

Лабораторная работа Э-103

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАРЯДКИ И РАЗРЯДКИ КОНДЕНСАТОРА

МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра Физики (ФН-4)

А.С. Чуев, В.Н. Бовенко

Введение

Процессы зарядки и разрядки конденсатора относятся к классическим примерам, изучаемым в начальный период освоения законов электромагнетизма. Студенты знакомятся с основными физическими понятиями 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 хорошо доступными для понимания.

Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является приобретение студентами практических навыков проведения экспериментов с использованием современных электроизмерительных приборов. По результатам выполнения лабораторной работы студенты смогут на практике оценить выполнение основных законов в электрических цепях с RC элементами и источниками постоянного тока, исследуют влияние на процессы зарядки и разрядки конденсатора различных факторов. Студенты приобретут навык графического отображения данных, а также их статистической обработки с привлечением корреляционного и регрессионного методов анализа.

Краткая характеристика объекта изучения

Если имеется система изолированных проводников, несущих заряды q_i , то их суммарная электрическая энергия определяется выражением

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

Потенциал φ_i каждого проводника определяется его зарядом q_i , геометрическими параметрами, а также электрической индукционной связью с другими проводниками. Индукционная электрическая связь i - го проводника с потенциалом j – го проводника линейная и определяется выражением

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

где величины 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_i , а все остальные проводники заземлены. Для коэффициентов C_{ij} всегда выполняется соотношение $C_{ii} > 0$, $C_{ij} = C_{ji} < 0 (i \neq j)$. В частности, если имеется один всего один проводник, то $q = C\varphi$, где C – емкость, которая всегда положительна.

Если двум изолированным друг от друга проводникам сообщить заряды q_1 и q_2 , то между ними возникает некоторая разность потенциалов $\Delta\varphi$, зависящая от величин зарядов, диэлектрической проницаемости среды и геометрии проводников. При переносе заряда величиной q от одного проводника к другому величина $\Delta\varphi$ будет изменяться прямо пропорционально. Это справедливо для проводников любой геометрической формы и, следовательно, можно ввести понятие взаимной емкости C как физической величины, численно равной заряду, который нужно перенести с одного проводника на другой для того, чтобы изменить на единицу разность потенциалов между ними:

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi}$$

В системе СИ единица емкости называется фарад (Ф).

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

Простейший конденсатор это система из двух плоских проводящих пластин, расположенных параллельно друг другу на малом по сравнению с размерами пластин расстоянии и разделенных слоем диэлектрика. Такой конденсатор называется плоским.

Значение ёмкости плоского конденсатора, исходя из условия однородности электрического поля, можно вычислить как:

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

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

Зарядка конденсатора. Рассмотрим цепь, показанную на рис.1. Она содержит конденсатор емкостью C , резистор сопротивления R и источник постоянного тока, электродвижущая сила (ЭДС) которого E , а внутреннее сопротивление r_0 . Внутреннее сопротивление источника r_0 , и сопротивление амперметра в схеме рис.1 не показаны из-за малости их значений и малого влияния на изучаемые процессы.

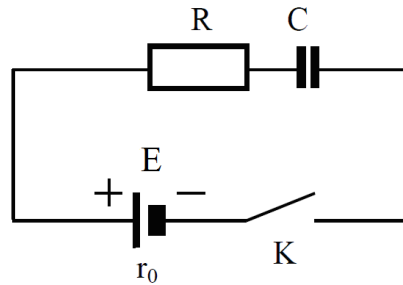


Рис.1. Электрическая схема при заряде конденсатора.

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 происходит не мгновенно, а за некоторый конечный промежуток времени. Найдем закон изменения на конденсаторе разности потенциалов U при его зарядке во времени.

