

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра общей и технической физики

ФИЗИКА

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАРЯДА И РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРА

*Методические указания к лабораторной работе
для студентов всех специальностей
и направлений подготовки бакалавриата*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020

УДК 531/534 (073)

ФИЗИКА. Исследование процессов заряда и разряда конденсатора:
Методические указания к лабораторной работе / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *С.С. Прошкин, В.В. Фицак, М.О. Силиванов*. СПб, 2020. 25 с.

Методические указания к лабораторной работе дают возможность ознакомиться с физическими явлениями, методикой выполнения лабораторного исследования и правилами оформления лабораторных работ. Выполнение лабораторной работы позволит студенту сформировать необходимые компетенции.

Предназначены для студентов всех специальностей и направлений подготовки бакалавриата.

Научный редактор проф. *А.С. Мустафаев*

Рецензент доц. *Н.И. Егорова* (СПбУ ГПС МЧС РФ)

© Санкт-Петербургский
горный университет, 2020

ФИЗИКА

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАРЯДА И РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРА

*Методические указания к лабораторной работе
для студентов всех специальностей
и направлений подготовки бакалавриата*

Сост.: *С.С. Прошкин, В.В. Фицак, М.О. Силиванов*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
общей и технической физики

Ответственный за выпуск *С.С. Прошкин*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 28.05.2020. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,5. Усл.кр.-отт. 1,5. Уч.-изд.л. 1,3. Тираж 150 экз. Заказ 336. С 34.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2

Цель работы: 1. Экспериментальная проверка экспоненциального характера процессов заряда и разряда конденсатора. 2. Экспериментальное определение постоянной времени RC -цепи.

1. Теоретические основы лабораторной работы

1.1. Введение

Опыт показывает, что разные проводники, имеющие одинаковый заряд q , обладают разным потенциалом. При этом увеличение заряда уединенного проводника, вызывает прямо пропорциональное возрастание его потенциала по формуле:

$$q = C\varphi. \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности, равный отношению накопленного на проводнике заряда к его потенциалу, называется *емкостью* (емкостью) проводника:

$$C = \frac{q}{\varphi}. \quad (2)$$

Емкость характеризует способность проводников накапливать электрический заряд и измеряется в фарадах (Ф). Емкость уединенного проводника зависит только от его размеров, формы и диэлектрических свойств окружающей среды и не зависит от заряда на проводнике.

1.2. Конденсатор

В природе практически не существует уединенных проводников, при этом наличие вблизи заряженного проводника других проводящих тел существенно изменяет его емкость.

Рассмотрим электрическое поле, создаваемое заряженным проводником A (рис. 1). Если рядом расположить незаряженный проводник B , то на его поверхности появятся индуцированные заряды. Причем заряды противоположные по знаку заряду проводника A располагаются ближе к проводнику A и, следовательно, оказывают

большее влияние на его потенциал. В связи с этим потенциал проводника A уменьшается, а его емкость, в соответствии с формулой (2), увеличивается.

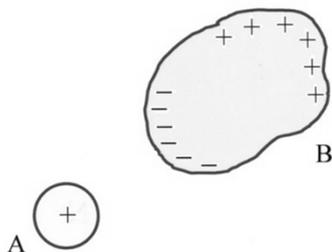


Рис. 1. Возникновение индуцированного заряда

Данное свойство снижения потенциала заряженного тела при приближении к нему другого тела с зарядом противоположного знака используется в **конденсаторах**.

Конденсатором называется система из двух изолированных друг от друга проводников, которые называют **пластинами (обкладками)**, хотя они могут иметь любую форму. Пространство между пластинами может быть заполнено диэлектриком.

В зависимости от конфигурации обкладок различают:

а) плоский конденсатор – систему из двух плоских параллельно расположенных металлических пластин площадью S каждая. Расстояние между пластинами d должно быть много меньше их линейных размеров. В этом случае поле между пластинами можно считать однородным и пренебречь искажениями поля на краях пластин (рис. 2);

б) цилиндрический конденсатор, у которого обкладками служат два коаксиальных цилиндра радиусами R_1 и R_2 и длиной l (рис. 3);

в) сферический конденсатор, обкладки которого представляют собой две концентрические сферы радиусами R_1 и R_2 (рис. 4).

В общем случае обкладки конденсатора могут иметь и другую форму.

