

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

А. С. Чуев, В. Н. Бовенко

**Изучение процессов
зарядки и разрядки конденсатора**

*Методические указания к выполнению
лабораторной работы по курсу общей физики*



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана

2 0 1 6

УДК 537.2
ББК 22.33
Ч-85

Издание доступно в электронном виде на портале *ebooks.bmstu.ru*
по адресу: <http://ebooks.bmstu.ru/catalog/70/book1372.html>

Факультет «Фундаментальные науки»
Кафедра «Физика»

*Рекомендовано Редсоветом МГТУ им. Н.Э. Баумана
в качестве методических указаний*

Рецензент
профессор С. А. Васюков

Чуев, А. С.

Ч-85 Изучение процессов зарядки и разрядки конденсатора : методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу общей физики / А. С. Чуев, В. Н. Бовенко. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. — 18, [2] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4330-7

Изложены основные теоретические сведения о физических процессах зарядки и разрядки конденсатора через резистивное сопротивление. Приведено описание лабораторной установки, даны указания по проведению измерений и обработке их результатов.

Для студентов 2-го курса всех специальностей МГТУ им. Н.Э. Баумана.

УДК 537.2
ББК 22.33

ISBN 978-5-7038-4330-7

© МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016

Предисловие

Процессы зарядки и разрядки конденсатора относятся к классическим примерам, изучаемым в начальный период освоения законов электромагнетизма. При проведении лабораторной работы студенты знакомятся с основными физическими величинами теории электричества: *электрический заряд, потенциал, напряженность, электрическое напряжение, сила и плотность тока, электрическое сопротивление и проводимость, электрическая емкость, энергия и мощность*. Изучаемые процессы обладают наглядностью, что делает их доступными для понимания и усвоения.

Цель лабораторной работы — закрепление теоретических знаний в области законов постоянного электрического тока и приобретение практических навыков в обращении с современными электроизмерительными приборами.

По результатам успешного выполнения лабораторной работы студенты будут:

- *знать* основные физические законы цепей постоянного электрического тока и переходных процессов в цепях с RC -элементами;
- *уметь* получать, структурировать и обрабатывать экспериментальные данные с привлечением статистических методов; представлять результаты опытов в наглядной и доходчивой форме; формулировать выводы о выполненной работе;
- *владеть* методикой измерения статических и изменяющихся параметров в электрических цепях с источниками постоянного тока.

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Суммарная электрическая энергия системы изолированных проводников, несущих заряды q_i , определяется выражением

$$W = \frac{1}{2} \sum_i q_i \Phi_i.$$

Потенциал Φ_i каждого проводника зависит от его заряда q_i , геометрических параметров, а также от электрической индукционной связи с другими проводниками. Индукционная электрическая связь i -го проводника с потенциалом j -го проводника является линейной. Связь *заряда с потенциалом* можно описать выражением

$$q_i = \sum_j C_{ij} \Phi_j,$$

где коэффициенты C_{ii} и C_{ij} зависят от формы и взаимного расположения проводников.

Величины C_{ii} называют *коэффициентами емкости*, а величины C_{ij} ($i \neq j$) — *коэффициентами электростатической индукции* между i -м и j -м проводниками. Коэффициент C_{ij} определяет заряд на i -м проводнике, когда потенциал j -го равен Φ_j , а все остальные проводники заземлены. Для коэффициентов C_{ij} всегда справедливо соотношение $C_{ii} > 0$, $C_{ij} = C_{ji} < 0$ ($i \neq j$). В частности, если имеется всего один проводник, то $q = C\Phi$, где C — емкость, которая всегда положительна.

Между двумя изолированными друг от друга проводниками с зарядами q_1 и q_2 возникает некоторая разность потенциалов $\Delta\Phi$, зависящая от значений зарядов, диэлектрической проницаемости среды и геометрии проводников. При переносе заряда q от одного проводника к другому величина $\Delta\Phi$ будет изменяться прямо пропорционально заряду. Это справедливо для проводников любой геометрической формы, следовательно, можно ввести понятие

взаимной емкости C как физической величины, численно равной заряду, который нужно перенести с одного проводника на другой для того, чтобы изменить разность потенциалов между ними на единицу:

$$C = \frac{q}{\Delta\phi}.$$

В системе СИ единица емкости называется фарад (Ф).

