

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА

Цель работы: определение электроемкостей отдельных конденсаторов и двух батарей из последовательно и параллельно соединенных конденсаторов.

Приборы и принадлежности: измерительный стенд с конденсаторами, универсальный источник питания, поляризованное реле (встроено в стенд), комплект проводов (получить у лаборанта).

Объект измерений: электроемкости отдельных конденсаторов и двух батарей из последовательно и параллельно соединенных конденсаторов.

Средства измерений: микроамперметр, вольтметр.

1. Теоретическая часть

Проводник, удаленный от окружающих предметов, способен принимать на себя электрический заряд. Потенциал φ *уединенного* проводника связан с величиной накопленного им заряда Q соотношением:

$$Q = C\varphi.$$

Коэффициент пропорциональности, численно равный величине заряда, полученного проводником при повышении потенциала на единицу, называют электроемкостью или емкостью проводника:

$$C = \frac{Q}{\varphi}. \quad (1)$$

Если проводник не уединенный, вводят понятие взаимной емкости проводников. Широкое практическое применение имеет случай, когда два проводника, заряженные разноименно, имеют такую форму и взаимное расположение, что создаваемое ими электростатическое поле практически целиком сосредоточено в пространстве между ними. Система таких двух проводников называется конденсатором, а сами проводники – его обкладками.

Емкость *конденсатора* определяется, как отношение

$$C = \frac{q}{U}, \quad (2)$$

где q – абсолютная величина заряда на одной из обкладок конденсатора; U – разность потенциалов его обкладок.

Емкость плоского конденсатора зависит от размеров и формы его обкладок, их взаимного расположения, а также от диэлектрических свойств среды, заполняющей пространство между обкладками конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}. \quad (3)$$

Два конденсатора с электроемкостями C_1 и C_2 можно соединять параллельно или последовательно. Электроемкость $C_{\text{пс}}$ последовательно соединенных конденсаторов рассчитывается по формуле

$$\frac{1}{C_{\text{пс}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}, \quad (4)$$

электроемкость $C_{\text{пр}}$ параллельно соединенных конденсаторов – по формуле

$$C_{\text{пр}} = C_1 + C_2. \quad (5)$$

В данной работе разность потенциалов обкладок конденсатора измеряют вольтметром, а величину заряда q можно измерить при периодической зарядке и разрядке конденсатора с помощью микроамперметра, у которого подвижная система обладает периодом собственных колебаний, много большим времени разряда конденсатора. Такой микроамперметр, вследствие значительной инерции подвижной системы не будет регистрировать мгновенные значения тока, а покажет некоторое, не меняющееся со временем среднее значение силы тока $\langle I \rangle$. Пользуясь этим значением можно найти заряд и вычислить емкость конденсатора.

Действительно, так как

$$I(t) = \frac{dq}{dt}, \quad \text{то}$$

$$q = \int_0^t I(t) dt,$$

где $I(t)$ – мгновенное значение тока разряда.

Для микроамперметра с периодом колебаний, много большим времени разрядки конденсатора, можно написать, что протекший через него при разрядке конденсатора заряд определяется соотношением

$$q = \int_0^t I(t) dt = \langle I \rangle T, \quad (6)$$

где T – время одного разряда конденсатора.

Если за некоторое время t произошло N разрядов, то прошедшее через микроамперметр количество электричества определяется равенством

$$Q = qN = \langle I \rangle t.$$

Но $q = CU$, следовательно,

$$CUN = \langle I \rangle t, \text{ или} \\ C = \frac{\langle I \rangle t}{UN} = \frac{\langle I \rangle}{Uf}, \quad (7)$$

где f – число разрядов в секунду.

2. Методика проведения измерений и описание установки

Исследуемый конденсатор C (рис. 1) заряжается от источника э. д. с., а затем автоматически действующий переключатель отсоединяет одну из обкладок от источника и замыкает обкладки конденсатора на микроамперметр. При этом конденсатор разряжается.

