

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

А.А. Королёв

С.А. Курашова

А.В.Смирнов

**ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ
РАБОТ**

Часть первая

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано к использованию в университете ИТМО по направлениям подготовки: 09.03.01, 09.03.02, 09.03.03, 09.03.04, 10.03.01, 11.03.02, 11.03.03, 12.03.01, 12.03.02, 12.03.03, 12.03.05, 13.03.02, 14.03.01, 15.03.06, 16.03.01, 24.03.02, 27.03.04, 01.03.02, 18.03.02, 19.03.01 в качестве учебно-методического пособия для реализации основных образовательных программ высшего образования бакалавриата (специалитета)

Санкт-Петербург

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

2019

Королёв А.А., Курашова С.А. Смирнов А.В. Электричество и магнетизм. Методические рекомендации по выполнению лабораторных работ. Часть первая – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 68 с.

Рецензент: Монахов В.В. доцент кафедры вычислительной физики СПбГУ.

Пособие содержит методические рекомендации к выполнению лабораторных работ и теоретические сведения, необходимые для объяснения результатов эксперимента. При подготовке данного пособия использованы материалы научно-исследовательской лаборатории (НИЛ) техники эксперимента Новосибирского государственного технического университета. Для выполнения лабораторных работ используются установки, разработанные НИЛ техники эксперимента Новосибирского государственного технического университета, производства ООО «Опытные приборы».

Учебно-методическое пособие разработано в соответствии с программой курса «Физика» (Б1.Б11) и «Общая физика» (Б1 естественнонаучный модуль 20 и 22) ОС НИУ ИТМО для бакалавров по направлениям подготовки 09.03.01, 09.03.02, 09.03.03, 09.03.04, 10.03.01, 11.03.02, 11.03.03, 12.03.01, 12.03.02, 12.03.03, 12.03.05, 13.03.02, 14.03.01, 15.03.06, 16.03.01, 24.03.02, 27.03.04, 01.03.02, 18.03.02, 19.03.01.

Рекомендовано к печати на заседании Ученого совета ФТФ, 26 декабря 2018г., протокол №11.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2019

© А.А. Королёв, С.А. Курашова, А.В. Смирнов, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1 Изучение картины эквипотенциальных поверхностей и силовых линий электростатического поля с помощью электролитической ванны.....	4
Лабораторная работа №2 Изучение электрических сигналов с помощью электронного осциллографа.....	13
Лабораторная работа №3 Простые линейные цепи.	25
Лабораторная работа №4 Исследование характеристик источника тока.....	39
Лабораторная работа №5 Методы измерения электрического сопротивления.....	46
Лабораторная работа №6 Сегнетоэлектрик.....	49
Лабораторная работа №7 Изучение процесса заряда и разряда конденсатора.....	55
Контрольные вопросы к лабораторным работам	62

Лабораторная работа №1

ИЗУЧЕНИЕ КАРТИНЫ ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И СИЛОВЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ВАННЫ

Цель работы: Осуществить построение эквипотенциальных линий электростатического поля с помощью экспериментального моделирования в проводящей среде, в которой протекает переменный ток.

Требуемое оборудование

Модульные учебные комплексы:

1. Модульный учебный комплекс МУК-ЭМ1;

Приборы:

1. Блок амперметра-вольтметра АВ1.
2. Генератор напряжений ГН1.
3. Электролитическая ванна ЭВ01.
4. Проводящие тела разной формы.
5. Проводники Ш4/Ш1,6: 4 шт.
6. Листы масштабной-координатной бумаги (миллиметровки) формата А4: 2шт.

Описание блока амперметр-вольтметр АВ1..

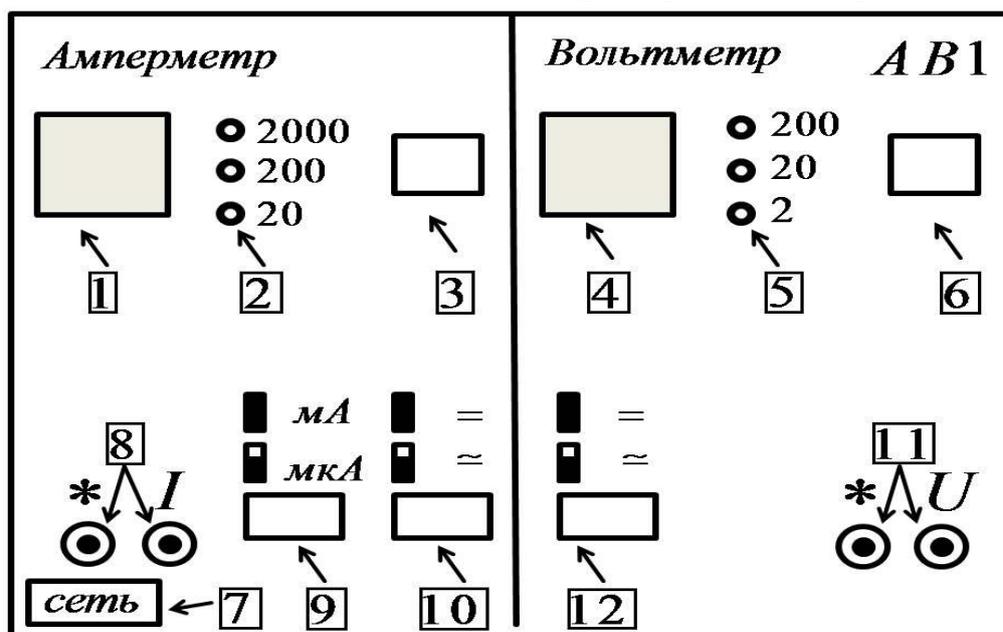


Рис.1 Схема рабочей панели АВ1

Назначение

Амперметр-вольтметр АВ1 предназначен для проведения лабораторных практикумов в вузах. Прибор применяется в составе модульных учебных комплексов серий МУК-ЭМ (Электричество и магнетизм), МУК-ОК (квантовая оптика), МУК-ТТ1(твердое тело), МУК-ФОЭ1 (Физические основы электроники) и МУК-ЭТ1 (Электротехника).

Прибор предназначен для:

- измерения постоянного напряжения;
- измерения амплитуды переменного напряжения;
- измерения постоянной силы тока;
- измерения амплитуды переменной силы тока.

Электрические параметры и характеристики

- Индикатор показаний вольтметра 3.5 разряда (max 1999);
- Индикатор показаний амперметра 3.5 разряда (max 1999);
- Пределы измерения постоянного напряжения: $\pm 2\text{В}$, $\pm 20\text{В}$, $\pm 200\text{В}$;
- Пределы измерения амплитуды переменного напряжения: 2В , 20В , 200В ;
- Пределы измерения постоянной силы тока: $\pm 20\text{мкА}$, $\pm 200\text{мкА}$, $\pm 2000\text{мкА}$, $\pm 20\text{мА}$, $\pm 200\text{мА}$, $\pm 2000\text{мА}$;
- Пределы измерения амплитуды переменной силы тока: 20мкА , 200мкА , 2000мкА , 20мА , 200мА , 2000мА ;
- Активное входное сопротивление вольтметра при измерении постоянного напряжения не менее 1МОм ;
- Входная ёмкость вольтметра при измерении переменного напряжения не более 50пФ ;
- Частотный диапазон прибора – не менее 30кГц ;
- Падение напряжения на входных клеммах амперметра не превышает 200мВ ;
- Предел допускаемой основной погрешности при измерении постоянных величин – не более 5% от предела измерения;
- Предел допускаемой основной погрешности при измерении переменных величин (во всем частотном диапазоне), – не более 10% от предела измерения;
- Защита по току и напряжению при неправильно выбранных пределах.

Конструктивные параметры

- Масса прибора не более 3кг ;
- Габаритные размеры прибора $250*150*85\text{мм}$.

Органы управления

1. индикатор значения тока;
2. индикатор выбранного предела измерений амперметра;

3. кнопка переключения пределов измерений амперметра;
4. индикатор значения напряжения;
5. индикатор выбранного предела измерений вольтметра;
6. кнопка переключения пределов измерений вольтметра;
7. кнопка выключателя “Сеть”;
8. входные гнезда измерителя тока;
9. кнопка переключения мА / мкА;
10. кнопка переключения постоянный / переменный сигнал;
11. входные гнезда измерителя напряжения;
12. кнопка переключения постоянный / переменный сигнал.

Описание генератора напряжений ГН1

Назначение

Генератор напряжений многофункциональный ГН1 предназначен для:

1. генерации постоянного напряжения с регулируемым уровнем;
2. генерации синусоидального напряжения с восемью фиксированными частотами и регулируемой амплитудой. (Значения четырёх частот указаны на генераторе, остальные четыре частоты, обозначенные X1, X2, X3, X4, должны быть определены студентами в процессе выполнения работы.
3. генерации однополярных прямоугольных импульсов с частотой, равной частоте синусоидального напряжения.

Электрические характеристики

Генератор постоянного напряжения имеет следующие параметры:

1. Выходное регулируемое напряжение 0-15 В;
2. Выходной ток до $1\text{А} \pm 10\%$;
3. Защита от перегрузки по току (отключение выхода);
4. Внутреннее сопротивление блока при выключенном внешнем сопротивлении практически равно 0.

Генератор переменного напряжения имеет следующие параметры:

1. Два типа сигналов:
 - а) синусоидальный;
 - б) однополярные прямоугольные импульсы;
2. Восемь фиксированных частот, одинаковых для всех типов сигналов; четыре указаны на передней панели и соответствуют следующим значениям:

$$40 \pm 5\text{Гц}$$

- 400 ± 50Гц
- 1200 ± 100Гц
- 2500 ± 200Гц

Четыре частоты (X1, X2, X3, X4) предполагаются неизвестными, то есть определить их нужно в процессе выполнения лабораторной работы;

3. Электронное переключение фиксированных частот;
4. Выходное напряжение (амплитудное) источника синусоидального напряжения 0 ÷ 15В;
5. Выходное сопротивление источника синусоидального напряжения 10 Ом ± 10%;
6. Выходное напряжение генератора импульсов 3 В ± 10%;
7. Внутреннее сопротивление генератора импульсов 4,3 Ом ± 10%.

Схема панели управления

ГН - 1

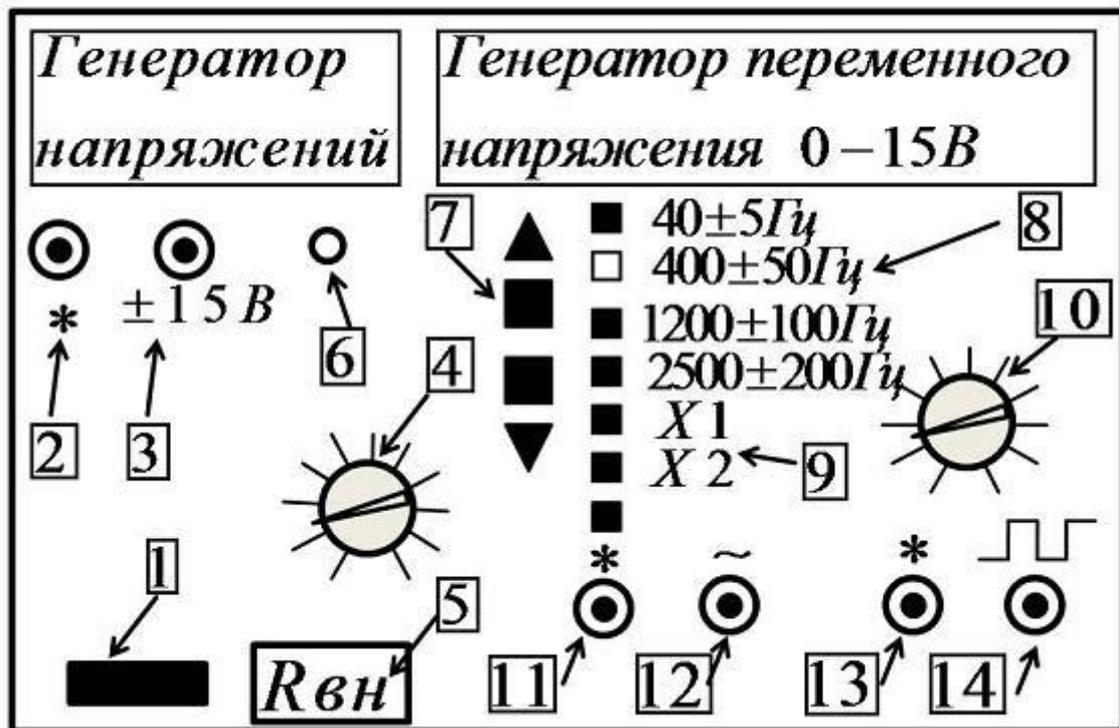


Рис 2. Схема рабочей панели генератора ГН-1

На рис. 2 показана схема панели управления генератора напряжений ГН-1.

1. Кнопка выключателя “Сеть”;
- 2 и 3 Выходные гнезда генератора постоянного напряжения (2 – “земля”, 3 – “сигнал”);
- 4 Регулировка выходного напряжения блока генератора постоянного напряжения;

5. Выключатель внутреннего сопротивления $R = 680 \text{ Ом}$ блока генератора постоянного напряжения;
6. Индикатор перегрузки блока генератора постоянного напряжения;
7. Кнопки переключения частот;
8. Индикатор выбранного диапазона заданных частот;
9. Индикатор выбранного диапазона неизвестных частот;
10. Регулировка выходного напряжения блока генератора синусоидального напряжения;
- 11 и 12. Выходные гнезда генератора синусоидального напряжения (11 – “земля”, 12 – “сигнал”);
- 13 и 14. Выходные гнезда генератора прямоугольных импульсов (13 – “земля”, 14 – “сигнал”).

Краткое теоретическое введение

Структуру электростатического поля можно представить графически с помощью силовых линий и с помощью эквипотенциальных поверхностей (на чертеже обычно изображают сечения таких поверхностей).

Силовые линии строятся так, чтобы касательная в каждой точке такой линии совпадала с вектором \vec{E} электрической напряженности в этой же точке. Густота силовых линий качественно характеризует величину напряженности электростатического поля: в области, где линии идут гуще, модуль вектора \vec{E} больше. Поскольку вектор электрической напряженности в данной точке пространства определяет величину и направление силы, действующей на любой точечный заряд, помещенный в данную точку, этот вектор называют силовой характеристикой электростатического поля.

Другая, энергетическая, характеристика электростатического поля — потенциал φ . Работа сил электростатического поля над зарядом при перемещении этого заряда по произвольной траектории определяется разностью потенциалов между началом и концом траектории. Поверхности равного потенциала $\varphi = const$ называются эквипотенциальными поверхностями.

Силовая и энергетическая характеристики электростатического поля связаны друг с другом соотношением:

$$\vec{E} = -\nabla\varphi. \tag{1}$$

Градиент потенциала, стоящий в правой части этого соотношения в декартовой системе координат, определяется формулой

$$\nabla\varphi = \vec{i} \frac{\partial\varphi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial\varphi}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial\varphi}{\partial z}, \quad (2)$$

где x, y, z – координаты, $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орты координатных осей.

Из свойств градиента следует, что:

- силовые линии пересекают эквипотенциальные поверхности под прямым углом;
- вектор напряженности направлен в сторону убывания потенциала;
- модуль вектора напряженности определяет пространственную быстроту убывания потенциала в направлении силовой линии.

Последнее означает, что, если известны потенциалы φ_1 и φ_2 двух точек, лежащих на одной силовой линии (см. рис. 1), то средняя напряженность между этими точками вычисляется по формуле

$$E_{12} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l_{12}}, \quad (3)$$

где l_{12} – длина участка силовой линии между точками. Если относительное изменение локального значения напряженности между выбранными точками невелико, то формула (3) дает значение близкое к напряженности на середине участка 1–2.

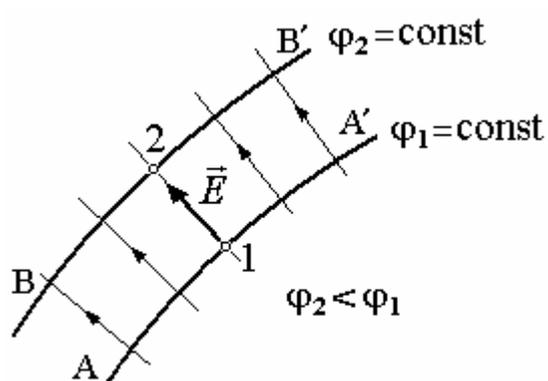


Рис. 3. AA' – эквипотенциальная поверхность с потенциалом φ_1 , BB' – с потенциалом φ_2 ; 1 и 2 – две точки одной силовой линии

Методика проведения эксперимента

В слабо проводящую среду, которая представляет собой недистиллированную воду в электролитической ванне 1, помещают два металлических проводника 2 и 3, подсоединенных к источнику переменного тока 4 (рис. 1). Так как проводимость среды намного меньше проводимости помещенных в нее металлических электродов, то потенциал в разных точках этих электродов с достаточной степенью точности можно считать одинаковым. При этом топография поля в пространстве между

ними будет такой же, какой была бы топография электростатического поля между заряженными проводниками, помещенными в однородную непроводящую среду.