При зарядке схема 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 $q = CU$, то:

$$I = dq / dt = C(dU / dt) \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) определим

$$(R + r_0)C(dU / dt) = E - U (R + r_0).$$

Разделяя переменные и интегрируя данное дифференциальное уравнение, получаем

$$\ln(E - U) = B_1 - t / [(R + r_0)C] \quad (3)$$

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

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

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

$$\ln[(E - U) / E] = -t / [(R + r_0)C] \quad (5)$$

Потенцируя уравнение (5), окончательно получим:

$$U = E(1 - \exp(-t / [(R + r_0)C])) \quad (6)$$

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

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

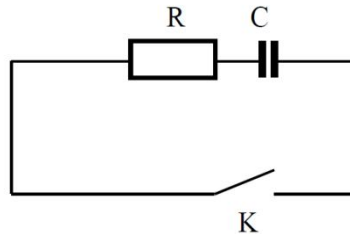


Рис.2. Электрическая схема при разрядке заряженного конденсатора.

Учитывая соотношение (2), перепишем (7)

$$RC(dU / dt) + U = 0 \quad (8)$$

Разделяя переменные и интегрируя, получим

$$\ln U = -t / RC + B_2 \quad (9)$$

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

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

Следовательно,

$$\ln U = \ln U_0 - t / RC \quad (11).$$

После подстановки (10) в (9) и его потенцирования окончательно имеем:

$$U = U_0 \exp(-t / RC) \quad (12)$$

Теоретическая зависимость силы разрядного тока от времени, записанная в показательной форме экспоненты, имеет вид:

$$I(t) = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (13)$$

Сила тока в схеме заряда конденсатора по рис.1 будет подчиняться аналогичному закону изменения, если внутреннее сопротивление источника r_0 будет пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением R .

$$I(t) = \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (14)$$

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

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

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

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

4. Как при зарядке, так и при разрядке разность потенциалов на обкладках конденсаторов 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.

Графически функции (6) и (12), то есть изменение напряжения на конденсаторе, изображены на рис.3.

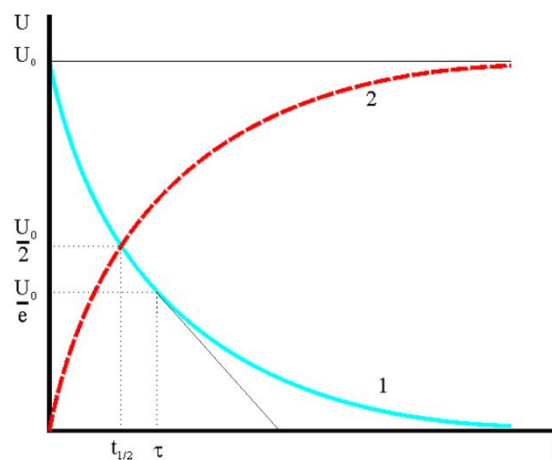


Рис.3. Зарядная и разрядная кривые изменения напряжения на конденсаторе.

5. Произведения $(R+r_0)C$ и RC , имеющие размерность времени, называют постоянной времени цепи и обозначают буквой τ , постоянная времени равна времени, которое необходимо, чтобы напряжение на конденсаторе изменилось в e раз. Постоянная времени не зависит от времени и определяется на графике как подкасательная экспоненты, взятая как проекция на ось времени касательной в любой точке экспоненты (см. рис.3). Это свойство позволяет определить постоянную времени RC - цепи графически, не производя расчетов.

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

Схема и описание лабораторной установки

Общий вид приборов и состав оборудования лабораторной установки приведен на рис.4. Принципиальная электрическая схема установки приведена на рис.5.



Рис.4. Состав оборудования лабораторной установки.

