3$ ,  $t_1$  — время зарядки конденсатора до напряжения  $U_r$ . 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  $U_r$ :

$$U_3 = U_0(1 - e^{-t_2/RC}) \quad \text{и} \quad U_r = U_0(1 - e^{-t_1/RC}).$$

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

$$t_3 = RC \ln(U_0 - U_r)/(U_0 - U_3).$$

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 емкости  $C$ :

$$T \approx t_3 = RC \ln(U_0 - U_r)/(U_0 - U_3). \quad (13a.2)$$

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В данной работе используются следующие приборы: генератор ГЗЧМ, два модульных блока МО1 и МО2, вольтметры VC97 и М-830В, осциллограф.

На модульном блоке МО1 собрана схема, изображенная на рис. 13а.3, которая подключается к генератору ГЗЧМ, образуя источник питания, способный выдавать постоянное напряжение  $U \leq 105 \text{ В}$ .

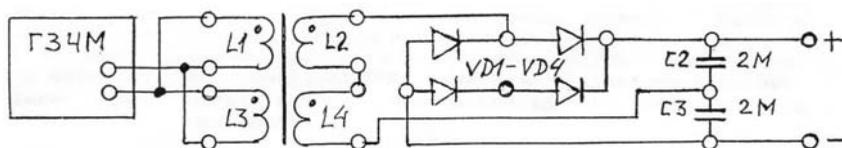


Рис. 13а.3. Источник напряжения

На модуле МО2 смонтированы: неоновая лампа  $N$ ; набор парных емкостей (по 1 нФ, 2 нФ, 10 нФ, 100 нФ и 1 мФ); набор сопротивлений (1 кОм, парные по 10 кОм и 30 кОм, 100 кОм, 300 кОм, 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 (М-830В) используется для измерения напряжения на последовательно включенном с лампой сопротивлении  $R_2 = 10 \text{ Ом}$ . Это напряжение пересчитывается в ток лампы.

Осциллограф служит для наблюдения формы релаксационных колебаний и измерения параметров сигнала.

## ЗАДАНИЯ

### 1. Снятие ВАХ.

1.1. Собрать схему согласно рис. 13а.4, используя модуль МО2, содержащий неоновую лампу и сопротивления  $R_1 = 30 \text{ кОм}$  и  $R_2 = 10 \text{ Ом}$ .

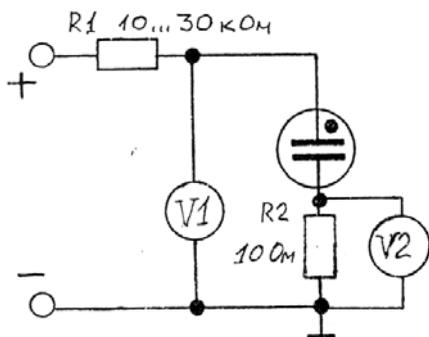


Рис. 13а.4. Схема для измерения ВАХ неоновой лампы

1.2. Присоединить, соблюдая полярность, собранную по рис. 13а.4 схему к источнику постоянного напряжения, выходы которого находятся на модуле МО1, как показано на рис. 13а.3. Выставить на генераторе ГЗЧМ частоту  $f = 5,0$  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 ВАХ 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  $R_2$ . Определить  $U_3$  и  $U_T$ .

## 2. Наблюдение релаксационных колебаний.

2.1. Собрать схему согласно рис. 13а.5 и присоединить ее, соблюдая полярность к источнику напряжения. Выбрать значение емкости в диапазоне  $5 \div 100$  нФ, сопротивление  $R = 100$  кОм.

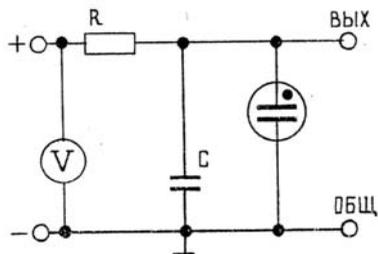


Рис. 13а.5. Релаксационный генератор

2.2. Присоединить параллельно лампе осциллограф. Получить на экране осциллографа устойчивую картину колебаний и зарисовать ее в рабочий журнал. Измерить с помощью осциллографа амплитуду колебаний.

2.3. Исследовать зависимости периода  $T$  и амплитуды  $\Delta U$  колебаний от емкости 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 емкостей  $C$  в диапазоне от  $5 \div 500$  нФ (например, последовательное соединение двух конденсаторов  $100$  нФ каждый даст новую емкость  $50$  нФ). Заготовить таблицу для записи результатов.

Измерить с помощью осциллографа для шести различных емкостей  $C$  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  $90 \div 100$  В, при фиксированных  $R = 100$  кОм и  $C = 100$  нФ.

### **3. Обработка результатов.**

3.1. Построить график ВАХ неоновой лампы.

3.2. 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).

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что такое релаксационные колебания?
2. Расскажите об особенностях ВАХ неоновой лампы.
3. Что такое внутреннее сопротивление лампы и как его найти по ВАХ?
4. Выведите формулу (13а.1).
5. Расскажите о принципе действия релаксационного генератора, изображенного на рис. 13а.2.а.
6. Какую форму имеют релаксационные колебания в данной работе?

7. Каким должно быть соотношение между сопротивлением  $R$  и внутренним сопротивлением горячей и негорящей неоновой лампы, чтобы период колебаний определялся формулой (13а.2)?
8. Каким способом можно менять период колебаний?
9. Каким образом можно изменить амплитуду колебаний?
10. Какую форму колебаний имеет генератор развертки в осциллографе? Можно ли в качестве генератора развертки использовать релаксационный генератор? Как искажается при этом форма исследуемого сигнала и почему?

## Работа 14а

### ВИХРЕВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

---

*Цель:* изучение свойств вихревого электрического поля.

#### ВВЕДЕНИЕ

Из уравнений Максвелла следует, что изменяющееся со временем магнитное поле порождает электрическое. Соответствующее уравнение записывается в виде

$$[\nabla \vec{E}] = -\partial \vec{B} / \partial t, \quad (14a.1)$$

где  $\vec{E}$  — вектор напряженности электрического поля;  $\vec{B}$  — 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 напряженности электрического поля;  $B_z$  — осевая (по оси соленоида) компонента магнитной индукции, а интегралы берутся по замкнутому контуру  $L$  и по поверхности  $S$ , опирающейся на этот контур.

В работе используется вихревое электрическое поле соленоида, по которому течет 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 имеем дело с бесконечно длинным соленоидом.

Известно, что магнитное поле внутри бесконечного соленоида однородно и его магнитная индукция определяется по формуле

$$B_z = \mu\mu_0 nI, \quad (14a.3)$$

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 (14a.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

$$\begin{cases} \frac{\partial B_z}{\partial t} \pi r^2 & \text{для } r < R; \\ \frac{\partial B_z}{\partial t} \pi R^2 & \text{для } r \geq R, \end{cases}$$

где  $R$  — радиус соленоида.

Интеграл в левой части уравнения (14a.2) в силу осевой симметрии задачи равен  $E_\phi \cdot 2\pi r$ . В результате после несложных преобразований получим для модуля напряженности вихревого электрического поля следующее выражение

$$E = \begin{cases} \left| \frac{r}{2} \frac{\partial B_z}{\partial t} \right|, & r < R, \\ \left| \frac{R^2}{2r} \frac{\partial B_z}{\partial t} \right|, & r \geq R, \end{cases} \quad (14a.4)$$

Поскольку  $\partial B_z / \partial t$  не зависит от  $r$ , то напряженность 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

$$B_z = \mu_0 n I_{\max} \cos \omega t. \quad (14a.5)$$

Соответственно, для модуля напряженности 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 напряженности 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 соединенных соленоидов  $L1$  (рис. 14a.1 и 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 напряженностью  $E_\varphi(r)$ , равна  $2\pi r N$  и, соответственно, на концах его возникает напряжение

$$U(r) = E_\varphi(r) 2\pi r N. \quad (14a.7)$$

Это напряжение измеряется с помощью осциллографа ЭО. Источником тока для соленоида служит генератор ГИ импульсов специальной формы.

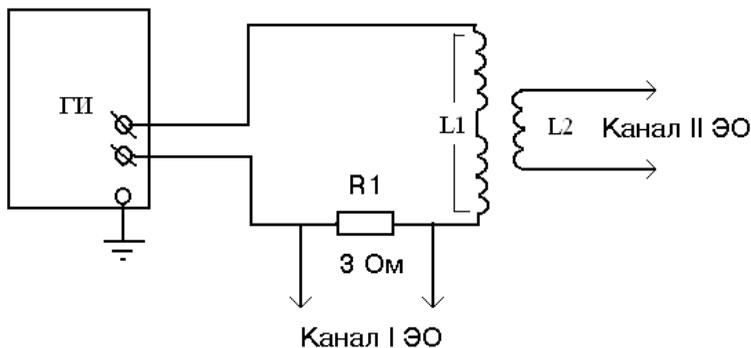


Рис. 14а.1. Принципиальная схема

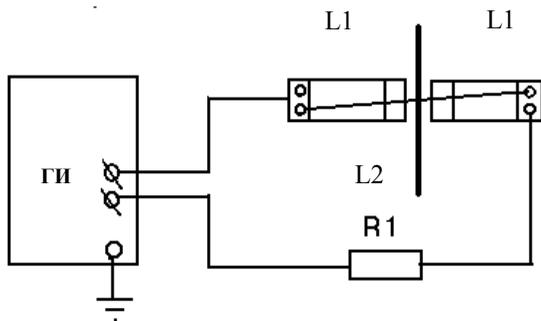


Рис. 14а.2. Схема соединения соленоидов

Принципиальная схема и схема соединения соленоидов приведены на рис. 14а.1 и 14а.2, где  $L1$  — контур, создающий магнитное поле (два соленоида, соединенные последовательно, причем последовательному соединению соответствует перекрестное соединение одинаковых клемм соленоидов),  $R1$  — датчик тока (сопротивление  $R = 3 \text{ Ом}$ ),  $L2$  — индукционный датчик электромагнитного поля

(одно из колец измерительной платы; всего девять колец по  $N = 10$  витков с радиусами  $r = 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70$  мм).  
 Схема подключения колец показана на рис. 14а.3.

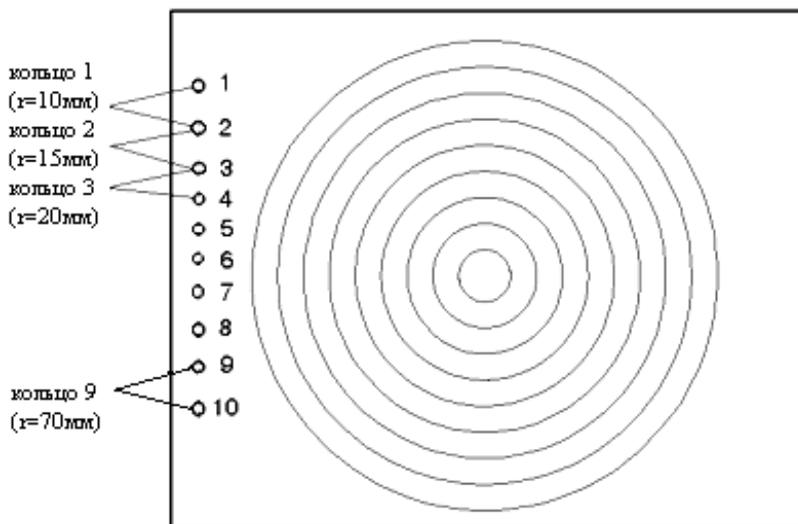


Рис. 14а.3. Схема подключения колец

Напряжение  $U(r)$ , измеряемое осциллографом, позволяет определить напряженность поля в каждом контуре

$$E(r) = U(r) / (2\pi r N). \quad (14а.8)$$

### ЗАДАНИЯ

1. Исследовать временную зависимость напряженности вихревого электрического поля от характера изменения магнитного поля:

1.1. Подать пилообразный сигнал от генератора на элементы схемы рис. 14а.1 с частотами следования в интервале  $30 \div 90$  Гц. Вход II осциллографа подключить к клеммам с кольца радиусом 10 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 — напряжение, пропорциональное напряженности вихревого электрического поля на расстоянии 10 мм от оси соленоида.

1.2. Получить на экране осциллографа устойчивые изображения сигналов по обоим входам.

1.3. 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.

1.4. Аналогичные исследования выполнить и для синусоидального сигнала и построить соответствующие зависимости.

1.5. Отразить в заключении степень согласия с теорией [см. формулу (14а.4)].

2. Исследовать зависимость напряженности вихревого электрического поля от скорости изменения магнитного поля. (Для удобства дальнейших измерений сигнал входа I вывести из поля зрения.)

2.1. Для пилообразного сигнала зарисовать (на одном и том же рисунке) зависимости  $U_2(t)$  с кольца  $r = 10$  мм для трех различных частот следования:  $\nu_1 = 30$  Гц;  $\nu_2 = 60$  Гц;  $\nu_3 = 90$  Гц. Обратить внимание на зависимость амплитуды  $U_2$  от частоты.

2.2. Для синусоидального сигнала с помощью осциллографа произвести измерения амплитуды напряжения  $U_2$  для кольца радиусом  $r = 10$  мм и десяти различных частот в интервале от 100 до 1000 Гц.

По формуле (14а.8) определить значение амплитуды напряженности вихревого электрического поля  $E_{\max}$  для всех значений частоты  $\nu$ . Построить график зависимости  $E_{\max}(\nu)$ . Сравнить характер этой зависимости с тем, что предсказывает теория [см. формулу (14а.6)].

3. Исследовать зависимость напряженности вихревого электрического поля от расстояния до оси соленоида:

3.1. С помощью осциллографа произвести измерения амплитуды напряжения  $U_{\max}(r)$  для синусоидального сигнала на частоте  $\nu = 1000$  Гц для всех колец измерительной платы.

3.2. Вычислить амплитуду напряженности вихревого электрического поля  $E_{\max}$  по формуле (14а.8) и построить график зависимо-

сти  $E_{\max}(r)$ . Сравнить характер этой зависимости с тем, что предсказывает теория [см. формулу (14а.6)], если  $R = 26$  мм.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Покажите направление вектора напряженности вихревого электрического поля относительно направлений тока в соленоиде для двух случаев: при увеличении тока (по модулю) и при уменьшении тока.

2. Как зависит напряженность вихревого электрического поля от расстояния до оси соленоида?

3. Как будет зависеть от времени напряженность вихревого электрического поля, если магнитная индукция зависит от времени: а) линейно, б) пилообразно?

4. Получите формулу (14а.7).

5. Почему напряженность магнитного поля в месте нахождения измерительной платы можно определять по формуле (14а.3), описывающей напряженность магнитного поля внутри соленоида, хотя плата находится вне соленоида?

6. Каким магнитное поле будет в месте расположения измерительной платы, если соленоиды соединить не перекрестно?

7. Можно ли при исследовании временной зависимости напряженности 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?

**Работа 19а**

**СКИН-ЭФФЕКТ**

**В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ**

---

*Цель:* изучение вихревого электрического поля и скин-эффекта в металлах.

**ВВЕДЕНИЕ**

Из уравнений Максвелла следует, что изменяющееся со временем магнитное поле порождает вихревое электрическое:

$$[\nabla \vec{E}] = -\partial \vec{B} / \partial t = -\mu_0 \mu \partial \vec{H} / \partial t. \quad (19a.1)$$

В работе исследуется вихревое электрическое поле двух соединенных последовательно соленоидов, по которым течет переменный электрический ток при наличии внутри соленоидов металлических сердечников. Измерения электрического поля проводятся с помощью многоконтурного плоского датчика, размещенного 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:

$$\vec{B} = \mu_0 n I_m \cos(\omega t), \quad (19a.2)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная,  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м;  $n$  — 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 (19а.1) с учетом (19а.2) соотношения для амплитуды напряженности электрического поля:

$$E_{m1} = \mu_0 n I_m \omega / 2 \cdot \begin{cases} r, & r < r_0; \\ r_0^2 / r, & r > r_0, \end{cases} \quad (19а.3)$$

где  $r_0$  — радиус соленоида,  $r_0 = 0,026$  м.

Из формулы (19а.3) следует, что в отсутствие проводников амплитуда напряженности 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 сосредотачивается главным образом вблизи поверхности проводника и почти не проникает вглубь проводника. Для объяснения скин-эффекта воспользуемся уравнениями Максвелла. Запишем дополнительно к (19а.1) уравнение, связывающее напряженности электрического и магнитного полей  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  в среде с постоянными удельным сопротивлением  $\rho$  и магнитной проницаемостью  $\mu$ :

$$[\nabla \vec{H}] = \vec{j} = \vec{E} / \rho, \quad (19а.4)$$

где  $\vec{j}$  — плотность тока проводимости. В правой части уравнения (19а.4) опущено слагаемое  $\partial \vec{D} / \partial t$  (плотность тока смещения), так как в проводниках ток проводимости во много раз превышает ток смещения.

Применим операцию  $\text{rot}$  к уравнению (19а.1). Воспользуемся тем, что  $[\nabla[\nabla \vec{E}]] = \nabla(\nabla \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$  и  $\nabla \vec{E} = 0$ , тогда  $[\nabla[\nabla \vec{E}]] = -\nabla^2 \vec{E}$ . Исключим  $\text{rot} \vec{H}$  с помощью уравнения (19а.4), и в результате получаем

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \mu (1 / \rho) (\partial \vec{E} / \partial t). \quad (19а.5)$$

Рассмотрим бесконечно длинный соленоид, заполненный проводящей средой. Введем цилиндрическую систему координат с осью  $z$  вдоль оси соленоида, в которой поле  $\vec{E}$  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 напряженности электромагнитного поля убывает при удалении от поверхности проводника вглубь при сильном скин-эффекте по экспоненте:

$$E_m = E_{02} \exp(-(r_0 - r) / r_s). \quad (19а.9)$$

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 идеали-

зированной случая (19а.7), введем 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 объема 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. 19а.1), звуковой генератор гармонических сигналов и осциллограф для измерения напряжения.

Схема эксперимента приведена на рис. 19а.2, где ЗГ — звуковой генератор,  $L1$  — контур, создающий магнитное поле (два соленоида, соединенные последовательно, причем последовательному соединению соответствует перекрестное соединение одинаковых клемм соленоидов),  $R1$  — датчик тока,  $L2$  — индукционный датчик электромагнитного поля (один из кольцевых контуров плоского индукционного датчика, всего девять контуров,  $N = 10$ , 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 напряженность поля в каждом контуре:

$$E_{m2} = U_2 / 2\pi r N. \quad (19a.11)$$

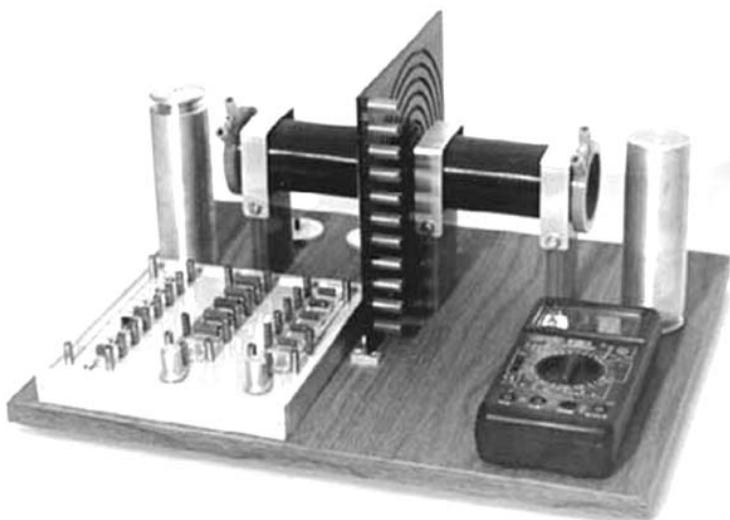


Рис. 19а.1. Комплекс ЛКЭ-5Р «Электромагнитное поле»

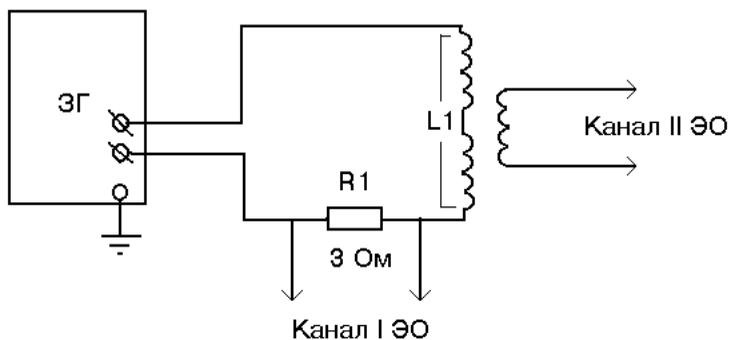


Рис. 19а.2. Принципиальная схема эксперимента

## ЗАДАНИЯ

1. 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 соленоиды и определить амплитуды напряженности электрического поля  $E_{2m}$  по формуле (19а.11) внутри проводника. Для сравнения

для тех же расстояний и частот рассчитать по формуле (19а.3) амплитуду напряженности  $E_{1m}$  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 напряженности электрического поля от расстояния до оси соленоида существенно отличается от линейной.

