53(075)
Л12

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ

ЧАСТЬ 2

Нижний Новгород 2005

19
53(075)
Л 12 Лабораторные работы по общей физике. Ч.2.
2005 13-78

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра физики

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ

Часть 2

БИБЛИОТЕКА НГТУ

Нижний Новгород 2005

Лабораторные работы по общей физике. Ч. 2 / НГТУ. Н. Новгород, 2005. 122 с.: ил.

Данный сборник описаний лабораторных работ является продолжением выпущенного ранее (Ч. 1) и охватывает следующие разделы из электричества и магнетизма:

1. Электрическое поле в вакууме.
2. Электрическое поле в диэлектриках.
3. Постоянный электрический ток.
4. Магнитное поле в магнетиках.
5. Электромагнитная индукция.
6. Электрические колебания.

В сборник включены также методические указания по работе с радиоизмерительными приборами, которые используются в лаборатории электричества. Описания лабораторных работ размещены в порядке их выполнения.

Настоящий сборник необходим студентам всех специальностей и для успешного освоения материала должен стать настольной книгой каждого первокурсника.

Научный редактор С. Б. Раевский

Редактор И. И. Морозова

© Нижегородский государственный технический университет, 2005

СОДЕРЖАНИЕ

1. Лабораторная работа № 2-23. Изучение основных правил работы с радиоизмерительными приборами 5

2. Лабораторная работа № 2-24. Экспериментальные исследования электростатических полей с помощью электролитической ванны 17

3. Лабораторная работа № 2-30. Экспериментальные исследования диэлектрических свойств материалов 31

4. Лабораторная работа № 2-2. Изучение компенсационного метода измерения ЭДС 41

5. Лабораторная работа № 2-29. Определение удельного сопротивления проводника 57

6. Лабораторная работа № 2-26. Исследование магнитных полей в веществе. Ферромагнетики 69

7. Лабораторная работа № 2-28. Экспериментальные исследования электромагнитной индукции 85

8. Лабораторная работа № 2-27. Исследование электрических колебаний 99

9. Лабораторная работа № 2-27а. Цепи переменного тока. Резонанс напряжений. Резонанс токов 111

УДК 537.85

Лабораторная работа № 2-23

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПРАВИЛ РАБОТЫ С РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ПРИБОРАМИ

Л. А. Кузнецов, А. А. Радионов, С. Б. Раевский

Приводятся основные правила работы с радиоизмерительными приборами, используемыми в лабораторном практикуме. В процессе выполнения работы студенты проводят ряд контрольных измерений и знакомятся с определением их погрешностей.

Введение

Измерения - эффективный метод познания природы, необходимый способ контроля и управления техническими устройствами и технологическими процессами. Одними из самых точных измерительных приборов с большим быстродействием являются электро- и радиоизмерительные приборы, используемые в сочетании с методами преобразования механических, тепловых и др. величин в пропорциональные им электрические напряжения. Несмотря на различные назначения этих приборов (генератор, вольтметр, осциллограф и т.д.), в работе с ними имеется много общего. Усвоение этого "общего" позволит быстрее приобрести навыки работы с радиоизмерительными приборами.

Целью данной работы является знакомство с основными характеристиками радиоизмерительных приборов, правилами их подключения к измеряемому объекту, методикой проведения измерений и оценкой их погрешности.

I. Классификация радиоизмерительных приборов

Существующие радиоизмерительные приборы классифицируются по следующим признакам: по назначению, по способу отсчета, по точности, по конструкции и т.д.

1) По назначению представленные на стенде приборы подразделяются на следующие группы:

а) Измерительные генераторы - источники электрических сигналов.

С выходов генератора сигналов (подгруппа Г3) и генератора стандартных сигналов (подгруппа Г4) снимаются электрические напряжения синусоидальной формы (рис. 1), которые характеризуются эффективным значением $U = U_m/\sqrt{2}$, где U_m - амплитуда напряжения, и частотой $f = 1/T$, где T - период колебания.

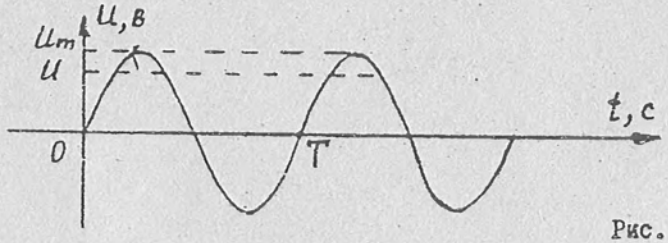


Рис. 1

С выхода генератора импульсов (подгруппа Г5) снимаются электрические напряжения импульсной формы (рис. 2), которые характеризуются амплитудой импульсов U_m, их длительностью τ и частотой повторений $f_n = 1/T_n$, где T_n - период повторений. На рис. 2 изображены импульсы положительной полярности.

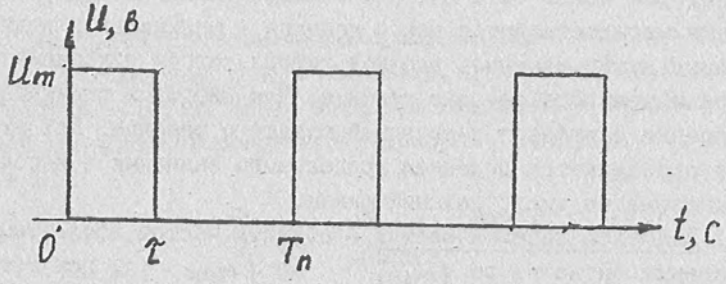


Рис. 2

б) Вольтметры - приборы для измерения напряжения.

В установке имеется вольтметр переменного тока (подгруппа В3) и вольтметр универсальный (подгруппа В7), предназначенный для измерения как переменного, так и постоянного напряжения. Вольтметры калиброваны на эффективное значение напряжения.

в) Частотомер (подгруппа Ч3 или подгруппа Ф) - прибор для измерения частоты синусоидального сигнала, длительности и периода повторения импульсов.

г) Электроннолучевой осциллограф (подгруппа С1) - прибор для визуального наблюдения формы электрических сигналов и измерения их параметров.

2) По способу отсчета. Используемые в лаборатории приборы делятся на стрелочные и цифровые.

3) По точности радиоизмерительные приборы, согласно ГОСТу, делятся на классы.

4) По конструкции и условиям эксплуатации приборы, представленные на стенде, являются переносными, лабораторными.

2. Основные характеристики измерительных приборов

а) Пределы измерения - область значений измеряемой величины от X_{min} до X_{max}, в пределах которой может быть

проведен отсчет по индикатору. В многодиапазонных приборах пределы измерения разбиты на несколько диапазонов, при этом в каждом последующем диапазоне максимальное значение измеряемой величины кратно увеличивается в целое число раз.

б) Чувствительность – наименьшее значение измеряемой величины, которое может быть считано с индикатора. Иногда чувствительность отождествляют с ценой деления – минимальной величиной, на которую нужно изменить входной сигнал, чтобы показание на индикаторе изменилось на одно деление. Для цифровых индикаторов цена деления совпадает с единицей младшего разряда. Для стрелочных она определяется делением предельного значения в используемом диапазоне на число делений шкалы.

в) Диапазон рабочих частот – область частот исследуемых синусоидальных сигналов от f_{min} до f_{max}, при которых измерительный прибор сохраняет все свои характеристики в заданных пределах.

г) Входной (выходной) импеданс – величина, определяемая сопротивлением, емкостью и индуктивностью на входе (выходе) измерительного прибора. Величину входного (выходного) импеданса всегда необходимо соизмерять с параметрами исследуемой схемы, так чтобы изменение токораспределения в ней при подключении прибора было минимально. Например, нельзя измерить напряжение на сопротивлении R вольтметром с входным сопротивлением $R_{вх}$, если $R_{вх} \leq R$. Не удастся эффективно снять сигнал с генератора, если сопротивление исследуемой схемы R меньше выходного сопротивления генератора $R_{вых}$.

д) Погрешность прибора – существует несколько способов выражения погрешности. Формула для расчета погрешности приведена в паспорте прибора.

Пример. Относительная погрешность вольтметра В7-27 при измерении переменного напряжения дается выражением

$$\delta U = \left(0{,}5 \pm 0{,}02 \frac{U_к}{U_x}\right), \%, \qquad (1)$$

где $U_к$ – наибольшее напряжение, которое можно измерить на выбранном диапазоне, U_x – измеряемое напряжение.

Если измерение на диапазоне 10 В дало результат для U_x = 5 В, то согласно формуле (1)

$$\delta U = \left(0{,}5 \pm 0{,}02 \frac{10}{5}\right)\% = 0{,}54\%.$$

Абсолютная погрешность $\Delta U = U_x \cdot \delta U = 5 в \cdot 0{,}0054 = 0{,}027 в$.

Тогда значение измеряемой величины

$$U_x = 5{,}00 \pm 0{,}03 \text{ В}.$$

Электроизмерительным приборам, паспорта на которые отсутствуют, присваивают классы точности, отмеченные на шкале прибора (например, (0,5)). Класс точности совпадает с пределом допускаемой приведенной погрешности прибора ($\delta_{прив}$), выраженной в %:

$$\delta_{прив} = \frac{\Delta}{X_{max}} \cdot 100\%, \qquad (2)$$

где Δ – абсолютная погрешность измерения величины X;
X_{max} – конечное значение шкалы используемого диапазона.

Пример. Класс точности вольтметра – 4.0 ($\delta_{прив}$). Тогда, согласно формуле (2), при измерении напряжения 60 В по шкале 100 В (X_{max}) абсолютная погрешность $\Delta = \frac{100 в \cdot 4\%}{100\%} = 4 в$. Для измеряемой величины имеем

$$U = 60 \pm 4 \text{ В}.$$

е) Время установления рабочего режима – необходимое время самопрогрева, после которого прибор обеспечивает требуемые характеристики или время, определяемое инерционными свойствами прибора, которое характеризует, как быстро можно проводить измерения после подключения прибора к исследуемой цепи.

3. Основные органы управления измерительными приборами

При всем многообразии измерительных приборов их органы управления во многом унифицированы. К общим относятся следующие:

а) "Выход" – для измерительных генераторов и "вход" – для вольтметров, частотомера и осциллографа – клеммы, к которым подключается исследуемый участок электрической цепи.

б) Переключатель рода работ – переключатель, с помощью которого выбирается измеряемая характеристика (U – напряжение, I – ток и т.д.)

в) Переключатель диапазона измерений (изменений) соответствующей характеристики – скачкообразно выбирает диапазон измерения (изменения) исследуемой характеристики электрического сигнала.

г) Потенциометр плавного изменения соответствующей характеристики – плавно меняет исследуемую характеристику внутри выбранного диапазона.

д) Калибровочные потенциометры – позволяют откалибровать прибор до начала измерений, что значительно повышает его точность.

4. Экспериментальная установка

В экспериментальную установку входят (рис. 3), следующие приборы: генератор сигналов Г3 – 1, генератор стандартных сигналов Г4 – 2, генератор импульсов Г5 – 3, вольтметр переменного тока В3 – 4, вольтметр универсальный В7 – 5, осциллограф электроннолучевой С1 – 6, частотомер Ч3 или Ф – 7,

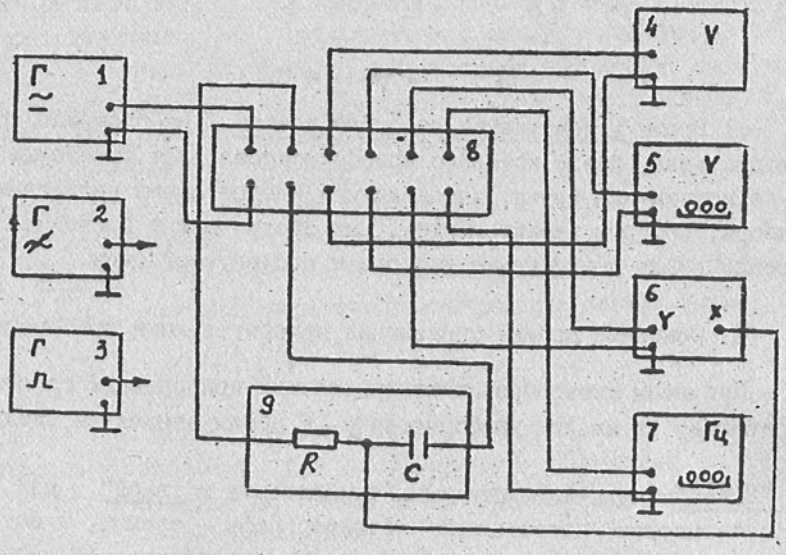


Рис. 3

а также соединительная колодка 8 (укреплена на стенде) и RC –цепочка – (9), собранная на отдельной панели.

В комплект приборов входят соединительные кабели. К каждому из приборов прилагается инструкция по эксплуатации (паспорт). В паспорте указано: назначение прибора, как подготовить прибор к работе, как измерить необходимую электрическую характеристику и рассчитать ее погрешность, как выключить прибор. Все соединения производятся на соединительной колодке (8), как показано на рис. 3, при этом заземленный провод одного прибора соединяется с заземленным проводом другого.

5. Техника безопасности

1. Внимание! Приборы стенда питаются от сети напряжением 220 В.
2. Все приборы должны быть заземлены.
3. Включения и выключения приборов проводить так, как указано в паспортах.
4. Во время проведения эксперимента запрещается прикасаться ко всем оголенным токонесущим частям установки.
5. При включении установки необходимо внимательно следить за показаниями приборов. В случае, если показания какого-либо прибора превысят допустимый предел, надо немедленно выключить прибор и обратиться за помощью к преподавателю или лаборанту.
6. Специальные указания по технике безопасности приведены в паспортах приборов.

6. Эксперимент

Задание I. Измерение напряжения сигнала генератора

Используемые приборы: генератор сигнала Г3, вольтметр В3 и В7.

а) Подготовить к работе и включить генератор сигналов Г3 и вольтметры В3, В7 – см.паспорта приборов, пп. I ÷ 3. Производить операции только по указанным пунктам!

б) Подключить через соединительную колодку входы вольтметров к выходу генератора.

в) Установить на генераторе частоту выходного сигнала f = 5 кГц и напряжение U = 2 В – см.паспорт генератора, п. 4.4.

г) Измерить вольтметром В3 выходное напряжение и рассчитать погрешность измерения – см.паспорт вольтметра, п. 4. Записать полученный результат в виде

$$U = U_x \pm \Delta U.$$

д) Аналогично произвести измерение напряжения вольтметром В7.

Сравнить результаты измерений между собой, а также с показанием вольтметра генератора.

Задание 2. Анализ формы и измерение параметров синусоидального сигнала на осциллографе

Используемые приборы: генератор сигналов Г3, вольтметры В3 и В7, осциллограф С1.

а) Подготовить к работе и включить осциллограф – см.паспорт осциллографа, пп. 1–3.

б) Не отключая вольтметров, подключить вход "Y" осциллографа к выходу генератора Г3.

в) Получить на экране осциллографа устойчивое изображение сигнала и зарисовать его форму – см.паспорт осциллографа, п.4.

Для получения устойчивого изображения синусоидального сигнала необходимо, чтобы моменты времени начала развертки луча по горизонтали, когда он находится в крайнем левом (начальном) положении, совпадали за все время наблюдения с моментами поступления исследуемого сигнала, когда последний принимает одно и то же значение. Таким образом, генератор развертки осциллографа должен быть синхронизирован с поступающим сигналом. Лучше всего такую синхронизацию проводить самим сигналом. Генератор развертки при этом переводится в ждущий режим. Как только напряжение сигнала достигает определенной пороговой величины $U_{пор}$, которая задается ручками управления на осциллографе, запускается генератор развертки, и на экране в течение времени развертки высвечивается отрезок синусоиды. Затем луч быстро возвращается в начальное положение. Повторный запуск развертки начинается, когда сигнал снова достигает того же уровня $U_{пор}$, и на экране воспроизводится аналогичный отрезок синусоиды, положение которого совпадает с предыдущим. И так за все время наблюдения, что позволяет наблюдать устойчивое изображение синусоидального сигнала.

г) Измерить осциллографом амплитуду сигнала – см.паспорт осциллографа, п. 5. Записать полученный результат. Сравнить результат измерения с показаниями вольтметров.

д) Измерить осциллографом период сигнала (Т) – см.паспорт осциллографа, п. 6. Рассчитать частоту (f) и записать полученный результат. Сравнить результат измерения со значением частоты на шкале генератора.

Задание 3. Измерение частоты генератора с помощью частотомера

Используемые приборы: генератор сигналов Г3, вольтметры В3 и В7, осциллограф С1, частотомер Ч3 или Ф.

а) Подготовить к работе и включить частотомер – см.паспорт частотомера, п. 1 ÷ 3.

б) Не отключая вольтметров и осциллографа, подключить вход частотомера в режиме измерения частоты к выходу генератора Г3.

в) Измерить частотомером частоту сигнала и рассчитать погрешность измерения – см.паспорт частотомера, п. 4.

Записать результат измерения в виде

$$f = f_x \pm \Delta f.$$

Сравнить этот результат с показаниями на шкале генератора и с результатом, полученным с помощью осциллографа.

Задание 4. Измерение разности фаз двух синусоидальных сигналов с помощью осциллографа

а) Не выключая приборов, подключить RC -цепь к выходу генератора Г3 и входу "X" осциллографа, как показано на рис.3. При этом на вход "Y" осциллографа подается синусоидальный сигнал, снятый со всей RC -цепи, а на вход "X" подается синусоидальный сигнал, снятый с резистора R и отличающийся по фазе от первого.

б) Измерить осциллографом разность фаз двух синусоидальных сигналов – см.паспорт осциллографа, п. 7. Записать полученный результат.

в) Выключить все приборы (кроме осциллографа и частотомера) – см.паспорта приборов, п. 5 и разобрать схему.

Задание 5. Анализ формы и измерение параметров импульсного сигнала на осциллографе

Используемые приборы: генератор импульсов Г5 и осциллограф С1.

а) Подготовить к работе и включить генератор импульсов Г5 см.паспорт генератора, пп.1 ÷ 3.

б) Подключить вход "Y" осциллографа к выходу генератора.

в) Установить на генераторе следующие параметры выходного сигнала: длительность импульсов τ = 200 мкс, частота повторений f_n = 500 Гц, амплитуда U_m = 150 мВ - см.паспорт генератора, п. 4.

г) Получить на экране осциллографа устойчивое изображение сигнала и зарисовать его форму - см.паспорт осциллографа, п.4.

Чтобы получить устойчивое изображение импульсов, необходимо синхронизировать генератор развертки исследуемым сигналом (см.задание 2,в). Для этого ручками управления на блоке синхронизации осциллографа выбираются: 1) режим синхронизации импульсами полярности поступающего сигнала; 2) порог запуска генератора развертки $U_{пор}$, превышающий нулевой уровень. В этом случае запуск развертки осуществляется очередным исследуемым импульсом в момент его поступления. Импульсы, запускающие развертку, высвечиваются на экране и по положению совпадают друг с другом (крайнее левое, начальное положение - рис. 2), создавая устойчивую картину.

д) Измерить осциллографом амплитуду импульсов - см.паспорт осциллографа, п. 5. Записать результат.

Сравнить полученный результат с показанием вольтметра генератора.

е) Измерить осциллографом длительность импульсов и период повторений - см.паспорт осциллографа, п. 6. Записать результаты. По результатам эксперимента рассчитать частоту повторений. Сравнить полученные результаты с показаниями на шкалах генератора.

Задание 6. Измерение длительности и периода повторений импульсов с помощью частотомера

Используемые приборы: генератор импульсов Г5, осциллограф С1, частотомер Ч3 или Ф.

а) Не отключая осциллографа, подключить вход частотомера

в режиме измерения длительности импульсов к выходу генератора Г5 (см.паспорт частотомера, п. 3).

б) Измерить частотомером длительность импульсов и рассчитать погрешность измерения - см.паспорт частотомера, п. 5.

Записать результат измерения в виде

$$\tau = \tau_x \pm \Delta\tau.$$

Сравнить полученный результат с показанием на шкале генератора и результатом, полученным с помощью осциллографа.

в) Измерить частотомером период повторений импульсов и рассчитать погрешность измерения - см.паспорт частотомера, п. 5.

Записать результат в виде

$$T_n = T_{nx} \pm \Delta T.$$

Сравнить этот результат с полученным с помощью осциллографа.

г) По окончании измерений выключить приборы - см.паспорта приборов.

Разобрать схему.

Литература

1. Валитов Р.А., Сретенский В.М. Радиотехнические измерения. М., 1970. 712 с.
2. Инструкции по эксплуатации генераторов, вольтметров, осциллографа и частотомера.

УДК 537.85

Лабораторная работа № 2-24

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ВАННЫ

В. И. Голубев, Л.А. Кузнецов, Г. В. Павловская,
Т. О. Прончатова-Рубцова

Даны краткие теоретические сведения об основных характеристиках электростатического поля, способах его изображения и физических основах моделирования электростатических полей в электролитической ванне. Описана экспериментальная установка и порядок работы на ней.

БИБЛИОТЕКА
НГТУ

ВВЕДЕНИЕ

При конструировании электровакуумных приборов, электронных ламп, ускорителей элементарных частиц, при расчете характеристик волноводов и т. д. требуется знать распределение электрического поля в пространстве, заключенном между электродами различной формы. Аналитический расчет поля удается выполнить для весьма ограниченного набора конфигураций и взаимного расположения электродов. Сложные электростатические поля исследуются экспериментально, в частности, с помощью электролитической ванны.

Цель работы. Изучение метода моделирования электростатических полей в электролитической ванне и исследование их характеристик в пространстве между электродами различной формы.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.

Электростатическое поле – это поле, создаваемое покоящимися электрическими зарядами. Силовой характеристикой поля является напряженность $\vec{E}$, которая равна отношению силы $\vec{F}$, действующей со стороны электрического поля на точечный пробный заряд, помещенный в рассматриваемую точку поля, к величине $q_{пр}$ этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{пр}} \quad . \tag{1.1}$$

Пробный заряд должен быть столь малым, чтобы его внесение не искажало исследуемое с его помощью поле.

Энергетической характеристикой электростатического поля служит его потенциал φ, численно равный работе, которую совершают силы поля над единичным положительным зарядом при удалении его из данной точки на бесконечность:

$$\varphi = \frac{A_{эл}}{q}. \tag{1.2}$$

Напряженность и потенциал связаны друг с другом соотношением:

$$\vec{E} = -grad\varphi = -\nabla\varphi, \tag{1.3}$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E_l dl \quad , \tag{1.4}$$

где φ_1, φ_2 - потенциалы в точках 1 и 2, $d\vec{l}$ - вектор элементарного перемещения в электростатическом поле, E_l – проекция напряженности на $d\vec{l}$. В декартовых координатах для $\vec{E}$ имеем:

$$\vec{E} = -(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}) \, , \tag{1.5}$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ - единичные орты в направлениях x,y,z соответственно.

Удобной моделью электрического поля является его изображение в виде силовых и эквипотенциальных линий. Силовые линии - это кривые, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора $\vec{E}$. Силовые линии начинаются на положительных зарядах (источники), а заканчиваются на отрицательных (стоки). В такой модели величина напряженности $\vec{E}$ пропорциональна густоте силовых линий (число линий на единицу поверхности, перпендикулярной к ним). Поэтому там, где силовые линии идут гуще, напряженность поля $|\vec{E}|$ - больше. Картину силовых линий удобно дополнить картиной эквипотенциальных поверхностей – поверхностей равного потенциала. Пересекаясь с плоскостью чертежа, эквипотенциальные поверхности дают эквипотенциальные линии (рис. 1).

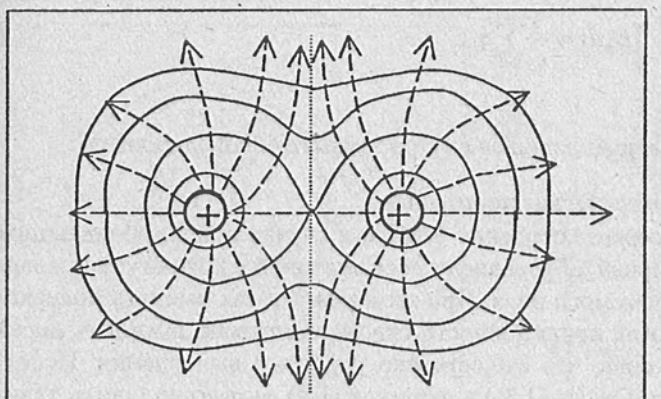


Рис. 1

------ - силовые линии;

—— - эквипотенциальные линии

Линии напряженности перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям (линиям), в том числе и поверхностям проводников в электростатическом поле, так как последние являются эквипотенциальными объемами. Тогда вектор средней напряженности $<\vec{E}>$ между двумя эквипотенциальными поверхностями (линиями) с разностью потенциалов $\Delta\varphi=\varphi_2-\varphi_1$ направлен вдоль линии, соответствующей кратчайшему расстоянию между ними $\Delta\vec{l}$ от большего потенциала к меньшему – вдоль направления наибольшего изменения потенциала (навстречу $grad\varphi$). Согласно выражению (1.5) для модуля средней напряженности поля $<E>$ имеем:

$$<E> = \left|\frac{\Delta\varphi}{\Delta l}\right|. \tag{1.6}$$

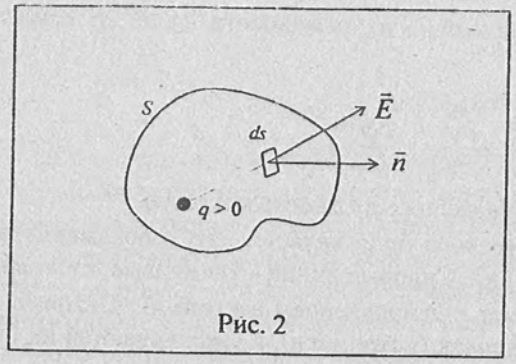


Рис. 2

Введем понятие потока напряженности через поверхность S:

$$N = \int_S E_n ds \ , \tag{1.7}$$

где E_n – проекция вектора напряженности на нормаль к элементу поверхности ds (рис. 2). Графический смысл потока – число силовых линий, пронизывающих поверхность S.