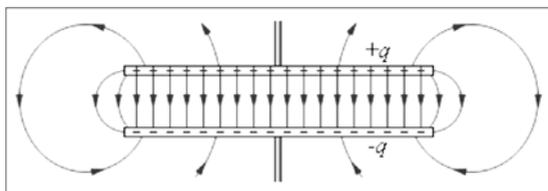


Рис. 2. Электрическое поле плоского конденсатора

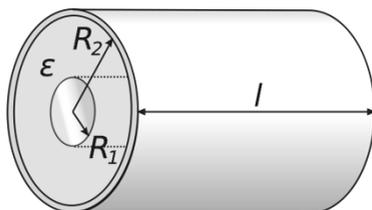


Рис. 3. Цилиндрический конденсатор

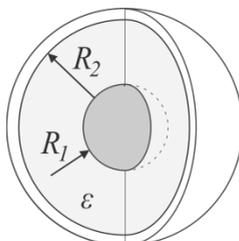


Рис. 4. Сферический конденсатор

Название конденсатор происходит от лат. *condensare* - «уплотнять», «сгущать» или от лат. *condensatio* - «накопление».

В 1745 году в немецком городе Лейдене голландский ученый Питер ван Мушенбрук изобрел конструкцию-прототип электрического конденсатора - «лейденскую банку» (рис. 5).

В энциклопедии Ф.А. Брокгауза и И.А. Ефрона устройство лейденской банки описано следующим образом: «этот конденсатор имеет форму банки, то есть цилиндра с более или менее широким горлом или же просто цилиндра, обыкновенно стеклянного. Банка оклеена внутри и снаружи листовым оловом (наружная и внутрен-

няя обкладки) примерно до 2/3 ее высоты и прикрыта деревянной крышкой. Банка может не иметь внутренней обкладки, но тогда в ней должна быть жидкость, например, вода. Именно так была устроена лейденская банка, когда впервые испытал удар от ее разряда лейденский гражданин Кюнеус».



Рис. 5. Устройство лейденской банки

1.3. Электрическая емкость конденсаторов

Емкостью конденсатора называется величина:

$$C = \frac{q}{U}, \quad (3)$$

где U – разность потенциалов между обкладками конденсатора.

Величина электроемкости конденсатора зависит от формы и размеров обкладок, расстояния между ними и диэлектрических свойств среды, заполняющей пространство между обкладками. Так как электрическое поле конденсатора сосредоточено внутри него, внешние (даже заряженные) тела не оказывают влияния на величину электроемкости конденсатора. В качестве обкладок обычно используется тонкая металлическая фольга, а диэлектрики могут быть твердыми, жидкими и газообразными.

Простейшим конденсатором является *плоский конденсатор*, состоящий из двух плоскопараллельных металлических пластин, линейные размеры которых много больше расстояния между ними.

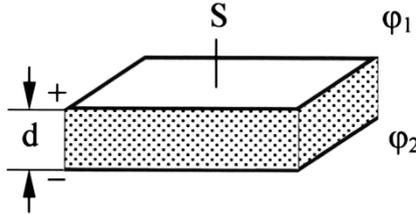


Рис. 6. Плоский конденсатор

Пусть площадь каждой из пластин равна S (рис. 6). На одной пластине находится заряд $+q$, на другой размещен заряд $-q$.

Если пренебречь «краевыми» эффектами, т. е. конфигурацией поля вблизи краев пластин, можно считать, что заряды распределены равномерно по поверхностям пластин, с постоянной поверхностной плотностью заряда: $\sigma = q/S$.

Если расстояние между пластинами конденсатора гораздо меньше их линейных размеров, то можно считать, что электрическое поле между пластинами однородно и его напряженность равна $E = \sigma/\epsilon\epsilon_0$ (ϵ – диэлектрическая проницаемость находящегося между пластинами диэлектрика; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная).

Разность потенциалов между обкладками равна интегралу от напряженности поля, взятому по любому пути между обкладками:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E_l dl . \tag{4}$$

Интегрируя вдоль силовой линии, ортогональной пластинам, получим:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = Ed = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0} d = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{d}{S} . \tag{5}$$

Тогда из формул (3) и (5) найдем емкость плоского конденсатора:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}. \quad (6)$$

В случае реального конденсатора поле оказывается не полностью сосредоточенным между обкладками (см. рис. 2). В результате на краях пластины наблюдается дополнительная концентрация заряда, что приводит к увеличению его емкости.

Если пластины плоского конденсатора представляют собой круги радиусом R , то емкость вычисляется по формуле Кирхгофа, полученной при условии $R \gg d$:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 \pi R^2}{d} + \varepsilon\varepsilon_0 R \left(\ln \frac{16\pi R}{d} - 1 \right). \quad (7)$$

Теперь рассмотрим *сферический конденсатор*. Пусть радиус внутренней обкладки равен R_1 , а внешней - R_2 . Поскольку поле такого конденсатора обладает центральной симметрией (рис. 7), напряженность поля между обкладками по теореме Гаусса равна:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \frac{q}{r^2}. \quad (8)$$