2. 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. Так как согласно формуле (19а.9) зависимость  $E_{2m}(x)$  носит экспоненциальный характер, то 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  $\nu^{-1/2}$ .

3. 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.

## 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. Каково назначение соленоида в данной работе?
5. Какова зависимость от расстояния  $r$  индукции магнитного поля в сердечнике в случае сильного скин-эффекта?
6. Какова зависимость плотности тока проводимости от расстояния  $r$  при наличии проводящего сердечника внутри соленоида?
7. Почему коэффициент  $a$  в реальном случае отличен от 1?

## Работа 20а

### ИЗУЧЕНИЕ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

---

**Цель:** исследование цепей переменного тока; определение индуктивности, емкости; изучение работы трансформатора.

#### ВВЕДЕНИЕ

В работе исследуются характеристики цепей переменного тока в контурах, состоящих из емкости  $C$ , индуктивности  $L$ , активного сопротивления  $R$  и источника переменной ЭДС  $\varepsilon$ .

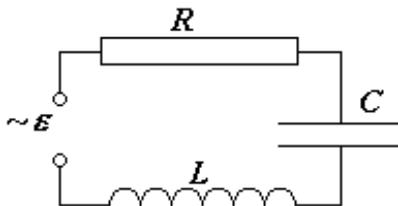


Рис. 20а.1. Последовательный  $RLC$ -контур

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 определенных 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 (20a.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 (20a.5), связывающую амплитудные значения тока и внешней ЭДС, называют законом Ома для переменного тока. Напряжение на активном сопротивлении

$$U_R = iR = U_{Rm} \cos(\omega t - \varphi), \quad (20a.8)$$

где  $U_{Rm} = I_m R$  — амплитуда напряжения на активном сопротивлении. С изменением частоты внешней ЭДС изменяется напряжение на емкости и индуктивности. Напряжение на конденсаторе

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int i dt = U_{C \max} \cos\left(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}\right), \quad (20a.9)$$

где  $U_{Cm} = I_m/\omega C = I_m X_C$  — амплитуда напряжения на емкости. Величину  $X_C = 1/\omega C$  называют емкостным сопротивлением. Напряжение на конденсаторе отстает от тока по фазе на  $\pi/2$ .

Напряжение на индуктивности

$$U_L = L \frac{di}{dt} = U_{L\max} \cos\left(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right), \quad (20a.10)$$

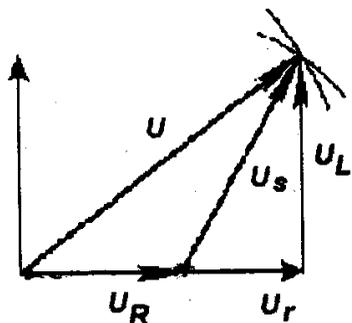
где  $U_{Lm} = I_m \omega L = I_m X_L$  — амплитуда напряжения на индуктивности. Величину  $X_L$  называют индуктивным сопротивлением. Напряжение на индуктивности опережает ток по фазе на  $\pi/2$ .

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 (20a.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 емкостному, и полное сопротивление цепи равно активному. Явление резонанса может быть использовано для определения неизвестной емкости или индуктивности (катушка, соленоид с сердечником). Изменяя частоту генератора, определяют такое ее 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 определить величину

$$\nu_r = \frac{\omega_r}{2\pi}.$$

Рис. 20а.2. Векторная диаграмма



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

Работа выполняется с помощью лабораторного комплекса ЛКЭ-1 или ЛКЭ-2 «Электромагнитные явления и устройства». В качестве источника переменного напряжения используется генератор сигналов ГЗЧМ. Его выходное напряжение изменяется в пределах  $1 \div 10$  В. Блок схема «Электрические цепи» приведена на рис. 1 (см. разд. «Лабораторный комплекс 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 напряженность магнитного поля). Тем не менее в случае малых напряженностей магнитного поля этой зависимостью можно пренебречь. Ферромагнитные свойства, таким образом, накладывают ограничение на используемые токи, а следовательно, и на входные напряжения контура. Отметим, что номинал, указанный на ней (например, 50 мГн) может

не совпадать с реальной индуктивностью катушки. Электромагнитный комплекс позволяет определить не только индуктивность и емкость 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.

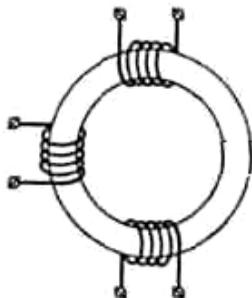


Рис. 20а.3. Схема трансформатора

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 учетом потокоцепления) согласно закону Фарадея равна

$$\varepsilon_1 = N_1 \varepsilon_m \cos(\omega t), \quad (20a.11)$$

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

$$K = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{N_2}{N_1} \cong \frac{U_2}{U_1}, \quad (20a.13)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  — соответствующие напряжения.

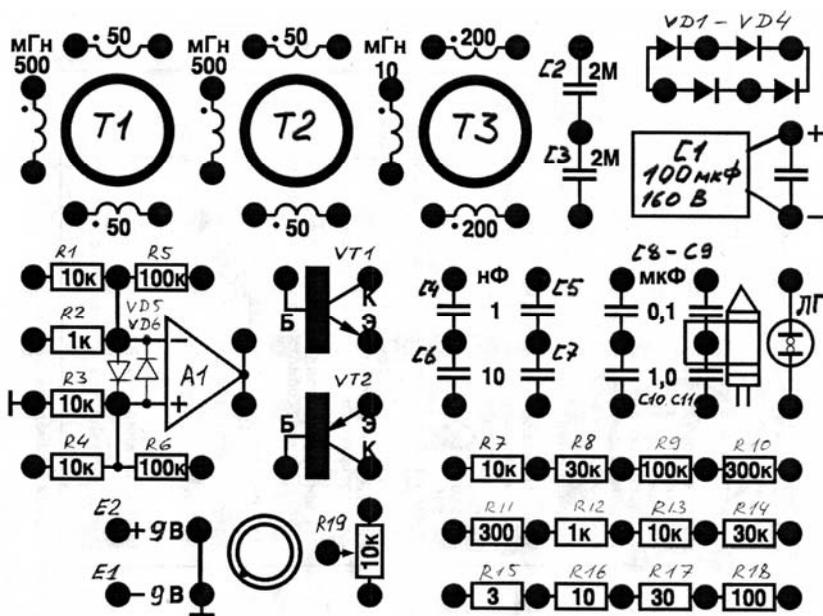


Рис. 20а.4. Схема модуля «Цепи переменного тока»

Для измерения напряжений используется цифровой мультиметр типа VC97.

Генератор ГЗЧМ обеспечивает напряжение на выходе не более 10 В. Неоновая газоразрядная лампа, обозначенная на рис. 20а.4 буквами ЛГ, зажигается при существенно больших напряжениях, вследствие чего необходимо использовать последовательно соединенные трансформаторы. Предлагается использовать для этой цели трансформаторы  $T1$  и  $T2$  (рис. 20а.4).

## ЗАДАНИЯ

**1. Определение емкости.** Сигнал от генератора подается на исследуемый конденсатор, соединенный последовательно с известным активным сопротивлением (рис. 20а.5).

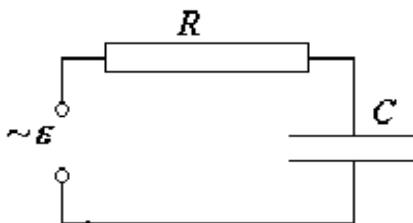


Рис. 20а.5. Последовательный  $RC$ -контур

С помощью вольтметра измеряются действующие значения напряжений на конденсаторе  $U_C$  и на активном сопротивлении  $U_R$ . Измерения повторить несколько раз. При известной частоте сигнала емкость определяется по формуле

$$C = U_R / (2\pi\nu R U_C). \quad (20а.14)$$

Повторить измерения для нескольких значений частоты и напряжения  $U$  генератора.

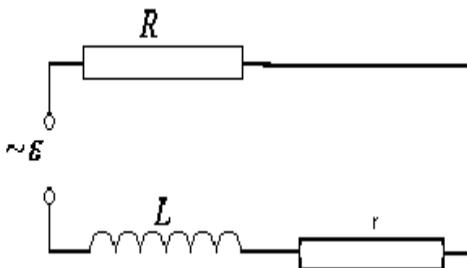
**2. Определение индуктивности соленоида.** В качестве неизвестной индуктивности рекомендуется использовать одну из обмоток (нижнюю) левого трансформатора, представляющего соленоид с сердечником. На рис. 20а.4 этот трансформатор обозначен  $T1$ . Собрать цепь, состоящую из активного сопротивления, конденсатора и соленоида (см. рис. 20а.1). Методом резонанса оценить индуктивность. Для этого, меняя частоту генератора, подобрать такое ее значение  $\nu_r$ , при котором напряжение на активном сопротивлении  $U_R$  достигнет максимального значения. Индуктивность опреде-

ляется по известным значениям емкости и резонансной частоты, совпадающей с собственной частотой контура по формуле

$$L = 1 / 4\pi^2 \nu_r^2 C. \quad (20a.15)$$

**3. Оценка 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 п. 2 задания (нижняя обмотка левого трансформатора  $T1$ ). Следует учитывать, что активное сопротивление контура складывается из активных сопротивлений резистора  $R$  и катушки  $r$ .

Рис. 20а.6. Последовательный  $RL$ -контур



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 п. 2 задания.

**4. Определение коэффициента трансформации.** Подайте на нижнюю катушку трансформатора  $T1$  с генератора сигналов ГЗЧМ напряжение  $U_1$  в диапазоне  $1 \div 3$  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  $K_2$ .

**5. Повышение напряжения с целью зажигания неоновой лампы.** Собрать схему, показанную на рис. 20а.7.

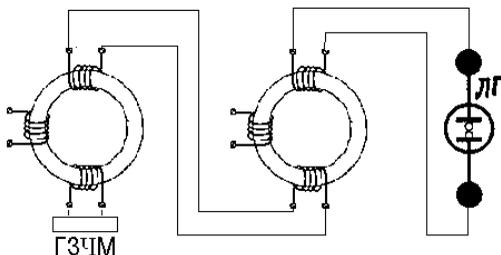


Рис. 20а.7. Схема зажигания неоновой лампы

Подать на первичную обмотку левого трансформатора с генератора ГЗЧМ напряжение порядка  $U_1 \approx 2$  В с частотой порядка 1000 Гц. Постепенно увеличивая напряжение  $U_1$  добиться зажигания неоновой лампы ЛГ. Измерить это напряжения для нескольких частот и убедиться в том, что это напряжение зависит от частоты.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Нарисуйте принципиальную схему контура.
2. Что такое действующее значение напряжения?
3. Что такое емкостное 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 емкость?
9. Как определить индуктивность методом резонанса?
10. Как устроен трансформатор переменного тока?
11. Что такое потокосцепление?

## Работа 21

### ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

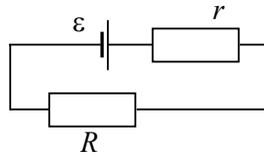
---

**Цель:** изучение цепей постоянного тока и применение законов Ома и Кирхгофа для определения параметров цепей.

#### ВВЕДЕНИЕ

В состав электрической цепи входят: источник тока, потребитель тока, соединительные провода, измерительные приборы.

Рис. 21.1. Электрическая цепь



Для электрической цепи (рис. 21.1), содержащей источник тока с ЭДС  $\varepsilon$ , внутренним сопротивлением  $r$  и внешним сопротивлением  $R$ , выполняется **закон Ома** для замкнутой цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{r + R}. \quad (21.1)$$

Закон Ома для неоднородного участка цепи (рис. 21.2):

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_1 - \varepsilon_2}{R_1 + R_2 + r_1 + r_2}. \quad (21.2)$$

Метод расчета разветвленных электрических цепей постоянного тока основан на **правилах Кирхгофа**. Первое правило Кирхгофа выражает закон сохранения заряда для линейных проводов и формулируется следующим образом: *алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю*:

$$\sum I_k = 0. \quad (21.3)$$

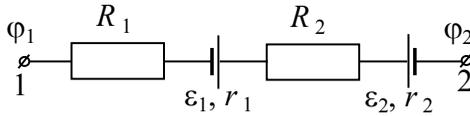


Рис. 21.2. Неоднородный участок цепи

*Узлом* в разветвленной цепи называется точка, в которой сходится не менее трех проводников. Токи, идущие к точке разветвления, и токи, исходящие из нее, следует считать величинами разных знаков. Для токов на рис. 21.3:  $I_3 - I_1 - I_2 = 0$ .

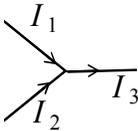


Рис. 21.3. Узел

Второе правило Кирхгофа является следствием закона Ома для неоднородного участка цепи: *алгебраическая сумма падений напряжений на сопротивлениях контура ( $U_i = I_i R_i$ ) равна алгебраической сумме имеющихся в контуре ЭДС ( $\varepsilon_j$ ):*

$$\Sigma(I_i R_i) = \Sigma\varepsilon_j. \quad (21.4)$$

Токи  $I_i$  входят в сумму (21.4) со знаком «плюс», если их направления совпадают с направлением обхода контура. ЭДС источников  $\varepsilon_j$  входят в правую часть (21.4) со знаком «плюс», если они создают токи, направленные в сторону обхода контура, и со знаком «минус» — в обратном случае. Направление обхода контура выбирается произвольно.

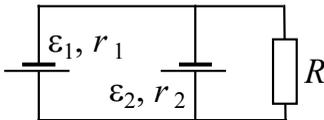


Рис. 21.4. Пример использования двух источников тока

Применив правила Кирхгофа к цепи на рис. 21.4, можно убедиться, что использование двух источников тока  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  (с внутренними сопротивлениями  $r_1$  и  $r_2$ ) эквивалентно использованию одно-

го источника  $\varepsilon$  с эффективным внутренним сопротивлением  $r$ , причем справедливы следующие соотношения:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}, \quad \frac{\varepsilon}{r} = \frac{\varepsilon_1}{r_1} + \frac{\varepsilon_2}{r_2} \quad (21.5)$$

Для того, чтобы убедиться в этом, следует найти ток  $I$  через сопротивление  $R$  в схеме на рис. 21.4. Предлагается провести расчеты самостоятельно. В результате несложных алгебраических преобразований получаем:

$$I \left( R + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \right) = \frac{\varepsilon_2 r_1 + \varepsilon_1 r_2}{r_1 + r_2} \quad (21.6)$$

Учитывая формулу (21.1), убеждаемся в справедливости (21.5).

**Мощность тока.** Рассмотрим участок цепи постоянного тока, к концам которого приложено напряжение  $U$ . За время  $\Delta t$  через любое сечение проводника проходит заряд  $\Delta q = I \Delta t$ , при этом электростатические и сторонние силы, действующие на данном участке, совершают работу:  $A = U \Delta q = UI \Delta t$ . Тогда мощность тока на этом участке  $P = d'A/dt = UI$ , или:

$$P = I^2 R, \quad (21.7)$$

так как  $U = IR$ , где  $R$  — сопротивление участка цепи.

Рассмотрим цепь на рис. 21.1 ( $r$  — внутреннее сопротивление источника тока,  $R$  — сопротивление внешней нагрузки). Определим, при каком значении сопротивления внешней нагрузки на нем выделяется максимальная мощность (например, в виде тепла). Из формул (21.1) и (21.7):

$$P(R) = \frac{\varepsilon^2 R}{(r + R)^2}. \quad (21.8)$$

Исследуем функцию (21.8) на экстремум (на максимум). Вычислим производную  $P$  по  $R$  и, из уравнения  $P'_R = 0$ , получим, что  $P(R)$  максимальна при  $R = r$  (рекомендуется провести выкладки самостоятельно).

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Данная работа выполняется на лабораторном комплексе ЛКЭ-1 (см. разд. «Лабораторный комплекс ЛКЭ-1»). Используется модуль М01 «Цепи постоянного тока», блок модулей «Электрические цепи» смонтирован на столике (см. рис. 2).

В цепях, изучаемых в работе, используются:

источник питания  $I$ ;

аккумулятор  $I2$ ;

набор сопротивлений  $\delta$ , состоящий из четырех цепочек сопротивлений;

цифровой мультиметр М-830В (рис. 18), правила работы с которым приведены в разд. «Лабораторный комплекс ЛКЭ-1»;

соединительные провода.

## ЗАДАНИЯ

### 1. Определение внутреннего сопротивления источника тока.

Собрать схему (рис. 21.5). В качестве источника тока использовать источник питания  $I$ . Предварительно измерить ЭДС источника с помощью мультиметра (диапазон «DCV», «20»). Взять  $R = 100$  Ом. Выбрать в качестве  $R_x$  пять-шесть сопротивлений и измерить соответствующее значение электрического тока (для измерения тока поставить переключатель мультиметра в положение «20m», диапазон «DCA»).

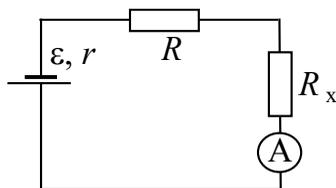


Рис. 21.5. Схема для определения внутреннего сопротивления источника тока

Вычислить внутреннее сопротивление источника [формула (21.1)].

Занести результаты в заранее подготовленную таблицу:

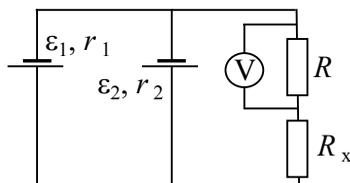
$\varepsilon = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В}$			
$R+R_x, \text{ Ом}$	$I, \text{ mA}$	$r, \text{ Ом}$	$\langle r \rangle, \text{ Ом}$
...			

Вычислить погрешность внутреннего сопротивления источника.

Повторить измерения, используя в качестве источника тока аккумулятор  $I2$  и  $R = 10 \text{ Ом}$ . Для измерения тока поставить переключатель мультиметра в положение «200m», диапазона «DCA», в процессе измерений, при необходимости, перевести переключатель в положение «20m».

**2. Экспериментальная проверка правил Кирхгофа.** Собрать схему (рис. 21.6). В качестве  $R_x$  можно выбрать пять-шесть сопротивлений из набора  $\delta$ .

Рис. 21.6. Схема для проверки правил Кирхгофа



На схеме сопротивление  $R = 100 \text{ Ом}$ , в качестве источников используются  $\varepsilon_1$  — источник питания  $I$  и  $\varepsilon_2$  — аккумулятор  $I2$ .

Снять показания вольтметра (в качестве вольтметра использовать мультиметр в положении «20», диапазона «DCV»). Рассчитать значение электрического тока, текущего через нагрузку.

Найти эффективное внутреннее сопротивление источника  $r$  по формуле (21.5), используя значения  $r_1$  и  $r_2$ , полученные в п. 1 задания. Найти  $\varepsilon$ , зная  $r, R_x + R, I$  (см. рис. 21.5). Убедиться, что рассчитанные значения  $\varepsilon$  удовлетворяют второму из соотношений (21.5).

Занести результаты в заранее подготовленную таблицу:

$R = 100 \text{ Ом}, \varepsilon_1 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В}, \varepsilon_2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В}$				
$R_x, \text{ Ом}$	$U, \text{ В}$	$I, \text{ mA}$	$R_x + R, \text{ Ом}$	$\varepsilon, \text{ В}$

Построить график зависимости  $I(R_x)$ .

**3. Определение максимальной мощности и соответствующего сопротивления нагрузки.** Собрать схему (рис. 21.7). В качестве источника использовать аккумулятор  $I2$ . Выбрать  $6 \div 8$  сопротивлений из набора  $b$  таким образом, чтобы значения двух-трех из них были меньше внутреннего сопротивления аккумулятора  $r_2$ , а остальные — больше  $r_2$ . При подборе сопротивлений иметь в виду, что допустимы как последовательные, так и параллельные их соединения.

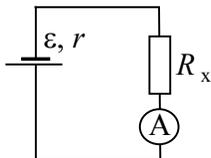


Рис. 21.7. Схема для определения максимальной мощности и соответствующего сопротивления нагрузки

Снять зависимость  $I(R_x)$ . Результаты занести в заранее подготовленную таблицу:

$R_x$ , Ом	$I$ , мА	$I^2$ , (мА) <sup>2</sup>	$I^2 R_x$ , Вт
...			

Построить график зависимости мощности  $P(R_x)$ . По графику определить максимальное значение мощности и соответствующее ему значение сопротивления нагрузки. Сравнить результаты с теорией. Оценить погрешности.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Докажите справедливость соотношений (21.5).
2. Сформулируйте правила Кирхгофа.
3. При каком сопротивлении нагрузки в цепи выделяется максимальная мощность?
4. Постройте график зависимости потенциала  $\varphi$  от координаты  $x$  для схемы на рис. 21.2,  $\varphi_1 > \varphi_2$ .
5. Сформулируйте условия применимости закона Ома (21.2).
6. В чем заключается закон Джоуля — Ленца?
7. Постройте график зависимости тепловой мощности от величины сопротивления нагрузки.
8. В чем состоит закон сохранения энергии для цепи постоянного тока?

## Работа 22

### ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

---

**Цель:** изучить вольт-амперные характеристики резистора, лампы накаливания и полупроводниковых приборов: кремниевого и германиевого диодов, кремниевого стабилитрона, р-п перехода транзистора.