В однородной изотропной среде $\vec{j} = \sigma \vec{E}$, здесь \vec{j} – вектор плотности тока в проводящей среде, σ – удельная электропроводность (проводимость) среды. Метод моделирования электростатического поля в проводящей среде основан на аналогии уравнений, описывающих электрическое поле в вакууме и в изотропной проводящей среде. Метод является удобным для практики, так как позволяет получить путем экспериментального моделирования сложную картину электростатического поля, аналитический расчет которого зачастую невозможен из-за сложности граничных условий. Использование переменного тока позволяет предотвратить выделение на электродах составных частей электролита. Для переменного синусоидального тока в электролите переменное электрическое поле не является потенциальным, в каждой точке напряжение изменяется со временем. Однако понятие «эквипотенциальной поверхности» как поверхности постоянно изменяющегося, но одинакового по амплитуде потенциала можно считать справедливым. Разные эквипотенциальные поверхности при этом характеризуются разным значением амплитуды напряжения.

Для моделирования электростатического поля в данной работе применяется электролитическая ванна ЭВ1, в состав которой входят:

- пластмассовая ванна;
- электроды;
- координатная сетка;
- металлическое кольцо;
- металлическое остриё.

Ниже приведена схема подключения ванны к генератору напряжения и измерительным приборам.

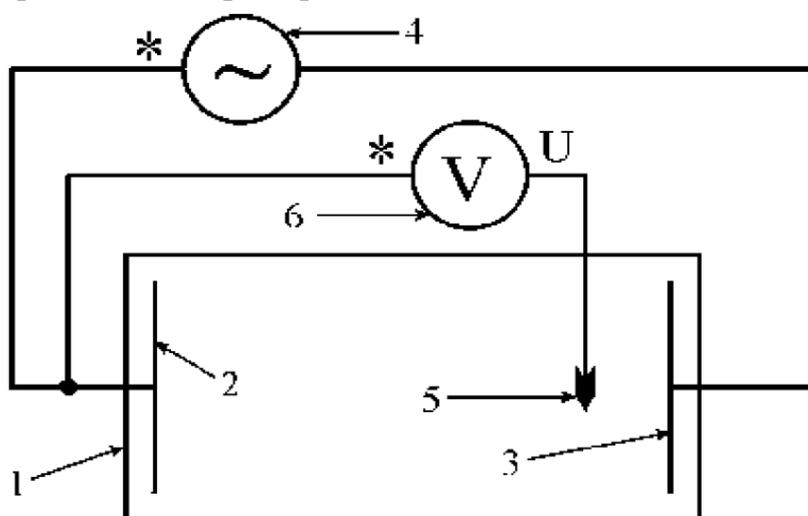


Рис.3. Схема подключения

Рекомендуемое задание к работе

1. Согласуйте с преподавателем конфигурацию исследуемого поля.
2. Соберите схему согласно рис. 1.
3. Оцифруйте на листе масштабной-координатной бумаги в определенном масштабе координатную сетку и отметьте на ней положение и форму электродов.
4. Подключите электроды к генератору звуковых частот. Установите напряжение около 15 В и частоту в диапазоне от 50 до 200 Гц.
5. С помощью вольтметра найдите точки, равноотстоящие по потенциалу (эквипотенциальные поверхности принято проводить так, чтобы между любыми соседними эквипотенциальными поверхностями разность потенциалов была бы одна и та же). Число эквипотенциальных поверхностей – не менее пяти. Число точек, принадлежащих одной эквипотенциальной поверхности – не менее семи. Зонд при измерениях держите вертикально. Запишите данные в таблицу (примеры таблиц для различных конфигураций электродов приведены ниже):

Таблица 1. Зависимость потенциала от координаты для модели плоского конденсатора

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8
X, см								
φ , В								

Таблица 2. Зависимость потенциала от координаты для модели плоского цилиндрического конденсатора

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8
r, мм								
φ , В								

6. По полученной картине эквипотенциальных линий проведите 6 – 7 силовых линий.
7. Оцените величину E – напряженности электрического поля в разных точках пространства.
8. Положите в ванну проводящее тело (по указанию преподавателя, например, кольцо).
9. Начертите картину поля, повторив п. 5 – 6.
10. Оцените величину E – напряженности электрического поля в разных точках пространства. Докажите, что поле неоднородно.

Литература

1. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики.— 8-е изд., стер. — М.: Издательский центр "Академия", 2009.
2. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014.
2. Курепин В.В., Баранов И.В. Обработка экспериментальных данных: Методические указания к лабораторным работам. – СПб, 2012 – 57 с.

Лабораторная работа №2

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ЛАБОРАТОРНОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Цель работы: Ознакомление с устройством осциллографа, изучение с его помощью процессов в электрических цепях.

Приборы:

1. Осциллограф лабораторный ОЦЛ2 1 шт.
2. Генератор звуковых сигналов ЗГ1 1 шт.
3. Генератор напряжений ГН1 1 шт.

Описание осциллографа лабораторного ОЦЛ2.

Осциллограф лабораторный ОЦЛ2 предназначен для проведения практикумов по курсам физики и электротехники. Прибор применяется в составе модульных лабораторных учебных комплексов МУК-ЭМ (по электричеству) и МУК-ЭТ (по электротехнике), а также самостоятельно.

Осциллограф лабораторный предназначен для визуального наблюдения и исследования электрических сигналов путем:

- измерения амплитудных и временных параметров исследуемого сигнала;
- одновременного изображения двух исследуемых сигналов на одной развертке;
- изображения функциональных зависимостей между двумя сигналами в режиме X-Y.

Технические характеристики

Прибор обеспечивает следующие режимы работы:

- Канал I;
- Канал II;
- I, II;
- I+II;
- X-Y.

Диапазоны измерения каждого канала:

- амплитуды постоянного напряжения от $\pm 25 \cdot 10^{-3}$ до ± 80 В;
- амплитуды переменного напряжения от $25 \cdot 10^{-3}$ до 80 В;

Диапазон значений коэффициентов отклонений каналов: 25; 50 мВ/дел.; 0,1; 0,25; 0,5; 1; 2,5; 5; 10 В/дел.

Диапазон значений временной развертки: 20; 50 мкс/дел.; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5 мс/дел.

Активное входное сопротивление прибора при измерении постоянного напряжения не менее 1 МОм;

Входная ёмкость каждого канала не более 30 пФ;

Максимальная частота дискретизации 1 МГц;

Режим синхронизации – автоматический по переднему фронту;

Разность фаз между каналами вертикального и горизонтального отклонений в режиме X-Y не более 10° в полосе частот от 20 Гц до 100 кГц.

Размер экрана 115x85 мм;

Размер точки экрана 0,4x0,4 мм;

Предел допускаемой основной погрешности при отображении сигнала, не более 10% от предела измерения;

Защита по напряжению при неправильно выбранных пределах

Панель управления работой ОЦЛ2

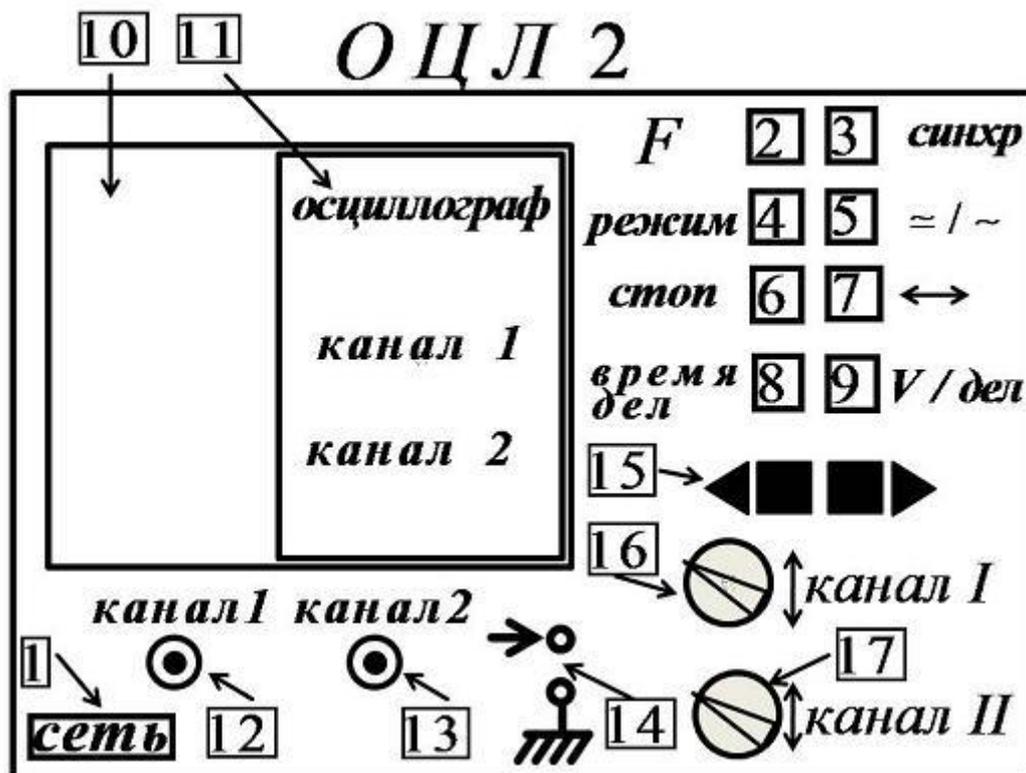


Рис.1. Схема рабочей панели осциллографа ОЦЛ2

- 1 – кнопка выключателя “Сеть”;
- 2 – кнопка выбора типа прибора (осциллограф или анализатор сигнала), в данной версии не используется;
- 3 – кнопка включения режима синхронизации ;
- 4 – кнопка перехода к переключению режимов с помощью кнопок 15.
- 5 – кнопка выбора режима измерения входного сигнала, переменного или переменного-постоянного « \sim / \sim »;
- 6 – кнопка запоминания оцифрованного сигнала «Стоп»;
- 7 – кнопка смещения оцифрованного сигнала « \leftrightarrow »;
- 8 – кнопка включения режима регулировки цены деления по оси при измерении времени;
- 9 – кнопка включения режима регулировки цены деления по оси при измерении напряжения;
- 10 – графический дисплей, поле для изображения сигнала;
- 11 – графический дисплей, поле для изображения режимов;
- 12 – вход канала I;
- 13 – вход канала II;
- 14 – вход синхронизации;
- 15– кнопки последовательного изменения цены деления шкалы или режима, пользоваться ею можно только после того, как выбран соответствующий вид работы– кнопки 3,4,8,9;
- 16 – ручки смещения первого канала по вертикали;
- 17 – ручки смещения второго канала по вертикали.

Генератор звуковых сигналов ЗГ1

Назначение

Генератор звуковых частот ЗГ1 предназначен для получения синусоидального напряжения с регулируемой амплитудой и частотой.

Электрические характеристики

Генератор звуковых частот ЗГ1 имеет следующие параметры:

- 1. Выходное регулируемое напряжение (амплитудное) 0-15 В;
- 2. Выходной ток до $1\text{А} \pm 10\%$;
- 3. Прибор генерирует синусоидальное напряжение в интервале 20Гц ÷ 30кГц, разбитом на 8 диапазонов;

20 ÷ 50 Гц

50 ÷ 130 Гц

130 ÷ 350 Гц

350 ÷ 900 Гц

900 ÷ 2000 Гц
 2000 ÷ 5000 Гц
 5000 ÷ 12000 Гц
 12000 ÷ 30000 Гц

4. Электронное переключение диапазонов частот;
5. Наличие индикации текущего рабочего диапазона частот;
6. Наличие встроенного частотомера с цифровой индикацией частоты;
7. Погрешность измерения частоты - единица младшего разряда индикатора частоты;
8. Изменение амплитуды сигналов при переключении диапазонов не более 5%;
9. Время установления стабильного режима генерации после перестройки частоты – не более 1с;
10. Внутреннее сопротивление прибора $110\text{м} \pm 10\%$;

Схема панели управления

На рис. 2 показана схема панели управления генератора звуковых частот ЗГ1.

1. Кнопка выключателя “Сеть”;
2. Индикатор генерируемой частоты;
3. Индикаторы единиц измерения частот;
4. Регулятор выходного напряжения генератора;
5. Регулятор выходной частоты генератора в пределах выбранного диапазона;

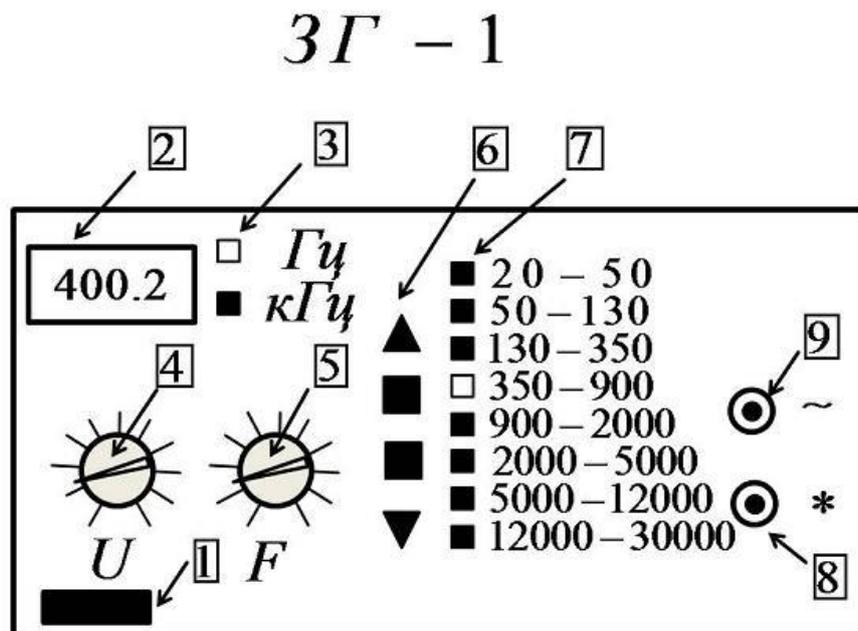


Рис. 2. Схема рабочей панели генератора ЗГ1

6. Кнопки переключения диапазонов частот;

7. Индикатор выбранного диапазона частот;
 8. и 9. Выходные гнезда генератора (8 – “земля”, 9 – “сигнал”).

Действующее (эффективное) значение напряжения и силы тока.

Переменный ток, протекая по проводнику, нагревает его так же, как и постоянный ток. Силу переменного тока удобно оценивать по его тепловому действию или, как говорят, по действующей, эффективной его величине.

Действующее или эффективное значение переменного напряжения

Действующее или эффективное значение переменного напряжения U_d равно по величине такому постоянному напряжению, которое обеспечивает выделение в проводнике того же количества теплоты, что и переменное напряжение.

$$Q(t) = \int_0^t \frac{(U_0 \cos \omega t)^2}{R} dt = \int_0^t \frac{U_d^2}{R} dt$$

При длительности интервала времени намного превосходящей период колебаний $t \gg T$ действующее значение напряжения в корень из двух раз меньше амплитудного значения напряжения.

$$U_0 = U_d \sqrt{2}$$

Некоторые вольтметры измеряют действующее значение, а некоторые - амплитудное.

Фигуры Лиссажу

Замкнутые траектории, прочерчиваемые точкой (след электронного луча), совершающей одновременно два гармонических колебания двух взаимно перпендикулярных направлениях. Впервые изучены Жюлем Антуаном Лиссажу (J. A. Lissajous). Вид фигур Лиссажу зависит от соотношения между периодами (частотами), фазами и амплитудами обоих колебаний.

Математическое выражение для кривой Лиссажу

$$\begin{aligned} x(t) &= A \sin(\omega_1 t + \delta) \\ y(t) &= B \sin(\omega_2 t) \end{aligned}$$

где A, B - амплитуды колебаний, ω_1, ω_2 - частоты, δ - сдвиг фаз
 В простейшем случае равенства обеих частот $\omega_1 = \omega_2$ фигуры Лиссажу представляют собой эллипсы, которые при разности фаз $\delta = 0$; или $\delta = \pi$ вырождаются в отрезки прямых, а при $\delta = \pi/2$ и равенстве амплитуд $A = B$ превращаются в окружность. Ещё один пример фигуры Лиссажу -

парабола ($\omega_1/\omega_2 = 2, \delta = \pi/2$). При других соотношениях фигуры Лиссажу представляют собой более сложные фигуры, которые являются замкнутыми при условии ω_1/ω_2 - рациональное число.

Если периоды обоих колебаний не совпадают точно, то фигура Лиссажу всё время меняется, вследствие чего эллипс непрерывно деформируется. При существенно различных периодах эллипс деформируется быстро, картина размывается и фигуры Лиссажу не наблюдаются. Однако если периоды относятся как целые числа, то через промежуток времени, равный наименьшему кратному обоим периодам, движущаяся точка снова возвращается в то же положение - получают фигуры Лиссажу более сложной формы. При этом число касаний фигурой Лиссажу сторон прямоугольника X и Y, в который она вписывается, даёт отношение периодов обоих колебаний по соответствующим осям - T_x и T_y .

