

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**Кафедра физики**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**

Методические указания  
к выполнению лабораторных работ по физике  
для студентов технических специальностей  
дневной и заочной форм обучения

Часть II

Брест 2018

УДК 53.91, 539.22

В методических указаниях приведено описание лабораторных работ по разделу физики «Электричество», по темам: «Резонанс в электрической цепи», «Измерение емкости конденсатора на основе переходных процессов», «Измерение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли».

В лабораторной работе по резонансу цепи студенты изучают явление на примере последовательного колебательного контура, исследуют его амплитудно-частотную характеристику, оценивают добротность, определяют индуктивность соленоида. В качестве измерительной техники используются осциллограф и генератор гармонических и импульсных сигналов. Эта же измерительная техника используется и для измерения емкости конденсатора на основе переходных процессов. Объектом исследования в этой работе является цепочка из резистора и конденсатора, включенных последовательно. Для измерения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли используются катушки Гельмгольца; математическая модель лабораторной работы позволяет студентам на практике освоить тему создания магнитного поля круговым током постоянной величины.

Методические указания могут использоваться для студентов технических специальностей факультетов: электронно-информационных систем, инженерных систем и экологии, строительного и машиностроительного факультетов, факультета заочного обучения. Издается в 2 частях. Часть 2.

Составители: Л.А. Величко, к.ф.-м.н., доцент  
Н.Н. Ворсин, к.ф.-м.н., доцент  
К.М. Маркевич, ст. преподаватель

Рецензент: В.С. Секержицкий, к.ф.-м.н., доцент УО «Брестский государственный университет» им. А.С. Пушкина

Учреждение образования  
«Брестский государственный технический университет», 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

Э-15. РЕЗОНАНС В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ.....	3
Э-16. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА НА ОСНОВЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ....	11
Э-17. ИЗМЕРЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ.....	20

## Э 15. РЕЗОНАНС В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

*Цель работы:* изучить резонанс и его проявления в последовательном колебательном контуре.

*Приборы и оборудование:* генератор электрических сигналов, осциллограф, электрический колебательный контур.

Если авторучку, стол, стул поместить на работающий вибро-стенд с частотой вибрации в единицы Гц, то они будут совершать движения с той же частотой и амплитудой. Но если частоту вибраций регулировать, то при некоторой частоте колебаний эти тела начнут двигаться с большей амплитудой, чем амплитуда колебаний самого вибро-стенда. Это проявление резонанса. Частота, при которой амплитуда колебаний физических тел возрастает, является их собственной частотой. Резонанс – это и раскачивание детских качелей. Он возникает тогда, когда частота внешнего воздействия на систему совпадает с собственной частотой физической системы. Резонанс возможен и в электрических цепях. Такой резонанс рассмотрим в лабораторной работе.

Колебательный контур - система с разнородными носителями энергии. В нем происходит переход энергии магнитного поля катушки в энергию электрического поля конденсатора. С колебательного контура начинается радиоприемник, сотовый телефон, безинтернетный телевизор. Антенны этих устройств подключается к колебательному контуру, где в соответствии закона электромагнитной индукции в катушке индуктивности индуцируется эдс от сигнала передающей станции. Далее этот сигнал декодируется до звукового или (и) изображения, в зависимости от функций приемника. Передатчик передающей системы заканчивается антенной, но сигнал на нее поступает из колебательного контура. Процессы в приеме-передающих системах радиоэлектроники гораздо сложнее тех, которые мы рассмотрим, но в основе понимания их работы лежат изучаемые нами явления. Если частота передатчика телефонных сигналов совпадает с частотой колебательного контура вашего телефона, то это звонок вам, и при этом используется резонанс. В радиоэлектронике применяются последовательные и параллельные колебательные контуры (Рис. 1). Рассмотрим некоторые аспекты их работы на примере колебательного контура Рис. 1 а.

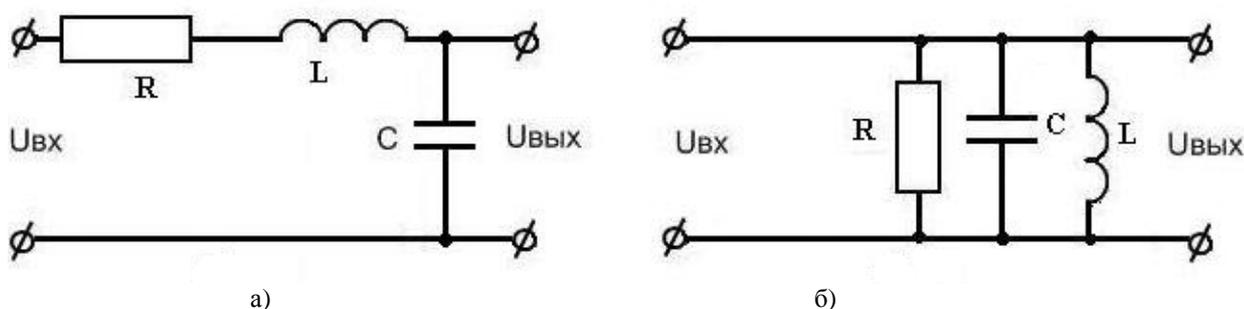


Рис. 1. а) – колебательный контур последовательного типа; б) - колебательный контур параллельного типа.