Для расчета электростатических полей в вакууме применяется теорема Остроградского–Гаусса. Она гласит, что поток вектора напряженности электрического поля через произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности зарядов, деленных на ε_0 :

$$\oint_S E_n ds = \frac{1}{\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{\infty} q_i , \tag{1.8}$$

где $\sum_{i=1}^{\infty} q_i$ - сумма зарядов, находящихся внутри замкнутой поверхности S;

$\varepsilon_0 = 8{,}85 * 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

Использование теоремы особенно удобно в случае полей, обладающих заранее известной симметрией, обусловленной симметрией в конфигурации зарядов – источников рассматриваемого поля. При этом удается так выбрать поверхность интегрирования, что поток напряженности сквозь нее можно выразить через искомую напряженность поля, что существенно упрощает вычисления. Используя теорему Остроградского-Гаусса (1.8) и формулу (1.4), можно получить значения напряженности и потенциала полей, созданных следующими заряженными телами:

1. Поле равномерно заряженной бесконечной плоскости:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} , \tag{1.9}$$

где $\sigma = q/S$ - поверхностная плотность заряда на плоскости, q – заряд на участке плоскости площадью S.

2. Поле конденсатора, образованного двумя бесконечными пластинами (рис. 3):

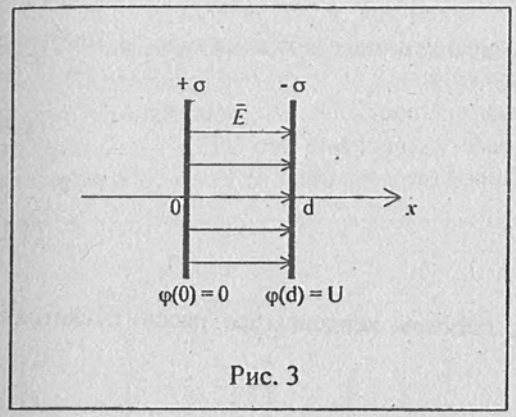


Рис. 3

$$E(x) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ \dfrac{\sigma}{\varepsilon_0}, & 0 \le x \le d; \\ 0, & x > d. \end{cases} \tag{1.10}$$

$$\varphi(x) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ Ex, & 0 \le x \le d; \\ U, & x > d, \end{cases} \tag{1.11}$$

где x – координата, отсчитываемая от пластины с нулевым потенциалом; d - расстояние между пластинами; $U=Ed$ - напряжение на конденсаторе.

3. Поле конденсатора, образованного двумя бесконечно длинными коаксиальными цилиндрами (рис. 4):

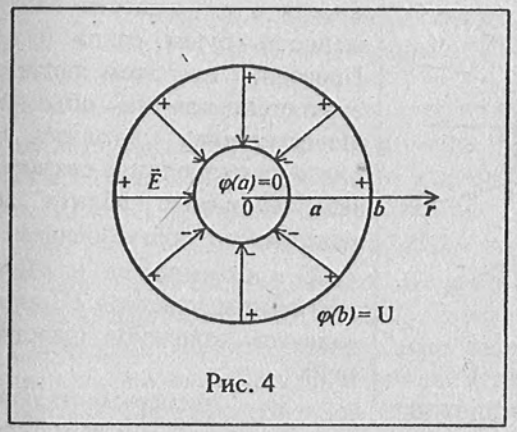


Рис. 4

$$E(r) = \begin{cases} 0, & 0 \le r < a; \\ \dfrac{\tau}{2\pi\varepsilon_0 r}, & a \le r \le b; \\ 0, & r > b. \end{cases} \tag{1.12}$$

$$\varphi(r) = \begin{cases} 0, & 0 \le r < a; \\ \dfrac{\tau}{2\pi\varepsilon_0} ln(r/a), & a \le r \le b; \\ U, & r > b, \end{cases} \tag{1.13}$$

где $\tau = q/l$ - линейная плотность зарядов, q – заряд на участке цилиндра длиной l ; r - расстояние от оси цилиндров до точки расчета напряженности и потенциала; a, b – радиусы внутреннего и внешнего цилиндров; U – напряжение на конденсаторе.

Емкости плоского и цилиндрического конденсаторов даются формулами соответственно:

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{d} , \tag{1.14}$$

где S – площадь пластины,

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0 L}{ln(b/a)} , \tag{1.15}$$

где L – длина цилиндра.

Энергия W, запасенная в электрическом поле конденсатора, и плотность энергии w определяются выражениями:

$$W = \frac{CU^2}{2}, \qquad (1.16)$$

$$w = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2}. \qquad (1.17)$$

Сила притяжения пластин F в плоском конденсаторе рассчитывается по формуле:

$$F = \frac{Eq}{2} = \frac{q^2}{2\varepsilon_0 S}. \qquad (1.18)$$

Внесем проводник с полостью в электрическое поле (рис. 5). Поле вызывает перераспределение зарядов, в результате которого в проводнике и в его полости напряженность будет равна нулю. Проводник при этом является эквипотенциальным объемом. Поверхностная плотность зарядов на проводнике связана с напряженностью вблизи его поверхности соотношением $\sigma = \varepsilon_0 E$ и оказывается наибольшей вблизи участков с малым радиусом кривизны (заострений).

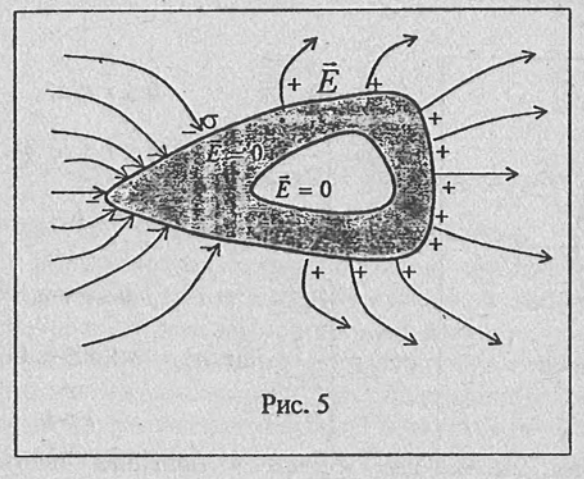


Рис. 5

В экспериментальной части работы будут исследованы электрические поля в плоском и цилиндрическом конденсаторах, а также между электродами специальной формы.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

2.1. Выбор методики эксперимента

В данной работе для исследования электростатических полей выбран метод их моделирования в электролитической ванне. Он основан на том, что слабые токи в электролитах подчиняются закону Ома и связаны с напряженностью поля $\vec{E}$ соотношением :

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} \qquad (2.1)$$

где j – плотность тока, γ - удельная проводимость электролита.

Поле плотности тока в электролите графически представляется линиями плотности тока также, как электростатическое поле силовыми линиями, и, согласно уравнению (2.1), они совпадают. Если необходимо исследовать какое-либо электрическое поле, то металлические модели электродов, создающих его, помещают в ванну с электролитом (рис. 6). Модели электродов должны быть подобны оригиналам по конфигурации, размерам и расположению, а подаваемые на них от источника потенциалы пропорциональны потенциалам на реальных электродах. В ванне возникает электрический ток, линии которого совпадают с силовыми линиями электрического поля.

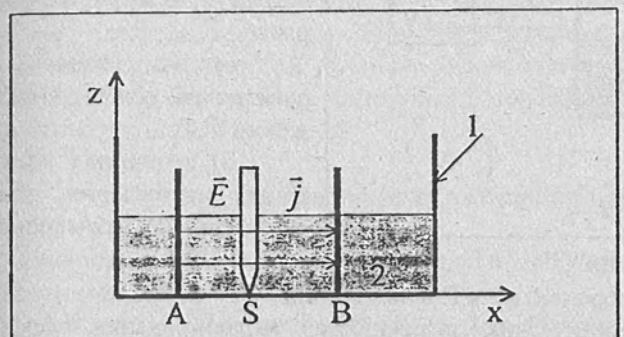


Рис. 6

1- ванна; 2- электролит; S – зонд; A, B – электроды.

Для измерения потенциала в различных точках ванны используют проводник-зонд. Так как ток течет только в электролите, то на границах ванна-электролит и электролит-воздух линии плотности тока параллельны этим поверхностям (рис. 6), т.е. $j_z = 0$. В случае неглубокой ванны это условие распространяется на весь объем электролита (рис. 6), т.е. линии $\vec{j}$ горизонтальны. Таким образом, можно достаточно точно моделировать лишь поля с горизонтальными силовыми линиями, зависящие только от двух координат x и y (плоскопараллельные поля). Такие поля создаются заряженными бесконечно длинными вдоль z цилиндрическими (плоскими) поверхностями. Для их моделирования электроды конечной длины погружают на дно неглубокой ванны и создают на них соответствующие потенциалы, при этом поле $\vec{j}$ в ванне эквивалентно электрическому полю $\vec{E}$ от бесконечно длинных вдоль z электродов.

В экспериментальной части работы будут исследоваться плоскопараллельные поля в неглубокой ванне.

2.2. Экспериментальная установка и требования к ее элементам

Схема установки представлена на рис. 7. В эксперименте используются следующие приборы: генератор сигнала низкой частоты Г3 (1), вольтметр универсальный В7 (2) с зондом (3), электролитическая ванна (4) с набором электродов различной формы (5).

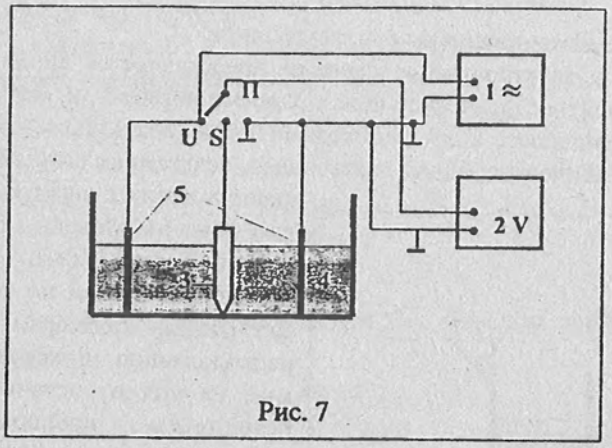


Рис. 7

С генератора переменное напряжение подается на электроды, формируя электрическое поле и токи в ванне. В зависимости от положения переключателя П вольтметр измеряет:

а) напряжение на электродах, если П в положении "U";

б) потенциал поля в точке нахождения зонда относительно заземленного электрода, если П в положении "S";

в) вход вольтметра закорочен, если П в положении "⊥".

Для уменьшения методических погрешностей моделирования электростатических полей к установке предъявляются следующие требования:

1) Требование к электролиту.

Метод моделирования основан на соотношении (2.1). Электролит не должен искажать это соотношение, т. е. должен быть однородным ($\gamma = const$). Если в электролите будут течь заметные токи, то вследствие локального разогрева изменится его проводимость и соотношение (2.1) может нарушиться, поэтому электролит должен быть слабо проводящим. В качестве электролита обычно используется дистилированная вода.

2) Требования к ванне.

Для сохранения подобия линий поля и тока необходимо, чтобы проводимость материала ванны была много меньше проводимости электролита. В этом случае ток не ответвляется на ванну, а протекает лишь по электролиту. В качестве материала ванны обычно применяют органическое стекло.

3) Требования к источнику напряжения.

При использовании источника постоянного тока из-за электролиза изменяется состав электролита и нарушается его однородность. Поэтому в установке применяется источник переменного тока (генератор сигналов Г3).

4) Требования к зонду и вольтметру.

Для минимального искажения зондом исследуемого поля его диаметр должен быть достаточно малым, так чтобы изменение потенциала в пределах зонда было много меньше его абсолютного значения. Входное сопротивление вольтметра должно быть много больше сопротивления участка электролита, к которому он подключается. При этом ответвление тока на вольтметр мало, что делает искажения поля пренебрежимо малыми.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1. Правила техники безопасности при работе на установке

а) Включать установку в сеть только после проверки ее лаборантом или преподавателем.
б) При включенной установке не касаться руками электродов.
в) Смену электродов проводить только при выключенном генераторе.
г) По окончании измерений установку отключить от сети.
д) Дополнительные указания по технике безопасности представлены в инструкции по эксплуатации приборов.

3.2. Подготовка установки к работе

а)Установить в ванну с дистиллированной водой электроды (форма электродов указывается преподавателем).
б) Собрать схему, изображенную на рис. 7, и показать для проверки преподавателю или лаборанту.
в) Поставить переключатель П в положение "U".
г) Подготовить к работе и включить приборы.
д) Подать с генератора Г3 сигнал частоты $f = 5$ кГц и напряжением $U = 5$ В.
е) По вольтметру В7 с помощью генератора установить напряжение на электродах $U = 5$ В.
ж) Поставить переключатель П в положение "S". При этом вольтметр В7 подключен к зонду и измеряет разность потенциалов между зондом и заземленным электродом. Установка готова к работе.

3.3. Задание 1. Исследование электростатического поля плоского конденсатора.

3.3.1. Измерения.

а) В случае установленных в ванну плоских электродов, перемещая зонд от одного электрода к другому вдоль средней линии с шагом $\Delta x = 1$ см, снять зависимость потенциала от расстояния $\varphi = \varphi(x)$ при $x < 0$, $0 \le x \le d$, $x > d$, где $x = 0$, $x = d$ – координаты электродов. Расстояние d устанавливается по указанию преподавателя в пределах от 10 до 20 см.

б) Экспериментально определить четыре эквипотенциальные линии с потенциалами $\varphi = 1$ В, 2 В, 3 В, 4 В.

Для определения эквипотенциальной линии перемещать зонд по ванне, находя точки с одинаковым потенциалом и записывая их координаты. Для каждой линии необходимо определить не менее 7 точек. Проверить, что электроды являются эквипотенциальными поверхностями.

3.3.2. Обработка результатов измерений

а) По результатам измерений построить график зависимости $\varphi = \varphi(x)$. Качественно сравнить экспериментальную кривую с теоретической.
б) Графическим дифференцированием (см. приложение) рассчитать зависимость $E=E(x)$ при $x < 0$, $0 \le x \le d$, $x > d$, построить ее график, провести качественное сравнение с теорией.
в) Исходя из погрешностей измерения напряжения и расстояния между пластинами, рассчитать погрешность измерения E.
г) По результатам измерений построить картину эквипотенциальных и силовых линий электростатического поля плоского конденсатора, образованного двумя бесконечными плоскостями.
д) Используя значения площади пластин S =1 м^2 и пренебрегая искажением поля на их краях, рассчитать следующие характеристики: q и σ - заряд и поверхностную плотность заряда на пластине, C - емкость конденсатора, W и w – энергию и объемную плотность энергии поля, F – силу притяжения пластин. Считая, что в моделируемом конденсаторе диэлектрик отсутствует, диэлектрические свойства электролита не учитывать.
е) Рассчитать поток $\vec{E}$ через плоскую поверхность (S =1 м^2), расположенную внутри конденсатора и наклоненную к силовым линиям под углом $\alpha = 30°$.

3.4. Задание 2. Исследование электростатического поля цилиндрического конденсатора.

3.4.1. Измерения.

а) В случае установленных в ванну коаксиальных цилиндрических электродов, перемещая зонд вдоль радиуса r (r – расстояние от оси цилиндров до зонда) с шагом Δr = 1 см, снять зависимость потенциала $\varphi = \varphi(r)$ при $r < a$, $a \le r \le b$, $r > b$, где a и b – радиусы малого и большого электродов.
б) Экспериментально определить четыре эквипотенциальные линии с потенциалами φ = 1 В, 2 В, 3 В, 4 В, как это указано в пункте 3.3.1.б. Для построения каждой линии использовать не менее 8-10 точек. Проверить, что электроды являются эквипотенциальными поверхностями.

3.4.2. Обработка результатов измерений

а) По результатам измерений построить графики зависимостей $\varphi = \varphi(r)$ и $\varphi = \varphi(ln(r/a))$ при $r < a$, $a \le r \le b$, $r > b$. Качественно сравнить экспериментальные кривые с теоретическими.
б) Графическим дифференцированием в нескольких точках (см. приложение) рассчитать зависимость $E=E(r)$ при $r < a$, $a \le r \le b$, $r > b$. Построить графики $E=E(r)$ и $E=E(1/r)$, провести качественное сравнение их с теорией.

в) По результатам измерений построить картину эквипотенциальных и силовых линий электростатического поля цилиндрического конденсатора, образованного двумя бесконечно длинными цилиндрами.
г) Из графика $\varphi = \varphi(ln(r/a))$, используя формулу (1.13), по тангенсу угла наклона кривой рассчитать линейную плотность заряда τ на электроде. Считая, что в моделируемом конденсаторе диэлектрик отсутствует, диэлектрические свойства электролита не учитывать.
д) Используя значения длины цилиндров L = 1 м и пренебрегая искажением поля на торцах цилиндров, рассчитать по формулам (1.15), (1.16), (1.17) емкость конденсатора C , энергию W и объемную плотность энергии поля w в какой-либо точке поля.
е) Рассчитать потоки $\vec{E}$ через коаксиальные с электродами цилиндрические поверхности радиусов r_1 = 5 см, r_2 = 8 см и длины L = 1 м. Проанализировать полученные результаты.

3.5. Задание 3. Исследование электростатического поля вокруг проводников произвольной формы

3.5.1. Измерения.

а) В случае произвольно установленных в ванну плоского и цилиндрического электродов поместить несимметрично между ними металлическую пластину с полостью. Зафиксировать координаты электродов и пластины.
б) Экспериментально определить четыре эквипотенциальные линии с потенциалами φ = 1 В, 2 В, 3 В, 4 В. Для построения каждой линии необходимо использовать не менее 10 точек. Проверить, что электроды и пластины являются эквипотенциальными поверхностями. Измерить потенциалы в нескольких точках полости.
в) Для расчета напряженности поля E и поверхностной плотности зарядов σ на поверхности пластины с полостью снять распределение потенциала вдоль линии, охватывающей пластину и расположенной на расстоянии l = 3 мм от ее края (не менее 8 точек).

3.5.2. Обработка результатов измерений

а) По результатам измерений построить картину эквипотенциальных и силовых линий электростатического поля.
б) Используя связь напряженности и потенциала (1.6), определить среднюю напряженность электростатического поля вдоль одной силовой линии.
в) По результатам эксперимента рассчитать в нескольких точках напряженность поля E вблизи поверхности пластины с полостью и поверхностную плотность зарядов σ на ней, напряженность поля E внутри полости. Считая, что в моделируемом поле диэлектрик отсутствует, диэлектрические свойства электролита не учитывать.

а) На базе имеющейся аппаратуры разработать схему измерения распределения потенциала электростатического поля, созданного тонким цилиндром (нитью) и заземленной пластиной.

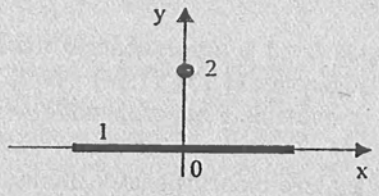


Рис. 8
1- заземленная металлическая пластина;
2- тонкий цилиндрический электрод

б) Расположив цилиндр на перпендикуляре, проходящем через середину пластины, на расстоянии l = 7 см от нее (рис. 8), экспериментально построить картину эквипотенциальных и силовых линий.

в) Экспериментально исследовать зависимость потенциала от расстояния между заземленной пластиной и цилиндром.

г) Для расчета напряженности E и поверхностной плотности зарядов на пластине σ экспериментально исследовать зависимость потенциала от x на расстоянии y = 3 мм от пластины $\varphi = \varphi(x, y = 3$ мм).

д) По результатам измерений построить графики $\varphi = \varphi(0, y)$; $\varphi = \varphi(x, y = 3$ мм); $E = E(x, 0)$; $\sigma = \sigma(x)$.

е) Используя метод зеркальных отображений, получить теоретические зависимости $\varphi = \varphi(0, y)$, $E = E(x, 0)$ и $\sigma = \sigma(x)$. По напряжению между цилиндром и пластиной рассчитать линейную плотность зарядов τ на цилиндре. Сравнить теоретические результаты с результатами эксперимента.

ж) По результатам эксперимента рассчитать силу F на единицу длины, с которой притягиваются цилиндр и пластина.

ВОПРОСЫ ПО ТЕМЕ

1. Закон Кулона. Напряженность и потенциал электрического поля. Связь между ними. Расчет напряженности и потенциала с помощью закона Кулона и принципа суперпозиции.
2. Поток напряженности. Теорема Остроградского-Гаусса.
3. Расчет поля равномерно заряженных:
   а) плоскости, двух плоскостей (плоский конденсатор),
   б) сферы,
   в) шара,
   г) бесконечно длинных нити и цилиндра.
4. Емкость плоского и цилиндрического конденсаторов.
5. Энергия и плотность энергии электрического поля.
6. Поля вокруг проводников. Электростатическая защита.
7. Метод моделирования электростатических полей в электролитической ванне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. – М.: Наука, 1988.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М., Милковская Л.В. Курс физики. Т. 2. М.: Высшая школа, 1977.
3. Калашников С.Г. Электричество. - М.: Наука, 1985.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. Т. 3. - М.: Наука, 1983.

Графическое дифференцирование

Известно, что производная dy/dx равна тангенсу угла наклона касательной к кривой $y=y(x)$ в соответствующей точке к положительному направлению оси X. Это позволяет по известному графику $y=y(x)$ провести графическое дифференцирование. Так, например, при исследовании электрических полей получают экспериментальную зависимость $\varphi=\varphi(x)$ и строят ее график (рис. 9).

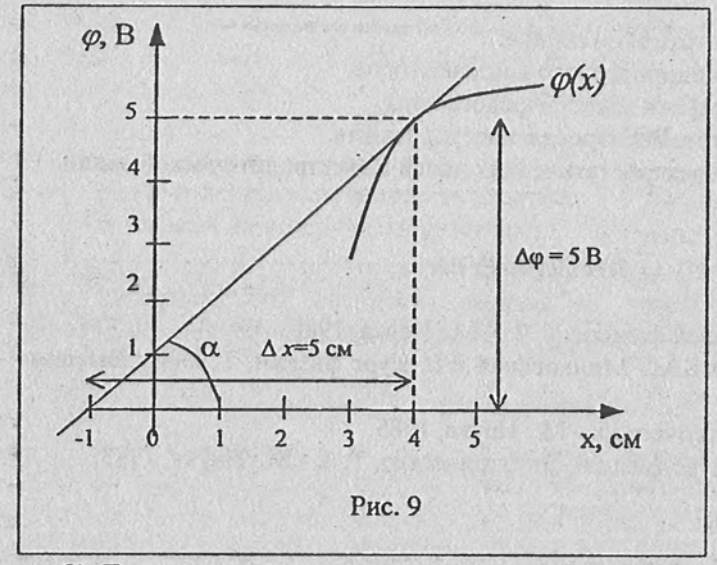


Рис. 9

Согласно выражению (1.5) для одномерного поля, когда E и φ зависят лишь от одной координаты, имеем:

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

Например, найдем значение напряженности E в точке $x = 4$ см. Для этого в данной точке проводим касательную к кривой $\varphi=\varphi(x)$ и определяем $\Delta\varphi$ и Δx (см. рис. 9). Тогда

$$\frac{d\varphi}{dx} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta x} = \frac{5\text{ В}}{5*10^{-2}\text{ м}} = 100\text{ В/м},$$

откуда E_x = - 100 В/м. Знак " – " показывает, что напряженность $\vec{E}$ направлена против оси X.

УДК 537.85

Лабораторная работа № 2-30

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Т. В. Кожевникова, Л. А. Кузнецов, Т. С. Царевская, Г. И. Шишков

Дано краткое описание электрических явлений в диэлектрике, помещенном в однородное электрическое поле. Описаны экспериментальная установка по исследованию свойств диэлектриков и порядок работы на ней.

Введение

В связи с широким использованием в электротехнике, радиоэлектронике, автоматике диэлектрических материалов проявляется значительный интерес к их электрическим характеристикам. Диэлектрики используются в качестве изолирующих элементов, входят в состав электрических конденсаторов, применяются как подложки для формирования радиосхем в микроэлектронике. На основе сегнетоэлектриков изготавливаются конденсаторы большой емкости и малых размеров. Пироэлектрические свойства диэлектриков используются для регистрации излучения. Пьезоэлектрики применяются как датчики давления, источники ультразвука. Пьезокварц – основной элемент в высокостабильных кварцевых генераторах. Следовательно, изучение электрических свойств материалов и электрических полей в них – важная инженерная задача.

Цель данной работы – определение диэлектрической проницаемости и поляризационных характеристик различных диэлектриков, изучение электрических полей в них, исследование линейности и дисперсии диэлектрических свойств материалов.

В работе изучается экспериментальный метод измерения емкости конденсаторов и диэлектрической проницаемости материалов.

I. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Рассмотрим характер электрических явлений в диэлектрике, помещенном в однородное электрическое поле. Пусть имеется заряженный плоский конденсатор с поверхностной плотностью свободных зарядов на обкладках $\pm\sigma$ (рис. I,а). Напряженность поля между пластинами в вакууме $\vec{E}_0$ вычисляется по формуле

$$E_0 = \sigma/\varepsilon_0 , \qquad (I.1)$$

где $\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Внесем в это поле пластину однородного изотропного диэлектрика (рис. I,б). Под действием поля диэлектрик поляризуется и на его поверхности появляются связанные заряды с поверхностной плотностью $\pm\sigma'$. Эти заряды создают в диэлектрике поле $\vec{E}'$ (рис. I,в), которое направлено против внешнего поля $\vec{E}_0$ и имеет величину

$$E' = \sigma'/\varepsilon_0 . \qquad (I.2)$$

Результирующее поле в диэлектрике, согласно принципу суперпозиции, вычисляется по формуле

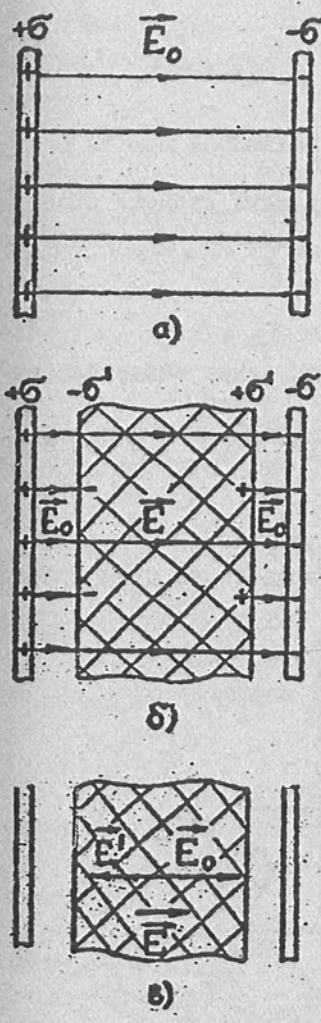


Рис.I

$$E = E_0 - E' = \frac{\sigma - \sigma'}{\varepsilon_0} . \qquad (I.3)$$

Степень поляризованности диэлектрика характеризуется вектором поляризации

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta V} , \qquad (I.4)$$

где $\Delta\vec{p}$ – электрический момент объема ΔV. В электрическом поле вектор поляризации $\vec{P}$ пропорционален напряженности:

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E} , \qquad (I.5)$$

где χ – диэлектрическая восприимчивость вещества. Модуль вектора поляризации $\vec{P}$ связан с плотностью связанных зарядов σ' соотношением

$$P_n = \sigma' . \qquad (I.6)$$

Здесь P_n – проекция вектора на нормаль к поверхности диэлектрика.

Используя формулы (I.3), (I.5) и (I.6), легко показать, что в рассматриваемой задаче

$$E = E_0/\varepsilon , \qquad (I.7)$$

где $\varepsilon = 1 + \chi$ – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, которая характеризует, во сколько раз электрическое поле свободных зарядов, помещенных в диэлектрическую среду, меньше, чем поле, создаваемое теми же зарядами в вакууме.

В диэлектрике вводится вектор электрической индукции $\vec{D}$:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} , \qquad (I.8)$$

который определяется только свободными зарядами и, согласно формулам (I.3) и (I.6), вычисляется как

$$D_n = \sigma . \qquad (I.9)$$

Из-за отсутствия на поверхности диэлектрика свободных зарядов в рассматриваемой задаче $\vec{D}$ в вакууме и в диэлектрике совпадают. В изотропном диэлектрике вектор $\vec{D}$, как следует из (I.8), связан с $\vec{E}$ соотношением

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}, \qquad \varepsilon = \text{const}. \tag{I.10}$$

где для линейного диэлектрика

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И УСТАНОВКА

В данной рабсте исследование диэлектрических свойств проводится методом измерения емкости конденсатора. Емкость C плоского конденсатора находится по формуле

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon S/d; \tag{2.1}$$

S – площадь пластины конденсатора; d – расстояние между пластинами.

Измеряя емкость конденсатора с диэлектриком (C) и без него (C_0), по формуле

$$\varepsilon = C/C_0 \tag{2.2}$$

определяем диэлектрическую проницаемость материала.

Измерение емкости конденсатора осуществляется по схеме, представленной на рис.2.

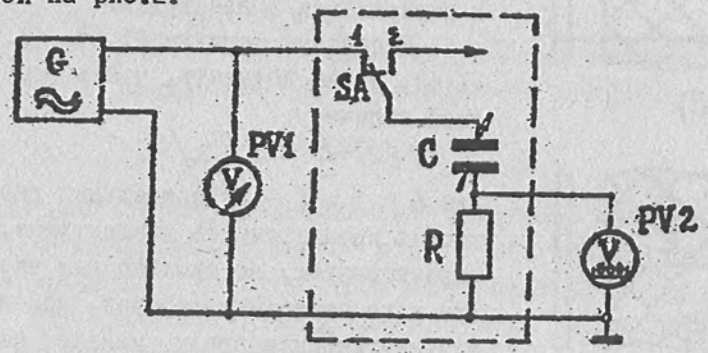


Рис.2

С генератора на RC-цепь подается переменное напряжение $U_1 = U_{m1}\cos\omega t$, где U_{m1} – амплитуда напряжения, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, f – частота.

Вольтметр PV_1 измеряет эффективное значение этого напряжения U_1, которое связано с амплитудным U_{m1} соотношением

$$U_{m1} = \sqrt{2}\,U_1. \tag{2.3}$$

Если емкостное сопротивление $X_C = 1/\omega C \gg R$, то с точностью порядка $(R/X_C)^2$ всё напряжение U_1 падает на емкости. Частота f определяется по шкале генератора. В RC-цепи течет ток $i = I_m\cos(\omega t - \varphi)$, где I_m – амплитуда тока; φ – разность фаз между током и напряжением на RC-цепи.

Амплитуда напряжения U_{m2} на сопротивлении R согласно закону Ома дается выражением

$$U_{m2} = I_m R. \tag{2.4}$$

Вольтметр PV_2 измеряет эффективное значение напряжения U_2 на сопротивлении, которое связано с амплитудным значением U_{m2} соотношением, аналогичным (2.3). Тогда для амплитуды тока через емкость из (2.4) с учетом (2.3) имеем

$$I_m = \sqrt{2}\,U_2/R. \tag{2.5}$$

По закону Ома для емкости можно записать:

$$U_{m1} = X_C I_m = I_m/(2\pi f C). \tag{2.6}$$

Подставляя выражения (2.3), (2.4) и (2.5) в (2.6), для емкости конденсатора получим

$$C = U_2/(2\pi f U_1 R). \tag{2.7}$$

Измеряя напряжение U_1 на RC-цепи ($X_C \gg R$), напряжение U_2 на сопротивлении R и частоту переменного сигнала f, по формуле (2.7) определяем емкость исследуемого конденсатора.

Напряженность электрического поля $\vec{E}$ в плоском конденсаторе связана с напряжением U_1 на нем соотношением

$$E = U_1/d. \tag{2.8}$$

По измеренному напряжению U_1 с помощью формулы (2.8) можно определить эффективное значение напряженности переменного электрического поля в диэлектрике.

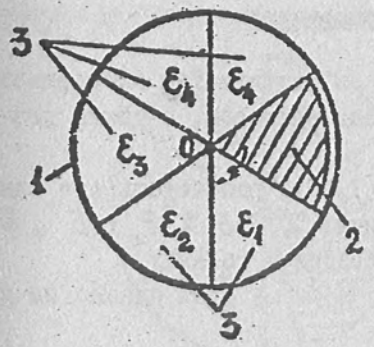


Рис.3

В эксперименте используются следующие приборы: генератор сигналов низкочастотный (G), вольтметр стрелочный ($PV1$), вольтметр цифровой ($PV2$). На макете установлены резистор R, конденсатор переменной емкости C и переключатель SA. Конструкция конденсатора такова. Неподвижная пластина имеет форму круга и разделена на 6 секторов (рис.3), 4 из которых покрыты диэлектриками: оргстеклом, гетинаксом, фторопластом и стеклотекстолитом – одинаковой толщины (d = 2 мм). На пятый сектор наклеен более тонкий стеклотекстолит. Шестой сектор оставлен свободным. Верхняя подвижная пластина имеет форму сектора, равного одному из секторов нижней. Она

закреплена на оси О и может свободно вращаться, перекрывая последовательно каждый сектор нижней пластины и образуя с ней конденсаторы с различными диэлектриками. Расстояние между пластинами конденсатора d = 2 мм. Для увеличения емкости конденсатор изготовлен из нескольких описанных выше секций, соединенных параллельно.

Обозначения на рисунке: I – неподвижная пластина, 2 – подвижная пластина, 3 – прослойка из диэлектрика.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ

3.I. Подготовка установки к работе

а) Поставить переключатель SA на макете в положение I и подключить к макету приборы согласно схеме на рис.2.

б) Подготовить к работе и включить приборы.

в) Подать с генератора синусоидальный сигнал частотой f = 60 кГц и напряжением $U_1 \simeq$ 5 В.

г) По вольтметру $PV1$ установить U_1 = 5 В.

д) Вольтметром $PV2$ измерить напряжение U_2 на резисторе R .

3.2. Измерение диэлектрической проницаемости и характеристик поляризации материалов

Вращая подвижную пластину, измерить напряжение U_2 для конденсатора без диэлектрика и 4-х конденсаторов с диэлектриками одинаковой толщины. При этом напряжение U_1 поддерживать постоянным.

Обработка результатов измерений

а) Используя формулы (2.7) и (2.2), по результатам эксперимента рассчитать емкости всех исследуемых конденсаторов, а также диэлектрические проницаемости материалов.

б) Используя формулы (2.8) и (I.I – I.I0), рассчитать для одного из диэлектриков следующие характеристики: χ , E , E_0 , E' , P , D , σ , σ'. Все результаты расчетов свести в таблицу.

в) Рассчитать погрешности измерений C и ε для одного из диэлектриков.

3.3. Исследование зависимости ε от напряженности электрического поля (линейность среды)

Изменяя генератором напряжение U_1 от 0 до 5 В с интервалом ΔU_1 = I В, исследовать зависимость $U_2 = F(U_1)$ для конденсатора с произвольным диэлектриком и без него.

Обработка результатов измерений

По результатам измерений построить график зависимости $\varepsilon = F(E)$. Проанализировать полученную зависимость.

3.4. Исследование зависимости ε от частоты (дисперсия среды)

а) Установить генератором следующие параметры сигнала: f = = 20 кГц, U_1 = 5 В.

б) Изменяя частоту генератора от 20 кГц до 200 кГц с интервалом Δf = 20 кГц, исследовать зависимость $U_2 = F(f)$ для конденсатора с произвольным диэлектриком и без него. При этом напряжение U_1 поддерживать постоянным.

Обработка результатов измерений

а) По результатам измерений рассчитать емкостные сопротивления $X_C = 1/\omega C = U_1 R / U_2$ и построить графики зависимостей $X_C = F(1/f)$. Сравнить экспериментальные зависимости с теоретическими.

б) По экспериментальным данным построить график зависимости $\varepsilon = F(f)$. Проанализировать полученную зависимость.

3.5. Исследование зависимости емкости конденсатора от угла перекрытия диэлектрика верхней пластиной

На рис. 4,а приведено положение нижней и верхней пластины конденсатора. Верхняя пластина частично перекрывает один из секторов

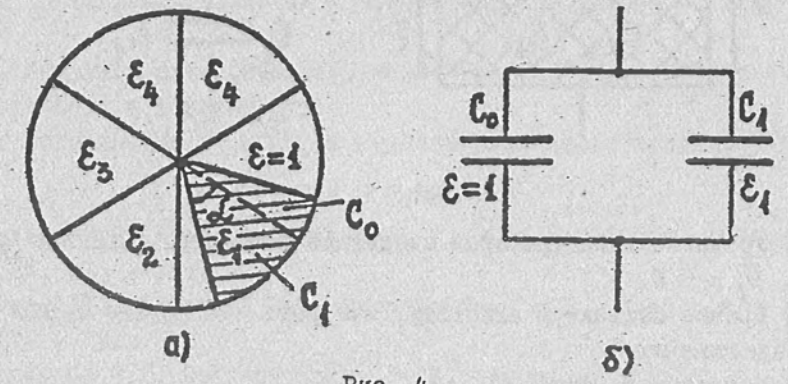


Рис. 4

нижней пластины с диэлектриком. Угол α – угол перекрытия диэлект-

рика верхней пластиной.

а) Установить генератором следующие параметры сигнала: f = 60 кГц, U_1 = 5 В.

б) Вращая подвижную пластину в пределах от $\alpha = 0^0$ до $\alpha = 60^0$ с интервалом $\Delta\alpha = 10^0$, исследовать зависимость $U_2 = F(\alpha)$. При этом U_1 поддерживать постоянным.

Обработка результатов измерений

а) По результатам измерений рассчитать емкость конденсатора для различных углов α.

б) Используя эквивалентную схему, представленную на рис. 4,б, получить теоретическую зависимость $C = F(\alpha)$. С учетом результатов эксперимента, полученных в п. 3.2, построить график теоретической зависимости.

в) Нанести на график теоретической зависимости $C = F(\alpha)$ экспериментальные точки. Сравнить результаты теории и эксперимента.

3.6. Измерение толщины диэлектрической прокладки

На рис.5.а приведен конденсатор с частичным заполнением диэлектриком пространства между пластинами. Эквивалентная схема такого конденсатора дана на рис. 5,б.

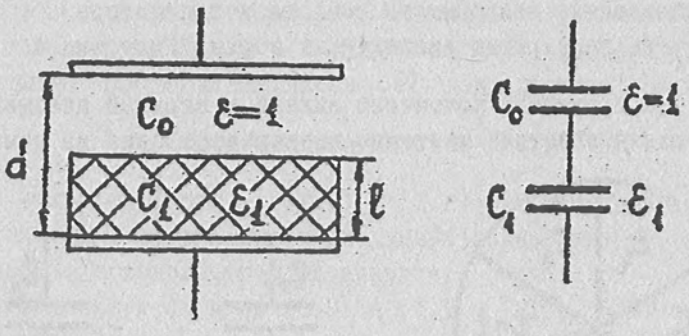


Рис. 5

а) Установить генератором следующие параметры сигнала: f = =60 кГц, U_1 = 5 В.

б) Вращая подвижную пластину, измерить напряжение U_2 для следующих конденсаторов:

1) без диэлектрика;

2) со стеклотекстолитом толщиной 2 мм (заполнено все пространство между пластинами);

3) со стеклотекстолитом толщиной, меньшей расстояния между пластинами (частично заполненное пространство): $\ell < d$.

При этом напряжение U_1 поддерживать постоянным.

Обработка результатов измерений

а) По результатам измерений рассчитать емкости соответствующих конденсаторов.

б) Используя эквивалентную схему и результаты эксперимента, рассчитать толщину диэлектрической пластины ℓ.

4. УИРС

а) На базе имеющейся аппаратуры разработать схему для исследования зависимости емкости конденсатора от угла перекрытия верхней пластиной сектора с диэлектриком толщиной $\ell < d$ (d – расстояние между пластинами).

б) Получить теоретическую зависимость $C = F(\alpha)$.

в) Экспериментально исследовать зависимость $C = F(\alpha)$. Сравнить результаты теории и эксперимента.

г) Вычислить по результатам эксперимента наибольшую энергию, запасенную в поляризованном диэлектрике.

ВОПРОСЫ ПО ТЕМЕ

1. Назначение и функциональные возможности используемой в установке аппаратуры.

2. Полярные и неполярные молекулы.

3. Поляризация полярных и неполярных диэлектриков. Вектор поляризации.

4. Индукция электрического поля. Теорема Гаусса для электростатического поля в диэлектрике.

5. Условия для $\vec{E}$ и $\vec{D}$ на границе двух диэлектриков.

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. – М.: Наука, 1978. С. 56–78, 85, 263 – 264.

2. Детлаф А.А., Яворский В.М. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1989. С. 170 – 181.

3. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Высш. шк., 1985. С. 72-106.

УДК 537.85

Лабораторная работа № 2-2

ИЗУЧЕНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ЭДС

В. Б. Доброхотова, Т. С. Царевская, Ю. Н. Шутов, В. В. Щербаков

Дано краткое описание характеристик и законов электрического тока. Представлена экспериментальная установка для определения ЭДС элемента компенсационным методом.

Актуальность работы

Измерения напряжений и ЭДС в электрических цепях являются основными. Существует большое многообразие методов этих измерений, применяются различные измерительные приборы: прямопоказывающие вольтметр со стрелочными индикаторами, цифровые вольтметры и интегрирующие цифровые вольтметры. Самыми простыми (по принципу действия) являются прямопоказывающие вольтметры со стрелочными индикаторами, более сложные - цифровые вольтметры. В основе работы этих вольтметров лежат разные методы измерений. В данной работе изучается компенсационный метод, который является универсальным.

Компенсационные методы измерения напряжения широко применяются в электро- и радиотехнике. Они используются при проверке электрических и радиоэлектронных измерительных приборов и источников напряжений для измерения с повышенной точностью напряжений и ЭДС, действующих в цепях, содержащих сопротивления больших величин.

На компенсационном методе основана работа компенсационных преобразователей напряжения в современных электронных цифровых вольтметрах. Поэтому современный инженер должен иметь представление о сущности и достоинствах этого метода и владеть навыками измерения напряжения с его помощью.

Цель работы – выработать у студентов четкие представления о физических величинах, описывающих электрический ток, изучить законы Ома и Кирхгофа для постоянного тока, освоить один из основных методов измерения напряжения - метод компенсации и его реализацию на постоянном токе.

1. Теоретическая часть

1.1. Характеристики электрического тока

Электрический ток представляет собой упорядоченное движение носителей электрических зарядов. За направление электрического тока условились принимать направление движения положительных носителей заряда. Основными количественными характеристиками электрического тока служат две величины: вектор плотности тока и сила тока.

Вектор плотности тока $\vec{j}$ численно равен заряду, проходящему в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную к направлению перемещения зарядов, а направление $\vec{j}$ совпадает с направлением скорости $\vec{V}$ движения положительных носителей заряда

$$\vec{j} = en\vec{V}, \qquad (1.1)$$

где n - концентрация носителей заряда одного знака; e - заряд отдельной частицы; $\vec{V}$ - вектор скорости упорядоченного движения носителя. Формула относится к случаю, когда ток образован движением одинаковых заряженных частиц.

Сила тока I численно равна заряду, проходящему в единицу времени через полное сечение проводника:

$$I = dq / dt. \qquad (1.2)$$

Сила тока через любую поверхность S вычисляется по формуле

$$I = \int_S \vec{j}\, d\vec{S}. \qquad (1.3)$$

Ток, не изменяющийся во времени, называется стационарным или постоянным. Для постоянного тока величина I одинакова для любого поперечного сечения проводника. В этой работе только такой ток и будет рассматриваться.

1.2. Электродвижущая сила. Закон Ома

Если в проводнике создать потенциальное электрическое поле напряженностью $\vec{E}_{кул}$, то положительные носители тока в этом поле будут перемещаться из точки с большим потенциалом φ_2 в точку с меньшим потенциалом φ_1 (рис. 1). Работа, совершенная кулоновскими силами по перемещению единичного положительного заряда из точки 2 в точку 1, называется разностью потенциалов между этими точками.

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{(A_{\text{к ул}})_{21}}{q} = \int_2^1 \vec{E}_{\text{к ул}} d\vec{l}. \qquad (1.4)$$

Такое перемещение носителей тока очень быстро приведет к выравниванию потенциалов точек 1 и 2 и прекращению тока.

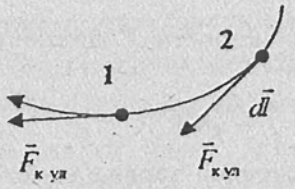


Рис. 1

Для того чтобы сила тока не менялась в течение длительного промежутка времени, необходимо, чтобы разность потенциалов между точками поддерживалась постоянной, т.е. кроме кулоновских сил должны действовать силы другой природы, называемые сторонними. Устройство, где действуют сторонние силы, называется источником (генератором) тока. На рис. 2 пунктиром выделена эквивалентная схема неоднородного участка цепи.

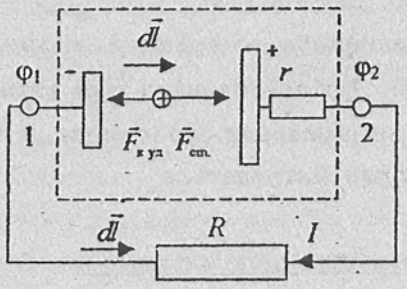


Рис. 2

Внутри источника тока действуют и сторонние, и кулоновские силы. Их направления противоположны. Под действием сторонних сил положительные заряды перемещаются от электрода с меньшим потенциалом φ_1 к электроду с большим потенциалом

φ_2. Природа сторонних сил различна. В гальванических элементах, например, непрерывное восстановление разности потенциалов на полюсах является результатом химических реакций. Так как внутри источника есть потери энергии, вводят понятие внутреннего сопротивления (здесь r).

Работа, совершенная сторонними силами на участке $1r2$ (рис. 2) по перемещению единичного положительного заряда, называется электродвижущей силой (ЭДС) источника:

$$\varepsilon = \varepsilon_{1r2} = \frac{(A_{\text{ст}})_{1r2}}{q} = \frac{\int_{1r2} \vec{F}_{\text{ст}} d\vec{l}}{q} = \int_{1r2} \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l}, \qquad (1.5)$$

где $\vec{E}_{\text{ст}}$ - напряженность поля сторонних сил. Стороннее поле в принципе не потенциально, поэтому величина ЭДС зависит от формы пути интегрирования в (1.5).

Величина U, численно равная работе, совершенной сторонними и кулоновскими силами по перемещению единичного положительного заряда от точки 1 к точке 2 (рис.2), называется падением напряжения на этом участке:

$$U_{1r2} = \frac{(A_{\text{к ул}})_{12} + (A_{\text{ст}})_{1r2}}{q} = \int_1^2 \vec{E}_{\text{к ул}} d\vec{l} = \int_{1r2} \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l}. \qquad (1.6)$$

С учетом (1.4) и (1.5) формулу (1.6) можно записать в виде

$$U_{1r2} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon. \qquad (1.6а)$$

Плотность тока $\vec{j}$ и напряженности кулоновского и стороннего полей ($\vec{E}_{\text{к ул}}$ и $\vec{E}_{\text{ст}}$) связаны между собой соотношением

$$\vec{j} = \gamma(\vec{E}_{\text{к ул}} + \vec{E}_{\text{ст}}), \qquad (1.7)$$

где γ - удельная проводимость (или электропроводность) данного материала. Величина обратная электропроводности - удельное сопротивление материала.

$$\rho = 1/\gamma. \qquad (1.8)$$

Соотношение (1.7) называется законом Ома в дифференциальной форме. Если величина $\vec{j}$ одинакова во всех точках поперечного сечения проводника, то из (1.3) получим:

$$j = I/S, \qquad (1.9)$$

где S - площадь поперечного сечения, перпендикулярного $\vec{j}$.

Мощность, развиваемая током на рассматриваемом участке цепи, определяется работой сторонних сил электростатического поля в единицу времени и равна

$$P = U_{12}I = (\varphi_1 - \varphi_2)I + \varepsilon I. \qquad (1.10)$$

При этом количество теплоты $dQ = I^2 r dt$, выделяемое в цепи за время dt, в соответствии с законом Джоуля-Ленца будет равно работе $dA = Pdt$, совершаемой током за время dt.

$$I^2 r dt = Pdt = (\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon) I dt. \qquad (1.11)$$

Из (1.11) имеем

$$Ir = (\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon). \qquad (1.12)$$

Формула (1.12) выражает закон Ома для неоднородного участка цепи.

Если участок цепи однородный ($\vec{E}_{ст} = 0$), например, 1 R 2 (на рис. 2 - это внешний участок цепи с сопротивлением R), падение напряжения на нем совпадает с разностью потенциалов на концах участка и закон Ома для этого участка цепи

$$U_{1R2} = \varphi_1 - \varphi_2 = -IR. \qquad (1.13)$$

Знак "-" получился из-за того, что перемещение $d\vec{l}$ направлено навстречу току $\vec{j}$. Подставив (1.13) в (1.12), получим закон Ома для замкнутой цепи

$$IR + Ir = \varepsilon. \qquad (1.14)$$

Из (1.12) видно, что ЭДС источника равна разности потенциалов на его клеммах в случаях, если он разомкнут ($I=0$) или равно нулю его внутреннее сопротивление ($r=0$). Так как обычно $r \neq 0$, ясно, что нельзя точно измерить ЭДС с помощью вольтметра, подключенного к полюсам источника. Его показания будут отличаться от ЭДС на величину падения напряжения внутри источника - (Ir).

1.3. Правила Кирхгофа

Расчет сложных разветвленных цепей значительно упрощается, если пользоваться правилами, сформулированными Кирхгофом. Узлом называется точка, в которой сходятся более чем два проводника. Току, текущему к узлу, присваивается один знак (плюс или минус), текушему от узла - другой знак (минус или плюс).

Первое правило Кирхгофа. Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_k I_k = 0.$$

Например, для рис. 3: $I_1 + I_2 - I_3 = 0$.

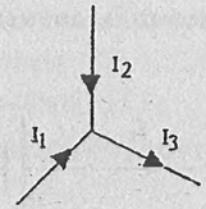


Рис. 3

Второе правило Кирхгофа относится к любому выделенному в разветвленной цепи замкнутому контуру. Оно формулируется следующим образом: алгебраическая сумма ЭДС, действующих в замкнутом контуре, равна алгебраической сумме произведений силы тока на сопротивление отдельных участков этого контура:

$$\sum_k I_k R_k = \sum_i \varepsilon_i.$$

Ток и величина $I_k R_k$ считаются положительными, если направление тока совпадает с выбранным направлением обхода контура. Если направление тока противоположно выбранному направлению обхода, то он и величина $I_k R_k$ считаются отрицательными. ЭДС считается положительной, если направление поля сторонних сил совпадает с выбранным направлением обхода. В противном случае ЭДС считается отрицательной.

2. Экспериментальная часть

2.1. Сущность метода компенсации

Для точного измерения ЭДС элемента путем сравнения ее с ЭДС другого эталонного элемента используется метод компенсации. Схема этого метода показана на рис. 4. Два источника с ЭДС ε и ε_x ($\varepsilon > \varepsilon_x$) включены навстречу друг другу, т.е. к точке А подключены положительные полюса обоих источников.

Элемент с большей ЭДС замкнут непосредственно на сопротивление R_{AB}. Другой элемент, величину ЭДС которого ε_x надо измерить, замкнут через гальванометр на часть этого сопротивления, а именно на R_{AC}.