Фигуры Лиссажу можно наблюдать, например, на экране электронно-лучевого осциллографа, если к двум парам отклоняющих пластин подведены переменные напряжения с равными или кратными периодами. Вид фигур Лиссажу позволяет определить соотношения между периодами и фазами обоих колебаний. Если колебания, которые совершает точка, происходят не по гармоническому, а по более сложному закону, но с одинаковым периодом, то получают замкнутые траектории, аналогичные фигурам, но искажённой формы. По виду этих фигур можно судить о форме колебаний. Таким образом, наблюдение фигур Лиссажу – удобный метод исследования соотношений между периодами и фазами колебаний, а также и формы колебаний.

Рекомендуемое задание к работе

Ручку регулятора амплитуды выходного напряжения на генераторе звуковых колебаний (4) и ручку регулятора амплитуды выходного сигнала на генераторе переменного напряжения (10) установите в положение 1–3 деления (НЕ БОЛЬШЕ!) см. рис. 3.



Рис. 3. Ручка регулятора амплитуды входного сигнала

1. Соберите схему для изучения синусоидальных сигналов (рис. 4). Приборы не включайте.

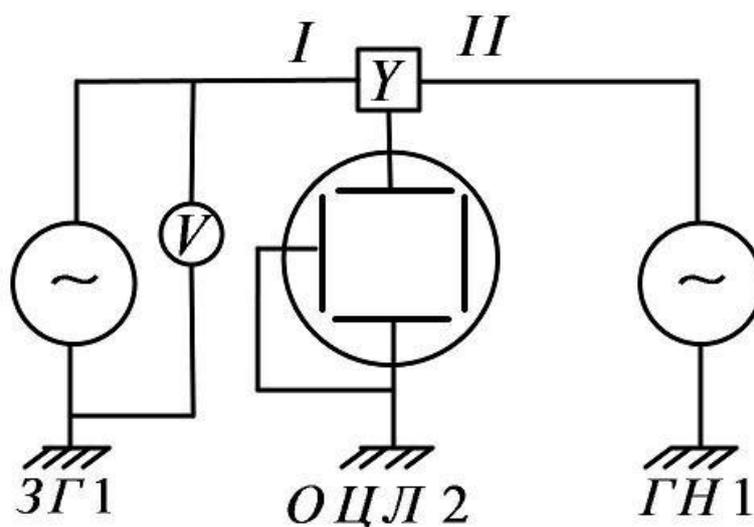


Рис. 4. Схема для изучения синусоидальных сигналов

Синусоидальный сигнал с генератора звуковых колебаний ЗГ1 (гнезда 8 и 9) подайте с помощью тройника на канал I осциллографа (12). К этому же тройнику подключите входные гнезда вольтметра АВ1 для измерения переменного напряжения. Синусоидальный сигнал с блока генератора переменного напряжения ГН1 (гнезда 11 и 12) подайте на канал II осциллографа (13).

2. Включите осциллограф, подождите 3 минуты.

3. Включите генератор звуковых колебаний ЗГ1 и генератор напряжений ГН1.

4. Кнопками переключения частот (кнопки 6 рис. 2), выберите режим работы ЗГ1 900 ÷ 2000 Гц, должен загореться соответствующий индикатор (7 рис. 2). Установите выходную частоту генератора ЗГ1 около 1200 Гц и запишите её.

5. Кнопками переключения частот (7 рис. 2), выберите режим работы ГН1 1200 ± 100 Гц, должен загореться соответствующий индикатор (8 рис. 3). Нажмите клавишу перехода к переключению режимов “Режим” на осциллографе (кнопка 4 рис.1). Нажимая кнопки переключения режимов (15 рис. 1) выберите режим “I канал”- в правой колонке на экране осциллографа он будет выделен синим цветом. Вращая ручку смещения первого канала по вертикали (16), выведите сигнал первого канала (зелёная кривая) на середину шкалы.

6. Нажмите клавишу регулировки цены деления осциллографа по напряжению “V/дел” (кнопка 9 рис. 1). Нажимая кнопки переключения режимов (15 рис. 1), добейтесь, чтобы размах измеряемого сигнала на экране осциллографа составлял 70-80 процентов от шкалы. Запишите цену

деления шкалы осциллографа по напряжению в выбранном диапазоне (В/дел.), см. индикатор в правой колонке на экране осциллографа. Рекомендуемое значение 2 В/дел. Измерьте амплитуду сигнала генератора звуковых колебаний ЗГ1 и её погрешность с помощью осциллографа. Измерьте с помощью вольтметра АВ1 амплитудное значение сигнала генератора звуковых колебаний ЗГ1 и её погрешность. Заполните таблицу 1. Сравните полученные результаты.

Таблица 1.

Канал I	ЗГ-1
Цена деления Y – шкалы осциллографа, В/ дел	
Амплитуда сигнала, измеренная с помощью осциллографа, дел	
Амплитуда сигнала, измеренная с помощью осциллографа, U, B	
Погрешность измерения амплитуды с помощью осциллографа $\Delta U, B$	
Амплитуда сигнала, измеренная с помощью вольтметра, U, B	
Погрешность измерения амплитуды с помощью вольтметра $\Delta U, B$	
Относительное отклонение показаний осциллографа от показаний вольтметра, %	

7. Нажмите клавишу регулировки цены деления шкалы осциллографа по времени (“Время/дел.”) (рис. 1). Нажимая кнопки переключения режимов (15 рис 1) добейтесь, чтобы на экране осциллографа умещалось 3–5 периодов сигнала. Включите режим внутренней синхронизации (клавиша 3). Запишите цену деления шкалы осциллографа по времени (“Время/дел”) в выбранном диапазоне (в мс/дел), см. индикатор в правой колонке на экране осциллографа. Измерьте период сигнала генератора ЗГ1 и его погрешность ($T \pm \Delta T$), вычислите частоту генератора ЗГ1 и её погрешность ($f \pm \Delta f$). Запишите показания индикатора генерируемой частоты ЗГ1 и её погрешность ($f_0 \pm \Delta f_0$). Результаты измерений занесите в таблицу 2. Сравните полученные результаты.

Таблица 2.

Канал I	ЗГ-1
Цена деления X – шкалы осциллографа, мс/ дел	
T сигнала, мс	
ΔT сигнала, мс	
f сигнала, Гц (вычисленная)	
Δf сигнала, Гц	
f ₀ сигнала, Гц (измеренная по индикатору ЗГ1)	
Δf_0 сигнала, Гц	

8. Нажмите клавишу “Режим” на осциллографе (4 рис. 1). Нажимая кнопки 15 выберите режим “II канал”- в правой колонке на экране осциллографа он будет выделен синим цветом. Вращая ручку смещения второго канала по вертикали (17), выведите сигнал второго канала (красная кривая) на середину шкалы.

9. Измерьте период сигнала генератора ГН1 и его погрешность, вычислите частоту генератора ГН1 и её погрешность.

По результатам измерений в пунктах 8-9 заполните таблицу 3.

Таблица 3.

Канал II	ГН1
Цена деления X – шкалы осциллографа, мс/ дел	
T сигнала, мс	
ΔT сигнала, мс	
f сигнала, Гц (вычисленная)	
Δf сигнала, Гц	

10. Поочередно выводя на экран осциллографа сигнал с I и со II канала добейтесь ручкой “Время/дел”, чтобы на экране наблюдалось 5 – 7 периодов сигнала. Конструкция используемого осциллографа такова, что это необходимо для получения качественного сигнала в этом упражнении. Рекомендуемый режим “Время/дел” – 0.5мс. Нажмите клавишу “Режим” на осциллографе (4 рис. 1). Нажимая кнопки переключения режимов (15 рис. 1) выберите режим “X-Y”- в правой колонке на экране осциллографа он будет выделен синим цветом. Сигнал с канала I будет подан на вход X осциллографа (рис. 5). Сигналы, поступающие на каналы X и Y, будут векторно складываться.

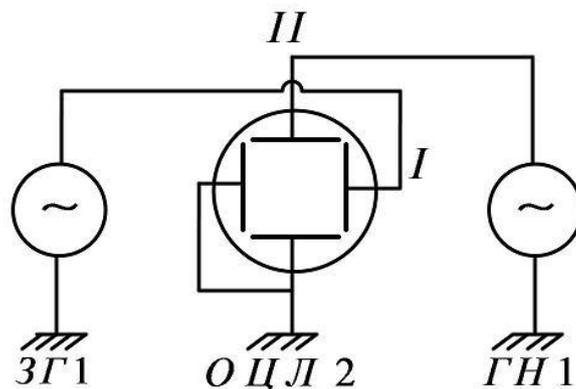


Рис. 5. Схема для изучения векторного сложения синусоидальных колебаний

11. Плавно изменяя выходную частоту генератора звуковых колебаний ЗГ1 в районе 1200 Гц ручкой (5), добейтесь получения чёткой картины фигуры Лиссажу на экране.

12. Запишите показания индикатора генерируемой частоты (2) генератора звуковой частоты ЗГ1. Обратите внимание, что ЗГ1 позволяет определить частоту выходного сигнала со значительно большей точностью, чем ГН1. Пользуясь показаниями ЗГ1 в момент, когда фигура Лиссажу при совпадении частот (эллипс) видна наиболее чётко, определите частоту сигнала генератора ГН1 и её погрешность.

13. Переключите генератор звуковых колебаний в режим $350 \div 900$ Гц, подберите и запишите частоты в районе 600 и 800 Гц, позволяющие получить чёткие фигуры Лиссажу. Используя режим "стоп", сфотографируйте эти фигуры. Переключите генератор звуковых колебаний в режим $900 \div 2000$ Гц, подберите и запишите частоту в районе 2400 Гц, позволяющую получить чёткую фигуру Лиссажу. Используя режим "стоп", сфотографируйте эту фигуру.

По результатам измерений в пунктах 12 – 13 вычислите среднее значение частоты сигнала генератора ГН-1 и её погрешность.

Сравните полученный результат с результатом полученным в пункте 9. Заполните таблицу 4.

Таблица 4. Режим работы ГН1 1200 ± 100 Гц.

Задание		Измеряемые величины		Вычислить
Диапазон ЗГ1	Частота ЗГ1 грубо	Частота точно по показаниям индикатора (2) ЗГ1	Картина фигуры Лиссажу (рис. по фото)	Частота ГН1 и её погрешность $f \pm \Delta f$, Гц

		$f \pm \Delta f, \text{Гц}$		
350 ÷ 900 Гц	600 Гц			
350 ÷ 900 Гц	800 Гц			
900 ÷ 2000 Гц	1200 Гц			
2000 ÷ 5000 Гц	2400 Гц			
				$\bar{f} \pm \Delta \bar{f}, \text{Гц}$

Исследование импульсного сигнала

Соберите схему для исследования импульсного сигнала (рис. 6) Подайте импульсный сигнал с генератора звуковых колебаний ГЗ1 на канал I осциллографа. Кнопками переключения диапазонов частоты (6 рис. 2) установите на генераторе ГЗ1 частоту в диапазоне 130 ÷ 350 Гц.

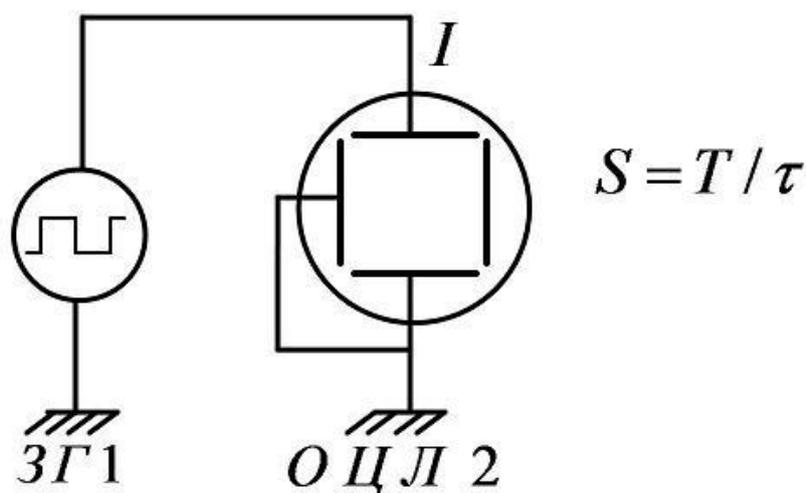


Рис. 6. Схема для исследования импульсного сигнала

Должен загореться соответствующий индикатор частоты (7 рис. 2).
 Нажмите клавишу “Режим” на осциллографе (4 рис. 1).
 Нажимая кнопки переключения режимов (15 рис. 1) выберите режим “1 канал”- в правой колонке на экране осциллографа он будет выделен синим цветом. Вращая ручку смещения первого канала по вертикали (16), выведите сигнал первого канала (зелёная кривая) на середину шкалы.

Нажмите клавишу регулировки цены деления осциллографа по напряжению “V/дел” (кнопка 9 рис. 1). Нажимая кнопки переключения режимов (15 рис. 1), добейтесь, чтобы размах измеряемого сигнала на экране осциллографа составлял 70-90 процентов от шкалы. Нажмите

клавишу регулировки цены деления шкалы осциллографа по времени (“Время/дел”) (8 рис.1) Нажимая кнопки переключения режимов (15 рис. 1) добейтесь, чтобы на экране осциллографа умещался 1 период сигнала. Запишите цену деления шкалы осциллографа по времени (“Время/дел”) в выбранном диапазоне (в мс/дел), см. индикатор в правой колонке на экране осциллографа.

Измерьте период сигнала и длительность импульса по показаниям осциллографа. Оцените их погрешности. Вычислите скважность сигнала. Повторите измерения для ещё 1-2 частот. Для каждой частоты вычислите скважность сигнала по формуле $S = T/\tau$ и её относительную погрешность по формуле $\delta S = \sqrt{\delta T^2 + \delta \tau^2}$. Вычислите абсолютную погрешность ΔS

Результаты измерений занесите в таблицу 5.

Таблица 5.

№ опыта	Цена деления шкалы осц. мс/дел	$T \pm \Delta T$, дел	$T \pm \Delta T$, мс	$\tau \pm \Delta \tau$, дел	$\tau \pm \Delta \tau$, мс	$S \pm \Delta S$
1						
2						
3						

Литература

1. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики.— 8-е изд., стер. — М. : Издательский центр "Академия", 2009.
2. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014.
3. Курепин В.В., Баранов И.В. Обработка экспериментальных данных: Методические указания к лабораторным работам. – СПб, 2012.– 57 с.

Лабораторная работа №3

ПРОСТЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ

Цель работы.

1. Изучить зависимость коэффициента передачи по амплитуде RL - и RC -цепей.
2. Ознакомится с двумя способами измерения сдвига фаз двух гармонических сигналов.

Приборы:

1. Осциллограф лабораторный ОЦЛ21 шт.
2. Генератор звуковых сигналов ЗГ1 1 шт.
3. Генератор напряжений ГН1 1 шт.
4. Стенд с объектами исследования СЗ-ЭМ01 1 шт.

Теория работы.

Рассмотрим электрическую схему из последовательно соединённых катушки, индуктивностью L , резистора, сопротивлением R , и конденсатора, ёмкостью C , подсоединённых к генератору переменного напряжения.

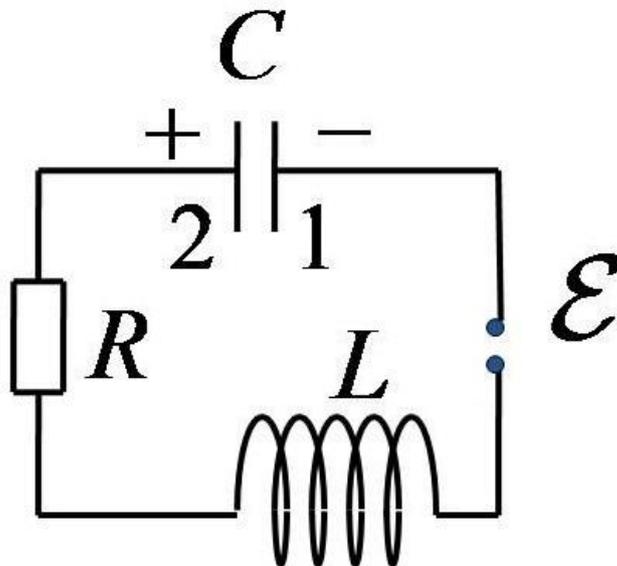


Рис.1. Резистор, катушка индуктивности и конденсатор в цепи переменного тока.

Пусть сигнал генератора (внешняя ЭДС) изменяется со временем t по закону $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cos(\omega t)$, где \mathcal{E}_0 – амплитуда, ω – циклическая частота колебаний сигнала. По закону Ома для неоднородного участка цепи

$$RI = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{SI} + \mathcal{E}. \quad (1)$$

Здесь I – сила тока (положительное направление от обкладки 1 к обкладке

2, см. рис. 1), φ_1, φ_2 – потенциалы соответствующих обкладок, \mathcal{E}_{SI} – ЭДС самоиндукции в катушке. Учитывая, что $\mathcal{E}_{SI} = -L \frac{dI}{dt}$, $\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{q}{C}$ (q – заряд обкладки 2) и $I = \frac{dq}{dt}$, получаем уравнение, описывающее изменение заряда на конденсаторе со временем:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = \frac{\mathcal{E}_0}{L} \cos(\omega t) \quad (2)$$

Общее решение уравнения (1) – сумма общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного уравнения. Общее решение однородного уравнения в процессе установления колебаний быстро затухает, поэтому мы будем искать только частное решение неоднородного уравнения. Оно имеет вид

$$q = q_0 \cos(\omega t - \psi), \quad (3)$$

где q_0 – амплитуда колебаний заряда на конденсаторе, ψ – сдвиг фаз между колебаниями заряда и внешней ЭДС. Зависимости заряда (3) от времени соответствует ток в контуре

$$I = \frac{dq}{dt} = -q_0 \omega \sin(\omega t - \psi) = I_0 \cos(\omega t - \psi + \pi/2) = I_0 \cos(\omega t - \varphi), \quad (4)$$

где $I_0 = q_0 \omega$ – амплитуда тока в контуре, φ – сдвиг фаз между током в цепи и внешней ЭДС.