Существуют системы проводников, в которых электрическое поле оказывается сосредоточенным (локализованным) лишь в некоторой области пространства, при этом заряды проводников одинаковы по модулю и противоположны по знаку: $|q_1| = |-q_2| = q$. Такие системы называют конденсаторами, а проводники, составляющие конденсатор, — обкладками. Емкость конденсатора является взаимной емкостью его обкладок. Конденсаторы служат накопителями электрической энергии.

Простейший конденсатор представляет собой систему двух плоских проводящих пластин, расположенных параллельно друг другу на малом по сравнению с размерами пластин расстоянии и разделенных слоем диэлектрика. Такой конденсатор называют плоским.

Исходя из условия однородности электрического поля, значение емкости плоского конденсатора можно вычислить как

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d},$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками; ϵ_0 — электрическая постоянная; S — площадь каждой обкладки; d — расстояние между обкладками.

Зарядка конденсатора. Рассмотрим цепь, показанную на рис. 1. Она содержит конденсатор емкостью C , резистор сопротивлением R и источник постоянного тока, электродвижущая сила (ЭДС) которого равна E , а внутреннее сопротивление — r_0 . Внутреннее сопротивление источника r_0 и сопротив-

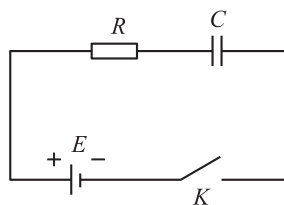


Рис. 1. Электрическая схема при зарядке конденсатора

ление амперметра на рис. 1 не показаны вследствие малости их значений и ничтожного влияния на изучаемые процессы.

Пусть при разомкнутом ключе K конденсатор C разряжен (обе обкладки конденсатора имеют одинаковый потенциал $\varphi_1 = \varphi_2$). При замыкании ключа K в момент времени $t = 0$ по цепи потечет ток и конденсатор начнет заряжаться. По мере накопления заряда на обкладках конденсатора появится разность потенциалов $U = \varphi_1 - \varphi_2$.

Как накопление заряда, так и изменение разности потенциалов на обкладках конденсатора происходят не мгновенно, а за некоторый конечный промежуток времени. Найдем закон изменения во времени разности потенциалов U на конденсаторе при его зарядке.

При зарядке конденсатора схема, изображенная на рис. 1, представляет собой замкнутую цепь, к которой можно применить закон Ома:

$$I(R + r_0) + U = E. \quad (1)$$

Так как заряд на обкладке конденсатора равен $q = CU$,

$$I = \frac{dq}{dt} = C \frac{dU}{dt}. \quad (2)$$

На основе уравнений (1) и (2) можно записать

$$(R + r_0)C \frac{dU}{dt} = E - U.$$

Разделяя переменные и интегрируя данное дифференциальное уравнение, получаем

$$\ln(E - U) = B_1 - \frac{t}{(R + r_0)C}. \quad (3)$$

Постоянную интегрирования B_1 найдем из начальных условий. При $t = 0$ $U = 0$, поэтому

$$B_1 = \ln E. \quad (4)$$

С учетом выражения (4) уравнение (3) примет вид

$$\ln\left(\frac{E - U}{E}\right) = -\frac{t}{(R + r_0)C}. \quad (5)$$

Потенцируя уравнение (5), окончательно получаем

$$U = E \left[1 - \exp \left(- \frac{t}{(R + r_0)C} \right) \right]. \quad (6)$$

Разрядка конденсатора. Теперь рассмотрим электрическую цепь, изображенную на рис. 2. Пусть в момент времени начала разрядки конденсатора $t = 0$ разность потенциалов на его обкладках равна U_0 (конденсатор заряжен). При замыкании ключа K по цепи потечет ток и конденсатор начнет разряжаться. Закон Ома для рассматриваемой цепи (ключ K замкнут) имеет вид

$$IR + U = 0. \quad (7)$$

Учитывая соотношение (2), перепишем выражение (7) как

$$RC \frac{dU}{dt} + U = 0. \quad (8)$$

Разделяя переменные и интегрируя, получаем

$$\ln U = - \frac{t}{RC} + B_2. \quad (9)$$

Постоянную интегрирования B_2 найдем из начальных условий. При $t = 0$ $U = U_0$, поэтому