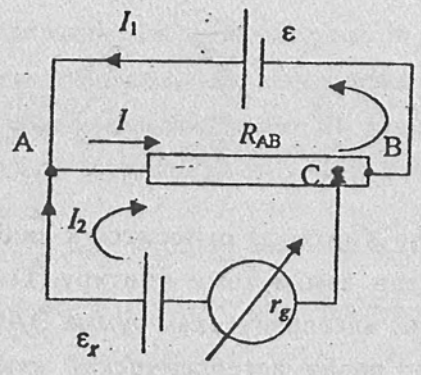


Рис. 4

Точка С соответствует положению скользящего контакта на сопротивлении АВ. Так как $\varepsilon > \varepsilon_x$, на сопротивлении АВ всегда найдется такая точка C_x, разность потенциалов между которой и точкой А будет равна разности потенциалов на клеммах элемента ε_x. При этом ток через гальванометр и элемент ε_x будет отсутствовать ($I_2=0$) и закон Ома (1.11) для участка цепи $A\varepsilon_x C_x$ можно записать так:

$$(\varphi_A - \varphi_{C_x}) - \varepsilon_x = -I_2(r_x + r_g) = 0, \qquad (2.1)$$

где r_g - сопротивление гальванометра; r_x - сопротивление элемента ε_x.

В этом случае элемент ε_x ведет себя как разомкнутый ("скомпенсированный"). Условие

$$\varepsilon_x = \varphi_A - \varphi_{C_x} \qquad (2.2)$$

называется условием компенсации, которое теоретически не накладывает ограничений на величины сопротивлений r_x и r_g. При смещении скользящего контакта С из точки компенсации C_x условие компенсации нарушается, и гальванометр показывает величину тока ($I_2 \neq 0$) того или иного направления.

Если выбрать направления токов, как показано на рис. 4, и применить к рассматриваемой схеме правила Кирхгофа, то первое правило для точек А (или С) даст:

$$I_1 + I_2 - I = 0. \qquad (2.3)$$

Второе правило для замкнутых контуров $AC\varepsilon B\varepsilon A$ и $AC\varepsilon_x A$ приводит к уравнениям:

$$I_1(r + R_{CB}) + IR_{AC} = \varepsilon, \qquad (2.4)$$

$$I_2(r_x + r_g) + IR_{AC} = \varepsilon_x, \qquad (2.5)$$

где r - внутреннее сопротивление элемента ε.

Система трех уравнений (2.3-2.5) позволяет определить все неизвестные токи. Однако мы ограничимся рассмотрением только случая, когда выполняется условие компенсации (2.2). При этом $I_2=0$; $I=I_1$.

Обозначим сопротивление R_{AC} при компенсации просто R_x, а R_{AB} через R. Тогда из (2.3-2.5) имеем:

$$I_1(r+R) = \varepsilon, \qquad I_1 R_x = \varepsilon_x \qquad (2.6)$$

где $R = R_{AB} = R_{AC} + R_{CB}$; $R_x = R_{ACx}$.

Отсюда следует:

$$\varepsilon_x = \varepsilon \frac{R_x}{r + R}. \qquad (2.7)$$

В это уравнение входят сопротивления r, R, R_x. Чтобы не измерять их, применяется следующий метод. Опыт повторяют, заменив элемент ε_x на элемент с ЭДС $\varepsilon_1 < \varepsilon$, оставляя все параметры схемы неизменными. Ток через гальванометр не пойдет при новом

положении скользящего контакта C_l и новом значении сопротивления $R_{ACl} = R_l$. Тогда аналогично (2.7) можно записать:

$$\varepsilon_l = \varepsilon \frac{R_l}{r + R}. \qquad (2.8)$$

Исключив из (2.7) и (2.8) $(r+R)$, получим

$$\varepsilon_x = \varepsilon_l \frac{R_x}{R_l}. \qquad (2.9)$$

Равенство (2.9) лежит в основе измерения ЭДС методом компенсации. В качестве элемента с известной ЭДС обычно выбирают источник тока, называемый нормальным элементом, величина ЭДС которого известна с высокой степенью точности. В электрической измерительной технике нормальные элементы играют роль эталонов.

2.2. Выбор методики эксперимента. Метод вилки

Для практического измерения ЭДС компенсационным методом надо как можно точнее зафиксировать положение скользящего контакта С в моменты выполнения условия компенсации, когда ток I_2 обращается в нуль ($I_2 = 0$). При этом стрелка регистрирующего прибора гальванометра находится в центральном неотклоненном положении (на нулевой риске).

Однако при снятии точной зависимости показаний гальванометра I_g от положения l_{AC} контакта С (нуль отсчета длины l помещен в точку А), получается целая область, называемая "мертвой зоной", в которой $I_g = 0$ (рис. 5).

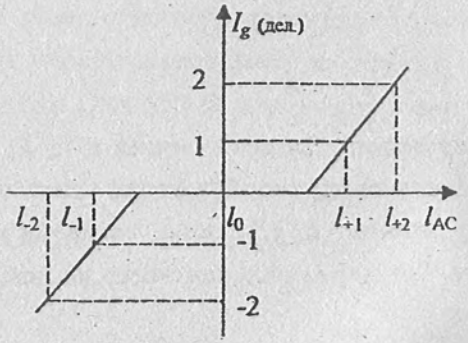


Рис. 5

Размеры зоны могут зависеть от времени из-за вибраций и т.д. В этой области чувствительность метода равна нулю. При неоднократных измерениях нуль гальванометра получается с равной вероятностью при любом положении l_{AC} из "мертвой зоны".

Чтобы найти истинное положение точки компенсации l_0, можно воспользоваться методом "вилки", сущность которого заключается в следующем. Линейные части кривой I_g (l_{AC}) идут симметрично относительно точки l_0 (в области малых токов -1-2 деления на шкале гальванометра); поэтому, зафиксировав положение контакта С, при котором стрелка гальванометра сначала отклонена на несколько "чувствительных" делений влево, а затем на такое же число делений вправо (например, ±1 дел.), l_0 находим как

$$l_0 = (l_{+1} + l_{-1})/2. \qquad (2.10)$$

Истинное положение компенсации найдено. Необходимо отметить, что метод вилки можно применять при условии $I_2 << I_1$. Это условие выполняется при $r_x + r_g >> R_{AC}$.

2.3. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 6) содержит вертикально

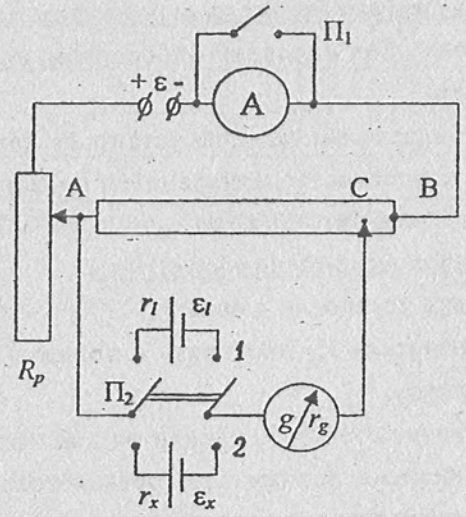


Рис. 6

расположенный реохорд (АСВ) с метрической шкалой и подвижным контактом С на кронштейне.

В нее входят: ε - источник постоянного тока *с* достаточно большой ЭДС; ε_x - исследуемый источник; ε_l - эталонный источник (ε_l =0,5 В); А - миллиамперметр, используется для измерения силы тока в цепи питания; *g* - нуль-гальванометр, служит для определения положения точки компенсации.

Переключатель $П_1$ служит для замыкания миллиамперметра (в случае протекания больших токов). Переключатель $П_2$ служит для поочередного включения источников ε_l (позиция 1) и ε_x (позиция 2). R_p - переменное сопротивление (позволяет изменить силу тока в цепи питания). Измерения ε_x производятся при силе тока в цепи питания, заданной преподавателем. Сопротивление АВ (реохорд) изготавливается из длинной однородной проволоки с большим удельным сопротивлением, так что отношение R_x/R_l в (2.9) можно заменить отношением соответствующих длин l_{AC}: l_x/l_l.

Тогда окончательная расчетная формула для определения ЭДС неизвестного элемента примет вид

$$\varepsilon_x = \varepsilon_l \frac{l_x}{l_l}. \qquad (2.11)$$

2.4. Правила техники безопасности при выполнении работы

1. Установку без проверки лаборантом или преподавателем не включать.

2. Не оставлять работающую установку без надзора.

3. После производства измерений и проверки их лаборантом установку отключить от сети.

2.5. Порядок выполнения измерения

1. Включить установку в сеть.

2. Переключатель $П_2$ поставить в положение 1, при этом включен элемент ε_l.

3. Найти точку отсчета, передвигая контакт С до тех пор, пока гальванометр не покажет отсутствие тока; записать показание l'_{0l}. Пройти эту точку и вернуться к ней с другой стороны – записать показания l''_{0l}. Обе эти точки лежат в "мертвой зоне" и являются просто ориентирами для проведения измерений методом "вилки".

4. Передвигать движок реохорда до тех пор, пока стрелка гальванометра не отклонится на одно деление шкалы; произвести отсчет l'_l по шкале реохорда.

5. Затем переместить движок реохорда в противоположном направлении до положения, при котором стрелка гальванометра, миновав "0", отклонится на такое же число делений в противоположную сторону. Отсчет производится по шкале реохорда l''_l.

6. Измерения l'_l и l''_l повторить 5 раз.

7. Переключатель $П_2$ поставить в положение 2, при котором оказывается включенным элемент ε_x.

8. Повторить все измерения пунктов 3-6 в прежнем порядке.

9. Результаты измерений занести в таблицу.

№	l'_l, см	l''_l, см	$l_l = \frac{l'_l + l''_l}{2}$, см	$\langle l_l \rangle$, см	l'_x, см	l''_x, см	$l_x = \frac{l'_x + l''_x}{2}$, см	$\langle l_x \rangle$, см
1								
2								
3								
4								
5								

10. Используя найденные значения $\langle l_l \rangle$ и $\langle l_x \rangle$ по формуле (2.11) найти ε_x.

11. Подсчитать относительную и абсолютную погрешности измерения ε_x.

Задание по УИРС

1. Включив последовательно с реостатом R_p прибор для измерения силы тока *I*, исследовать ширину "мертвой зоны"

$\Delta l_{0I} = | l'_{0I} - l''_{0I} |$ для различных значений токов (при различных положениях движка реостата R_p).

2. Провести измерения ε_x при этих же значениях тока обычным методом отсчета l_{0I}, l_{0x} (при токе гальванометра $I_g=0$) и методом вилки (каждое измерение 5 раз). Сравнить и объяснить полученные результаты.

3. С помощью эталонного источника и прибора для измерения силы тока I определить погонное сопротивление реохорда $r_{пог}$ (сопротивление на единицу длины).

4. Проделать измерения погонного сопротивления при различных значениях силы тока I и оценить степень однородности сопротивления реохорда, т.е. проверить линейную зависимость - $R_x = r_{пог} x + R_0$ (x - координата движка реохорда, R_0 - начальное сопротивление реохорда, $r_{пог}$ - погонное сопротивление реохорда).

4. Вопросы для самопроверки

1. Характеристики электрического тока: плотность тока, сила тока. Единицы их измерения.

2. Условия существования стационарного электрического тока.

3. Понятие ЭДС, разности потенциалов, напряжения, падения напряжения. Единицы их измерения.

4. Закон Ома в дифференциальной и интегральной формах.

5. Понятия сопротивления участка цепи, удельного сопротивления, электропроводности. Единицы измерения.

6. Сущность метода компенсации.

7. Правила Кирхгофа и их применение к цепям в данной работе.

8. Применяя законы Кирхгофа, получить уравнение $\varepsilon_x = \varepsilon_I l_x / l_I$.

9. Показать направление токов в цепях при перемещении движка реохорда влево и вправо от "мертвой зоны".

10. Показать направление токов в цепях при перемещении движка реостата в ту или другую сторону от положения, соответствующего компенсации.

11. Метод "вилки".

12. Что покажет вольтметр с большим внутренним сопротивлением, подключенный непосредственно к клеммам элемента?

13. В чем преимущество компенсационного метода определения ЭДС перед методом непосредственного измерения вольтметром?

5. Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. - М.: Наука, 1978. § 31-38.

2. Калашников С.Г. Электричество. - М.: Наука, 1985. § 22, 53-55, 57, 59-61, 64-70.

3. Детлаф А.А., Яворский Б.М., Милковская Л.Б. Курс физики. Т. 2. М.: Высш. шк., 1964. § 8.1, 8.2, 9.1, 9.2, 9.4.

4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. - М.: Наука, 1983. § 45.

УДК 537.85

Лабораторная работа № 2-29

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА

А. И. Кузин, Л. Г. Рудоясова

Дано краткое описание методов определения удельного сопротивления проводника, связанных либо с точным измерением тока, либо с точным измерением напряжения, а также сравнение этих методов с методом приближенного определения сопротивления; указана допускаемая при этом погрешность. Описана экспериментальная установка и порядок работы на ней. Предлагаются задания и контрольные вопросы.

I. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

I.I. Понятие об электрическом токе. Количественные характеристики электрического тока

Электрический ток – упорядоченное движение электрических зарядов. Для протекания тока необходимо наличие в данном теле заряженных частиц, которые могут перемещаться в пределах всего тела. Такие частицы называются носителями тока. Ими могут быть электроны и ионы. Ток, связанный с перемещением зарядов, называется конвекционным, или током проводимости.

Согласно теории Друде–Лоренца носители заряда принимают участие в тепловом движении и, следовательно, движутся в отсутствии внешнего поля с некоторой скоростью $\bar{u}$, среднее значение модуля которой определяется выражением

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \qquad (1)$$

где m – масса носителей заряда.

В этом случае через произвольную площадку, выбранную в теле, проходит в обе стороны одинаковое количество носителей, так что ток равен нулю.

Если внутри проводника создать поле, напряженность которого равна $\bar{E}$, то на хаотическое движение носителей со скоростью $\bar{u}$ будет накладываться упорядоченное движение электронов со скоростью $\bar{v}$.

С позиций классической механики ускорение электрона во внешнем поле будет равно

$$a = \frac{e \cdot E}{m}, \qquad (2)$$

где e – заряд электрона, m – его масса, E – напряженность внешнего электрического поля.

Максимальная скорость движения электрона при этом определяется выражением

$$v_{max} = \frac{e \cdot E}{m} \cdot \bar{t}, \qquad (3)$$

где $\bar{t}$ – среднее время свободного пробега электрона (время между двумя столкновениями).

Поскольку, согласно теории Друде–Лоренца, при столкновении с кристаллической решеткой электрон отдает всю энергию, его скорость становится равной нулю, а среднее значение скорости упорядоченного движения

$$\bar{v} = \frac{1}{2} v_{max} = \frac{e \cdot E}{2 \cdot m} \bar{t} \qquad (4)$$

Среднее время свободного пробега при этом

$$\bar{t} = \frac{\bar{l}}{\bar{v} + \bar{u}}, \qquad (5)$$

где $\bar{l}$ – длина свободного пробега.

Количественными характеристиками электрического тока служат сила тока

$$J = \frac{dq}{dt} \qquad (6)$$

– величина заряда, переносимого через рассматриваемую поверхность в единицу времени, а также вектор плотности тока, модуль которого

$$j = \frac{dJ}{dS_1}. \qquad (7)$$

Здесь dJ – сила тока через площадку, расположенную в рассматриваемой точке перпендикулярно к направлению движения носителей, dS_1 – площадь этой площадки.

Плотность тока с учетом (4) определяется как

$$j = e n \bar{v} = \frac{n e^2 \bar{t}}{2m} \cdot E, \qquad (8)$$

где n – концентрация носителей.

Коэффициент пропорциональности между плотностью тока и напряженностью поля называется удельной проводимостью металла

$$\sigma = \frac{n \cdot e^2 \bar{t}}{2m}. \qquad (9)$$

Более строгая формула для удельной проводимости металла получается при квантово-механической трактовке электропроводности:

$$\sigma = \frac{n \cdot e^2 \bar{\tau}}{m^*}, \qquad (10)$$

где m^* – эффективная масса электрона, τ – время релаксации. Однако обе формулы позволяют правильно определить порядок величины удельного сопротивления.

Величина, обратная удельной проводимости, называется удельным сопротивлением,

$$\rho = \frac{1}{\sigma} . \qquad (11)$$

Согласно закону Ома сила тока, текущего по металлическому проводнику, пропорциональна падению напряжения на проводнике:

$$J = \frac{1}{R} U . \qquad (12)$$

Здесь R – электрическое сопротивление проводника, величина которого зависит от формы и размеров проводника, а также от свойств материала, из которого он изготовлен:

$$R = \frac{\rho \ell}{S} . \qquad (13)$$

I.2. Измерение активного сопротивления проводника по методу точного измерения тока

Для определения удельного сопротивления, как следует из (13), необходимо знать сопротивление проводника R, а также его продольные ℓ и поперечные S размеры.

Для измерения сопротивления существует несколько методов. Один из них основан на точном измерении тока.

Согласно закону Ома (12) сопротивление проводника

$$\tilde{R}_x = \frac{U}{J} \qquad (14)$$

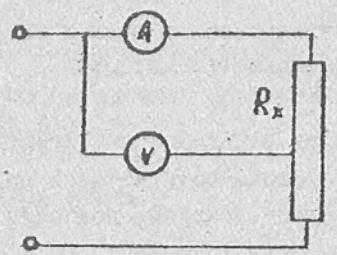


Рис. 1

При этом (рис. 1) мы получаем приближенное значение $\tilde{R}_x$, равное сумме точного значения R_x и внутреннего сопротивления амперметра:

$$\tilde{R}_x = R_x + R_a . \qquad (15)$$

Абсолютная погрешность в определении сопротивления

$$\Delta R_x = \tilde{R}_x - R_x = R_a , \qquad (16)$$

а относительная

$$\delta R_x = \frac{R_a}{R_x} . \qquad (17)$$

Если $R_x \gg R_a$, то сопротивление можно определить по приближенной формуле (14).

Из схемы (рис. 1) следует, что показание вольтметра

$$U = U_a + U_x , \qquad (18)$$

где U_a – напряжение на зажимах амперметра, U_x – напряжение на сопротивлении R_x.

Пользуясь законом Ома для участка цепи (12), равенство (18) можно представить в виде

$$U = JR_a + JR_x . \qquad (19)$$

Здесь J – показание амперметра, $R_a = 0{,}15$ Ом – сопротивление амперметра.

Из (19) следует, что

$$R_x = \frac{U - JR_a}{J} = \frac{U}{J} - R_a . \qquad (20)$$

Подставив R_x из (20) в (13), найдем удельное сопротивление проводника:

$$\rho = \frac{S}{\ell_x} \left(\frac{U}{J} - R_a \right) . \qquad (21)$$

Равенство (21) можно представить в виде

$$\frac{U}{J} = \alpha \ell_x + R_a , \qquad (22)$$

где

$$\alpha = \frac{\rho}{S} \qquad (23)$$

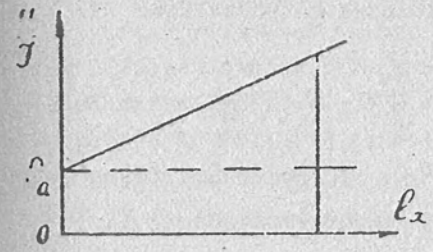


Рис. 2

Уравнение прямой (22) графически представлено на рис. 2. Тангенс угла наклона этой линии α находится из соотношения

$$\alpha = \frac{\frac{U}{J} - R_a}{\ell_x} . \qquad (24)$$

I.3. Измерение активного сопротивления проводника по методу точного измерения напряжения

Рассмотрим электрическую схему, изображенную на рис. 3. Приближенное значение сопротивления $\widetilde{R}_x$ можно также определить по формуле (I4). Оценим погрешность при использовании схемы (рис. 3), если не учитывать ток, протекающий через вольтметр.

Абсолютная погрешность в определении сопротивления

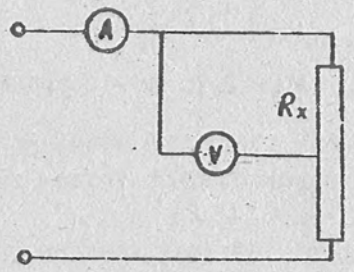


Рис. 3

$$\Delta R_x = \frac{U}{J_x} - \frac{U}{J} , \qquad (25)$$

где

$$J = J_x + J_в . \qquad (26)$$

Ток, текущий через вольтметр,

$$J_в = J_x \frac{R_x}{R_в} , \qquad (27)$$

а ток, показываемый амперметром,

$$J = J_x \left(1 + \frac{R_x}{R_в}\right) , \qquad (28)$$

где J_x – ток, текущий по сопротивлению R_x (рис. 3). Относительная погрешность в определении сопротивления R_x с учетом (25) и (28),

$$\delta R_x = \frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{U(J - J_x)\cdot J_x}{J \cdot J_x \cdot U} = 1 - \frac{J_x}{J} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{R_x}{R_в}} , \qquad (29)$$

Из (29) видно, что если $R_x \ll R_в$, то при определении сопротивления можно пользоваться приближенной формулой (I4).

Пользуясь точным равенством (26) и применяя закон Ома (I2), получим уравнение

$$\frac{U}{R_x} = J - \frac{U}{R_в} . \qquad (30)$$

Здесь U – показание вольтметра, а $R_в = 2500$ Ом – сопротивление вольтметра.

Разделив равенство (30) на U и подставив вместо R_x его значение из (I3), получим

$$\frac{J}{U} = \frac{S}{\rho} \cdot \frac{1}{\ell_x} + \frac{1}{R_в} . \qquad (31)$$

Обозначив

$$\beta = \frac{S}{\rho} , \qquad (32)$$

равенство (3I) запишем в виде

$$\frac{J}{U} = \beta \cdot \frac{1}{\ell_x} + \frac{1}{R_в} . \qquad (33)$$

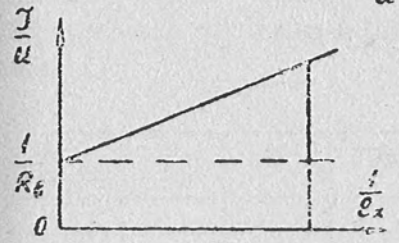


Рис. 4

График прямой линии (33) изображен на рис. 4.

Тангенс угла наклона этой линии β находится из соотношения

$$\beta = \frac{\frac{J}{U} - \frac{1}{R_в}}{\frac{1}{\ell_x}} . \qquad (34)$$

2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.I. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рис. 5) состоит из основания 1 с регулируемыми по высоте ножками 2. К основанию крепится цилиндрическая стойка 3 со шкалой 4. На стойке смонтированы два неподвижных кронштейна 5 и один подвижный 6. Между неподвижными кронштейнами натянута проволока 7, удельное сопротивление которой определяется. Проволока имеет хороший гальванический контакт с подвижным кронштейном, через который она подключается в цепь постоянного тока по одной из схем рис. I или рис. 2. Сила тока в ней измеряется амперметром, а напряжение – вольт-

метром.

Включение прибора в сеть осуществляется нажатием клавиши СЕТЬ, изменение тока в цепи производится потенциометром РЕГ. ТОКА, режим работы клавишами МОСТ и ВИД СХЕМЫ. Клавиша МОСТ позволяет пользоваться прибором в режиме измерения сопротивления либо с помощью моста постоянного тока, когда эта клавиша отжата, либо методом измерения тока и напряжения, когда она нажата.

Отжатая клавиша ВИД СХЕМЫ позволяет использовать прибор для измерения сопротивления по схеме (рис. I) с точным измерением тока а нажатая - обеспечивает соединение частей прибора по схеме (рис. 3) с точным измерением напряжения.

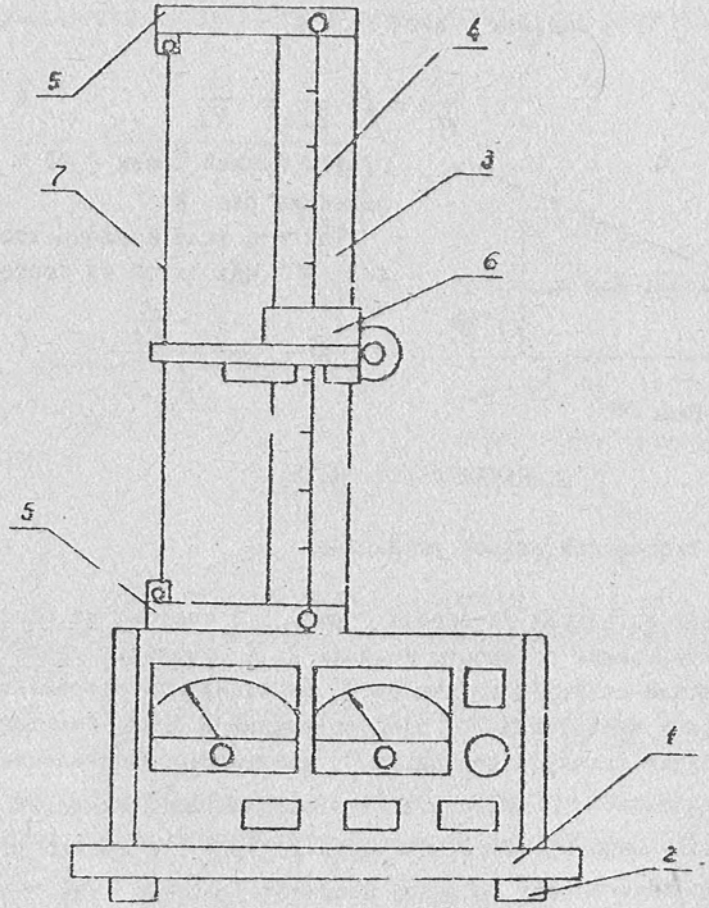


Рис. 5

2.2. Порядок выполнения работы

Задание № I

1. Регулировкой высоты ножек основания добиться устойчивого положения прибора на поверхности стола.
2. Включить прибор в сеть переменного тока 220 В.
3. Нажать клавишу СЕТЬ. На лицевой панели прибора загорается неоновый индикатор.
4. Установить подвижный контакт на расстоянии ℓ_x = 30 см. Взятое расстояние ℓ_x занести в табл. I.
5. Нажать клавишу МОСТ, а клавишу ВИД СХЕМЫ отжать, после этого прибор готов к измерению сопротивления в режиме точного измерения тока.
6. Ручкой потенциометра РЕГ.ТОКА установить значения тока I и напряжения U такими, чтобы показания вольтметра составляли 2/3 диапазона его шкалы. Данные полученных измерений занести в табл. I.