#### ВВЕДЕНИЕ

Электрический ток есть упорядоченное движение электрических зарядов. Эти заряды называют *носителями тока*. В металлах носителями тока являются электроны. Обозначим через  $\langle \vec{u} \rangle$  средний вектор скорости рассматриваемых носителей. Его называют *средней, дрейфовой* или *упорядоченной* скоростью движения носителей тока. Обозначим, далее, через  $n$  концентрацию носителей тока, т.е. их число в единице объема, и через  $e$  величину заряда электрона. Вектор

$$\vec{j} = -en\langle \vec{u} \rangle \quad (22.1)$$

называется *плотностью электрического тока*. По величине плотность тока есть электрический заряд, переносимый в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную к направлению протекания тока. Направление же вектора  $\vec{j}$  совпадает с направлением упорядоченного течения положительного электричества.

Для тонких проводов плотность тока  $j$  может считаться одной и той же во всех точках поперечного сечения провода. Через поперечное сечение провода в единицу времени проходит количество электричества

$$I = j \cdot S, \quad (22.2)$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения провода, называемое *силой тока*, или просто *током*. Как показывает опыт, для металлов в широких пределах плотность тока  $\vec{j}$  пропорциональна напряженности электрического поля  $\vec{E}$ :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \quad (22.3)$$

где  $\sigma$  — постоянная для данного материала величина, называемая его *удельной проводимостью*, или *электропроводимостью*. Она зависит от физического состояния тела, в частности от температуры. Величина, обратная электропроводимости, называется *удельным сопротивлением* материала:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}.$$

Для металлов температурная зависимость удельного сопротивления в широком диапазоне температур носит линейный характер:

$$\rho(T) = \rho(T_0) \cdot [1 + \alpha(T - T_0)], \quad (22.4)$$

где  $T$  и  $T_0$  — соответствующие температуры проводника;  $\alpha$  — температурный коэффициент материала проводника.

Выше приведенное соотношение (22.3) называется *законом Ома в локальной (дифференциальной) форме*. Рассмотрим случай, когда электрический ток течет вдоль тонкого провода, и его направление совпадает с направлением оси провода. Если ток постоянен, то из-за сохранения заряда сила тока  $I$  будет одна и та же вдоль всего провода. Перепишем закон Ома в следующей форме:

$$E = \rho \frac{I}{S}.$$

Умножим это соотношение на элемент длины провода  $dl$  и проинтегрируем по участку провода от какой-либо точки 1 до другой точки 2:

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

Так как электрическое поле стационарных токов потенциально, то первый интеграл выражается через разность потенциалов или, другими словами, электрическое напряжение на концах 1 и 2 рассматриваемого участка провода  $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ . Второй интеграл есть величина, характеризующая свойства провода, по которому течет электрический ток. Эта величина называется *электрическим сопротивлением*, или просто *сопротивлением* провода. Если провод изготовлен из однородного материала и всюду имеет одинаковую толщину, то получается известная формула

$$R = \int \rho \frac{dl}{S} = \rho \frac{l}{S}. \quad (22.5)$$

Таким образом,

$$U = IR. \quad (22.6)$$

Формула (22.6) выражает *закон Ома в интегральной форме*, ее называют также *законом Ома для однородного участка цепи*.

Закон Ома может быть выведен в рамках классической теории электропроводности металлов. В металлах носителями тока служат свободные электроны, т.е. электроны, слабо связанные с ионами кристаллической решетки, внутри которой они практически свободно перемещаются. В отсутствие электрического поля свободные электроны ведут себя подобно молекулам идеального газа. Полагая, что на этот электронный газ могут быть распространены результаты кинетической теории газов, получим для оценки средней скорости теплового движения электронов

$$\langle v \rangle = \sqrt{8kT/\pi m}, \quad (22.7)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура,  $m$  — масса электрона.

При включении электрического поля на беспорядочное движение электронов накладывается упорядоченное — дрейфовое — движение. Под действием силы со стороны поля отдельно взятый электрон приобретает некоторую скорость  $\vec{u}$ , дополнительную к скорости хаотического движения, направление которой задается вектором  $\vec{E}$ . Если поле однородно, то средняя скорость упорядо-

ченного движения всех электронов  $\langle \vec{u} \rangle$  одинакова, а так как она оказывается существенно меньше средней скорости теплового движения, то движение свободных электронов приобретает характер относительно медленного смещения электронного газа как целого вдоль силовых линий электрического поля. Такое движение принято называть *дрейфом*, а скорость  $\langle \vec{u} \rangle$  — *скоростью дрейфа*.

Движение электрона в классической механике описывается уравнением

$$m \frac{d}{dt} (\vec{v} + \vec{u}) = -e\vec{E} + \vec{F}_{\text{ст}}, \quad (22.8)$$

где  $\vec{F}_{\text{ст}}$  — сила, действие которой испытывает электрон при столкновении с ионами или другими электронами. Если уравнение (22.8) усреднить по всем свободным электронам, то окажется, что  $\langle \vec{v} + \vec{u} \rangle = \langle \vec{u} \rangle$ , так как  $\langle \vec{v} \rangle = 0$  и  $d/dt(\vec{v} + \vec{u})$  перейдет в  $d/dt(\vec{u})$ , а сила  $\vec{F}_{\text{ст}}$  заменится ее средним значением  $\langle \vec{F}_{\text{ст}} \rangle$ . Заметим, что при таком усреднении столкновения между электронами можно не принимать во внимание, так как они (столкновения) не влияют на импульс всей системы электронов, который только и определяет среднюю скорость их движения. Таким образом, под  $\langle \vec{F}_{\text{ст}} \rangle$  следует понимать силы, действующие на электроны при их столкновениях только с ионами кристаллической решетки. При малых дрейфовых скоростях величину  $\langle \vec{F}_{\text{ст}} \rangle$  можно разложить по степеням  $\langle \vec{u} \rangle$  в ряд и ограничиться при этом линейным членом

$$\langle \vec{F}_{\text{ст}} \rangle = -m \frac{\langle \vec{u} \rangle}{\tau_{\text{ин}}}, \quad (22.9)$$

где  $\tau_{\text{ин}}$  — постоянная, имеющая размерность времени, которую принято называть *инерционным временем* электронов в металле, поскольку при выключении электрического поля дрейфовое движение экспоненциально затухает во времени таким образом, что за время  $\tau_{\text{ин}}$  скорость  $\langle \vec{u} \rangle$  убывает в  $e$  раз.

Воспользовавшись соотношениями (22.1) и (22.9) и введя обозначение

$$\sigma = \frac{ne^2\tau_{\text{ин}}}{m}, \quad (22.10)$$

преобразуем уравнение (22.8) к виду

$$\vec{j} + \tau_{\text{ин}} \frac{d\vec{j}}{dt} = \sigma \vec{E}. \quad (22.11)$$

Если  $\vec{E} = \text{const}$ , а  $n$  и  $\tau_{\text{ин}}$  не зависят от напряженности электрического поля, то общее решение уравнения (22.11) имеет вид

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} + \vec{j}_0 \cdot e^{-t/\tau_{\text{ин}}}, \quad (22.12)$$

где  $\vec{j}_0 = \vec{j}(t=0)$ .

При  $t \gg \tau_{\text{ин}}$  получим закон Ома

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}.$$

Закон Ома верен и для переменных полей. Требуется только, чтобы за время  $\tau_{\text{ин}}$  ток менялся пренебрежимо мало, т.е. выполнялось условие

$$\left| \tau_{\text{ин}} \frac{d\vec{j}}{dt} \right| \ll |\vec{j}|. \quad (22.13)$$

Инерционное время электрона в металле можно выразить через среднее время свободного пробега электрона между двумя последовательными столкновениями его с ионами кристаллической решетки. Так как масса электрона пренебрежимо мала по сравнению с массой иона, то можно принять, что при каждом столкновении с ионом электрон утрачивает свое упорядоченное движение, т.е. его скорость упорядоченного движения  $\vec{u}$  обращается в нуль. Предположим для начала, что время свободного пробега между двумя последовательными столкновениями  $\tau$  одно и тоже для всех электронов и для всех столкновений, а электрическое поле квазипостоянно:

$$\left| \tau \frac{d\vec{E}}{dt} \right| \ll |\vec{E}|. \quad (22.14)$$

Претерпев столкновение, электрон начинает двигаться с постоянным ускорением  $\vec{w} = -e\vec{E}/m$ . К следующему столкновению он приходит с упорядоченной скоростью  $\vec{u} = \vec{w}\tau$ , так что его средняя скорость между двумя последовательными столкновениями будет  $\langle \vec{u} \rangle = \vec{w}\tau/2$ , а плотность тока

$$\vec{j} = -en\langle \vec{u} \rangle = \frac{ne^2\tau}{2m}\vec{E}. \quad (22.15)$$

В этих упрощающих предположениях  $\tau_{\text{ин}} = \tau/2$ . В общем случае вместо времени  $\tau$  необходимо использовать в расчетах среднее значение времени между соударениями, при этом получим

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{ne^2\langle \tau \rangle}{2m} = \frac{ne^2\langle l \rangle}{2m\langle v \rangle}, \quad (22.16)$$

где  $\langle l \rangle$  — средняя длина свободного пробега электрона.

Полупроводниковые материалы (кремний, германий) занимают по электрической проводимости промежуточное положение между металлами и диэлектриками, а по своему строению относятся к ковалентным кристаллам. Ковалентная связь частиц, находящихся в узлах кристаллической решетки, образуется, когда так называемые валентные электроны, находящиеся на внешних электронных оболочках вступающих в связь атомов, обобществляются несколькими атомами. Некоторые из валентных электронов в силу своего теплового движения могут переходить в свободное состояние в пределах кристалла, т.е. становиться носителями тока. Незаполненное состояние валентных электронов (или вакансия), образующееся при этом, называется *дыркой*. В присутствии внешнего электрического поля ближайший к дырке валентный электрон попадает в нее, оставляя при этом новую дырку, которую заполнит следующий соседний электрон, и т.д. Таким образом, дырка будет перемещаться в направлении, противоположном направлению движения электронов, и вести себя как носитель положительного заряда. При наличии примесей концентрации свободных электронов (электронов проводимости) и дырок могут не совпадать.

Полупроводники бывают двух типов: с преобладающей концентрацией электронов проводимости или дырок и, соответственно, называются *полупроводниками* *n*- или *p*-типа. Различия в концентрации носителей при контакте двух полупроводников различающихся типов вызывают перемещение электронов из объема полупроводника *n*-типа в объем полупроводника *p*-типа, а дырок — в обратном направлении. При этом возникает пограничный слой, называемый *p-n-переходом*. В пограничном слое возникает разность потенциалов, препятствующая дальнейшему перемещению электронов и дырок, т.е. возникает потенциальный барьер и таким образом устанавливается равновесие. При включении внешнего источника напряжения это равновесие нарушается. При обратном включении (рис. 22.1, *a*) электроны и дырки движутся в противоположных направлениях, стремясь покинуть пограничный слой, *p-n*-переход оказывается обеднен носителями тока, его сопротивление велико, а протекающий ток незначителен. При прямом включении (рис. 22.1, *б*) электроны и дырки движутся навстречу друг другу, число носителей в пограничном слое увеличивается, его сопротивление незначительно и велик проходящий через него ток.

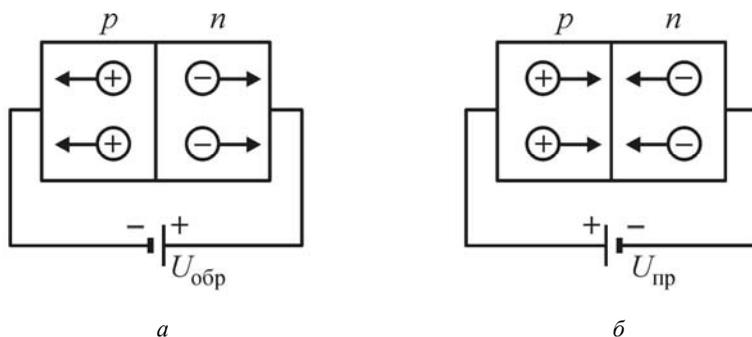


Рис. 22.1. Обратное (*a*) и прямое (*б*) подключение внешнего напряжения к *p-n*-переходу

Таким образом, *p-n*-переход представляет собой вентиль, пропускающий ток в одном направлении. Ток, протекающий через *p-n*-переход, под действием приложенного напряжения может быть описан следующим образом

$$I = I_0 \cdot (e^{eU/kT} - 1), \quad (22.17)$$

где  $I_0$  — максимальный ток, создаваемый носителями обоих знаков при обратном напряжении (рис. 22.2).

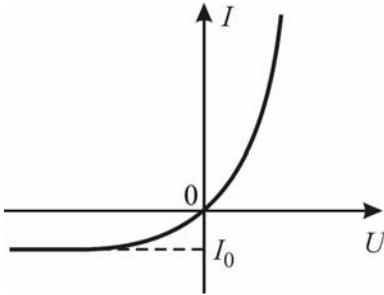


Рис. 22.2. Типовая вольт-амперная характеристика  $p$ - $n$ -перехода:  $U > 0, I > 0$  — область прямого включения;  $U < 0, I < 0$  — область обратного включения

Приборы, действие которых основано на использовании свойств полупроводников, называются *полупроводниковыми* (рис. 22.3).

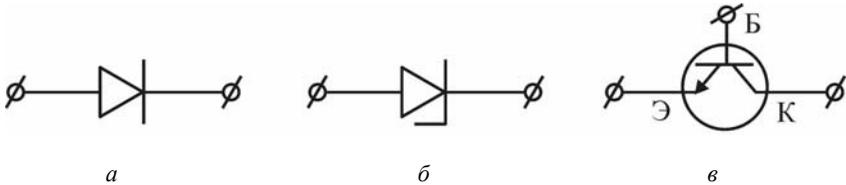


Рис. 22.3. Условные обозначения полупроводниковых приборов:  
*a* — диод, *б* — стабилитрон, *в* — транзистор  $n$ - $p$ - $n$  типа  
 (Э — эмиттер, Б — база, К — коллектор)

*Диод* — двухэлектродный прибор, принцип действия которого основан на использовании свойств пограничного слоя между частями монокристалла полупроводника с проводимостями  $p$ - или  $n$ -типа. Предназначен для выпрямления переменного тока. Типовая вольт-амперная характеристика полупроводникового диода представлена на рис. 22.2. *Стабилитрон (опорный диод)* — прибор, принцип действия которого основан на использовании явления лавинного пробоя, возникающего при включении обратного напряжения и заключающегося в быстром росте концентрации носителей тока при достижении критической напряженности электриче-

ского поля. Стабилитрон обеспечивает постоянное напряжение (напряжение стабилизации) независимо от проходящего через него тока. Типовая вольт-амперная характеристика стабилитрона представлена на рис. 22.4. *Транзистор* — полупроводниковый трехэлектродный прибор, предназначенный для усиления, генерирования или преобразования электрических сигналов. Он представляет собой кристалл со структурой *p-n-p* (рис. 22.5) или *n-p-n* типа.

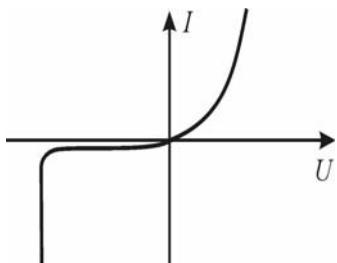


Рис. 22.4. Типовая вольт-амперная характеристика стабилитрона

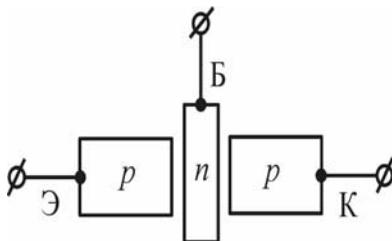


Рис. 22.5. Структура транзистора *p-n-p* типа: Э — эмиттер, Б — база, К — коллектор

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка состоит из генератора переменного напряжения, платы модуля МО1, содержащей исследуемые элементы, и осциллографа.

**Внимание!** В используемой схеме включения общий провод генератора не должен быть соединен с общим проводом модуля («землей»).

## ЗАДАНИЕ 1

1. С помощью проводов со штекерами собрать на плате модуля схему согласно рис. 22.6. Исследуемый элемент — резистор номинальным сопротивлением  $R_n$  Ом из «магазина» сопротивлений на плате модуля. Резистор  $R_0$  — датчик тока, обеспечивающий сигнал, пропорциональный току в исследуемом элементе. Кроме того, резистор  $R_0$  защищает исследуемый элемент от перегрузок, поэто-

му его сопротивление в заданиях 1 и 2 должно составлять не менее 10 Ом. В задании 1 рекомендуется выбрать  $R_0 = 30$  Ом. На выходе генератора установить синусоидальное или пилообразное напряжение частотой  $100 \div 300$  Гц и амплитудой  $U_m = 1$  В. Подать сигналы на  $X$  и  $Y$  входы осциллографа. Регулятор развертки осциллографа установить в положение  $X—Y$ . Переключатели режима регистрации установить в положение «DC» для обоих входов осциллографа.

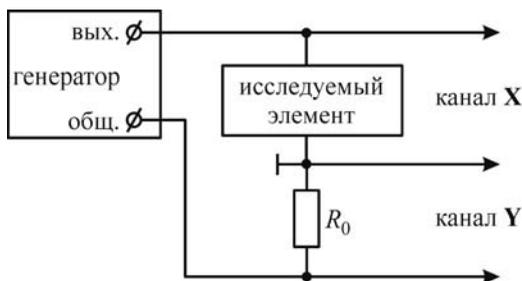


Рис. 22.6. Схема регистрации вольт-амперных характеристик резистора и лампы накаливания

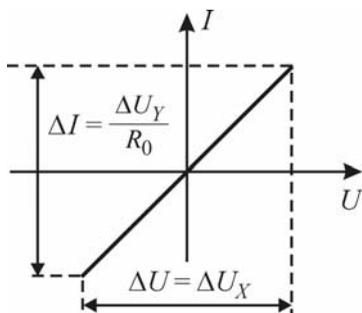


Рис. 22.7. Вольт-амперная характеристика резистора и лампы накаливания

2. Наблюдать вольт-амперную характеристику исследуемого элемента (рис. 22.7). Переключением ручки регулятора чувствительности каждого из каналов регистрации ( $V/div$  или  $mV/div$ ) добиться максимально возможного в пределах измерительной сетки размаха луча на экране осциллографа как по горизонтали, так и по вертикали. Ручки регуляторов калибровки чувствительности должны быть повернуты по часовой стрелке до упора.

3. Зарисовать наблюдаемую осциллограмму в лабораторном журнале. Указать чувствительность каждого канала регистрации.

4. Измерить размах сигнала в каждом из каналов регистрации ( $\Delta U_X$  и  $\Delta U_Y$ ) в делениях шкалы и вольтах.

5. Рассчитать сопротивление резистора на основе выполненных измерений

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} = R_0 \cdot \frac{\Delta U_X}{\Delta U_Y}. \quad (22.18)$$

6. Оценить погрешность полученного значения сопротивления резистора. Принять погрешность осциллографа равной 5 %, погрешность значения  $R_0$  — 10 %.

## ЗАДАНИЕ 2

1. В схеме из предыдущего задания заменить резистор  $R_n = 100$  Ом на лампу накаливания (ЛН) в качестве исследуемого элемента. Установить  $R_0 = 100$  Ом и амплитуду сигнала на выходе генератора  $U_m = 1$  В.

2. Наблюдать вольт-амперную характеристику исследуемого элемента. Добиться максимально возможного размаха луча на экране осциллографа.

3. Зарисовать наблюдаемую осциллограмму в лабораторном журнале. Указать чувствительность каждого канала регистрации.

4. Измерить размах сигнала в каждом из каналов регистрации ( $\Delta U_X$  и  $\Delta U_Y$ ) в делениях шкалы и вольтах.

5. Рассчитать сопротивление холодной нити накала ЛН, используя формулу (22.18). Оценить погрешность.

6. Установить  $R_0 = 10$  Ом и, повышая амплитуду сигнала на выходе генератора до  $U_m = 4 \div 5$  В, добиться нагрева нити ЛН до красного каления.

7. Наблюдать вольт-амперную характеристику исследуемого элемента. Добиться максимального размаха луча на экране осциллографа.

8. Зарисовать наблюдаемую осциллограмму в лабораторном журнале. Указать чувствительность каждого из каналов.

9. Измерить размах сигнала в каждом из каналов в делениях шкалы и вольтах.

10. Рассчитать сопротивление горячей нити накаливания ЛН. Оценить погрешность.

11. Используя формулу (22.4) и принимая температуру холодной нити накала равной комнатной, рассчитать температуру горячей нити накала. Температурный коэффициент для вольфрама (материал нити накала)  $\alpha = (4,5 \pm 0,3) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

12. Используя соотношения (22.1), (22.2), (22.7), оценить величину дрейфовой скорости  $\langle u \rangle$  и средней скорости теплового движения  $\langle v \rangle$  свободных электронов в материале холодной и горячей нити накала ЛН. Диаметр нити принять  $D = 0,25 \text{ мм}$ , плотность и молярную массу вольфрама  $d = 19,3 \cdot 10 \text{ кг/м}^3$  и  $\mu = 184 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ , соответственно. Положить, что на каждый ион вольфрама приходится один свободный электрон, в этом случае концентрацию носителей тока можно оценить как

$$n = \frac{d \cdot N_A}{\mu}, \quad (22.19)$$

где  $N_A$  — число Авагадро.