Цикл «зарядка-разряд» повторяется с частотой работы переключателя 50 раз в секунду. Сопротивление микроамперметра, электроемкость конденсатора, а также индуктивность контура выбраны столь малыми, что конденсатор успевает зарядиться и разрядиться менее чем за $1/50$ с. Период собственных колебаний подвижной системы микроамперметра значительно больше этой величины.

На рис. 1 цифры 4 и 5 соответствуют специальным клеммам на измерительном стенде для подачи напряжения на конденсатор, цифры 3 и 6 – клеммам для подключения конденсаторов (батарей

конденсаторов). Цифры 1 и 2 обозначают клеммы для подачи переменного напряжения 6,3 В на управляющую обмотку реле.

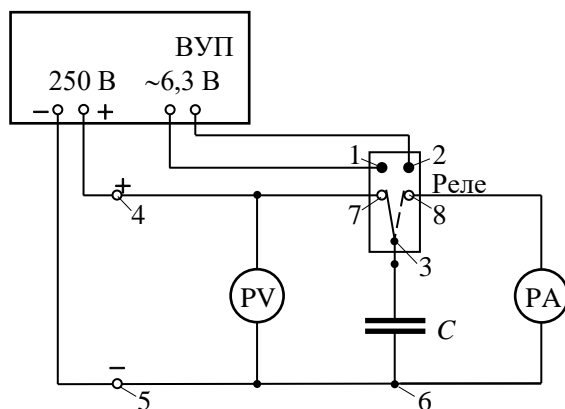


Рис. 1

Устанавливая с помощью потенциометра ВУПа известную разность потенциалов U , измеряемую вольтметром, и измеряя силу тока $\langle I \rangle$ с помощью микроамперметра, можно по формуле (2) рассчитать неизвестную электроемкость конденсатора.

В качестве переключателя в работе применено специальное устройство – поляризованное реле (его схема представлена на рис. 2).

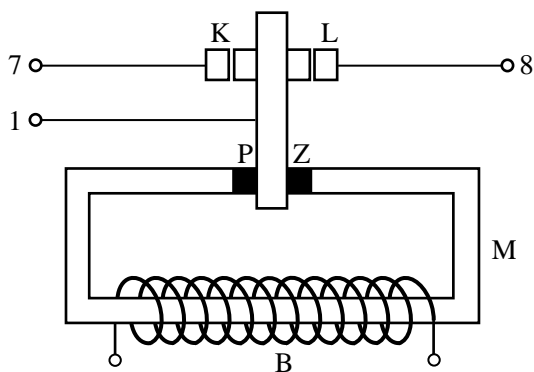


Рис. 2

На подковообразный железный сердечник M намотана намагничивающая катушка B , по которой пропускается переменный ток с частотой $f = 50$ Гц. Посредине между концами сердечника M помещен намагниченный стерженек – якорь. Если в катушке B тока нет, якорь располагается точно посредине между наконечниками P и Z . Когда в катушке B идет ток, то он создает магнитное поле. При этом плоская пружина, удерживающая якорь в среднем положении, изгибается, и якорь притягивается к одному из полюсов P или Z в зависимости от направления тока в катушке B , тогда клемма соединяется через якорь и контакты K и L поочередно с клеммами 7 и 8. Таким образом (см. рис. 1) конденсатор C заряжается и разряжается 50 раз в секунду.

Фотография измерительного стенда приведена на рис. 3.