Таблица I

№ опыта	ℓ_x	I	U	d	S	$\frac{U}{I}$	R_a
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

7. Определить поперечное сечение проводника по формуле

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \qquad (35)$$

где d = 0,36 мм - диаметр проволоки. Значения d и S занести в табл. I.

8. Изменить длину проволоки на $\Delta\ell$ = 2 см в сторону увеличения

и проделать все экспериментальные операции в соответствии с пунктами 6 – 7 настоящего задания. Изменение длины производить 8–10 раз. Учесть, что R_a = 0,15 Ом.

9. Построить график (рис. 2) и определить тангенс угла его наклона α по формуле (24).
10. По формуле (23) определить удельное сопротивление проводника ρ .
11. Рассчитать погрешность в определении ρ .

Задание № 2

1. Выполнить пункты 1 – 4 задания № 1.
2. Нажать клавиши КОСТ и ВИД СХЕМЫ. После этого прибор готов к измерению сопротивления в режиме точного измерения напряжения.
3. Ручкой потенциометра РЕГ. ТОКА установить значения тока J и напряжения U такими, чтобы показание вольтметра составляло 2/3 диапазона его шкалы. Данные полученных измерений и соответствующие им ℓ_x занести в табл. 2.

Таблица 2

N опыта	ℓ_x	J	U	$\frac{1}{\ell_x}$	$\frac{J}{U}$	d	S	$R_в$	$\frac{1}{R_в}$
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									

4. По формуле (35) определить сечение проводника S . Значения d и S занести в табл. 2.
5. Изменить длину проводника на $\Delta\ell$ = 2 см в сторону увеличения и проделать все экспериментальные операции в соответствии с пунктами 3 – 4 настоящего задания. Изменение длины производить 8 – 10 раз. Учесть, что сопротивление $R_в$ = 2500 Ом.
6. Построить график (рис. 4) и определить тангенс угла его наклона по формуле (34).
7. По формуле (32) определить удельное сопротивление проводника ρ .
8. Рассчитать погрешность в определении ρ .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятие об электрическом токе. Количественные характеристики электрического тока.
2. Что называется удельным сопротивлением проводника?
3. Как определить удельное сопротивление проводника методом точного измерения тока? Сравнение данного метода с методом приближенного определения сопротивления.
4. Как определить удельное сопротивление проводника методом точного измерения напряжения? Сравнение данного метода с методом приближенного определения сопротивления.
5. Устройство экспериментальной установки. Порядок проведения экспериментальных измерений на ней.
6. Правила расчета погрешностей.
7. Основные положения теории Друде-Лоренца.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.II. М.:Наука, 1966.
2. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. Т.II. М.:Наука, 1965.
3. Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука, 1964.

УДК 537.85

Лабораторная работа № 2-26

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ВЕЩЕСТВЕ. ФЕРРОМАГНЕТИКИ

Л. Г. Рудоясова, Т. Ф. Федорова. А. Б. Федотов, Ю. Н. Шутов

Дано краткое описание характеристик магнитного поля в веществе и основных свойств ферромагнетиков. Представлена экспериментальная установка для изучения характеристик магнитного поля в веществе. В частности, предусмотрено: получение основной кривой намагничивания, наблюдение петель гистерезиса, решение задач с разветвленными магнитными цепями.

Актуальность работы. Уникальные свойства ферромагнитных материалов широко используются в промышленности. Практически ни одна радиотехническая, электротехническая установка не обходится без магнитных цепей. В качестве примеров можно привести: преобразователи энергии – трансформаторы, магнитные усилители, магнитные элементы памяти, электромагниты в реле, электрические машины, магнито-электрические измерительные приборы, динамики и многие другие устройства.

Совершенно новые перспективы в решении задач радиотехники высоких частот появились с получением ферритов. Это ферромагнитные химические соединения (типа $MeO \cdot Fe_2O_3$, где Me – один или смесь из двухвалентных катионов $Mn, Co, Ni, Cu, Mg, Zn, Cd, Fe$), которые в отличие от железа и других ферромагнитных металлов являются магнитными полупроводниками и имеют большое удельное сопротивление порядка $10^2 - 10^6$ Ом·см.

О применении различных магнетиков в технике см./I/, § II2.

Цель работы: получение зависимостей индукции магнитного поля, намагниченности и магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности поля; наблюдение петли гистерезиса для различных ферромагнетиков; изучение магнитных цепей.

Практическая ценность работы. Экспериментально изучаются важнейшие свойства ферромагнетиков различных марок: НМ 600, пермаллой, ППГ (прямоугольная петля гистерезиса).

В процессе исследований студенты получают практические навыки работы с современными электронными приборами: вольтметрами, осциллографом, а также учатся правильно проводить эксперимент и анализировать результаты.

I. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Атомы вещества обладают магнитным моментом $\vec{P}_m$. Магнитный момент атома обусловлен двумя причинами: I) орбитальным движением электронов в атоме (орбитальный магнитный момент); 2) наличием у электронов и нуклонов атома собственного (спинового) магнитного момента /I-4/. Поведение вещества в магнитном поле существенно зависит от величины суммарного магнитного момента атома. По этому признаку все вещества подразделяются на два класса: диамагнетики и парамагнетики. Магнитный момент атома диамагнетика равен нулю (например, атомы ^4_2He, орбитальные моменты обоих электронов которого в основном состоянии равны нулю, а спиновые компоненты как электронов, так и нуклонов ядра попарно компенсируются). Магнитный момент атома парамагнетика не равен нулю. Парамагнитные вещества встречаются в природе значительно чаще, чем диамагнитные. Намагниченность вещества в окрестности некоторой точки определяется выражением

$$\vec{J} = \frac{\sum_i \vec{P}_{mi}}{\Delta V}, \qquad (I.1)$$

где $\vec{P}_{mi}$ – магнитные моменты атомов, содержащихся в физически однородном малом объеме ΔV, заключающем внутри себя данную точку. Таким образом, намагниченность – плотность магнитного момента. В отсутствие магнитного поля намагниченность большинства магнетиков равна нулю: у диамагнетиков – поскольку равен нулю каждый член суммы (I.I), у парамагнетиков – вследствие хаотичности теплового движения атомов, т.е. полной разориентации их магнитных моментов.

При внесении вещества в магнитное поле, индукция которого $\vec{B}_0$, возникают два эффекта. Во-первых, диамагнитный эффект: в атомах индуцируются магнитные моменты, направленные в соответствии с правилом Ленца противоположно увеличивающемуся внешнему полю $\vec{B}_0$. Во-вторых, парамагнитный эффект: магнитные моменты атомов (отличные от нуля у парамагнетиков) ориентируются преимущественно в направлении $\vec{B}_0$ (см. поведение рамки с током в магнитном поле /I/). Парамагнитный эффект (если он есть) обычно сильнее диамагнитного, поэтому в веществах парамагнетиках намагниченность $\vec{J}$ параллельна $\vec{B}_0$. В диамагнетиках намагниченность $\vec{J}$ антипараллельна $\vec{B}_0$ вследствие диамагнитного эффекта *).

В слабых полях намагниченность $\vec{J}$ пропорциональна $\vec{B}_0$. В системе СИ соотношение, связывающее $\vec{J}$ и $\vec{B}_0$, записывают в виде

$$\vec{J} = \frac{\chi}{\mu_0}\vec{B}_0, \qquad (I.2)$$

*) Здесь и ниже имеются в виду только изотропные вещества, например, твердые магнетики в поликристаллическом состоянии.

где χ – безразмерный параметр, называемый магнитной восприимчивостью вещества (для диамагнетиков $\chi < 0$ и не зависит от температуры T, для парамагнетиков $\chi > 0$ и убывает с ростом T); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, Гн/м – магнитная постоянная.

Вследствие намагниченности в веществе возникает дополнительное магнитное поле, индукция которого $\vec{B}'$ пропорциональна $\vec{\mathcal{J}}$:

$$\vec{B}' = \mu_0 \vec{\mathcal{J}} = \chi \vec{B}_0 . \qquad (I.3)$$

Полное поле в веществе, таким образом,

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' = \vec{B}_0 + \chi \vec{B}_0 = \mu \vec{B}_0 . \qquad (I.4)$$

Здесь $\mu = 1 + \chi$ – относительная магнитная проницаемость вещества. Она показывает, во сколько раз индукция магнитного поля в веществе отличается от индукции внешнего магнитного поля (рис.I). Для описания магнитного поля в веществе вводят еще одну величину $\vec{H}$ – напряженность магнитного поля.

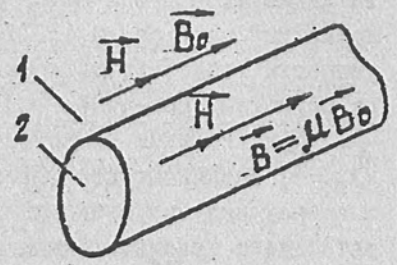


Рис.I

I – вакуум, 2 – вещество

По определению

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{\mathcal{J}} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} . \qquad (I.5)$$

Нетрудно убедиться, что величины $\vec{\mathcal{J}}$ и $\vec{B}$ связаны с $\vec{H}$ соотношениями

$$\vec{\mathcal{J}} = \chi \vec{H} , \quad \vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H} . \qquad (I.6)$$

Особенность физической величины $\vec{H}$ состоит в том, что ее циркуляция по произвольному замкнутому контуру Γ ($\oint_\Gamma \vec{H} d\vec{l}$) не зависит от наличия намагниченного вещества и всегда равна /I-4/ алгебраической сумме макротоков, пронизывающих данный контур:

$$\oint_\Gamma \vec{H} d\vec{l} = \oint_\Gamma H_l dl = \sum i_{макро} . \qquad (I.7)$$

Ввиду произвольности контура Г из (I.7) следует, что напряженность магнитного поля пропорциональна создающим это поле макроскопическим токам. В отличие от $\vec{H}$ циркуляция $\vec{B}$ по произвольному замкнутому контуру определяется, наряду с макротоками, микротоками, т.е. намагниченностью вещества (см.I.3, I.4) $\vec{\mathcal{J}}$.

Намагниченность веществ обоих классов обычно весьма мала по сравнению с $\vec{H}$, что можно формально выразить соотношением $\chi \ll 1$. Имеются, однако, такие парамагнетики, для которых это условие не выполняется. В качестве примера сильномагнитных веществ рассмотрим ферромагнетики. У этих веществ наблюдается явление спонтанного намагничивания: спиновые (нескомпенсированные) магнитные моменты отдельных атомов ориентируются параллельно друг другу даже в отсутствие внешнего магнитного поля. Объяснение этого явления выходит за пределы курса общей физики. Область ферромагнетика, в пределах которой магнитные моменты параллельны друг другу, называется доменом. Намагниченность ферромагнетика определяется величиной и взаимной ориентацией векторов намагниченности отдельных доменов, из которых он состоит. Поведение ферромагнетика в магнитном поле определяется, в основном, двумя факторами – ростом доменов, ориентированных энергетически выгодно по отношению к внешнему полю, за счет своих соседей, и переориентацией магнитных моментов доменов в направлении внешнего поля. Эти процессы необратимы, поэтому намагниченность ферромагнетика зависит не только от величины внешнего поля, но и от предыстории данного образца ферромагнетика. Подобные явления называются гистерезисом. Ферромагнетик можно превратить в обычный парамагнетик, если нагреть его до такой температуры, при которой эффект тепловой разориентации магнитных моментов отдельных атомов больше, чем эффект их спонтанной ориентации. Критическая температура перехода из ферромагнитного в парамагнитное состояние называется точкой Кюри. После охлаждения до температур ниже точки Кюри без внешнего магнитного поля опять формируются домены, ориентированные хаотично друг относительно друга. Ферромагнетик полностью размагничен. Зависимость $\mathcal{J}(H)$ и $B(H)$ для такого ферромагнетика качественно изображена на

рис.2. Обратим внимание, что зависимости эти нелинейны. Пунктирная прямая J_s на этом рисунке показывает максимально достижимую (для данного материала) намагниченность (насыщение), соответствующую максимальной упорядоченности доменов по отношению к H. Сопоставление рис.2 и формул (I.6) показывает, что величины χ и μ в ферромагнетике являются функциями H Качественный вид кривых $\chi(H)$ изображен на рис.3, H_{max} – значение напряженности магнитного поля, при котором χ максимальна.

Кривая зависимости $B(H)$ на рис.2 называется начальной кривой намагничивания. Вследствие необратимости процессов намагничивания ферромагнетика (см.выше) при изменении H от H_m до $-H_m$ и обратно, зависимость $B(H)$ изображается замкнутой кривой (рис.4), называемой петлей гистерезиса. Если снимать петли гистерезиса, увеличивая величину H_m магнитного поля, получится семейство симметричных петель (рис.3) для данного материала,

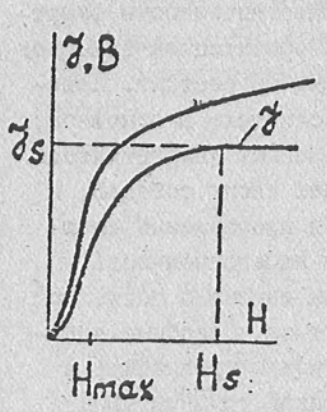


Рис.2

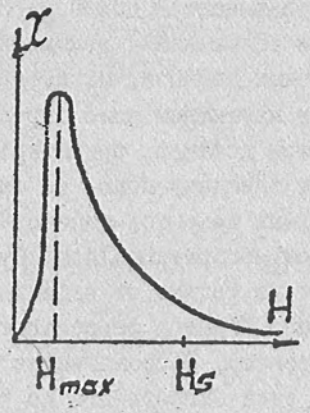


Рис.3

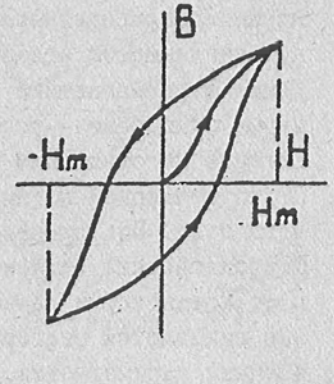


Рис.4

При увеличении максимального значения напряженности магнитного поля H_m площадь петли увеличивается. Это будет происходить до определенного значения H_s, при котором ширина петли достигнет наибольшего значения. При дальнейшем увеличении напряженности поля форма и размеры петли не меняются. Такая петля называется предельной петлей. Предельную петлю гистерезиса

характеризуют параметрами $H_s, B_s, B_{ост}, H_c$ (рис.5): B_s, H_s – магнитная индукция и напряженность магнитного поля насыщения; H_c – коэрцитивная сила – величина напряженности магнитного поля, при которой индукция снижается до нуля; $B_{ост}$ – остаточная индукция, которая сохраняется в образце при нулевой напряженности магнитного поля.

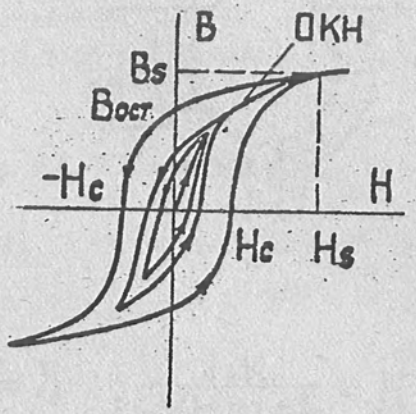


Рис.5

Наиболее полно свойства магнетика отражает именно семейство гистерезисных петель (рис.5). Вершины гистерезисных петель лежат на основной кривой намагничивания (ОКН), которая незначительно отличается от начальной кривой намагничивания (рис.2).

Если величины B и H на осях графика рис.4,5 откладывать в единицах СИ, площадь петли гистерезиса окажется численно равной энергетическим потерям, затрачиваемым на один цикл перемагничивания. Эти потери приводят к нагреванию образца из ферромагнетика (см./I/).

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.I. Выбор методики эксперимента

Для изучения зависимостей $B=B(H)$ и $\mu=\mu(H)$ необходимо создать в магнетике магнитное поле и одновременно измерить магнитную индукцию B и напряженность H

Рассмотрим ферромагнитный сердечник с зазором и двумя обмотками (рис.6). Пусть по первой обмотке течет синусоидальный ток $i=i_m\cos\omega t$. Тогда по закону полного тока (I.7) циркуляция вектора H вдоль средней линии, обозначенной на рис.6 пунктиром, равна

$$\oint_l H_l\,dl = H(l-l_0) + H_0 l_0 = i N_1, \qquad (2.1)$$

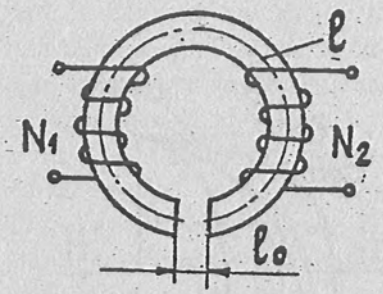


Рис.6

где l – длина замкнутой средней линии, l_0 – ширина зазора, H и H_0 – напряженности магнитного поля в магнетике и в зазоре, N_1 – число витков первой обмотки.*) Так как линии магнитной индукции замкнуты, а зазор мал, то $B_0 = B$. Следовательно, $H_0 = \mu H$. Подставив последнее равенство в (2.1), получим:

$$H = \frac{N_1 i}{l + (\mu - 1) l_0}; \quad B = \mu\mu_0 \frac{N_1 i}{l + (\mu - 1) l_0}. \qquad (2.2)$$

Если зазор в сердечнике отсутствует, напряженность магнитного поля в нем можно найти из (2.2), положив $l_0 = 0$. В этом случае

$$H = \frac{N_1 i}{l}; \quad H_m = \frac{N_1 i_m}{l}. \qquad (2.3)$$

Таким образом, напряженность магнитного поля в сердечнике можно найти, измерив ток, текущий в обмотке I. Индукция магнитного поля равна $B = \mu\mu_0 H$. Для того, чтобы измерить эту величину, учтем, что ЭДС индукции, наводимая во второй обмотке,

$$\mathcal{E}_i = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt}, \qquad (2.4)$$

где N_2 – число витков во второй обмотке,

*) Строго говоря, правая часть закона (I.7) содержит еще член $N_2 i_2$ – суммарный накоток вторичной обмотки, но сопротивление нагрузки вторичной цепи (ниже, см.рис.7) настолько велико, что выполняется соотношение $N_2 i_2 \ll N_1 i_1$, поэтому членом $N_2 i_2$ можно пренебречь.

$\Phi = B \cdot S$ **) – магнитный поток в сердечнике, S – площадь поперечного сечения сердечника.

Так как B изменяется в соответствии с током, можно записать: $B = B_m \cos\omega t$. В результате дифференцирования (см.2.4) получим:

$$\mathcal{E}_i(t) = N_2 S B_m \omega \sin\omega t = \mathcal{E}_m \sin\omega t. \qquad (2.5)$$

Амплитудное значение B_m связано с амплитудным значением ЭДС индукции $\mathcal{E}_m$ соотношением

$$B_m = \frac{\mathcal{E}_m}{N_2 S \omega}. \qquad (2.6)$$

Таким образом, для определения B_m достаточно измерить $\mathcal{E}_m$, возникающую в обмотке 2.

2.2. Описание экспериментальной установки

В установку входят следующие приборы: осциллограф СI-68, вольтметры V_1 и V_2, блок-макет, содержащий элементы цепей, собираемых для выполнения заданий. Элементы, входящие в блок-макет и схема их коммутации изображены на верхней крышке макета (см.рис.7).

2.3. Правила техники безопасности при выполнении работы

1. Собранную схему без проверки преподавателем или лаборантом не включать.
2. Не касаться открытых клемм и токоведущих частей.
3. Любые изменения в цепи производить только после отключения ее от сети.

**) Учитывая, что диаметр сечения кольца значительно меньше, чем диаметр кольца, при расчете магнитного потока Φ в (2.4) поле $\vec{B}$ полагается практически однородным по сечению и равным его значению на средней линии.

4. После проведения измерений схему отключить от сети.

ПОМНИТЕ: самопроизвольные разрывы и короткие замыкания в любых элементах цепи приводят к появлению на обмотках трансформатора повышенного значения напряжения.

2.4. Задание № I. Снятие основной кривой намагничивания (ОКН) ферромагнетика

I. Собрать цепь по схеме рис.7. Для этого вольтметры V_1 и V_2 подключить к клеммам А-В и С-Д – на верхней крышке макета соответственно.

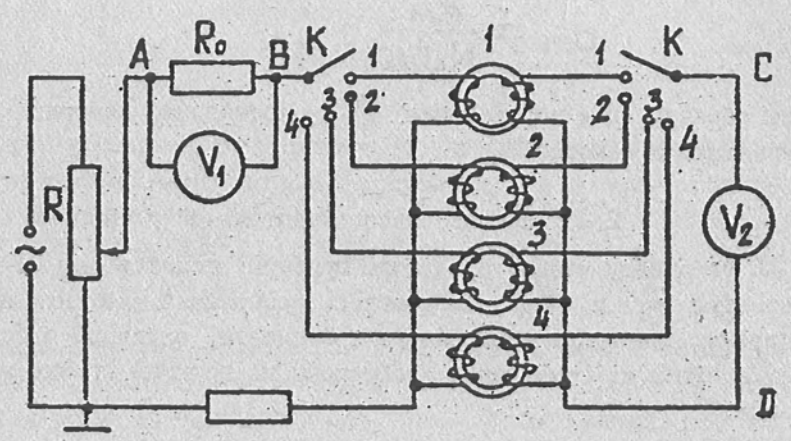


Рис.7

2. Переключатель К поставить в позицию I. При этом исследуется трансформатор, кольцевой сердечник которого выполнен из феррита марки М 600. Сопротивление R_0 =I Ом. Таким образом, показания вольтметров численно равны: V_1 – эффективному значению тока, текущего в первичной обмотке исследуемого трансформатора ($i_{эф.}$); V_2 – эффективному значению ЭДС во вторичной обмотке ($\mathcal{E}_{эф}$).

3. С помощью движка потенциометра R установить в первичной обмотке трансформатора ток, равный 0,5 А, и плавно (за I–2 с) уменьшить его до нуля, размагнитив таким образом сердечник.

4. Постепенно увеличивая ток в первичной обмотке, снять

показания вольтметров V_1 и V_2 (не менее I0–I2 точек). Отсчет следует проводить не через равные промежутки по току, а чаще там, где $\mathcal{E}_{эф.}$ меняется быстрее.

5. По формулам (2.3, 2.6) определить значения H_m, B_m ($\mathcal{E}_m = \sqrt{2}\,\mathcal{E}_{эф.}\; i_m = \sqrt{2}\,i_{эф.}$). Значения γ_m и μ рассчитать по формулам (I.5, I.6).

Результаты оформить в виде таблицы.

N опыта	i_m, А	$\mathcal{E}_m$, В	H_m, А/м	B_m, Тл	γ_m, А/м	μ

Для расчетов принять N_1 =I0, N_2 =2000, S =0,25 см^2, l = =I6 см, $\omega = 2\pi\nu = 2\pi \cdot 50$ Гц =3I4 рад/с.

6. Построить на миллиметровой бумаге графики $\gamma = \gamma(H)$, $B = B(H)$, $\mu = \mu(H)$.

2.5. Задание № 2. Наблюдение петли гистерезиса

I. Чтобы наблюдать петлю гистерезиса на экране осциллографа, необходимо собрать цепь по схеме, изображенной на рис.8.

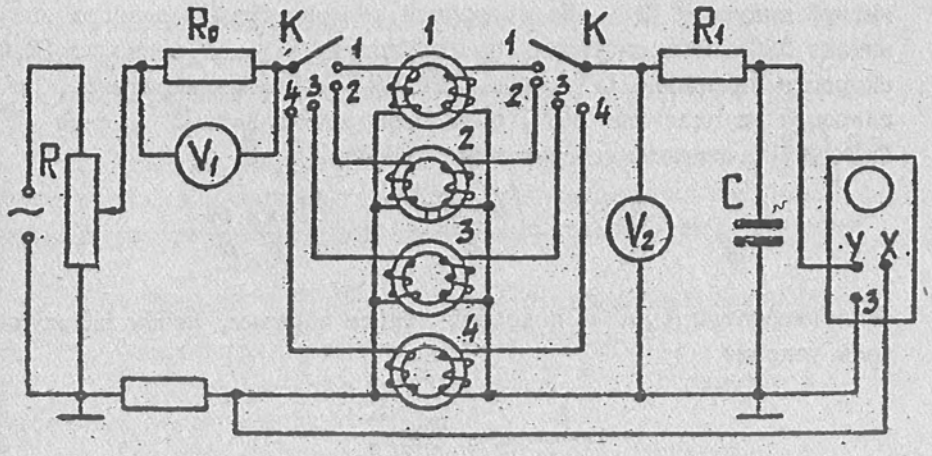


Рис.8

Осциллограф - универсальный измерительный прибор, позволяющий не только измерять ток, напряжение, частоту, мощность, фазу и т.д., но и исследовать форму различных сигналов и наблюдать кривые, описывающие зависимость одних величин от других.

Основным элементом электронного осциллографа является электронно-лучевая трубка, состоящая из электронной пушки, формирующей узкий пучок электронов, двух пар пластин (X , отклоняющих этот пучок в горизонтальном направлении, Y , отклоняющих его в вертикальном направлении) и экрана.

Принцип работы электронного осциллографа основан на взаимодействии электронного потока (луча) с электрическими полями, создаваемыми между пластинами X и Y . Попадая на экран, луч создает светящееся пятно, которое под действием электрических полей между пластинами может быть перемещено в любую точку экрана.

В нашем опыте на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа X подается напряжение, пропорциональное току i в первичной обмотке трансформатора. Согласно (2.3) напряженность магнитного поля H пропорциональна этому току. Следовательно, напряжение, подаваемое на пластины X осциллографа, будет пропорционально напряженности магнитного поля H.