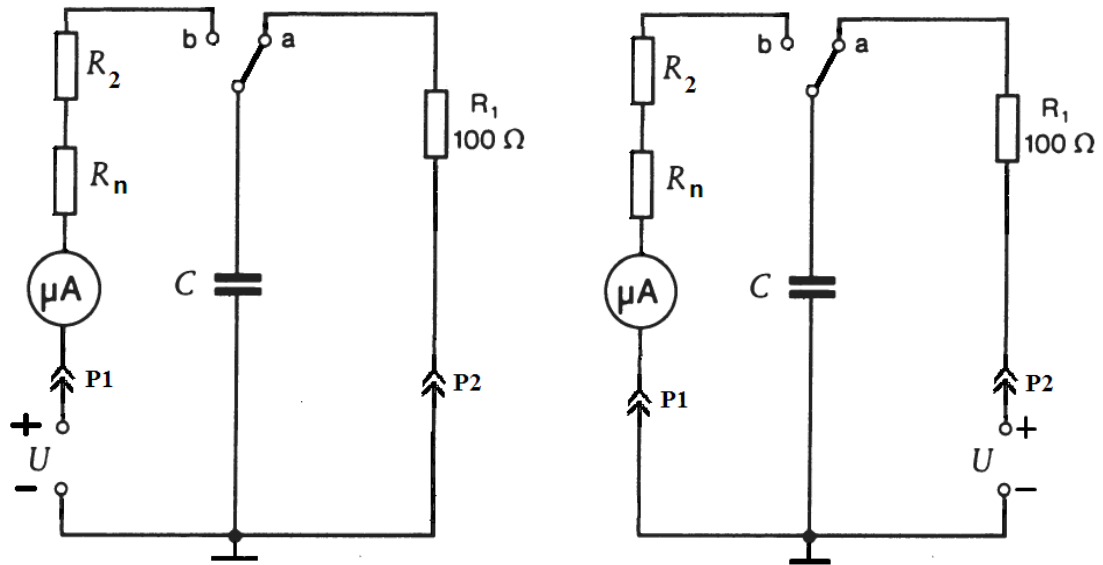


Рис.5. Схемы соединений элементов лабораторной установки для изучения заряда (левая схема) и разряда (правая схема) конденсатора.

ПРИМЕЧАНИЕ: Измерение силы тока можно производить с помощью вольтметра, зашунтированного сопротивлением 1 кОм. В этом случае показания в милливольтмах (мВ) будут соответствовать силе тока в микроамперах (мкА).

Задачи и порядок выполнения работы

1. Изучить характер измерения зарядного и разрядного токов конденсатора в зависимости от времени при неизменных параметрах схемы (R , C , U).
2. Изучить влияние на процесс зарядки изменений емкости C при неизменных параметрах напряжения U и сопротивления R .
3. Изучить влияние на ток зарядки конденсатора изменений напряжения U и сопротивления R (емкость конденсатора не изменять).
4. Записать уравнения, описывающие процессы зарядки и разрядки конденсатора во времени и в зависимости от измеренных величин, построить экспериментальные графики зависимостей и оценить погрешности проводимых измерений.

Порядок выполнения эксперимента

1. Собрать требуемую схему экспериментальной установки согласно рис.5. На соединения рис.4 не обращать внимания. Преобразование одной схемы в другую по рис.5 производить перестыковкой разъемов P1 и P2 на выходе источника питания. Конденсатор C в обеих схемах подключен одинаково. **Нельзя допускать подключения микроамперметра к источнику питания без последовательно включенных высокоомных резисторов!!!**

5. Определить зависимость $I(t)$ для различных значений зарядного напряжения U при одних и тех же значениях емкости и сопротивления, параметры которых выбрать самостоятельно. Результаты измерений занести в таблицу 7 (интервалы времени можно изменять для расширения диапазона измеряемых токов примерно от I_{\max} до $0,1I_{\max}$):

t, c U, B	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
2,0										
4,0										
6,0										
8,0										

6. Обработка полученных результатов опытов.

6.1. По данным таблиц 1-4 построить графики зависимостей 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.