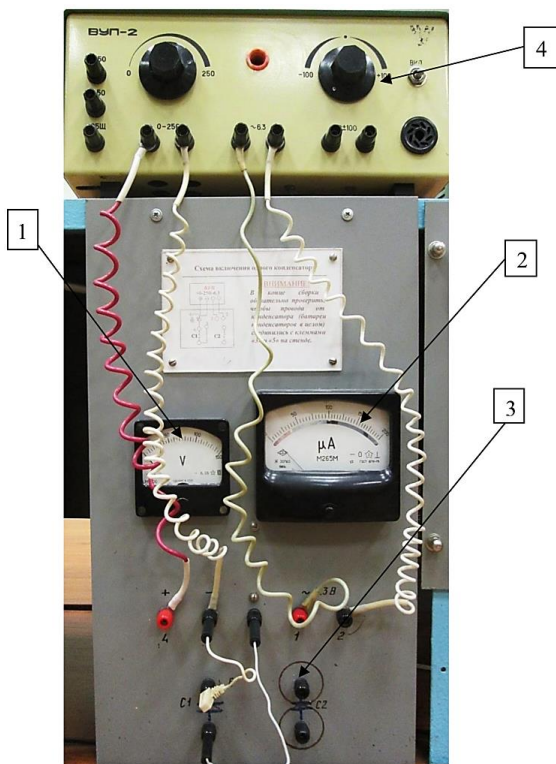


Рис. 3

На переднюю панель выведены головки измерительных приборов: вольтметра – 1, микроамперметра – 2, клеммы подключения конденсаторов – 3. Источник питания – 4 расположен выше на специальном стеллаже. Сами конденсаторы и реле не видны, поскольку находятся внутри стенда за металлической панелью.

3. Порядок выполнения работы

а) проведение измерений в лаборатории

1. Согласно указаниям на стенде, рис. 1 настоящих указаний и рис. 2 в рабочей тетради собрать схему с первым неизвестным конденсатором (C_1).

2. С помощью потенциометра ВУПа установить на конденсаторе напряжение U и измерить его вольтметром. С целью уменьшения погрешности измерений значение напряжения надо выбирать таким, чтобы стрелка вольтметра отклонялась более чем на $2/3$ его шкалы (**конкретное значение задает преподаватель индивидуально**).

3. С помощью микроамперметра измерить значение силы тока I_1 .

4. Уменьшить напряжение до нуля.

5. Повторить пункты 2-4 пять раз, каждый раз заново устанавливая на вольтметре напряжение U (то есть сбрасывая напряжение до нуля перед каждым следующим измерением), и записать полученные значения силы тока I_1 в таблицу 1.

6. Вместо конденсатора C_1 включить в схему конденсатор C_2 и выполнить операции, описанные в пунктах 2-5 при том же значении напряжения. Занести измеренные величины силы тока I_2 в таблицу 1.

7. Включить в схему батарею из последовательно соединенных конденсаторов C_1 и C_2 (то есть C'); выполнить операции, описанные в пунктах 2-5 при том же значении напряжения U . Занести измеренные величины силы тока I' в таблицу 1.

8. Вместо батареи из последовательно соединенных конденсаторов включить батарею из параллельно соединенных конденсаторов

(C''). Выполнить операции, описанные пунктах 2-5 при том же значении напряжения U . Занести измеренные величины силы тока I'' в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты измерений
 Разность потенциалов $U =$ _____ В
 Частота реле $f =$ _____ Гц

Конденсаторы в цепи		C_1	C_2	C'	C''
Измеряемая сила тока, мкА	№	I_1	I_2	I'	I''
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
Среднее значение силы тока $\langle I_i \rangle$, мкА					

б) обработка результатов измерений

1. Рассчитайте средние арифметические значения силы тока $\langle I_i \rangle$ для каждой схемы включения конденсаторов в цепь и внесите данные в таблицу 1.
2. Пользуясь полученными на основе эксперимента значениями $\langle I_i \rangle$, по формуле (7) рассчитайте значения электроемкости первого конденсатора C_1 , второго конденсатора C_2 , батарей из двух последовательно C' и параллельно C'' соединенных конденсаторов.
3. Пользуясь рассчитанными значениями C_1 , C_2 , по формулам (4) и (5) рассчитайте теоретические значения электроемкости C_T' и C_T'' .

в) вычисление ошибок измерений

1. Для одиночных конденсаторов с электроемкостями C_1 и C_2 вычислите абсолютные ошибки измерений. Для этого:
 - 1.1) пользуясь методом Стьюдента, рассчитать *случайное* значение ошибки измерения силы тока $\Delta I_{сл1}$ и $\Delta I_{сл2}$ для выполненных $N = 5$ измерений при доверительной вероятности $P = 0,95$:

$$\Delta I_{\text{сл}} = \alpha \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i - \langle I \rangle)^2}{N(N-1)}}.$$

Здесь α – коэффициент Стьюдента; для $P = 0,95$ и $N = 5$ коэффициент Стьюдента $\alpha = 2,8$ (см. таблицу в [1, стр. 21]).