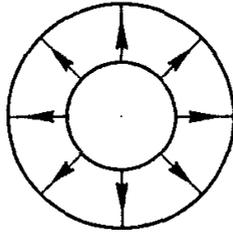


Рис. 7. Электрическое поле сферического конденсатора

Тогда разность потенциалов между обкладками сферического конденсатора определяется следующим интегралом

$$U = \int_{R_1}^{R_2} E dr = \int_{R_1}^{R_2} \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \frac{q}{r^2} dr = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right). \quad (9)$$

После подстановки (9) в (3) получим формулу для емкости сферического конденсатора:

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}. \quad (10)$$

При выводе формулы для емкости **цилиндрического конденсатора** следует учесть, что электрическое поле такого конденсатора представляет собой параллельные плоскости, в которых располагаются силовые линии, перпендикулярные цилиндрическим обкладкам (рис. 8).

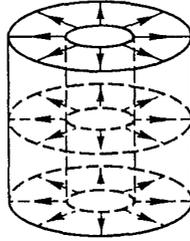


Рис. 8. Электрическое поле цилиндрического конденсатора

Приведем окончательную формулу для емкости цилиндрического конденсатора без вывода:

$$C = 2\pi\epsilon\epsilon_0 \frac{l}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}, \quad (11)$$

где l – длина коаксиальных цилиндров, R_1 и R_2 – радиусы внутреннего и внешнего цилиндров (обкладок).

1.4. Виды конденсаторов

Свойства конденсаторов в основном определяются диэлектриком, расположенным между обкладками. Конденсаторы могут быть воздушными (вакуумными), бумажными, слюдяными, керами-

ческими, фторопластовыми (тефлоновыми), сегнетоэлектрическими и т. д. Чаще всего конденсатор изготавливают из двух металлических лент, между которыми проложен ленточный диэлектрик (рис. 9). В металлоленточных конденсаторах на тонкую ленту диэлектрика напыляется с обеих сторон слой металла. Затем ленты скручиваются в рулон и укладываются в металлический корпус. Обычный технический бумажный конденсатор состоит из двух полосок станиоля, изолированных друг от друга и от защитного корпуса бумажными лентами, пропитанными парафином. Полоски и ленты туго свернуты в пакеты небольшого размера.

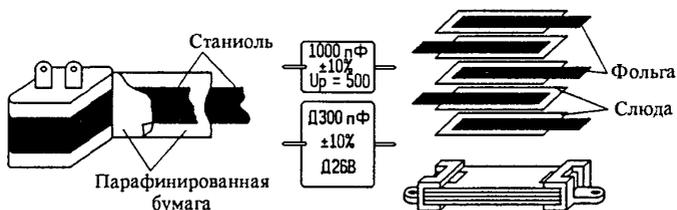


Рис. 9. Устройство металлоленточных конденсаторов

В радиотехнике широко применяются **конденсаторы переменной емкости**. В подобных конденсаторах одна пластина (или группа пластин) смещается относительно другой пластины (группы пластин) (рис. 10). Тогда в формуле емкости плоского конденсатора (6) величина S (для данного типа конденсаторов) - не площадь пластин, а площадь взаимодействующей части пластин. Поэтому при относительном сдвиге пластин емкость конденсатора меняется. Для воздушного конденсатора важно, чтобы пластины не задевали друг друга, поэтому расстояние d между пластинами не удастся сделать достаточно малым. В результате емкость переменного воздушного конденсатора обычно не превышает 600 пФ.



Рис.10. Конденсатор переменной емкости

Для того чтобы емкость менялась по определенному закону (линейному, квадратичному, обратно квадратичному), подвижные пластины делают специальной формы. Переменные конденсаторы обычно используются в схемах для подстройки. Чтобы изменить их емкость, нужно повернуть ручкой верхнюю обкладку относительно нижней.

Электролитические конденсаторы обладают гораздо большей емкостью, чем рассмотренные выше. Их устройство напоминает устройство бумажных или пленочных конденсаторов, но вместо изолирующей бумаги между металлическими лентами прокладывается пористая бумага, пропитанная проводящим раствором (электролитом), роль изоляции выполняет тонкий слой оксида, покрывающий один из электродов. Такой конденсатор обладает полярностью, т. е. на его обкладки можно подавать напряжение только так, как указано на конденсаторе. При несоблюдении полярности кислород из-за процесса электролиза испаряется из оксидного слоя, в результате этот слой становится тоньше и пробивается. Поэтому электролитические конденсаторы нельзя использовать в цепях со знакопеременным напряжением. Чаще всего их ставят в сглаживающих фильтрах и выпрямителях источников питания.

Важной характеристикой любых конденсаторов является номинальное напряжение, которое обозначено на корпусе конденсатора. Номинальное напряжение зависит от конструкции конденса-

ра и свойств применяемых в нем материалов. Эксплуатационное напряжение на конденсаторе не должно быть выше номинального.