Чтобы наблюдать петлю гистерезиса, нужно на вертикально отклоняющие пластины подать напряжение, пропорциональное магнитной индукции B . Во вторичной обмотке трансформатора возникает ЭДС взаимоиндукции, пропорциональная, как видно из (2.4), скорости изменения B , т.е. dB/dt . Чтобы напряжение, подаваемое на пластины Y , было пропорционально B , а не dB/dt , ставят интегрирующую цепочку $R_1 C$,

$$U_y = \frac{q}{C} = \frac{\int i_2 dt}{C} = \frac{\int U_{R_1} dt}{R_1 C}. \qquad (2.7)$$

Если параметры R_1 и C подобрать таким образом, чтобы выполнялось условие

$$\frac{1}{\omega C} \ll R_1, \qquad (2.8)$$

то напряжение, возникающее во вторичной обмотке (см. 2.4)

$$U_2 = U_{R_1} + U_C \approx U_{R_1} = -N_2 S \frac{dB}{dt}, \qquad (2.9)$$

а напряжение, подаваемое на пластины Y , будет пропорционально магнитной индукции B : $U_y \sim B$.

Таким образом, схема, представленная на рис.8, дает возможность наблюдать на экране осциллографа вид зависимости B от H , т.е. петлю гистерезиса /3/.

Световое пятно на экране осциллографа будет многократно вырисовывать зависимость $B(H)$ в том случае, когда напряжения на горизонтально и вертикально отклоняющих пластинах изменяются с одинаковой частотой. Многократно повторенное быстрое движение светового пятна на экране воспринимается глазом как одно неподвижное изображение, если частота превышает 25-30 Гц. При меньшей частоте изображение начинает "мигать" и, наконец, при частотах ниже 5-10 Гц вместо изображения будет видно перемещающееся по экрану световое пятно.

2. Включить осциллограф и подготовить его к работе в режиме внешней развертки (смотри описание осциллографа).

3. С помощью движка потенциометра R добиться появления на экране предельной петли гистерезиса. Положения переключателя К соответствуют следующим маркам материала сердечника: 1 - НМ 600, 2-НМ 600 (с зазором), 3 - НМ 3000, 4 - ППГ (прямоугольная петля гистерезиса).

4. Зарисовать на миллиметровке предельные петли гистерезиса для 3 и 4 образца.

5. Вычислить отношения $B_{ост}$ (3)/$B_{ост}$ (4); H_c (3)/H_c (4).

6. Ответить на вопрос: какую марку ферромагнетика и почему нужно выбрать для изготовления сердечника силового трансформатора и какую для изготовления постоянного магнита?

2.6. Задание № 3. Исследование сердечника с зазором.

1. Использовать схему задания № 2 (рис.8).

2. С помощью движка потенциометра R установить в первичной обмотке ток, равный 1 А.

3. Сравнить вертикальный размер петли гистерезиса в двух позициях ключа К: - 1 (сердечник НМ 600) и - 2 (сер-

дечник НМ 600 с зазором). При измерении вертикального размера руководствоваться описанием осциллографа С I-68.

4. Определив число $n = B_1/B_2$, где B_1 и B_2 - значения индукции магнитного поля в сердечниках без зазора и с зазором, рассчитать ширину зазора, используя формулы (2.2 и 2.3). Для расчета принять длину средней линии сердечника ℓ =I6 см. При выборе значения магнитной проницаемости использовать результаты выполнения задания № I (взять значение μ, полученное при токе $i_{эф}$=I А).

3. ЗАДАНИЕ ПО УИРС
ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕННЫХ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ

Студентам, выполняющим это задание, предлагается:

I. Разработать методику эксперимента, позволяющую определить магнитную проницаемость материала сердечника трансформатора, изображенного на рис.9.

2. На базе имеющихся приборов собрать цепь и произвести необходимые измерения и расчеты.

3. В качестве численных значений параметров принять:
N_1=90, N_2 =I20, N_3 =I50,
ℓ_1=40 см, ℓ_2 =20 см,
ℓ_3=20 см;
площадь поперечного сечения
S =0,3 см^2.

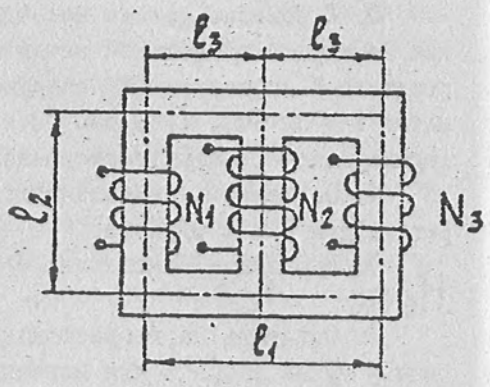


Рис.9

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

I. Описание магнитного поля в магнетиках (физический смысл величин $\vec{B}$, $\vec{J}$, $\vec{H}$, χ, μ, единицы их измерения).

2. Классификация магнетиков, особенности их поведения в магнитном поле.

3. Объяснить явления диа-, пара-, ферромагнетизма (качественно).

4. Кривые намагничивания ферромагнетиков (начальная, ОКН). Какие кривые и как вы получаете в лабораторной работе?

5. Объяснить явление гистерезиса, наличие остаточного намагничивания, коэрцитивной силы.

6. Работа при перемагничивании ферромагнетика, тепло гистерезиса.

7. Температурная зависимость свойств магнетиков. Точка Кюри для ферромагнетиков.

8. Способы размагничивания ферромагнетиков.

9. Начертить и объяснить схемы установки, выполнение работы, вывод расчетных формул.

I0. Наблюдение петли гистерезиса на экране осциллографа, схема установки, назначение интегратора R_1C.

II. Типичные магнитные материалы разных групп, применение их в технике.

5. ЛИТЕРАТУРА

I. Калашников Э.Г. Электричество.-М.: Наука, I985, §§ 76, 79-82, 84, 9I, 93, 97, 98, I03-II2, II5, II7-I22, I32, 2I7, 2I8, 223.

2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2.-М.: Наука, I978. §§ 35, 5I-53, 55, 57-59, 6I, 63, 64, 66, 68, 9I, 92.

3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.Ш. Электричество.-М.: Наука, I977. Гл.Ш.

4. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т.7.-М.: Мир, I966. Гл. 34, 36, 37.

УДК 537.85

Лабораторная работа № 2-28

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Л. А. Кузнецов, В. К. Майстренко, Т. О. Прончатова-Рубцова

Дано краткое описание явлений электромагнитной индукции, само- и взаимоиндукции, рассмотрены процессы установления тока в *LR*-цепи. Представлена экспериментальная установка по изучению этих явлений и порядок работы на ней.

ВВЕДЕНИЕ

Явление электромагнитной индукции было открыто Фарадеем (1831 г.) и нашло широкое техническое применение. Оно лежит в основе всей современной электро- и радиотехники. Благодаря электромагнитной индукции (ЭМИ) происходит переход механической энергии в электрическую и, наоборот, электрической в механическую, трансформаторы преобразуют низкое напряжение в высокое, и наоборот; возникают и распространяются радиоволны, свет, электромагнитные волны в различных линиях передачи. Переменные магнитные поля возбуждают в массивных проводниках индукционные токи Фуко, которые используются в металлургии для плавки металлов. Выход СВЧ-тока на поверхность проводника (скин-эффект), также связанный с ЭМИ, используется при поверхностной закалке деталей, его учитывают при конструировании СВЧ аппаратуры. В связи с этим экспериментальное изучение ЭМИ представляет значительный интерес.

Целью данной работы является экспериментальное изучение зависимости ЭДС индукции от ориентации контура в магнитном поле и от скорости изменения поля, измерение взаимной индукции двух катушек, индуктивности одной из них; исследование зависимости тока от времени в LR -цепи при переходных процессах.

I. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

I.I. Электромагнитная индукция

Рассмотрим контур, помещенный в магнитное поле с индукцией $\vec{B}$ (рис.I). При всяком изменении магнитного потока Φ через площадь S поверхности, ограниченной контуром, в последнем возникает ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_{инд} = -\frac{d\Phi}{dt}, \qquad (1)$$

где $\Phi = \int_S B_n dS$ -магнитный поток, $B_n = B\cos\alpha$ -проекция $\vec{B}$ на нормаль $\vec{n}$ к площадке dS ; α - угол между $\vec{B}$ и $\vec{n}$

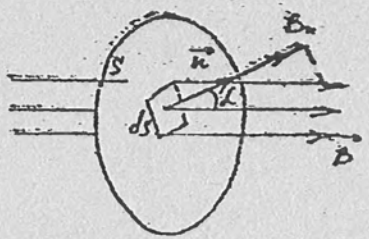


Рис.I

Если контур образуется N витками проводника, вводится понятие потокосцепление; $\Psi = N\Phi$, тогда (I) можно записать следующим образом:

$$\mathcal{E}_{инд} = -\frac{d\Psi}{dt}. \qquad (I')$$

Если магнитная индукция меняется по закону $B = B_m\cos\omega t$, где B_m - амплитуда индукции, ω - круговая частота, а угол α между $\vec{B}$ и $\vec{n}$ одинаков на всей поверхности S , то из уравнения (I') следует, что

$$\mathcal{E}_{инд} = E_{max}\sin\omega t,$$

где

$$E_{max} = N\omega\cos\alpha\cdot\int_S B_n dS = 2\pi\Psi_m f\cos\alpha, \qquad (2)$$

$\Psi_m = N\int_S B_n dS$ - максимальное потокосцепление; $f = \frac{\omega}{2\pi}$.

I.2. Взаимная индукция

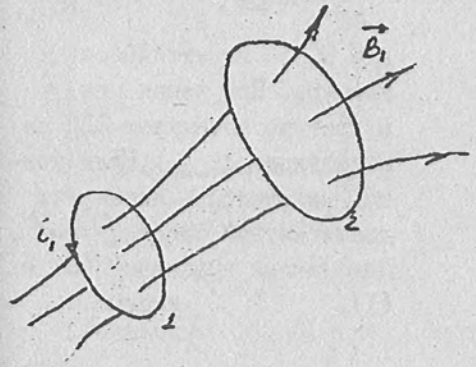


Рис.2

Рассмотрим два контура (рис.2), по одному из которых (I) течет ток i_1 , создающий магнитное поле с индукцией B_1 . Согласно закону Био-Савара-Лапласа $B_1 \sim i_1$, поэтому и потокосцепление Ψ_{21} контура 2 в магнитном поле B_1 пропорционально току i_1 :

$$\Psi_{21} = L_{21} i_1, \qquad (3)$$

где L_{21} - взаимная индуктивность.

При изменении тока i_1 в контуре 2 возникает ЭДС взаимоиндукции $\mathcal{E}_2$. Если контуры находятся в пара- или диамагнитной среде, $L_{21} = const$. Тогда, подставляя выражение (3) в (I), имеем:

$$e_2 = -L_{21}\frac{di_1}{dt}. \qquad (4)$$

Если ток i_1 меняется по закону $i_1 = I_{m1}\cos\omega t$, где I_{m1} – амплитуда тока, ω – круговая частота, то из формулы (4) следует, что

$$e_2 = E_{m2}\sin\omega t,$$

где

$$E_{m2} = L_{21}\omega I_{m1} = 2\pi L_{21} f \cdot I_{m1}. \qquad (5)$$

I.3. Самоиндукция

Рассмотрим одиночный контур (рис.3), по которому течет ток i, создающий магнитное поле с индукцией $\vec{B}$. Согласно закону Био-Савара-Лапласа $B \sim i$, поэтому и потокосцепление контура $\Psi \sim i$, т.е. можно записать, что

$$\Psi = Li, \qquad (6)$$

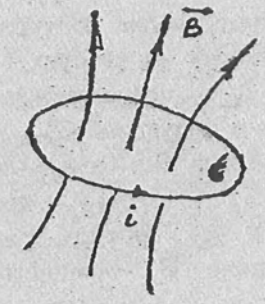


Рис.3

где L – индуктивность контура. При изменении i в контуре возникает ЭДС самоиндукции $e_{сам}$. Если контур находится в пара- или диамагнитной среде, $L = const$. Подставляя выражение (6) в (I), имеем

$$e_{сам.} = -L\frac{di}{dt}. \qquad (7)$$

Если ток i меняется по закону $i = I_m\cos\omega t$, где I_m – амплитуда тока, ω – круговая частота, то из формулы (7) имеем:

$$e_{сам.} = E_{m\,сам.}\sin\omega t,$$

где

$$E_{m\,сам} = \omega L I_m = 2\pi f L I_m = X_L I_m; \qquad (8)$$

$$X_L = \omega L = 2\pi f L, \qquad (9)$$

X_L – индуктивное сопротивление контура переменному (синусоидальному) току.

I.4. Переходные процессы в LR-цепи

При всяком изменении тока в проводящем контуре (рис.4) возникает ЭДС самоиндукции, в результате чего в контуре появляются токи самоиндукции. Согласно правилу Ленца они всегда направлены так, что препятствуют нарастанию тока в цепи, при размыкании – исчезновению его.

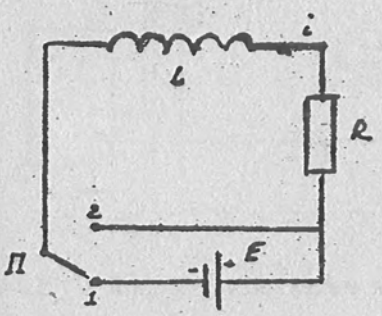


Рис.4

Рассмотрим случай замыкания цепи. Запишем закон Ома для цепи, изображенной на рис.4, в случае, когда переключатель $П$ находится в положении I:

$$iR = E - L\frac{di}{dt}. \qquad (10)$$

Обозначим $E - iR = u$, тогда (I0) запишется следующим образом:

$$u + \frac{L}{R}\frac{du}{dt} = 0.$$

Разделив переменные в полученном дифференциальном уравнении, имеем:

$$\frac{du}{u} = -\frac{R}{L}dt.$$

Решение этого уравнения: $Cu = e^{-\frac{R}{L}t}$.

Значение C определяем из начальных условий. Полагая, что источник был отключен в момент времени $t=0$ (в этот момент времени переключатель $П$ разомкнут), тогда сила тока $i(0)=0$, $u=E$ откуда $C=\frac{1}{E} \rightarrow u = Ee^{-R/L\,t}$

Окончательно получаем:

$$i = \frac{E}{R}\left(1 - e^{-R/L\,t}\right) \qquad (11)$$

Формула (11) описывает нарастание тока в цепи после ее замыкания. Чем больше индуктивность, тем больше ЭДС самоиндукции, тем медленнее идет процесс нарастания тока.

Найдем характер изменения тока при размыкании цепи. В момент времени $t=0$ переключатель из положения I переходит в положение 2 (см.рис.4). Сила тока в цепи начнет убывать, возникает ЭДС самоиндукции, противодействующая этому убыванию. Тогда закон Ома для цепи (рис.4) (переключатель $П$ в положении 2) запишется следующим образом:

$$iR = -L\frac{di}{dt}.$$

Разделив переменные, имеем:

$$\frac{di}{i} = -\frac{R}{L}dt.$$

После интегрирования и наложения начальных условий ($t=0$, $i(0)=\frac{E}{R}$) получаем:

$$i = \frac{E}{R}e^{-\frac{R}{L}t}. \qquad (12)$$

Из (12) видно, что при размыкании цепи из-за явления самоиндукции ток в ней не сразу обращается в нуль, а спадает по экспоненциальному закону, причем тем медленнее, чем больше индуктивность контура.

Выражения (11) и (12) можно записать в следующем виде:

$$i = I\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad i = Ie^{-\frac{t}{\tau}}, \qquad (13)$$

где $I = E/R$ - установившейся ток, $\tau = L/R$ - постоянная времени цепи или время релаксации.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И УСТАНОВКА

В эксперименте используются следующие приборы: генератор низкочастотный $\boxed{Г\approx}$, генератор импульсный $\boxed{Г}$, осциллограф $\boxed{N}$, стрелочный вольтметр (V_1), цифровой вольтметр (V_2). Макет включает в себя две катушки индуктивности (неподвижная L_1 и подвижная L_2), резисторы: R_1 и R_2, и переключатель $П$.

Для исследования явлений электромагнитной индукции, взаимной индукции и самоиндукции используется схема, представленная на рис.5.

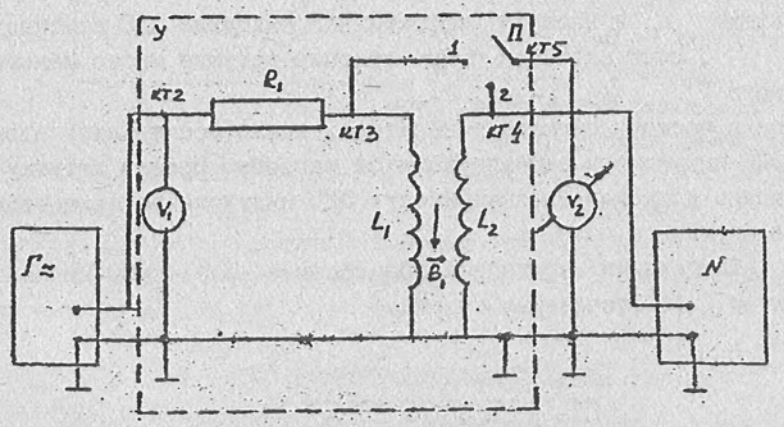


Рис.5

С низкочастотного генератора на цепь L_1R_1 подается синусоидальное напряжение u_1, и в цепи течет синусоидальный ток i_1. Ток i_1 создает переменное магнитное поле с индукцией $\vec{B}_1$, пронизывающее катушки L_1 и L_2. В катушке L_2 возникает ЭДС индукции (взаимоиндукции), а в катушке L_1 - ЭДС самоиндукции. Вольтметр V_1 измеряет эффективное значение синусоидального напряжения U_1 на L_1R_1 - цепи, которое связано с амплитудным значением U_{m1} формулой

$$U_1 = \frac{U_{m1}}{\sqrt{2}}. \qquad (14)$$

Параметры цепи подобраны так, что на используемых частотах $X_L \ll R_1$. При этом условии для I_{m1}, исходя из закона Ома, можно записать:

$$I_{m1} = \frac{U_{m1}}{R_1}. \qquad (15)$$

Скорость изменения тока $\frac{di_1}{dt}$ и магнитного поля $\frac{dB_1}{dt}$ пропорциональны частоте f, которая измеряется по шкале генератора. Когда переключатель $П$ находится в положении 2, вольтметр V_2 подключен к катушке L_2 и измеряет эффективное значение ЭДС индукции (взаимоиндукции) E_2, которое связано с амплитудным E_{m2} формулой $E_2 = \frac{E_{m2}}{\sqrt{2}}$. На осциллографе наблюдается форма ЭДС. Когда переключатель $П$ находится в положении I, вольтметр V_2 подключен к катушке L_1 и измеряет эффективное значение ЭДС самоиндукции E_1, если активное сопротивление катушки много меньше индуктивного ($R_K \ll X_L$).

Изменяя частоту сигнала генератора, можно исследовать зависимость ЭДС индукции и самоиндукции от частоты. Вращая катушку L_2, можно исследовать зависимость ЭДС индукции от ориентации контура в магнитном поле.

Для исследования переходных процессов в LR-цепи используется схема, представленная на рис.6.

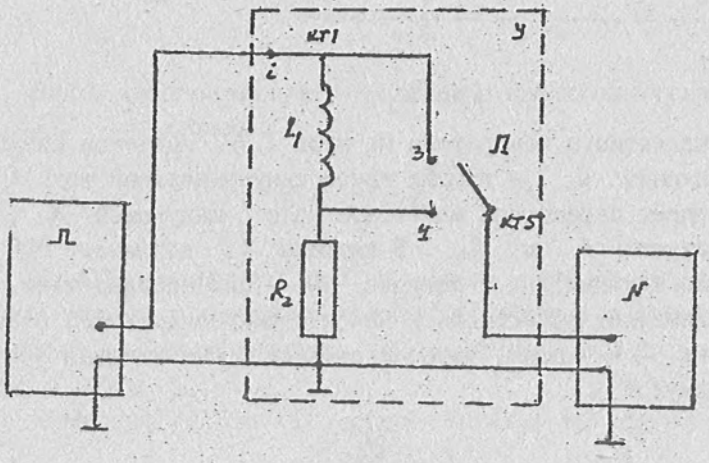


Рис.6

С импульсного генератора на цепь L_1R_2 подаются прямоугольные импульсы напряжения амплитудой U_m и длительностью τ_u (рис.7). В момент $t=0$ (передний фронт импульса, а – рис.7) на L_1R_2 -цепь "мгновенно" подается напряжение U_m и держится постоянным в течение длительности импульса τ_u. За это время происходит нарастание тока i в L_1R_2 -цепи. В момент времени $t=\tau_u$ (задний фронт импульса, б – рис.7) напряжение "мгновенно" снимается, в результате происходит спад тока.

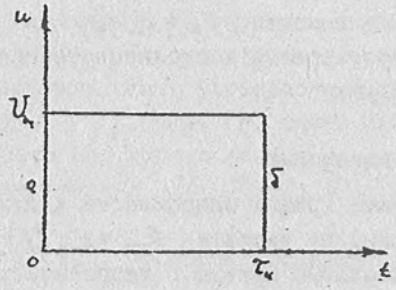


Рис.7

Когда переключатель $П$ находится в положении 3, осциллограф подключен ко всей L_2R_2 -цепи и показывает форму напряжения, которое подается с генератора. Если переключатель $П$ находится в положении 4, осциллограф подключен к резистору R_2 и показывает форму напряжения u_2 на R_2, которое согласно закона Ома $u_2 = iR_2$, зависит от времени так же, как и ток i в цепи. Измеряя с помощью осциллографа значения напряжения u_R в различные моменты времени t, можно получить зависимость $u_R = u_R(t)$ или $i = i(t)$

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1. Исследование электромагнитной индукции, взаимной индукции и самоиндукции

3.1.1. Подготовка установки к работе

а) Подсоединить к макету приборы согласно схеме на рис.5.
б) Подготовить к работе и включить приборы.
в) Поставить переключатель $П$ на макете в положение 2. При этом вольтметр V_2 будет измерять ЭДС индукции (взаимоиндукции) в катушке L_2.
г) Подать с генератора синусоидальный сигнал частотой f =200Гц и напряжением U =8 В.
д) По вольтметру V_1 установить эффективное значение напряжения U_1 =8 В.
е) Ориентировать катушки L_1 и L_2 так, чтобы угол между их

плоскостями был равен нулю.

ж) Вольтметром V_2 измерить эффективное значение ЭДС индукции (взаимоиндукции) E_2 в катушке L_2.

з) Исследовать визуально форму $e_2 = e_2(t)$ на осциллографе.

3.I.2. Исследование зависимости ЭДС индукции (взаимоиндукции) от частоты магнитного поля.

Изменяя частоту генератора f от 200 Гц до 2000 Гц с интервалом Δf =200 Гц, снять зависимость $E_2 = E_2(f)$. При этом по вольтметру V_1 контролировать постоянство напряжения U_1 (тока I_1 через катушку L_1).

3.I.3. Обработка результатов измерений

а) По результатам измерений построить график зависимости амплитуды ЭДС индукции (взаимоиндукции) от частоты $E_{m2} = E_{m2}(f)$. Качественно сравнить экспериментальную кривую с теоретической, полученной на основе формулы (5).

б) По экспериментальному графику $E_{m2} = E_{m2}(f)$ рассчитать максимальное потокосцепление Ψ_{m21} катушки L_2 и взаимную индуктивность L_{21}.

в) Рассчитать погрешности измерений Ψ_{m21} и L_{21} на частоте f =2000 Гц.

3.I.4. Исследование зависимости ЭДС индукции от ориентации контура в магнитном поле.

а) Установить частоту синусоидального тока f =2000 Гц.

б) Изменяя угол α между плоскостями катушек (угол между индукцией магнитного поля $\vec{B}_1$ и нормалью $\vec{n}_2$ к плоскости катушки L_2) от 0 до 180^0 с интервалом $\Delta\alpha$ =15^0, снять зависимость эффективного значения ЭДС индукции от угла

$$E_2 = E_2(\alpha).$$

3.I.5. Обработка результатов измерений

По результатам измерений построить график зависимости амплитуды ЭДС индукции от угла $E_{m2} = E_{m2}(\alpha)$. Здесь же построить теоретическую зависимость $E_{m2}^{теор} = |E_{m2}(\alpha)|$ – формула (2), используя значение Ψ_{m21}, полученное в эксперименте на f = =2000 Гц (п.п.3.I.2., 3.I.3.), так, чтобы $E_{m2}^{теор}(0) = E_{m2}^{эксп}(0)$. Сравнить экспериментальную и теоретическую кривые.

3.I.6. Исследование зависимости ЭДС самоиндукции от частоты синусоидального тока

а) Поставить переключатель $П$ на макете в положение I. При этом вольтметр V_2 будет измерять эффективное значение ЭДС самоиндукции E_1 в катушке L_1 (если $R_1 \ll X_{L_1}$).

б) Изменяя частоту генератора f от 500 Гц до 2 кГц с интервалом Δf =250 Гц, снять зависимость $E_1 = E_1(f)$. При этом необходимо по вольтметру V_1 контролировать постоянство напряжения U_1 (тока I_1 через катушку L_1).

3.I.7. Обработка результатов измерений

а) По результатам измерений построить график зависимости амплитуды ЭДС самоиндукции от частоты $E_{m1} = E_{m1}(f)$. Качественно сравнить экспериментальную кривую с теоретической, полученной на основе формулы (8).

б) По результатам измерений построить график зависимости индуктивного сопротивления катушки от частоты $X_{L_1} = X_{L_1}(f)$, где согласно формулам (8), (I3) и (I4) $X_{L_1} = \left(R/U_1\right) E_1(f)$. Качественно сравнить экспериментальную кривую с теоретической, полученной на основе формулы (9).

в) Из экспериментального графика $X_{L_1} = X_{L_1}(f)$ определить индуктивность L катушки L_1.

г) Рассчитать погрешность измерения L на частоте f =2000 Гц.

3.2. Исследование переходных процессов в LR-цепи

3.2.I. Проведение измерений

а) Подсоединить к макету приборы согласно схеме на рис.6.

б) Подготовить к работе и включить приборы.

в) Поставить переключатель $П$ на макете в положение 3. При этом осциллограф подключен ко всей L,R_2-цепи.

