

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Кафедра физики

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

*Методические указания к выполнению
лабораторных работ и решению задач*

Москва
2019

УДК 537(075)

Электричество и магнетизм: метод. указ. к выполнению лаб. работ и решению задач / сост. С. Г. Веселко, Е.Е. Карпова. – М.: ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», 2019. — 48 с.

Приведены описания лабораторных работ и даны задачи по разделу «Электричество и магнетизм». Предназначены для студентов первого и второго курсов всех специальностей.

УДК 537(075)

© Веселко С. Г., Карпова Е.Е., 2019
© ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», 2019

Лабораторная работа 1

Изучение закона Ома и определение удельного сопротивления нихромовой проволоки

Цель работы – проверка закона Ома в дифференциальной и интегральной формах. Оценка скорости упорядоченного движения и концентрации свободных электронов в металле, определение удельного сопротивления нихромовой проволоки, исследование зависимости сопротивления проводника от его длины.

Приборы и принадлежности: лабораторная установка и микрометр.

Экспериментально было установлено, что носителями тока в металлах являются свободно перемещающиеся по металлу электроны. Согласно классическим представлениям электрическое сопротивление металлов обусловлено соударениями свободных электронов с ионами, находящимися в узлах кристаллической решетки металла.

Если предположить, что у каждого атома освободится по одному электрону, то концентрация n свободных электронов будет равна количеству атомов в единице объема:

$$n = \left(\frac{\delta}{\mu}\right) N_A, \quad (1)$$

где δ – плотность металла; μ – молярная масса; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро. При упорядоченном движении электронов со скоростью v через единичную площадку, перпендикулярную току, в единицу времени переносится электрический заряд, величина которого равна модулю вектора плотности тока \vec{j} :

$$\vec{j} = en\vec{v}, \quad (2)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – абсолютное значение заряда электрона (элементарный заряд).

Одним из главных способов возбуждения электрического тока в телах является создание и поддержание в них электрического поля, которое в дальнейшем будем считать однородным ($\vec{E} = \text{const}$). Как показывает опыт, для многих тел (например, металлов) в широких пределах плотность электрического тока \vec{j} пропорциональна напряженности электрического поля \vec{E} :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = \frac{1}{\rho} \vec{E}, \quad (3)$$

где σ – удельная проводимость; ρ – удельное сопротивление материала – величины постоянные для данного материала и зависящие от физического состояния тела (температуры, давления и т.п.). Они определяют способность тела проводить электрический ток. Формула (3) представляет собой закон Ома в дифференциальной форме.

Рассмотрим случай, когда электрические токи текут вдоль тонких проводов (проволок) (рис.1).

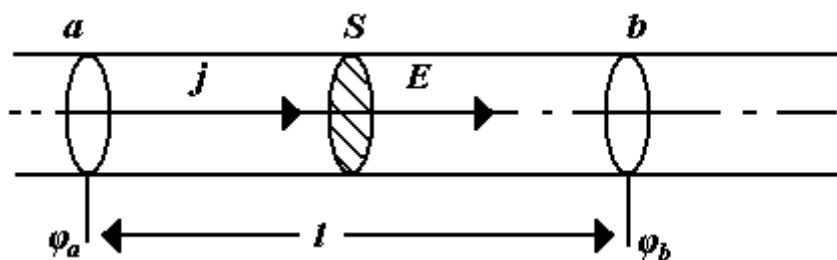


Рис. 1.

Направление тока (упорядоченное движение положительных зарядов) будет совпадать с направлением оси провода и плотность тока \mathbf{j} может считаться одинаковой во всех точках поперечного сечения провода. Если через поперечное сечение проводника площади S за малый промежуток времени Δt проходит заряд Δq , то силой тока называют величину

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (4)$$

При однородном распределении плотности тока \mathbf{j} по сечению проводника $\mathbf{I} = \mathbf{j}S$.

В дальнейшем будем считать, что электрический ток в проводнике возбуждается только силами однородного электрического поля. Воспользуемся законом Ома в дифференциальной форме (3) и запишем для напряженности электрического поля выражение

$$\mathbf{E} = \rho \mathbf{j} = \rho \frac{\mathbf{I}}{S}. \quad \mathbf{E} = \rho \mathbf{j} = \rho \left(\frac{\mathbf{I}}{S} \right). \quad (5)$$

Умножим это соотношение на элемент длины провода $d\mathbf{l}$ и проинтегрируем полученное выражение по участку проводника \mathbf{ab} (рис.1):

$$\int_{a \rightarrow b} \mathbf{E} d\mathbf{l} = I \int_{a \rightarrow b} \rho \frac{d\mathbf{l}}{S}. \quad (6)$$

Величина \mathbf{I} выносится из-под знака интеграла, т.к. сила тока \mathbf{I} одинакова во всем проводнике в силу закона сохранения электрического заряда.

Левая часть формулы (6) есть не что иное, как разность потенциалов (напряжение U на участке \mathbf{ab}) $\varphi_a - \varphi_b = U$ (рис.1):

$$U = \varphi_a - \varphi_b = \int_{a \rightarrow b} \mathbf{E} d\mathbf{l}. \quad (7)$$

Интеграл в правой части формулы (6), определяемый как

$$R = \int_{a \rightarrow b} \rho \frac{d\mathbf{l}}{S}, \quad (8)$$

есть величина, характеризующая данный участок проводника, по которому течет электрический ток. Эта величина \mathbf{R} называется электрическим сопротивлением или просто сопротивлением участка проводника. Если проводник изготовлен из однородного материала постоянного поперечного сечения, то из (8) получается известная формула:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (9)$$

Таким образом, из (6) – (8) вытекает закон Ома для участка цепи проводника в интегральной форме:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (10)$$

Напряженность однородного электрического поля E , как видно из (7), связана с напряжением U на участке проводника длиной l соотношением:

$$E = \frac{U}{l}. \quad (11)$$

Порядок выполнения работы

Для определения удельного сопротивления собирают электрическую цепь, схематично показанную на рис.2, где между точками a и c включена проволочка исследуемого материала.

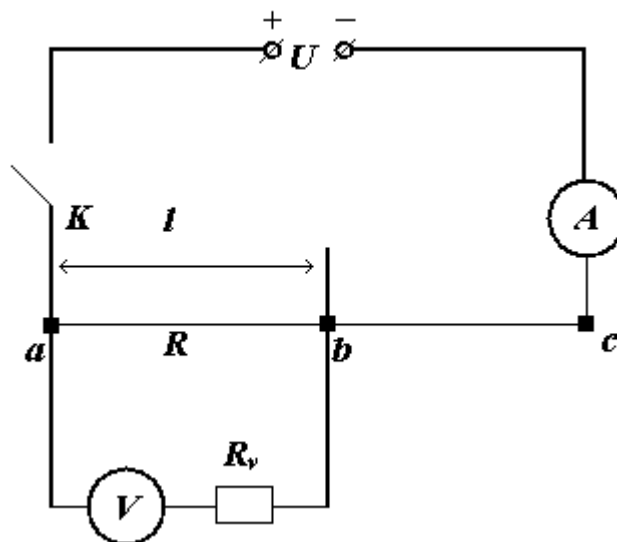


Рис.2

Измеряя силу тока в цепи и напряжение на участке " ab " длиной l (при замкнутом положении ключа K), можно рассчитать, в соответствии с законом Ома, сопротивление этого участка цепи по формуле:

$$R = \frac{U_v}{I_a - \left(\frac{U_v}{R_v}\right)}, \quad (12)$$

где U_v и I_a – показания вольтметра и амперметра соответственно, а R_v – внутреннее сопротивление вольтметра. Если ток через вольтметр, равный $I_v = \frac{U_v}{R_v}$, много меньше тока I_a , то для расчета сопротивления можно воспользоваться приближенной формулой:

$$R = \frac{U_v}{I_a}. \quad (13)$$

Измеряя диаметр d проволочки, можно рассчитать площадь ее поперечного сечения:

$$S = \frac{\pi}{4} d^2. \quad (14)$$

Из соотношений (9), (13) и (14) для удельного сопротивления окончательно получаем расчетную формулу:

$$\rho = \frac{\pi d^2}{4 l} \frac{U_v}{I_a}. \quad (15)$$

Для оценки погрешности σ_p в определении удельного сопротивления, в соответствии с соотношением (15), можно воспользоваться формулой:

$$\frac{\sigma_\rho}{\rho} = \sqrt{4 \left(\frac{\sigma_a}{d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_U}{U_v}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_I}{I_a}\right)^2} \quad (16)$$

Погрешность σ_ρ , как видно из формулы (16), будет минимальна при максимальной длине l и как можно большем токе I_a .

Для экспериментальной проверки закона Ома для участка цепи, не изменяя напряжение источника U , измеряют силу тока I_a и напряжение U_v на исследуемом участке " ab " цепи. Результаты измерений представляют графически в виде зависимости $U_v = U_v(I_a)$. Если экспериментальные точки в пределах точности измерений ложатся на прямую (рис.3), то это может являться экспериментальным подтверждением закона Ома в интегральной форме.

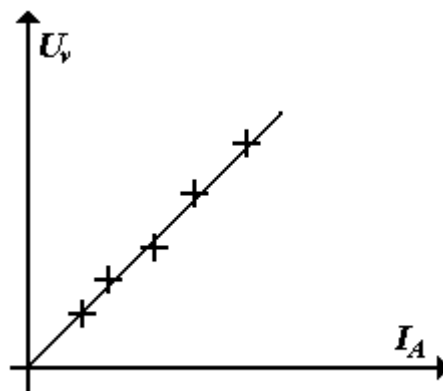


Рис.3

Для проверки формулы (9), отражающей зависимость сопротивления проволоки от ее длины, измеряют сопротивление R при разных длинах l проволоки. Результаты измерений представляют графически в виде зависимости $R = R(l)$. Поскольку проволока однородна ($\rho = \text{const}$) и имеет одинаковую толщину ($S = \text{const}$), то экспериментальные точки должны находиться на прямой, не проходящей через начало координат (рис.4).

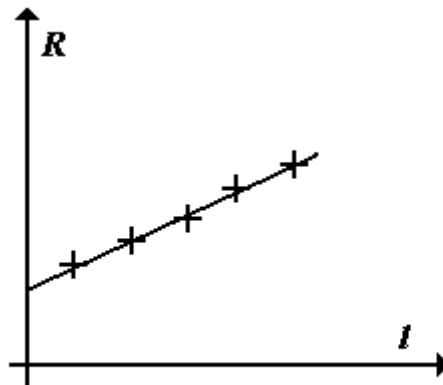


Рис.4

Для определения напряженности электрического поля в проводнике измеряют, падение напряжения U на участках проводника при разных длинах l проволоки. Результаты измерений представляют в виде зависимости $U = U(l)$. Если поле E в проводнике однородно, график зависимости $U(l)$ будет представлять собой прямую линию (рис.5), угловой коэффициент которой равен напряженности электрического поля в проводнике.

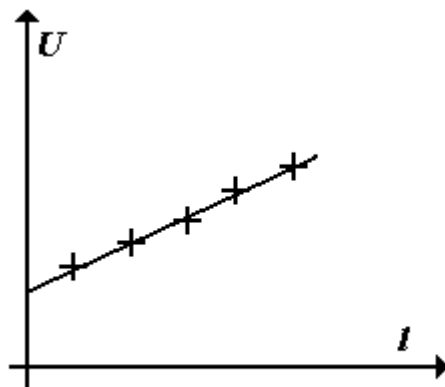


Рис.5

Порядок измерений. Обработка результатов измерений

1. Измерьте микрометром или штангенциркулем диаметр проволоки по всей ее длине в 5 – 7 точках. Найдите среднее значение диаметра \bar{d} и оцените погрешность σ_d .

Таблица 1

$d_1, \text{мм}$	$d_2, \text{мм}$	$d_3, \text{мм}$	$d_4, \text{мм}$	$d_5, \text{мм}$	$d_{\text{ср}}, \text{мм}$	$\sigma d, \text{мм}$

2. Соберите электрическую цепь по схеме рис.2. Установите максимальную длину проволоки. Измерьте силу тока I_a при 8-10 значениях U . Результаты занесите в табл.1.

Таблица 2

$U_v, \text{В}$										
$I_a, \text{А}$										

Затем постройте график зависимости $U = U(I)$, из которого определите сопротивление проводника \bar{R} . По формуле (15) рассчитайте удельное сопротивление $\bar{\rho}$. Оцените погрешность σ_ρ .

3. Экспериментально проверьте зависимость сопротивления R проволоки от ее длины l . Для этого при 5-7 значениях длины l запишите в табл.2 показания U_v вольтметра и I_a амперметра. Вычислите значения $R_i = \left(\frac{U_v i}{I_a i} \right)$ ($i=1,2,3,\dots,7$). Постройте график зависимости $R = R(l)$.

Таблица 3

$l, \text{ м}$							
$U, \text{ В}$							
$I, \text{ А}$							
$R, \text{ Ом}$							

4. Установите максимальное значение силы тока I , протекающего по проводнику. Найдите плотность тока $j = \frac{I}{S}$, измерьте падение напряжения U при 5-7 разных значениях длины l проволоки. Результаты занесите в табл.3.

Таблица 4

$l, \text{ м}$									
$U, \text{ В}$									

Затем постройте график зависимости $U=U(l)$ и определите напряженность электрического поля $E = \frac{\Delta U}{\Delta l}$ в проводнике. Оцените погрешность σ_E .

Рассчитайте удельное сопротивление проволоки исходя из закона Ома в дифференциальной форме: $\rho = \frac{E}{j}$. Оцените погрешность σ_ρ и запишите окончательный результат $\rho \pm \sigma_\rho$.

5. Нихром представляет собой сплав (67,5 %-Ni, 15 %-Cr, 16 %-Fe, 1,5 %-Mn), молярная масса которого $\mu=0,058 \text{ кг/моль}$, плотность $\delta=8,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. По формулам (1) и (2) оцените концентрацию n и скорость v упорядоченного движения электронов при протекании тока по нихромовому проводнику. Сравните скорость v со средней скоростью теплового движения электронов при данной температуре T : $\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$, где $k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/кг}$ – постоянная Больцмана; $m=9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ – масса электрона. Какие выводы можно сделать из такого сравнения?