Особенно критичны по напряжению электролитические конденсаторы, которое у них обычно невелико. При превышении номинального напряжения или при обратной полярности напряжения электролитические конденсаторы обычно выходят из строя из-за вскипания электролита внутри и, как следствие, взрыва корпуса. Основной причиной этого является перегрев конденсатора. Например, в компьютерах перегрев конденсаторов - частая причина выхода их из строя вследствие близкого расположения с источниками тепла, например, рядом с радиатором охлаждения.

Менее чувствительны к нарушению полярности напряжения **оксидные конденсаторы**, в которых поверх оксидного слоя напыляется слой металла - второй электрод. Для изготовления электролитических и оксидных конденсаторов используется алюминиевая фольга, покрытая слоем оксида алюминия Al_2O_3 . Также в таких конденсаторах применяют тантал, титан или ниобий.

В некоторых электрических цепях важное место занимают нелинейные конденсаторы, т. е. конденсаторы, в которых заряд и потенциал не пропорциональны друг другу. В таких устройствах электрическая емкость является функцией поданного напряжения: $C(U)$. К нелинейным конденсаторам относится **вариконд** – это конденсатор, емкость которого нелинейно изменяется в широких пределах в зависимости от напряжения, приложенного к его обкладкам. В качестве изолятора в варикондах применяется специальная керамика, обладающая свойствами сегнетоэлектрика, у которой очень большая диэлектрическая проницаемость ϵ (до $10^3 \dots 10^4$). Также диэлектрическая проницаемость такого материала значительно изменяется при изменении напряженности электрического поля, в котором он находится. С увеличением напряжения диэлектрическая проницаемость (а, значит, и емкость конденсатора) растет до определенного значения, а затем снижается. Электрическая емкость варикондов может изменяться в (4...8) раз. Это свойство используется в цепях автоматической настройки, в усилителях переменного и постоянного токов, умножителях частоты, стабилизаторах напряжения и других устройствах.

1.5. Энергия электрического поля конденсатора

Для того чтобы зарядить конденсатор нужно затратить некоторую работу. Следовательно, заряженный конденсатор обладает энергией, которая будет равна работе, затраченной на его зарядку.

Например, если обкладки заряженного конденсатора соединить проволокой, то она нагреется. В этом случае энергия конденсатора переходит во внутреннюю энергию проволоки в результате кратковременно текущего тока.

В качестве примера рассмотрим процесс заряда плоского конденсатора, обкладки которого разделены слоем диэлектрика. Для этого будем переносить заряды одного знака с одной обкладки на другую. При этом на одной обкладке появится избыток электронов, и она будет заряжаться отрицательно, а на второй обкладке будет избыточный положительный заряд, и она будет заряжаться положительно.

Элементарная работа dA , необходимая для переноса заряда dq определяется формулой: $dA = Udq$. Если теперь воспользоваться формулой (3) определения емкости конденсатора: $U = q / C$, тогда работа по переносу порции элементарного заряда с одной обкладки на другую приобретает вид:

$$dA = \frac{q}{C} dq. \quad (12)$$

Проинтегрировав выражение (12), находим полную работу, необходимую для заряда конденсатора:

$$A = \int_0^q \frac{q}{C} dq = \frac{q^2}{2C}. \quad (13)$$

Используя формулу (3), полученное выражение можно записать следующим образом:

$$A = \frac{CU^2}{2}. \quad (14)$$

Следовательно, энергия заряженного конденсатора равна:

$$W = \frac{CU^2}{2}. \quad (15)$$

2. Процессы заряда и разряда конденсатора

Рассмотрим процессы заряда и разряда конденсатора емкостью C в схеме, показанной на рис. 11. Когда переключатель K находится в положении 1, конденсатор будет заряжаться от источника с ЭДС – U_0 ; а в положении 2 – конденсатор будет разряжаться через сопротивление R . Можно показать, что процессы, протекающие в таких цепях, являются медленными, поэтому такие процессы считаются квазистационарными.

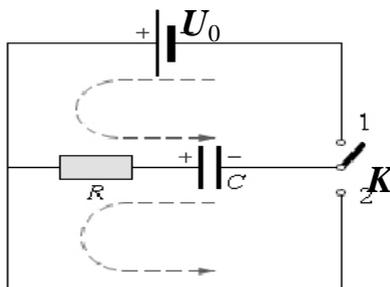


Рис. 11. Электрическая схема заряда и разряда конденсатора

Вначале рассмотрим процесс заряда конденсатора, при этом выберем положительное направление тока как показано на рис. 11. Применяя к контуру второе правило Кирхгофа, получим

$$RI + U_C = U_0, \quad (16)$$

где I – мгновенное значение силы тока в цепи, U_C – мгновенное значение напряжения на конденсаторе. Воспользуемся определением переменного тока

$$I = \frac{dq}{dt}, \quad (17)$$

где q – заряд конденсатора, t – время, прошедшее с момента начала заряда, т. е. с момента включения ключа.