$$B_2 = \ln U_0. \quad (10)$$

Следовательно,

$$\ln U = \ln U_0 - \frac{t}{RC}. \quad (11)$$

Потенцируя уравнение (11), окончательно получим

$$U = U_0 \exp \left(- \frac{t}{RC} \right). \quad (12)$$

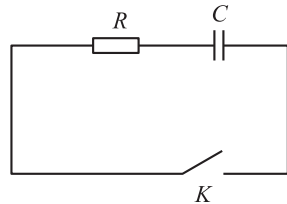


Рис. 2. Электрическая схема при разрядке заряженного конденсатора

Теоретическая зависимость силы разрядного тока от времени, записанная в экспоненциальной форме, имеет вид

$$I(t) = \frac{U_0}{R} \exp\left(-\frac{t}{RC}\right). \quad (13)$$

Сила тока в схеме заряда конденсатора (см. рис. 1) будет изменяться по аналогичному закону, если внутреннее сопротивление источника r_0 пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением R , т. е.

$$I(t) = \frac{E}{R} \exp\left(-\frac{t}{RC}\right). \quad (14)$$

Проанализируем полученные результаты, т. е. уравнения (6), (12)–(14).

1. Как зарядка, так и разрядка конденсатора происходят по экспоненциальному закону, а разность потенциалов на обкладках конденсатора асимптотически стремится к некоторому предельному значению. Такой процесс изменения физической величины называют аperiодическим.

2. Для случая зарядки конденсатора $I(0) = \max$; $U(0) = 0$; при $t \rightarrow \infty$ $I(t) \rightarrow 0$, а $U(t) \rightarrow E$.

3. При разрядке конденсатора $I(0) = \max$; $U(0) = \max$; при $t \rightarrow \infty$ $I(t) \rightarrow 0$, а $U(t) \rightarrow 0$.

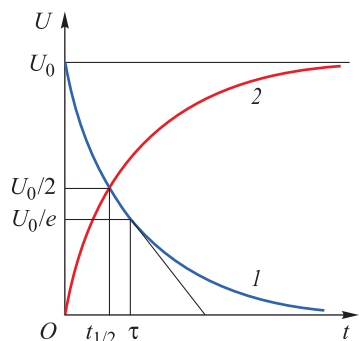


Рис. 3. Кривые зарядки (1) и разрядки (2) конденсатора

4. Как при зарядке, так и при разрядке конденсатора разность потенциалов на его обкладках зависит от одних и тех же величин, а именно от емкости конденсатора C , сопротивления R в цепи и времени t , прошедшего от начала зарядки или разрядки.

Графики функций (6) и (12), т. е. кривые изменения напряжения на конденсаторе, изображены на рис. 3.

5. Произведение $(R + r_0)C$ при зарядке конденсатора или RC при его разрядке, имеющее размерность времени, называют постоянной времени цепи и обозначают буквой τ . Постоянная времени цепи равна времени, которое необходимо, чтобы напряжение на конденсаторе изменилось в e раз. Постоянная времени не зависит от времени и определяется на графике функции как подкасательная экспоненты (проекция на ось времени касательной в любой точке экспоненты, см. рис. 3). Это свойство позволяет определить постоянную времени RC -цепи графически, не проводя расчетов.

6. Постоянная времени цепи характеризует скорость зарядки и разрядки конденсатора. Действительно, при $RC = 0$ изменение напряжения на конденсаторе будет происходить почти мгновенно; при $RC = \infty$ процесс зарядки или разрядки конденсатора продлится бесконечно долго.

СХЕМА И ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Общий вид приборов и состав оборудования лабораторной установки показан на рис. 4, принципиальная электрическая схема установки приведена на рис. 5.