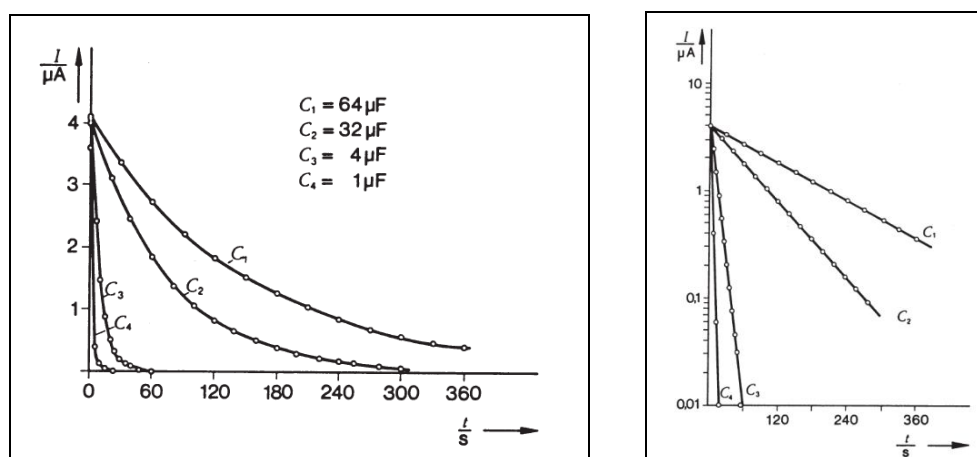


Рис.6. Зависимости зарядного тока от времени для различных емкостей конденсатора.

6.2. Для одного варианта опытов из таблиц 1 или 2 построить полулогарифмический график изменения тока через конденсатор с обозначением интервала изменений измеренных значений в пределах минимального и максимального углов наклона прямых по типу рис.7. По графикам определить минимальное и максимальное значения постоянной времени цепи - $\tau = RC$. Значение τ определяется углом наклона прямых рис. 7. Формула для определения постоянной времени цепи вытекает из соотношения (11):

$$\tau = \frac{|t_1 - t_2|}{|\ln U_0 - \ln U|}. \quad (15)$$

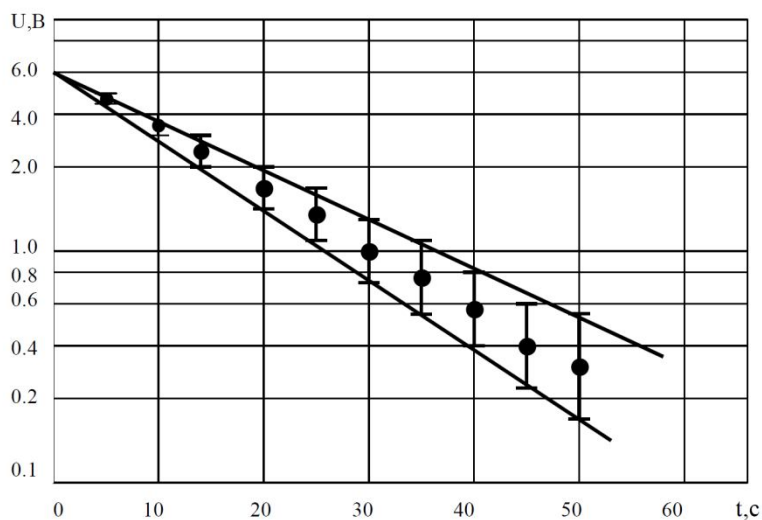


Рис.7. График изменения напряжения на конденсаторе при разряде.

6.3. Построить графики зависимости по результатам таблицы 5. Для зависимости тока I_0 от сопротивления брать логарифмический масштаб графика, для зависимости от емкости полулогарифмический. Отметим, что начальное значение зарядного тока I_0 от емкости C не зависит. Вид графиков приведен на рис.8.