Пусть на входе колебательного контура (Рис 1 а) присутствует источник гармонического напряжения:  $e = E_m \cos \omega t$  (Рис. 2):

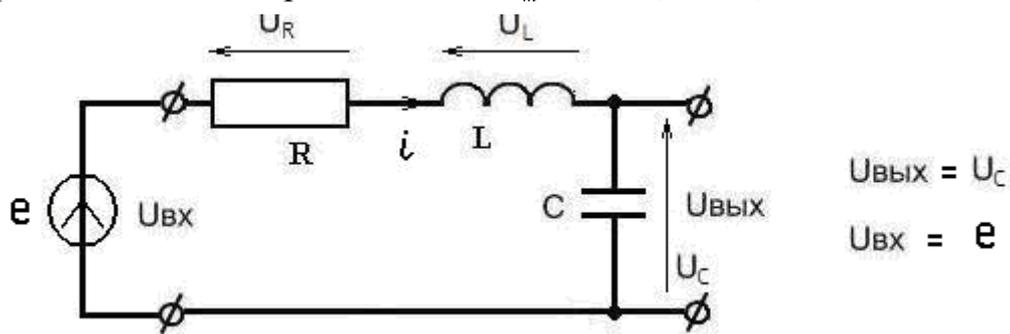


Рис. 2 . Последовательный колебательный контур, подключенный к гармоническому источнику напряжения  $e$ .

В соответствии электрической схемы Рис. 2, имеем (1):

$$e = U_R + U_L + U_C \quad (1)$$

$$U_R = iR; \quad U_L = L \frac{di}{dt}; \quad U_C = \frac{1}{C} \int idt \quad (2)$$

$$E_m \cos \omega t = iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt \quad (3)$$

(3) - интегрально дифференциальное уравнение. Его частным решением является функция (4). Если ее подставить в (3), получим тождество.

$$i = I_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

Найдем амплитуду  $I_m$  и начальную фазу  $\varphi$  для последнего выражения.

$$U_R = iR = I_m R \cos(\omega t + \varphi)$$

$$U_L = L \frac{di}{dt} = -\omega L I_m \sin(\omega t + \varphi)$$

$$U_C = \frac{1}{C} \int idt = \frac{I_m}{\omega C} \sin(\omega t + \varphi)$$

Подставим  $U_R$ ,  $U_L$  и  $U_C$  в (1), получим (5):

$$E_m \cos \omega t = I_m R \cos(\omega t + \varphi) - (\omega L - \frac{1}{\omega C}) I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

Если в (5) принять  $\omega t = 0$  и  $\omega t = \pi/2$ , то получим два частных уравнения. Они и позволят определить  $I_m$  и  $\varphi$ .

$$E_m = I_m R \cos \varphi - (\omega L - \frac{1}{\omega C}) I_m \sin \varphi$$

$$0 = I_m R \cos(\frac{\pi}{2} + \varphi) - (\omega L - \frac{1}{\omega C}) I_m \sin(\frac{\pi}{2} + \varphi)$$

или,

$$E_m = I_m R \cos \varphi - (\omega L - \frac{1}{\omega C}) I_m \sin \varphi \quad (6)$$

$$0 = I_m R \sin \varphi + (\omega L - \frac{1}{\omega C}) I_m \cos \varphi \quad (7)$$

Все слагаемые (6) и (7) возведем в квадраты и просуммируем (8):

$$E_m^2 = I_m^2 R^2 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2 I_m^2 (\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi) \quad (8)$$

Из (8) следует (9):

$$I_m = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \quad (9)$$

Из (7) следует (10):

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{(\omega L - \frac{1}{\omega C})}{R}; \quad \varphi = -\operatorname{arctg} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (10)$$

Уравнение (4) будет иметь вид (11):

$$i = \frac{E_m \cos(\omega t - \operatorname{arctg} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R})}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \quad (11)$$

Из (9) и (11) следует, что  $I_m$  и  $i$  зависят от частоты  $\omega$  источника эдс  $e$ . При этом,  $I_m$  и  $i$  возрастут, если в выражении под корнем станет равным нулю величина (12). Такое состояние цепи называют резонансным.

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0; \quad (12)$$

Частота  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$  - собственная частота колебательного контура. Если частота внешнего сигнала  $e = E_m \cos \omega t$  совпадет с собственной частотой колебательного контура, то в цепи на частоте  $\omega$  произойдет увеличение тока цепи  $i$  и, как следствие, напряжения  $U_{\text{вых}}$ , которое есть напряжение на кон-

денсаторе. Однако при резонансе будет происходить и увеличение напряжения и на катушке с индуктивностью  $L$ , и на резисторе сопротивлением  $R$ .

Качество резонанса оценивается величиной, которая называется добротностью ( $Q$ ) контура. Она показывает - во сколько раз в колебательном контуре, при резонансе, возрастает напряжение на конденсаторе (индуктивности).

Для амплитудных значений напряжений на катушке индуктивности (13) и конденсаторе (14):

$$U_{mL} = \omega_0 L I_m = \frac{\omega_0 L}{R} E_m = Q E_m \quad (13)$$

$$U_{mC} = \frac{1}{\omega_0 C} I_m = \frac{1}{\omega_0 C R} E_m = Q E_m \quad (14)$$

Величины  $U_{mL}$ ,  $U_{mC}$  и  $E_m$  могут определяться осциллографическими измерениями.

### *Стенд для исследования колебательного контура*

Система колебательного контура реализована в «черном ящике», который имеет вход для сигналов генератора и два выхода для подключения двух каналов осциллографа: один на вход колебательного контура, другой - на его выход. Колебательный контур содержит катушку с индуктивностью  $L$  и сопротивлением обмотки  $R_k$ , конденсаторы  $C_1 - C_4$  и магазин сопротивлений  $R_{доб}$ , от 0 до десятков (сотен) кОм.