Рис. 4. Общий вид и состав оборудования лабораторной установки

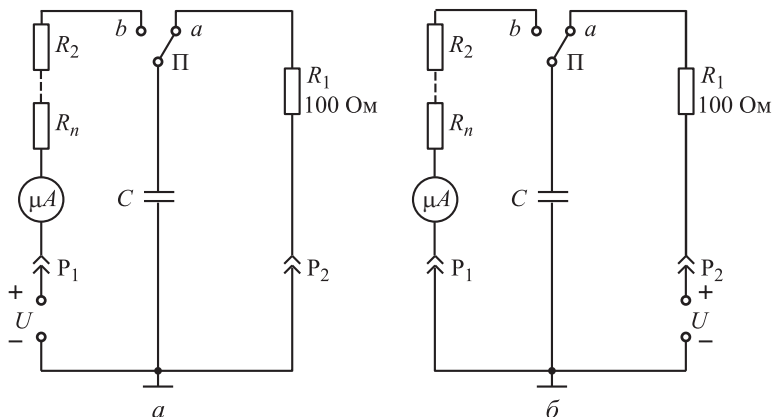


Рис. 5. Схемы соединений элементов лабораторной установки для изучения зарядки (а) и разрядки (б) конденсатора

В схеме, изображенной на рис. 5, а, конденсатор C первоначально разряжен шунтирующим сопротивлением R_1 . При переводе переключателя Π из положения a в положение b конденсатор C заряжается через сопротивления $R_1 \dots R_n$ и микроамперметр μA , который измеряет текущий в цепи зарядный ток конденсатора.

В схеме, показанной на рис. 5, б, конденсатор C первоначально заряжен от источника напряжения U через сопротивление R_1 . При переводе переключателя Π из положения a в положение b конденсатор C разряжается через сопротивления $R_1 \dots R_n$ и микроамперметр μA , который измеряет разрядный ток конденсатора.

Преобразование этих схем из одной в другую осуществляется перестыковкой разъемов P_1 и P_2 .

Примечание. Силу тока можно также измерять с помощью вольтметра, зашунтированного сопротивлением 1 кОм. В этом случае показания в милливольтгах (мВ) будут соответствовать силе тока в микроамперах (мкА).

ЗАДАНИЕ

1. Изучить характер измерения зарядного и разрядного токов конденсатора в зависимости от времени при неизменных параметрах схемы (R , C , U).

2. Исследовать влияние на процесс зарядки изменения емкости C при неизменных значениях напряжения U и сопротивления R .

3. Изучить влияние на зарядный ток конденсатора изменений напряжения U и сопротивления R (емкость конденсатора не изменять).

4. Составить уравнения, описывающие процессы зарядки и разрядки конденсатора во времени и в зависимости от измеренных величин, построить экспериментальные графические зависимости и оценить погрешности проводимых измерений.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать требуемую схему экспериментальной установки согласно рис. 5 (на соединения, показанные на рис. 4, не обращать внимания). **Не допускать подключения микроамперметра к источнику питания без последовательно включенных высокоомных резисторов!**

2. Выполнить измерения значений зарядного и разрядного токов емкости в зависимости от времени при определенных значениях приложенного напряжения и зарядного сопротивления ($U = 9$ В, $R = 2,0$ МОм). Измерения проводить одно- или многократным подключением цепи зарядки или разрядки конденсатора с фиксацией показаний микроамперметра через определенные интервалы времени, отсчитываемые ручным секундомером. Результат быстропротекающих процессов фиксировать как среднее значение из нескольких измерений. Измерения выполнять последовательно от максимального значения I_{\max} до уровня $0,1I_{\max}$.

Результаты представить в табличной форме по типу табл. 1 и 2. Допускается выбор других значений сопротивления, общего для табл. 1 и 2, значений емкостей конденсаторов и моментов времени измерения зарядного и разрядного токов.

Таблица 1

**Зарядный и разрядный ток конденсаторов, мкА,
в различные моменты времени ($U = 9 \text{ В}$, $R = 2,0 \text{ МОм}$)**

C, мкФ	t, с								
	20	40	60	80	100	...	200	220	240
<i>Зарядка конденсаторов</i>									
60									
30									
<i>Разрядка конденсаторов</i>									
60									
30									

Таблица 2

**Зарядный и разрядный ток конденсаторов, мкА,
в различные моменты времени ($U = 9 \text{ В}$, $R = 2,0 \text{ МОм}$)**

C, мкФ	t, с									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
<i>Зарядка конденсаторов</i>										
4,7										
1,0										
<i>Разрядка конденсаторов</i>										
4,7										
1,0										

3. Определить зависимость начального зарядного тока I_0 от значений зарядного сопротивления и напряжения источника питания. Емкость конденсатора в опытах не изменять.