Найдем с помощью векторной диаграммы связь между амплитудой I_0 тока и амплитудой \mathcal{E}_0 внешней ЭДС. Для этого уравнение (1) представим в виде:

$$U_R + U_C + U_L = \mathcal{E}, \quad (5)$$

где три слагаемых в левой части уравнения (5) – напряжения на соответствующих элементах цепи:

$$U_R = RI = RI_0 \cos(\omega t - \varphi), \quad (6)$$

$$U_C = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{q}{C} = \frac{q_0}{C} \cos(\omega t - \psi) = \frac{I_0}{\omega C} \cos\left(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}\right), \quad (7)$$

$$U_L = -\mathcal{E}_{SI} = L \frac{dI}{dt} = -\omega LI_0 \sin(\omega t - \varphi) = \omega LI_0 \cos\left(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right). \quad (8)$$

Вспомним, что внешняя ЭДС изменяется со временем по формуле

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cos(\omega t). \quad (9)$$

Формулы (6)–(8) показывают, что напряжение на конденсаторе отстает по фазе на $\pi/2$ от напряжения на резисторе, напряжение на катушке индуктивности опережает по фазе на $\pi/2$ напряжение на резисторе, а

формула (9) означает, что внешняя ЭДС опережает по фазе на φ напряжение на резисторе.

Рассмотрим момент времени, когда фаза напряжения U_R равна нулю. В этот момент $\omega t = \varphi$. Изобразим напряжение U_R вектором длины RI_0 , направленным по оси Ox (см. рис. 2), U_C – вектором длины $\frac{I_0}{\omega C}$, повернутым на угол $\pi/2$ по часовой стрелке относительно оси Ox , U_L – вектором длины ωLI_0 , повернутым на угол $\pi/2$ против часовой стрелки относительно оси Ox , внешнюю ЭДС \mathcal{E} – вектором длины \mathcal{E}_0 , повернутым на угол φ против часовой стрелки относительно оси Ox . При вращении всех четырех векторов с угловой скоростью ω против часовой стрелки проекции этих векторов на ось Ox с течением времени будут изменяться в соответствии с формулами (6) – (9). Для того чтобы проекции векторов подчинялись уравнению (5), сумма векторов, изображающих напряжения на элементах цепи должна быть равна вектору, изображающему внешнюю ЭДС, как это и изображено на рис. 2.

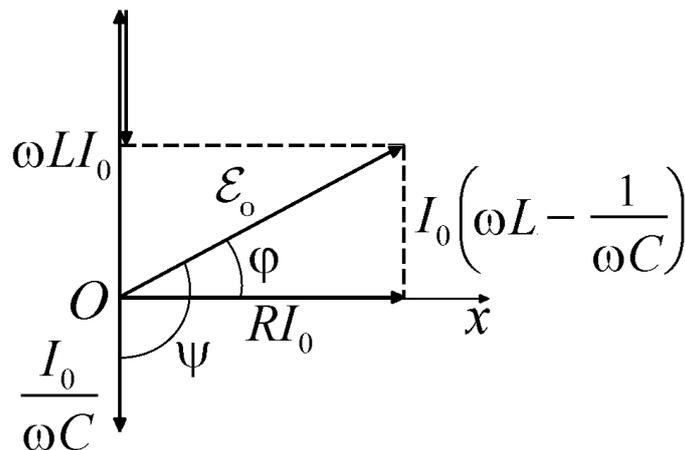


Рис.2. Векторная диаграмма напряжений на элементах схемы

При этом модули векторов на рис. 2 должны подчиняться уравнению

$$(\mathcal{E}_0)^2 = I_0^2 R^2 + I_0^2 \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2. \quad (10)$$

Отсюда получаем выражение для амплитуды тока через амплитуду внешней ЭДС:

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} = \frac{\mathcal{E}_0}{Z}, \quad (11)$$

где величина

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \quad (12)$$

называется импедансом или полным активно-реактивным сопротивлением цепи, состоящей из последовательно включенных резистора, катушки и конденсатора.

Из рис. 2 можно получить и выражение для фазового сдвига φ между силой тока и внешней ЭДС:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} . \quad (13)$$

Изучение RL - цепи.

Рассмотрим схему, в которой цепь, из последовательно соединённых катушки индуктивности и резистора (RL – цепь) подключена к генератору гармонического напряжения (см. рис.3).

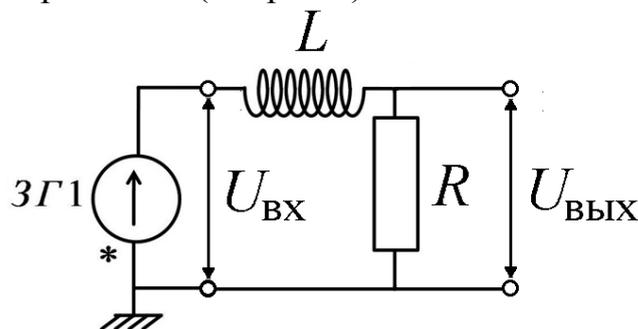


Рис.3. RL – цепь, подключенная к генератору гармонического напряжения 3Г1

Входное напряжение совпадает с ЭДС генератора

$$U_{\text{вх}} = \mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cos(\omega t) . \quad (14)$$

Выходное напряжение, снимаемое с резистора, найдем по формуле (6):

$$U_{\text{вых}} = RI_0 \cos(\omega t - \varphi) . \quad (15)$$

Заметим, что фаза колебаний выходного напряжения совпадает с фазой колебаний тока в цепи. Отношение амплитуд выходного и входного сигналов называется коэффициентом передачи по амплитуде. Из уравнений (14), (15) и (11) найдем коэффициент передачи для такой цепи:

$$K_{RL} = \frac{I_0 R}{\mathcal{E}_0} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad (16)$$

Здесь учтено, что в изучаемой схеме нет конденсатора, и в формуле (11) отсутствует соответствующее слагаемое. При малых частотах коэффициент K_{RL} близок к единице, при больших – стремится к нулю. На рис. 4 изображен характерный вид зависимости коэффициента передачи от циклической частоты .



Рис.4. Зависимость коэффициента передачи по амплитуде от частоты для RL - цепи.

Сдвиг фаз φ между выходным напряжением (15) и ЭДС генератора (14) в изучаемой схеме согласно (13) определяется уравнением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R} . \quad (17)$$

Сдвиг фаз (17) незначителен при малых частотах ($\omega \ll R/L$) и увеличивается с ростом частоты, стремясь к $\pi/2$. Из-за того, что цепь содержит катушку индуктивности, ток отстаёт по фазе от входного напряжения (ЭДС генератора). Сдвиг фаз можно измерить экспериментально двумя способами. Ниже разобраны оба способа на примере измерения сдвига фаз между током и выходным напряжением RL -цепи.

Измерение сдвига фаз между двумя гармоническими сигналами с помощью одновременного наблюдения осциллограмм

Для RL -цепи, изображенной на рис. 3, зависимости тока и ЭДС генератора от времени изображены на рис. 5.

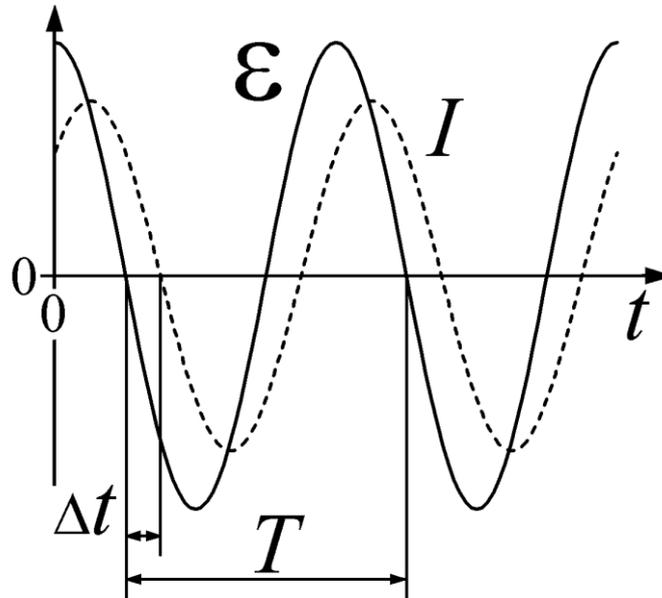


Рис.5. Ток в RL -цепи отстаёт по фазе от приложенного напряжения. Из-за сдвига фаз между током и входным напряжением колебания тока отстают по времени на Δt от колебаний входного напряжения.

Напряжение на резисторе в схеме на рис. 3 по фазе совпадает с током цепи, а ЭДС генератора совпадает с входным напряжением цепи. Поэтому зависимости от времени входного и выходного напряжений (см. уравнения (14)б (15)) имеют вид, подобный изображенному на рис.5. Если обе синусоиды вывести одновременно на экран осциллографа, то фазовый сдвиг можно измерить по временному сдвигу Δt (см. рис. 5). Колебания, отстающие по фазе на φ отстают по времени на $\Delta t = \frac{\varphi}{\omega}$. Следовательно, измерив сдвиг по времени Δt и период колебаний T , можно рассчитать фазовый сдвиг по формуле

$$\varphi_1 = \omega \Delta t = \frac{\Delta t}{T} 2\pi. \quad (18)$$

Измерение сдвига фаз между двумя гармоническими сигналами с помощью векторного сложения колебаний (фигуры Лиссажу)

Подадим на горизонтальные пластины осциллографа сигнал, пропорциональный входному напряжению схемы рис.3:

$$U_x = k_x U_{вх} = A \cos(\omega t) ; A = k_x \mathcal{E}_0, \quad (19)$$

а на вертикальные – напряжение с резистора, пропорциональное току в цепи (см. (12), (14), (15)):

$$U_y = k_y U_{вых} = B \cos(\omega t - \varphi) ; B = k_y \frac{R \mathcal{E}_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}. \quad (20)$$

Здесь k_x и k_y – коэффициенты усиления, A и B – амплитуды сигналов по осям X и Y , соответственно.

Исключив время из уравнений (19), (20) получим уравнение, связывающие между собой оба сигнала:

$$\left(\frac{U_x}{A}\right)^2 + \left(\frac{U_y}{B}\right)^2 - \frac{2U_x U_y}{AB} \cos(\varphi) = \sin^2(\varphi). \quad (21)$$

Это уравнение эллипса. Из уравнения (21) следует, что в момент времени когда $U_x = 0$ (луч пересекает ось Y) отклонение по оси Y

$$U_{y1} = B \sin(\varphi) \text{ или } U_{y2} = -B \sin(\varphi). \quad (22)$$

Поскольку по оси Y амплитуда колебаний $U_{x \max} = B$, сдвиг фаз между двумя сигналами (19), (20) можно вычислить из соотношения (22) по формуле (см. рис.6а):

$$\varphi_2 = \arcsin\left(\frac{U_{y1}}{U_{y \max}}\right). \quad (23)$$

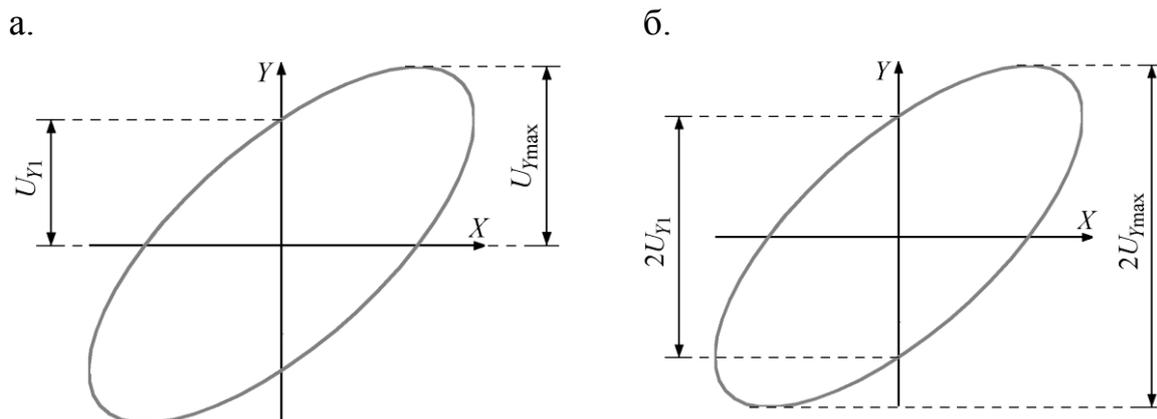


Рис.6. Определение сдвига фаз между двумя гармоническими сигналами (входным и выходным напряжением RL -цепи) с помощью векторного сложения сигналов (фигура Лиссажу). А) определение напряжений U_{y1} и $U_{y \max}$ для расчета по формуле (23); б) измерение «расстояния» $2U_{y1}$ между двумя точками пересечения оси Y и «размаха» $2U_{y \max}$ сигнала по оси Y .

Для увеличения точности определения сдвига фаз по формуле (23) обычно измеряют «расстояние» $2U_{y1}$ между двумя точками пересечения оси Y и «размах» $2U_{y \max}$ сигнала по оси Y рис. 6б).

Изучение RC - цепи

Рассмотрим схему, в которой цепь, из последовательно соединённых конденсатора и резистора (RC – цепь) подключена к генератору гармонического напряжения (см. рис.8).

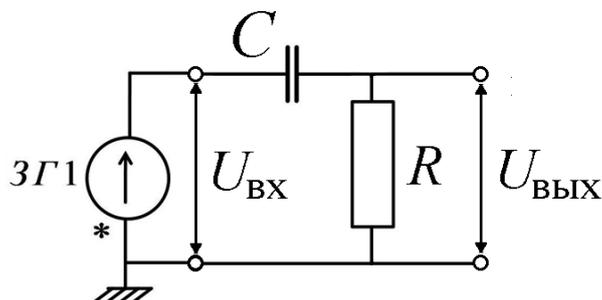


Рис.8. RC – цепь, подключенная к генератору гармонического напряжения ЭГ1

Как и для RL -цепи входное и выходное напряжение для схемы рис. 8 вычисляется по формулам (14) и (15), но при вычислении амплитуды тока по формуле (11) надо оставить только слагаемые, содержащие сопротивление R резистора и емкость C конденсатора. Поэтому коэффициент передачи по амплитуде для RC - цепи рассчитывается по формуле

$$K_{RC} = \frac{I_0 R}{\mathcal{E}_0} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} . \quad (24)$$

При малых частотах этот коэффициент близок к нулю, при больших – стремится к единице. Характерный вид зависимости коэффициента K_{RC} передачи от циклической частоты ω для RC - цепи изображен на рис 9.

Сдвиг фаз φ между током и напряжением в такой схеме согласно (13) определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{1}{R\omega C} . \quad (25)$$

Из этой формулы следует что $\varphi < 0$. С учетом знака минус перед фв формуле (15) это означает, что ток в RC -цепи и связанное с током напряжение на резисторе опережают по фазе внешнюю ЭДС.

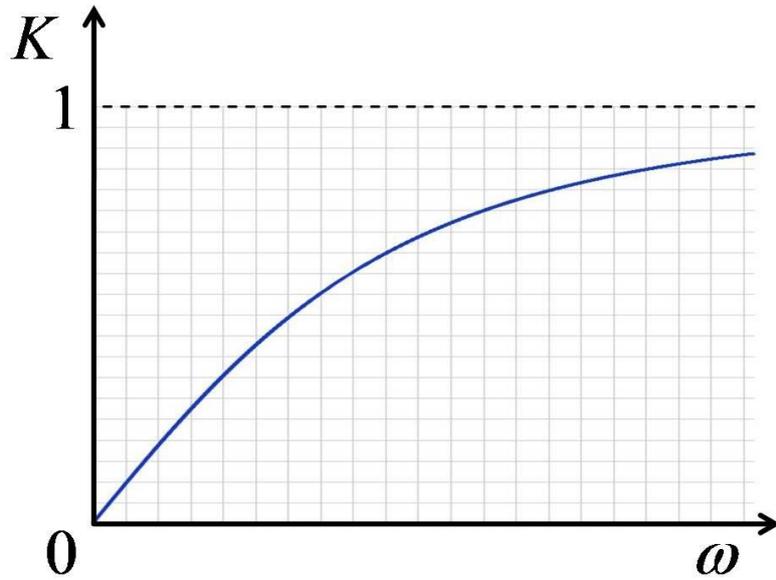


Рис.9. Зависимость коэффициента передачи по амплитуде от частоты для RC -цепи.

На рисунке 10 показан характерный вид осциллограмм тока и внешней ЭДС в RC -цепи.