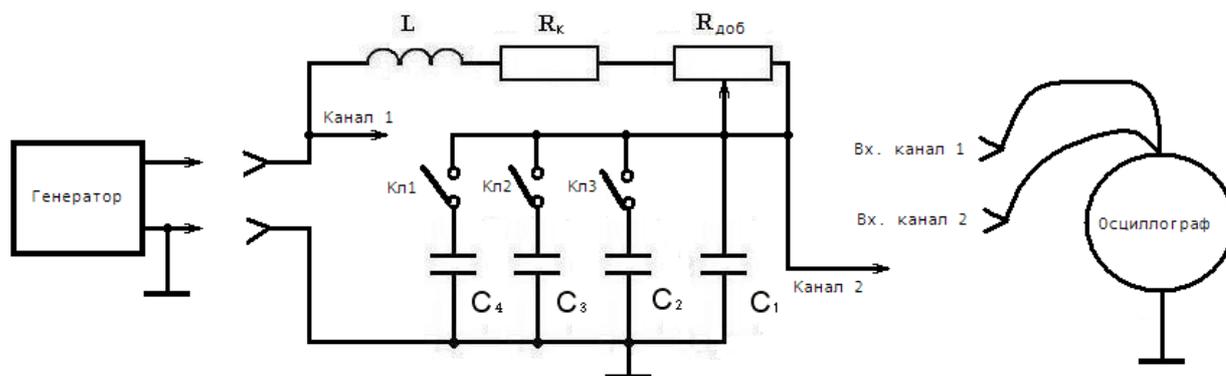


Рис. 3. Схема для исследования резонанса в электрической цепи.

$C_1 = 290$  пФ;  $C_2 = 390$  пФ;  $C_3 = 560$  пФ;  $C_4 = 750$  пФ.

Возможны и другие номиналы емкостей.

Колебательный контур может иметь разные собственные частоты (12), зависящие от положения ключей К1 – К3 для конденсаторов  $C_1 - C_3$  (Рис. 3). Их подключение осуществляется переключателями «черного ящика» 1 – 4. В зависимости от комбинации положений этих переключателей в колебательном контуре включается разная результирующая емкость. Тем самым изменяется и собственная (резонансная) частота колебательного контура.

## Порядок выполнения работы

1. Изучите математическую модель резонанса в колебательном контуре.

2. На вход колебательного контура от генератора подаем максимально возможный гармонический сигнал по амплитуде. Это когда регулятор уровня выходного сигнала генератора, при движении по часовой стрелке, в крайнем правом положении. Его величину контролируем каналом 2 осциллографа. Заметим, что  $U_{\text{вых.ген}} \approx \text{const}$  во всем частотном диапазоне. Поэтому, в дальнейшем, зафиксировав величину  $U_{\text{вых.ген}}$  возможно отключить канал 2 осциллографа, что облегчит эксперименты.

Выходной сигнал снимаем с конденсатора (конденсаторов) и подаем на вход канала 1 осциллографа (Рис. 3). Положение выключателей 1-4 на «черном ящике» в выключенном состоянии.

Если изменять частоту выходного напряжения генератора от 0, например, до 100 кГц, и при этом подавать на вход «черного ящика» постоянное по амплитуде напряжение, то, начиная с некоторых частот выходное напряжение (канал 1) начнет увеличиваться, а потом уменьшаться. Это есть проявление резонанса. В ходе эксперимента, возможно, зафиксировать частоту, при котором будет максимум напряжения на выходе колебательного контура. Если это проделали, и получилось наблюдать описанное, Вы готовы к дальнейшим исследованиям.

### 3. Построение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) колебательного контура.

АЧХ – есть зависимость отношения амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного сигнала ( $U_{\text{ex}} = \text{const}$ ) при изменении частоты от 0 до  $\infty$ .

По заданию преподавателя, переключатели 1 - 4 установите в активное состояние и задайте величину напряжения генератора сигналов -  $U_{\text{ex}}$ . Зафиксируйте номинал результирующей емкости  $C = \dots$  колебательного контура и определите экспериментально его собственную (резонансную) частоту  $f_{\text{рез}}$ .

Снимите данные в соответствии табл. 1 для следующих значений добавочного сопротивления (возможны и др. значения  $R_{\text{доб}}$ ):

$$R_{\text{доб1}} = 0 \text{ Ом}; \quad R_{\text{доб2}} = 500 \text{ Ом} \text{ и } R_{\text{доб3}} = 1 \text{ кОм}.$$

Таблица 1

	$f_{\text{ген}}, \text{кГц}$	10	20	30	40	50	60	70	80
$U_{\text{ex}}, \text{В}$									
$U_{\text{вых1}}, \text{В}$	$R_{\text{доб1}} = 0$ $\text{Ом}$								
$U_{\text{вых2}}, \text{В}$	$R_{\text{доб2}} =$ $500 \text{ Ом}$								
$U_{\text{вых3}}, \text{В}$	$R_{\text{доб3}} =$ $1 \text{ кОм}$								

Для трех случаев исследований, при различных сопротивлениях  $R_{доб}$ , в одной координатной системе постройте АЧХ. В качестве ординаты используйте отношение  $U_{вых}/U_{вх}$ ; в качестве оси абсцисс – параметр частоты  $f$ .

По полученному графику по уровню 0, 707 от максимального значения напряжения на резонансной частоте  $U_{рез}$  графически определите полосу пропускания последовательного колебательного контура  $\Delta f$ . Отношение:  $f_{рез}/\Delta f = Q$ , есть добротность колебательного контура. Это еще один экспериментальный метод нахождения  $Q$ .

### 5. Определение индуктивности $L$ в последовательном колебательном контуре.

Считаем, что  $R_k \approx 0$ ; выставляем  $R_{доб} = 0$ .

Изменяя емкость  $C$  колебательного контура, определяем соответствующие его резонансные частоты, которые определяем с помощью генератора и осциллографа и, которые являются для него собственными. Полученные результаты исследований заносим в табл. 2.

Величину индуктивности  $L$  определяем в соответствии выражения (12) на основе показаний частоты осциллографом, поскольку они более точны сравнительно с показаниями генератора. По осциллографическим показаниям определяем и период колебаний  $T$  на различных собственных частотах последовательного колебательного контура.

Таблица 2

$N$	$C, \text{нФ}$	$f_{ген}, \text{кГц}$	$f_{осц}, \text{кГц}$	$T, \text{мкс}$	$L, \text{мГн}$	$\langle L \rangle, \text{мГн}$	$Q$
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							

По самому худшему результату исследований определите погрешность измеренной индуктивности  $\Delta L$ . Запишите результат определенной индуктивности соленоида  $L$  с указанием погрешности.