Значения сопротивлений устанавливать равными 1, 2, 3 и 4 МОм при одном и том же напряжении. Значения зарядного напряжения устанавливать равными 2, 4, 6 и 8 В при одном и том же выбранном сопротивлении. Результаты измерений занести в табл. 3.

Таблица 3

Начальный зарядный ток конденсатора, мкА, для различных значений зарядного сопротивления и напряжения источника

$U = 9 \text{ В}; C = 30 \text{ мкФ}$					$R = 2 \text{ МОм}; C = 30 \text{ мкФ}$				
R, МОм	1	2	3	4	U, В	2	4	6	8
I_0 , мкА					I_0 , мкА				

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным табл. 1 и 2 построить зависимости силы тока заряда и разряда от времени для различных значений емкости, используя равномерную и полулогарифмическую шкалы. Графически определить постоянную времени для двух вариантов цепи.

Вид экспериментальных зависимостей $I(t)$ при использовании различных масштабов по оси значений силы тока показан на рис. 6 (точками обозначены экспериментальные данные, линиями — аппроксимирующие зависимости).

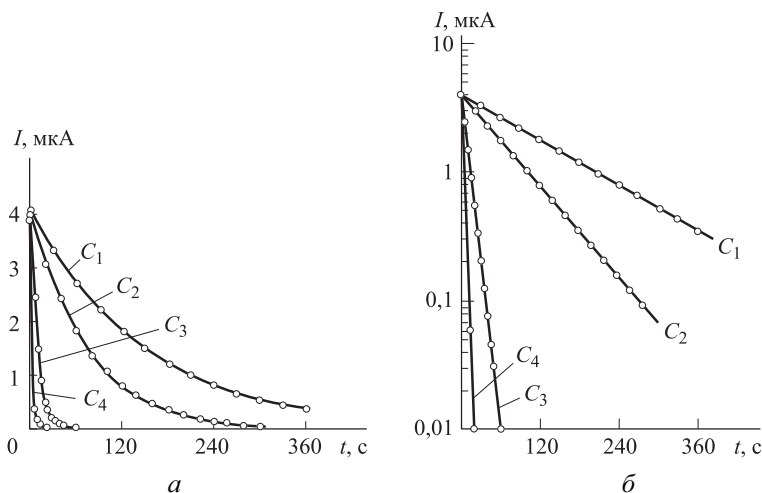


Рис. 6. Зависимости зарядного тока от времени для различных значений емкости конденсатора при использовании равномерной (а) и полулогарифмической (б) шкал:

$C_1 = 60 \text{ мкФ}$, $C_2 = 30 \text{ мкФ}$, $C_3 = 4,7 \text{ мкФ}$, $C_4 = 1,0 \text{ мкФ}$

2. Для одного варианта опытов по данным табл. 1 построить полулогарифмическую зависимость напряжения (произведения тока, протекающего через конденсатор, на разрядное сопротивление) от времени (рис. 7) с обозначением интервала изменений измеренных значений в пределах минимального и максимального углов наклона прямых.

По зависимостям определить минимальное и максимальное значения постоянной времени цепи $\tau = RC$. Значение τ определя-

ется углом наклона прямых (см. рис. 7). Формула для определения постоянной времени цепи выводится из соотношения (11):

$$\tau = \frac{|t_1 - t_2|}{|\ln U_0 - \ln U|}.$$

3. Построить зависимости тока от сопротивления и напряжения по данным табл. 3. Для зависимости тока I_0 от сопротивления выбрать логарифмический масштаб зависимости, для зависимости тока от зарядного напряжения емкости — полулогарифмический. Отметим, что начальное значение зарядного тока I_0 от емкости C не зависит. Примерный вид зависимостей показан на рис. 8 (точками обозначены экспериментальные данные, линиями — аппроксимирующие зависимости).