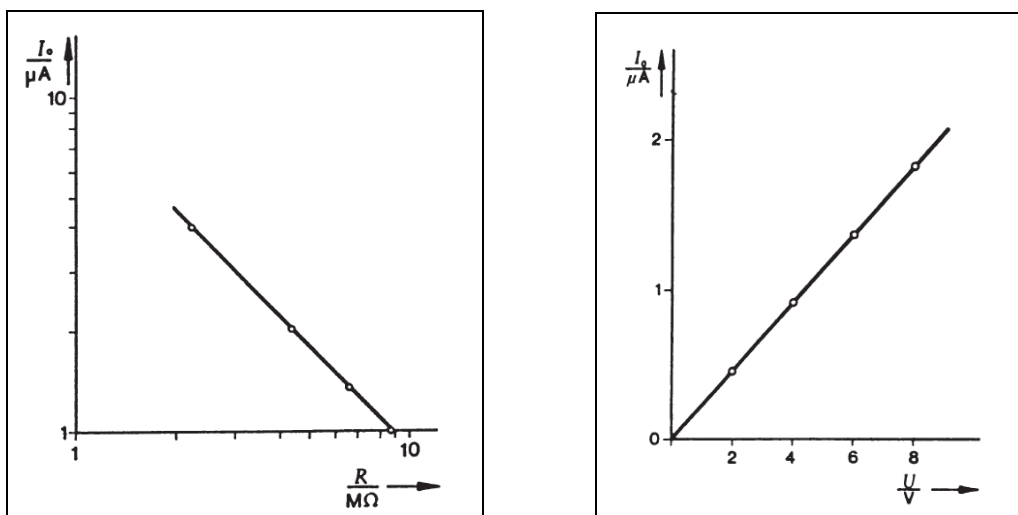


Рис.8. Вид графиков зависимостей $I_0(R)$ и $I_0(U)$.

При обработке результатов измерений по п. 5 использовать полулогарифмический масштаб (примерный вид графиков представлен на рис.9).

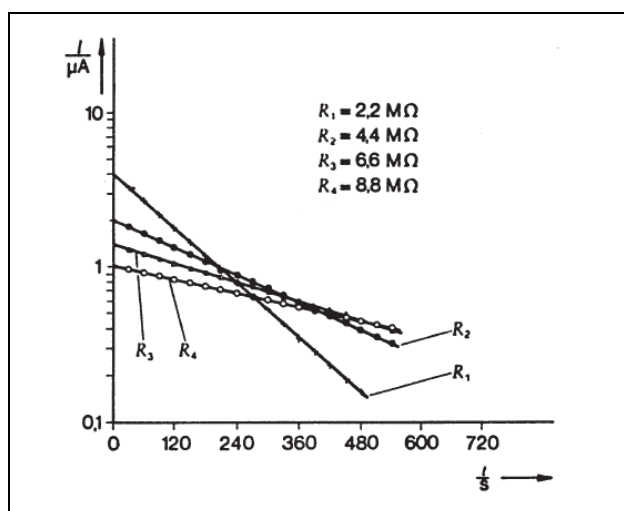


Рис.9. Изменение тока зарядки для различных сопротивлений

6.4. По результатам таблицы 7 построить зависимость $I(t)$ для различных значений зарядного напряжения U при одних и тех же значениях емкости и сопротивления. Вид зависимостей представлен на рис.10. По данным зависимостям, имеющим одинаковый наклон, определите экспериментальное значение сопротивления зарядного резистора и оцените погрешность этого определения, отталкиваясь от действительного значения сопротивления резистора.

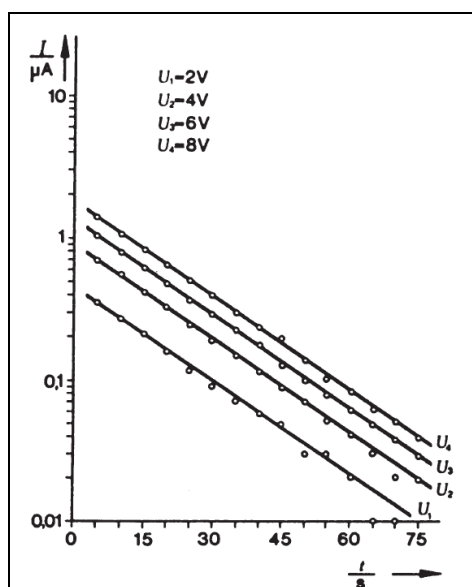


Рис.10. Изменение зарядного тока во времени при различных напряжениях.