13. Используя соотношение (5.11), оценить среднее время между последовательными соударениями свободного электрона с ионами в узлах кристаллической решетки  $\langle \tau \rangle$  и среднюю длину свободного пробега электрона в металле  $\langle l \rangle$ . Сравнить последнюю величину со средним расстоянием между ионами в кристаллической решетке  $\langle \lambda \rangle$

$$\langle \lambda \rangle \approx 1/\sqrt[3]{n}. \quad (22.20)$$

**Внимание!** Для последующих измерений  $R_0 \geq 300 \text{ Ом}$ .

### ЗАДАНИЕ 3

1. Установить в качестве исследуемого элемента кремниевый диод (КД) согласно рис. 22.8. Использовать один из диодов, входящих в состав мостовой схемы выпрямления на плате модуля МО1. Установить  $R_0 = 300 \div 1000 \text{ Ом}$  и  $U_m \leq 10 \text{ В}$ .

2. Наблюдать вольт-амперную характеристику исследуемого элемента. Добиться максимально возможного размаха луча на эк-

ране осциллографа. Зарисовать наблюдаемую осциллограмму в лабораторном журнале.

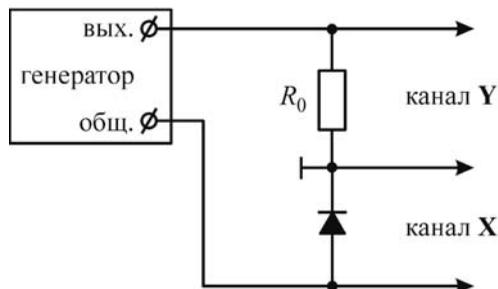


Рис. 22.8. Схема регистрации вольт-амперных характеристик: кремниевого диода,  $p$ - $n$ -переходов транзистора, германиевого диода, стабилитрона

3. Выставить амплитуду сигнала на выходе генератора равной нулю. Ручками «**POSITION**» и «**▲**» переместить луч в нижний левый угол измерительной сетки на экране осциллографа, задав таким образом начало отсчета для измерения величины сигнала в каналах регистрации X и Y. Подать напряжение на выход генератора. Наблюдать на экране осциллографа ветвь вольт-амперной характеристики, соответствующую прямому току и напряжению.

4. Регулируя амплитуду сигнала на выходе генератора и чувствительность каждого из каналов регистрации добиться максимального размаха луча. При этом максимальная величина прямого тока через диод должна составлять **не менее 10 мА**.

5. Зафиксировать в лабораторном журнале чувствительность каждого из каналов регистрации. Измерить и занести в таблицу координаты  $6 \div 8$  точек на осциллограмме по измерительной сетке:

№ п/п	$U_{пр}$		$I_{пр}$	
	дел.	В	дел.	мА

6. Установить в качестве исследуемого элемента  $p$ - $n$ -переход между эмиттером и базой транзистора (КТ). Выполнить исследования вольт-амперной характеристики перехода согласно пп. 1÷5 настоящего задания.

7. Установить в качестве исследуемого элемента  $p$ - $n$ -переход между коллектором и базой транзистора. Выполнить исследования вольт-амперной характеристики перехода согласно пп. 1÷5 настоящего задания.

8. Построить графики вольт-амперных характеристик кремниевого диода,  $p$ - $n$ -перехода между эмиттером и базой транзистора,  $p$ - $n$ -перехода между коллектором и базой транзистора на основе проделанных измерений. Указать на каждом их графиков напряжение открывания, соответствующее прямому току  $I_{пр} = 10$  мА. Оценить погрешность.

#### ЗАДАНИЕ 4

1. Установить в качестве исследуемого элемента германиевый диод (ГД). Установить  $R_0 = 300$  Ом и  $U_m \approx 1$  В. Выполнить пп. 2 и 3 из задания 3.

2. Регулируя амплитуду сигнала на выходе генератора и чувствительность каждого из каналов регистрации добиться максимального размаха луча.

3. Зафиксировать в лабораторном журнале чувствительность каждого из каналов регистрации. Измерить и занести в таблицу координаты 6÷8 точек на осциллограмме по измерительной сетке. Минимальный отсчет по оси  $Y$  должен быть не менее 0,5 дел.

4. По результатам проделанных измерений построить график зависимости  $\ln I_{пр}$  от  $U_{пр}$ . Согласно (22.17) при  $I_{пр} \gg I_0$

$$\ln I_{пр} = \frac{eU_{пр}}{kT} + \text{const} , \quad (22.21)$$

т.е. зависимость  $\ln I_{пр}$  от  $U_{пр}$  носит линейный характер (график — прямая линия), а угловой коэффициент этой прямой определяется коэффициентом  $e/kT$ .

5. Вычислить по угловому коэффициенту графика эффективную температуру носителей заряда в  $p$ - $n$ -переходе диода

$$T = \frac{e}{k} \cdot \frac{\Delta U_{\text{пр}}}{\Delta(\ln I_{\text{пр}})}, \quad (22.22)$$

где  $\Delta U_{\text{пр}}$  — интервал значений напряжения на диоде;  $\Delta(\ln I_{\text{пр}})$  — соответствующий  $\Delta U_{\text{пр}}$  интервал значений  $\ln I_{\text{пр}}$ . Оценить погрешность полученного результата.

6. Используя полученное значение эффективной температуры  $T$  и соотношение (22.17), вычислить максимальный ток  $I_0$  при обратном напряжении. Оценить погрешность.

7. Используя известные значения параметров  $T$  и  $I_0$ , а также соотношения (22.6), (22.17), построить график зависимости  $\lg R_D$  от  $U$ , где  $R_D$  — сопротивление  $p$ - $n$ -перехода диода;  $U$  — напряжение, прикладываемое к диоду при прямом и обратном включении. Интервал значений напряжения взять равным  $-U_{\text{пр}}^{\max} \leq U \leq +U_{\text{пр}}^{\max}$ , где  $U_{\text{пр}}^{\max}$  — максимальная величина измеренного в п. 3 настоящего задания напряжения на диоде.

## ЗАДАНИЕ 5

1. Установить в качестве исследуемого элемента кремниевый стабилитрон (КС). Установить  $R_0 = 300$  Ом и  $U_m \approx 2$  В.

2. Наблюдать вольт-амперную характеристику исследуемого элемента. Добиться максимально возможного размаха луча на экране осциллографа. Зафиксировать наблюдаемую осциллограмму в лабораторном журнале.

3. Выставить амплитуду сигнала на выходе генератора равной нулю. Ручками горизонтальной и вертикальной настройки переместить луч в нижний левый угол измерительной сетки. Подать напряжение на выход генератора. Наблюдать на экране осциллографа ветвь вольт-амперной характеристики, соответствующую прямому току и напряжению. Добиться максимального размаха луча. Зафиксировать в лабораторном журнале чувствительность каждого из каналов регистрации.

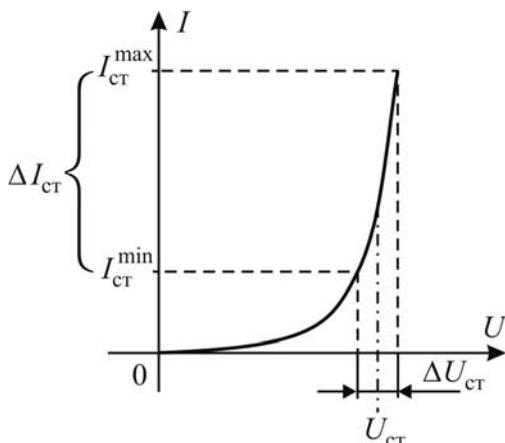


Рис. 22.9. Основные параметры вольт-амперной характеристики стабилизатора при прямом включении

4. Измерить и занести в таблицу основные параметры стабилизатора при прямом включении (рис. 22.9):

- 1) область стабилизации — рабочий участок вольт-амперной характеристики, на котором большому изменению тока стабилизации  $\Delta I_{ст}$  соответствует малое изменение напряжения стабилизации  $\Delta U_{ст}$ ;
- 2) напряжение стабилизации  $U_{ст}$ ;
- 3) минимальный  $I_{ст}^{min}$  и максимальный  $I_{ст}^{max}$  токи стабилизации.

$U_{ст}$		$\Delta U_{ст}$		$I_{ст}^{min}$		$I_{ст}^{max}$		$\Delta I_{ст}$	
дел.	В	дел.	В	дел.	мА	дел.	мА	дел.	мА

5. Выставить амплитуду сигнала на выходе генератора равной нулю. Ручками горизонтальной и вертикальной настройки переместить луч в верхний правый угол измерительной сетки. Подать напряжение на выход генератора. Наблюдать ветвь вольт-амперной характеристики, соответствующую обратному току и напряжению. Добиться максимального размаха луча. Зафиксировать в лабораторном журнале чувствительность каждого из каналов регистрации.

6. Измерить и занести в таблицу основные параметры стабилизатора при обратном включении (рис. 22.10).

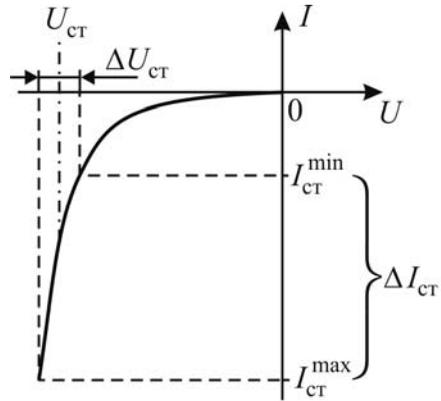


Рис. 22.10. Основные параметры вольт-амперной характеристики стабилитрона при обратном включении

7. Вычислить дифференциальное сопротивление стабилитрона при прямом и обратном включении

$$r_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{\Delta I_{\text{ст}}}. \quad (22.23)$$

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое электрический ток?
2. Что представляют собой носителя тока в металлах?
3. Как можно охарактеризовать движение свободных электронов в металлах?
4. Как записывается закон Ома в дифференциальной и интегральной формах?
5. Какова зависимость удельного сопротивления металла от температуры в ограниченном интервале температур?
6. Как выглядит уравнение 2-го закона Ньютона, описывающее усредненное движение свободного электрона в металле?
7. Что представляют собой носители тока в полупроводниках?
8. Какие процессы идут в  $p$ - $n$ -переходе при прямом и обратном включениях?
9. Изобразите типовые вольт-амперные характеристики полупроводникового диода, стабилитрона.
10. Как аналитически выражается зависимость тока, протекающего через  $p$ - $n$ -переход, от приложенного напряжения?

## 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.

### 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 (рис. 23.1). 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.

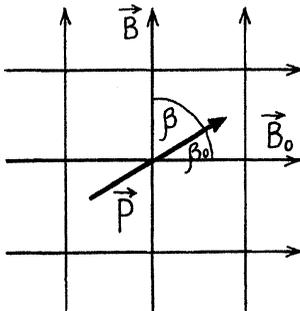


Рис. 23.1. Принцип действия тангенс-буссоли

Пусть  $\vec{B}$  — магнитная индукция, направление которой известно, а величина подлежит определению;  $\vec{B}_0$  — магнитная индукция, направление и величина которой известны, тогда из условия равновесия  $\vec{N} + \vec{N}_0 = 0$  следует  $pB \sin \beta = pB_0 \sin \beta_0$  и  $B = B_0 \sin \beta_0 / \sin \beta$ . При измерениях плоскость катушки тангенс-буссоли **в отсутствии электрического тока** ставится параллельно стрелке компаса и при включении тока магнитное поле  $\vec{B}_0$  катушки оказывается перпендикулярным  $\vec{B}$ , тогда  $B$  будет равно  $B_0 \operatorname{tg} \beta_0$  или  $B_0 \operatorname{ctg} \beta$ . Если силу тока в катушке подобрать такой, чтобы стрелка отклонилась на угол  $\beta = \pi/4 = \beta_0$ , то получится простая формула для расчета  $\vec{B}$ :

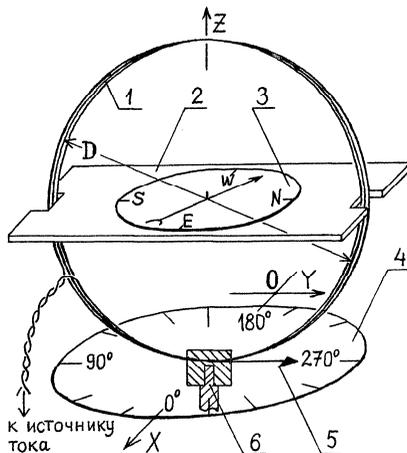
$$B = B_0 = \mu_0 N \cdot I / D = K \cdot I, \quad (23.1)$$

в которой  $B_0$  — магнитная индукция в центре кольцевой катушки из  $N$  витков диаметром  $D$  с током  $I$  такой силы, что  $\beta = \beta_0 = \pi/4$ ,  $K$  — коэффициент пропорциональности между  $B$  и  $I$ , равный  $\mu_0 N / D$  (см. Савельев И.В. Курс общей физики. Кн. 2. Электричество и магнетизм. — М., 2004. — §§ 6.8, 6.9).

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка представляет собой электротехнический конструктор, в котором имеются все необходимые для работы детали. Конструкция тангенс-буссоли показана на рис. 23.2.

Рис. 23.2. Принципиальная схема устройства тангенс-буссоли



Катушка  $1$  имеет  $N = 400$  витков медного провода с общим сопротивлением  $R_0 = 18$  Ом. Средний диаметр витков  $D = 76$  мм.

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 нем плавают небольшой пузырек воздуха, который дает 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  $x_6 = +27,5$  см.

Схема подключения прибора к источнику тока показана на рис. 23.3.

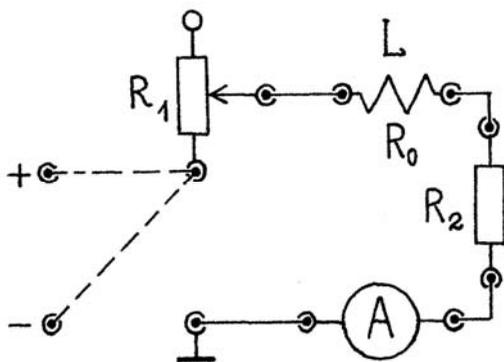


Рис. 23.3. Принципиальная электрическая схема подключения тангенс-буссоли к источнику тока

Кольцевая катушка  $L$  (рис. 23.2 позиция  $1$ ) подключается к клеммам «+» или «-» и «земля» источника тока через переменный резистор (реостат)  $R_1$ , который служит для плавного изменения силы то-

ка в катушке, резистор  $R_2$ , ограничивающий ток в цепи (его сопротивление не меньше сопротивления катушки  $R_0$  плюс остаточное сопротивление реостата) и амперметр А. В качестве амперметра используется мультиметр М830В в режиме измерения тока в четырех диапазонах: до 2000 мкА с абсолютной приборной погрешностью  $(2 + I/100)$  мкА, до 20 мА с погрешностью  $(0,02 + I/100)$  мА, до 200 мА с погрешностью  $(0,2 + 1,2I/100)$  мА и до 10 А с погрешностью  $(0,02 + 2I/100)$  А. Все эти диапазоны могут понадобиться в работе. На схеме контактные гнезда показаны кружочками «○», соединительные провода — отрезками «•—•», пунктиром показан один и тот же провод, с помощью которого можно изменять направление тока в катушке. Источник тока снабжен выключателем (на схеме не показан), ЭДС источника между клеммами «+» или «-» и «земля»  $\approx 9$  В, а между клеммами «+» и «-»  $\approx 18$  В.

После того, как тангенс-буссоль установлена на свое место и подключена к источнику тока, прибор готов к измерениям. В этой работе измеряется геомагнитное поле, поле постоянного магнита и поле на оси катушки с током.

## ЗАДАНИЯ

При подготовке к работе 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.

### 1. Измерение горизонтальной составляющей индукции геомагнитного поля.

1.1. Руководствуясь рис. 23.2, собрать тангенс-буссоль и поставить ее на штырь б.

1.2. По рис. 23.3 собрать схему питания катушки  $L$  и подключить ее к источнику тока, 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.

1.3. 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 отсчет угла  $\alpha_{\oplus}$  по лимбу 4 и запишите его в таблицу, приведенную в п. 1.4, с погрешностью: этот угол задает направление индукции геомагнитного поля  $\vec{B}_{\oplus}$  в лабораторной системе координат (символ « $\oplus$ » общепринят в астрономии для обозначения нашей планеты).

1.4. Присоедините провод от реостата к клемме «+» источника тока. 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 ее положения при отсутствии тока в катушке. Запишите в таблицу соответствующее значение силы тока  $I_+$  без знака:

$K =$  мкТл/мА  $\alpha_{\oplus} =$

Ток в буссоли, мА		Магнитная индукция, мкТл			
$I_+$	$I_-$	$B_+$	$B_-$	$B_{\oplus}$	$\Delta B_{\oplus}$

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.

По формуле (23.1) вычислите  $B_+$  и  $B_-$  и их полусумму запишите как  $B_{\oplus}$ . Используя модуль полуразности, приборную погрешность силы тока и относительную погрешность индукции из-за отсчета угла по лимбу компаса  $\approx 7\%$ , найдите  $\Delta B_{\oplus}$ .

В заключении к работе сравните  $B_{\oplus}$  с табличным значением для Москвы.

**2. Измерение поля постоянного магнита.** Основная цель этого задания — не измерение магнитного поля самого по себе, а уста-

новление на его основе параметров магнита: дипольного момента  $\vec{p}$ , намагниченности  $\vec{J}$  и тока намагничивания  $I'$  (см. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. — М., 2004. — §§ 7.1, 7.2). Постоянный магнит представляет собой кольцо из магнитно-жесткого 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 объемом  $V = (22,4 \pm 0,2)$  см<sup>3</sup>.

Магнитный дипольный момент такого магнита  $\vec{p} = \vec{J}V$ . Магнитное поле, которое он создает на расстояниях  $r \gg d_1, d_2, h$ , является полем магнитного диполя:

$$\vec{B} = (\mu_0/4\pi) [3(\vec{p} \vec{r}) \vec{r} - \vec{p} \vec{r}^2]/r^5,$$

где  $\vec{r}$  — радиус-вектор точки относительно центра магнита, в которой индукция равна  $\vec{B}$ . Из общей формулы следуют два частных случая, используемые в этом задании для определения  $\vec{p}$ :

поле на оси диполя

$$\vec{B} = (\mu_0/4\pi) \cdot 2 \vec{p} / r^3, \quad (23.2)$$

поле в точках плоскости, перпендикулярной оси и проходящей через центр диполя,

$$\vec{B} = -(\mu_0/4\pi) \vec{p} / r^3. \quad (23.3)$$

В заданиях 2 и 3 необходимо учитывать влияние геомагнитного поля на результаты измерений. Рис. 23.4 поясняет возможные способы такого учета: «исключение» путем дополнительных измерений и «вычитание» по теореме косинусов.

В задании 2 используется способ «исключения»:  $\vec{B} = (\vec{B}_1 - \vec{B}_2)/2$ . 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 расчетная формула несколько изменяется:

$$B_M = |B_1 \sin \alpha_1 - B_2 \sin \alpha_2|/2. \quad (23.5)$$

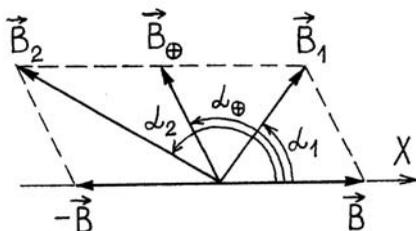


Рис. 23.4. Учет магнитного поля Земли при измерении полей других источников

Измерения п. 2 полностью повторяют измерения в п. 1, другим может оказаться только подходящий диапазон для силы тока.

2.1. 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 таблицу:

$p \parallel X$		Ток в bussоли, мА		Магнитная индукция, мкТл			
$i$	$\alpha_i$	$I_+$	$I_-$	$B_+$	$B_-$	$B_i$	$\Delta B_i$
1							
2							

$r_m =$  см       $B_m =$  мкТл       $p =$  А·м<sup>2</sup>

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.

2.3. Магнит повернуть так, чтобы его ось стала параллельна оси  $Y$  и проделать необходимые измерения, как в пп. 2.1, 2.2. Результаты внести в такую же таблицу, которую в лабораторной тетради можно просто присоединить к таблице, приведенной в п. 2.1, написав 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 двух значений, полученных в пп. 2.2, 2.3 и оценить погрешность. Определить намагниченность  $J$ , поверхностный ток намагничивания  $I' = Jh$  и магнитную индукцию  $\vec{B}_{м,0}$  в центре постоянного магнита.

**3. Измерение магнитного поля на оси кольцевой катушки с током.** Магнитная индукция на оси кругового тока определяется выражением  $B = B_0/(1 + 4r^2/D^2)^{3/2}$ , в котором  $B_0$  — поле в центре окружности,  $r$  — расстояние от центра до точки на оси, в которой индукция равна  $B$ . Для целей этого задания  $B(r)$  удобно преобразовать в прямую пропорциональную зависимость  $\eta = \ln(B_0/B)$  от  $\xi = \ln(1 + 4r^2/D^2)$  с угловым коэффициентом  $3/2$ .