Контрольные вопросы

1. Что называется электрическим током?
2. Дайте определение силы и плотности тока.
3. Сформулируйте закон Ома в интегральной и дифференциальной формах.
4. Что называется удельным сопротивлением проводника? От чего зависит удельное сопротивление?
5. Выведите формулу (12).
6. При каких упрощающих предположениях получена формула (15)?
7. Получите формулу (16) для оценки погрешности σ_ρ .
8. Какое электрическое поле называют однородным? Укажите связь между напряженностью электрического поля и падением напряжения на участке проводника.

Лабораторная работа 2

Исследование процесса разрядки конденсатора

Цель работы – исследование процесса разрядки конденсатора на активное сопротивление, определение времени релаксации, оценка емкости конденсатора.

Приборы и принадлежности: лабораторная установка, источник питания, микроамперметр, исследуемый конденсатор, секундомер.

Электрический конденсатор или просто конденсатор – это устройство, способное накапливать и отдавать (перераспределять) электрические заряды. Конденсатор состоит из двух или более проводников (обкладок), разделенных слоем диэлектрика. Как правило, расстояние между обкладками, равное толщине диэлектрика, мало по сравнению с линейными размерами обкладок, поэтому электрическое поле, возникающее при подключении обкладок к источнику с напряжением U , практически полностью сосредоточено между обкладками. В зависимости от формы обкладок конденсаторы бывают плоские, цилиндрические, сферические.

Основной характеристикой конденсатора является его емкость C , которая численно равна заряду q одной из обкладок при напряжении, равном единице: $C = \frac{q}{U}$. Пусть конденсатор емкостью C включен в электрическую цепь (рис.1),

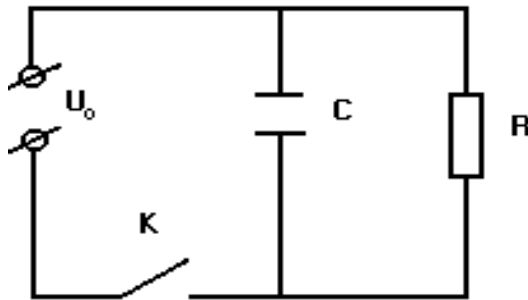


Рис.1

содержащую источник постоянного напряжения U_0 , ключ K и резистор (активное сопротивление) R . При замыкании ключа K конденсатор зарядится до напряжения U_0 . Если затем ключ K разомкнуть, то конденсатор начнет разряжаться через резистор R и в цепи возникнет электрический ток I . Этот ток изменяется со временем. Считая процессы, происходящие в цепи, квазистационарными, применим для данной цепи законы постоянного тока.

Найдем зависимость разрядного тока I от времени t . Для этого воспользуемся вторым правилом Кирхгофа применительно к цепи RC (рис.2).

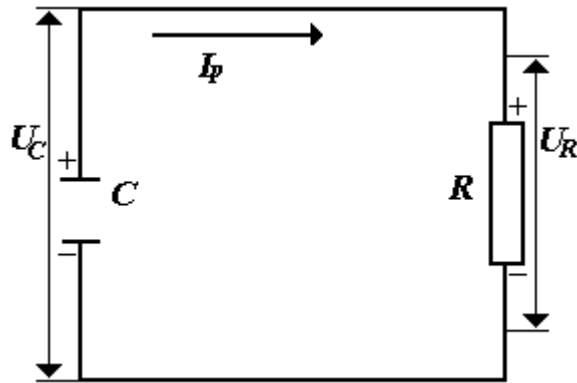


Рис.2

Тогда получим:

$$-U_C + U_R = 0, \quad \frac{q}{C} = IR, \quad (1)$$

где I – электрический ток в цепи; q – заряд конденсатора C . Подставив в уравнение (1) значение силы тока $I = -\frac{dq}{dt}$, получим дифференциальное уравнение первого порядка с разделяющимися переменными:

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{q}{RC}, \quad (2)$$

После интегрирования уравнения (2) находим

$$q(t) = q_0 e^{-t/\tau}, \quad (3)$$

где q_0 – начальное значение заряда конденсатора; $\tau = RC$ – постоянная, имеющая размерность времени. Она называется временем релаксации. Через время τ , заряд на конденсаторе убывает в e раз.

Продифференцировав уравнение (3), найдем закон изменения разрядного тока $I(t)$:

$$I(t) = \frac{q_0}{\tau} e^{-t/\tau},$$

или

$$I(t) = I_0 e^{-t/\tau}, \quad (4)$$

где $I_0 = \frac{q_0}{\tau}$ – начальное значение силы тока, т.е. тока при $t = 0$.

На рис.3 построены две зависимости разрядного тока I от времени t , соответствующие двум различным значениям активного сопротивления R_1 и R_2 ($R_1 < R_2$).

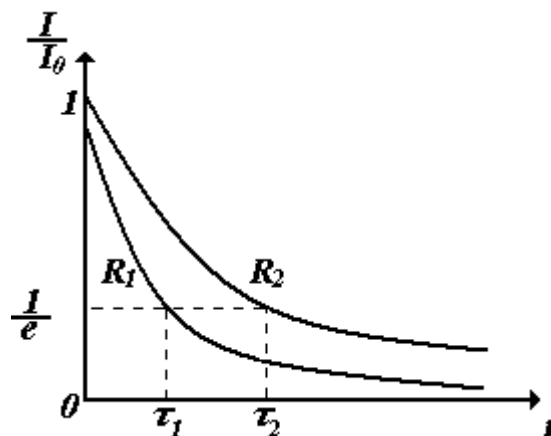


Рис.3

Описание лабораторной установки

В данной лабораторной работе предлагается исследовать процесс разрядки конденсатора на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис.4.

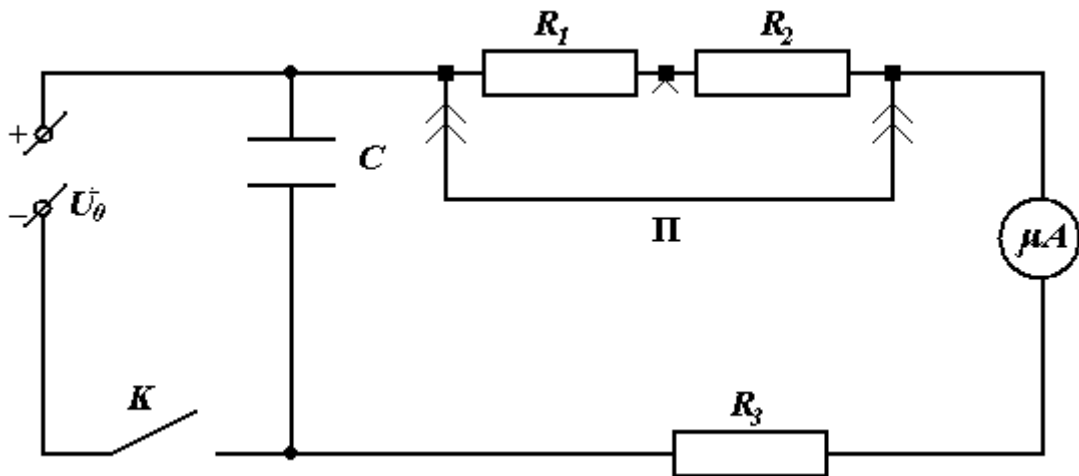


Рис.4

Она состоит из источника постоянного напряжения U_0 , емкости C , резисторов R_1 , R_2 , R_3 и микроамперметра. Так как резисторы R_1 , R_2 , R_3 включены последовательно, активное сопротивление цепи можно изменять при помощи переключки Π , замыкая поочередно накоротко резисторы R_1 , R_2 или оба вместе.

Порядок измерений. Обработка результатов измерений

1. Соберите электрическую цепь по схеме рис.4 и по заданию преподавателя выберите необходимое значение сопротивления цепи R .
2. Замкните ключ K и зарядите конденсатор C до напряжения U_0 . При полной зарядке конденсатора микроамперметр покажет максимальное значение тока I_0 .
3. Разомкните ключ K и одновременно включите секундомер. Измерьте время t_0 , в течение которого показания микроамперметра уменьшатся в 10 раз. Определите интервал времени $\Delta t \approx \frac{t_0}{10}$, через который будет фиксироваться сила тока I .
4. Вновь замкните ключ K и зарядите конденсатор.
5. Разомкните ключ K и зафиксируйте показания микроамперметра через интервалы времени Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$ и т.д. до времени $10 \Delta t$. Такие измерения сделайте три раза, и результаты занесите в табл.1 для каждого набора сопротивлений R .

Вычислите \bar{I} (среднее значение тока) и отношение $\frac{\bar{I}}{I_0}$.

R=

Таблица 1

t,с	0	Δt	$2\Delta t$	$3\Delta t$	$4\Delta t$	$5\Delta t$	$6\Delta t$	$7\Delta t$	$8\Delta t$	$9\Delta t$	$10\Delta t$
I_1											
I_2											
I_3											
\bar{I}											
$\frac{\bar{I}}{I_0}$											

6. По результатам измерений постройте график зависимости отношения $\frac{\bar{I}}{I_0}$ от времени (см. формулу 4), и определите из графика постоянную $\tau = RC$. Оцените погрешность σ_τ (см. приложение 1).
7. Зная значения τ и **R**, найдите емкость конденсатора $C = \frac{\tau}{R}$. Оцените погрешность σ_C .
8. Запишите окончательный результат с погрешностью: $C \pm \sigma_C$
9. Оцените емкость конденсатора другим способом.
Для этого изобразите на графике в полулогарифмическом масштабе зависимость

$$\ln \frac{I_0}{\bar{I}} = \frac{1}{RC} t \quad (5)$$

для каждого значения сопротивления **R**.

Формула (4) показывает, что график должен иметь вид прямой линии с наклоном $K = \frac{1}{RC}$.

Наклон прямой (5) позволяет, таким образом, определить емкость конденсатора

$$C = \frac{1}{KR} \quad (6)$$

10. Оцените погрешность σ_C и запишите окончательный результат: $C \pm \sigma_C$

Контрольные вопросы

1. Какое устройство называется конденсатором?
2. Дайте определение емкости конденсатора.
3. Сформулируйте правила Кирхгофа.
4. Выведите формулы (3) и (4).
5. Получите выражения для емкостей плоского и сферического конденсаторов.

Приложение.

В лабораторной работе 2 Исследование процесса разрядки конденсатора из экспоненциальной кривой $\frac{\bar{I}}{I_0} = e^{-\frac{t}{\tau}}$ определяется время релаксации τ и погрешность ее измерения. Т.к. $\ln \frac{\bar{I}}{I_0} = -\frac{t}{\tau}$, следует, что $\tau = \frac{t}{\ln(\frac{I_0}{\bar{I}})}$ или $\tau = t$ при отношении токов $\frac{\bar{I}}{I_0} = \frac{1}{e}$. Проведя горизонтальную линию через все экспериментальные кривые, можно определить значение τ для различных значений сопротивлений (см. рис. 3).

Погрешность измерений τ в различных точках экспоненциальных кривых различна и для ее определения, прежде всего, требуется проанализировать в какой точке кривой эта погрешность максимальна.

Среднеквадратичная погрешность:

$$\sigma_{\tau} = \frac{1}{\ln\left(\frac{I_0}{\bar{I}}\right)} \sigma_t + \frac{t}{\left[\ln\left(\frac{I_0}{\bar{I}}\right)\right]^2} \frac{1}{\bar{I}} \frac{I_0}{I^2} \sigma_I.$$

Относительная погрешность:

$$\varepsilon_{\tau} = \frac{\sigma_{\tau}}{\tau} = \frac{\sigma_t}{t} + \frac{1}{\ln\left(\frac{I_0}{\bar{I}}\right)} \frac{\sigma_I}{I}.$$

Анализ этой формулы показывает, что максимальная погрешность измерения τ будет также при токе $\frac{\bar{I}}{I_0} = \frac{1}{e}$. В этом случае (значение e принимается ≈ 3).

$$\varepsilon_{\tau} = \frac{\sigma_t}{t \left(\text{при } \frac{\bar{I}}{I_0} = \frac{1}{e} \right)} + e \frac{\sigma_I}{I_0} = \frac{\sigma_t}{t \left(\text{при } \frac{\bar{I}}{I_0} = \frac{1}{e} \right)} + 3 \frac{\sigma_I}{I_0}.$$

Среднеквадратичная погрешность: $\sigma_{\tau} = \varepsilon_{\tau} \tau^*$.

Расчет погрешности τ можно провести для одной из построенных кривых, т.е. найти τ_R для одного значения R : $\tau_R = \tau \pm \sigma_{\tau}$.

При расчете погрешности емкости конденсатора необходимо в формулу относительной погрешности $\frac{\sigma_{\tau}}{\tau}$ добавить относительную погрешность $\frac{\sigma_R}{R}$,

* При расчете относительной погрешности ε_I погрешность σ_I можно принять равной половине выбранного интервала времени, а $\sigma_I = \sqrt{\sigma_{\text{сис}}^2 + \sigma_{\text{сл}}^2}$, где $\sigma_{\text{сис}}$ = половине цены деления амперметра, а $\sigma_{\text{сл}}$ = максимальной разности $|I - \bar{I}|$ для интервала времени соответствующего отношению токов $\frac{\bar{I}}{I_0} = \frac{1}{e}$.

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{C} = \frac{\sigma_t}{t} + 3 \frac{\sigma_I}{I_0} + \frac{\sigma_R}{R}.$$

Относительная погрешность сопротивления промаркирована на сопротивлении. В этом случае среднеквадратичная погрешность

$\sigma_c = \varepsilon_c C_{cp}$, где C_{cp} – определяется из всех экспериментальных кривых как $C_{cp} = \sum \frac{\tau_i}{R_i}$, и можно записать результат в виде $C = C_{cp} \pm \sigma_c$.