г) Подать с импульсного генератора прямоугольные импульсы напряжения положительной полярности длительностью $\tau_и$ =I мс, час-

тотой повторений $\frac{1}{T_п}$ =100 Гц, амплитудой U_m =3 В.

д) Осциллографом измерить амплитуду импульсного напряжения U_m на L_1R_2-цепи и длительность импульса $\tau_и$.

е) Поставить переключатель $П$ на макете в положение 4. При этом на осциллограф подается напряжение U_R с резистора R_2, совпадающее по форме с током i в L_1R_2-цепи.

ж) Установить картинку на осциллографе так, чтобы нарастание занимало весь экран.

з) Измеряя осциллографом напряжение U_R в процессе его нарастания в различные моменты времени t, снять зависимость $U_R^{нарост}=U_R(t)$.

и) Установить картинку на осциллографе так, чтобы спад U_R занимал весь экран.

к) Измеряя осциллографом напряжение U_R в процессе его спада в различные моменты времени t, снять зависимость $U_R^{спад}=U_R(t)$.

3.2.2. Обработка результатов измерений.

а) По результатам измерений построить график зависимости тока i в L_1R_2-цепи от времени в процессе нарастания тока $i^{нарост}=i(t)$, а также график $\ln(1-i/I)=R(t)$, где I - установившийся в цепи ток. Качественно сравнить экспериментальную кривую с теоретической, полученной на основе формулы (II).

б) Из экспериментального графика $\ln(1-i/I)=R(t)$ определить постоянную времени цепи τ и индуктивность L.

в) По результатам измерений построить график зависимости тока i в L_1R_2-цепи от времени в процессе спада тока $i^{спад}=i(t)$, а также график $\ln(i/I)=F(t)$. Качественно сравнить экспериментальную кривую с теоретической, полученной на основе формулы (I2).

г) Из экспериментального графика $\ln(i/I)=F(t)$ определить постоянную времени τ и индуктивность L. Сравнить τ и L со значениями, полученными из графика, изображающего процесс нарастания тока (п.3.2.2, б).

4. УИРС. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИНДУКТИВНОСТИ ДВУХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ КАТУШЕК ОТ ИХ ВЗАИМНОЙ ОРИЕНТАЦИИ

Исследование проводится на макете, где имеется переключатель $П$ на пять положений.

а) Поставить переключатель $П$ на макете в положение 5, при этом все элементы L_i, R_i будут изолированы друг от друга.

б) На основании имеющейся аппаратуры разработать и собрать схему для измерения индуктивности L цепи, состоящей из двух последовательно соединенных катушек.

в) Экспериментально исследовать зависимость индуктивности цепи из двух последовательно соединенных катушек L_1 и L_2 от угла α между их плоскостями в диапазоне от 0 до 360°.

г) Получить теоретическую зависимость $L=L(\alpha)$ для цепи из двух последовательно соединенных катушек, удовлетворительно описывающую результаты эксперимента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2, 1978. С.174-190,260,263.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М., Милковская Л.В. Курс физики. Т.2, 1977. С.262-269.
3. Калашников С.Г. Электричество, 1985. С.178-199.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Магнитный поток, потокосцепление.
2. Электромагнитная индукция.
3. Взаимная индукция. Взаимная индуктивность.
4. Самоиндукция. Индуктивность.
5. Переходные процессы установления тока в LR-цепи.
6. Методика эксперимента. Назначение и функциональные возможности используемой в установке аппаратуры.

УДК 537.85

Лабораторная работа № 2-27

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Л. А. Кузнецов, А. А. Радионов, В. К. Майстренко, Т. Ф. Федорова

Дано краткое описание собственных и вынужденных электрических колебаний в колебательном контуре. Представлена экспериментальная установка по исследованию электрических колебаний и порядок работы на ней.

ВВЕДЕНИЕ

Колебательное движение – одно из самых распространенных в природе и технике. Колебания совершают свободно подвешенные тела и тела на пружинах – маятники. При распространении звука и сейсмволн колеблются частицы среды. Свет и радиоволны – распространяющиеся колебания электромагнитного поля. Колебания различных конструкций, аппаратов, машин, судов и т.д. (вибрация) – вредное явление, с которым приходится бороться на производстве и транспорте. Колебательные движения зарядов (переменные токи) в электрических цепях широко применяются в электротехнике. На колебаниях атомов в молекулах основана работа мазеров – СВЧ генераторов. Несмотря на различную физическую природу, все колебательные процессы описываются одинаковыми уравнениями. Таким образом, экспериментальное исследование колебательного движения на примере колебаний тока в LCR-контуре является важной задачей в формировании знаний современного инженера.

Целью данной работы являются экспериментальное исследование собственных и вынужденных колебаний тока и напряжений на элементах в колебательном контуре, измерение параметров контура: индуктивности L, сопротивления R, добротности Q.

I. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

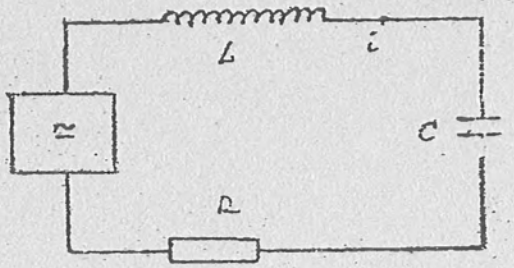


Рис.I

Уравнение, которому удовлетворяет ток i в колебательном контуре (рис.I) с подключенным к нему генератором синусоидальной ЭДС ($e=E_m \sin\omega t$), имеет вид

$$\frac{d^2i}{dt^2} + 2\beta\frac{di}{dt} + \omega_0^2 i = E_m' \cos\omega t, \quad (1)$$

где $\beta = \frac{R}{2L}$ – коэффициент затухания; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – собственная круговая частота; R – сопротивление резистора; L – индуктивность катушки; C – емкость конденсатора; $E_m' = \frac{\omega}{L} E_m$; E_m, ω – амплитуда и круговая частота синусоидальной ЭДС.

Общее решение линейного неоднородного уравнения (I) состоит из общего решения соответствующего ему однородного уравнения и частного решения неоднородного уравнения (I):

$$i = I_{m_0}' e^{-\beta t} \sin(\omega_0' t + \alpha_0) + I_m \sin(\omega t - \varphi), \quad (2)$$

где $\omega_0' = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ – круговая частота собственных затухающих колебаний тока; I_{m_0}', α_0 – начальные амплитуда и фаза собственных колебаний; I_m – амплитуда вынужденных колебаний тока и φ – разность фаз между ЭДС и током, которые даются выражениями:

$$I_m = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{E_m}{Z}; \quad (3)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{X_L - X_C}{R}\right), \quad (4)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ – импеданс цепи; $X_L = \omega L$ – индуктивное сопротивление катушки синусоидальному току; $X_C = \frac{1}{\omega C}$ – емкостное сопротивление конденсатора.

I.1. Собственные колебания

Первый член в выражении (2) представляет собой собственные затухающие колебания тока, которые существуют только в начальный период (переходные процессы), а также могут иметь место без генератора, если первоначально зарядить конденсатор или создать ток в контуре. Аналогичными формулами описываются также собственные колебания заряда на конденсаторе и напряжений на элементах контура: u_C, u_L, u_R. При этом возможны два случая: а) $\beta^2 < \omega_0^2$, т.е. $R < 2\sqrt{L/C}$. В этом случае ω_0' – действительная, и собственные колебания представляют собой квазипериодический процесс с круговой частотой ω_0', $f_0' = \omega_0'/2\pi$, периодом $T' = 2\pi/\omega_0'$ и затухающей амплитудой $I_m'(t) = I_{m_0}' e^{-\beta t}$ (рис.2).

За время релаксации $\tau = \frac{1}{\beta} = 2L/R$ амплитуда тока уменьшается в e раз ($e = 2{,}7$).

Качество контура характеризуется добротностью Q, определяемой как отношение энергии, запасенной в контуре, к энергии, расходуемой за период:

$$Q = 2\pi \frac{W}{W_{пт}}, \qquad (5)$$

где $W = \frac{1}{2} I_m^2$ – запасенная энергия; $P = \frac{I_m^2 R}{2}$ – мощность потерь; $W_{пт} = PT' = P/f_0'$ – энергия, расходуемая за период T'. Учитывая, что расчет добротности в колебательном контуре проводится на собственной частоте колебательного контура, можно легко перейти к следующему выражению для добротности (при $\beta \ll \omega_0$):

$$Q = \omega_0 \frac{W}{P} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\pi c}{T'}, \qquad (6)$$

откуда следует, что добротность равна числу колебаний в контуре за время редаксации, умноженному на π.

б) $\beta^2 \geq \omega_0^2$, т.е. $R \geq 2\sqrt{L/C}$. В этом случае ω_c' – мнимая и собственные колебания представляют собой апериодический процесс, изображенный на рис.3,а, б. Сопротивление $R_{кр} = 2\sqrt{L/C}$, при котором периодический процесс переходит в апериодический, называется критическим.

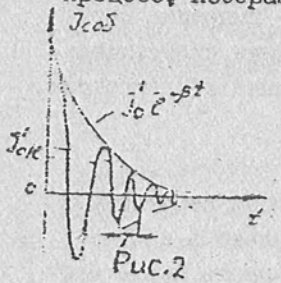


Рис.2

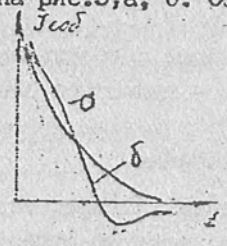


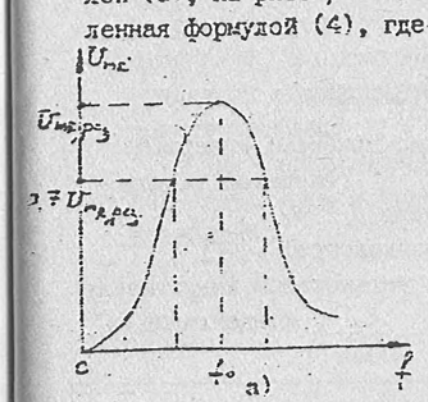
Рис.3

I.2. Вынужденные колебания

С течением времени первый член в формуле (2) обращается в нуль и остается лишь второй, описывающий вынужденные колебания тока в контуре, амплитуда которых дается выражением (3). Для амплитуды вынужденных колебаний напряжения $U_{вн}$ на резисторе R согласно закону Ома имеем:

$$U_{вн} = \frac{R E_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \qquad (7)$$

Выражения (3) и (7) определяют амплитудно-частотные характеристики контура, выражение (4) – фазочастотную характеристику. На рис.4,а приведена резонансная кривая, представленная формулой (7), на рис.4,б – фазочастотная характеристика, представленная формулой (4), где $f = \frac{\omega}{2\pi}$;



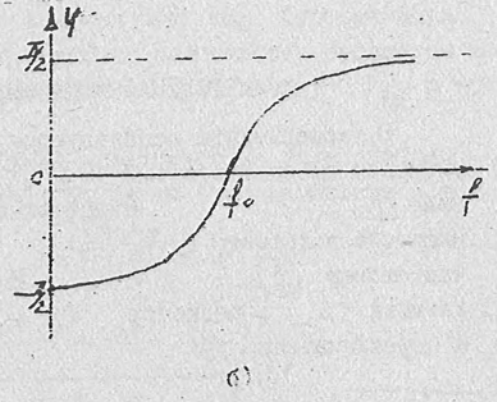


Рис.4

При совпадении частоты ЭДС с собственной частотой контура ($f = f_0$) амплитуды колебаний тока $I_{m,рез}$ и напряжения на резисторе $U_{вн,рез}$ максимальны. Подобный отклик колебательной системы на периодическое воздействие называется резонансом.

Шириной полосы пропускания колебательной системы (рис.4,а) принято называть интервал частот $\Delta f = f_2 - f_1$, где $f_{1,2}$ – значения частот, при которых резонансная кривая проходит через уровень $U_{вн} = U_{вн,рез}/\sqrt{2} = 0{,}7\,U_{вн,рез}$, где $U_{вн,рез}$ – амплитуда напряжения на резисторе при $f = f_0$. На границах полосы пропускания мощность, рассеиваемая на сопротивлении R, равна половине мощности, рассеиваемой при резонансе.

Определим зависимость между добротностью контура и шириной полосы его пропускания.

Подставив выражение (7) в соотношение $\frac{U_{вн}(\omega_1)}{U_{вн,рез}(\omega_1)} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ с учетом (6), при условии $\omega_1 \approx \omega_0$, получаем:

$$\frac{E_m R \sqrt{R^2 + \left(\omega_1 L - \frac{1}{\omega_1 C}\right)^2}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega_1 L - \frac{1}{\omega_1 C}\right)^2}\; E_m R} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega_1 L - \frac{1}{\omega_1 C}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_1}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega_1}\right)^2 Q^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \frac{\Delta\omega^2}{\omega_1^2}}} = \frac{1}{\sqrt{2}},$$

откуда следует:

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{f_0}{\Delta f} \quad . \qquad (8)$$

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И УСТАНОВКА

В эксперименте используются следующие приборы: генератор сигналов высокочастотный [Г≅], генератор импульсный [⎍], стрелочный вольтметр (V_1), цифровой вольтметр (V_2), осциллограф [N], частотомер (f). На макете установлены индуктивная катушка L, резистор R_1, реостат R_2, конденсатор C и переключатель $П$.

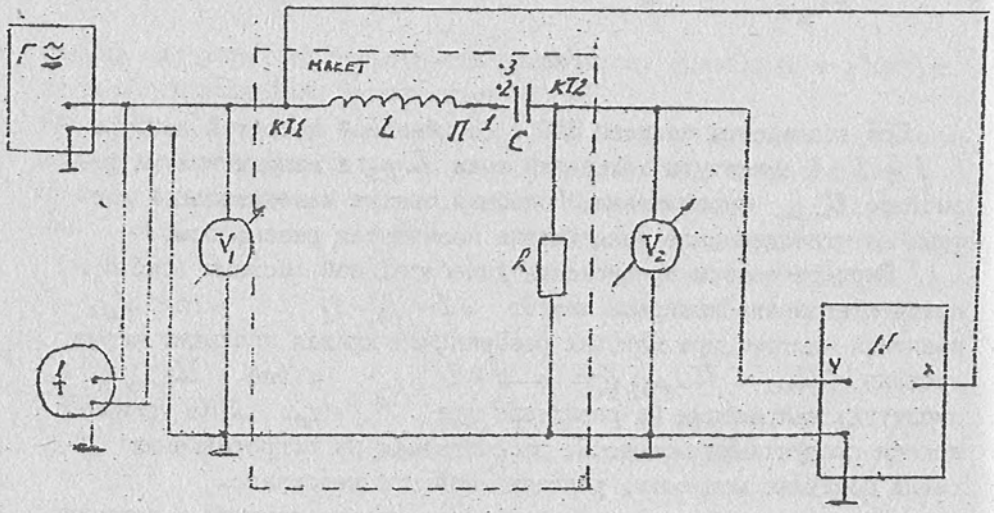


Рис.5

Исследование вынужденных колебаний проводится по схеме, представленной на рис.5 (переключатель П в положении I).

Высокочастотный синусоидальный генератор возбуждает в колебательном контуре LCR_1 вынужденные колебания тока. Вольтметр V_1 измеряет эффективное значение напряжения, подаваемого на контур (U_1), вольтметр V_2 – эффективное значение напряжения на резисторе (U_2), частотомер – частоту колебаний, на осциллографе наблюдается форма колебаний u_R .

Эффективные значения U_1 и U_2 связаны с амплитудными значениями U_{m1} и U_{m2} соотношением вида $U = U_m/\sqrt{2}$. В режиме измерения разности фаз (смотри описание к лабораторной работе № 2-23) осциллографом измеряется разность фаз между $u_{вх}$ (подается на вход "X") и током в контуре или u_c (подается на вход "У"). В эксперименте исследуются зависимости амплитуды вынужденных колебаний U_{m2} и разности фаз φ между $u_{вх}$ и током от частоты.

Для исследования собственных электрических колебаний используется схема, представленная на рис.6 (переключатель П в положении 2).

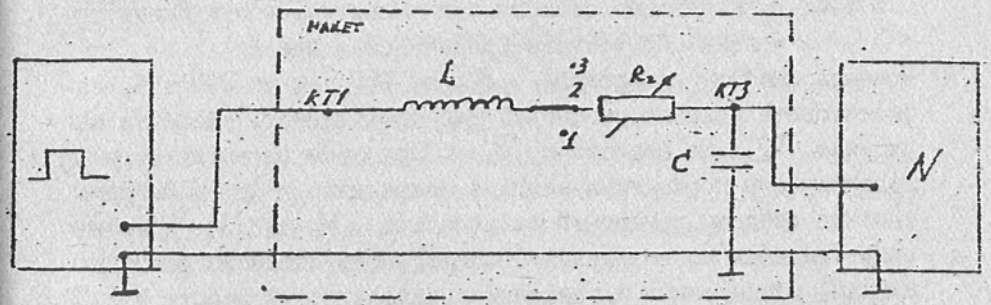


Рис.6

С импульсного генератора подаются короткие периодические импульсы напряжения на колебательный контур LCR_2 . При включении напряжения (передний фронт импульса) за время длительности импульса конденсатор заряжается. После выключения напряжения (задний фронт импульса) конденсатор начинает разряжаться, в результате в контуре возникают собственные затухающие колебания тока, заряда на конденсаторе, напряжений на элементах контура. Колебания напряжения на конденсаторе u_c просматриваются на осциллографе. Осциллографом также измеряются основные характеристики собственных колебаний: период T и время релаксации τ .

3. ЭКСПЕРИМЕНТ

3.I. Исследование вынужденных колебаний.

3.I.I. Подготовка установки к работе.

а) Поставить переключатель П на макете в положение I и подключить к макету приборы согласно схеме на рис.5.

б) Подготовить к работе и включить приборы.

в) Подать с генератора синусоидальный сигнал частотой f =180 кГц и напряжением $U_{вх}$ =150 мВ.

г) По вольтметру V_1 установить эффективное значение входного напряжения $U_{вх}$ =150 мВ.

д) Частотомером измерить частоту колебаний и контролировать ее в дальнейших исследованиях.

е) Вольтметром V_2 измерить эффективное значение напряжения U_2 на резисторе R_1.

ж) Исследовать на осциллографе визуально форму вынужденных колебаний напряжения u_R.

3.I.2. Исследование зависимости амплитуды вынужденных колебаний от частоты (резонансная кривая)

а) Изменяя частоту генератора f от 180 кГц до 300 кГц, зафиксировать явление резонанса для эффективного значения напряжения U_R на резисторе R_1. При этом по вольтметру V_1 поддерживать постоянным входное напряжение $U_{вх}$. Выбрать удобные пределы измерений вольтметров V_1 и V_2 и величину усиления по вертикали осциллографа, согласно рекомендациям, приведенным в описании к лабораторной работе № 2-23.

б) Изменяя частоту генератора f от 180 кГц до 300 кГц, снять зависимость $U_R = U_R(f)$. При этом по вольтметру V_1 поддерживать постоянным входное напряжение $U_{вх}$. Интервал изменения частоты Δf выбирать разным в зависимости от изменения U_R: в областях частот, далеких от резонансной, брать Δf =20 кГц; в областях частот, близких к резонансной, Δf =5 кГц, измерить резонансную частоту f_0.

3.I.3. Обработка результатов измерений

а) По результатам измерений построить график зависимости $U_R = U_R(f)$. Вычислить экспериментальную кривую с теоретической, определяемой формулой (7).

б) Из экспериментального графика $U_R = U_R(f)$ при известном значении емкости конденсатора C, найти следующие параметры контура: $f_0, \omega_0, \Delta f, Q, L, R_1, \beta$.

в) Рассчитать погрешности измерений f_0, L, Q, R_1.

3.I.4. Исследование зависимости разности фаз между ЭДС и током в контуре

а) Перевести осциллограф в режим измерения разности фаз двух колебаний φ.

б) Изменяя частоту генератора f от 180 кГц до 300 кГц, снять зависимость $\varphi = \varphi(f)$. Интервал изменения частоты выбирать аналогично указанному в п.3.I.2 б. Установить значение резонансной частоты.

3.I.5. Обработка результатов измерений

а) По результатам измерений построить график зависимости $\varphi = \varphi(f)$. Вычислить экспериментальную кривую с теоретической, определяемой формулой (4).

б) Из экспериментального графика $\varphi = \varphi(f)$, при заданном значении C, найти f_0, ω_0 и L. Сравнить значения f_0, ω_0 и L с результатами, полученными в п.3.I.3.

3.2. Исследование собственных электрических колебаний

3.2.I. Проведение измерений

а) Поставить переключатель П на макете в положение 2 и подключить к макету приборы согласно схеме на рис.6. Ручку реостата R_2 поставить в крайнее левое положение.

б) Подготовить к работе и включить приборы.

в) Подать с импульсного генератора сигнал длительностью импульсов $\tau_и$ =2 мкс, частотой повторений $f_и$ =5 10^3 Гц и амплитудой $U_{вых}$ =80÷120 мВ (выход генератора Г5-54, $C \to 1:10^6$).

г) Исследовать на осциллографе визуально форму затухающих колебаний напряжения u_C на конденсаторе C и зарисовать ее. Сравнить изображение на экране с теоретическим графиком (рис.2).

д) Измерить осциллографом период колебаний T' и время релаксации τ.

е) Изменяя сопротивление реостата R_2, наблюдать на осциллографе, как меняется форма собственных колебаний. Зарисовать две осциллограммы при разных значениях R_2.

ж) Подобрать значение R_2, когда колебательный режим переходит в апериодический. Зарисовать форму "колебаний" при апериодическом режиме.

з) Поставить ручку реостата R_2 в крайнее левое положение и подать с генератора сигнал длительностью импульсов $\tau_и$ =140мкс,

частотой повторения $f_{\text{п}}$ =2,4 кГц и амплитудой $U_{\text{вх}}$ = = 80÷120 мВ.

На экране осциллографа будет наблюдаться форма общего решения неоднородного уравнения (I), описывающего процессы в колебательном контуре с импульсной ЭДС. В момент включения и выключения напряжения будут возбуждаться собственные затухающие колебания – происходить переходные процессы (рис.7).

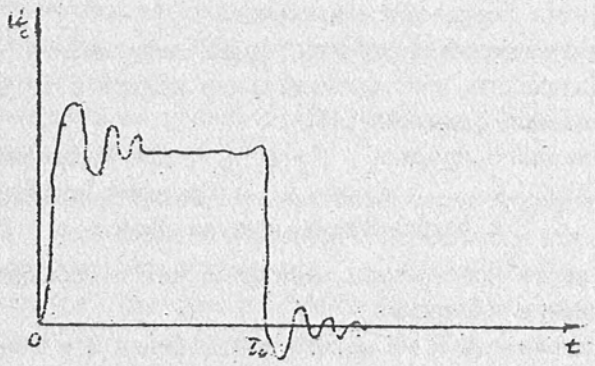


Рис.7

Зарисовать осциллограмму, полученную на экране осциллографа, и измерить длительность переходных процессов $t_{\text{пер}}$.

3.2.2. Обработка результатов измерений

а) Воспроизвести осциллограмму собственных затухающих колебаний.

б) По экспериментальным значениям T' и τ найти следующие параметры контура: f_0', ω_0', ρ, Q, ω_0, f_0, L, R_2. Учесть, что общая емкость $C_{\text{об}} = C + C_{\text{вх}}$, где $C_{\text{вх}}$ – входная емкость осциллографа, подключенного параллельно конденсатору C.

в) Рассчитать погрешности измерений f', ρ, Q.

г) Воспроизвести две осциллограммы колебаний для различных значений сопротивления R_2. Указать, в каком случае значение R_2 больше.

д) Воспроизвести осциллограмму апериодического процесса. Рассчитать критическое сопротивление $R_{\text{кр}}$.

е) Воспроизвести осциллограмму переходных процессов, возникающих при подаче на контур импульсных напряжений. Сравнить время длительности переходных процессов $t_{\text{пер}}$ с временем релаксации τ.

4. УИРС. ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ В СВЯЗАННЫХ КОНТУРАХ

а) Собрать схему с двумя связанными контурами, представленную на рис.8. (Переключатель П на макете – в положении 4.)

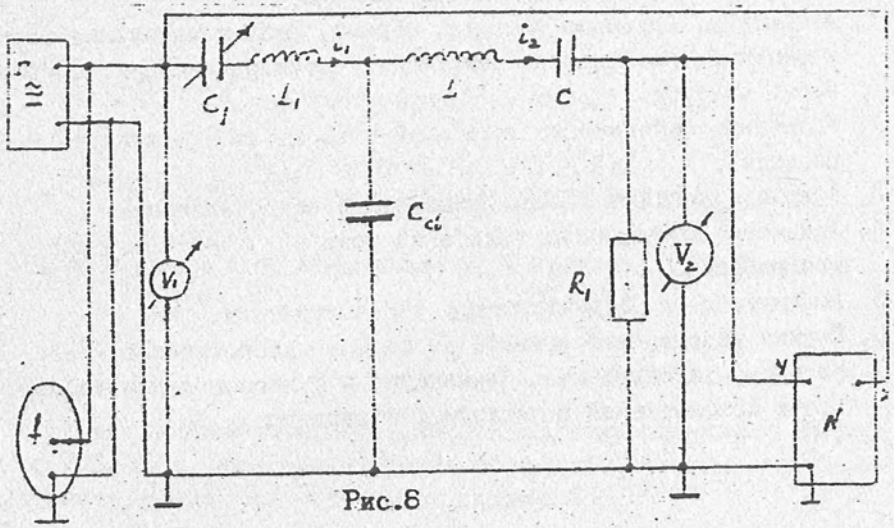


Рис.8

б) Экспериментально подобрать параметры элементов двух контуров LC и L_1C_1 так, чтобы их собственные частоты были одинаковы.

в) Экспериментально исследовать зависимость $U_{R_1} = U_{R_1}(f)$ – резонансная кривая, где U_{R_1} – эффективное напряжение на резисторе R_1, f – частота колебаний. При этом по вольтметру V_1 поддерживать постоянным входное напряжение $U_{\text{вх}}$. Эксперименты провести для двух значений емкости связи $C_{\text{св}}$.