Объединив выражения (16) и (17), получим дифференциальное уравнение первого порядка с постоянными коэффициентами для нахождения U_C

$$\frac{dU_C}{dt} + \frac{1}{RC}U_C - \frac{U_0}{RC} = 0. \quad (18)$$

Уравнение (18) можно решить путем разделения переменных с последующим интегрированием. При интегрировании следует учесть начальные условия, когда при $t = 0$ напряжение на конденсаторе $U_C = 0$. В результате находим зависимость напряжения от времени при заряде конденсатора:

$$U_C = U_0(1 - \exp(-\frac{t}{RC})). \quad (19)$$

С ростом времени напряжение на конденсаторе непрерывно увеличивается и асимптотически приближается к ЭДС U_0 источника.

Зависимость зарядного тока от времени в соответствии с законом Ома имеет вид:

$$I = \frac{U_0 - U_C}{R} = \frac{U_0}{R} \exp(-\frac{t}{RC}) = I_0 \exp(-\frac{t}{RC}). \quad (20)$$

В случае разряда конденсатора уравнение для тока будет иметь вид

$$I = -\frac{dq}{dt}. \quad (21)$$

В отличие от выражения (17) в (21) входит знак минус, т. к. выбранное в качестве положительного направления тока соответствует уменьшению заряда конденсатора.

В результате из (18) получим дифференциальное уравнение

$$\frac{dU_C}{dt} + \frac{U_C}{RC} = 0. \quad (22)$$

Решение уравнения (22) дает зависимость напряжения на конденсаторе от времени в процессе его разряда:

$$U_C = U_{\text{нач}} \exp\left(-\frac{t}{RC}\right), \quad (23)$$

где $U_{\text{нач}}$ – напряжение на конденсаторе перед его разрядом.

Разрядный ток в соответствии с законом Ома при этом равен

$$I = \frac{U_C}{R} = \frac{U_{\text{нач}}}{R} \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) = I_{\text{нач}} \exp\left(-\frac{t}{RC}\right), \quad (24)$$

где $I_{\text{нач}}$ – сила тока в момент времени $t = 0$.

Графики, изображающие зависимость напряжения конденсатора от времени при его заряде и разряде показаны на рис. 12.

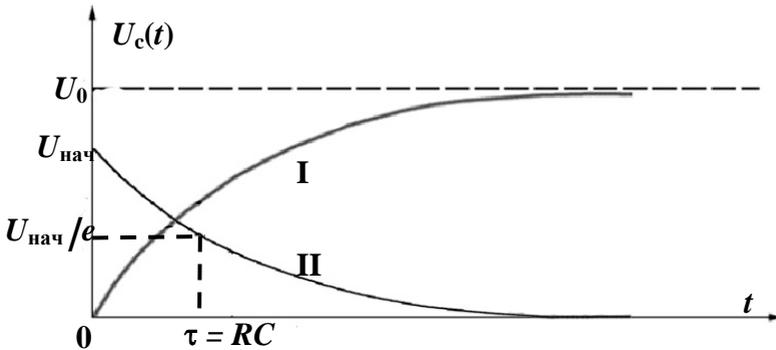


Рис. 12. Заряд (I) конденсатора от источника и его разряд (II) через резистор

Полученные в формулах (19) и (23) результаты показывают, что процессы заряда и разряда конденсатора происходят не мгновенно, а с конечной скоростью. В рассмотренном случае электрической цепи (рис. 12) быстрота этих процессов зависит от произведения

$$\tau = RC, \quad (25)$$

которое имеет размерность времени и называется **постоянной времени** RC – цепи. Как видно из рис. 12, постоянная времени показы-

вает, через какое время после начала разряда напряжение на конденсаторе уменьшается в $e = 2,72$ раз. Принято считать, что процесс заряда и разряда конденсатора, практически, полностью заканчивается за время 3τ .

Таким образом, в начальный момент времени ток разряда имеет максимальное значение $I_{\max} = U/R$. За время $\tau = RC$ ток уменьшается в e раз. В результате энергия, сосредоточенная в электрическом поле заряженного конденсатора, выделяется в виде тепла на сопротивлении R .

Рассмотренные переходные процессы используются в радиотехнике, для измерения малых промежутков времени, для получения мощных электрических разрядов, в релаксационных генераторах (генераторах пилообразного напряжения).

3. Методика проведения эксперимента

3.1. Измерение кривой заряда конденсатора

1.1. Проверить монтаж схемы в соответствии с рис. 13 и 14. Включить в схему конденсатор и резистор следующих номиналов: $C_1 = 470$ мкФ, $R_1 = 100$ кОм.