Фазовый сдвиг φ близок к $-\frac{\pi}{2}$ при низкой частоте ($\omega \ll 1/(RC)$) и уменьшается по абсолютной величине с ростом частоты. Из-за наличия конденсатора в цепи ток опережает внешнюю ЭДС по фазе (рис.10).

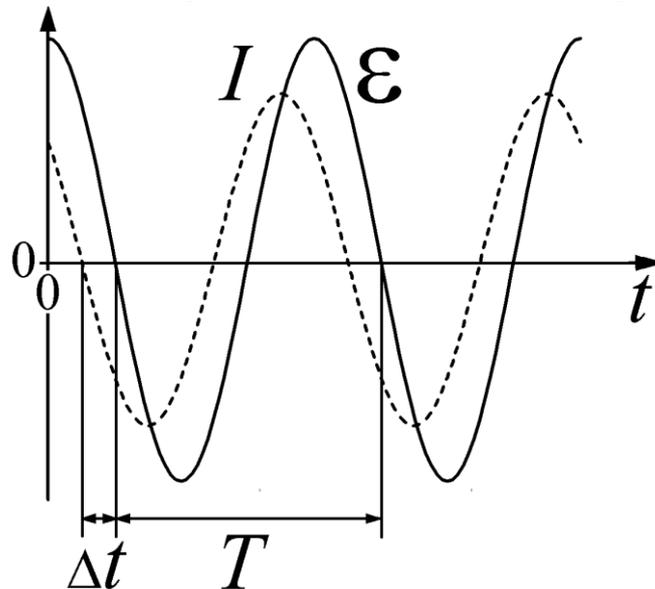


Рис. 10. Фазовый сдвиг между током и внешней ЭДС в RC -цепи. Ток опережает по фазе внешнюю ЭДС. Временной сдвиг Δt и T используются для вычисления фазового сдвига по формуле (26)

При экспериментальном определении разности фаз в случае RC -цепи на основе одновременного наблюдения осциллограмм входного и выходного напряжений вместо формулы (18) необходимо использовать формулу

$$\varphi_1 = -\frac{\Delta t}{T} 2\pi. \quad (26)$$

Обозначения пояснены на рис. 10. Вид фигуры Лиссажу при векторном сложении колебаний входного и выходного напряжений для RC -цепи также как и для RL -цепи имеет вид, изображенный на рис. 6, но при расчете фазового сдвига с помощью фигуры необходимо использовать формулу

$$\varphi_2 = -\arcsin\left(\frac{U_{Y1}}{U_{Y\max}}\right). \quad (27)$$

Порядок выполнения работы.

1. Соберите электрическую схему (рис. 11). Используйте резистор $R_1=68$ Ом и катушку индуктивности $L_1=10$ мГн. Установите ручку регулировки выходного напряжения генератора в положение 3,5 деления, а частоту выходного сигнала генератора $f=350$ Гц. Сигнал с генератора ЗГ-1 подайте на вход цепочки и на канал I осциллографа, сигнал с резистора подайте на канал II осциллографа.

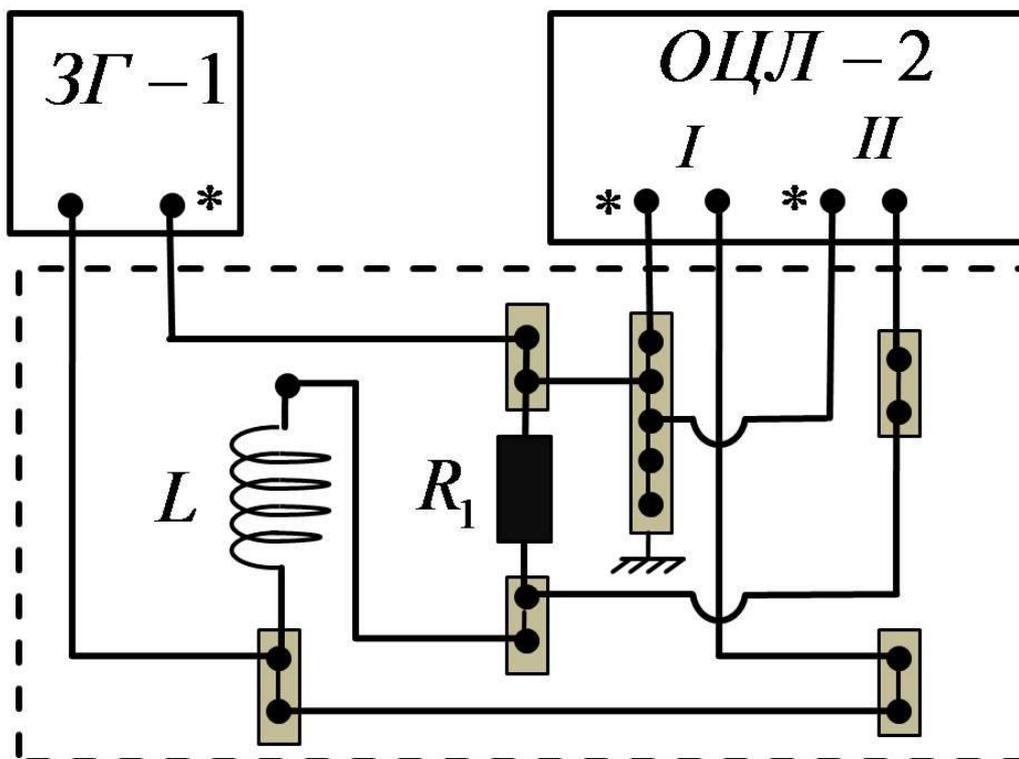


Рис.11. Рабочая схема для изучения RL -цепи.

2. Включите осциллограф в режим “1,2”. Включите режим внутренней синхронизации. Установите коэффициент усиления по обоим каналам 2 В/дел. Ручкой “Время/дел.” выведите на экран 3-5 периодов сигнала. Увеличивая частоту от 350 Гц до 6 кГц с шагом порядка 330Гц-350Гц, измеряйте амплитуды выходного $U_{\text{вых}}$ и входного $U_{\text{вх}}$ сигнала. Оцените и запишите погрешности измерения амплитуд $\Delta U_{\text{вых}}$ и $\Delta U_{\text{вх}}$. Результаты измерений занесите в таблицу №1.

Таблица № 1.

f Гц	350	700							6000
$U_{\text{вх}}$ дел									
$U_{\text{вых}}$ дел									
K_{RL}									
ΔK_{RL}									
$\Delta U_{\text{вх}}$ (дел)=					$\Delta U_{\text{вых}}$ (дел)=				

По результатам измерений вычислите коэффициент передачи при различных частотах генератора. Оцените его погрешность. Постройте график. Оцените, совпадает ли общий вид кривой с теоретической зависимостью (16), учитывая, что $\omega = 2\pi f$.

2. Для частоты в районе 1000 Гц измерьте сдвиг между выходным и входным сигналом Δt и период сигнала T в делениях шкалы. Оцените и запишите погрешность измерения. Рекомендуемый режим “Время/дел” – 0.2 мкс/дел. Вычислите сдвиг фаз между током и напряжением φ_1 по формуле (18) и его погрешность. Сравните результат с теоретическим, полученным по формуле (17). Заполните таблицу № 2

Таблица № 2

Измеряем величины						Вычисляемые величины			
$f \pm \Delta f$ Гц	$\omega \pm \Delta\omega$ рад/с	Δt дел	$\Delta(\Delta t)$ дел	T дел	ΔT дел	φ_1 рад	$\Delta\varphi_1$ рад	$\varphi_{\text{теор}}$ рад	$\Delta\varphi_{\text{теор}}$ рад

3. Переведите осциллограф в режим работы “X – Y”, отключив развёртку. Выведите центр эллипса на ось Y. Сфотографируйте эллипс на экране осциллографа. Используйте режим “Стоп”. По фотографии измерьте «расстояние» $2U_{Y1}$ и «размах» сигнала $2U_{Y\text{max}}$, оцените и

запишите погрешность измерения. Вычислите сдвиг фаз между током и напряжением φ_2 по формуле (23), и его погрешность. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу № 3.

Таблица № 3

Измеряемые величины				Вычисляемые величины			
$f \pm \Delta f$ Гц	$\omega \pm \Delta\omega$ рад/с	$2U_{Y1}$, дел	$2\Delta U_{Y\max}$ дел	φ_2 рад	$\Delta\varphi_2$ рад	$\varphi_{теор}$ рад	$\Delta\varphi_{теор}$ рад

4. Соберите электрическую схему (рис. 12). Используйте резистор $R_1=68$ Ом и конденсатор $C_4=0.47$ мкФ. Установите ручку регулировки выходного напряжения генератора в положение 3,5 деления, а частоту выходного сигнала генератора $f=350$ Гц. Сигнал с генератора ЗГ-1 подайте на вход цепочки и на канал I осциллографа, сигнал с резистора подайте на канал II осциллографа.

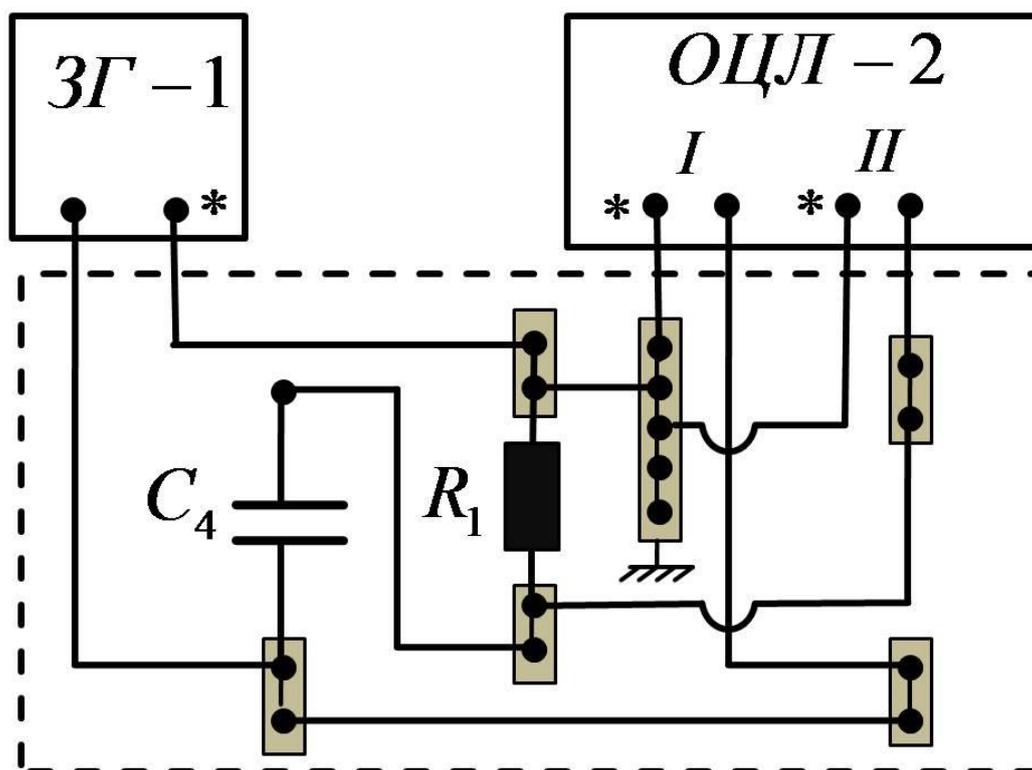


Рис.12. Рабочая схема для изучения RC-цепочки.

5. Включите осциллограф в режим “1,2”. Установите коэффициент усиления по обоим каналам 2 В/дел. Ручкой “Время. Дел.” выведите на экран 3-5 периодов сигнала. Увеличивая частоту от 350Гц до 6 кГц с

шагом 330-350Гц, измерьте амплитуды выходного $U_{\text{вых}}$ и входного $U_{\text{вх}}$ сигнала. Оцените и запишите погрешности измерения амплитуд $\Delta U_{\text{вых}}$ и $\Delta U_{\text{вх}}$. Результаты измерений занесите в таблицу № 4.

Таблица №4.

f Гц	350	700							6000
$U_{\text{вых}}$ дел									
$U_{\text{вх}}$ дел									
K_{RC}									
ΔK_{RC}									
$\Delta U_{\text{вых}}$ (дел)=					$\Delta U_{\text{вх}}$ (дел)=				

По результатам измерений вычислите коэффициент передачи при различных частотах генератора. Оцените его погрешность. Постройте график. Оцените, совпадает ли общий вид кривой с теоретической зависимостью (18), учитывая, что $\omega = 2\pi f$.

6. Для частоты в районе 5000 Гц измерьте сдвиг между выходным и входным сигналом Δt и период сигнала T в делениях шкалы. Оцените и запишите погрешность измерения. Рекомендуемый режим “Время/дел” 50 мкс/дел. По полученным результатам вычислите сдвиг фаз (26) между током и напряжением φ_1 и его погрешность. Сравните результат с теоретическим, полученным по формуле (25). Заполните таблицу №5.

Таблица №5.

Измеряемые величины						Вычисляемые величины			
$f \pm \Delta f$ Гц	$\omega \pm \Delta\omega$ рад/с	Δt дел	$\Delta(\Delta t)$ дел	T дел	ΔT дел	φ_1 рад	$\Delta\varphi_1$ рад	$\varphi_{\text{теор}}$ рад	$\Delta\varphi_{\text{теор}}$ рад

7. Переведите осциллограф в режим работы “X – Y”. Выведите центр эллипса на ось Y. Сфотографируйте эллипс на экране осциллографа. Используйте режим “Стоп”. По фотографии измерьте параметры $2U_{Y1}$ и $2U_{Y\text{max}}$, оцените и запишите погрешность измерения. Вычислите по формуле (27) сдвиг фаз между током и напряжением φ_2 , и найдите его погрешность. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу № 6.

Таблица №6.

Измеряемые величины				Вычисляемые величины			
$f \pm \Delta f$ Гц	$\omega \pm \Delta\omega$ рад/с	$2U_{Y1}$, дел	$2\Delta U_{Y\max}$ дел	φ_2 рад	$\Delta\varphi_2$ рад	$\varphi_{теор}$ рад	$\Delta\varphi_{теор}$ рад

Литература

1. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики.— 8-е изд., стер. — М. : Издательский центр "Академия", 2009.
2. Иродов И.Е. Электродинамика. Основные законы. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014.
3. Курепин В.В., Баранов И.В. Обработка экспериментальных данных: Методические указания к лабораторным работам. – СПб, 2012.– 57 с.

Лабораторная работа №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКА ТОКА

Цель работы: Исследовать зависимость полной мощности, полезной мощности, мощности потерь, падения напряжения во внешней цепи и КПД источника от силы тока в цепи.

Требуемое оборудование:

Модульный учебный комплекс МУК-ЭМ1 (МУК-ЭМ2).

Приборы:

Блок генератора напряжений ГН1 1 шт.

Амперметр-вольтметр АВ1 1 шт.

Стенд с объектами исследования СЗ-ЭМ01 1 шт.

Проводники Ш4/Ш1,6-60 см 4 шт.

Ш4/Ш4-60 см 1 шт.

Краткое теоретическое введение

Если к источнику тока (рис. 1), обладающему внутренним сопротивлением r подключить внешнее сопротивление R , то напряжение на зажимах источника U , согласно закону Ома, для замкнутой цепи можно представить в виде:

$$U = \varepsilon - Ir \quad (1)$$

где ε – значение ЭДС; I значение тока в цепи;

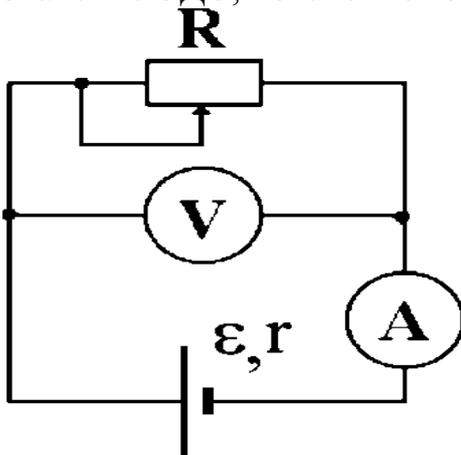


Рис. 1. Рабочая схема

График зависимости напряжения U от силы тока I показан на рисунке 2.

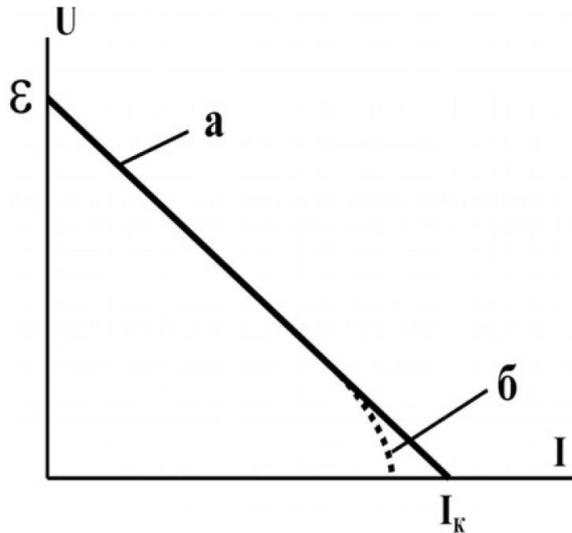


Рис. 2. График зависимости напряжения от силы тока в цепи

График этой зависимости является прямой линией (кривая «а»). Пересечение графика с осью напряжений ($I=0$) происходит в точке $\varepsilon=U$, а точка пересечения графика с осью токов ($U=0$) дает значение силы тока короткого замыкания источника $I=I_k$. Важно отметить, что последнее утверждение является идеализацией. В реальных источниках, при токах близких к I_k , линейный характер зависимости напряжения U от силы тока I нарушается (кривая «б»). Это вызвано у одних источников уменьшением ЭДС при таких токах, у других увеличением внутреннего сопротивления, а у третьих одновременным влиянием двух этих причин.