Лабораторная работа 3

Изучение электронно-лучевого осциллографа

Цель работы - изучение назначения органов управления электронного осциллографа и их действия; в использовании осциллографа для измерения напряжений, частоты и временных интервалов периодических и импульсных электрических "сигналов".

Приборы и оборудование: Осциллограф С1-65А, рабочая часть экрана ЭЛТ осциллографа: по горизонтали 10 делений; по вертикали 8 делений. Основная приведенная погрешность измерения напряжений $\pm 5\%$. Основная приведенная погрешность измерения временных интервалов $\pm 5\%$. Генератор сигналов ГЗ-112/1. Основная погрешность установки частоты не превышает $\pm \left(2 + \frac{30}{f_n}\right)\%$, где f_n – установленное по шкале значение частоты в герцах.

Электронно-лучевой осциллограф является одним из наиболее распространенных приборов для визуального наблюдения электрических процессов и измерения их параметров с помощью электронно-лучевой трубки (ЭЛТ).

Обобщенная структурная схема осциллографа показана на рис.1. ЭЛТ представляет собой электронный вакуумный прибор, состоящий из электронного прожектора – устройства, формирующего узкий пучок электронов – электронный луч двух взаимно перпендикулярных пар отклоняющих пластин, между которыми проходит сфокусированный электронный луч и экрана, покрытого с внутренней стороны слоем люминофора (вещество, светящееся под воздействием электронных ударов).

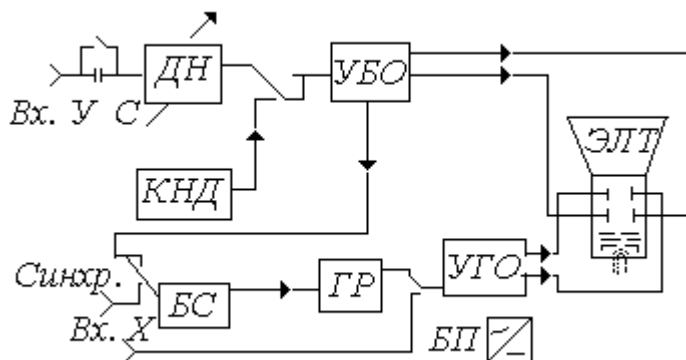


Рис.1

"Сигналом" будем называть электрическое напряжение, действующее на входе или выходе исследуемой электрической цепи. Отклонение электронного луча по вертикали происходит при воздействии исследуемого сигнала на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ. Канал вертикального отклонения состоит из делителя напряжения (ДН), уменьшающего напряжение исследуемого сигнала, и усилителя вертикального отклонения (УВО), выход которого соединен с вертикально отклоняющими пластинами ЭЛТ. Переключатель ДН проградуирован в коэффициентах отклонения от 5 мВ/дел

(для осциллографа С1-65А), что позволяет определить напряжение, как произведение числа делений шкалы ЭЛТ по вертикали на установленный коэффициент отклонения. Отклонение луча по горизонтали происходит при подаче на горизонтально отклоняющие пластины линейно нарастающего напряжения генератора развертки (ГР) или внешнего напряжения, подаваемого на гнездо "Вх.Х". Канал горизонтального отклонения состоит из блока синхронизации (БС), преобразующего внешнее исследуемое напряжение в импульсы синхронизации, генератора развертки (ГР), вырабатывающего линейно нарастающее напряжение и усилителя горизонтального отклонения (УГО), выход которого соединен с горизонтально отклоняющими пластинами ЭЛТ.

Наиболее часто осциллограф используется для получения осциллограмм, т.е. графиков зависимости исследуемых электрических сигналов от времени. При этом две пары пластин ЭЛТ отклоняют электронный луч в двух взаимно перпендикулярных направлениях, которые можно рассматривать как координатные оси. Обычно горизонтальное отклонение луча представляет собой ось времени, а вертикальное отклонение – ось мгновенных значений исследуемого сигнала. Для получения равномерной шкалы оси времени необходимо, чтобы луч смещался по горизонтали с постоянной скоростью. Для этого к горизонтально отклоняющим пластинам прикладывается линейно нарастающее напряжение, называемое напряжением развертки, которое перемещает луч по экрану трубки слева направо с постоянной скоростью ("прямой ход луча"), затем быстро возвращает его обратно налево ("обратный ход луча"), и процесс повторяется периодически. В то же время напряжение исследуемого сигнала прикладывается к вертикально отклоняющим пластинам. Таким образом, при одновременном действии двух напряжений электронный луч вычерчивает на экране трубки в некотором масштабе график зависимости исследуемого напряжения от времени – осциллограмму.

«Переключатель время задающих элементов» ГР проградуирован в коэффициентах развертки от 0,01 мкс/дел до 50 мкс/дел (для осциллографа С1-65А), что позволяет определять временной интервал как произведение числа делений шкалы ЭЛТ по горизонтали на установленный коэффициент развертки.

Устойчивость изображения осциллограмм на экране ЭЛТ достигается синхронизацией запуска генератора развертки напряжением, вырабатываемым БС.

Калибратор напряжения и длительности (КНД) представляет собой генератор импульсов прямоугольной формы частотой 1кГц и служит для установки определенных калиброванных коэффициентов отклонения и развертки, используемых при измерении напряжений и временных интервалов. Блок питания (БП) преобразует переменное напряжение сети 220 В в постоянные и переменные напряжения для питания электронных узлов осциллографа и ЭЛТ.

Порядок измерений

1. Подготовить осциллограф к работе. Ручку "яркость" на передней панели осциллографа повернуть в крайнее левое положение. Переключатель входа усилителя вертикального отклонения поставить в положение "⊥" (заземлить). Переключатель режима развертки поставить в положение "Z" (автоматический режим). Переключатель источника синхронизации поставить в положение "Внутр."
2. Включить осциллограф и генератор в сеть, дать прогреться в течение 5 мин.
3. Ручками "яркость" и "фокус" получить четкую линию развертки, а ручками "↔", "↑↓" совместить её со средней линией масштабной сетки. Для предохранения люминофора экрана ЭЛТ от прожигания не устанавливать чрезмерную яркость луча.
4. Переключатель входа усилителя Y поставить в положение " ~ ".
5. Для проведения измерений выполнить следующие операции:
 - а) переключатель режима работы генератора установить в положение " ~ " или "п";
 - б) переключатель "множитель" шкалы частот генератора поставить в положение "10³";
 - в) переключатель "ослабление дБ" поставить в положение 10, а ручку плавной регулировки выходного напряжения генератора в среднее положение;
 - г) установить некоторое значение частоты генератора.

На передней панели осциллографа:

- а) поставить переключатель коэффициентов отклонения V/дел в такое положение, чтобы амплитуда осциллограммы составляла 6-7 делений (при этом ручка "плавно" должна быть установлена в положение "V");
 - б) ручкой "уровень" получить устойчивое изображение;
 - в) установить переключатель "время/дел" в такое положение, при котором наблюдается 2-4 периода исследуемого сигнала; при этом переключатель растяжки следует установить в положение (XI), а ручка "плавно" переключателя "время/дел" должна быть установлена в положение V;
 - г) ручками "↔" и "↑↓" совместить фронт (начало) импульса с одной из вертикальных (контрольных) линий шкалы в левой части экрана ЭЛТ.
6. Определить расстояние в делениях шкалы между контрольной горизонтальной линией, соответствующей нулевому значению входного сигнала, и точкой на линии максимального значения сигнала. Измеренное амплитудное значение входного напряжения равно:

$$U = KN,$$




где K - положение переключателя коэффициента отклонения, а N - измеренное расстояние в делениях шкалы ЭЛТ.

7. Для определения временного интервала T измерить горизонтальное расстояние от вертикальной контрольной линии, соответствующей началу импульса, вправо до заданной точки. Длительность интервала времени равна: $T = Cd$, где C - положение переключателя скорости развертки "время/дел";

d - измеренное расстояние в делениях шкалы ЭЛТ. Измерить периоды исследуемых сигналов. Частоту сигнала можно определить по формуле $\nu = \frac{1}{T}$.

8. Оценить погрешность измерений напряжения и временных интервалов.

Другим методом измерения частоты периодического сигнала является сравнение неизвестной частоты с эталонной частотой по фигуре Лиссажу. В этом случае на вход УВО подайте сигнал, частоту которого необходимо измерить. Установите

→ переключатель **X1**; **X0,1**; →  **X** в положение →  **X**; переключатель Внутр; сеть; Внешн. 1:1; 1:10 – в положение Внешн. 1:1; переключатель **Z**, **Ž** - в положение **Z**. Подайте на гнездо внешнего входа синхронизации →  **X** сигнал от генератора образцовой частоты.

Под влиянием двух переменных взаимно перпендикулярных напряжений электронный луч будет описывать фигуры Лиссажу, вид которых зависит от формы и амплитуды напряжений, а также от соотношения между частотами и фазами напряжений. Фигуры Лиссажу будут неподвижными, если частоты сигналов относятся как целые числа. Так как электронный луч под действием напряжений U_y и U_x дважды за период колебаний пересекает соответственную горизонтальную и вертикальную оси, то отношение частот можно определить по числу точек касания фигуры с горизонталью и вертикалью.

Контрольные вопросы

1. Принцип действия электронно-лучевой трубки.
2. Что называется осциллограммой?
3. Что называется временной разверткой?
4. Объяснить метод получения временной развертки в электронном осциллографе.
5. Объяснить метод получения фигур Лиссажу.

Лабораторная работа 4

Изучение затухающих колебаний в колебательном контуре

Цель работы – изучение колебаний в колебательном контуре в зависимости от активного сопротивления контура и расчет параметров колебательного контура.

Приборы и принадлежности:

генератор сигналов ГЗ-112, осциллограф С1-96, измерительный модуль.

Колебательный контур состоит из последовательно соединенных конденсатора **C**, катушки индуктивности **L** и активного сопротивления **R** (рис. 1).

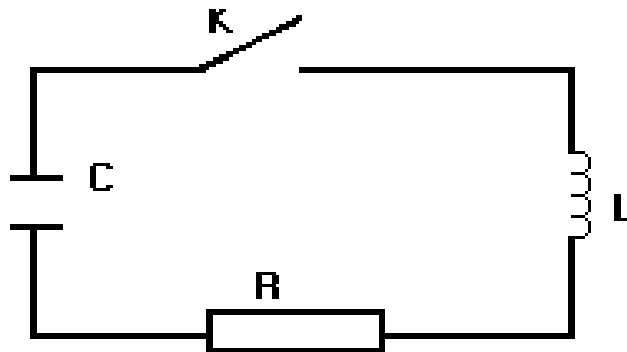


Рис.1

Предполагается, что рассматриваемая электрическая цепь представляет собой линейную систему с постоянными параметрами **L**, **C**, **R**, удовлетворяющую условию квазистационарности, т.е. когда значение тока **I** в данный момент времени одинаково во всех элементах цепи.

Если конденсатору **C** сообщить заряд **q₀**, а затем замкнуть ключ **K**, то в цепи появится ток. Для данного момента времени **t** заряд конденсатора **q**, напряжение на его пластинах **U** и ток в цепи **I** связаны между собой соотношениями:

$$q = CU, \quad I = \frac{dq}{dt} = C \frac{dU}{dt}. \quad (1)$$

Согласно второму правилу Кирхгофа

$$IR + U = \mathcal{E}_C, \quad (2)$$

где $\mathcal{E}_C = -L \frac{dI}{dt}$ – ЭДС самоиндукции в катушке **L**. Подставляя выражения **I** и \mathcal{E}_C в (2), получим:

$$LC \frac{d^2U}{dt^2} + RC \frac{dU}{dt} + U = 0. \quad (3)$$

Это уравнение можно представить в виде:

$$\frac{d^2U}{dt^2} + 2\beta \frac{dU}{dt} + \omega_0^2 U = 0, \quad (4)$$

где введены обозначения $2\beta = \frac{R}{L}$, $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$.

Уравнение (4) представляет собой дифференциальное уравнение затухающих колебаний в контуре. Можно сказать, что при не слишком большом сопротивлении R , когда $\beta < \omega_0$ или $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, решением уравнения (4) является функция

$$U(t) = U_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi) = U_m(t) \cos(\omega t + \varphi), \quad (5)$$

которая описывает затухающие колебания напряжения на конденсаторе контура. В уравнении (5) $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$ - частота затухающих колебаний; $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ - частота собственных колебаний идеального контура при $R=0$; $\beta = \frac{R}{2L}$ - коэффициент затухания; $U_m(t) = U_0 e^{-\beta t}$ - амплитуда колебаний в момент времени t . Постоянные величины U_0 и φ определяются из начальных условий. Период затухающих колебаний

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}. \quad (6)$$

На рис.2 показана зависимость заряда $q(t)$ и напряжения $U(t)$ на конденсаторе колебательного контура от времени.

Характеристикой затухания колебаний в контуре является логарифмический декремент затухания λ , который определяется как логарифм отношения двух любых последовательных амплитуд, отстоящих друг от друга по времени на период T :

$$\lambda = \ln \frac{U_0 e^{-\beta t}}{U_0 e^{-\beta(t+T)}} = \ln e^{\beta T} = \beta T. \quad (7)$$

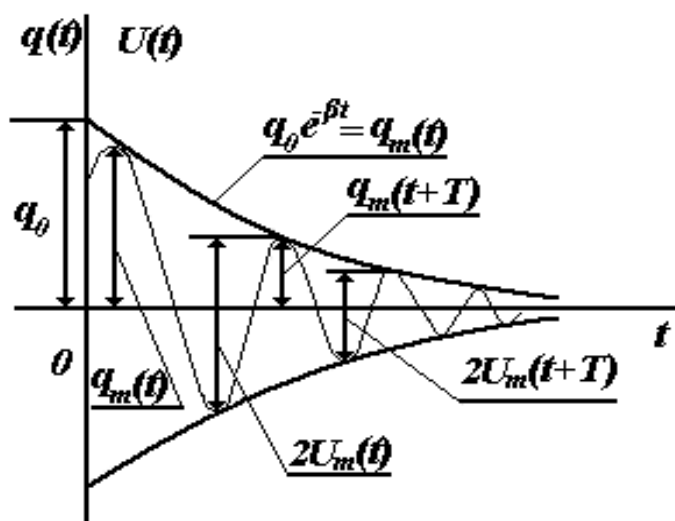


Рис. 2

Если амплитуда колебаний $U_m(t) = U_0 e^{-\beta t} = U_0 e^{-\frac{\lambda}{T}t}$ за время τ уменьшается в e раз, то

$$\frac{U_m(t)}{U_m(t+\tau)} = e^{\frac{\lambda}{T}\tau} = e, \quad \lambda \frac{\tau}{T} = \lambda n = 1, \quad \lambda = \frac{1}{n}, \quad (8)$$

где $n = \frac{\tau}{T}$ - число колебаний за время τ . Следовательно, логарифмический декремент обратен по величине числу колебаний n , совершаемых за время, когда амплитуда уменьшается в e раз.