1.2) Определить величины приборных ошибок микроамперметра $\Delta I_{\text{пр}}$ и вольтметра $\Delta U_{\text{пр}}$ с учетом их классов точности:

$$\Delta I_{\text{пр}} = \frac{\gamma_A}{100} I_{\text{max}}; \quad \Delta U_{\text{пр}} = \frac{\gamma_V}{100} U_{\text{max}};$$

где I_{max} , U_{max} – максимальные значения на шкалах амперметра и вольтметра соответственно; γ_I и γ_V – классы точности амперметра и вольтметра соответственно. Класс точности указан на панели прибора числом и равен максимальной погрешности прибора, выраженной в процентах.

1.3) Определить величину абсолютной ошибки измерений силы тока $\Delta I = \sqrt{\Delta I_{\text{сл}}^2 + \Delta I_{\text{пр}}^2}$, округлив ее до первой значащей цифры в большую сторону.

1.4) Рассчитать относительные ошибки измерений электроемкостей δC_1 и δC_2 (ошибку Δf принять равной 2,5 Гц):

$$\delta C_i = \frac{\Delta i}{\langle I_i \rangle} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta f}{f}.$$

1.5) Учитывая, что по определению относительная ошибка связана с абсолютной соотношением:

$$\delta C = \frac{\Delta C}{C},$$

вычислите абсолютную ошибку измерения электроемкости ΔC для каждого из конденсаторов. Ошибку округлить в соответствии с правилами округления ошибок.

2. Оцените расхождение результатов определения электроемкости батарей из последовательно и параллельно соединенных конденсаторов по формуле (7) и по формулам (4) и (5):

$$\eta' = \frac{|C_{\text{ср}}' - C_{\text{т}}'|}{C_{\text{т}}'} 100 \%,$$

$$\eta'' = \frac{|C_{\text{CP}}'' - C_{\text{T}}''|}{C_{\text{T}}''} 100 \, \%.$$

3. Запишите окончательные результаты измерений электроемкостей C_1 и C_2 в виде:

измеряемая величина = измеренное значение \pm абсолютная ошибка измерений

Контрольные вопросы

1. Что называется электрическим конденсатором?
2. Дайте определение электроемкости уединенного проводника и конденсатора. От чего она зависит?
3. Укажите единицу измерения электроемкости в СИ. Как она связана с основными единицами СИ?
4. От чего зависит электроемкость плоского конденсатора?
5. Какую роль играет реле в данной лабораторной работе?
6. Какое соотношение между периодом колебаний подвижной системы микроамперметра и периодом разрядки конденсатора должно выполняться в данной лабораторной работе?
7. Начертите примерный график зависимости тока через амперметр от времени.
8. Запишите формулы для расчета электроемкости батареи конденсаторов, соединенных: а) последовательно; б) параллельно. Как при этом связаны общее напряжение и общий заряд батарей с напряжением и зарядом на каждом из конденсаторов?
9. Как изменится электроемкость плоского конденсатора, если между его обкладками поместить пластину из проводника? Толщина пластины равна половине расстояния между обкладками.
10. Как изменится электроемкость плоского конденсатора, если между его обкладками поместить пластину из диэлектрика диэлектрической проницаемостью ϵ ? Толщина пластины равна половине расстояния между обкладками.
11. Укажите основные источники погрешности измерений в данной работе.

Список литературы

1. Андреев А.И., Селезнев В.А., Тимофеев Ю.П. Вводное занятие в лабораториях кафедры физики / Под ред. проф. В.А. Никитенко. М.: МИИТ, 2017. 40 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1979 – 2007. Т. 2. – 496 с.
3. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Курс физики. – М.: Высш. школа, 1989 – 2003. – 608 с.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. школа, 1985 – 2012. – 542 с.