г) Измерить разность фаз колебаний токов i_1 и i_2 в контурах при резонансных частотах.

д) Получить теоретически резонансную кривую для контуров без сопротивления, удовлетворительно описывающую результаты эксперимента.

е) На основе результатов экспериментальных и теоретических исследований рассчитать величину емкости связи $C_{\text{св}}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2, 1978. С.251-266.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М., Милковская Л.Б. Курс физики. Т.2. 1977. С.237-349.

3. Калашников С.Г. Электричество, 1977. С.455–466, 476–498.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.III, 1977. С.544–556, 557–561, 573–593, 612–616.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Амплитуда, круговая частота, период, фаза и начальная фаза колебаний. Коэффициент затухания, время релаксации. Добротность контура.
2. Уравнение собственных колебаний тока в *LCR* – контуре и его решение.
3. Апериодический процесс. Критическое сопротивление.
4. Уравнение вынужденных колебаний тока в *LCR* – контуре и его решение.
5. Амплитудно- и фазочастотные характеристики.
6. Ширина резонансной кривой, ее связь с добротностью.
7. Методика эксперимента. Назначение и функциональные возможности используемой в установке аппаратуры.

УДК 537.85

Лабораторная работа № 2-27а

ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ. РЕЗОНАНС ТОКОВ

Л. А. Кузнецов, В. К. Майстренко, А. А. Радионов, Т. Ф. Федорова

Дано краткое описание прохождения синусоидального сигнала через *LCR*-цепи. Представлена экспериментальная установка для исследования резонанса токов и резонанса напряжений.

I. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.

I.1. Комплексная форма записи гармонического колебания

Для расчета цепей переменного тока широко используется метод векторных диаграмм. Этот метод основан на представлении гармонического колебания в комплексной форме. Согласно формуле Эйлера

$$e^{j\varphi} = \cos\varphi + j\sin\varphi$$

величину $\hat{i} = I_m e^{j(\omega t+\varphi_0)}$ можно представить как

$$\hat{i} = I_m e^{j(\omega t+\varphi_0)} = I_m\cos(\omega t+\varphi_0) + jI_m\sin(\omega t+\varphi_0).$$

Тогда гармоническое колебание $i = I_m\cos(\omega t+\varphi_0)$ является реальной частью комплексной величины $\hat{i}$, т.е.

$$i = Re\left(I_m e^{j(\omega t+\varphi_0)}\right),$$

где I_m, ω, φ_0 – амплитуда, круговая частота и начальная фаза колебания соответственно.

Выражение

$$\hat{i} = I_m e^{j(\omega t+\varphi_0)} = \left(I_m e^{j\varphi_0}\right)e^{j\omega t} = \dot{I}_m e^{j\omega t} \qquad (I)$$

называется записью гармонического колебания в комплексной форме,

$\dot{I}_m = I_m e^{j\varphi_0}$ – комплексная амплитуда.

Комплексную амплитуду $\dot{I}_m$ можно изобразить вектором на комплексной плоскости, модуль (длина) которого равна амплитуде колебания I_m, а угол наклона к реальной оси – начальной фазе φ_0 (рис.I).

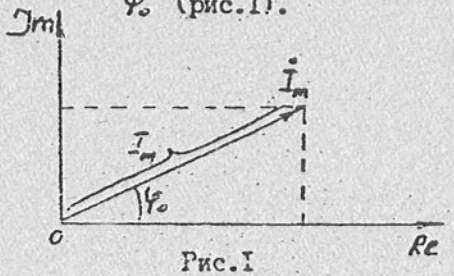


Рис.I

I.2. Резонанс напряжений

Рассмотрим цепь переменного тока с последовательно соединенными конденсатором C, катушкой индуктивности L и резистором R, являющуюся нагрузкой синусоидального генератора с выходным напряжением $u = U_m\cos\omega t$ (рис.2).

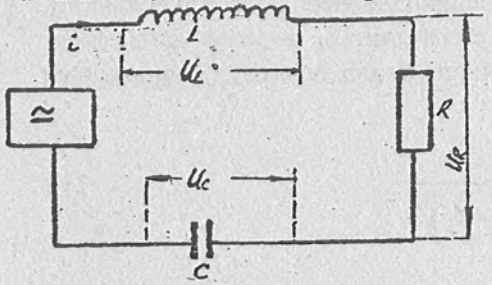


Рис.2

Тогда ток в цепи и напряжения на элементах будут также меняться по синусоидальному закону. Найдем их амплитуды и начальные фазы методом векторных диаграмм.

Первым построим вектор $\dot{I}_m$ – комплексную амплитуду тока. Пусть $\varphi_{0i} = 0$ (рис.3). Длину I_m возьмем произвольно

Напряжение u_R совпадает по фазе с током i. Поэтому вектор $\dot{U}_{mR}$ сонаправлен с вектором $\dot{I}_m$ (рис.3), длина вектора $\dot{U}_{mR}$ определяется по закону Ома $U_{mR} = I_m R$.

Напряжение u_L опережает ток i по фазе на $\pi/2$, поэтому вектор $\dot{U}_{mL}$ повернут относительно вектора $\dot{I}_m$ на $\pi/2$ (рис.3), а его длина $U_{mL} = X_L I_m$, где $X_L = \omega L$ – индуктивное сопротивление.

Напряжение u_C отстает от i по фазе на $\pi/2$, поэтому вектор $\dot{U}_{mC}$ повернут относительно вектора $\dot{I}_m$ на $(-\pi/2)$ (рис.3), а его длина $U_{mC} = X_C I_m$, где $X_C = \frac{1}{\omega C}$ – емкостное сопротивление.

Сумма комплексных амплитуд напряжений на L, C и R равна комплексной амплитуде напряжения генератора:

$$\dot{U}_{mL} + \dot{U}_{mC} + \dot{U}_{mR} = \dot{U}_m.$$

Построим сначала на векторной диаграмме вектор $\dot{U}_{mLC}$, где $\dot{U}_{mLC} = \dot{U}_{mL} + \dot{U}_{mC}$.

Как видно, u_L и u_C колеблются в противофазе, поэтому $\dot{U}_{mLC}$ направлен в сторону большего напряжения, а его длина $U_{mLC} = |\dot{U}_{mL} - \dot{U}_{mC}| = |X_{LC}|I_m$, где $X_{LC} = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ – реактивное сопротивление рассматриваемой цепи.

Складывая геометрически $\dot{U}_{mLC}$ и $\dot{U}_{mR}$ (рис.3), для U_m имеем

$$U_m = \sqrt{U_{mR}^2 + U_{mLC}^2} = I_m \sqrt{R^2 + X_{LC}^2} = Z I_m , \qquad (1)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + X_{LC}^2}$ – полное сопротивление цепи (импеданс).

Используя полученные выше соотношения, выразим амплитуды тока и напряжений на элементах цепи через амплитуду напряжения генератора U_m :

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} ; \qquad (2)$$

$$U_{mR} = \frac{R U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} ; \qquad (3)$$

$$U_{mL} = \frac{\omega L U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} ; \qquad (4)$$

$$U_{mC} = \frac{U_m}{\omega C \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} . \qquad (5)$$

Сдвиг фаз φ между внешним напряжением и током в цепи определим (рис.3) по следующей формуле:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{U_{mLC}}{U_{mR}} = \operatorname{arctg} \left(\frac{\omega L - 1/\omega C}{R}\right). \qquad (6)$$

Из формул (2)-(6) видно, что амплитуды тока и напряжений на элементах, а также сдвиг фаз между током и внешним напряжением зависят от круговой частоты ω . Так при $\omega = 1/\sqrt{LC}$, $X_{LC} = 0$ $Z = R$, т.е. сопротивление цепи чисто активное.

Амплитуды тока и напряжения на резисторе при этом достигают максимального значения $I_{mp} = \frac{U_m}{R}$, $U_{mR\,рез} = U_m$, амплитуды напряжений на катушке индуктивности и конденсаторе оказываются одинаковыми (близкими к максимальным):

$$U_{mL,рез} = U_{mC,рез} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}\, U_m .$$

Так как величины u_L и u_C колеблются в противофазе, то

$$U_{mLC,рез} = U_{mL,рез} - U_{mC,рез} = 0 .$$

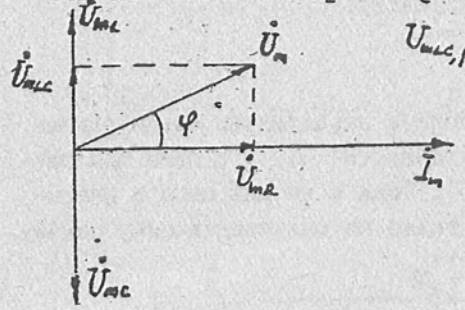


Рис.3

Этот эффект в цепи с последовательно соединенными L и C называется резонансом напряжений, а $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – резонансной круговой частотой.

На рис.4 приведена зависимость $U_{mR} = U_{mR}(f)$ – амплитудно-частотная характеристика цепи, где $f = \omega/2\pi$ – частота колебаний.

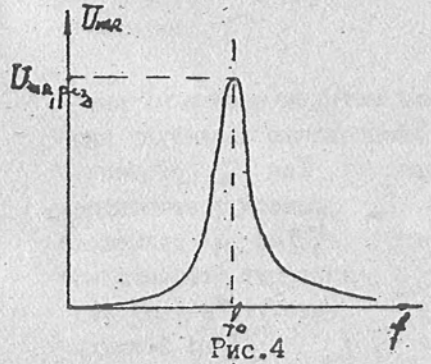


Рис.4

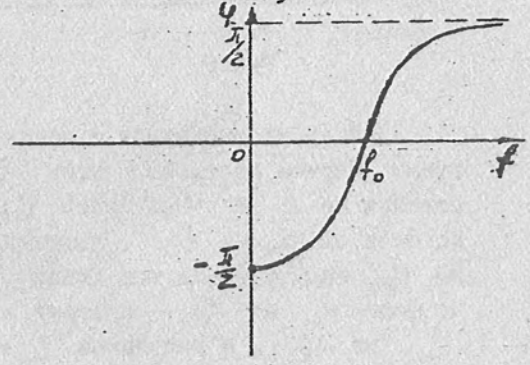


Рис.5

На рис.5 приведена зависимость $\varphi = \varphi(f)$ – фазо-частотная характеристика, представленная формулой (6). При резонансе полное сопротивление цепи чисто активное и сдвиг фаз между внешним напряжением и током в цепи $\varphi = 0$. Если $f < f_0$, то $X_L < X_C$ и $\varphi < 0$, при этом ток опережает напряжение на всей цепи по

фазе, т.е. реактивное сопротивление цепи $X_{LC}=X_L-X_C$ носит емкостной характер. При $f>f_0$, $X_L>X_C$ и $\varphi>0$ – напряжение на всей цепи опережает ток по фазе – реактивное сопротивление цепи X_{LC} носит индуктивный характер.

I.3. Резонанс токов

Рассмотрим цепь переменного тока с параллельно соединенными конденсатором C и катушкой индуктивности L. К цепи приложено напряжение $u=U_m\cos\omega t$ (рис.6). Токи в ветвях цепи и напряжения на элементах будут меняться также по синусоидальному закону.

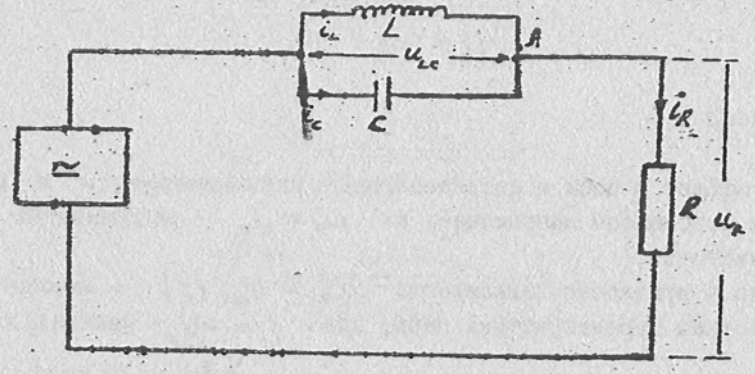


Рис.6

Найдем их амплитуды и начальные фазы методом векторных диаграмм. Первым построим вектор $\dot U_{mLC}$ – комплексную амплитуду напряжения на L и C. Пусть $\varphi_{LC}=0$ (рис.7). Ток i_L отстает по фазе от u_{LC} на $\pi/2$, поэтому вектор $\dot I_{mL}$ повернут относительно $\dot U_{mLC}$ на $(-\pi/2)$, а его длина $I_{mL}=U_{mLC}/X_L$. Ток i_C опережает по фазе u_{LC} на $\pi/2$, поэтому вектор $\dot I_{mC}$ повернут относительно $\dot U_{mLC}$ на $\pi/2$, а его длина $I_{mC}=U_{mLC}/X_C$ (рис.7). По I-му закону Кирхгофа для узла A, $\dot I_{mC}=\dot I_{mL}+\dot I_{mC}$. Тогда амплитуда

$$I_{mR}=|I_{mC}-I_{mL}|=U_{mLC}\left|\frac{1}{X_C}-\frac{1}{X_L}\right|=\frac{U_{mLC}}{|X_{LC}|}, \qquad (7)$$

где $X_{LC}=\dfrac{X_L\cdot X_C}{X_L-X_C}$ – реактивное сопротивление цепи.

Напряжение u_R совпадает по фазе с током i_R (рис.7), а его амплитуда $U_{mR}=I_mR=\left(\dfrac{R}{X_{LC}}\right)U_{mLC}$.

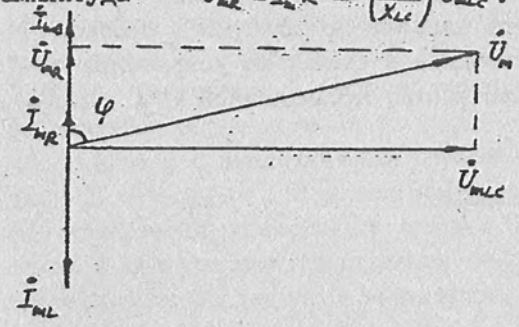


Рис.7

Комплексная амплитуда выходного напряжения генератора $\dot U_m=\dot U_{mR}+\dot U_{mLC}$ (рис.7). Тогда, как видно из рис.7,

$$U_m=\sqrt{U_{mR}^2+U_{mLC}^2}=U_{mLC}\sqrt{\frac{R^2}{X_{LC}^2}+1}=\frac{U_{mLC}}{|X_{LC}|}\sqrt{R^2+X_{LC}^2}=\frac{Z}{|X_{LC}|}U_{mLC},$$

где $Z=\sqrt{R^2+X_{LC}^2}$ – полное сопротивление (импеданс) цепи.

Используя полученные выше соотношения, выразим амплитуды токов и напряжений на элементах через амплитуду напряжения генератора U_m. Выражения для тока и напряжения на сопротивлении имеют вид

$$I_{mR}=\frac{U_m}{Z}=\frac{U_m}{\sqrt{R^2+X_{LC}^2}}=\frac{U_m}{\sqrt{R^2+\left(\frac{L}{C}\right)^2\left(\frac{1}{\omega L-1/\omega C}\right)^2}}; \qquad (8)$$

$$U_{mR}=I_mR=\frac{R\,U_m}{\sqrt{R^2+\left(\frac{L}{C}\right)^2\left(\frac{1}{\omega L-1/\omega C}\right)^2}}. \qquad (9)$$

Из формулы (8) видно, что амплитуда тока в цепи зависит от круговой частоты. Так при $\omega=1/\sqrt{LC}=\omega_0$, $X_{LC,рез}\to\infty$ и $I_{mR,рез}=0$, т.е. ток через сопротивление практически не течет, в то время как через емкость и индуктивность текут токи равной амплитуды, колебания которых находятся в противофазе, так что

$$I_{mR,рез}=|I_{mC,рез}-I_{mL,рез}|=0.$$

Этот эффект, который наблюдается в цепи с параллельно соединенными L и C, называется резонансом токов.

На рис.8 дан график зависимости U_{mR} от частоты генерато-

ра $f = \omega/2\pi$ (формула (9)). Если снимать выходное напряжение с сопротивления, то, как видно из графика, сигнал частоты f_0 через цепь не проходит. Такая цепь называется фильтром – пробкой на частоте f_0. Она нашла применение в схемах по устранению помехи определенной частоты, в частности, промышленной (f =50 Гц).

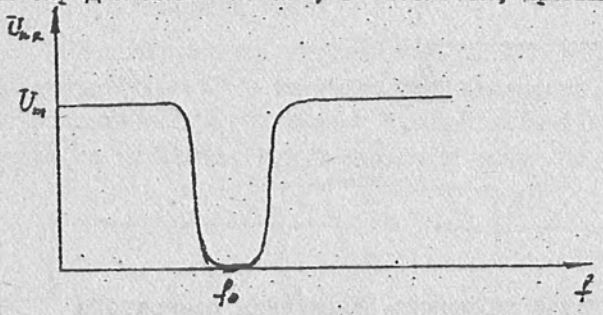


Рис.8

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И УСТАНОВКА

В эксперименте используются следующие приборы: генератор сигналов высокочастотный Г≈ , вольтметр (V_1) , вольтметр (V_2), частотомер (f) , осциллограф N . На макете установлены катушка индуктивности L , резистор R_1 , конденсатор C и переключатель $П$.

Исследование резонанса напряжений проводится по схеме, представленной на рис.9 (переключатель $П$ в положении I).

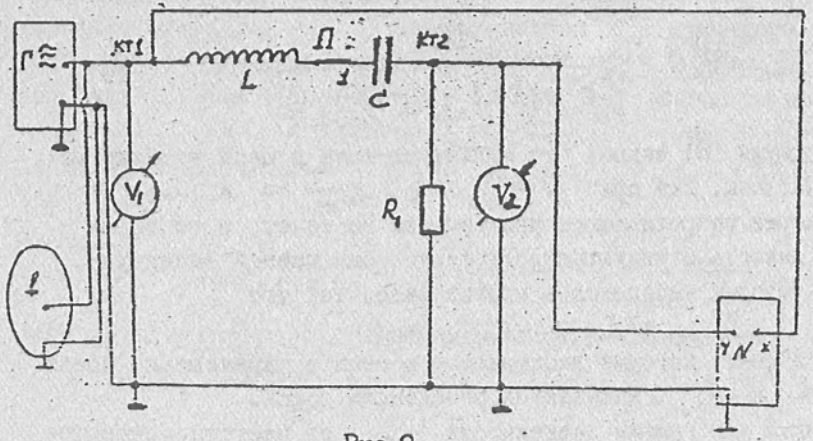


Рис.9

Высокочастотный синусоидальный генератор нагружен на цепь с последовательно соединенными L и C . Вольтметр V_1 измеряет эффективное значение напряжения, приложенного к цепи (U), вольтметр V_2 – эффективное значение напряжения на резисторе (U_R), частотомер – частоту переменного тока, на осциллографе наблюдается форма колебаний u_R . Эффективные значения U и U_R связаны с амплитудными значениями U_m и U_{mR} формулой вида $U = U_m/\sqrt{2}$. В режиме измерения разности фаз осциллографом измеряется разность фаз между u (подается на вход "X") и током в контуре или напряжением u_R (подается на вход "У"). В эксперименте исследуются амплитудно- и фазо-частотные характеристики цепи.

Исследование резонанса токов проводится по схеме, представленной на рис.10 (переключатель $П$ в положении 3).

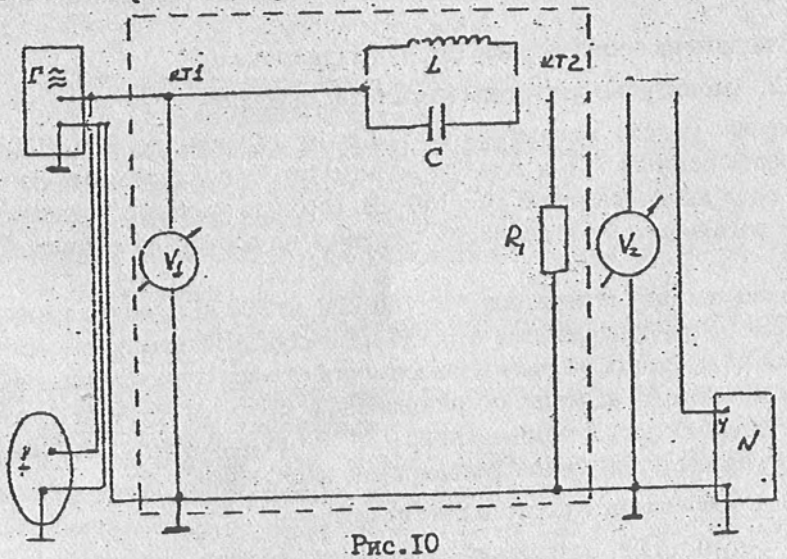


Рис.10

Высокочастотный синусоидальный генератор нагружен на цепь с параллельно соединенными L и C . Эффективное значение напряжения, приложенного к цепи, измеряется вольтметром V_1 . Частота переменного тока измеряется частотомером, вольтметр V_2 измеряет эффективное значение напряжения на резисторе, а на осциллографе просматривается его форма. В эксперименте исследуется амплитудно-частотная характеристика цепи.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ

3.1. Исследование резонанса напряжений.

3.1.1. Подготовка установки к работе.

а) Поставить переключатель П на макете в положение 1 и подключить к макету приборы согласно схеме рис. 9.

б) Подготовить к работе и включить приборы.

в) Подать с генератора синусоидальный сигнал частотой $f = 180$ кГц и напряжением $U = 150$ мВ.

г) По вольтметру V_1 установить эффективное значение напряжения $U = 150$ мВ.

д) Частотомером определить частоту сигнала и контролировать ее в дальнейших измерениях.

е) Вольтметром V_2 измерить эффективное значение напряжения на резисторе U_R.

ж) Наблюдать на осциллографе форму напряжения u_R.

3.1.2. Амплитудно-частотная характеристика цепи.

а) Изменяя частоту генератора $f = \omega/2\pi$ от 180 кГц до 300 кГц, зафиксировать резонанс. При этом по вольтметру V_1 поддерживать постоянным входное напряжение $U = 150$ мВ. Выбрать удобные пределы измерений вольтметра V_2 и величину усиления по вертикали осциллографа.

б) Изменяя частоту генератора f от 180 кГц до 300 кГц, снять зависимость $U_R = U_R(f)$, поддерживая $U = 150$ мВ = const. Интервал изменения частоты Δf выбирать разным в зависимости от характера изменения U_R: в области частот, далеких от резонансной, брать $\Delta f = 20$ кГц, в области частот, близких к резонансной, – $\Delta f = 5$ кГц. В многократных измерениях установить значение резонансной частоты f_0.

3.1.3. Обработка результатов измерений.

а) По результатам измерений построить график зависимости $U_R = U_R(f)$. Качественно сравнить экспериментальную кривую с теоретической, определяемой формулой (3).

б) Из экспериментального графика $U_R = U_R(f)$ при известном значении C и R_1 найти f_0, ω_0, L.

в) Рассчитать X_L, X_C, X_{LC}, Z на частотах $f_1 = 180$ кГц, $f_2 = 220$ кГц, $f_3 = 300$ кГц.

г) Рассчитать погрешности измерений f_0, L, X_L, X_C.

3.1.4. Исследование зависимости разности фаз между внешним напряжением и током в цепи.

а) Перевести осциллограф в режим измерения разности фаз $\Delta\varphi$ двух

колебаний.

б) Изменяя частоту генератора f от 180 кГц до 300 кГц, снять зависимость $\Delta\varphi = F(f)$. Интервал изменения частоты Δf выбирать в соответствии с указанием п.3.1.2 б. Установить значение резонансной частоты f_0.

3.1.5. Обработка результатов измерений

а) По результатам измерений построить график зависимости $\Delta\varphi = F(f)$. Сравнить экспериментальную кривую с теоретической, определяемой формулой (6).

б) Из экспериментального графика $\Delta\varphi = F(f)$ найти f_0; ω_0 и L. Сравнить значения f_0, ω_0 и L с результатами, полученными в п.3.1.3.

в) Рассчитать X_L и X_C на резонансной частоте f_0.

г) Рассчитать погрешности измерений f_0 и L.

3.2. Исследование резонанса токов

3.2.1. Проведение измерений

а) Поставить переключатель П на макете в положение 3 и подключить к макету приборы согласно схеме на рис.10.

б) Подготовить к работе и включить приборы.

в) Подать с генератора синусоидальный сигнал частотой f =150 кГц и напряжением U =0,9 В.

г) По вольтметру V_1 установить эффективное значение напряжения U =0,9 В.

д) Частотомером измерить частоту сигнала и контролировать ее в дальнейших исследованиях.

е) Вольтметром V_2 измерить U_{R_1} на резисторе R_1.

ж) Наблюдать на осциллографе форму u_{R_1}.

з) Изменяя частоту генератора f от 150 кГц до 300 кГц, снять зависимость $U_{R_1} = U_{R_1}(f)$. Интервал изменения частоты выбирать в соответствии с указанием п.3.1.2 б. Установить значение частоты сигнала f_0, при которой наблюдается резонанс токов.

3.3. Обработка результатов измерений

а) По результатам измерений построить график зависимости $U_{R_1} = U_{R_1}(f)$ и сравнить его с теоретической кривой, определяемой формулой (9).

б) Из экспериментального графика $U_{R_1} = U_{R_1}(f)$ найти f_0, ω_0, L.

в) Рассчитать X_L, X_C, X_{LC}, z на частотах f_1 =180 кГц, f_2 =220 кГц, f_3 =300 кГц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2, 1978. с.251-266.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М., Милковская Л.Б. Курс физики. Т.2, 1977. С.337-349.
3. Калашников С.Г. Электричество, 1977. с.455-466, 476-498.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.Ш, 1977. с.544-556, 557-561, 573-593, 612-616.

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ

Часть 2

Подписано в печать 23.06.2005. Формат 60x84 $^1/_{16}$. Бумага газетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,75. Уч.-изд. л. 7,1. Тираж 1500 экз. Заказ 449.

Нижегородский государственный технический университет.
Типография НГТУ. 603600, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.