Подставляя в (7), для случая слабого затухания ($\beta \ll \omega_0$), значения

$\beta = \frac{R}{2L}$ и $T \approx T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$, найдем для λ выражение:

$$\lambda = \pi R \sqrt{\frac{L}{C}} = \pi \frac{R}{\rho}, \quad (9)$$

где величина $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ имеет размерность "сопротивления" – и называется "характеристическим сопротивлением" контура.

Колебательный контур часто характеризуется добротностью

$$Q = \frac{\pi}{\lambda} = \frac{\rho}{R} = \pi n.$$

Добротность контура определяет относительную убыль энергии в процессе колебаний :

$$Q = 2\pi \frac{W}{\Delta W}, \quad (10)$$

где W – полный запас энергии в контуре; ΔW – уменьшение энергии за один период колебаний.

Если активное сопротивление R контура велико, $\beta \geq \omega_0$ или $\frac{R^2}{4L} \geq \frac{1}{LC}$, то процесс разрядки конденсатора имеет аperiодический характер (колебания отсутствуют). Сопротивление R , при котором колебательный процесс переходит в аperiодический, называется критическим. Критическое сопротивление $R_{кр}$ определяется из условия

$$\frac{R_{кр}^2}{4L} = \frac{1}{LC}, \quad R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}} = 2\rho. \quad (11)$$

Описание лабораторной установки

Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рис. 3.

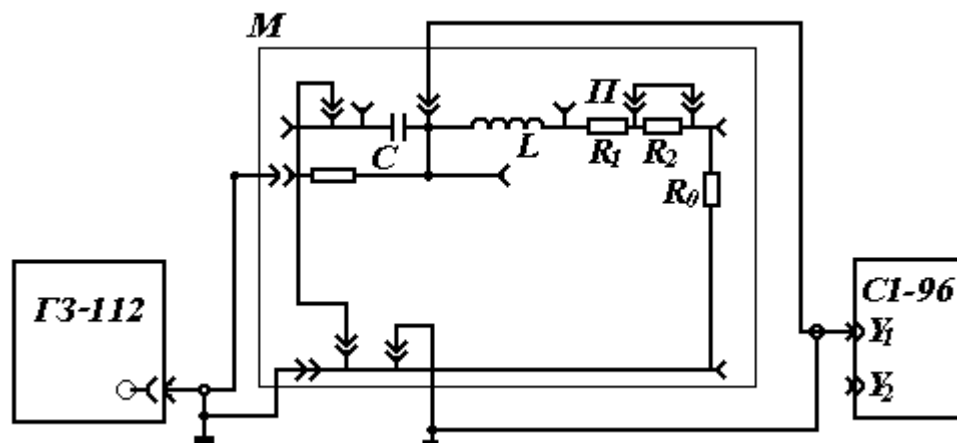


Рис.3

Источником импульсов для периодического возбуждения колебаний в контуре служит генератор ГЗ-112. Элементы исследуемого колебательного контура собраны в кассете М. Напряжение с конденсатора С контура подается на вход канала Y_1 электронного осциллографа С1-96. Сопротивление в цепи колебательного контура $R = R_0 + R_L + R_{\Pi} + R_{\text{ген}}$,

где R_L – сопротивление катушки; R_{Π} – сопротивление, которое можно изменять с помощью переключки П, $R_{\text{ген}} = 50 \text{ Ом}$ - сопротивление генератора.

Рабочая часть экрана электронно-лучевой трубки осциллографа: по горизонтали 10 делений, по вертикали 8 делений. Основная приведенная погрешность измерения напряжения $\pm 4 \%$. Основная приведенная погрешность измерения временных интервалов $\pm 5 \%$.

Сопротивления R_0 , R_L , а также значения переменного сопротивления R_{Π} указаны на установке.

Порядок измерений

1. Соберите электрическую цепь измерительной установки согласно рис.3; включите генератор и осциллограф в сеть, соблюдая меры техники безопасности, и дайте им прогреться в течение 5-7 минут.
2. Изменяя частоту следования возбуждающих импульсов генератора, установив коэффициент отклонения канала Y_1 (переключателем "В/дел") и коэффициент развертки осциллографа, добейтесь устойчивого изображения затухающих колебаний (5-7 периодов) на экране осциллографа с максимальной амплитудой 7-8 делений.
3. Измерьте по осциллограмме длительность периода колебаний T .
4. Замкните сопротивления R_1 и R_2 переключкой П ($R_{\Pi}=0$) и проведите измерение размахов напряжения, т.е. удвоенных амплитуд ($2U_m$)(рис.2) в делениях шкалы экрана осциллографа для моментов времени t и $(t + T)$, где T - период колебаний.
5. Вычислите логарифмический декремент затухания по формуле:

$$\lambda = \ln \frac{2U_m(t)}{2U_m(t+T)}.$$

6. Повторите пп. 4-5 с каждым сопротивлением R_1 и R_2 и их последовательным соединением ($R_1 + R_2$).

Результаты занесите в табл.1

Таблица 1

$R_{\Pi}, \text{кОм}$	$2U_m(t), \text{дел}$	$2U_m(t+T), \text{дел}$	λ	$Q = \frac{\pi}{\lambda}$
0				
1				
2				
3				

7. Постройте график зависимости логарифмического декремента λ от сопротивления R и, экстраполируя прямую $\lambda = \lambda(R)$ до пересечения с осью R , определите полное сопротивление контура ($R_L + R_0 + R_{ген}$) рис.4.

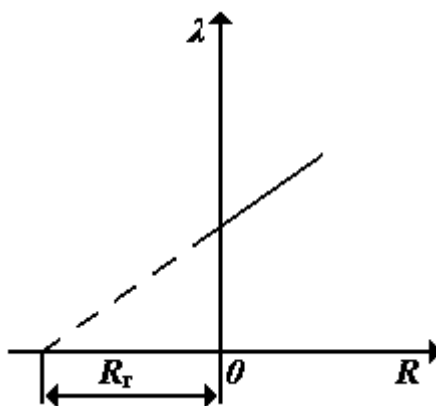


Рис.4

8. Используя график зависимости $\lambda = \lambda(R)$, найдите угловой коэффициент K наклона прямой.

9. Оцените индуктивность катушки контура по формуле $L = \frac{T}{2K}$, где T - период колебаний, измеренный в п.3.

10. Вычислите погрешность измерений логарифмического декремента затухания $\Delta\lambda$ по формуле: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_{m1}}{U_{m1}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_{m2}}{U_{m2}}\right)^2}$, а также погрешность измерения периода колебаний ΔT .

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте правила Кирхгофа. Объясните, как получено дифференциальное уравнение (4).
2. Дайте определения коэффициента затухания, логарифмического декремента и добротности колебательного контура.
3. Что представляет собой критическое сопротивление колебательного контура?
4. Что называется характеристическим сопротивлением колебательного контура?

Приложение.

Инструкция по подготовке установки для лабораторной работы 4 Изучение затухающих колебаний в колебательном контуре

1. Состав установки

- 1.1 Панель монтажная с элементами RLC и гнездами для подключения кабелей и установки перемычек.
- 1.2. Осциллограф универсальный двулучевой (ОСУ-20).
- 1.3. Генератор низкочастотный ГЗ-112/1.

2. Подготовка приборов для работы

- 2.1. Подготовка осциллографа (рис.1).

2.1.1. Осциллограф должен быть отключен от сети, кнопка **POWER(1)** – **отжата**.

2.1.2. Переключатели входов **CH1(2)** и **CH2(3)** поставить в положение **GND**.

2.1.3. Ручки **POSITION** \updownarrow (4,5) **POSITION** \leftrightarrow (6) установить в **среднее положение**.

2.1.4. Ручку яркости **INTEN(7)** - в **правое крайнее положение**.

2.1.5. Ручку **FOCUS(8)** – в **правое крайнее положение**.

2.1.6. Ручку усиления **Volt/div(9)** первого канала – в **положение «1»**.

2.1.7. Центральные маленькие ручки (10,12) – в **правое крайнее положение**.

2.1.8. Ручку усиление **Volt/div (11)** второго канала – в **положение «5»**.

2.1.9. Переключатель рода развертки **MODE(13)** в положение **AUTO**.

2.1.10. Переключатель источника синхронизации **TRIGGER SOURCE(14)** – в положение **CH1**.

2.1.1.1. Переключатель времени развертки **Time/div (15)** установить в положение **0,5 ms – 0,1 ms**.

2.1.1.2. Переключатель лучей **MODE(16)** – в положение **CH1**.

- 2.2. Подготовка генератора (рис.2)

2.2.1. Генератор должен быть отключен от сети. Тумблер **СЕТЬ(1)** - в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**.

2.2.2. Ручка **МНОЖИТЕЛЬ(2)** - в положение «1» или «10».

2.2.3. Переключатель формы входного сигнала(3) – в положение 


2.2.4. Переключатель **ОСЛАБЛЕНИЕ(4)** – в положение «0» или «10».

2.2.5. Ручка регулировки входного сигнала(5) – в **среднем положении**.

3. Соединение панели монтажной (рис.3) с приборами

3.1. Соединить кабелем гнездо осциллографа **CH1(17)** с гнездами панели \perp (5) и **У2-1(9)**.

3.2. Замкнуть перемычкой(8) гнезда \perp (1) и (3).

3.3. Соединить кабелем гнездо выхода генератора(6) с гнездами панели \perp (1) и (2) 

3.4. Замкнуть резисторы(6) перемычкой(7).

4. Включение установки

4.1. Вставить вилки приборов в сетевые розетки и включить соответствующие сетевые выключатели осциллографа и генератора и прогреть их в течении 2-3 минут.

4.2. Положение появившейся на экране осциллографа линии развертки откорректировать ручками **POSITION**(4,6).

4.3. Перевести переключатель **CH1**(2) в положение **AC**.

4.4. Плавно вращая ручки изменения **частоты** (7), добиться изображения затухающих колебаний (пример на рис.5).

4.5. Устойчивости и качества изображения добиваться **ручками** (15 и 18) осциллографа и **ручками** (4,5,7) генератора.

4.6. Изменять коэффициент затухания перестановкой **перемычки** (7) на панели.

4.7. Перейти к измерениям.