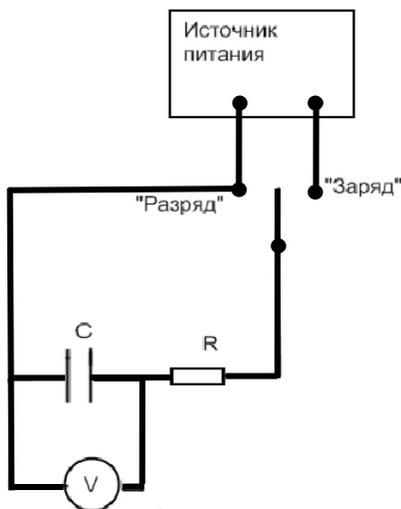


Рис. 13. Электрическая схема лабораторной установки

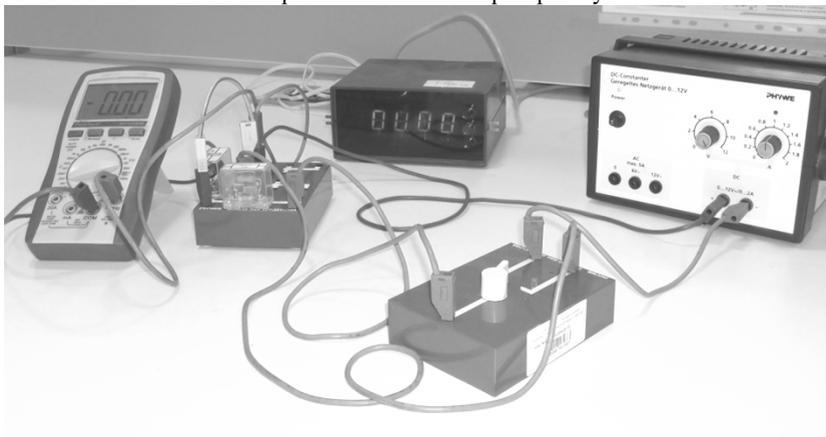


Рис. 14. Внешний вид экспериментальной установки

1.2. Включить источник питания и мультиметр в режиме вольтметра на предел измерений 20 V. Установить регулятор максимально допустимой силы тока (A) выходного сигнала в среднее положение (приблизительно 1 A), а регулятор напряжения (V) повернуть до упора по часовой стрелке. В этом положении напряжение на источнике $U_0 = 12,1$ В.

1.3. Переключатель поставить в положение «Разряд». Убедиться, что конденсатор полностью разряжен, для чего на (10...15) с закортить его коротким проводником (рис. 15), т. е. в коммутационном блоке соединить коротким проводником (перемычкой) оба контакта конденсатора. Восстановить электрическую схему в соответствии с рис. 13, отсоединив от конденсатора один из концов закорачивающего проводника.

1.4. Обнулить показания секундомера, подготовив его к измерениям. Одновременно с переводом переключателя в положение «Заряд» включить секундомер. Записать в таблицу 1 значения изменяющегося напряжения U_C на конденсаторе в соответствующие моменты времени t . Измерения производить через неравные промежутки времени: в начале заряда напряжение растет быстро, поэтому измерения надо делать по каждые 5 с. После достижения времени

60 с измерения можно проводить с интервалом 10 с. Полное время проведения опыта должно составить 300 с. По этой причине таблицу следует начертить с достаточным количеством столбцов.

При длительном бездействии мультиметр автоматически выключается, поэтому в случае, если его дисплей погас, необходимо заново включить мультиметр.

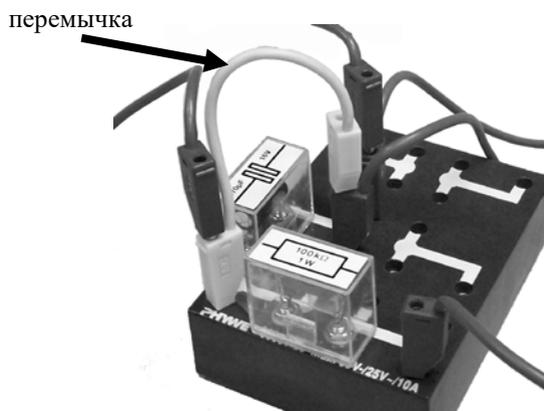


Рис. 15. Закорачивание конденсатора проводником

Таблица 1.

t, c	0	5	10	15	...	60	70	...	300
U_C, B									
$U_{C, теор.}, B$									
$\ln(U_{max} - U_C)$									

3.2. Измерение кривой разряда конденсатора

2.1. Дождаться момента, когда напряжение на конденсаторе, практически перестанет изменяться. Это означает, что конденсатор полностью заряжен.