На лабораторной установке имеются две одинаковые катушки: одна занята в тангенс-буссоли, а вторая в этом задании. Учет геомагнитного поля в этом задании производится способом «вычитания» (см. рис. 23.4):  $\vec{B} = \vec{B}_1 - \vec{B}_\oplus$  или

$$B_k = [B_1^2 - 2B_1B_\oplus \cos(\alpha_\oplus - \alpha_1) + B_\oplus^2]^{1/2}. \quad (23.6)$$

3.1. Удалить постоянные магниты на 2 м от установки и положить их плашмя. Свободную катушку и мультиметр соединить последовательно и подключить их к клеммам «+» и «земля» источника тока. Перевести мультиметр в режим измерения тока до 10 А, так как ожидается  $\approx 0,5$  А и включить источник тока. Измерить ток  $I_0$  в катушке и записать его в таблицу с приборной погрешностью:

$D =$ мм		$I_0 =$ А		$B_0 =$ мкТл			
$x_B =$ см	см	Ток в буссоли, мА		Магнитная индукция, мкТл			
$x_k, \text{ см}$	$\alpha_i$	$I_+$	$I_-$	$B_+$	$B_-$	$B_i$	$\Delta B_i$

Выключить источник тока и мультиметр: дело в том, что при токе  $\approx 0,5$  А катушка заметно нагревается, поэтому источник тока в этом задании следует включать только на время измерения. Вычислить  $B_0$  с погрешностью и тоже внести в таблицу.

3.2. Мультиметр вернуть в схему питания буссоли, а катушку оставить подключенной к источнику непосредственно, так что катушка и буссоль будут подключены к источнику тока параллельно. Катушку поставить на ось  $X$  на координату 17,5 см, так чтобы ее

контактные гнезда были обращены к оси  $Y$ . Теперь все готово к измерению магнитной индукции катушки.

3.3. Меняя координату  $x_k$  катушки от 17,5 до 2,5 см с шагом 3 см, измерить магнитную индукцию в шести точках и записать результаты в таблицу, приведенную п. 3.1.

Таблицу переработать в таблицу, которая приведена ниже. Для расчета поля катушки  $B_k$  воспользоваться величинами  $B_\oplus$  и  $\alpha_\oplus$  из первого задания и формулой (23.6).

$r_k$ , см	$\xi$	$B_k$ , мкТл	$\Delta B_k$ , мкТл	$\eta$	$\Delta\eta$

На координатную плоскость ( $\xi$ ;  $\eta$ ) нанести экспериментальные точки; так как теоретически ожидается линейная зависимость  $\eta(\xi)$ , провести по ним наилучшую прямую и найти ее угловой коэффициент с погрешностью. В заключении к работе сравнить его с теоретическим значением.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое индукция магнитного поля по определению?
2. Зачем в первом и третьем заданиях удаленные постоянные магниты рекомендуется положить плашмя?
3. Как найден вклад 7 % в погрешность индукции (см. текст за таблицей, приведенной в п. 1.4)?
4. Что такое намагничённость по определению и как с нею связан ток намагничивания, т.е. откуда взялась формула для вычисления  $I'$ ?
5. Выведите формулы (23.2) и (23.3) из общего выражения для поля диполя.
6. Как вычислить  $B_{m,0}$  в центре постоянного магнита?
7. Почему в третьем задании ожидается ток в катушке  $\approx 0,5$  А?
8. При измерении магнитной индукции в этой работе присутствует систематическая ошибка. С чем она связана?

## Работа 24

# ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИНДУКЦИОННЫМ ДАТЧИКОМ

*Цель:* изучение методов создания магнитного поля и измерение индукции этого поля с помощью индукционного эталонного датчика.

## ВВЕДЕНИЕ

### Способы создания магнитного поля

**Поле прямого проводника с током.** Простейшим устройством, создающим магнитное поле, является проводник с током (рис. 24.1, *a*). 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;  $\mu_0$  — магнитная постоянная,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м. Поле проводника с током неоднородно.



Рис. 24.1. Индукция магнитного поля, создаваемого:  
*a* — прямым проводником с током; *б* — круговым проводником с током

**Поле кругового проводника с током.** Если проводник согнуть в кольцо радиусом  $r$  (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).

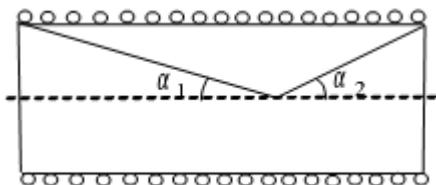


Рис. 24.2. Устройство соленоида

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  $B$  (см. 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 объема 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 охла-

ждения составляет сотни кубометров в секунду. Сверхпроводящие соленоиды обеспечивают получение полей с индукцией несколько десятков тесла.

### **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

$$\langle \varepsilon \rangle = - \frac{\Delta\Psi}{\Delta t} . \quad (24.5)$$

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 закончился. Тогда при  $t = t_1$  и при  $t = t_2$  имеет место  $i = 0$ , поэтому

$$\Delta\Psi = R\Delta Q.$$

Откуда

$$\Delta Q = \frac{\Delta\Psi}{R} = \frac{\Delta B \cdot S \cdot N}{R}.$$

Таким образом, при изменении индукции на величину  $\Delta B$  через измерительную катушку протечет заряд  $\Delta Q$  и ЭДС электромагнитной индукции

$$\varepsilon = NS \frac{dB}{dt}.$$

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 нее изменится так же, как при изменении тока от  $I$  до 0.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Назначение отдельных блоков и устройств приведено в разд. «Лабораторный комплекс ЛКЭ-1. Описание». Для измерения магнитного поля используется индукционный эталонный датчик. *Индукционный эталонный* (с заранее известными параметрами) *датчик магнитного поля* — катушка из  $N_0 = 250$  витков диаметром 18 мм (площадь витка  $S_0 = 2,5 \text{ см}^2$ ), закрепленная на кронштейне в стойке на рейтере, который может перемещаться по рельсу. Под рельсом закреплена линейка, по которой отсчитывается координата метки, нанесенной на рейтере. Датчик регистрирует составляющую

магнитного поля  $B$ , параллельную оси катушки. Схема регистрации магнитного поля индукционным методом приведена на рис. 24.3.

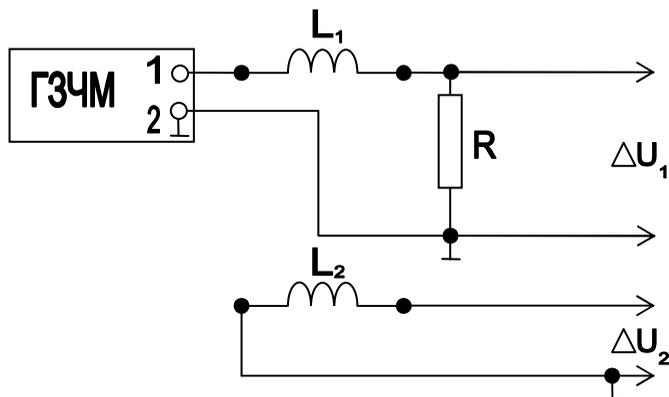


Рис. 24.3. Индукционный метод регистрации магнитного поля

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 осциллографа ЭО или на вольтметры.

Источником тока служит генератор импульсов ГЗЧМ. Измерения проводятся на синусоидальном сигнале генератора. Рабочие значения частоты генератора выбрать в диапазоне от 1 до 100 кГц.

В зависимости от измерительных приборов (ЭО или вольтметр) измеряют:

амплитуду сигнала  $\Delta U_1$  на экране ЭО от датчика тока или эффективное напряжение на датчике тока  $U_1$ ;

амплитуду сигнала  $\Delta U_2$  на экране ЭО от эталонного датчика (конструкция этого датчика не позволяет проводить измерения вольтметром).

Экспериментально амплитуда магнитной индукции определяется так:

$$B_m = \frac{\Delta U_2}{4\pi\nu NS} = \frac{U_2\sqrt{2}}{2\pi\nu NS}. \quad (24.7)$$

## ЗАДАНИЯ

**1. Подготовка установки к измерениям** (см. приложение на рабочем месте).

**2. Измерение индукции магнитного поля прямого тока.** Собрать схему в соответствии с рис. 24.3. В качестве  $L_1$  — контур «Прямой ток» с числом витков  $N_1 = 100$ . Установить заданное значение сопротивления  $R$  на блоке модулей «Электрические цепи» и рабочую частоту генератора ГЗЧМ. Эталонный датчик ориентировать на максимум ЭДС в этом и во всех следующих заданиях. Провести измерения: первое измерение — датчик придвинут вплотную к прямому току, в последующих — отодвигается от контура с шагом  $10 \div 20$  мм. Результаты измерений занести в таблицу:

Рабочие параметры:  $\nu =$  Гц,  $R =$  Ом

№ измерения	1	2	...	~ 20
$\Delta U_1$ , мВ				
$U_1$ , мВ				
Координата метки датчика $y$ , см				
Число делений, дел.				
Показание переключателя «VOLT/DIV», мВ/дел.				
$\Delta U_2$ , мВ				
$(B_m)_{\text{расч}}$ , мТл				
$(B_m)_{\text{эксп}}$ , мТл				

Вычислить значение магнитной индукции по формуле

$$B_m = \frac{\mu_0 N_1 \Delta U_1}{4\pi r R} = \frac{\mu_0 N_1 U_1 \sqrt{2}}{4\pi r R}. \quad (24.8)$$

Расчетное 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 контуром), построить график

зависимости  $1/B_m$  от расстояния  $r$ . Построить на одном рисунке экспериментальный и расчетный графики и сравнить угловые коэффициенты графиков.

**3. Измерение индукции магнитного поля длинного соленоида.** Собрать схему в соответствии с рис. 24.3, где  $L_1$  — два однослойных соленоида на стойках, соединенных последовательно. Установить заданное значение сопротивления  $R$  на блоке модулей «Электрические цепи» и рабочую частоту генератора ГЗЧМ. 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 спадание поля, это означает, что соленоиды включены встречно. Тогда нужно поменять местами подключение двух клемм одного из соленоидов. Индукция магнитного поля длинного соленоида рассчитывается по формуле:

$$B_m = \frac{\mu_0 N I_m}{l} = \frac{\mu_0 N \Delta U_1}{2l} = \frac{\mu_0 N U_1 \sqrt{2}}{l}, \quad (24.9)$$

где  $l$  — длина одного соленоида,  $l = 120$  мм;  $N$  — число витков в одном соленоиде.

При гармоническом сигнале частотой  $\nu$  напряжение  $U_2$  на индукционном датчике и напряжение на датчике тока  $R$  связаны соотношением:

$$U_2 = U_1 \frac{2\pi\nu\mu_0 N N_0 S_0}{lR}. \quad (24.10)$$

Значение параметров  $R$  и  $N$  указано на рабочем месте. 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 размаха сигнала  $\Delta U_2$  на экране ЭО для этой точки, перемещать катушку внутри соленоида с шагом в два сантиметра вплоть до достижения противоположного конца соленоида. Продолжить эти измерения вне соленоида, передвигая датчик вдоль всей длины рельса. Результаты занести в таблицу, аналогичную приведенной в задании 2. Построить график зависимости поля соленоида от расстояния от его торцов. Отразить в заключе-

нии влияние зазора в конструкции составного соленоида на однородность магнитного поля.

#### 4. Измерение индукции магнитного поля кольца с током.

Конструкция установки такова, что для измерения поля кольца необходимо ввести в зазор соленоида плоский индукционный датчик. На плате плоского индукционного датчика в виде колец различных диаметров намотано по десять витков тонкой проволоки. 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. Установить заданное значение сопротивления  $R$  на блоке модулей «Электрические цепи» и рабочую частоту на ГЗЧМ.

Индукция магнитного поля кольца с числом витков  $N$  и током  $I$  на его оси

$$B = \mu_0 \frac{NIr^2}{2(r^2 + y^2)^{3/2}} = \frac{B_0}{(1 + y^2 / r^2)^{3/2}}, \quad (24.11)$$

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:

$$B = \frac{U_2}{2\pi^2 \nu N_0 R^2}. \quad (24.12)$$

**4а. Поле на оси кольца.** Снять зависимость распределения поля кольца, перемещая эталонный датчик с шагом  $1 \div 2$  см по рельсу. Результаты измерений занести в таблицу, аналогичную приведенной в задании 2.

**4б. 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, потом — 2 и 3, затем — 3 и 4 и т.д.

**4в. Поле кольца в зависимости от числа витков.** Не меняя положения эталонного датчика, исследовать магнитное поле, изменяя число витков, включенных 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 для каждого пп. 4б и 4в занести в таблицу:

$$v = \text{Гц}, \quad R = \text{Ом}$$

№ измерения	1	2	...	9
№ клемм				
Параметр ( $r$ или $N$ )				
Показание переключателя «VOLT/DIV», мВ/дел.				
Число делений, дел.				
$\Delta U_2$ , мВ				
$B$ , мТл				

Полученные зависимости представить графически.

**5. Измерение индукции магнитного поля катушек Гельмгольца.** Две соосные катушки (число витков каждой катушки  $N = 400$ ), разнесенные на расстояние, равное их радиусу, создают почти однородное магнитное поле в области, сравнимой по размерам с радиусом катушек.

Собрать схему в соответствии с рис. 24.3, где  $L_1$  — две катушки Гельмгольца. Параметры катушек приведены в приложении на рабочем месте. Установить заданное значение сопротивления  $R$  на блоке модулей «Электрические цепи» и рабочую частоту на ГЗЧМ.

**5а. Поле пары катушек, соединенных последовательно.** Установить на длинном рельсе две катушки с расстоянием  $50 \div 60$  мм между метками их рейтеров и соединить их последовательно. Измерить эталонным датчиком распределение поля вдоль оси катушек с шагом 1 см. Аналогично провести измерения магнитного поля в пп. 5б и 5в.

**5б. Поле пары катушек при их встречном включении.**

**5в. Поле одной катушки.** Результаты измерений и вычислений для каждого из пп. 5а, 5б и 5в занести в таблицу, аналогичную приведенной в задании 2. Зависимости  $B(y)$  представить графически.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое напряженность магнитного поля, индукция магнитного поля? В каких единицах они измеряются?
2. Чем определяется поле прямолинейного проводника с током, поле витка с током, поле соленоида?
3. Написать выражение для индукции магнитного поля в центре кольца с числом витков  $N$ .
4. Что такое поток магнитной индукции, потокоцепление?
5. В чем заключается индукционный метод измерения магнитного поля?
6. Показать, что электростатический вольтметр пригоден для измерения как постоянного, так и переменного напряжения.
7. Нарисовать силовые линии магнитного поля соленоида.

## Работа 25

# ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ ДАТЧИКА ХОЛЛА

---

*Цель:* калибровка датчика Холла, исследование магнитных полей постоянного магнита, катушки Гельмгольца и исследование неоднородности поля соленоида.

### ВВЕДЕНИЕ

Эффектом Холла называется возникновение поперечного электрического поля  $\vec{E}_H$  в проводнике, по которому течет ток плотности  $\vec{j}$ , при помещении его в магнитное поле  $\vec{B}$ . Напряженность возникающего электрического поля определяется выражением

$$\vec{E}_H = H [\vec{B}, \vec{j}], \quad (25.1)$$

где  $H$  — постоянная Холла.

Простейшая микроскопическая теория эффекта Холла основана на представлении о свободных носителях — электронах. При протекании тока через образец (рис. 25.1), помещенный в магнитное поле, электроны под действие силы Лоренца смещаются в направлении, перпендикулярном току и магнитной индукции, в результате чего на боковых поверхностях пластины образуется избыток зарядов и возникает поперечное электрическое поле. Измерение поперечной разности потенциалов  $U_H$  (см. рис. 25.1) и тока, протекающего через пластину, позволяет определить постоянную Холла  $H$ .

Если же постоянная Холла  $H$  известна, то эффект Холла используется для исследования магнитных полей. Прибор для измерения магнитной индукции (датчик Холла) представляет собой прямоугольную пластину (рис. 25.2 и 25.3) из проводящего мате-

риала с четырьмя контактами (два используются для создания тока, а остальные два для измерения поперечной разности потенциалов). Датчик Холла является знаочувствительным как по отношению к направлению магнитной индукции, так и по отношению к полярности управляющего тока. Измеряя поперечную разность потенциалов  $U_H$  и ток  $I$ , протекающий через пластину, и учитывая, что  $U_H = bE_H$ , а  $j = I / hb$ , в соответствии с выражением (25.1) находим магнитное поле, вызывающее появление данной разности потенциалов:

$$B = \frac{U_H h}{IH}, \quad (25.2)$$

где  $h$  — толщина пластины.

В данной работе при помощи датчика Холла проводятся исследования магнитного поля на оси постоянного магнита, имеющего форму кольца, и однородно намагниченного вдоль его оси, а также определения поля на оси катушки Гельмгольца и определения степени неоднородности магнитного поля на оси соленоида.

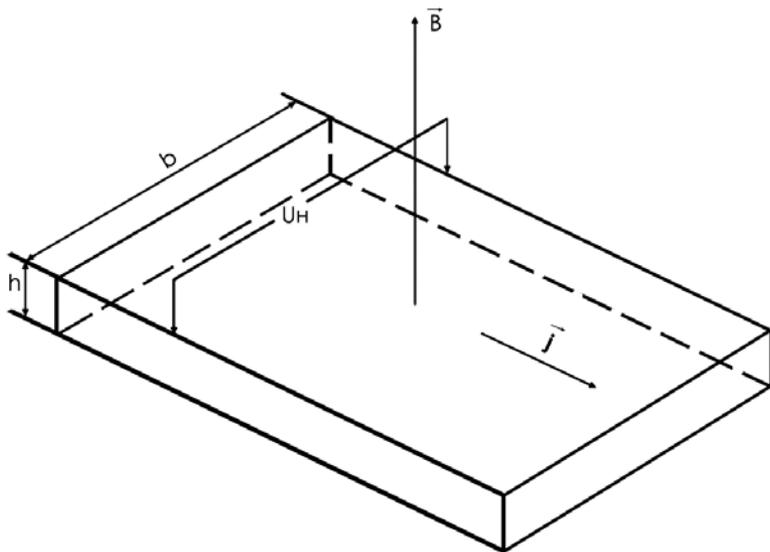


Рис. 25.1. Схема датчика Холла

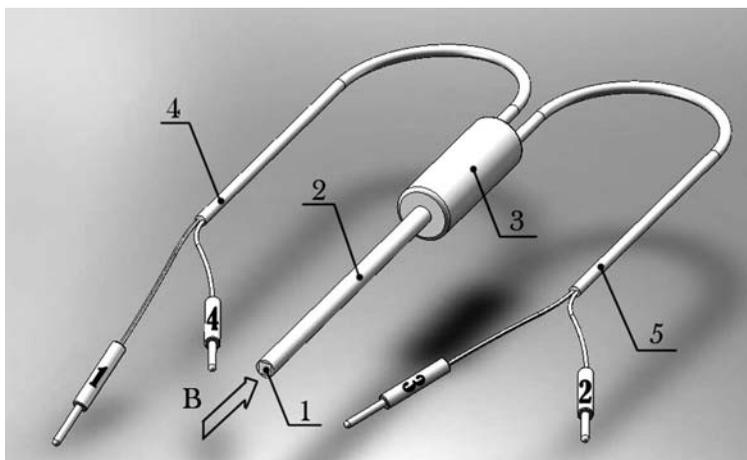


Рис. 25.2. Общий вид датчика Холла: 1 — чувствительный элемент; 2 — кронштейн; 3 — рукоятка; 4, 5 — выходы дву жильных кабелей

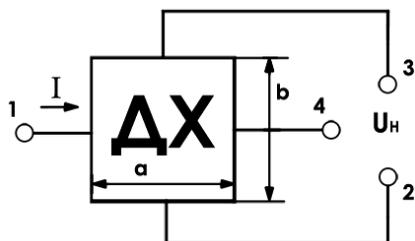


Рис. 25.3. Схема подключения датчика Холла

Поле магнита создается одинаковыми по модулю токами намагничивания, текущими по внутренней и внешней цилиндрическим поверхностям магнита в противоположных направлениях. Приближенно можно считать, что это поле эквивалентно полю, создаваемому двумя круговыми витками. Радиусы витков равны, соответственно, радиусам внутренней и внешней поверхностей магнита. С учетом сказанного зависимость индукции магнитного поля на оси магнита от расстояния до центра магнита определяется следующим выражением

$$B_x = \frac{\mu_0}{4\pi} 2\pi I \left\{ \frac{R_1^2}{(R_1^2 + x^2)^{3/2}} - \frac{R_2^2}{(R_2^2 + x^2)^{3/2}} \right\}, \quad (25.3)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  — радиусы внутренней и внешней поверхностей магнита. График данной зависимости приведен на рис. 25.4.