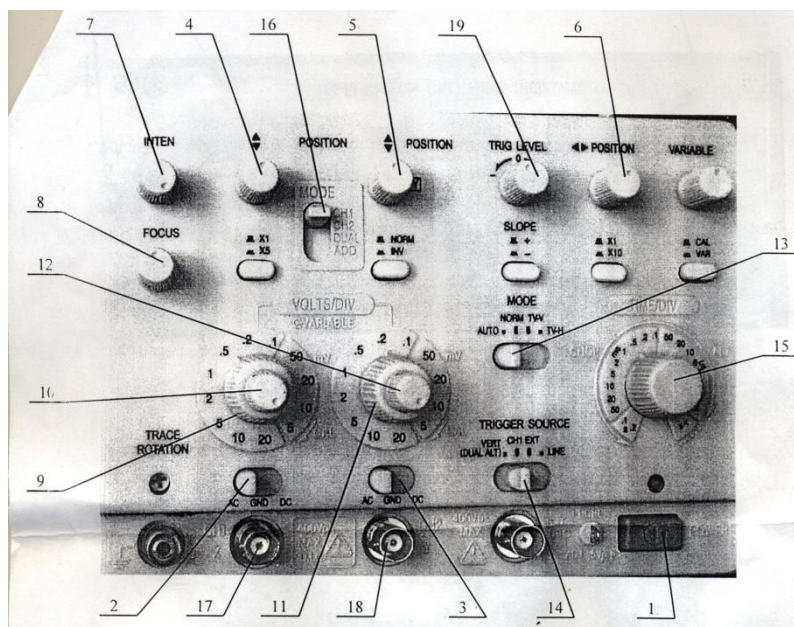


Рис. 1. Панель управления осциллографа ОСУ-20

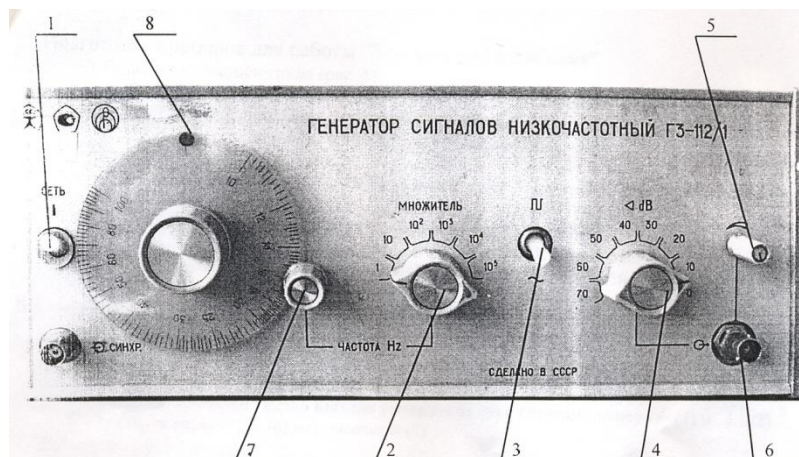


Рис. 2. Генератор ГЗ-112/1

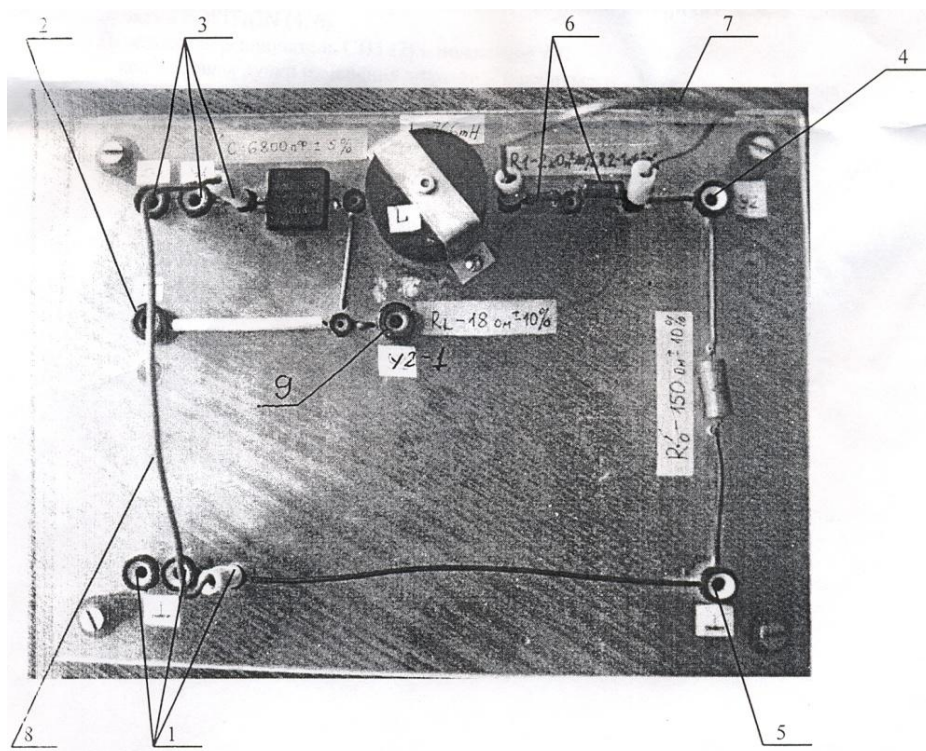


Рис. 3. Панель монтажная

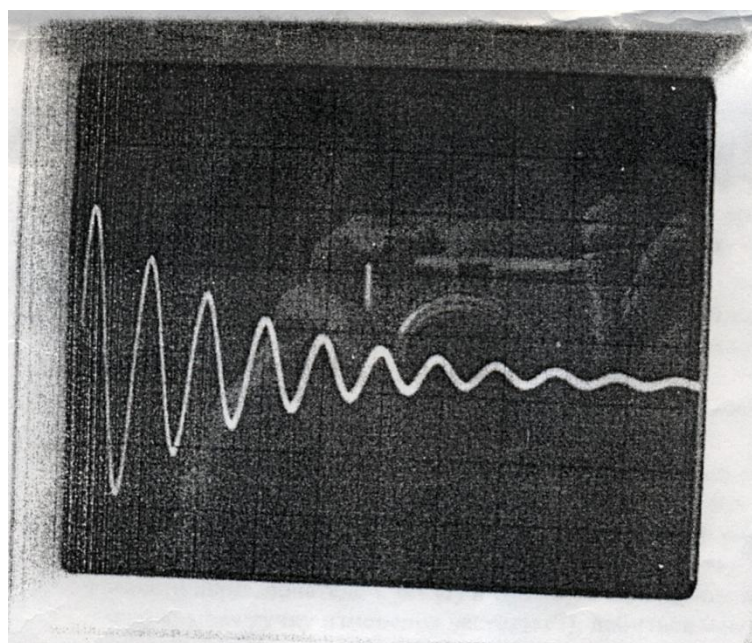


Рис. 4. Пример осциллограммы затухающих колебаний

Лабораторная работа 5

Изучение вынужденных колебаний в колебательном контуре

Целью работы является изучение резонансных явлений в последовательном электрическом колебательном контуре и определение его параметров.

Приборы и принадлежности:

генератор сигналов ГЗ-112, осциллограф С1-96, измерительный модуль.

Рассмотрим процессы, протекающие в колебательном контуре (рис.1), состоящем из последовательно соединенных катушки индуктивности L , конденсатора C , резистора R и источника ЭДС ε .

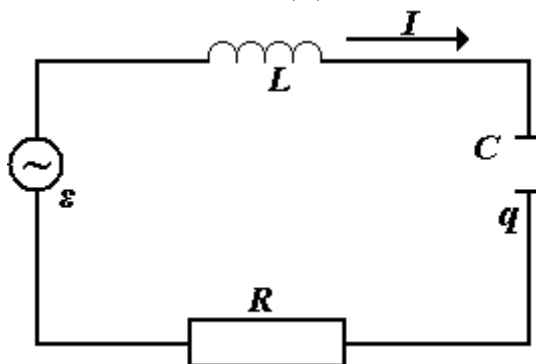


Рис.1

Пусть ЭДС источника ε изменяется со временем t по гармоническому закону:

$$\varepsilon = \varepsilon_m \cos \omega t,$$

где ε_m амплитуда ЭДС; ω - циклическая частота.

Будем полагать, что процессы в цепи удовлетворяют условию квазистационарности. Тогда для мгновенных значений токов и напряжений справедливы все законы, установленные для постоянного тока. По закону Ома для цепи, представленной на рис.1, можно записать:

$$U_C + U_R = \varepsilon + \varepsilon_L, \quad (1)$$

где $U_C = \frac{q}{C}$ - напряжение на конденсаторе; $U_R = IR$ - напряжение на сопротивлении R ; $\varepsilon_L = -L \frac{dI}{dt}$ - ЭДС самоиндукции в катушке индуктивности L ; I, q, ε - мгновенные значения тока, заряда и ЭДС источника $I = \frac{dq}{dt}$.

Подставляя выражения для U_C , U_R , ε_L и I в уравнение (1) получим для заряда конденсатора q неоднородное линейное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = \varepsilon_m \cos \omega t. \quad (2)$$

Уравнение (2) можно представить в виде

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \frac{\varepsilon_m}{L} \cos \omega t, \quad (3)$$

где $2\beta = \frac{R}{L}$, $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$.

Дифференциальное уравнение (3) позволяет установить зависимость заряда $q(t)$ конденсатора C от времени. Его решение равно сумме решения однородного дифференциального уравнения и частного решения неоднородного уравнения (3). Решение однородного дифференциального уравнения:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0,$$

имеет вид $q_1(t) = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega_1 t + \varphi_0)$ и определяет затухающие колебания в контуре. Затухание колебаний зависит от множителя $e^{-\beta t}$, где β – коэффициент затухания, а q_0 и φ_0 определяются начальными условиями. При $t \gg \frac{1}{\beta}$ установившиеся колебания в контуре описываются частным решением уравнения (3):

$$q(t) = q_m \cos(\omega t - \varphi). \quad (4)$$

Амплитуду q_m и разность φ фаз можно определить из формул

$$q_m = \frac{\varepsilon_m}{L} \frac{1}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}, \quad (5)$$

$$tq\varphi = \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad (6)$$

В настоящей лабораторной работе найдём ток в колебательном контуре. Из уравнений (4), (5) и (6) можно получить выражение для тока $I = \frac{dq}{dt}$:

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi_1), \quad (7)$$

где I_m – амплитуда тока; φ_1 – разность фаз между током и ЭДС ε генератора,

$$I_m = \varepsilon_m \frac{1}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (8)$$

$$tq\varphi_1 = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (9)$$

Уравнение (7) описывает установившиеся стационарные вынужденные колебания тока в колебательном контуре. Из выражений (7) и (9) следует, что ток отстает по фазе от ЭДС ε в том случае, когда $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ ($\varphi_1 > 0$) и опережает ЭДС, когда $\omega L < \frac{1}{\omega C}$ ($\varphi_1 < 0$).

Амплитуда вынужденных колебаний тока I_m , как следует из выражения (8), зависит от соотношения частоты источника ЭДС ω и собственной частоты контура $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$. Зависимость амплитуды установившихся колебаний от частоты внешнего напряжения носит название резонансной кривой. На рис.2 изображена резонансная кривая для силы тока.

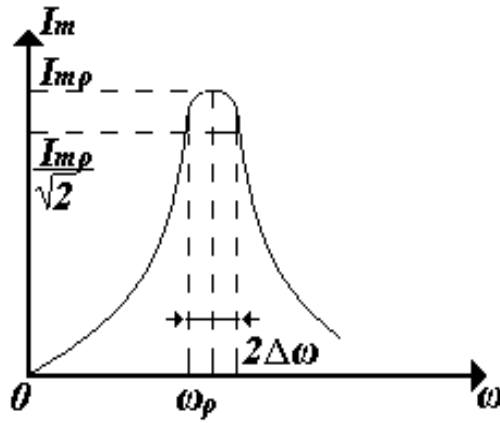


Рис.2

Из графика на рис.2 видно, что при приближении частоты вынужденных колебаний ω к собственной частоте контура ω_0 амплитуда тока резко увеличивается. Это явление называется резонансом. Частота, при которой амплитуда вынужденных колебаний достигает максимального резонансного значения, называется резонансной. Из формулы (8) следует, что резонансное значение амплитуды силы тока $I_{mp} = \frac{\varepsilon_m}{R}$ и достигается при частоте внешнего напряжения ω равной резонансной $\omega_p = \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$.

Определим ширину резонансной кривой $2\Delta\omega$ (рис.2), на уровне соответствующем току $\frac{I_{mp}}{\sqrt{2}}$ (ее называют полосой пропускания контура).

Из формулы (8) найдем

$$I_m = \varepsilon_m = \frac{1}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{I_{mp}}{\sqrt{2}} = \varepsilon_m \frac{1}{R\sqrt{2}}. \quad (10)$$

Равенство (10) выполняется, если $\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = R$. Рассмотрим частоты ω , близкие к ω_0 , т.е. $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$. В этом случае

$$(\omega_0 + \Delta\omega)L - \frac{1}{C(\omega_0 + \Delta\omega)} = R, \quad (11)$$

или

$$\omega_0 L \left[\left(1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right) - \frac{1}{C\omega_0 \left(1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)} \right] = R.$$

Ограничиваясь точностью первой степени отношения $\frac{\Delta\omega}{\omega_0}$, соотношение (11) можно представить в виде:

$$\omega_0 L \left(1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_0} - \frac{1}{1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_0}} \right) \approx \omega_0 L \left(\frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \right) = R. \quad (12)$$

Из уравнения (12) получим ширину $(2\Delta\omega)$ резонансной кривой

$$2\Delta\omega = \frac{R\omega_0}{\omega_0 L} = \frac{\omega_0}{Q}, \quad (13)$$

где $Q = \omega_0 \frac{L}{R}$ - добротность колебательного контура, которая определяется из ширины резонансной кривой.

Из формулы (13) определим добротность Q колебательного контура

$$Q = \frac{\omega_0}{2\Delta\omega} = \frac{\nu_0}{2\Delta\nu}, \quad (14)$$

где $\nu_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$ и $2\Delta\omega = \frac{2\Delta\varphi}{2\pi}$. Таким образом, исследование резонансных кривых колебательного контура может быть использовано для определения его параметров, что находит применение в измерительной технике.

Описание лабораторной установки

Принципиальная схема измерительной установки показана на рис.3.

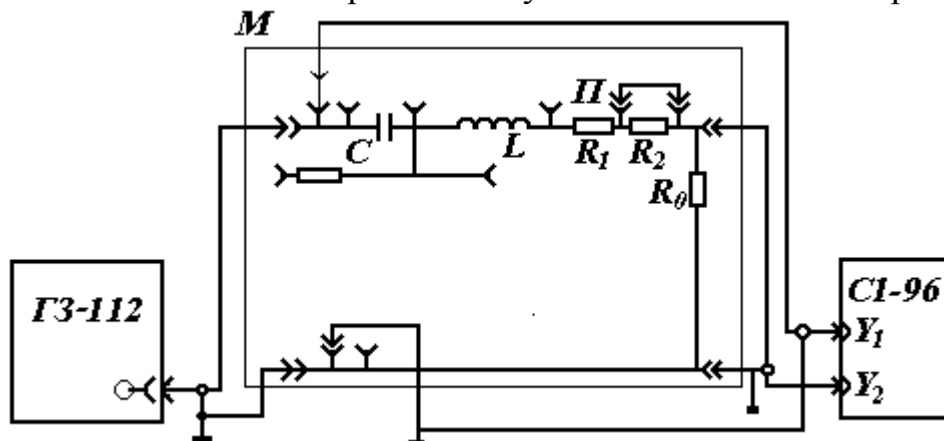


Рис.3

Элементы исследуемого колебательного контура смонтированы в каскаде М. Источником ЭДС служит генератор ГЗ-112, выходное напряжение и частоту которого можно изменять в широких пределах. Амплитуда напряжения, приложенного к контуру (выходное напряжение генератора), а также амплитуда напряжения на резисторе R_0 , прямо пропорциональная току, текущему в контуре, измеряются с помощью двухлучевого осциллографа С1-96. Напряжение с входа колебательного контура подается в канал Y_1 , а напряжение с резистора R_0 - в канал Y_2 . Полное активное сопротивление цепи колебательного контура: $R_K = R_L + R_0 + R_{\Gamma} + R_{\Pi}$, где R_L – сопротивление катушки контура; $R_{\Gamma} = 50$ Ом – выходное сопротивление генератора, R_{Π} – сопротивление резистора, включенного с помощью переключки П.

Рабочая часть экрана ЭЛТ осциллографа С1-96 для луча составляет: по горизонтали 10 делений, по вертикали 8 делений. Основная приведенная погрешность измерения напряжения не превышает $\pm 4\%$. Основная приведенная погрешность измерения временных интервалов не превышает $\pm 5\%$. Основная погрешность установки частоты по шкале генератора ГЗ-112/1 не превышает $\pm \left(2 + \frac{30}{\nu_n}\right)\%$, где ν_n - установленное по шкале значение частоты в герцах.