2.2. Обнулить показания секундомера, подготовив его к измерениям. Одновременно с переводом переключателя в положение «Разряд» включить секундомер. Записать в таблицу 2 значения из-

меняющегося напряжения U_C на конденсаторе в соответствующие моменты времени t . Измерения производить через неравные промежутки времени: в начале разряда напряжение изменяется быстро, поэтому измерения надо делать каждые 5 с. После достижения времени 60 с измерения можно проводить с интервалом 10 с. Полное время проведения опыта должно составить 300 с. По этой причине таблицу следует начертить с достаточным количеством столбцов.

Таблица 2.

$t, \text{с}$	0	5	10	15	...	60	70	...	300
$U_C, \text{В}$									
$U_{C \text{ теор.}}, \text{В}$									
$\ln(U_0/U_C)$									

2.3. Повторить измерения зарядной и разрядной кривых при следующих значениях емкости конденсаторов и сопротивлении резисторов: $C_2 = 470 \text{ мкФ}$ и $R_2 = 1 \text{ МОм}$; $C_3 = 22 \text{ мкФ}$ и $R_3 = 1 \text{ МОм}$, заноса данные измерений в таблицы, аналогичные таблицам 1 и 2. Записать рядом с таблицами значения емкостей и сопротивлений, использованных в эксперименте.

4. Обработка результатов измерений

1. Заполнить таблицы 1 и 2, используя для расчета теоретического значения напряжения на конденсаторе формулы (19) и (23) соответственно.

2. По данным таблиц 1 и 2 на одном координатном поле (в одних координатных осях) построить зарядные и разрядные кривые конденсатора, т. е. зависимости $U_C(t)$. Следует построить четыре зависимости – две теоретических (с использованием формул (19) и (23)) и две экспериментальных. Кривые обозначить и указать их названия в подписи к рисунку. Из экспериментальной разрядной кривой конденсатора определить экспериментальное значение постоянной времени RC -цепи $\tau_{\text{экс}}$ как момент времени, соответствующий уменьшению напряжения на конденсаторе в $e = 2,72$ раз по сравнению с начальным значением. Сравнить полученное значение с

теоретическим значением постоянной времени $\tau_{\text{теор}}$, рассчитанным по формуле (25).

3. Заполнить последние строки таблиц 1 и 2, рассчитав значения натуральных логарифмов. В таблице 1 в качестве U_{max} выбрать максимальное напряжение, достигнутое за время измерения. В таблице 2 в качестве U_0 выбрать напряжение, соответствующее началу отсчета времени $t = 0$.

По данным таблицы 1 построить зарядную характеристику конденсатора в полулогарифмическом масштабе, т. е. зависимость $\ln(U_{\text{max}} - U_C)$ от времени t . По данным таблицы 2 построить разрядную характеристику конденсатора в полулогарифмическом масштабе, т. е. зависимость $\ln(U_0/U_C)$ от времени t .

Оба графика должны иметь вид отрезков прямых, что подтверждает справедливость зависимостей (19) и (23).

На рис. 16 приведен качественный вид графика при разряде конденсатора. С помощью данного графика можно найти котангенс угла наклона прямой к оси t , как отношение

$$\text{ctg}\alpha = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{\Delta t}{\Delta \ln\left(\frac{U_0}{U_C}\right)} = \tau. \quad (26)$$

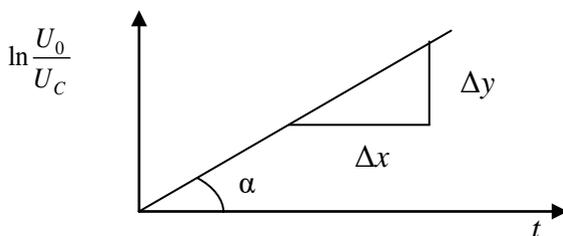


Рис. 16. График разряда конденсатора в полулогарифмическом масштабе

Полученное по формуле (26) значение котангенса угла наклона прямой будет равно характерному времени разряда конденсатора, которое нужно будет сравнить с полученным по формуле (25).

Аналогичные вычисления проделать с графиком заряда конденсатора в полулогарифмическом масштабе.

Повторить все вычисления п.п. 1–3 для других значений емкости и сопротивления: C_2 , R_2 и C_3 , R_3 .