Сделайте выводы по проведенным исследованиям.

### 6. Зависимость добротности колебательного контура от его собственной частоты.

Исследуйте, как зависит добротность  $Q$  колебательного контура (отношение выходного напряжения на резонансной частоте  $U_{вых рез}$ , ко входному –  $U_{вх рез}$ ) в зависимости от изменения его собственной частоты (14).

Для этого используйте результаты ранее проведенных измерений, представленных в табл. 2. Для всех  $N$  резонансных частот экспериментально определите добротность контура  $Q_1 - Q_8$ . Данные исследований занесите в эту же таблицу.

По результатам эксперимента постройте зависимость:  $Q = r(f_{рез})$ .

Сделайте выводы по проведенному исследованию: зависимости добротности последовательного колебательного контура  $Q$  от его собственной частоты  $f$ .

### Контрольные вопросы

1. Что есть собственная и резонансная частоты колебательной системы; их различие и взаимосвязанность.

2. Условия возникновения резонанса в физической системе.

3. Математическая модель и условия возникновения резонанса в последовательном колебательном контуре.

4. Параметры последовательного колебательного контура: активное, индуктивное и емкостное сопротивления; собственная частота, полоса пропускания, добротность.

5. Теоретические и экспериментальные методы определения добротности колебательного контура.

6. Методы повышения добротности колебательного контура.

7. Что характеризует индуктивность  $L$  соленоида или любого другого индуктивного элемента.

8. Резонансный метод измерения индуктивности соленоида.

Отчет по работе:

Название.

Цель.

Приборы и оборудование.

Теоретические сведения:

- физическая и математическая модели резонанса в последовательном колебательном контуре;

- условия реализации явления резонанса.

Порядок выполнения работы.

Описание и представление исследований по каждому пункту лабораторной работы с использованием таблиц, графиков (если это предусмотрено заданием), отдельных физических результатов и выводов.

## Э 16. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА НА ОСНОВЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

*Цель работы:* изучить переходные процессы в резистивно-емкостной цепи и определить величину емкости конденсатора.

*Приборы и оборудование:* генератор электрических сигналов, осциллограф, электрическая цепь из RC элементов.

Конденсатор – элемент электро-, радио- электроники из двух обкладок, с диэлектриком внутри. Наиболее распространены – плоские конденсаторы. В микро- электронике они выполнены в виде микро- элементов, в компьютере их сотни. Основные параметры конденсатора: емкость -  $C$ , погрешность -  $\Delta C$ , напряжение –  $U$ . Для плоского конденсатора (1):

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d} \quad (1)$$

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  ф/м;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;

$S$  – площадь пластин,  $d$  – расстояние между пластинами.

Емкость конденсатора  $C$  характеризует диэлектрик и его геометрические размеры (1). Понятие «емкость» для конденсатора связана со способностью накапливать заряд  $q$ , при подаче на него напряжения  $U$ .

$$C = \frac{q}{U}; \quad C = \frac{dq}{dU} \quad (2)$$

Зависимость между током и напряжением конденсатора (3):

$$dq = CdU; \quad dq = idt; \quad C = \frac{idt}{dU} \quad (3)$$

Откуда (4):

$$i_c = C \frac{dU_c}{dt}; \quad U_c = \frac{1}{C} \int i_c dt \quad (4)$$

Формулы (3) - (4) устанавливают зависимость между током и напряжением конденсатора в дифференциальной и интегральной формах.  $i_c$  и  $U_c$  - мгновенные значения тока и напряжения, зависящие от времени:  $i_c = i_c(t)$ ;  $U_c = U_c(t)$ . Однако время, в этих величинах, как правило, не указывают.

Рассмотрим, как будут меняться ток  $i_c(t)$  и напряжение  $U_c(t)$  на конденсаторе, если его через резистор  $R$  (Рис. 2) подключить к источнику постоянного напряжения  $E$  (Рис. 1).

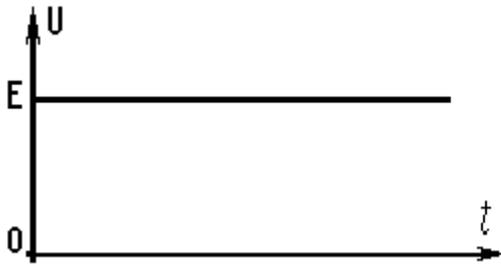


Рис. 1. График напряжения источника постоянной ЭДС величиной  $E$

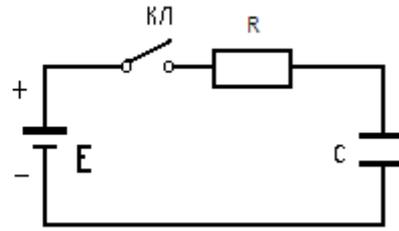


Рис. 2. Схема подключения конденсатора к источнику ЭДС через резистор сопротивлением  $R$

Положим, при  $t=0$ , замыкают ключ КЛ (Рис. 2). Найдем  $U_C$  для  $t \geq 0$ :

$$E = U_R + U_C; \quad U_R = i_C R; \quad i_C = C \frac{dU_C}{dt}; \quad (5)$$

$$E = RC \frac{dU_C}{dt} + U_C \quad (6)$$

Это не однородное линейное дифференциальное уравнение (ДУ) первого порядка. Его решение (функцию  $U_C$ , которую подставим в последнее уравнение и получим тождество) будем искать как сумму частного решения и, решения, соответствующего ему однородного ДУ. Частное решение обозначим как  $U_{ПР}$ , - принужденная составляющая. Решение соответствующего ему однородного уравнения –  $U_{СВ}$ , свободная составляющая.

$$U_C = U_{ПР} + U_{СВ} \quad (7)$$

Если КЛ замкнуть, то при  $t=\infty$  конденсатор зарядится и, получим:  $U_C(\infty)=E$ . Это частное решение:  $U_{ПР}=E$ . Принужденная составляющая определяет, к чему *принудит* внешнее воздействие  $E$  параметр  $U_C$  при  $t=\infty$ .