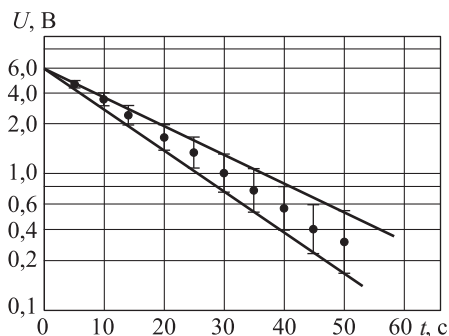


Рис. 7. Зависимость напряжения от времени при разрядке конденсатора

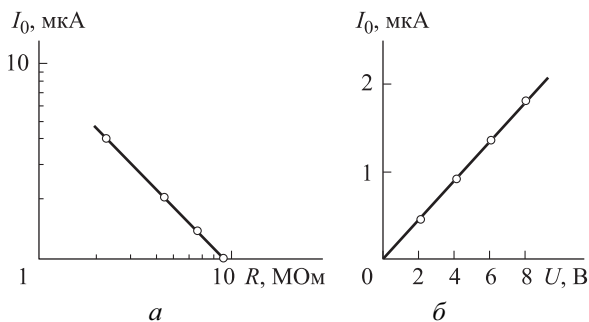


Рис. 8. Примерный вид зависимостей $I_0(R)$ (а) и $I_0(U)$ (б)

По результатам табл. 4 использовать полулогарифмический масштаб. Примерный вид зависимостей показан на рис. 9 (здесь +, ○, ●, ▲ — экспериментальные точки, линиями обозначены аппроксимирующие зависимости).

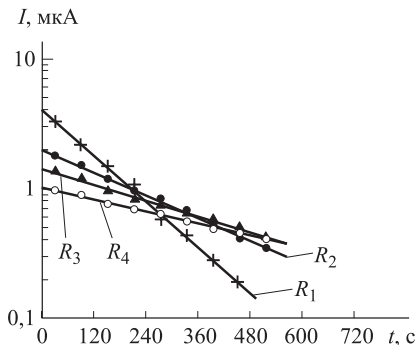


Рис. 9. Зависимость зарядного тока конденсатора от времени при различных значениях сопротивления: $R_1 = 1 \text{ МОм}$, $R_2 = 2 \text{ МОм}$, $R_3 = 3 \text{ МОм}$, $R_4 = 4 \text{ МОм}$

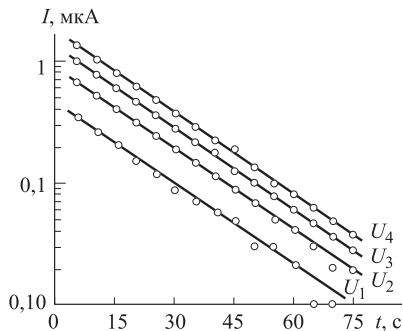


Рис. 10. Зависимость зарядного тока конденсатора от времени при различных значениях напряжения: $U_1 = 2 \text{ В}$, $U_2 = 4 \text{ В}$, $U_3 = 6 \text{ В}$, $U_4 = 8 \text{ В}$

4. По результатам табл. 5 построить зависимости $I(t)$ для различных значений зарядного напряжения U при одних и тех же значениях емкости и сопротивления. Примерный вид зависимостей представлен на рис. 10 (точками обозначены экспериментальные данные, линиями — аппроксимирующие зависимости). По данным линиям, имеющим одинаковый наклон, определить экспериментальное значение сопротивления зарядного резистора и оценить погрешность этого определения, отталкиваясь от действительного значения сопротивления резистора.

ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Форма отчета о лабораторной работе должна соответствовать общепринятым на кафедре физики требованиям. Предварительный отчет, подготавливаемый студентом до выполнения лабораторной работы, должен содержать: наименование и номер лабораторной работы, краткое изложение цели работы, основные теоретические сведения по теме лабораторной работы, письменный ответ на пять контрольных вопросов (по выбору студента), схему лабораторной установки с обозначениями и расшифровкой позиций, заготовки таблиц для размещения данных. Окончательный отчет должен включать раздел по обработке экспериментальных данных, в котором выполнены все необходимые расчеты, и заключение или выводы о работе. Выводы о работе должны отражать достижение поставленных целей и формулироваться студентом самостоятельно.

Результаты выполнения заданий 1–4 следует приводить в виде таблиц и графических зависимостей, выполненных на миллиметровой бумаге. При обработке результатов эксперимента нужно давать сравнительную оценку теоретических и экспериментальных зависимостей и причин их расхождения.