Порядок измерений

1. Соберите схему измерительной установки согласно рис.3.
2. По данным параметрам колебательного контура индуктивности L и емкости конденсатора C рассчитайте его собственную частоту $\nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$,

($\omega_0 = 2\pi\nu_0$). Индуктивность колебательного контура L , его емкость C , а также сопротивления R_0 , R_L и R_T указаны на установке.

3. Подготовьте генератор и осциллограф к работе. Установите тумблер выбора режима работы генератора в положение "~". Используя результаты расчета частоты колебательного контура ν_0 , переключателем "множитель" установите необходимый диапазон частот генератора. Ручку регулировки выходного напряжения поставьте в среднее положение, "ослабление дБ" – в положение "0".

Внимание! Во избежание выхода из строя электро-лучевой трубки (ЭЛТ) осциллографа перед включением его в сеть установите ручку яркость "☀" в крайнее против хода часовой стрелки положение, соответствующие минимальной яркости лучей. Переключатель режима развертки "АВТ" (автоколебательный режим). Ручку растяжки развертки в положение "X1" (нажата). Включите генератор и осциллограф в сеть и дайте прогреться 5-7 мин.

4. Ручками яркость "☀", фокусировка "⊗" добейтесь оптимальной яркости и фокусировки лучей, ручками "↑" "↔" установите изображение сигналов в средней части экрана ЭЛТ.

5. Нажатием кнопки " Y_1 " включите внутреннюю синхронизацию и ручкой "уровень", а также ручкой переключателя длительности развертки "Время/дел." получите на экране ЭЛТ две четкие и устойчивые осциллограммы: осциллограмма канала Y_1 представляет собой напряжение на входе колебательного контура, осциллограмма канала Y_2 – напряжение на резисторе R_0 .

6. С помощью переключателей коэффициентов отклонения "Время/дел." Каналов Y_1 и Y_2 осциллографа и ручкой плавной регулировки выходного напряжения генератора установите величину изображения сигналов на экране при резонансе не более 8 дел. **Внимание!** Значения коэффициентов отклонения усилителей каналов Y_1 и Y_2 , обозначенные на передней панели осциллографа, верны лишь при крайнем правом положении ручек "Усил. Плавно".

7. Изменяя частоту генератора, измерьте амплитуду напряжения U_m на резисторе R_0 ($U_m = I_m R_0$) (канал Y_2). Отсчеты следует производить через 100 Гц (сделайте 10-15 измерений). **Указание.** Для определения амплитуды измерьте в делениях шкалы размах переменного напряжения (размах равен удвоенному значению амплитуды) $U_m = 2U_m(t)$ и умножьте это расстояние на показания переключателя коэффициента отклонения "Вольт/дел."

8. Снимите резонансные кривые при различных значениях сопротивления резистора R_n и результаты измерений (не менее 15 измерений для каждого сопротивления) занесите в табл.1.

Таблица 1

№	$\nu, \Gamma_{\text{ц}}$	$R_{\text{п}} = 0 \text{ Ом}$		$R_{\text{п}} = 1 \text{ кОм}$		$R_{\text{п}} = 3 \text{ кОм}$	
		$2U_{\text{м}}$	$U_{\text{м}}$	$2U_{\text{м}}$	$U_{\text{м}}$	$2U_{\text{м}}$	$U_{\text{м}}$
1							
2							
3							
4							
и							
т.д							

10. По результатам измерений постройте на одном чертеже графики резонансных кривых, откладывая по оси абсцисс частоту генератора ν , а по оси ординат не $U_{\text{м}}$, а отношение $U_{\text{м}}$ к $U_{\text{мп}}$ (т.е. к $U_{\text{м}}$ при резонансе).

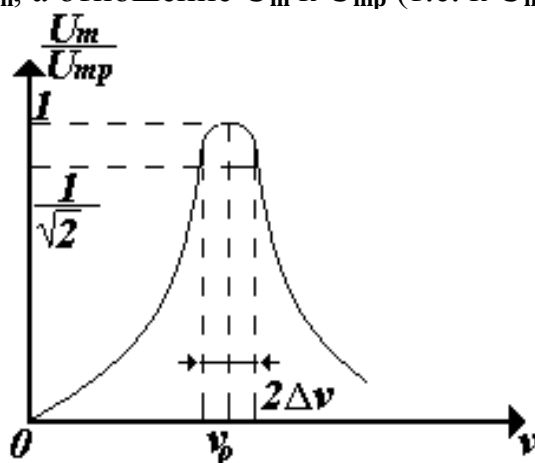


Рис. 3.

11. Используя графики резонансных кривых, рассчитайте добротность колебательного контура по формуле: $Q = \frac{\nu_p}{2\Delta\nu}$, где $2\Delta\nu$ — ширина резонансной кривой на высоте $\frac{I_{\text{мп}}}{\sqrt{2}}$, ν_p — резонансная частота при $R_{\text{п}} = 0$.
12. Найденные значения добротности и резонансной частоты контура сопоставьте с результатами расчета по формулам:

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R_K} = \frac{1}{R_K} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{и} \quad \nu_{\text{рез}} = \nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad \text{где } L — \text{индуктивность катушки; } C — \text{емкость конденсатора, а } R_K = R_L + R_0 + R_{\Gamma} + R_{\text{п}} — \text{полное сопротивление колебательного контура.}$$

Разность фаз φ_1 определяется уравнением:

$$\tan \varphi_1 = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (9)$$

Измерение угла сдвига фаз φ_1 можно выполнить по относительному расположению осциллограмм напряжения на экране осциллографа:

1. Установите с помощью переключателя "Время/дел." такую скорость развертки, чтобы наблюдались 1 – 2 периода исследуемых сигналов (при

этом кнопка переключателя растяжки изображения должна находиться в положении **X1**).

2. Ручкой "Уровень" получите устойчивое изображение сигналов, а ручками центровки " \updownarrow " " \leftrightarrow " каналов Y_1 и Y_2 совместите временные оси осциллограммы.

3. Разность фаз сигналов в радианах можно определить по формуле

$$\varphi_1 = 2\pi \frac{a}{A}, \quad (15)$$

где a и A измеряются в делениях временной шкалы осциллографа, как показано на рис.4.

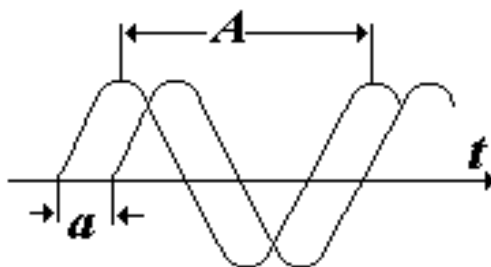


Рис. 4.

4. Рассчитайте погрешность измерений.

Контрольные вопросы

1. Какие процессы в колебательном контуре и при каком условии называются квазистационарными?
2. Какой вид имеет частное решение дифференциального уравнения (3)?
3. Что называется резонансом? Получите из выражения (8) резонансное значение амплитуды силы тока и резонансную частоту.
4. Что называется резонансной кривой?
5. Что называется добротностью колебательного контура? Получите выражение для добротности колебательного контура $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$.

Инструкция по подготовке установки для лабораторной работы 5 Изучение вынужденных колебаний в колебательном контуре

1. Состав установки

- 1.1 Панель монтажная с элементами RLC и гнездами для подключения кабелей и установки перемычек.
- 1.2. Осциллограф универсальный двулучевой (ОСУ-20).
- 1.3. Генератор низкочастотный ГЗ-112/1.

2. Подготовка приборов для работы

- 2.1. Подготовка осциллографа (рис.1).

2.1.1. Осциллограф должен быть отключен от сети, кнопка **POWER(1)** – отжата.

2.1.2. Переключатели входов **CH1(2)** и **CH2(3)** поставить в положение **GND**.

2.1.3. Ручки **POSITION** \updownarrow (4,5) **POSITION** \leftrightarrow (6) установить в среднее положение.

2.1.4. Ручку яркости **INTEN(7)** - в правое крайнее положение.

2.1.5. Ручку **FOCUS(8)** – в правое крайнее положение.

2.1.6. Ручку усиления **Volt/div(9)** первого канала – в положение «1».

2.1.7. Центральные маленькие ручки (10,12) – в правое крайнее положение.

2.1.8. Ручку усиление **Volt/div (11)** второго канала – в положение «5».

2.1.9. Переключатель рода развертки **MODE(13)** в положение **AUTO**.

2.1.10. Переключатель источника синхронизации **TRIGGER SOURCE(14)** – в положение **CH1**.

2.1.11. Переключатель времени развертки **Time/div(15)** – в положение **2ms**.

2.1.12. Переключатель лучей **Mode(16)** - в положение **DUAL**.

- 2.2. Подготовка генератора (рис.2) для лабораторной работы.

2.2.1. Генератор должен быть отключен от сети. Тумблер **СЕТЬ(1)** – в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**.

2.2.2. Ручка **МНОЖИТЕЛЬ(2)** - в положение **10²**.

2.2.3. Переключатель формы выходного сигнала(3) - в положение «~».

2.2.4. Переключатель **ОСЛАБЛЕНИЕ(4)** – в положение «0».

2.2.5. Ручку регулировки выходного сигнала(5) – в среднее положение.

3. Соединение панели монтажной с приборами для работы

3.1. Соединить кабелем гнездо осциллографа **CH1(17)** с гнездами панели \perp (1) и (3).

3.2. Соединить кабелем гнездо осциллографа **CH2(18)** с гнездами панели \perp (5) и (4).

3.3. Замкнуть резисторы (6) перемычкой.

3.4. Соединить кабелем гнездо выхода генератора(6) с гнездами платы \perp (1) и (3).

4. Включение установки

4.1. Вставить вилки приборов в сетевые розетки и включить соответствующие сетевые выключатели осциллографа и генератора и прогреть их в течение 2-3 минут.

4.2. Положение появившихся на экране осциллографа линий развертки откорректировать ручками **POSITION(4,5,6)**.

4.3. Перевести переключатели **CH1(2) и CH2(3)** в положение **AC**.

4.4. Плавно вращая ручку изменения **частоты (7)**, добиться максимума вынужденных колебаний по второму каналу (пример на рис.4).

4.5. Синхронизировать изображение ручкой **TRIG LEVEL(19)**.

4.6. Изменять добротность контура различным замыканием **резисторов (6)** панели.

4.7. Амплитуду колебаний регулировать **ручкой (5)** генератора, а длительность - ручкой **Time/div** осциллографа.

4.8. Перейти к измерениям.