Решение однородного ДУ определяет  $U_{СВ}$  (7). Имеется ввиду, что цепь *свободна* от внешних воздействий, т. е.  $E=0$  (8).

$$RC \frac{dU_{СВ}}{dt} + U_{СВ} = 0 \quad (8)$$

Используем подстановку Эйлера:

$$U_{СВ} = Ae^{Pt} \quad (9)$$

Если найдем  $A$  и  $P$ , то определим  $U_{СВ}$  и, соответственно,  $U_C$ . Подставим (9) в (8), получим характеристическое уравнение и его корень (10):

$$RC \frac{dAe^{Pt}}{dt} + Ae^{Pt} = 0; \quad RC PAe^{Pt} + Ae^{Pt} = 0; \quad P = -\frac{1}{RC} \quad (10)$$

Для определения  $A$ , воспользуемся начальными условиями задачи.

Будем учитывать свойства конденсатора в переходных процессах (переключениях), которые известны как законы коммутации, описывающие его поведение по величинам напряжения и тока. Такие законы имеются и для катушки индуктивности.

1. В моменты переключений напряжение на конденсаторе не меняется мгновенно, а сохраняет свое предыдущее состояние, а затем плавно изменяется (11):

$$U_C(0_-) = U_C(0_+) \quad (11)$$

0<sub>-</sub> - момент времени перед переключением; 0<sub>+</sub> - сразу после переключения.

2. В моменты переключений ток через конденсатор меняется мгновенно, и может достигать бесконечного значения. Однако провода к конденсатору обладают сопротивлением, поэтому, в реальности, ток будет конечным. Во время переключений конденсатор рассматривают как короткозамкнутый элемент.

При  $t=0$  КЛ замыкается, но до этого  $U_C(0_-)=0$ . Следовательно, (12):

$$U_C(0) = U_{пп}(0) + U_{св}(0) = E + Ae^{-p0} = 0; \quad A = -E; \quad U_{св} = -Ee^{-\frac{t}{RC}} \quad (12)$$

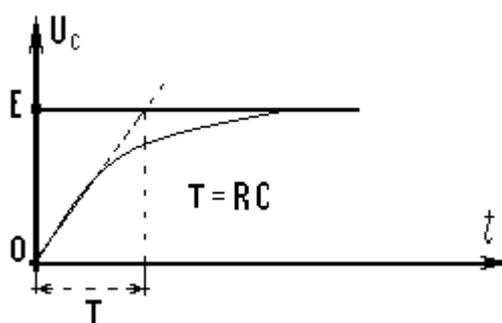
Итак,  $U_C$  для  $t \geq 0$ :

$$U_C = E - Ee^{-\frac{t}{RC}} = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}); \quad U_C = E(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (13)$$

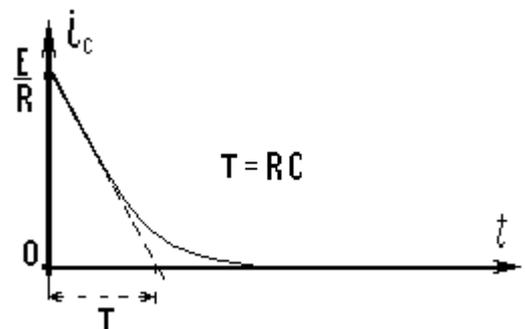
$T=RC$  - приблизительно, время зарядки конденсатора. Если  $t=T$ , то  $U_C/E = 0,637$ . Боле точнее,  $T=RC$  - это время от начала зарядки конденсатора до значения 0,637 от максимальной величины  $E$ .

График заряда конденсатора приведен на Рис. 3 а. Зная  $U_C$ , найдем  $i_C$  (14). График  $i_C$  представлен на Рис. 3 б.

$$i_C = C \frac{dU_C}{dt} = C \frac{d \left[ E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \right]}{dt} = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}}; \quad i_C = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{T}} \quad (14)$$



а)



б)

Рис. 3. Графики изменений напряжения - а); и тока - б) на конденсаторе при его подключении к батарееке напряжением  $E$ .

Постоянную зарядку конденсатора  $T$  можно, приблизительно, определить графически, на основе построения касательной к графику Рис.3 а), б).

Прибор, который позволяет наблюдать процесс зарядки конденсатора – осциллограф. Он может отображать график функции (13) и позволяет измерять напряжение, время и, напряжение во времени. Если для исследования использовать схему Рис.2, то после замыкания ключа КЛ произойдет зарядка конденсатора и на нем установится напряжение  $E$  (Рис. 3 а). Процесс зарядки будет кратковременным и за это время невозможно провести измерение данных эксперимента, так как современные резисторы и конденсаторы таковы, что медленная зарядка может составлять единицы секунд. Проще организовать зарядку конденсатора в мС или мкС. Но, чтобы на экране осциллографа видеть зарядку этого элемента, необходимо его периодически разряжать и заряжать. Эту идею можно реализовать, если вместо схемы Рис. 2 использовать схему Рис. 4.

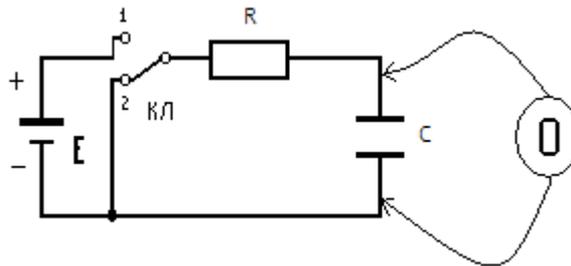


Рис. 4. Схема для осциллографического наблюдения процесса заряда/разряда конденсатора

Процесс переключения следует проводить с частотой, которая соответствовала бы постоянной времени  $T=RC$ , или, с частотой, близко кратной  $1/T$ . Инерционность зрения глаз не сможет ощущать переключения и тогда на экране осциллографа будет заряд/разряд конденсатора. Как будет изменяться напряжение  $U_C$ , когда ключ КЛ перейдет в положение 2 (Рис. 4)? Считаем, что в положении 1 КЛ конденсатор зарядился до напряжения  $E$ .