5. Требования к содержанию отчёта по лабораторной работе

Отчёт оформляется в печатном виде на листах формата А4 в соответствии с требованиями, предъявляемыми кафедрой ОТФ, в котором помимо стандартного титульного листа должны быть раскрыты следующие пункты:

- I. Цель работы.
- II. Краткое теоретическое содержание:
 1. Явление, изучаемое в работе.
 2. Определение основных физических понятий, объектов, процессов и величин.
 3. Законы и соотношения, описывающие изучаемые процессы, на основании которых получены расчётные формулы.
 4. Пояснения к физическим величинам и их единицы измерений.
- III. Схема установки.
- IV. Расчётные формулы.
- V. Формулы погрешностей косвенных измерений.
- VI. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
(Таблицы должны иметь номер и название. Единицы измерения физических величин должны быть указаны в отдельной строке.)
- VII. Пример вычисления (для одного опыта):
 1. Исходные данные.
 2. Вычисления.
 3. Окончательный результат.
- VIII. Графический материал:
 1. Аналитическое выражение функциональной зависимости, которую необходимо построить.
 2. На осях координат указать масштаб, физические величины и единицы измерения.
 3. На координатной плоскости должны быть нанесены экспериментальные точки.

4. По результатам эксперимента, представленным на координатной плоскости, провести плавную линию, аппроксимирующую функциональную теоретическую зависимость в соответствии с методом наименьших квадратов.

IX. Анализ полученного результата. Выводы.

6. Правила записи результатов измерения:

- 1) погрешность должна округляться до одной значащей цифры:
правильно: $\Delta_C = 0,04$ мкФ;
неправильно: $\Delta_C = 0,0382$ мкФ;
- 2) последняя значащая цифра результата должна быть того же порядка величины, что и погрешность:
правильно: $R = (9,83 \pm 0,03)$ Ом;
неправильно: $R = (9,826 \pm 0,03)$ Ом;
- 3) если результат имеет очень большую или очень малую величину, необходимо использовать показательную форму записи – одну и ту же для результата и его погрешности, причем запятая десятичной дроби должна следовать за первой значащей цифрой результата:
правильно: $I = (5,27 \pm 0,03) \cdot 10^{-5}$ А,
неправильно: $I = (0,0000527 \pm 0,0000003)$ А,
 $I = (5,27 \cdot 10^{-5} \pm 0,0000003)$ А,
 $I = (0,0000527 \pm 3 \cdot 10^{-7})$ А,
 $I = (527 \pm 3) \cdot 10^{-7}$ А,
 $I = (0,527 \pm 0,003) \cdot 10^{-4}$ А.
- 4) Если результат имеет размерность, ее необходимо указать:
правильно: $g = (9,82 \pm 0,02)$ м/с²,
неправильно: $g = (9,82 \pm 0,02)$.

7. Правила построения графиков

1. Графики строятся на миллиметровой бумаге.
2. Перед построением графика необходимо четко определить, какая переменная величина является аргументом, а какая функцией. Значения аргумента откладываются на оси абсцисс (ось x), значения функции – на оси ординат (ось y).

3. Исходя из экспериментальных данных определить пределы изменения аргумента и функции.
4. Указать физические величины, откладываемые на координатных осях, и обозначить единицы величин.
5. Нанести на график экспериментальные точки, обозначив их (крестиком, кружочком, жирной точкой).
6. Провести через экспериментальные точки плавную кривую (прямую) так, чтобы эти точки приблизительно в равном количестве располагались по обе стороны от кривой.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение электрической емкости уединенного проводника и конденсатора.
2. Какие факторы влияют на электрическую емкость конденсаторов? Что такое относительная диэлектрическая проницаемость?
3. Докажите справедливость формулы (11) для емкости цилиндрического конденсатора.
4. Дайте определение постоянной времени RC – цепи. Как ее можно определить графически?
5. Перечислите виды конденсаторов и их особенности устройства.
6. Что такое вариконд и где он применяется?
7. Объясните необходимость построения графиков в полулогарифмическом масштабе в данной лабораторной работе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Калашников Н.П.* Основы физики. М.: Дрофа, 2004. Т. 1
2. *Савельев И.В.* Курс физики. СПб.: Лань, 2016. Т. 2.
3. *Детлаф А.А., Яворский Б.М.* Курс физики. М.: АCADEMIA, 2005.
4. *Иродов И.Е.* Электромагнетизм. М.: Лань, 2009.
5. *Трофимова Т.И.* Курс физики. М.: Академия, 2015.
6. *Детлаф А.А., Яворский Б.М.* Справочник по физике. М.: Наука, 2008.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Теоретические основы лабораторной работы.....	3
1.1. Введение.....	3
1.2. Конденсатор	3
1.3. Электрическая емкость конденсаторов	6
1.4. Виды конденсаторов.....	9
1.5. Энергия электрического поля конденсатора.....	13
2. Процессы заряда и разряда конденсатора.....	14
3. Методика проведения эксперимента	17
3.1. Измерение кривой заряда конденсатора.....	17
3.2. Измерение кривой разряда конденсатора.....	19
4. Обработка результатов измерений.....	20
5. Требования к содержанию отчёта по лабораторной работе.....	22
6. Правила записи результатов измерения.....	23
7. Правила построения графиков.....	23
Контрольные вопросы.....	24
Библиографический список.....	24