Умножив обе части уравнения (1) на силу тока, протекающего по цепи, получим следующее уравнение:

$$I\varepsilon = I^2 R + I^2 r \quad (2)$$

которое можно представить в виде

$$P = P_1 + P_2 \quad (3)$$

Здесь $P = I\varepsilon$ - полная мощность, развиваемая источником;
 $P_1 = I^2 R = IU$ - полезная мощность, т.е. мощность, развиваемая источником во внешней цепи (на сопротивлении R); $P_2 = I^2 r$ - потери мощности внутри источника (на сопротивлении r).

Исследуем зависимость этих мощностей от силы тока.

Графически (рис.3) зависимость полной мощности от силы тока $P = I\varepsilon$ выражается прямой линией, проходящей через начало координат.

Полезная мощность из (2) может быть представлена в виде:

$$P_1 = \varepsilon I - I^2 r \quad (4)$$

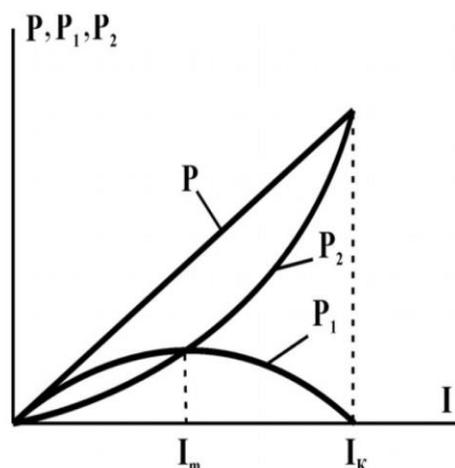


Рис. 3. Зависимости полной мощности (P), полезной мощности (P_1) и мощности потерь (P_2) от силы тока в замкнутой цепи

Эта зависимость выражается параболой. Найдем значение тока, при котором полезная мощность максимальна. Для этого, взяв первую производную, $\frac{dP_1}{dI}$ приравняем ее нулю

$$\frac{dP_1}{dI} = \varepsilon - 2Ir = 0 \quad (5)$$

откуда, получим:

$$I_m = \frac{\varepsilon}{2r} \quad (6)$$

Вторая производная $\frac{d^2P_1}{dI^2} = -2r$ отрицательна, поэтому при значении силы тока I_m полезная мощность имеет максимум. Подставляя выражение (6) в уравнение (4) находим максимальное значение полезной мощности:

$$P_{1\max} = \frac{\varepsilon^2}{4r} \quad (7)$$

Заметим, что из уравнения (1) с учетом $U = IR$ следует, что

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r} \quad (8)$$

Сравнивая это выражение с выражением (6), видим, что при $I = I_m$ выполняется равенство $R=r$. Следовательно, полезная мощность P_1 максимальна тогда, когда сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника питания $R=r$.

Потери мощности в источнике зависят от силы тока по формуле :

$$P_2 = I^2 r \quad (9)$$

Графически эта зависимость (см. рис.3) – парабола с вершиной в начале координат и ветвями направленными вверх. При физически осмысленных значениях $r > 0$, мы видим правую ветвь этой параболы.

Коэффициентом полезного действия (КПД) η источника тока называется величина, равная отношению полезной мощности к полной мощности, затрачиваемой источником:

$$\eta = \frac{P_1}{P} = \frac{IU}{I\varepsilon} = \frac{U}{\varepsilon} \quad (10)$$

Подставив выражение для U из (1) в (10), находим зависимость КПД от силы тока:

$$\eta = \frac{\varepsilon - Ir}{\varepsilon} = 1 - I \frac{r}{\varepsilon} \quad (11)$$

Из уравнения (11) видно, что зависимость КПД от силы тока в цепи изображается прямой линией (рис.4), убывающей от значения $\eta = 1$, при токе $I=0$, до значения $\eta = 0$, при силе тока

$$I_k = \frac{\varepsilon}{r} \quad (12)$$

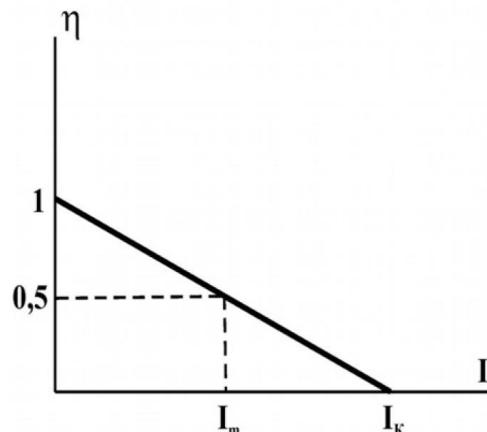


Рис. 4. Зависимость КПД источника от силы тока в замкнутой цепи

Это значение тока – уже упомянутый выше ток «короткого замыкания». Действительно, из (1) видно, что при внешнем сопротивлении $R = 0$ («короткое замыкание» источника) сила тока достигает наибольшего значения, даваемого формулой (12). Полезная мощность P_1 при этом убывает до нуля (рис.3), так как при сопротивлении $R = 0$ получаем $P_1 = I_K U = I_K^2 R = 0$.

Полная мощность источника $P = I_K \varepsilon$ и потери мощности $P_2 = I_K^2 r$ при токе короткого замыкания $I = I_K$ достигают наибольшего значения и равны друг другу

$$P_{\max} = P_{2\max} = \frac{\varepsilon^2}{r} \quad (13)$$

Найдем значение КПД и соотношения между мощностями P , P_1 , P_2 при максимуме полезной мощности $P_1 = P_{1\max}$. Полезная мощность максимальна при условии, что $R = r$, КПД (10) при этом равен:

$$\eta = \frac{U}{\varepsilon} = \frac{IR}{I(R+r)} = \frac{r}{2r} = 0.5 = 50\% \quad (14)$$

Отсюда, при токе $I = I_m$, полезная максимальная мощность равна $P_{1\max} = 0.5 P$ и с учетом (3) полезная мощность равна мощности потерь $P_{1\max} = P_2$.

Из графиков зависимостей мощностей и КПД от силы тока (рис.3, 4) видим, что условия получения наибольшей полезной мощности $P_{1\max}$ и наибольшего КПД несовместимы. Когда P_1 достигает наибольшего значения, сила тока равна I_m и $\eta = 0.5$ или 50%. Когда же КПД близок к единице, полезная мощность P_1 мала по сравнению с максимальной мощностью $P_{1\max}$, которую мог бы развить данный источник.

Прямолинейный характер зависимости напряжения U от силы тока I (см формулу (1) и рис. 2), позволяет следующим, так называемым, методом «короткого замыкания и холостого хода», определить параметры источника. Изменяя в некоторых пределах сопротивление R , измеряют соответствующие значения силы тока и напряжения. По измеренным значениям строят прямолинейную зависимость U от I . Продолжив ее до пересечения с осью напряжений, находят напряжение «холостого хода» $U_x = \varepsilon$, а продолжив до пересечения с осью токов, находят ток короткого замыкания I_K . Внутреннее сопротивление источника ЭДС определяют после этого по формуле

$$r = \frac{\varepsilon}{I_K} \quad (15)$$

полученной из уравнения (12).

Порядок выполнения работы

1. Соберите установку в соответствии со схемой, представленной на рисунке 5. В качестве источника ЭДС используйте генератор регулируемого постоянного напряжения блока ГН1 с включенным внутренним сопротивлением (переключатель RVH нажат). В качестве измерительных приборов используйте амперметр и вольтметр, содержащиеся в блоке АВ1. Переменное сопротивление находится на стенде с объектами исследования СЗ-ЭМ01.

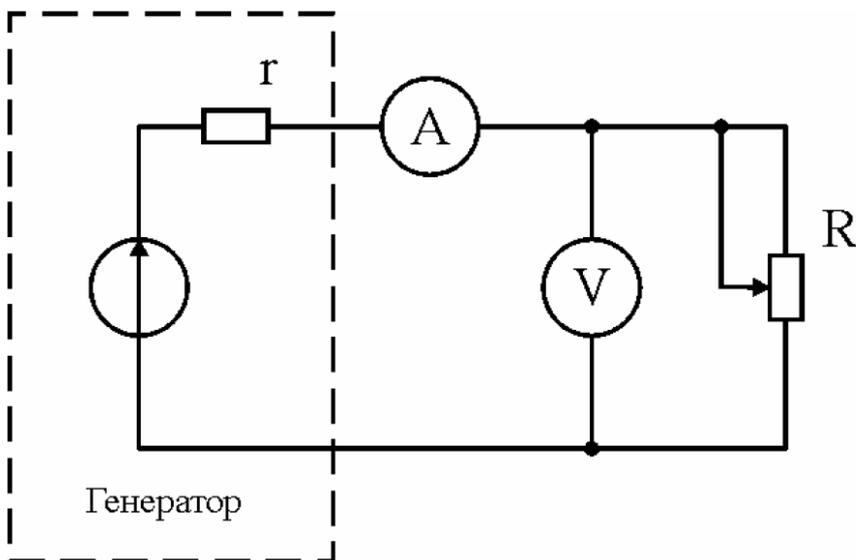


Рис.5. Электрическая схема лабораторной установки

2. Ручку регулировки выходного напряжения на генераторе постоянного напряжения (блока ГН1) установите в положение около восьми делений. Изменяя переменное сопротивление R (от 100 Ом до 1500 Ом с шагом 100 Ом), снимите зависимость напряжения U от силы тока I и заполните таблицу 1.

Таблица 1

U, В								
I, А								

3. Постройте график зависимости напряжения U от силы тока I . Определите, экстраполируя график до пересечения с осями координат, ЭДС источника ε и силу тока короткого замыкания I_K .
4. Определите внутренне сопротивление источника r .
5. Рассчитайте мощности P , P_1 , P_2 и КПД η для измеренных значений силы тока. Постройте графики зависимостей этих величин от силы тока, причем для мощностей сделайте построение на одном листе. Продолжите графики $P_1(I)$ и $\eta(I)$ до пересечения с осями координат. Сравните полученные результаты с теоретическими зависимостями, изображенными на рис. 3, 4.
6. С помощью построенных графиков найдите значения сопротивления R , при которых наблюдаются максимум полезной мощности и $\eta = 0.5$. Сравните эти значения с теоретическим значением.

Литература

1. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики.— 8-е изд., стер. — М. : Издательский центр "Академия", 2009 .
2. Курепин В. В., Баранов И. В. Обработка экспериментальных данных: Методические указания к лабораторным работам. – СПб, 2003.-57 с.

Лабораторная работа №5

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Требуемое оборудование

Модульно учебные комплексы:

1. Модульный учебный комплекс МУК-ЭМ1;

Приборы:

1. Блок амперметра-вольтметра АВ1 1 шт.
2. Генератор напряжений ГН1 1 шт.
3. Стенд с объектами исследования СЗ-ЭМ01 1 шт.

Краткое теоретическое введение

Измерение сопротивления с помощью вольтметра и амперметра

Найти величину сопротивления можно, воспользовавшись законом Ома для участка цепи

$$IR = U, \quad (1)$$

где R – электрическое сопротивление проводника; U – падение напряжения на участке цепи; I – ток в цепи.

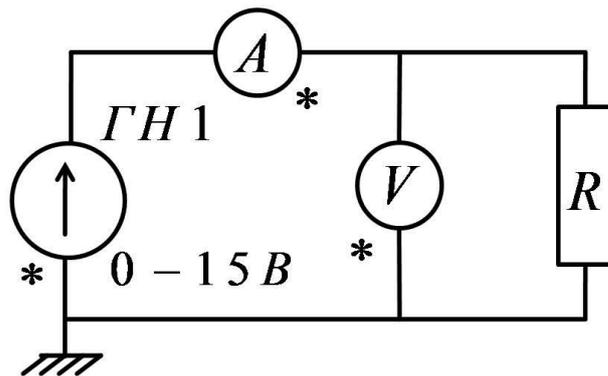


Рис. 1. Первый вариант включения измерительных приборов

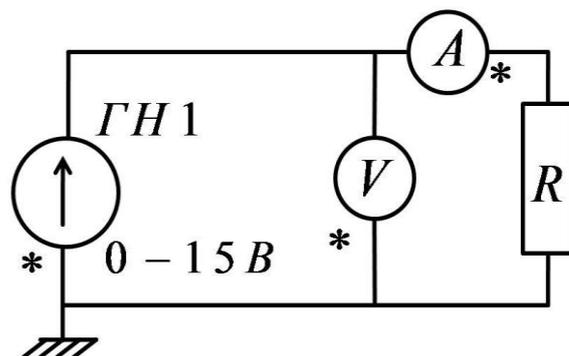


Рис. 2. Второй вариант включения измерительных приборов
 Поскольку амперметр имеет внутреннее сопротивление отличное от 0 Ом, а внутреннее сопротивление вольтметра меньше чем ∞ , то в зависимости от величины измеряемого сопротивления возможны два варианта включения измерительных приборов.

Первый вариант включения измерительных приборов (рис. 1) возможен при следующем условии:

- внутреннее сопротивление вольтметра намного больше измеряемого сопротивления (вольтметр не шунтирует измеряемое сопротивление);
- сопротивление амперметра должно быть таким, чтобы падение напряжения на нем существенно не уменьшало падение напряжения на измеряемом сопротивлении. Измеряемое при этом вольтметром напряжение должно находиться в рабочем диапазоне.

Второй вариант включения измерительных приборов (рис. 2) возможен при следующем условии:

- внутреннее сопротивление вольтметра соизмеримо с измеряемым сопротивлением;
- внутреннее сопротивление амперметра намного меньше измеряемого сопротивления.

Измерение неизвестного сопротивления при помощи моста постоянного тока

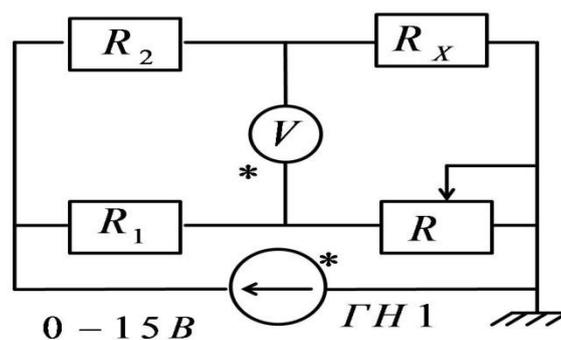


Рис. 3 Вариант включения измерительных приборов с помощью моста

Еще одним способом измерения сопротивления является измерения с помощью моста (рис. 3).

На представленном рисунке сопротивления R_1 и R_2 являются известными. Сопротивление R

– переменное, значения которого проградуированы (магазин сопротивлений). В диагональ моста включается нуль-индикатор (вольтметр или микроамперметр с большим внутренним сопротивлением). Значение неизвестного сопротивления можно вычислить по формуле (2), при условии, что нуль-индикатор покажет 0.

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R \quad (2)$$

Рекомендуемое задание к работе

1. Соберите схему. Внутреннее сопротивление генератора постоянного напряжения (блок ГН) следует выключить. Установите значения ЭДС генератора около 1В.

2. Проведите косвенные измерения сопротивлений резисторов R_1 (68 Ом) и R_5 (470 кОм), используя разные схемы включения измерительных приборов (рис. 1, рис.2). Занесите в таблицу значения силы тока и напряжения.

Таблица

U, В								
I, А								

Сравните результаты и сделайте выводы.

3. Подберите схему включения измерительных приборов для определения R_{1X} или R_{2X} .

4. Измерьте R_{1X} или R_{2X} при помощи моста. Сравните с предыдущими результатами.

Литература

1. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики.— 8-е изд., стер. — М. : Издательский центр "Академия", 2009 .

2. Курепин В. В., Баранов И. В. Обработка экспериментальных данных: Методические указания к лабораторным работам. – СПб, 2003.-57 с.

Лабораторная работа №6

СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК

Цель работы: экспериментальное определение основных параметров сегнетоэлектриков по петле гистерезиса.

Требуемое оборудование:

Стенд с объектами исследования СЗ-СЭ1 «Сегнетоэлектрик»;

Измеритель статических характеристик ИСХ1;

Соединительные провода.