Состояние цепи будет описываться тем же уравнением (6), с той разницей, что  $E=0$ , то есть, уравнение (6) примет вид (15):

$$RC \frac{dU_C}{dt} + U_C = 0 \quad (15)$$

Оно по форме совпадает с (8).

Используем тот же алгоритм решения, что и для (6), получим (16):

$$U_C = U_{ПР} + U_{СВ}; \quad U_{ПР} = U_C(\infty) = 0; \quad U_C = U_{СВ}; \quad (16)$$

$U_{ПР} = 0$ , так как после замыкания КЛ в положение 2 конденсатор разрядится и при  $t \rightarrow \infty$   $U_C = 0$ . Для определения  $U_{СВ}$  воспользуемся, еще раз, подстановкой Эйлера (9). Подставляя (9) в (15) найдем характеристическое

уравнение, соответствующее нашему ДУ и его корень  $P$ . Вполне очевидно, что он совпадает с (10). Получим (17):

$$P = -\frac{1}{RC} \quad (17)$$

Что касается  $A$ , то оно будет другим, поскольку изменились начальные условия задачи. В момент переключения ( $t=0$ ), с учетом законов коммутации для конденсатора (в моменты переключений он сохраняет свое предыдущее состояние по напряжению), получим (18):

$$E = Ae^{p \cdot 0} + 0; \quad A = E \quad (18)$$

И тогда, (16) примет вид (19):

$$U_C = U_{CB} = Ee^{-\frac{t}{RC}} \quad (19)$$

График разряда конденсатора ( $U_{вх} = 0$ ) приведен на Рис. 5.

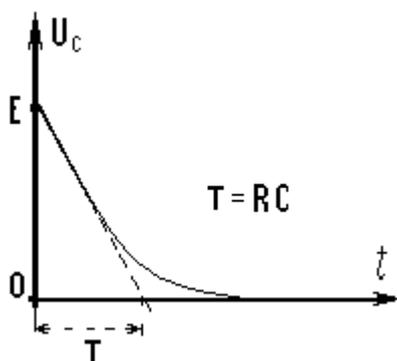


Рис. 5. График разряда конденсатора при переключении ключа КЛ в положение 2

Ключ КЛ (Рис. 4) можно «автоматизировать», если на вход  $RC$  – цепочки (Рис. 7) подавать прямоугольные импульсы (Рис. 6). Время  $t_1$  – соответствует состоянию ключа КЛ -1 (Рис. 4);  $t_2$  – 2.

Техника электроники позволяет организовать сигнал Рис. 6, с частотами, позволяющими наблюдать зарядку/разрядку конденсатора. Эти приборы – генераторы прямоугольных импульсов (ГПИ). В схеме Рис. 2 исключим источник ЭДС и на вход цепи (Рис. 7) будем подавать прямоугольные импульсы (Рис. 6), имитирующие переключение ключа КЛ (Рис. 4).

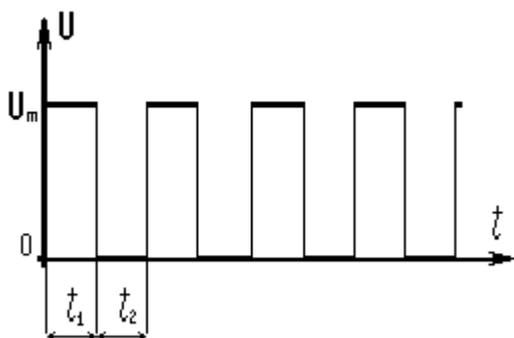


Рис. 6 Прямоугольные импульсы

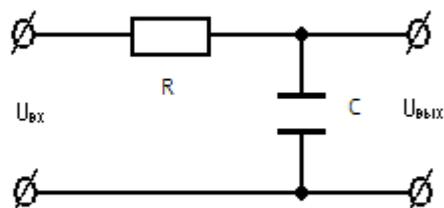


Рис. 7. RC – цепь

## Стенд для определения емкости конденсатора

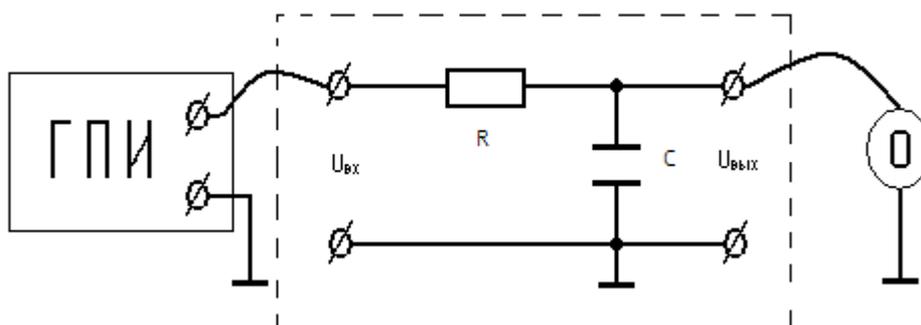


Рис. 8. ГПИ – генератор прямоугольных импульсов; О – осциллограф;  
RC – цепь

### Порядок выполнения работы

1. Соберите стенд Рис. 8. ГПИ, О, RC-цепь должны иметь общую «землю» - провод нулевого потенциала.