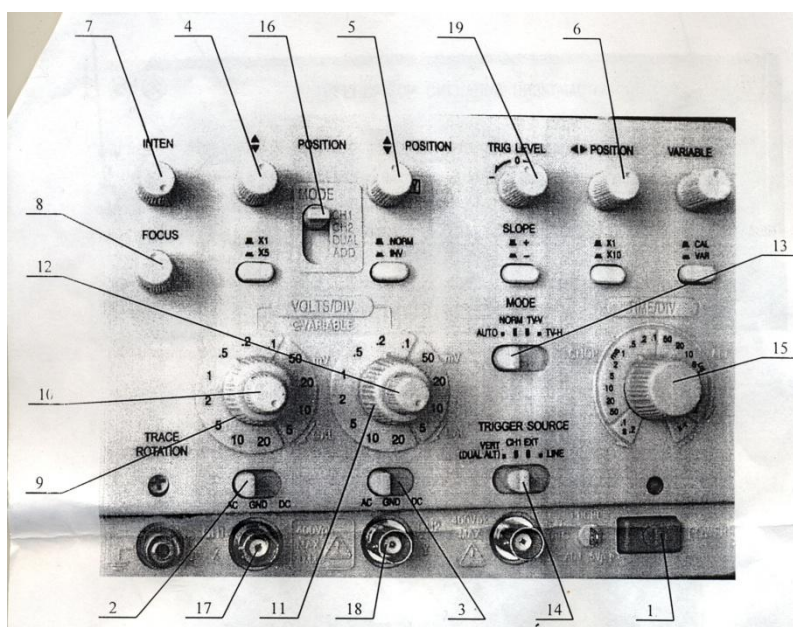


Рис. 1. Панель управления осциллографа ОСУ-20

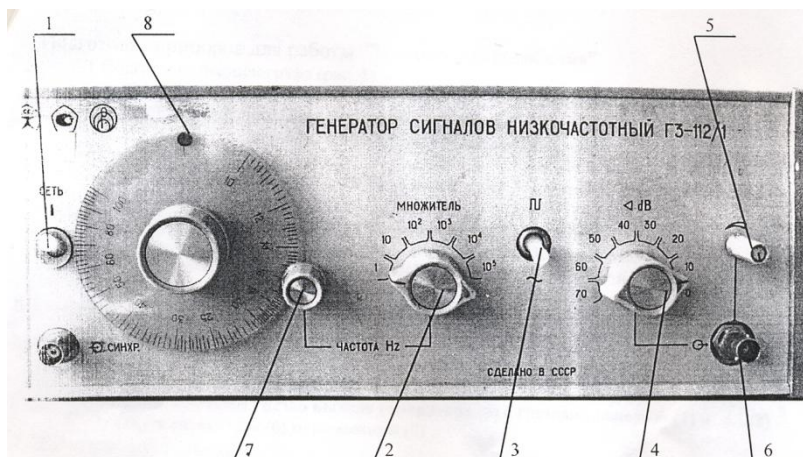


Рис. 2. Генератор ГЗ-112/1

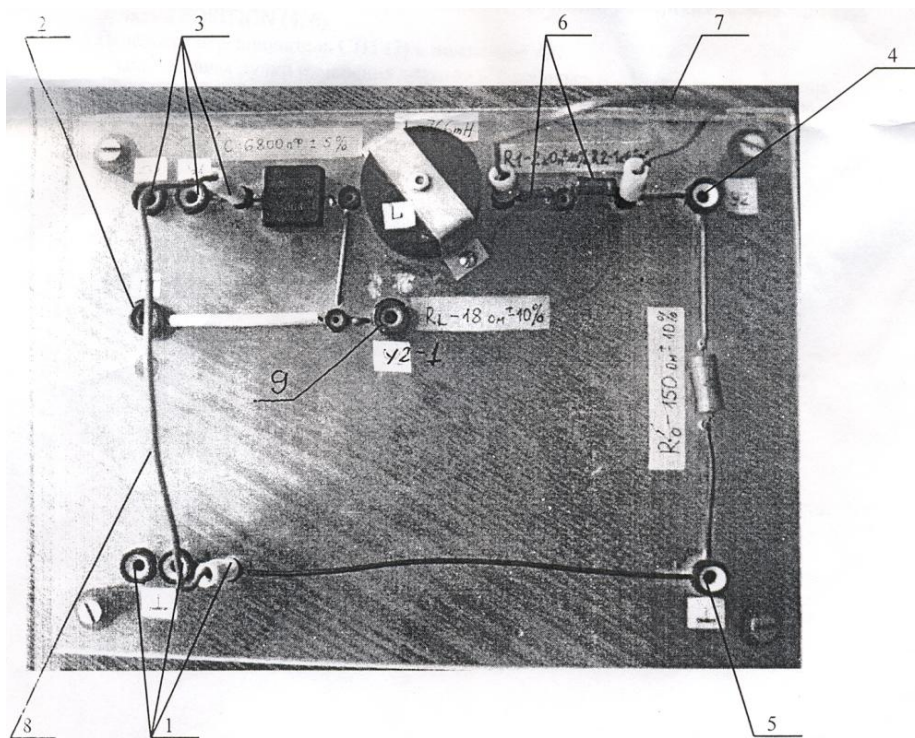


Рис. 3. Панель монтажная

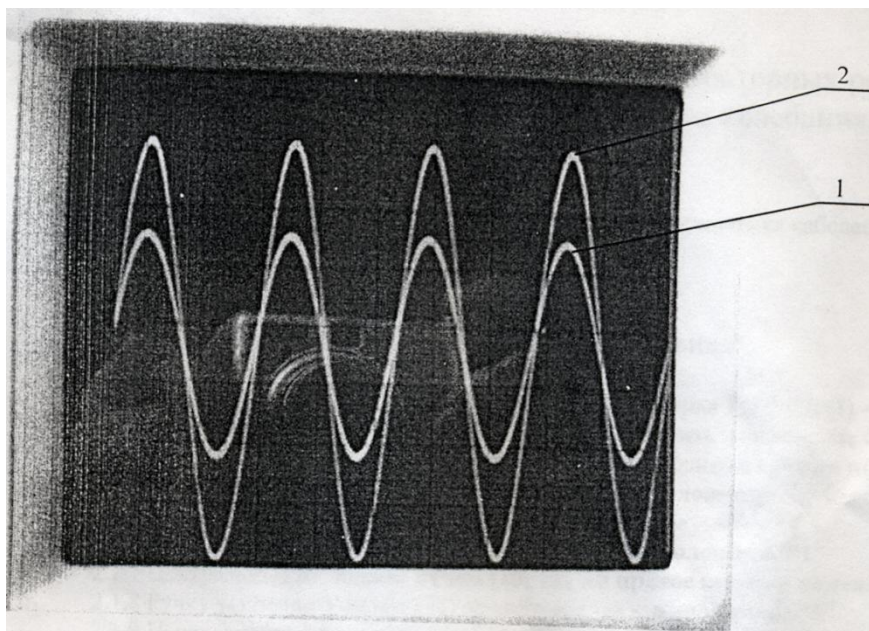


Рис. 4. Пример осциллограммы вынужденных колебаний.
1 – входное напряжение, 2 – выходное напряжение.

УЧЕБНЫЕ ЗАДАНИЯ

Электрическое поле. Закон Кулона. Теорема Гаусса и теорема о циркуляции для электрического поля. Потенциальность электрического поля

1. Определите силу кулоновского притяжения электрона водородного атома к ядру, если диаметр атома водорода порядка $2 \cdot 10^{-8}$ см. Сравните её с силой гравитационного притяжения.
2. Молекула воды H_2O имеет постоянный дипольный момент $p = 6,2 \cdot 10^{-30}$ Кл·м, направленный от центра иона O^{2-} к середине прямой, соединяющей центры ионов H^+ . Определите силу взаимодействия воды и электрона, если расстояние между ними 10 нм и дипольный момент молекулы направлен вдоль соединяющей их прямой.
3. Тонкий стержень длиной $L = 20$ см заряжен равномерно зарядом $q = 10^{-9}$ Кл. Определите напряженность электрического поля в т. А, находящейся на расстоянии $r = 10$ см от центра стержня О (линия АО перпендикулярна стержню). Исследуйте зависимость напряженности от расстояния r для случаев $r \gg L$ и $r \ll L$.
4. Сферический конденсатор образован двумя концентрическими проводящими сферами радиусами R_1 и R_2 ($R_1 < R_2$). Внутренней сфере сообщают заряд $+q$, а внешней $-q$. Определите напряженность электрического поля в конденсаторе как функцию расстояния r от общего центра сфер и постройте график этой зависимости.
5. Шар радиусом R равномерно заряжен с объемной плотностью ρ . Определите напряженность электрического поля как функцию расстояния r от центра шара и постройте график этой зависимости.
6. Сфера радиусом R равномерно по поверхности заряжена зарядом q . Определите напряженность и потенциал электрического поля как функцию расстояния r от центра сферы и постройте график этой зависимости. Потенциал бесконечно удаленной точки принять равным нулю.
7. В задаче №5 определите разность потенциалов между точками О и А, где т. О – центр шара, а т. А находится на расстоянии $2R$ от т. О.
8. Три одинаковых точечных заряда (масса каждого m , заряд q) удерживаются в вершинах правильного треугольника со стороной a . Определите скорости этих зарядов, после того как их отпустят, и они разлетятся на большое расстояние друг от друга.

Электрическое поле в диэлектриках. Электростатика проводников. Конденсаторы.

9. Вблизи т. А (см. рис.1) границы стекло-воздух напряженность электрического поля в воздухе $E_0 = 10$ В/м, причем угол между вектором E_0 и нормалью \vec{n} к границе раздела $\alpha = 30^\circ$. Определите напряженность E поля в стекле вблизи т. А, а также поверхностную плотность поляризационных зарядов в этой точке. Диэлектрическая проницаемость стекла $\epsilon = 6$,

диэлектрическую проницаемость воздуха принять равной 1.

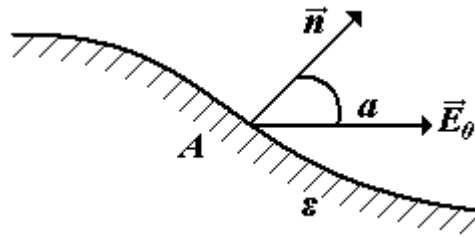


Рис. 1

10. Плоский воздушный конденсатор с площадью пластин S и расстоянием между ними d подключен к батарее, поддерживающей постоянную разность потенциалов U . Параллельно обкладкам конденсатора в него вдвигают диэлектрическую пластину толщиной $L (L < d)$ с диэлектрической проницаемостью ϵ . Определите напряженность электрического поля во всем пространстве между обкладками и поверхностную плотность поляризационных зарядов (рис.2).

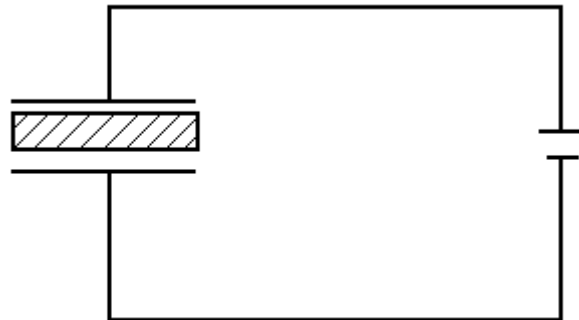


Рис.2

11. Плоский воздушный конденсатор с площадью пластин S и расстоянием d между ними подключен к батарее, поддерживающей постоянную разность потенциалов U . Параллельно обкладкам конденсатора в него вдвигают незаряженную проводящую пластинку толщиной $L (L < d)$. Определите напряженность электрического поля во всем пространстве между обкладками, величину заряда, индуцированного на пластинке, и емкость образовавшейся системы.

12. В задаче №4 определите разность потенциалов между обкладками сферического конденсатора, его емкость и энергию электрического поля.

Постоянный электрический ток. Законы Ома, Джоуля – Ленца. Правила Кирхгофа

13. Электрическая цепь состоит из источника с постоянной ЭДС ϵ и внутренним сопротивлением r и внешнего сопротивления R . Определите, как зависит полезная мощность, выделяемая на внешнем сопротивлении, и КПД источника в цепи от внешнего сопротивления R . Постройте графики

этих зависимостей. При каком значении сопротивления R тепловая мощность, выделяемая на нем, будет максимальна (рис.3).

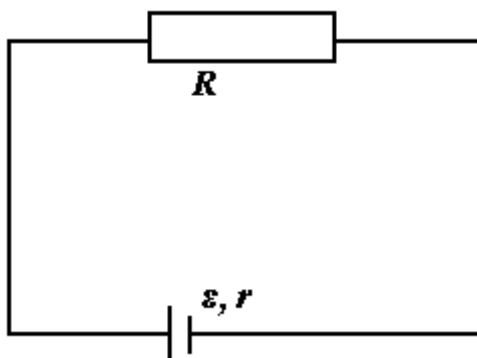


Рис.3

14. В электрической цепи определите показания идеальных вольтметра и амперметра. ЭДС источников и их внутреннее сопротивление равны соответственно: $\varepsilon_1 = 18$ В, $\varepsilon_2 = 12$ В, $r_1 = 3$ Ом, $r_2 = 4$ Ом; сопротивления резистора $R = 5$ Ом. Какое количество тепла выделится на резисторе R за время $\Delta t = 10$ с (рис.4).

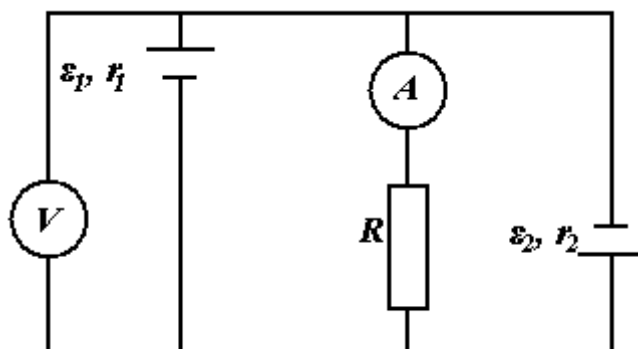


Рис.4

15. Определите заряд конденсатора в цепи в установившемся режиме. Все характеристики элементов цепи известны. Какое количество тепла выделится на резисторах R_1 и R_2 после размыкания ключа K (рис.5)?

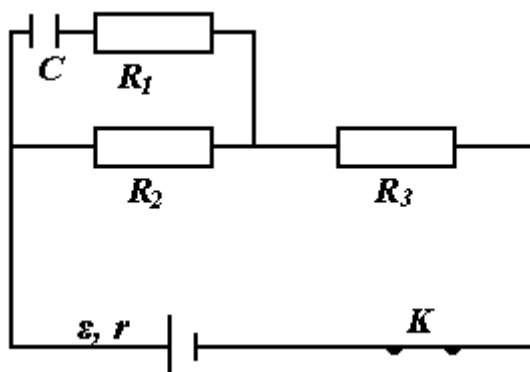


Рис.5

Магнитное поле. Сила Лоренца, сила Ампера. Закон Био – Савара – Лапласа. Теорема о циркуляции для магнитного поля

16. В масс- спектрографе заряженные частицы ускоряются на участке **CD** электрическим полем и, попав в магнитное поле с индукцией **B**, описывают окружность радиусом **R**. Определить удельный заряд частиц $\frac{q}{m}$. Ускоряющее напряжение равно U_y , начальная скорость частицы пренебрежимо мала (рис. 6).

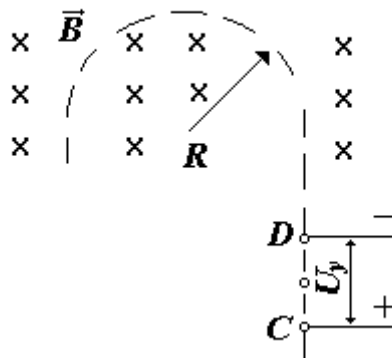


Рис.6

17. Плоская прямоугольная катушка из $N = 100$ витков со сторонами $a = 10$ см и $b = 20$ см находится в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,1$ Тл. Каков максимальный вращающий момент может действовать на катушку в этом поле, если сила тока в катушке $I = 2$ А?

18. По круговому проволочному витку радиусом **R** циркулирует ток **I**. Определите индукцию магнитного поля на оси витка на расстоянии **x** от его центра и постройте график этой зависимости. Исследуйте зависимость индукции от расстояния **x** для случаев $x \gg R$ и $x \ll R$.

19. Длинный проводник с током $I = 3$ А изогнут в форме прямого угла. Определите индукцию магнитного поля в точке, лежащей на биссектрисе этого угла на расстоянии $L=10$ см от вершины (рис.7).

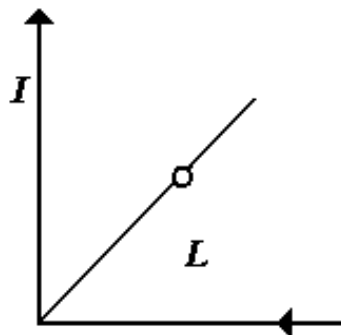


Рис.7

20. По длинному прямому цилиндрическому проводу радиусом R течет ток с постоянной плотностью j . Определите индукцию магнитного поля как функцию расстояния r от оси провода и постройте график этой зависимости.

21. По оси длинного тонкостенного проводящего цилиндра радиусом R натянут провод. По цилиндру и проводу течет постоянный электрический ток I , как показано на рисунке. Определите индукцию магнитного поля как функцию расстояния от провода и постройте график этой зависимости (рис.8).