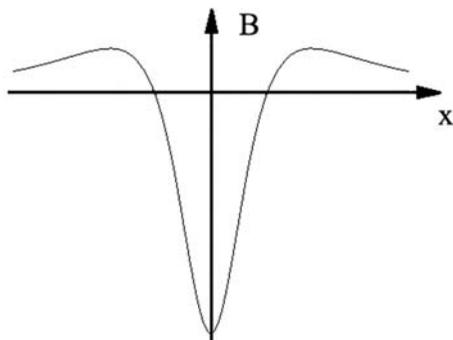


Рис. 25.4. Зависимость индукции магнитного поля на оси магнита от координаты

Из приведенной зависимости следует, что на оси магнита существуют две симметричные относительно центра магнита точки, в которых магнитная индукция обращается в нуль. Расстояние до этой точки от центра магнита можно вычислить как

$$l = \frac{\sqrt[3]{R_1^2 R_2^2}}{\sqrt{R_1^{2/3} + R_2^{2/3}}}. \quad (25.4)$$

Измерив зависимость индукции магнитного поля от координаты датчика Холла, или какой-либо метки связанной с датчиком, это расстояние можно найти как

$$l = \left| \frac{x_2 - x_1}{2} \right|, \quad (25.5)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  — координаты точек, в которых график пересекает горизонтальную ось.

С учетом краевых эффектов зависимость индукции магнитного поля на оси соленоида от расстояния  $x$  от его центра определяется выражением

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2l} \left\{ \frac{\frac{l}{2} - x}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{l}{2} - x\right)^2}} + \frac{\frac{l}{2} + x}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{l}{2} + x\right)^2}} \right\}, \quad (25.6)$$

где  $N$  — число витков соленоида;  $l$  и  $r$  — длина и радиус исследуемого соленоида, соответственно. Из приведенной зависимости легко можно получить отношение магнитной индукции в центре соленоида к магнитной индукции на границе соленоида

$$\frac{B(0)}{B(l/2)} = \frac{\sqrt{r^2 + l^2}}{\sqrt{r^2 + \frac{l^2}{4}}}. \quad (25.7)$$

Катушка Гельмгольца — две последовательно соединенные одинаковые катушки, диаметр которых много больше, чем их длина. Катушки устанавливаются так, что их оси лежат на одной прямой и на расстоянии, равном их радиусу. Поле на оси катушки Гельмгольца определяется суперпозицией полей создаваемых каждой катушкой и равно

$$B_x = \frac{\mu_0}{4\pi} 2\pi I \left\{ \frac{r^2}{(r^2 + x^2)^{3/2}} + \frac{r^2}{(r^2 + (x - r)^2)^{3/2}} \right\}, \quad (25.8)$$

где  $r$  — радиус используемых катушек, а координата  $x$  отсчитывается от центра левой катушки (ось  $x$  направлена справа налево). Поле в области между катушками является квазиоднородным.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В данной работе используется промышленный датчик Холла типа ДХК-0,5 (см. рис. 25.2 и 25.3), чувствительным элементом  $I$  которого является проводящая пленка ДХК, сформированная на поверхности кремниевого кристалла. Чувствительный элемент (собственно датчик Холла) укреплен на кронштейне 2 таким образом, чтобы фиксировать компоненту магнитного поля, параллельную оси кронштейна («продольный» датчик Холла). Кронштейн закреплен в рукоятке 3, в которую выведены два двужильных кабеля с нумерованными выводами 4 и 5.

Через контакты 1 и 4 через пленку пропускают ток, а контакты 2 и 3 предназначены для измерения поперечной разности потенциала Холла.

Размеры чувствительного элемента  $a = b = 0,5$  мм, толщина пленки  $h = 12$  мкм. Номинальный управляющий ток для датчика Холла составляет 3 мА. Входное сопротивление (сопротивление между выводами  $I$ ) от 1,8 до 3 кОм, а выходное сопротивление (сопротивление между выводами  $U_H$ ) — не более 3 кОм. Необходимо помнить, что датчик Холла ДХК-0.5 не является калиброванным, и его чувствительность меняется от образца к образцу.

Для измерения холловского напряжения и напряжения на датчике тока используются мультиметры М830В, а для измерения тока через датчик Холла — мультиметр VC-97. Приборные погрешности приведены в описании установки.

## ЗАДАНИЯ

**1. Градуировка продольного датчика Холла.** Основная цель данного задания состоит в калибровке датчика Холла, т.е. в определении его чувствительности к магнитному полю. Для калибровки используется длинный соленоид модуля М03, его длина составляет  $l = 160$  мм, а количество витков  $N = 1705$ .

1.1. Поместить датчик Холла в длинный соленоид модуля М03, подключить датчик Холла к источнику тока и измерительным приборам согласно схеме, приведенной на рис. 25.5. Один конец соленоида подключить к источнику тока +9 В через сопротивления

$R_2 = 1 \text{ Ом}, 3 \text{ Ом}, 10 \text{ Ом}$  или напрямую к источнику тока. Второй конец катушки подключается через датчик тока ( $R_3 = 1 \text{ Ом}$ ) к общему проводу модуля. Для измерения напряжений в работе используются два одинаковых мультиметра М830В на пределах 2000 и 20 мВ для измерения, соответственно, напряжения на датчике тока через соленоид и холловского напряжения.

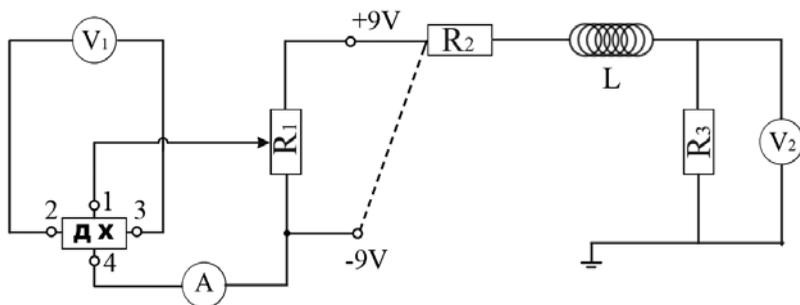


Рис. 25.5. Схема для выполнения задания по калибровке датчика Холла

1.2. С помощью потенциометра  $R_1 = 2,2 \text{ кОм}$  установить ток через датчик Холла 4,00 мА. Меняя ток через соленоид путем выбора различных сопротивлений  $R_2$ , измерить напряжение между контактами 2 и 3 датчика Холла. Результаты занести в таблицу:

$R_2$ , Ом							
$I_c$ , мА							
$U_H$ , мВ							
$B_c$ , мТл							

1.3. Подключить соленоид к источнику  $-9 \text{ В}$  и провести аналогичные измерения.

1.4. Воспользовавшись известной длиной соленоида и количеством его витков, рассчитать индукцию магнитного поля внутри соленоида.

1.5. Построить график зависимости индукции магнитного поля от напряжения на датчике Холла. На график нанести приборные погрешности  $\Delta B_c = B_c \delta I_c$  и  $\Delta U_H$ .

1.6. Методом парных точек найти угловой коэффициент  $K$  графика, определяющий чувствительность датчика Холла при данном рабочем токе. Определить погрешность чувствительности  $\Delta K$ , выбрав максимальную из приборной погрешности и погрешности разброса угловых коэффициентов.

1.7. Повторить пп. 1.2 — 1.6 для тока через датчик Холла равный 3,00 мА.

## 2. Исследование магнитного поля на оси постоянного магнита.

2.1. Закрепите датчик Холла в держателе и подключите его к источнику питания и измерительным приборам аналогично предыдущему заданию. Ток через датчик Холла установите равный 3,00 мА.

2.2. Магнит и держатель с датчиком Холла установите на длинном рельсе таким образом, чтобы расстояние между датчиком Холла и центром магнита составляло приблизительно 50 мм.

2.3. Перемещая держатель с датчиком Холла по рельсу, проведите измерения холловского напряжения в зависимости от координаты метки держателя. Провести не менее 20 измерений, меняя координату на 5 мм. Результаты занести в таблицу:

$x_d$ , мм							
$U_H$ , мВ							
$B$ , мТл							
$\Delta B$ , мТл							

2.4. Используя найденную в предыдущем задании чувствительность датчика Холла для используемого рабочего тока, найдите значения индукции магнитного поля на оси магнита. Погрешность индукции в этом случае  $\delta B = \sqrt{\delta U_H^2 + \delta K^2}$ . Найдите относительную и абсолютную погрешности магнитной индукции.

2.5. Постройте график зависимости магнитной индукции от координаты держателя. Вид графика сравните с теоретической зависимостью.

2.6. Вычислите расстояние от центра кольца до точки, в которой индукция обращается в нуль. Вычисления проведите двумя методами: по графику (25.5) и теоретически (25.4). Рассчитайте погрешности найденного расстояния, считая, что погрешность измерения координаты равна цене деления линейки, нанесенной на длинном рельсе, и сравните полученные результаты.

### 3. Исследование магнитного поля на оси катушки Гельмгольца.

3.1. Соберите схему, приведенную в задании 1, заменив соленоид катушкой Гельмгольца, подключая ее через сопротивление  $R_2 = 3$  Ом. Датчик тока и вольтметр  $V_2$  из схемы можно исключить. Катушка Гельмгольца собирается из двух одинаковых катушек со средним диаметром  $d = 76$  мм, последовательно подключенных к источнику +9 В и установленных на длинном рельсе на расстоянии равном их радиусу.

3.2. Закрепите датчик Холла в держателе, и поместите держатель на длинный рельс. Потенциометром установить ток через датчик 4,00 мА.

3.3. Перемещая держатель с датчиком Холла по рельсу, измерьте зависимость холловского напряжения от координаты чувствительного элемента датчика Холла. Измерения необходимо проводить каждые 5 мм от центра левой катушки до центра правой. Результаты занесите в таблицу, подготовленную самостоятельно по аналогии с таблицей, приведенной в задании 2.

3.4. Пользуясь чувствительностью, найденной в задании 1, найдите значения магнитной индукции на оси катушки Гельмгольца. Оцените погрешность.

3.5. Постройте график зависимости индукции магнитного поля от координаты чувствительного элемента датчика.

3.6. Вычислите степень неоднородности поля  $\chi = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max}}$ .

Убедитесь в том, что  $\chi \ll 1$ .

#### 4. Исследование неоднородности магнитного поля на оси соленоида.

4.1. Соберите схему, приведенную в задании 1, заменив длинный соленоид модуля М03 соленоидом на стойках и подключив его напрямую к источнику тока +9 В.

4.2. Закрепите датчик Холла в держателе, и поместите держатель на длинный рельс. Ток через датчик установите равным 3,00 мА.

4.3. Перемещая держатель с датчиком Холла по рельсу, измерьте зависимость холловского напряжения от координаты чувствительного элемента датчика Холла. Измерения проводить каждые 5 мм от границы соленоида до его центра. Результаты занести в таблицу, подготовленную самостоятельно по аналогии с таблицей, приведенной в задании 2.

4.4. Найдите значения магнитной индукции на оси соленоида. Оцените погрешность.

4.5. Вычислите отношение магнитной индукции в центре соленоида к индукции на его границе. Полученное значение сравните с теоретическим значением, рассчитанным по формуле (25.7).

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается эффект Холла?
2. Каким образом датчики Холла используются для определения индукции магнитного поля?
3. Во сколько раз индукция магнитного поля на границе соленоида меньше индукции в центре соленоида при выполнении условия  $r \ll l$ ?
4. Что такое катушка Гельмгольца? Как можно характеризовать поле на оси катушки Гельмгольца?
5. Какие особенности имеет зависимость индукции магнитного поля на оси магнита от координаты?

## Работа 26

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАГНЕТИКОВ

---

*Цель:* изучение методов определения магнитной проницаемости веществ в слабых магнитных полях.

### ВВЕДЕНИЕ

Всякое вещество способно намагничиваться под действием магнитного поля, т.е. является магнетиком.

Количественно интенсивность намагничивания вещества характеризуется объемной плотностью магнитного момента магнетика  $\vec{J}$ . Для изотропных магнетиков

$$\vec{J} = \chi \vec{H}, \quad (26.1)$$

где  $\chi$  — магнитная восприимчивость (безразмерная величина, зависящая от рода магнетика и его состояния).

При наличии магнетика напряженность магнитного поля

$$\vec{H} = \vec{B} / \mu_0 - \vec{J}, \quad (26.2)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная.

Подставив соотношение (26.1) в (26.2), получаем

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H},$$

где  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость вещества, или просто магнитная проницаемость, показывающая, во сколько раз магнитная индукция в магнетике больше, чем в вакууме ( $\mu = 1 + \chi$ ).

Магнитные свойства веществ определяются магнитными моментами элементарных частиц (электронов, протонов и нейтронов), входящих в состав каждого атома. Но в большинстве случаев тео-

рия 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  $\vec{J}$  направлен противоположно намагничивающему полю, в результате чего диамагнетики выталкиваются из области наибольшей напряженности. 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  $\vec{H}$  внешнего магнитного поля. Таким образом, порождаемое диамагнетиком поле направлено против внешнего поля и ослабляет его.

В соответствии с теорией, полностью подтвержденной экспериментальными исследованиями, магнитная восприимчивость диамагнетиков не зависит ни от температуры, ни от напряженности 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 напряженности. Магнитная проницаемость парамагнетиков  $\mu > 1$ , а магнитная восприимчивость  $\chi > 0$ , причем, 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:

$$\chi \approx 1/T.$$

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  $\mu = 10^2 \div 10^6$  (очевидно, что и  $\chi \gg 1$ ). Кроме того, они имеют ряд других характерных особенностей:

зависимость между индукцией  $\vec{B}$  и напряженностью магнитного поля  $\vec{H}$  имеет сложный нелинейный характер, в результате чего их магнитная проницаемость  $\mu$  существенно зависит от величины напряженности (см. работу 8), соответственно, магнитная восприимчивость ферромагнетиков также непостоянна и зависит от  $\vec{H}$ ;

величина индукции в ферромагнетиках существенно зависит от предыдущих состояний намагничивания — наблюдается своеобразное отставание изменения индукции  $\vec{B}$  от изменений напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  — так называемый гистерезис (см. работу 8);

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, магнитные проницаемость и восприимчивость падают при любом значении  $\vec{H}$  и при температуре, называемой температурой Кюри, ферромагнетики переходят в парамагнитное состояние).

Ответственными за магнитные свойства ферромагнетиков являются собственные магнитные моменты электронов. При определенных условиях в кристаллах возникают так называемые обменные силы (которые могут быть описаны только в рамках квантовой теории), в результате чего эти магнитные моменты стремятся сориентироваться 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 определенном направлении до насыщения, но направление этих моментов в соседних доменах различно и поэтому суммарный момент всего образца равен нулю. При появлении и увеличении напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  рост намагниченности ферромагнетика происходит сначала из-за обратимого смещения границ и поворотов граничных стенок. Дальнейшее увеличение  $\vec{H}$  приводит к необратимой, скачкообразной переориентации собственных магнитных моментов электронов в пределах энергетически невыгодных доменов (имеющих большой угол между вектором спон-

танной 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 подрешеток, которые спонтанно намагничены в противоположных направлениях с одинаковой интенсивностью. При этом суммарный магнитный момент равен нулю. Наложение внешнего поля  $\vec{H}$  приводит к небольшой намагниченности образцов, соответствующей крайне малой восприимчивости  $\chi > 0$ , т.е. антиферромагнетики ведут себя как очень слабые парамагнетики. При повышении температуры до так называемой температуры Нееля антиферромагнетики переходят в парамагнитное состояние.

К антиферромагнетикам относится ряд редкоземельных элементов и карбонаты таких металлов, как Fe и Ni.

*Ферриты* (или *ферримагнетики*) во внешнем магнитном поле ведут себя аналогично ферромагнетикам — в частности обладают спонтанной намагниченностью. Но в отличие от ферро-, ферримагнетики имеют чрезвычайно малую электропроводность, что позволяет широко использовать их в радиотехнике. При температуре выше температуры Нееля ферриты переходят в парамагнитное состояние.

У ферримагнетиков спонтанный магнитный момент, существующий в отсутствие внешнего магнитного поля, создается за счет того, что магнитные моменты вышеуказанных магнитных подрешеток кристаллов взаимно не скомпенсированы (нескомпенсированный антиферромагнетизм).

Ферриты представлены широким рядом соединений типа  $\text{MeO} \cdot \text{Fe}_2 \text{O}_3$ , где Me — один (или смесь) из двухвалентных катионов Mn, Co, Ni, Cu, Mg, Zn, Cd, Fe.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДОВ РАБОТЫ

В работе используется модуль М03 «Поле в веществе» блока «Поле в веществе» лабораторного комплекса ЛКЭ-1 (см. разд. «Лабораторный комплекс ЛКЭ-1. Описание»).

Определение магнитной проницаемости ферро- и ферримангнетиков в слабых магнитных полях (в отсутствие гистерезиса), а также слабомагнитных веществ, характеризующихся однозначной зависимостью намагниченности  $\vec{J}$  от напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ , может быть проведено одним из следующих методов:

индукционным;

индукционным дифференциальным;

генераторным.

**Индукционный метод.** Схема, используемая для реализации индукционного метода, представлена на рис. 26.1, где ГЗЧФ — генератор сигналов; L — соленоид модуля (параметры соленоида указаны в разд. «Лабораторный комплекс ЛКЭ-1. Описание»); Д1 — индукционный датчик магнитного поля (параметры датчика также указаны в разд. «Лабораторный комплекс ЛКЭ-1. Описание»); R1 — сопротивление (1,0 Ом) датчика тока, составляющее последовательную цепь с обмоткой соленоида; С — неполярный электролитический конденсатор емкостью 100 мкФ, подключенный на выходе генератора ГЗЧФ.

При протекании через обмотку длинного соленоида тока  $I_1$  внутри соленоида создается магнитное поле напряженностью

$$H = \frac{NI_1}{l} = \frac{NU_1}{lR},$$

где  $l$  — длина соленоида;  $N$  — число витков обмотки соленоида;  $U_1$  — напряжение на сопротивлении R1.

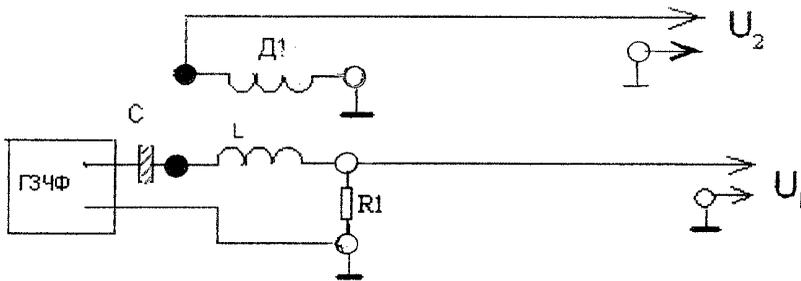


Рис. 26.1. Схема реализации индукционного метода

В отсутствие внутри соленоида магнетика размах напряжения (т.е. разность между максимальным и минимальным значениями) на выходе датчика равен

$$U_{20} = 8\mu_0 H_m \nu N_0 S_0,$$

где  $H_m$  — амплитуда напряженности;  $N_0$  — 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

$$\Delta\Phi_{\text{доп}} = \mu_0 J N_0 S,$$

где  $J$  — намагниченность образца,  $J = \chi H$ ;  $S$  — площадь поперечного сечения стержня (параметры образцов указаны в приложении на лабораторном столе).

Размах напряжения на датчике изменится при этом на величину

$$\Delta U = U_2 - U_{20} = 8\mu_0 J_m \nu N_0 S.$$

Измерив размах напряжений с образцом ( $U_2$ ) и без образца ( $U_{20}$ ), можно найти магнитную восприимчивость  $\chi$  и магнитную проницаемость  $\mu$  образца:

---

\* Стержень считается длинным, если  $l^2/S \geq \mu$ . 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.

$$\chi = \frac{J_m}{H_m} = \frac{U_2 - U_{20}}{U_{20}} \cdot \frac{S_0}{S}, \quad \mu = 1 + \chi. \quad (26.3)$$

**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.

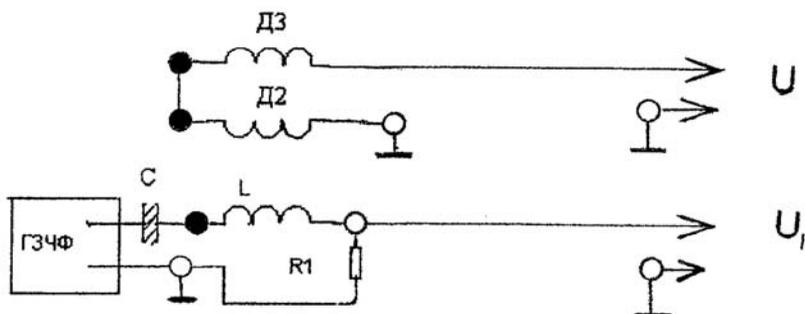


Рис. 26.2. Схема реализации индукционного дифференциального метода

Магнитная восприимчивость в этом случае рассчитывается по формуле:

$$X = \frac{J_m}{H_m} = \frac{|U_{\text{кон}} - U_{\text{нач}}|}{U_{20}} \cdot \frac{S_0}{S}, \quad \mu = 1 + \chi. \quad (26.4)$$

**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, 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 емкостью 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.