2. Включите тумблеры ВКЛ генератора и осциллографа. Проконтролируйте, чтобы в осциллографе:

- канал, который используете для исследований, был включен (найдите на панели прибора кнопки подключения каналов и включите необходимый);

- была включена синхронизация канала, который Вы используете для исследований (в цифровом осциллографе (ЦО) эта операция реализуется автоматически);

3. Проконтролируйте, чтобы в ГПИ:

- провод, идущий на RC – цепь, был подключен ко выходу прямоугольных импульсов;

- регулятор плавной регулировки импульсного выходного сигнала генератора (найдите его на передней панели прибора), находился, примерно, в среднем положении;

- переключатель dB (логарифмический делитель выходного напряжения генератора) находился в положении «0». Это означает, что логарифмический делитель напряжения отключен, и регулировка уровня выходного сигнала генератора осуществляется только плавной регулировкой.

4. Установите частоту генерации ГПИ 1кГц; грубую подстройку частоты (время/дел) установите в положение  $10^3$  ( $10^2$ ); а точную (круговая шкала) - 1,0 кГц (10,0 кГц).

5. Получите примерную осциллограмму Рис. 9.



Рис. 9. Процесс заряда/разряда конденсатора, если на вход RC – цепи подавать импульсное напряжение

Для этого подстройте каналы X и Y осциллографа по величинам времени (канал X) и напряжения (канал Y). Что это означает.

Канал Y позволяет измерять вольты. На Y-пластины электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), по паспортным данным, следует подавать напряжение не более  $U_{\max}$ . Если подать на пластины Y синусоидальное напряжение более этой величины, то увидим, лишь часть синусоиды, и трудно будет понять, что за сигнал подан на осциллограф. Если подать очень малый сигнал по напряжению (раз в 100 меньше  $U_{\max}$ ) - не сможем видеть форму сигнала. Это требует согласования величины измеряемого сигнала к величине допустимого напряжения на Y-пластины ЭЛТ. Согласование осуществляется переключателем В/дел или, ВЕРТИК В  $\cap$  мВ, если осциллограф цифровой. Барабанным переключателем включаем между входным разъемом прибора делителя напряжения из резисторов (когда надо уменьшить величину входного напряжения), либо усилители (если входной сигнал имеет маленькую величину).

Переключателем В/дел выберите такое его положение, чтобы на экране отображался график функций (13) и (19) (Рис. 9). У цифрового осциллографа это переключатель ВЕРТИК В  $\cap$  мВ.

Согласование требуется и для пластин – X ЭЛТ. Если период измеряемого сигнала значительно меньше периода переноса луча ЭЛТ (слева – направо), то на экране будет большое количество периодов исследуемого сигнала, которое будет представляться в виде темной сплошной полосы. Если же период исследуемого сигнала значительно больше периода развертки осциллографа, то можем видеть лишь часть синусоиды. Чтобы на экране прибора получить осциллограмму, по которой можно проводить измерения времени, необходимо частоту развертки прибора подстроить к частоте измеряемого сигнала (синхронизировать осциллограф). Иначе будем наблюдать «бегущую» осциллограмму Рис. 9.

Последнее реализуется барабанным переключателем время/дел. Если частота исследуемого сигнала совпадет с частотой развертки X-канала, то на экране увидим один период колебаний. Измерение можно проводить и тогда, когда частота развертки осциллографа будет близко-кратной к частоте измеряемого сигнала. При этом сможем видеть 2, 3, 4 ... периода сигнала. Барабанный переключатель осуществляет грубую подстройку частоты синхронизации; плавная подстройка прово-

дится регулятором «УРОВЕНЬ». В ЦО процедура синхронизации автоматизирована и осуществляется регулятором ...ГОРИЗОНТ  $c \cap \mu c$ .

Установите такой режим работы осциллографа, чтобы на экране наблюдался, примерно, один цикл заряда/разряда конденсатора. Это позволит более точно фиксировать интервалы времени исследуемого процесса.

Добейтесь наибольшей чувствительности осциллографа при измерении напряжения. Осциллограмму можно двигать по измерительной сетке экрана с помощью регуляторов смещения по осям X, Y (разберитесь, как это осуществить). Установите осциллограмму в положение, удобное для измерений (когда начало заряда/разряда конденсатора совпадает с началом координат сетки экрана, которое выбирается произвольно исследователем на экране).

Если у Вас «неподвижная» осциллограмма на экране прибора, будем считать, что Вы научились, в основном, пользоваться приборами лабораторной работы и можете снимать данные для уравнений заряда (13) и разряда (19) конденсатора.

6. На основе графика заряда/разряда конденсатора, осуществите снятие зависимости  $U_C = f(t)$ . Какой из вариантов N (1, 2, 3 или 4) Вам выполнять, согласуйте с преподавателем. Число измерений  $n = 10$ . 5 измерений для заряда конденсатора; 5- для его разряда. Моменты времени 1-10 на осциллограмме выбираете самостоятельно.  $U_{m\text{ вх}}$  – амплитудное значение напряжения импульсов генератора, оно же  $U_m$  на Рис. 6.

7. Данные исследований своего варианта занесите в таблицу.

8. На основе (13) и (19) получите выражения для определения C и найдите их для всех точек n ваших графиков. Далее определите среднее значение  $\langle C \rangle$ .

Таблица результатов исследований конденсатора

N	$U_{\text{вх}}$			Процесс n	Заряд конденсатора (13)					Разряд конденсатора (19)				
	f, кГц	$U_{\text{п вх}},$ В	R, кОм		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,5	15	82	t, мкс										
				$U_C$ , В										
2	1,0	20		t, мкс										
				$U_C$ , В										
3	2,0	25		t, мкс										
				$U_C$ , В										
4	По заданию преподавателя			t, мкс										
				$U_C$ , В										
5	N	По зад. препод.		C, пФ										
6	Среднее значение			$\langle C \rangle$ , пФ										
7	ΔC													

7. По худшему результату из числа  $n=10$  определите погрешность измерения  $\Delta C$  емкости конденсатора. Оцените ее в процентах.