Краткое теоретическое введение

Диэлектриками называют материалы, в которых нет свободных электрических зарядов, поэтому они не могут проводить электрический ток. При внесении диэлектрика во внешнее электрическое поле происходит явление *поляризации*, т. е. смещения зарядов, входящих в состав молекул, в соответствии с их знаком (положительные заряды смещаются в направлении вектора электрического поля, отрицательные – в противоположном). В результате на поверхности диэлектрика возникают связанные заряды, неспособные свободно перемещаться по диэлектрику. Наличие этих зарядов приводит к тому, что поле внутри диэлектрика уменьшается. Физическая величина, равная отношению модуля вектора напряженности E_0 однородного электрического поля в вакууме к модулю вектора напряженности электрического поля в диэлектрике E , называется диэлектрической проницаемостью вещества:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}$$

Для количественной характеристики поляризации используется физическая величина, называемая *вектором поляризации* P . Он равен дипольному моменту единицы объема диэлектрика:

$$\vec{P} = \frac{\sum_{i=1}^N \vec{p}_i}{V}$$

где $\vec{p}_i = q\vec{l}$ - дипольный электрический момент молекулы (вектор \vec{l} направлен от отрицательного заряда к положительному), V – объем

образца, N – число диполей в объеме V . Для большинства диэлектриков в отсутствии внешнего электрического поля дипольные моменты молекул равны нулю (в случае неполярных молекул), либо расположены хаотично так, что суммарный дипольный момент равен нулю. Для ряда ионных кристаллов центры положительных и отрицательных зарядов, расположенных в одной элементарной ячейке, не совпадают. Каждая такая элементарная ячейка может рассматриваться как диполь. В результате взаимодействия элементарных ячеек друг с другом могут образовываться микроскопические области, в которых дипольные моменты элементарных ячеек ориентированы одинаково. Это приводит к тому, что в кристалле возникают области со **спонтанной поляризацией** в отсутствие внешнего электрического поля. Такие области называются **доменами**. Направление суммарного дипольного момента каждого домена расположено хаотично по отношению друг к другу. По этому, суммарный дипольный момент всего кристалла равен нулю. Такие вещества называются **сегнетоэлектриками**. Для сегнетоэлектриков спонтанная поляризация существует только в определенном интервале температур. При температуре фазового перехода, называемой **точкой Кюри**, происходит изменение структуры кристалла. При температуре выше точки Кюри домены распадаются. Кристалл становится неполярным.

Особенности сегнетоэлектриков состоят в следующем:

1. Наличие диэлектрического **гистерезиса** – отставание поляризации от величины приложенного внешнего поля.

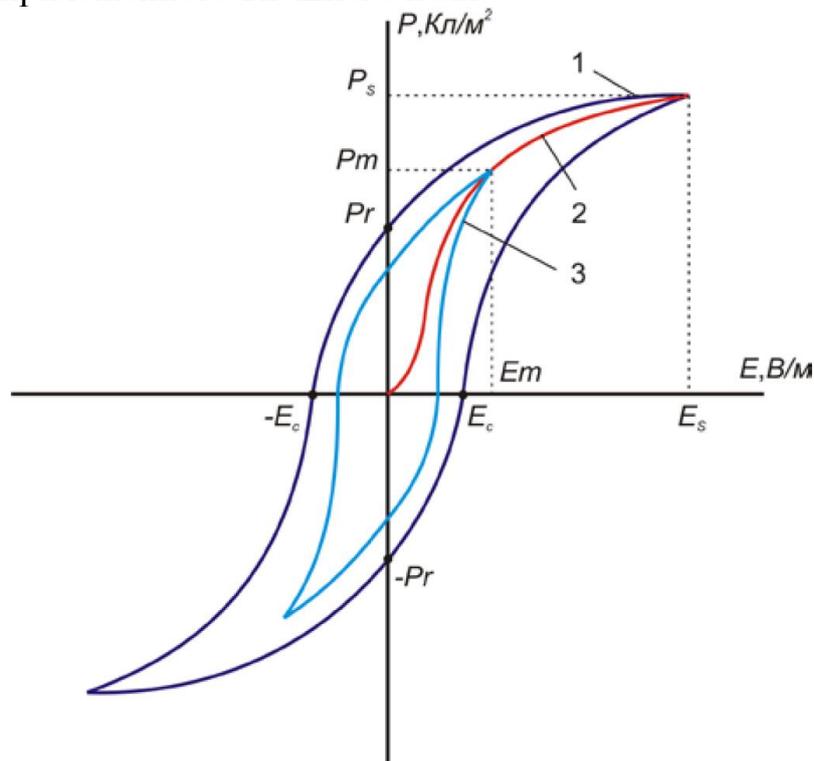


Рис. 1. Петля гистерезиса

При небольших значениях внешнего поля, пока оно не в состоянии переориентировать ни один из доменов, сегнетоэлектрик ведет себя как обычный диэлектрик. Но при некотором значении внешнего поля электрические моменты доменов начинают ориентироваться по полю. По мере увеличения внешнего поля начинается быстрый рост поляризации образца как за счет движения доменных стенок, так и за счет поворота электрических моментов доменов. При достижении состояния, называемым *насыщением*, вектора поляризации в доменах ориентированы вдоль направления поля. Сегнетоэлектрик становится однодоменным. При дальнейшем увеличении напряженности внешнего поля общая поляризация такого кристалла слабо растет за счет увеличения индуцированной поляризации.

При уменьшении электрического поля домены, в отличие от молекул полярного диэлектрика, не смогут до конца вернуться в свое первоначальное состояние, и тем самым обеспечивают остаточную поляризацию. Уменьшение поляризации P при уменьшении внешнего поля пойдет по кривой 2, отличной от кривой 1 первоначальной поляризации, т.е. поляризация будет убывать более медленно, «запаздывать». Когда поле станет равным нулю, сегнетоэлектрик сохраняет остаточную поляризацию P_0 . Теперь для того чтобы свести поляризацию сегнетоэлектрика к нулю, необходимо приложить поле направленное противоположно первоначальному, это поле будет действовать на домены, заставляя повернуться их в противоположную сторону и тем самым уменьшить общую поляризацию сегнетоэлектрика. Напряженность поля, при которой поляризация сегнетоэлектрика становится опять равной нулю, называется *коэрцитивной напряжённостью (коэрцитивной силой) E_c* . Гистерезис можно наблюдать, подводя к образцу сегнетоэлектрика с металлизированными поверхностями (сегнетоконденсатору) переменное напряжение. Часть электрической энергии, которая при переменном напряжении в диэлектрике переходит в тепло, называют диэлектрическими потерями. Площадь петли гистерезиса пропорциональна энергии, рассеянной за один период.

Изменяя значения подаваемого напряжения, можно получить семейство петель гистерезиса и восстановить кривую первоначальной поляризации. Сняв параметры петли, можно рассчитать такие характеристики сегнетоэлектрика как поляризация насыщения, остаточная поляризация, коэрцитивная сила при определенных значениях внешнего напряжения.

2. Нелинейная зависимость значения вектора поляризации P и диэлектрической проницаемости ϵ от напряженности внешнего электрического поля.

3. Значительная зависимость диэлектрической проницаемости ϵ от температуры с аномально большим максимумом при температуре Кюри.

После температуры Кюри резко уменьшается до значений, обусловленных индуцированной поляризацией.

4. Высокое значение ε ($10^3 \div 10^4$). Это обусловлено тем, что под воздействием внешнего электрического поля ориентируются электрические моменты доменов, а не отдельных атомов или молекул.

5. При переходе через точку Кюри скачкообразно изменяется целый ряд свойств вещества: структура кристаллической решетки, удельная теплоемкость, показатель преломления и др.

Методика эксперимента

В качестве исследуемого образца используется сегнетоэлектрический конденсатор вариконд ВК2-4, у которого известны геометрические размеры. Он расположен на термостатированной площадке в стенде СЗ-СЭ1. Стенд содержит ещё терморегулятор, повышающий трансформатор, делитель напряжения, эталонный конденсатор и вентилятор для быстрого охлаждения образца. Стенд подключается к измерителю статических характеристик ИСХ1 через разъем на задней панели прибора.

Получить изображение петли гистерезиса сегнетоэлектрика на экране измерителя ИСХ1 можно с помощью схемы рис. 2.

Схема собирается с помощью проводников. В качестве источника используется генератор регулируемого синусоидального напряжения, расположенный в приборе ИСХ 1 (выход генер. 1 на лицевой панели ИСХ1). Напряжение с C_1 и R_2 подается на вход U_1 и U_2 измерителя статических характеристик ИСХ1.

На схеме исследуемый сегнетоэлектрический конденсатор $C_{сегн}$ последовательно присоединен к эталонному конденсатору C_1 . Напряжение U на выходе повышающего трансформатора равно сумме напряжений на каждом из конденсаторов:

$$U = U_{сегн} + U_{C_1} = \frac{q}{C_{сегн}} + \frac{q}{C_1}$$

Заряды q на конденсаторах равны, т. к. конденсаторы соединены последовательно. Поскольку в схеме $C_{сегн} \gg C_1$, то $U_{сегн} \gg U_{C_1}$ и $U \approx U_{сегн}$ (напряжение на выходе трансформатора приблизительно равно напряжению на сегнетоэлектрическом конденсаторе). В этом случае модуль вектора напряженности в сегнетоэлектрическом образце:

$$E = \frac{U}{d}$$

где d – толщина образца.

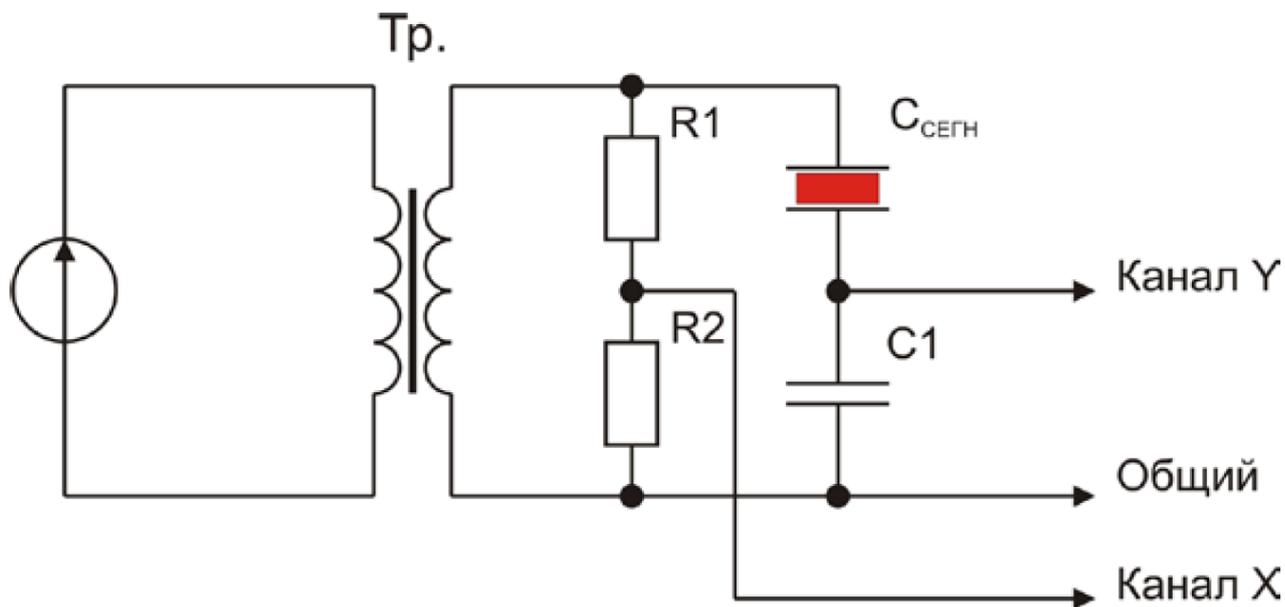


Рис. 2. Схема

Из схемы видно, что напряжение на выходе трансформатора пропорционально напряжению на резисторе R_2 :

$$U_{R_2} = U \frac{R_2}{(R_1 + R_2)}$$

Напряжение на эталонном конденсаторе пропорционально заряду на сегнетоэлектрическом образце:

$$Q_{сегн} = \sigma S$$

В то же время

$$Q_{сегн} = \sigma S$$

где σ – поверхностная плотность заряда на пластинах сегнетоэлектрического конденсатора.

В слабых полях $\sigma = P$. Тогда:

$$U_{C_1} = \frac{PS}{C_1}$$

Таким образом, напряжение на эталонном конденсаторе пропорционально модулю вектора поляризации.

Рекомендуемое задание к работе

1. Включите в сеть ИСХ1 и лабораторный стенд. Установите изображение петли гистерезиса в центре экрана.

2. Изменяя напряжение генератора на ИСХ1, получите на экране 5 – 7 петель.

3. Для каждой из полученных петель определите координаты и рассчитать значения P_m и E_m .

Занесите значения в таблицу 1

Таблица 1

$P_m, \text{ Кл/м}^2$								
$E_m, \text{ В/м}$								

4. Построить кривую начальной поляризации (график зависимости $P_m = f(E_m)$).

5. Зарисовать предельную петлю, отметив на рисунке значения поляризации насыщения, остаточной поляризации и коэрцитивной силы.

6. Плавнo увеличивая температуру, найдите точку Кюри, при которой исчезает петля гистерезиса.

Литература

1. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики.— 8-е изд., стер. — М. : Издательский центр "Академия", 2009 .

2. Курепин В. В., Баранов И. В. Обработка экспериментальных данных: Методические указания к лабораторным работам. – СПб, 2003.-57 с.

Лабораторная работа №7

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ЗАРЯДА И РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРА

Цель работы

1. Ознакомиться с процессом заряда и разряда конденсатора.
2. Экспериментально определить значение ёмкости конденсатора.

Требуемое оборудование.

Модульный учебный комплекс: МУК-ЭМ1* или МУК-ЭМ2.

Приборы:

1. Генератор напряжений ГН1 - 1 шт.
2. Стенд с объектами исследования СЗ-ЭМ01 - 1 шт.
3. Осциллограф ОЦЛ2 - 1 шт.
4. Комплект проводников - 1 шт.

Для обеспечения выполнения лабораторной работы требуется дополнительно осциллограф с полосой пропускания не менее 1 МГц.

Краткое теоретическое введение

Если двум изолированным друг от друга проводникам сообщить заряды Q_1 и Q_2 , то между ними возникает некоторая разность потенциалов $\Delta\varphi$, зависящая от величин зарядов, диэлектрической проницаемости среды и геометрии проводников. При переносе заряда величиной q от одного проводника к другому величина $\Delta\varphi$ будет изменяться прямо пропорционально. Это справедливо для проводников любой геометрической формы и, следовательно, можно ввести понятие взаимной емкости C как физической величины, численно равной заряду, который нужно перенести с одного проводника на другой для того, чтобы изменить на единицу разность потенциалов между ними:

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} \quad (1)$$

В системе СИ единица емкости называется фарад (Ф).

Существуют такие конфигурации проводников, при которых электрическое поле оказывается сосредоточенным (локализованным) лишь в некоторой области пространства, а заряды проводников одинаковы по модулю и противоположны по знаку: $|q_1| = |-q_2| = q$. Такие системы называются конденсаторами, а проводники, составляющие конденсатор, называются обкладками. Емкость конденсатора является взаимной

ёмкостью его обкладок. Конденсаторы служат накопителями электрической энергии.

Простейший конденсатор – система из двух плоских проводящих пластин, расположенных параллельно друг другу на малом по сравнению с размерами пластин расстоянии и разделенных слоем диэлектрика. Такой конденсатор называется плоским. Электрическое поле плоского конденсатора в основном локализовано между пластинами (рис. 1); однако, вблизи краев пластин и в окружающем пространстве также возникает сравнительно слабое электрическое поле, которое называют полем рассеяния. В целом ряде задач можно приближенно пренебрегать полем рассеяния и полагать, что электрическое поле плоского конденсатора целиком сосредоточено между его обкладками. Так, например, значение ёмкости плоского конденсатора, исходя из условия однородности электрического поля, можно вычислить как:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d},$$

где ε_0 – электрическая постоянная;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками;

S – площадь каждой обкладки;

d – расстояние между обкладками.

Таким образом, величина электроёмкости зависит от формы и размеров проводников и от свойств диэлектрика, разделяющего проводники.

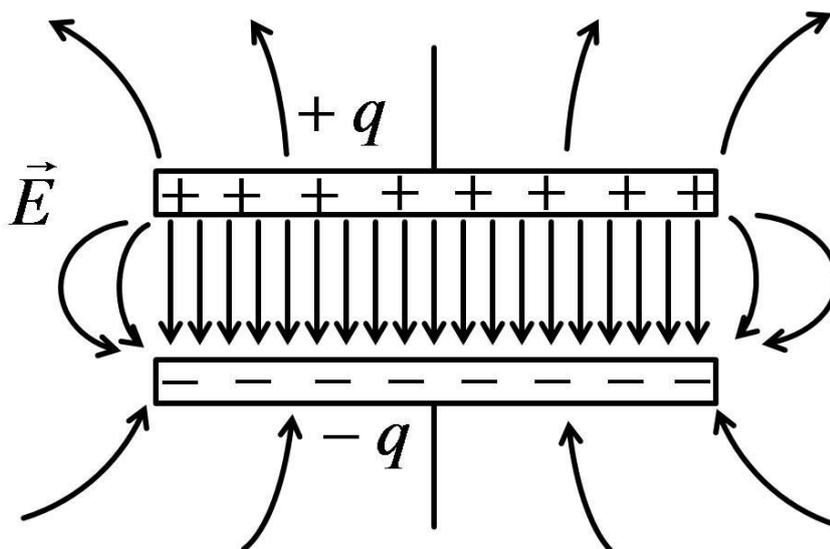


Рис. 1.