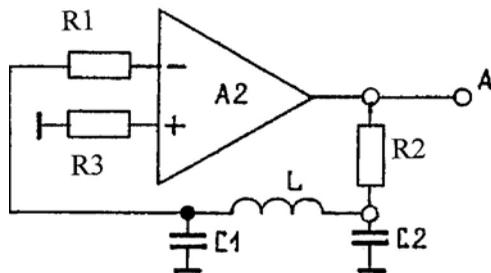


Рис. 26.3. Схема реализации генераторного метода

Частота колебаний напряжения в контуре при малом активном сопротивлении равна

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad \text{где } C = \frac{C1 \cdot C2}{C1 + C2}.$$

Индуктивность длинного соленоида без магнетика:

$$L = \mu_0 n^2 V,$$

где  $n$  — линейная плотность числа витков,  $n = \frac{N}{l}$ ;  $V$  — объем, занятый магнитным полем при условии, что это поле можно считать 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:

$$\mu = 1 + \left( \frac{\nu^2}{\nu_1^2} - 1 \right) \cdot \frac{V}{V_1}, \quad \chi = \mu - 1. \quad (26.5)$$

## ЗАДАНИЯ

### 1. Определение магнитных характеристик ферромагнетика и феррита с помощью индукционного метода.

1.1. Собрать схему согласно рис. 26.1. Сигнал  $U_1$  подать на вход «X», сигнал  $U_2$  — на вход «Y» осциллографа MATRIX MOS-620B.

1.2. Включить на прогрев осциллограф и генератор сигналов ГЗЧМ (время прогрева не менее 10 мин).

1.3. Записать в предварительно созданную таблицу длину  $l$  и площадь поперечного сечения  $S$  ферритового стержня и стальной спицы (см. приложение на лабораторном столе).

1.4. Установить частоту генерируемого сигнала пилообразной формы в пределах 300 ÷ 500 Гц и записать ее значение в таблицу.

1.5. Установить ручку «Амплитуда» генератора ГЗЧМ в положение  $\approx 1$ .

1.6. Регулятор «SWP.VAR» осциллографа поставить в положение «CAL». Переключатель «VERT MODE» — в режим «DUAL» (для наблюдения одновременно двух сигналов  $U_1$  и  $U_2$ ). Разделить сигналы по высоте, манипулируя регуляторами «Position» («▲ ▼»), и определить их принадлежность входам «Y» или «X» путем поочередного отключения их от контуров. С помощью переключателя «TIME/DIV» добиться того, чтобы на экране умещалось не более четырех периодов сигнала.

1.7. В отсутствие образца в соленоиде установить размах сигнала  $U_1$  в пределах, указанных в приложении. Измерить размах сигналов  $U_1$  и  $U_{20}$  (в делениях шкалы), смещая по вертикали один из сигналов

и оставляя на экране другой, и учитывая, что точность измерений тем больше, чем большую часть экрана занимает сигнал. При каждом измерении необходимо заносить в таблицу значения коэффициентов усиления осциллографа по осям  $X$  и  $Y$  —  $K_x$  и  $K_y$ .

1.8. 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  $U_2$  и, в случае выявления существенных изменений, уменьшить амплитуду тока в соленоиде, снизив амплитуду сигнала ГЗЧМ (это обеспечит соблюдение условия определения магнитной проницаемости в слабом магнитном поле).

1.9. Прodelать измерения пп. 1.7 ÷ 1.8 для пяти различных значений амплитуды сигнала ГЗЧМ в диапазоне  $U_1$ , указанном для каждого из исследуемых образцов в приложении.

1.10. Вычислить значения магнитных восприимчивости и проницаемости по формулам (26.3) (диаметр витка обмотки датчика указан в описании модуля МОЗ в разд. «Лабораторный комплекс ЛКЭ-1. Описание») и проверить выполнение соотношения

$$\frac{l^2}{S} \geq \mu.$$

1.11. 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  $\chi < 1$ .

## **2. Определение индукционным дифференциальным методом магнитной проницаемости вещества с малым $\chi$ .**

2.1. Собрать схему (см. рис. 26.2).

2.2. Записать в таблицу параметры пенала с исследуемым магнитным порошком (см. приложение на рабочем месте).

2.3. Выполнить п. 1.4.

2.4. В отсутствие образца в соленоиде установить размах сигнала  $U_1$ , равный одному из его значений, установленных в п. 1.7 (это позволит использовать в расчетах по формулам (26.4) значения  $U_{20}$ , полученные там же). Измерить размах сигнала  $U_{\text{нач}}$  в делениях шкалы, зафиксировать коэффициент усиления осциллографа по оси  $Y$  —  $K_y$  и занести результаты в таблицу.

2.5. 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.

2.6. 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 нуль (смена знака отчетливо прослеживается на экране осциллографа в процессе продвижения образца в соленоиде), то значению  $U_{\text{кон}}$  надо приписать отрицательный знак. В этом случае в расчетную формулу (26.4) войдет модуль суммы измеренных напряжений.

2.7. Меняя величину сигнала с ГЗЧМ, проделать измерения пп. 2.4 ÷ 2.6 для пяти различных значений амплитуды  $U_1$  (каждый раз выставляя амплитуду равной одному из ее значений из п. 1.7).

2.8. Вычислить значения  $\chi$  и  $\mu$  по формулам (26.4) и проверить выполнение соотношения  $\frac{l^2}{S} \geq \mu$ .

### **3. Определение магнитных свойств магнетиков генераторным методом.**

3.1. Собрать схему генератора электрических колебаний согласно рис. 26.3.

3.2. Включить блок питания модуля МО-3 (см. разд. «Лабораторный комплекс ЛКЭ-1. Описание»). С помощью цифрового мультиметра VC-97 (см. тот же раздел) проверить наличие напряжения на клеммах «+9» и «-9» (т.е. на входе усилителя).

3.3. Сигнал с выхода усилителя (точка А) подать на  $Y$ -вход осциллографа. Переключатель «VERT MODE» перевести в положение «CH2». На экране появятся прямоугольные импульсы. С по-

мощью переключателя «TIME/DIV» растянуть один из импульсов на весь экран.

3.4. Измерить длительность (период) импульса  $T$  и вычислить частоту  $\nu$  колебаний.

3.5. Вставить в соленоид образец из магнетика. Измерить период  $T_1$  и определить частоту  $\nu_1$ . Для каждого из исследуемых образцов (феррита и ферромагнетика) провести указанные измерения не менее трех раз.

3.6. По формулам (26.5) найти магнитную проницаемость  $\mu$  и восприимчивость  $\chi$  каждого образца (при вычислениях принять  $V = 30 \text{ см}^3$ ;  $V_1$  вычислить самостоятельно).

### 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?

## Работа 27

# ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

---

*Цель:* изучение диэлектрических свойств твердых тел, измерение емкости плоского конденсатора с диэлектриком в переменном электрическом поле, исследование зависимости поляризованности различных тел от напряженности электрического поля, определение диэлектрической проницаемости пластин.

## 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  $10^{-8} \div 10^{-15} \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ , а электропроводность металлов около  $10^7 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ . В диэлектриках свободных носителей заряда очень мало, а 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 мо-

мент 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 напряженности 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 объема диэлектрика, называется *электрическим дипольным моментом* единицы объема диэлектрика, или *поляризованностью*:

$$\vec{P} = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i, \quad (27.1)$$

где  $\vec{p}_i$  — элементарный  $i$ -й дипольный момент, образованный под действием поля в диэлектрике;  $n$  — число диполей в единице объема диэлектрика.

Поляризация твердых диэлектриков чаще всего обусловлена 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 счет смещения ионов в молекуле. В тех случаях, когда диэлектрик построен из ионов (ионный кристалл), поляризация имеет место также и за счет смещения положительных ионов относительно отрицательных. Поляризация устанавливается быстро. Время установления электронной поляризации сравнимо с периодом световых колебаний и составляет  $10^{-15} \div 10^{-14}$  с, а время установления ионной поляризации сравнимо с периодом собственных колебаний иона в положении равновесия и составляет  $10^{-13} \div 10^{-12}$  с.

*Полярными* называются 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 твердых 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.

Укажем, что поляризация, возникающая в диэлектрике под действием электрического поля, имеет обычно сложный характер, являясь совокупностью отдельных простейших видов поляризации. Электрический момент единицы объема 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 напряженности 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 емкости конденсатора с данным диэлектриком к емкости такого же по размеру конденсатора, если между обкладками — вакуум.

Диэлектрическая проницаемость вещества часто определяется по величине емкости конденсатора, между обкладками которого находится исследуемый диэлектрик. При этом измерение емкости 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 час-

тиц 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. 27.1. Конденсатор состоит из нижней пластины 1, соединенной с гнездом «1», и верхней съемной 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» подключен эталонный резистор  $R_0$ , а к гнездам «3» и «4» подключен эталонный конденсатор  $C_0$ .

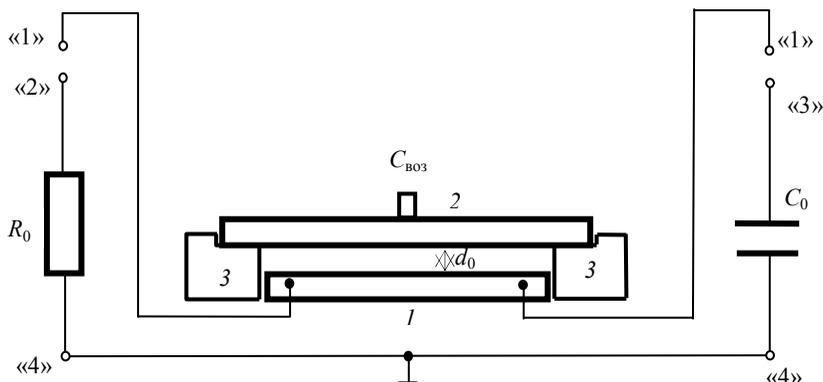


Рис. 27.1. Схема конденсатора

Емкость разборного конденсатора с воздушным зазором в данной работе находится двумя способами. В первом способе последовательно с исследуемым конденсатором соединяют эталонное сопротивление (рис. 27.2). Получается цепь переменного тока из последовательно включенных емкости, активного сопротивления и источника переменного напряжения. В такой цепи устанавливают-

ся 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. Емкость 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.

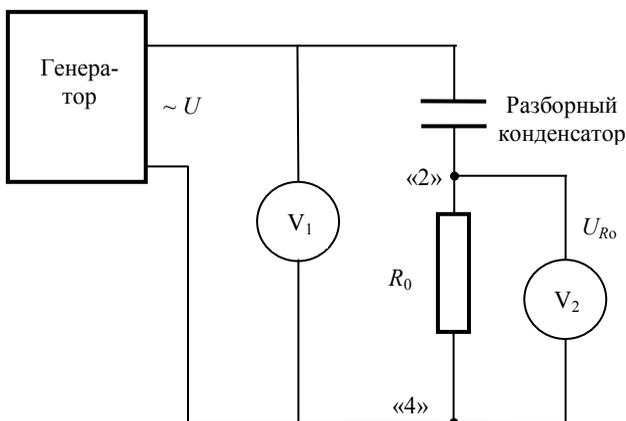


Рис. 27.2. Способ последовательного соединения с исследуемым конденсатором эталонного сопротивления

Во втором способе последовательно с исследуемым конденсатором соединяют эталонный конденсатор (рис. 27.3). В этой цепи переменного тока вместо активного сопротивления используется второй конденсатор. Тогда емкость 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.

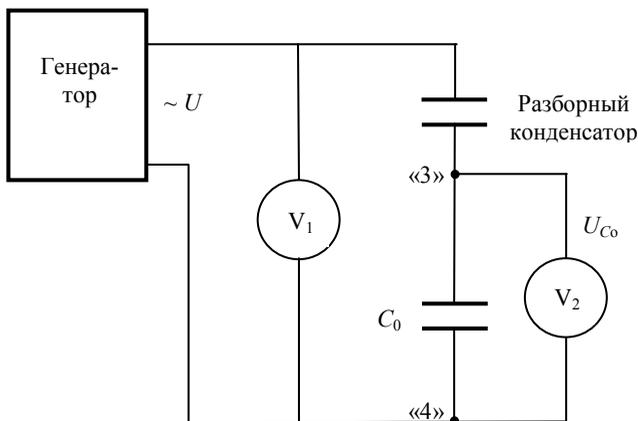


Рис. 27.3. Способ последовательного соединения с исследуемым конденсатором эталонного конденсатора

Если в разборном конденсаторе находится твердый однородный диэлектрик толщиной  $d$ , то напряженность 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.

## ЗАДАНИЯ

1. Определить емкость 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  $2 \div 3$  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 %, а погрешность отсчета 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. Рассчитать  $C_{\text{воз}}$  по формуле (27.3).

Соединить гнезда «1» и «3». Подключив кабель к эталонному конденсатору  $C_0$ , измерить напряжение  $U_{C_0}$  на нем. Рассчитать  $C_{\text{воз}}$  по формуле (27.4).

Так же рассчитать  $C_{\text{воз}}$  по формуле:

$$C_{\text{воз}} = \frac{\varepsilon_0 S}{d_0},$$

где  $S$  — площадь обкладки конденсатора.

Найти среднее значение  $C_{\text{воз}}$ .

2. Определить зависимость модуля поляризованности диэлектрика  $P$  от напряженности электрического поля  $E$ . На нижнюю обкладку разборного конденсатора плотно установить одну из трех диэлектрических пластин. Накрыть ее 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 напряженности электрического поля. Построить графики зависимости  $P(E)$  для каждого диэлектрика (на вертикальной оси вместо  $P$  удобно откладывать

кратную величину  $P/\varepsilon_0$ ). По наклону прямых определить диэлектрическую проницаемость каждого диэлектрика. Сравнить полученные значения с табличными.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие бывают виды поляризации твердых диэлектриков?
2. Назовите методы измерения диэлектрической проницаемости.
3. Выведите формулы (27.3) и (27.4).
4. Каков характер зависимости поляризованности от напряженности электрического поля?
5. Каков характер зависимости диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля?
6. Зачем необходимо плотно прижимать диэлектрическую пластину к нижней обкладке конденсатора?
7. Как зависит диэлектрическая проницаемость пластин от частоты сигнала генератора?

## Работа 28

# ИЗУЧЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

---

*Цель:* изучение процессов в  $RC$ - и  $RL$ -цепях, определение времени релаксации и параметров цепи.

### 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, ее 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, подключенную к источнику ЭДС —  $U_{\Gamma}$  и содержащую, последовательно соединенные конденсатор  $C$ , индуктивность  $L$  и активное сопротивление  $R$  (рис. 28.1, а).

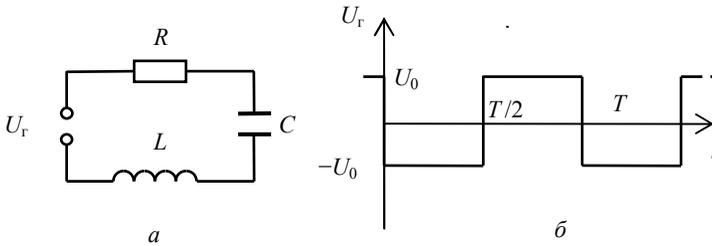


Рис. 28.1. Последовательный  $LRC$ -контур

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

$$IR + q/C + LdI/dt = U_{\Gamma}(t). \quad (28.1)$$

Разделив это уравнение на  $L$ , учитывая, что  $I = dq/dt$ , 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

$$d^2q/dt^2 + 2\beta dq/dt + \omega_0^2 q = U_{\Gamma}/L. \quad (28.2)$$

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  $U_{\Gamma}(t)$  (см. 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  $U_r = -U_0$  уравнение (28.1) примет вид:

$$Rdq/dt + q/C = -U_0. \quad (28.3)$$

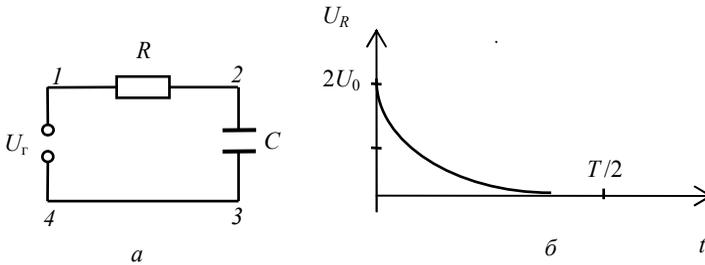


Рис. 28.2. Последовательный  $RC$ -контур

Используя начальное условие  $q(0) = U_0C$ , получим изменение заряда на конденсаторе

$$q(t) = U_0C(2\exp(-t/\tau_1) - 1),$$

где  $\tau_1$  — постоянная времени или время релаксации  $RC$ -цепи,  $\tau_1 = RC$ . Эта величина характеризует скорость убывания заряда или тока. Для постоянной времени  $\tau_1 \ll T$  напряжение на конденсаторе будет меняться по закону:

$$U_C(t) = U_0(2\exp(-t/\tau_1) - 1), \quad (28.4)$$

где  $U_0$  — предельное значение напряжения на конденсаторе, а напряжение на сопротивлении —

$$U_R(t) = 2U_0\exp(-t/\tau_1), \quad (28.5)$$

где  $U_R$  — разность потенциалов на участке 1 — 2:  $U_R = \varphi_2 - \varphi_1$ . График зависимости  $U_R(t)$  представлен на рис. 28.2, б.

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

$$IR + LdI/dt = -U_0. \quad (28.6)$$

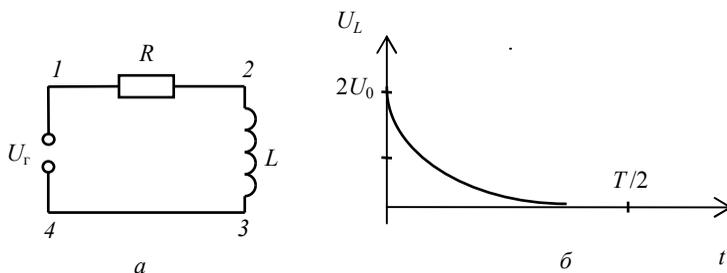


Рис. 28.3. Последовательный  $RL$ -контур

С учетом 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  $\tau_2$  — время релаксации  $RL$ -цепи,  $\tau_2 = L/R$ . Из (28.7) следует, что  $\tau_2$  есть время, в течение которого 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

$$U_R(t) = U_0(2\exp(-t/\tau_2) - 1), \quad (28.8)$$

$$U_L(t) = 2U_0\exp(-t/\tau_2), \quad (28.9)$$

где  $U_L$  — разность потенциалов на участке 2 — 3:  $U_L = \varphi_3 - \varphi_2$ . График зависимости  $U_L(t)$  представлен на рис. 28.3, б.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В работе используется лабораторный комплекс ЛКЭ-1 или ЛКЭ-2, блок «Электрические цепи» (см. рис. 1), звуковой генератор сигналов ГЗЧМ и осциллограф для измерения напряжения и параметров импульсов.

## ЗАДАНИЯ

1. Получить развертку прямоугольного импульса на экране осциллографа (см. рис. 28.1, б).

Подключить ГЗЧМ к осциллографу с помощью кабеля. Штекер «земляного» (черного) провода должен быть соединен с гнездом «L» ГЗЧМ, а второй штекер «сигнального» провода — с гнездом «С». Переключатель рода работ «Форма» установить в положение «□». Ручка «Амплитуда» управляет величиной сигнала. Зарисовать полученную осциллограмму  $U_r(t)$ . Определить значение напряжения  $U_0$ , подаваемое с генератора. В процессе выполнения всех заданий напряжение генератора  $U_0$  не менять.

2. Изучить процессы заряда и разряда конденсатора при прямоугольном сигнале на выходе генератора для  $RC$ -цепи.

2.1. Определить время релаксации для частоты звукового генератора по согласованию с преподавателем. Для этого сигнал от генератора подать на исследуемый конденсатор, соединенный 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.

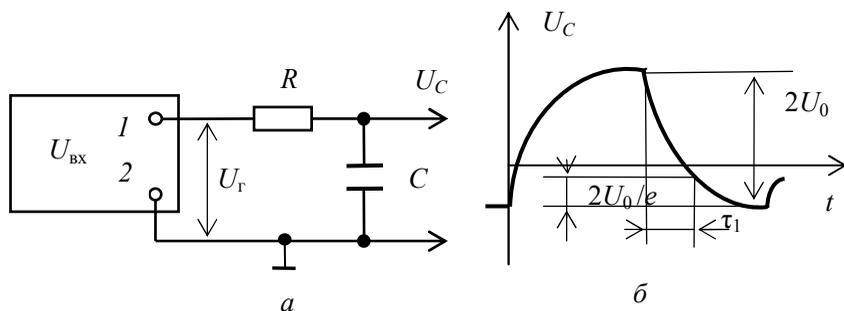


Рис. 28.4. Схема интегрирующей  $RC$ -цепи

Измерить время релаксации  $\tau_1$  за которое напряжение на конденсаторе уменьшается в  $e$  раз. Измерения сравнить с расчетными значениями по формуле  $\tau_{1\text{теор}} = RC$ . Определить погрешность измерения  $\tau_1$ .

2.2. Построить теоретическую зависимость  $U_C(t)$  для промежутка времени  $0 < t < T/2$ , используя полученное в задании 1 значение напряжения  $U_0$ .