## Контрольные вопросы

1. Что характеризует емкость  $C$  конденсатора?
2. Что есть заряд/разряд конденсатора в  $RC$  – цепи.
3. Математические модели заряда/разряда конденсатора в  $RC$ -цепи.
4. Сущность постоянной времени  $1/RC$  в процессах заряда/разряда конденсатора.
5. Для схемы Рис. 2. Считаем, что замыкание ключа происходит при  $t=0$ . Чему равно  $U_C(0)$ ;  $U_R(0)$ ;  $U_C(\infty)$ ;  $U_R(\infty)$ ;  $i_C(0)$ ;  $i_R(0)$ ;  $i_C(\infty)$ ;  $i_R(\infty)$ .
6. Для схемы Рис. 4. Считаем, что КЛ находился в состоянии 1 и при  $t=0$  переключаем в состояние 2. Чему равно  $U_C(0)$ ;  $U_R(0)$ ;  $U_C(\infty)$ ;  $U_R(\infty)$ ;  $i_C(0)$ ;  $i_R(0)$ ;  $i_C(\infty)$ ;  $i_R(\infty)$ .

## Отчет по работе:

Название.

Цель.

Приборы и оборудование.

Теоретические сведения:

- физическая и математическая модели заряда/разряда конденсатора;
- таблица с результатами измерений и расчетов;
- результат измерения в форме:  $C = \langle C \rangle \pm \Delta C$ .
- выводы.

## Э-17. ИЗМЕРЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

*Цель работы:* развитие навыков и умений электрических измерений магнитного поля, определение горизонтальной компоненты магнитного поля Земли.

*Приборы и оборудование:* лабораторная установка с компасом и катушками Гельмгольца, источник регулируемого постоянного тока, миллиамперметр.

Земля является огромным постоянным магнитом. Ее магнитное поле позволяет с помощью магнитной стрелки определить направление на северный полюс Рис.1. Направление, по которому устанавливается магнитная стрелка в магнитном поле, принимается за направление вектора индукции этого поля. Соответствующий прибор – компас хорошо известен. Он входит в состав лабораторной установки, которая изображена на Рис. 2. Шкала компаса проградуирована в угловых градусах.

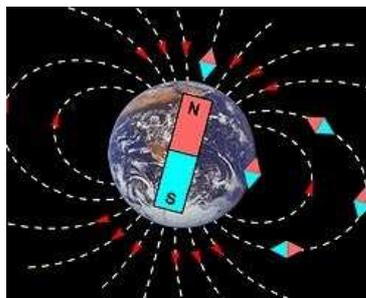


Рис. 1. Линии индукции магнитного поля Земли.

В работе ставится задача измерения не только направления вектора индукции магнитного поля земли, но и его модуля, точнее модуля горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли. С этой целью в состав лабораторной установки входит источник магнитного поля, индукцию которого можно плавно изменять. Для создания магнитного поля используются катушки Гельмгольца. Это пара соосных цилиндрических катушек, разнесенных на некоторое расстояние. Если по катушкам течет одинаковый ток, то в пространстве между ними создается магнитное поле. Вектор индукции этого поля направлен вдоль оси катушек, а модуль индукции определяется следующей формулой (1):

$$B = I \frac{\mu_0 N R^2}{2(R^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

где,  $I$  – ток в катушках;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная,

$N$  – суммарное число витков в катушках (в данной установке  $N=350$ );

$R$  – средний радиус катушек (измеряется по среднему витку катушки);

$h$  – расстояние от центра одной из катушек до точки наблюдения. Точкой наблюдения считается ось стрелки компаса.

Изменяя ток в катушках можно изменять индукцию создаваемого ими магнитного поля. При этом магнитная стрелка, находящаяся в суммарном поле Земли и катушек, будет поворачиваться в направлении их суммарного вектора индукции. Таким образом, по углу поворота мы имеем возможность сравнить величины индукции поля Земли и катушек.



Рис. 2. Лабораторный стенд для определения индукции горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Расположить установку таким образом, чтобы векторы индукций магнитных полей Земли и катушек Гельмгольца были взаимно перпендикулярны.
2. Включить питание установки. Регулируя ток катушек и наблюдая за поворотом стрелки компаса, добиться равенства модулей магнитной индукции поля земли и катушек.
3. С помощью линейки измерить размеры установки, необходимые для расчета по формуле (1).
4. Рассчитать, используя (1) индукцию поля катушек, которая по постановке опыта равна индукции горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

5. Основная погрешность проведенного измерения обусловлена, в основном, неточностями измерения размеров установки. Полагая, что  $R$  и  $h$  определены с относительной погрешностью 0.1, вычислить относительную погрешность измерения результата.

### **Контрольные вопросы**

1. Обоснуйте значение угла поворота стрелки, при котором вычислялась индукция поля катушек в лабораторной работе.
2. Какую величину и по какой формуле определяет закон Био-Савара-Лапласа.
3. Выведите формулу для расчета индукции магнитного поля, созданного круговым током на его оси.

### **Отчет по работе:**

Название.

Цель.

Приборы и оборудование.

Теоретические сведения:

- описание физической модели установки по определению горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли;
- математическая модель и основные параметры установки для определения горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли;
- письменный ответ на 2 и 3 контрольные вопросы;
- выводы.

Учебное издание

Составители:

Величко Любовь Алексеевна  
Ворсин Николай Николаевич  
Маркевич Константин Михайлович

## **ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**

Методические указания  
к выполнению лабораторных работ по физике  
для студентов технических специальностей  
дневной и заочной форм обучения

Часть II

Ответственный за выпуск: Величко Л.А.  
Редактор: Боровикова Е.А.  
Компьютерная верстка: Соколюк А.П.  
Корректор: Никитчик Е.В.

---

Подписано к печати 07.01.2019. Формат 60×84 1/16 Бумага «Performer». Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 1,39. Уч. изд. л. 1,5. Заказ № 1628. Тираж 22 экз. Отпечатано на ризографе  
учреждения образования «Брестский государственный технический университет», 224017,  
г. Брест, ул. Московская, 267