Форма отчета по лабораторной работе

Форма отчета по лабораторной работе должна соответствовать общепринятым на кафедре «Физика» требованиям. Предварительный отчет, подготавливаемый студентом до выполнения лабораторной работы, должен включать: наименование и номер лабораторной

работы, краткое изложение цели работы, основные теоретические сведения по теме лабораторной работы, письменный ответ на пять контрольных вопросов методички, схему лабораторной установки с обозначениями и расшифровкой позиций, заготовки таблиц для размещения данных. Окончательный отчет должен включать раздел по обработке экспериментальных данных с выполнением необходимых расчетов и заключение или выводы по работе. Выводы должны отражать достижение поставленных целей.

Способы и средства контроля знаний студента

Для допуска к лабораторной работе студент предъявляет преподавателю предварительно оформленный отчет и демонстрирует знание теории по теме лабораторной работы и методике ее выполнения. В качестве средства контроля знаний студентов по данной работе используются следующие контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Знать 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. Формула для определения емкости плоского конденсатора.
4. Формулы для определения энергии заряженной емкости.
5. Как называется величина RC ? Как графически ее найти? 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 заряде и разряде 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?

Оценка выполнения лабораторной работы

В соответствии с балльной рейтинговой системой, действующей на кафедре «Физика», каждая лабораторная работа оценивается в **3 рейтинговых балла**. Итоговая оценка учитывает

уровень подготовки студента к работе, качество ее выполнения, а также качество и своевременность ее защиты.

За допуск к лабораторной работе и ее выполнение – 1 балл. При отсутствии заготовленной формы отчёта или незнании ответов на контрольные вопросы – студент к выполнению лабораторных работ не допускается.

За безошибочное выполнение, качественное оформление и понимание существа лабораторной работы – 1 балл. Если отчет имеет ошибки, неправильно (включая, небрежно) оформлен или студент не понимает существа выполненной работы и не способен объяснить полученные результаты, ставится – **0 баллов**. Студенту, выполнившему лабораторную работу, предоставляется возможность повторного ее выполнения и исправления отчёта.

За защиту лабораторной работы, проводимой в форме устных вопросов и ответов по теме или тестирования (в течение 10 минут, 3 вопроса, мин. оценка – **0 баллов**, макс. оценка – **1 балл**), (при этом студенту предоставляется возможность пройти процедуру защиты повторно). Защита лабораторной работы спустя два месяца с момента ее выполнения не принимается.

Лабораторная работа считается выполненной, если студент её защитил и получил в сумме **не менее 2-х баллов**.

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

Литература основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В 5 кн.: Кн. 2: Электричество и магнетизм: Учеб. пособие для втузов. – М.: «Издат. АСТ». 2006. – 336 с.
2. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. Изд. 9-е испр.– М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2014. – 319 с.
3. Мартинсон Л.К, Морозов А.Н., Смирнов Е.В. Электромагнитное поле: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 422 с.

Литература дополнительная

1. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм: Учеб. пособие. Москва, Высш. Школа, 1983. 463 с.
2. Калашников С.Г. Электричество. Учебное пособие. 5-е изд. Москва, Наука, Главная редакция Ф-МЛ, 1985. (Общий курс физики), 576 с.
3. Беззубов Ю.И. Изучение процессов зарядки и разрядки конденсатора: Метод. указания к лабораторной работе Э-3 по курсу «Общая физика». - М.: МГТУ, 1992. 9 с.