2.3. Аналогично определить время релаксации для схемы, приведенной на рис. 28.5.

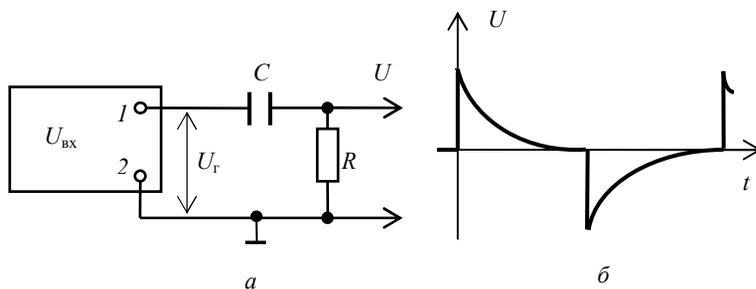


Рис. 28.5. Схема дифференцирующей  $RC$ -цепи

3. 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  $\tau_2$ . 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  $U_0$ .

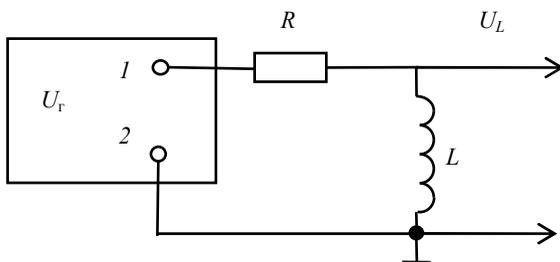


Рис. 28.6. Схема дифференцирующей  $RC$ -цепи

4. Проверить закон сохранения энергии для  $RC$ -цепи. Вычислить работу генератора по формуле:  $A_r = U_r \Delta q = 2U_0^2 C$ . 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  $0 < t < T/2$ .

### 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, выделяемой в сопротивлении за время перезарядки конденсатора?
9. Чему равно приращение энергии конденсатора при его перезарядке?

## Работа 29

# АНАЛИЗ СПЕКТРА ПЕРИОДИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

---

*Цель:* изучение спектра негармонических колебаний периодических сигналов различной формы.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования колебаний сложной формы начались в XVIII в. математиками Ж.Л. Д'Аламбером и Д. Бернулли в известной задаче о колеблющейся струне. В XIX в. Ж.Б. Фурье их идеи развил в общий метод решения разнообразных задач математической физики. Теорема Фурье утверждает, что всякая периодическая изменяющаяся функция может быть представлена как суперпозиция постоянной (независимой от времени) величины и ряда синусоидальных (гармонических) величин с кратными частотами.

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kx + b_k \sin kx), \quad -\pi \leq x \leq \pi, \quad (29.1)$$

где

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos kx dx, \quad k = 1, 2, \dots,$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin kx dx, \quad k = 1, 2, \dots$$

Следовательно, периодический сигнал  $U(t)$ , отличающийся от гармонического, можно представить как сумму гармонических сигналов, частоты которых кратны частоте исходного сигнала (рис. 29.1):

$$U(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(\omega_n t + \alpha_n), \quad \text{где } \omega_n = n\omega_1, \quad n = 1, 2, \dots \quad (29.2)$$

Гармоническая составляющая, частота которой равна частоте несинусоидального периодического сигнала, называется *основной гармоникой*; остальные гармоники, у которых частота в 2, 3, 4 (и т.д.) раз больше, называются *высшими гармониками*, т.е. второй гармоникой, третьей и т.д.

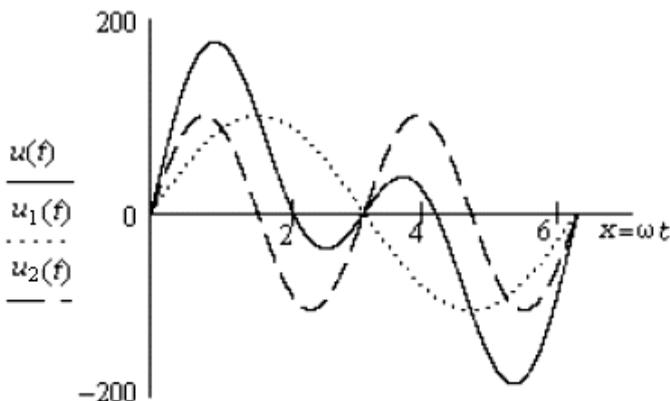


Рис. 29.1. Пример сложения первой и второй гармоники негармонического сигнала с начальными фазами, равными нулю

*Спектром сигнала* называется совокупность гармоник, на которые может быть разложен или из которых может быть синтезирован сложный сигнал. Спектры, состоящие из отдельных линий, называют *линейчатыми*, или *дискретными*. *Амплитудным спектром* называют набор амплитуд всех гармоник, который представляют графиком в виде набора вертикальных линий, длины которых пропорциональны амплитудным значениям гармонических составляющих, а место на оси абсцисс определяется частотой (номером гармоники) данной составляющей. Таким образом, спектральные линии находятся на расстоянии  $\nu$  друг от друга, где  $\nu$  — частотный интервал, равный частоте первой гармоники (рис. 29.2). На рисунке представлен спектр прямоугольного колебания, где длительность импульса равна времени паузы (скважность равна двум так называемым меандрам). Спектр не содержит четных гармоник.

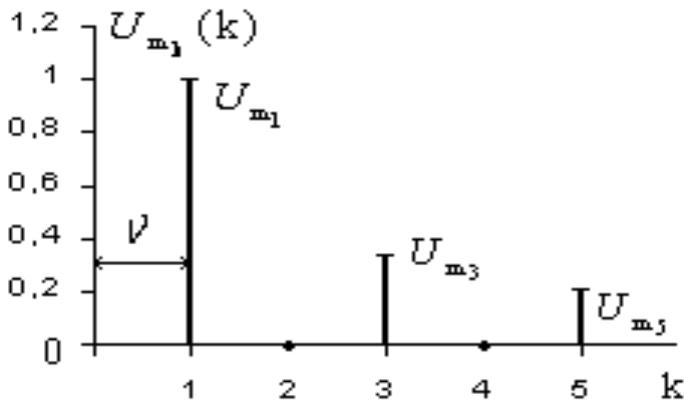


Рис. 29 2. Линейчатый амплитудный спектр прямоугольного сигнала скважностью два

Периодическая кривая называется *симметричной относительно оси абсцисс*, если любым двум абсциссам, отличающимся на половину периода, соответствуют ординаты, равные по величине и обратные по знаку, т.е. кривая удовлетворяет уравнению:

$$f(x) = -f(x + \pi). \quad (29.3)$$

Такие кривые обладают тем свойством, что отрицательная полуволна, будучи сдвинутой на половину периода по оси абсцисс, представляет собою зеркальное изображение положительной полуволны относительно оси абсцисс.

Кривые, симметричные относительно оси абсцисс, не содержат постоянной составляющей и высших гармоник четного порядка.

Докажем это математически:

пусть

$$\begin{aligned} f(x) &= a_0 + a_1 \sin(x + \alpha_1) + a_2 \sin(2x + \alpha_2) + a_3 \sin(3x + \alpha_3) + \dots, \\ f(x + \pi) &= a_0 + a_1 \sin(x + \pi + \alpha_1) + a_2 \sin[(2(x + \pi) + \alpha_2)] + a_3 \times \\ &\times \sin[3(x + \pi) + \alpha_3] + \dots = a_0 - a_1 \sin(x + \alpha_1) + a_2 \sin(2x + \alpha_2) - \\ &- a_3 \sin(3x + \alpha_3) + \dots \end{aligned}$$

Так как симметричные относительно оси абсцисс кривые должны удовлетворять уравнению:

$$f(x) = -f(x + \pi) \quad \text{или} \quad f(x) + f(x + \pi) = 0,$$

т.е.

$$a_0 + a_1 \sin(x + \alpha_1) + a_2 \sin(2x + \alpha_2) + a_3 \sin(3x + \alpha_3) + \dots + \\ + a_0 - a_1 \sin(x + \alpha_1) + a_2 \sin(2x + \alpha_2) - a_3 \sin(3x + \alpha_3) + \dots = 0,$$

то  $2a_0 + 2a_2 \sin(2x + \alpha_2) + \dots = 0$ .

Последнее уравнение должно быть справедливо при любых значениях  $x$ , а это возможно лишь в том случае, если  $a_0 = 0$ ;  $a_2 = 0$ ;  $a_4 = 0$  и т.д. Следовательно, кривая, симметричная относительно оси абсцисс, содержит только нечетные гармоники:

$$f(x) = a_1 \sin(x + \alpha_1) + a_3 \sin(3x + \alpha_3) + \dots$$

или

$$f(x) = b_1 \sin x + b_3 \sin 3x + \dots + c_1 \cos x + c_3 \cos 3x + \dots \quad (29.4)$$

В физике и электротехнике кривые, симметричные относительно оси абсцисс, встречаются часто, например кривые тока в катушке с ферромагнитным сердечником, подключенной к синусоидальному источнику напряжения.

Периодическая кривая называется *симметричной относительно начала координат*, если удовлетворяет уравнению:

$$f(x) = -f(-x). \quad (29.5)$$

Можно показать, что уравнение такой кривой:

$$f(x) = b_1 \sin x + b_3 \sin 3x + b_5 \sin 5x + \dots, \quad (29.6)$$

т.е. эти кривые не содержат постоянной составляющей, четных гармоник и косинусоидальных составляющих.

Постоянная составляющая сигналов, несимметричных относительно оси абсцисс, определяется по формуле:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx. \quad (29.7)$$

Следует отметить, что симметрия или несимметрия относительно оси абсцисс обусловлена формой кривой и устранена быть не

может. Симметрия же относительно начала координат в ряде случаев достигается целесообразным выбором начала отсчета.

Таким образом, если в электрической цепи присутствует негармонический сигнал, рассчитывается воздействие на эту цепь каждой гармоники, а затем результаты суммируются. Амплитуда гармоник с ростом номера убывает. Поэтому для практических целей используется конечное число слагаемых ряда, определяемое заданной точностью.

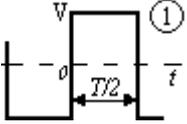
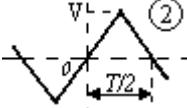
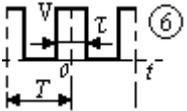
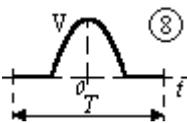
В технике для получения необходимых частот гармонический сигнал заведомо искажается нелинейными элементами (полупроводники, ферромагнетики в области насыщения и т.п.), а затем нужную гармонику выделяют с помощью настроенного колебательного контура.

Для сигналов часто встречающихся форм разложение в ряд Фурье можно найти в специальной литературе. В табл. 29.1 представлены разложения для форм, выдаваемых генератором ГЗЧ/М. Под  $V$  следует понимать величину, измеряемую либо в вольтах, либо в амперах.

В какой мере математические представления соответствуют физической реальности и можно ли их использовать в инженерной практике? В цепь перестраиваемого последовательного колебательного контура, подключенного к генератору несинусоидальных колебаний, включим амперметр. При изменении частоты резонанса в контуре будут наблюдаться максимумы тока на частотах  $\nu$ ,  $2\nu$ ,  $3\nu$ , ... и т.д. Амплитуда колебаний, в соответствии с теорией, будет уменьшаться с ростом номера гармоники. Такой эксперимент, казалось бы, полностью подтверждает существование гармоник, но это не так. Правильное понимание заключается в том, что существует единый несинусоидальный сигнал, но на те или иные цепи он воздействует так, как будто состоит из бесконечной суммы гармонических сигналов с определенными амплитудами, частотами и фазами.

В результате лабораторной работы могут появиться данные, отличающиеся от теоретических. Возможной причиной этого может быть несоответствие формы сигнала табличным примерам. Создать идеальную форму требуемого сигнала — сложная инженерная задача.

Разложения для форм, выдаваемых генератором ГЗЧ/М

	$f(t) = \frac{4V}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin k\omega t}{k} \quad (1)$	$k = 1, 3, 5, \dots$ $\omega = 2\pi\nu$
	$f(t) = \frac{8V}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{\frac{k-1}{2}} \frac{\sin k\omega t}{k^2} \quad (2)$	$k = 1, 3, 5, \dots$ $\omega = 2\pi\nu$
	$f(t) = V \left[ \frac{\tau}{T} + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin \frac{k\omega\tau}{2} \cos k\omega t \right] \quad (3)$	$k = 1, 2, 3, 4, 5,$ $\omega = 2\pi\nu$
	$f(t) = \frac{2V}{\pi} \left( \frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos \omega t + \frac{1}{1.3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3.5} \cos 4\omega t + \frac{1}{5.7} \cos 6\omega t \right) \quad (4)$	$k = 1, 2, 4, 6, \dots$ $\omega = 2\pi\nu$

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Изучение спектров периодических сигналов производится студентом на комплексе ЛКЭ-1 на модуле МО2 «Цепи переменного тока». В качестве генератора несинусоидальных колебаний применяется «Генератор звуковой частоты/Метроном» (ГЗЧ/М). Для измерений также понадобится осциллограф MOS-620В. Измерения производятся при помощи схемы, приведенной на рис. 29.3.

Приведенная схема представляет собой последовательный колебательный контур с возможностью косвенного измерения тока в контуре и наблюдения его формы. Комплекс не имеет в своем составе перестраиваемый колебательный контур, поэтому для изме-

рений спектров используется способ изменения частоты возбуждающего генератора без изменения его выходного напряжения и формы сигнала. При этом колебательный контур будет входить в резонанс с высшими гармониками сигнала, так как частота генератора будет уменьшаться от резонансной частоты контура, найденной на гармоническом сигнале. Такой способ определения спектра аналогичен способу, где спектр снимается изменением резонансной частоты колебательного контура в сторону увеличения частоты (номера) гармоники.

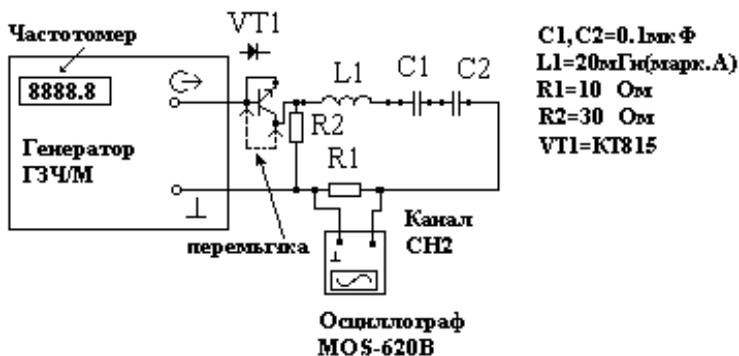


Рис 29.3. Принципиальная схема установки

Осциллограф применяется для однозначного нахождения максимума тока гармоники и измерения ее амплитуды. Чем выше номер гармоники, тем сильнее искажается сигнал. Искажения вызваны тем, что с ростом номера гармоники уменьшается и энергия, возбуждающая контур. Поэтому колебания становятся затухающими. Следовательно, для измерения амплитуды найденной гармоники необходимо фиксировать размах только первого периода (т.е. крайние точки осциллограммы по оси ординат, **соответствующие двойной амплитуде гармоники**). Синхронизацию сигнала устанавливать в этом случае нет необходимости.

В качестве катушки индуктивности используется высокодобротная индуктивность с маркировкой А из комплекта комплекса и устанавливается на держатель, расположенный в центре между модулями (имеет вид соленоида диаметром 70 мм и толщиной около 15 мм). Ее характеристики:  $R = 18,4 \text{ Ом}$ ,  $L = 20 \text{ мГн}$ .

Конденсатор контура набирается из двух последовательно соединенных емкостей с номиналом каждой по 0,1 мкФ для достижения более удобной для снятия спектра резонансной частоты.

Для создания сигнала несимметричной формы в схему последовательно может быть включен диод, в качестве которого используется *p-n*-переход транзистора VT1. Для этого достаточно убрать переключку.

## ЗАДАНИЕ

1. Собрать схему.
2. Включить генератор, осциллограф.
3. Дать прогреться приборам в течение 5 мин. За это время убедиться в следующих установках переключателей и ручек осциллографа: «HORIZONTAL SWP. VAR» — в положение CAL, «HORIZONTAL TIME/DIV» — 2 ms (рекомендуемое, начальное), «TRIGGER MODE» — AUTO, «TRIGGER SOURCE» — CH2, «TRIGGER SLOPE» — +, «VERTICAL MODE» — CH2, «VERTICAL (для CH2) VAR. PULLx5MAG» — CAL., «CH2 INV» — отжата, «AC GND DC» — в положение DC. В названии переключателя первое слово обозначает блок осциллографа. Остальные положения переключателей и ручек меняются по необходимости.
4. Генератор переключить в режим синусоидального сигнала (~) ручкой «Форма». Ручкой «Амплитуда» установить выходное напряжение 5 В. **Амплитуду колебаний в течение всей работы больше не менять!** Дискретный переключатель «Частота» установить в положение 1 К.
5. Найти собственную частоту резонанса колебательного контура. Для чего, медленно вращая ручку «Частота», добиться максимума амплитуды на экране осциллографа, при этом подбирая оптимальную чувствительность канала вращением ручки «VOLTS/DIV» второго канала (CH2). Сигнал на экране должен занимать наибольшую площадь и быстро спадать при расстройке частоты влево и вправо от резонанса.
6. Снять показания частотомера генератора и измерить **двойную** амплитуду сигнала осциллографом, занести их в колонки и столбцы подготовленной таблицы, соответствующие синусоидаль-

ному сигналу. Убедиться в отсутствии других резонансов плавным изменением частоты.

7. Переключить генератор в режим выдачи треугольного сигнала «Форма» —  $\nabla$ . Медленно вращая ручку «Частота» от большей частоты к меньшей (справа налево), найти  $5 \div 6$  резонансов, измеряя, соответственно, значения амплитуд гармоник осциллографом, а частоты по цифровой шкале генератора. При этом опять подбирать чувствительность осциллографа для большей точности нахождения резонансов и измерения амплитуд. Проверить наличие резонансов на меньшем диапазоне генератора (100). Все измерения занести в таблицу в колонки для этой формы сигнала.

8. Повторить все операции п. 7 для других форм сигнала, имеющих на генераторе.

9. Опять установить на генераторе синусоидальный сигнал, но при этом удалить перемычку из схемы. Зарегистрировать частоты и амплитуды резонансов.

10. После исследования всех вариантов, переключить осциллограф к входу генератора и, добившись устойчивой синхронизации сигнала, зарисовать два периода в журнал для каждой формы. При этом все осциллограммы снимаются с установленной перемычкой, а для синусоидального сигнала с ней и без нее.

11. Рекомендуется для формирования таблицы использовать такую последовательность названий рядов для каждой формы сигнала: 1 — частота (Гц); 2 — коэффициент чувствительности осциллографа (В/дел); 3 — размах гармоник, равный  $2 \times U_i$ , (дел.); 4 — амплитуда гармоник (В); 5 — номер гармоник; 6 — нормированное значение амплитуды экспериментальное; 7 — теоретическое значение амплитуды (В); 8 — нормированное значение теоретической амплитуды гармоник.

12. Построить графики зависимости амплитуды гармоник от частоты для всех измеренных форм сигнала в виде пропорциональных вертикальных отрезков, а теоретические значения, рассчитанные по приведенным формулам, с некоторым смещением по горизонтали обозначить рядом пунктирной линией. Постоянную составляющую отмечать на оси ординат. Для возможности сравнения теоретической и экспериментальной зависимости, а также чтобы не учитывать сопротивления схемы, необходимо нормировать амплитуды гармоник. Для этого разделите измеренные и рассчитанные

амплитуды на соответствующую величину первой гармоники (таким образом  $U_1 = 1$ ). Формулу (3) в табл. 29.1 для данного генератора можно легко упростить (скважность сигнала  $T / \tau = 2$ ). На тех же листах отразить формы сигналов. Масштабы по всем осям для всех графиков сделать одинаковыми. В отличие от эксперимента частота на графиках должна увеличиваться слева на право. Под частотой на оси абсцисс нанести номер гармоники, определив ее по отношению первого резонанса ко всем остальным, с округлением до целого числа. Видимую погрешность по амплитуде изобразить пунктирным отрезком (3 %). Приборная погрешность по частоте незначительна, а случайная составляющая находится с точностью определения резонанса при помощи осциллографа как индикатора.

13. Проанализировать получившиеся данные и сделанные выводы записать в заключении.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется спектром сигнала? Как он изображается?
2. Как может быть представлен периодический сигнал сложной формы?
3. У каких форм сигналов отсутствуют четные гармоники?
4. Для стабилизации частоты в технике используются кварцевые пластины («обратный пьезоэффект»). Но механическая прочность тонкой пластины кварца не позволяет получить частоты выше 100 МГц. Как получить стабильные частоты в 300 или 400 МГц? Предложить два варианта решения.
5. Можно ли из набора независимых генераторов создать любой сложности форму периодического сигнала?
6. Как изменяется спектр сигнала в зависимости от роста искажений синусоидального напряжения?
7. Почему электрические разряды (одиночные или повторяющиеся) являются источником помех для приемной радиоаппаратуры?