ЭТАПЫ КОНТРОЛЯ И ГРАДАЦИЯ ОЦЕНОК

Контроль успешности выполнения лабораторной работы осуществляется в три этапа:

1) *допуск* к лабораторной работе, который заключается в проверке преподавателем наличия у студента предварительно подготовленного отчета и демонстрации им знаний теории по теме лабораторной работы и методике ее выполнения; при отсутствии предварительно подготовленного отчета студент к выполнению лабораторной работы не допускается;

2) *наблюдение* за самостоятельным выполнением студентом лабораторной работы с проверкой правильности записи и разумности значений получаемых результатов;

3) *защита* студентом выполненной лабораторной работы, которая состоит в проверке качества отчета, достоверности получен-

ных результатов, а также ответах на контрольные и дополнительные вопросы преподавателя по теме лабораторной работы.

Лабораторная работа считается защищенной, если за нее начислено 1 и более баллов. Максимальная оценка составляет 3 балла.

Градации оценок за лабораторную работу:

3 — лабораторная работа выполнена в срок и защищена в соответствии с графиком; хорошее качество отчета, полные и правильные ответы на вопросы, задаваемые на защите;

2 — лабораторная работа выполнена в срок, но защищена с нарушением графика, качество отчета удовлетворительное, неполные ответы на вопросы, задаваемые при защите;

1 — лабораторная работа выполнена со значительным нарушением графика без уважительных причин, качество отчета и его содержание неудовлетворительные, неправильные ответы на задаваемые вопросы;

0 — лабораторная работа не выполнена и не защищена.

Защита лабораторной работы проводится в форме устных вопросов и ответов по теме или тестирования. Защита проводится в течение 10 мин, задается не менее трех вопросов. Защита лабораторной работы спустя два месяца с момента ее выполнения не может оцениваться выше одного балла.

Лабораторная работа считается успешно выполненной, если студент ее защитил и получил в сумме не менее двух баллов.

Студенты, допущенные к защите, но не набравшие достаточного минимума баллов, могут быть допущены к повторной защите в сроки, установленные кафедрой.

Контрольные вопросы

1. Назовите единицы измерения и размерности электрических величин, встречающихся в данной работе: емкость, сопротивление, напряжение, сила тока, заряд, электрическая постоянная и др.

2. Как определяется емкость системы конденсаторов при их последовательном, параллельном и смешанном соединениях?

3. Приведите формулу для емкости плоского конденсатора.

4. Приведите формулы, определяющие энергию заряженного конденсатора.

5. Как называется величина RC ? Как найти ее графически? Какова размерность RC в системе СИ?

6. Как изменяется ток во времени при зарядке и разрядке конденсатора?

7. Как изменяются напряжения на конденсаторе и сопротивлении цепи при зарядке и разрядке конденсатора?

8. Какие виды ошибок обуславливают погрешность определения значения постоянной времени цепи? Дайте определение абсолютной и относительной погрешностей.

9. Показать на принципиальной электрической схеме лабораторной установки цепи зарядки и разрядки исследуемого конденсатора.

10. Каковы начальные условия коммутации в цепях, содержащих емкости?

Литература

Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. 9-е изд., испр. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 319 с.

Мартинсон Л.К., Морозов А.Н., Смирнов Е.В. Электромагнитное поле: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 422 с.

Савельев И.В. Курс общей физики: в 5 кн. Кн. 2: Электричество и магнетизм: учеб. пособие для втузов. М.: АСТ, 2006. 336 с.

Содержание

Предисловие	3
Основные теоретические сведения.....	4
Схема и описание лабораторной установки	9
Задание	11
Порядок выполнения работы	11
Обработка полученных результатов измерений	14
Требования к отчету о лабораторной работе.....	17
Этапы контроля и градация оценок.....	17
Контрольные вопросы	18
Литература.....	19

Учебное издание

Чуев Анатолий Степанович
Бовенко Вильян Николаевич

**Изучение процессов
зарядки и разрядки конденсатора**

Редактор *С.А. Серебрякова*
Художник *Я.М. Ильина*
Корректор *Н.В. Савельева*
Компьютерная верстка *С.А. Серебряковой*

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Подписано в печать 16.12.2015. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 50 экз. Изд. № 507-2015. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
baumanprint@gmail.com