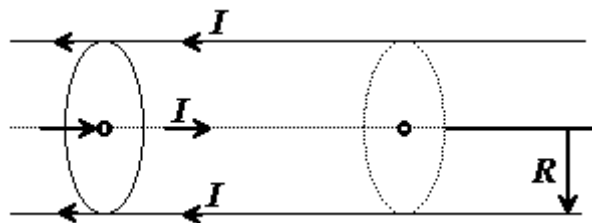


Рис.8

22. Тороидальная однослойная катушка содержит N витков плотно намотанного провода, по которому течет ток I . Внутренний радиус тора R_1 , внешний R_2 . Определите индукцию магнитного поля внутри и вне тора в зависимости от расстояния от его оси.

23. Соленоид представляет собой полый цилиндр радиусом R и длиной L , на который плотно намотан в один слой тонкий провод. Число витков провода в обмотке n на единицу длины. Определите индукцию магнитного поля внутри и вне соленоида, если по его обмотке течет ток I . Проведите оценки для: $R=1$ см, $L=50$ см, $n=15$ витков/см, $I=1$ А.

Магнитное поле в веществе. Теорема о циркуляции и теорема Гаусса для магнитного поля в веществе. Граничные условия

24. Вблизи т.А границы магнетик-вакуум магнитная индукция в вакууме равна B_0 и составляет угол α_0 с нормалью к границе раздела в данной точке. Магнитная проницаемость магнетика μ . Определите магнитную проницаемость B в магнетике вблизи т.А (рис.9).

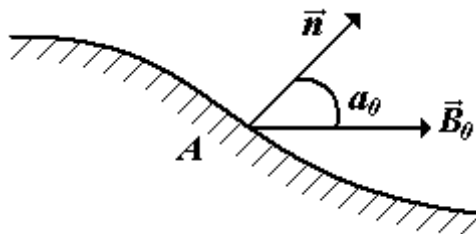


Рис.9

25. Однослойная тороидальная катушка с железным сердечником имеет $N=500$ витков обмотки, по которой течет ток $I=1$ А. Радиус поперечного сечения тора $r=1$ см, радиус его средней окружности $R=10$ см. Сердечник имеет воздушный зазор толщиной $L=1$ мм. Определите индукцию магнитного поля в сердечнике и в зазоре, а также намагниченность сердечника. Магнитная

проницаемость железа $\mu=10^3$, рассеиванием поля на краях зазора пренебречь. Оцените энергию магнитного поля тороидальной катушки (рис.10).

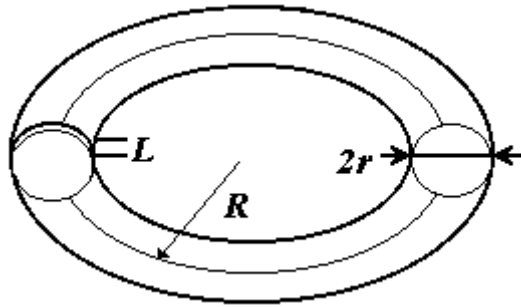


Рис.10

Электромагнитная индукция. Самоиндукция

26. Два металлических стержня расположены вертикально и замкнуты сверху проводником. По стержням без трения и нарушения контакта начинает скользить перемычка длиной $L=10$ см и массой $m=20$ г. Вся система находится в однородном магнитном поле с индукцией $B=0,1$ Тл, перпендикулярной к её плоскости. Какой максимальной скорости достигнет перемычка при своем движении вниз? Сопротивление перемычки $R=0,05$ Ом, сопротивление стержней и проводника пренебречь, ускорение свободного падения $G=9,8$ м/с² (рис.11).

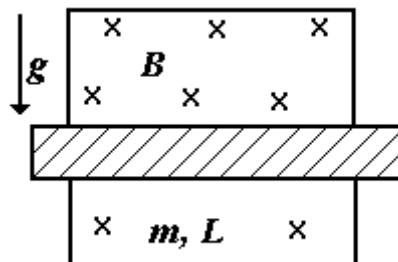


Рис.11

27. В задаче **23** определите индуктивность соленоида, плотность энергии и энергию его магнитного поля.

Квазистационарные токи. Электрические колебания

28. Цепь на рис.12 состоит из источника с ЭДС \mathcal{E} и резисторов с сопротивлениями R_1 и R_2 , конденсатора емкостью C и ключа K , разомкнутого в начальный момент. Определите зависимость заряда конденсатора от времени после замыкания ключа. Внутренним сопротивлением источника пренебречь (рис.12).

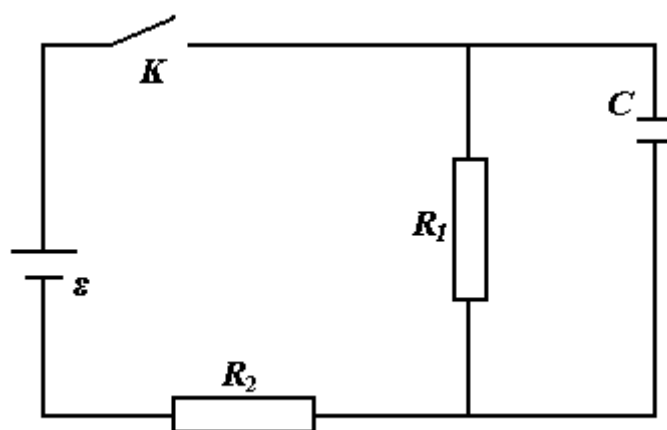


рис.12

29. Цепь на рис.13 состоит из источника с ЭДС ε и резисторов с сопротивлениями R_1 и R_2 , катушки с индуктивностью L и ключа K , разомкнутого в начальный момент. Ток в катушке равен нулю. Определите зависимость тока в катушке от времени после замыкания ключа. Внутренним сопротивлением источника и омическим сопротивлением катушки пренебречь (рис.13).

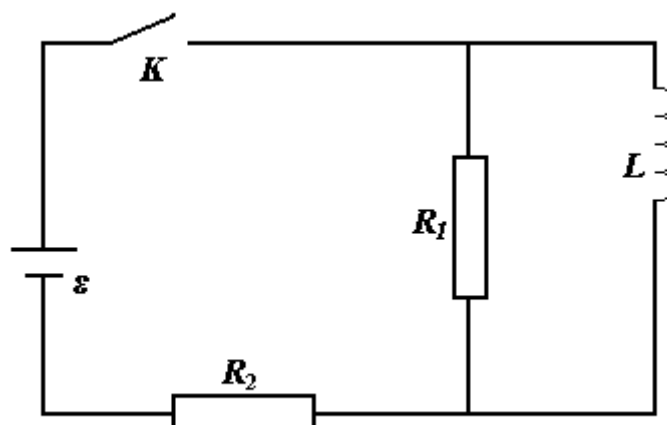


Рис.13

30. Определите связь между амплитудами тока и напряжения при свободных колебаниях в LC –контуре.

31. Из-за наличия активного сопротивления проводов в колебательном контуре, состоящем из конденсатора емкостью $C = 1$ мкФ и катушки индуктивностью $L = 1$ мкГн, амплитуда тока за $t = 1$ мс уменьшилась в 2 раза. Определите сопротивление проводов и добротность колебательного контура.

Вихревое Электрическое поле. Ток смещения

32. Бесконечный прямой соленоид радиусом R имеет n витков на единицу длины. По соленоиду пропускают линейно нарастающий со временем ток: $I = at$. Определите напряженность вихревого электрического поля как функцию расстояния r от оси соленоида и постройте график этой зависимости.

33. Плоский воздушный конденсатор состоит из двух одинаковых параллельных металлических дисков, расстояние между внутренними поверхностями которых равно d . Между обкладками конденсатора поддерживается переменное напряжение $U = U_0 \sin(\omega t)$. Пренебрегая краевыми эффектами, определите магнитное поле между обкладками конденсатора.

Дополнительные задачи

1. По поверхности тонкостенной непроводящей сферы, из которой вырезано небольшое отверстие, равномерно распределён заряд $+q$. Площадь отверстия S и его линейные размеры много меньше радиуса сферы R . Определите силу электростатического взаимодействия такой сферы с точечным зарядом $-Q$, помещенным в центр сферы.
2. Тонкое полукольцо радиусом $R = 20$ см заряжено равномерно зарядом $q = 7 \cdot 10^{-10}$ Кл. Определите напряжённость электрического поля в центре кривизны этого полукольца.
3. Шар радиусом R равномерно заряжен с объёмной плотностью заряда ρ . Определите потенциал электрического поля как функцию расстояния r от центра шара. Потенциал бесконечно удалённой точки принять равным нулю.
4. На рис. 14 показаны три плоские параллельные проводящие пластины. Пластина 2 сообщается заряд $+Q$, а предварительно незаряженные пластины 1 и 3 соединили проводником. Определите силу электростатического взаимодействия пластины 2 с пластинами 1 и 3. Площадь, каждой пластины S , расстояние между пластинами l_1 и l_2 много меньше их размеров (рис.14).

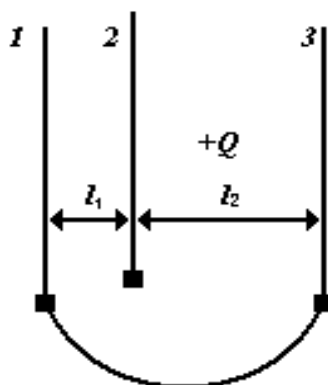


Рис.14

5. В однородное электрическое поле напряженностью \vec{E}_0 внесли тонкую плоскопараллельную металлическую пластинку. Плоскость пластинки перпендикулярна направлению электрического поля. Определите электрическое давление на поверхность пластинки.
6. Из одного пункта в другой передаётся электроэнергия, питающая установку мощностью $P = 62$ кВт. Сопротивление проводов линии $R = 5$ Ом. Определите падение напряжения в линии, потери мощности в ней и КПД передачи, если передача осуществляется при напряжении $U_1 = 6200$ В или $U_2 = 620$ В.
7. Оцените индукцию магнитного поля, создаваемого вращающимся электроном, в центре атома водорода. Можно считать, что электрон движется вокруг ядра по круговой орбите радиусом $r \sim 10^{-10}$ м со скоростью $v = 2,4 \cdot 10^6$ м/с.

8. Электрический ток I протекает по бесконечному проводу, изогнутому как показано на рис.15. Определите индукцию магнитного поля \vec{B} в центре окружности O (её радиус R).

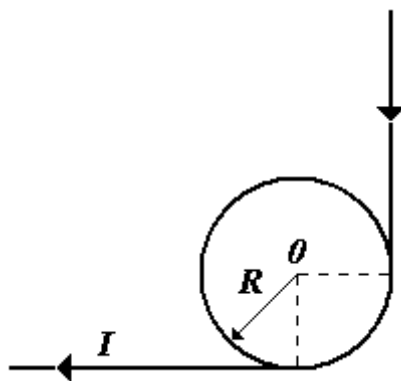


Рис.15

9. Определите индукцию магнитного поля внутри бесконечной цилиндрической полости, сделанной в бесконечном прямом цилиндрическом проводе, вдоль которого течет постоянный ток плотностью \vec{j} , равномерно распределённый по сечению провода. Расстояние между осями провода и полостью равно a (рис.16).

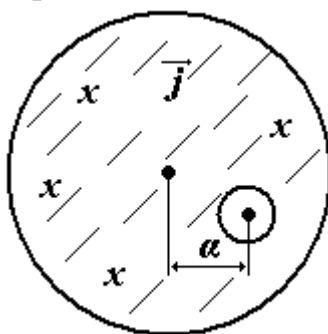


Рис.16

10. По длинному плазменному цилиндру радиусом $r=2,5$ см течёт ток $I=5 \cdot 10^4$ А, сосредоточенный в поверхностном слое. Давление в плазме P . Определите магнитное давление P_m на боковую поверхность плазменного цилиндра, вызванное электрическим током. Каков ток J_0 необходим для того, чтобы давления P_m и P сравнялись?
11. Два металлических стержня расположены вертикально и замкнуты сверху проводником. По стержням без трения и нарушения контакта начинает скользить из состояния покоя перемычка длиной $L=10$ см и массой $m=20$ г. Вся система находится в однородном магнитном поле с индукцией $B=0,1$ Тл, перпендикулярной к её плоскости. Сопротивление перемычки $R=0,05$ Ом, сопротивлением стержней и проводника пренебречь, ускорение свободного падения $g=9,8$ м/с². Определите, как со временем будет изменяться скорость перемычки (рис.17).

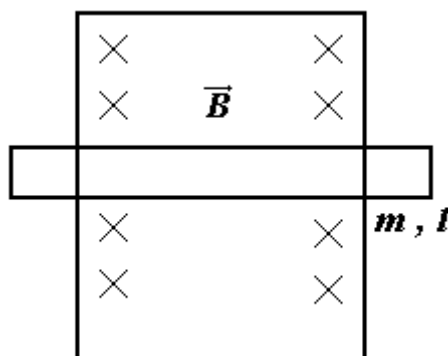


Рис.17

- 12.** Заряд q равномерно распределен по тонкому диэлектрическому кольцу массой m , лежащему на гладкой горизонтальной поверхности. Индукция вертикально направленного магнитного поля возрастает от 0 до B_0 . Какую угловую скорость вращения приобретает при этом кольцо?

Библиографический список

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики . Т. 3. Электричество : учеб. пособие.- М.: Физматлит, 2013.
2. Савельев И. В. Курс общей физики . Т.2. Электричество и магнетизм: учеб. пособие.-М.: Астрель, 2008.

Содержание

Лабораторная работа 1. Изучение закона Ома и определение удельного сопротивления нихромовой проволоки.....	3
Лабораторная работа 2. Исследование процесса разрядки конденсатора.....	9
Лабораторная работа 3. Изучение электронно-лучевого осциллографа.....	15
Лабораторная работа 4. Изучение затухающих колебаний в колебательном контуре	19
Лабораторная работа 5. Изучение вынужденных колебаний в колебательном контуре.....	27
Учебные задания	37
Дополнительные задачи.....	45
Библиографический список.....	47

Учебное издание

Составители:

Веселко Сергей Григорьевич, **Карпова** Елена Евгеньевна

Электричество и магнетизм

Методические указания к выполнению лабораторных работ и решению задач