Электрическое поле внутри плоского конденсатора и вблизи него.

Рассмотрим процессы заряда и разряда конденсатора. Если заряженный конденсатор замкнуть проводником, то по проводу потечет ток, и конденсатор будет разряжаться.

Пусть U – разность потенциалов между его обкладками, R – сопротивление цепи, через которую происходит разряд. Для мгновенных значений заряда q , силы тока I и напряжения U можно записать:

$$I = \frac{U}{R}, \quad q = CU, \quad I = -\frac{dq}{dt} \quad (2)$$

Знак «минус» взят потому, что заряд q на конденсаторе со временем убывает. Полагаем, что мгновенное значение тока одно и то же во всех поперечных сечениях проводника, замыкающего конденсатор. Исключая силу тока I и напряжение U из уравнений (2), имеем:

$$\frac{dq}{dt} + \frac{q}{RC} = 0 \quad \text{или} \quad \frac{dq}{q} = -\frac{1}{RC} dt$$

Интегрируя это выражение, получаем: $\ln q = -\frac{t}{RC} + B$,

где B – постоянная интегрирования, которая определяется на начальных условиях, т. е. при $t = 0$ заряд конденсатора q_0 : $\ln q_0 = B$. Тогда имеем

$$\ln q - \ln q_0 = -\frac{t}{RC} \quad \text{или} \quad q = q_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что заряд на конденсаторе при его разряде изменяется по экспоненциальному закону. По такому же закону изменяется и напряжение на конденсаторе (рис. 2, кривая 1):

$$U = \frac{q}{C} = \frac{q_0}{C} e^{-\frac{t}{RC}} = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4)$$

где U_0 – напряжение в начальный момент времени. Из выражения (3) следует, если, $\frac{q_0}{q} = e \approx 2,7$ то

$$t = \tau = RC \quad (5)$$

Величина τ имеет размерность времени и называется временем релаксации, т.е. это время за которое заряд конденсатора (напряжение на обкладках) изменится в e раз. Вообще релаксацией называется любой самопроизвольный процесс перехода системы в устойчивое равновесное состояние. В данном случае это процесс разряда конденсатора.

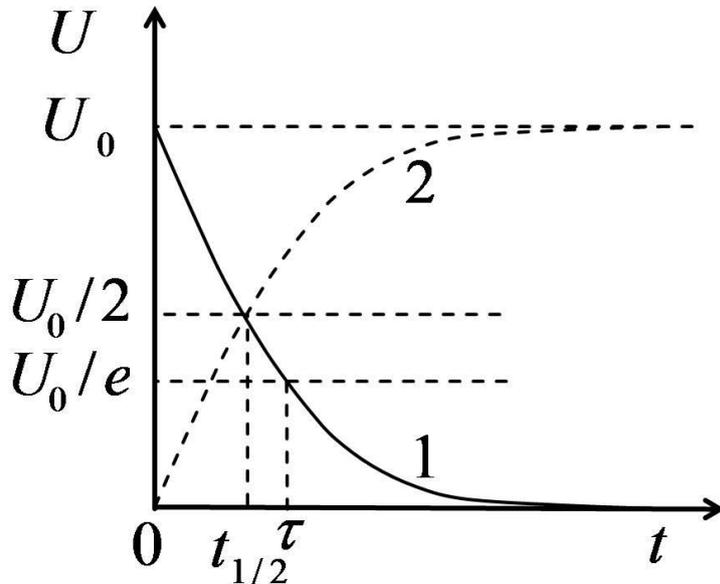


Рис. 2. Зависимость напряжения на конденсаторе от времени в процессе разрядки-1 и зарядки -2.

Для определения времени релаксации можно измерить время $t_{1/2}$, за которое заряд и напряжение (см. выражения (3), (4)) уменьшаются до половины первоначальной величины:

$$\frac{1}{2} q_0 = q_0 e^{-\frac{t_{1/2}}{\tau}} \quad (6)$$

Решая последнее выражение относительно $t_{1/2}$, имеем:

$$t_{1/2} = \tau \ln 2 = \tau \cdot 0.693 \quad (7)$$

Закон изменения напряжения на конденсаторе при его заряде выглядит как:

$$U = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (8)$$

и на рис. 2 представлен кривой 2.

Методика проведения эксперимента.

Полученные теоретические зависимости напряжения на конденсаторе при его разряде или заряде могут быть проверены экспериментально. Для этого следует измерить значения напряжения в разные моменты времени и результаты измерений изобразить в виде точек на координатной плоскости, XOY где $X = t$, $Y = \ln \frac{U_0}{U}$ (операция линеаризации функции).

Если экспериментальные точки в пределах точности измерений ложатся на прямую (рис. 3), то это подтверждает зависимости (4) и (8).

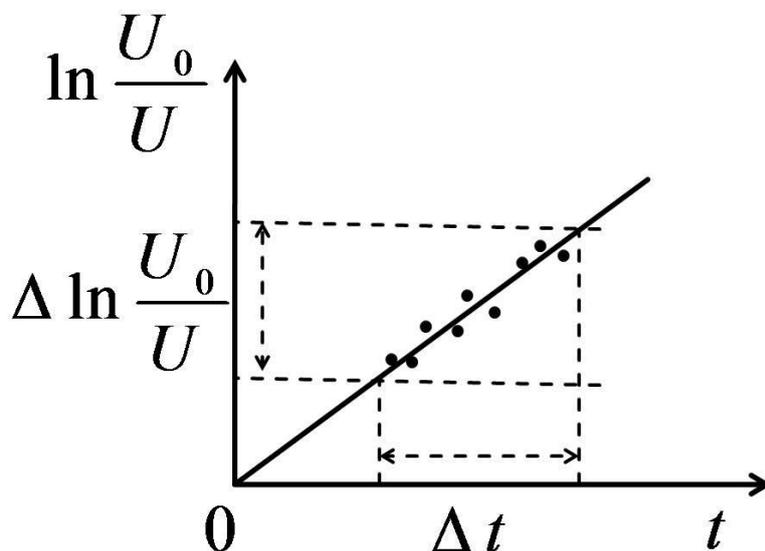


Рис.3 . Графический метод обработки результатов.

Для расчета ёмкости конденсатора можно воспользоваться полученным графиком. Для этого необходимо на линейном участке выбрать

приращение Δt и найти соответствующее ему приращение $\ln \frac{U_0}{U}$, а затем воспользоваться формулой (9).

$$C = \frac{\Delta t}{R \ln \frac{U_0}{U}} \quad (9)$$

Для наблюдения процессов зарядки и разрядки конденсатора на осциллографе необходимо периодически подключать и отключать конденсатор от источника. Для этого можно использовать генератор прямоугольных импульсов. Период следования импульсов выбирается исходя из условия $T_{имп} \approx 4 - 6\tau$.

Для исследования процессов зарядки и разрядки конденсатора используется модульный учебный комплекс МУК-ЭМ1(2).

Электрическая схема представлена на рис. 4. В качестве источника прямоугольного напряжения используется генератор ГН1. В качестве измерительного прибора используется осциллограф ОЦЛ2. Постоянный резистор и исследуемый конденсатор располагаются в стенде с объектами исследования СЗ-ЭМ01.

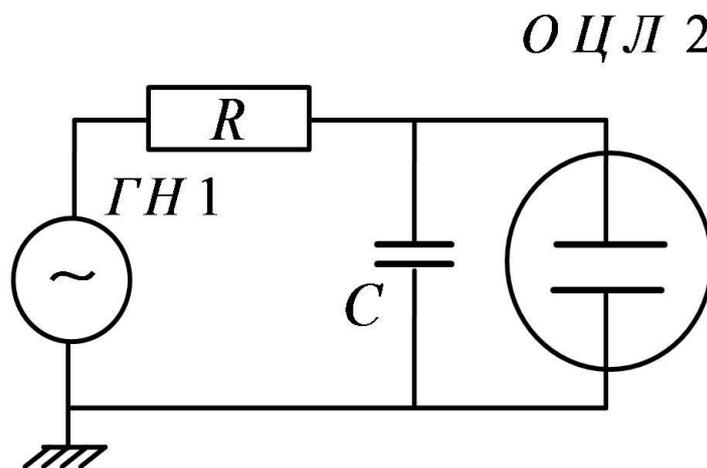


Рис. 4. Схема лабораторной установки.

Рекомендуемое задание к работе

1. Соберите электрическую схему рис. 4. На экране осциллографа получите изображение сигнала заряда и разряда конденсатора.
2. Перерисуйте осциллограмму. Сравните процессы разряда и заряда конденсатора. По осциллограмме измерьте значение U_0 . На участке

разряда конденсатора для 8-10 отсчетов времени найдите значения $\ln \frac{U_0}{U}$
 Заполните таблицу 1.

Таблица 1

№ опыта	U_0 , дел	U , дел	$\ln \frac{U_0}{U}$

- По полученным результатам постройте график зависимости $\ln \frac{U_0}{U}$ от t . Убедитесь, что в пределах точности измерений, экспериментальные точки ложатся на прямую.
- Оцените ёмкость конденсатора по формуле (8), используя метод наименьших квадратов.
- Проведите аналогичную процедуру измерений и расчётов, изменив сопротивление цепи R . Сопоставьте полученные Вами значения ёмкости C .

Литература

- Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики.— 8-е изд., стер. — М. : Издательский центр "Академия", 2009 .
- Курепин В. В., Баранов И. В. Обработка экспериментальных данных: Методические указания к лабораторным работам. – СПб, 2003.-57 с.

Контрольные вопросы к лабораторным работам.

Лабораторная работа № 1 «Изучение картины эквипотенциальных поверхностей и силовых линий электростатического поля с помощью электролитической ванны»

1. Какие характеристики поля отражают напряженность и потенциал?
2. Как напряжённость и потенциал связаны друг с другом?
3. Выведите формулу для напряженности электростатического поля двух точечных зарядов, одинаковых по величине и противоположных по знаку для точки наблюдения, находящейся а) посередине между зарядами, б) на расстоянии, весьма большом по сравнению с расстоянием между зарядами.
4. Докажите, что элементарный поток электростатического поля через площадку dS равен его потоку через проекцию этой площадки, перпендикулярную вектору напряженности. Докажите, что поэтому поток поля точечного заряда через любую замкнутую поверхность, окружающую этот заряд равен потоку через любую концентричную ему сферу.
5. Почему циркуляция электростатического поля по любому замкнутому контуру равна нулю?
6. Докажите, что ротор градиента любой функции координат тождественно равен нулю.
7. Запишите через интеграл по объему общее выражение для потенциала поля, созданного объемным распределением заряда ρ заданным в некоторой области V .
8. Используя теорему Гаусса в интегральной форме, выведите формулу для поля равномерно заряженного шара радиусом R с зарядом Q для точек наблюдения внутри шара. Выразите результат через объемную плотность заряда.
9. Используя теорему Гаусса в интегральной форме, выведите формулу для поля равномерно заряженного с объёмной плотностью ρ цилиндра радиусом сечения R для точек наблюдения внутри и вне цилиндра.
10. Покажите, что силовые линии всегда перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.

Лабораторная работа № 2 Изучение электрических сигналов с помощью электронного осциллографа»

1. Как осуществляется развёртка сигнала в осциллографе?
2. Почему для правильной работы осциллографа нужна синхронизация.
3. Чем отличается внутренняя синхронизация от внешней?
4. Как определить погрешность измерения напряжения с помощью осциллографа?
5. Как определить погрешность измерения периода колебаний при помощи осциллографа?

6. Как можно реализовать сложение двух сигналов с помощью осциллографа?
7. Как получить фигуры Лиссажу с помощью осциллографа?
8. Что называется скважностью сигнала?
9. Выведите формулу для оценки погрешности скважности.
10. Как работает осциллограф в ждущем режиме?
11. Что называется действующим значением напряжения. Почему в зависимости от типа вольтметра, может измеряться действующее или амплитудное значение переменного напряжения. Как они связаны между собой?

Лабораторная работа № 3 «Исследование характеристик источника тока»

1. Что такое ЭДС источника тока?
2. Чем отличается электродвижущая сила источника тока от разности потенциалов на его электродах? В каком случае значения этих величин оказываются равными и почему.
3. Что такое сторонние силы. Сторонние силы какой природы могут использоваться в источнике тока?
4. Почему поддержание тока в замкнутом контуре невозможно только за счёт электростатических сил?
5. В чем отличие понятия напряжения на неоднородном участке цепи от напряжения (на однородном участке), например от напряжения на конденсаторе?
6. Как мощность, потребляемая во внешней цепи источника, зависит от сопротивления нагрузки.
7. Электромотор постоянного тока подключили к напряжению U . Сопротивление обмотки якоря равно R . При каком значении тока через обмотку полезная мощность мотора будет максимальной?

Лабораторная работа № 4. «Методы измерения электрического сопротивления»

1. За счет каких столкновений (упругих или неупругих) происходит преобразование кинетической энергии движущихся носителей заряда в энергию колебаний решётки? Выведите закон Джоуля-Ленца?
2. Докажите, что поверхность проводника эквипотенциальна.
3. Выразите сопротивление цилиндрического проводника через его длину и площадь сечения.
4. Что называется удельным сопротивлением проводника?
5. Что называется проводимостью проводника? В каких единицах она измеряется?
6. Запишите закон Ома для однородного участка цепи в интегральной и дифференциальной формах.

7. Запишите закон Ома для неоднородного участка цепи в интегральной и дифференциальной формах.
8. В чём смысл уравнения непрерывности?
9. В каких случаях для измерения сопротивлений используют мост постоянного тока?
10. Какие схемы включения приборов следует выбирать в зависимости от внутренних сопротивлений амперметра и вольтметра при измерении с их помощью сопротивления проводника.

Лабораторная работа № 5 «Сегнетоэлектрик»

1. Объясните ход зависимости поляризованности сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля, указав идущие при этом физические процессы.
2. Объясните зависимость диэлектрической восприимчивости сегнетоэлектрика от приложенного поля.
3. Как наличие доменной структуры влияет на процесс поляризации?
4. Почему, измеряя напряжение на обкладках конденсаторов в данной работе, мы оцениваем напряжённость и индукцию поля в диэлектрике?
5. Каким образом в данной работе удалось получить петлю гистерезиса на экране осциллографа?
6. Как температура сегнетоэлектрика влияет на его свойства?
7. Как связаны диэлектрическая восприимчивость и диэлектрическая проницаемость диэлектрика?
8. Что называют поляризуемостью диэлектрика? В каких единицах она измеряется?
9. Что называют поляризованностью диэлектрика? В каких единицах она измеряется?
10. Как определить объёмную плотность энергии электрического поля в диэлектрике?

Лабораторная работа № 6. «Изучение процесса заряда и разряда конденсатора»

1. Почему заряды на обкладках конденсатора после окончания зарядки оказываются сосредоточенными на тех их сторонах, которые обращены друг к другу?
2. Известно, что в установившемся режиме (в электростатике) внутри проводника, помещенного во внешнее поле, напряженность поля равна нулю $E=0$. То же самое относится и к касательной компоненте установившегося поля на поверхности проводника. Почему?
3. Выведите формулы для емкости плоского конденсатора с площадью пластин S и расстоянием между обкладками d . Как наличие диэлектрика влияет на ёмкость конденсатора.

4. Выведите формулу для ёмкости на единицу длины цилиндрического воздушного конденсатора с радиусами обкладок R_1 и R_2 .
5. Выведите формулу для ёмкости сферического воздушного конденсатора с радиусами обкладок R_1 и R_2 .
6. Выведите формулу для напряжённости электрического поля внутри плоского конденсатора.
7. Получите зависимость заряда на конденсаторе от времени в процессе зарядки.
8. В плоский конденсатор с расстоянием между обкладками d ввели металлическую платину толщиной a , равную по размерам обкладкам. Во сколько раз изменится ёмкость конденсатора?
9. Выведите формулу для объёмной плотности энергии внутри плоского конденсатора.
10. Почему ёмкость уединённого проводника сильно зависит от внешних условий, а ёмкость конденсатора - нет.

При подготовке данного учебно-методического пособия использовались материалы следующих учебников:

1. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики.— 8-е изд., стер. — М.: Издательский центр "Академия", 2009.
2. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014.
3. Савельев, И.В. Курс общей физики: Учебник. В 3 т. Т. 2.: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И.В. Савельев. - СПб.: Лань, 2016.
4. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. 3.: Электричество , стер / Д.В. Сивухин. - М.: Физматлит, 2015
5. Фриш С.Э. Курс общей физики : учебник : в 3 т. / С. Э. Фриш, А. В. Тиморева .— СПб. [и др.] : Издательство "Лань", 2007 .— (Классическая учебная литература по физике)
6. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики : в 3 т. / Г. А. Зисман, О. М. Тодес .— Изд. 7-е, стер. — СПб. [и др.] : Издательство "Лань", 2007 .— (Классическая учебная литература по физике)

Королёв Александр Александрович

Курашова Светлана Александровна

Смирнов Александр Витальевич

Электричество и магнетизм
Методические рекомендации
по выполнению лабораторных работ
часть первая
Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

