

Работа 3.7

Измерение емкости конденсаторов

У п р а ж н е н и е 1. *Определение емкости конденсатора баллистическим методом.*

Оборудование. Набор конденсаторов, зеркальный гальванометр, источник постоянного тока, цифровой электронный вольтметр, реостат, ключ, два переключателя, соединительные провода.

Введение

Емкость конденсатора C определяется соотношением:

$$C = \frac{Q}{U},$$

где Q — заряд, U — напряжение на его обкладках.

Экспериментальное определение емкости конденсатора сводится к измерению заряда Q и напряжения U . Однако, если напряжение измеряется легко с помощью вольтметра, то измерение заряда — задача более сложная.

Величину заряда Q , который проходит через сечение проводника за время t при постоянном токе I , можно определить по формуле $Q = It$, измерив ток амперметром и время с помощью секундомера. Но постоянный ток через конденсатор не проходит, поэтому измерение емкости производят, изучая процесс разряда конденсатора или его поведение в цепи переменного тока.

Заряд, переносимый импульсом тока, возникающим при разрядке конденсатора, можно измерить при помощи зеркального гальванометра, работающего в *баллистическом* режиме. Название «баллистический» означает, что при измерении отсчитывается не установившееся отклонение светового указателя гальванометра, а его первое, максимальное отклонение — баллистическое, после которого подвижная часть прибора постепенно возвращается в положение равновесия.

Баллистический режим работы гальванометра обеспечивается в том случае, если через рамку пропускается импульс тока, продолжительность которого значительно меньше периода ее собственных колебаний. При этих условиях за время прохождения тока рамка не успевает существенно отклониться от положения равновесия и можно считать, что весь ток пройдет при неотклоненном ее положении. Рамка начинает перемещаться под воздействием толчка, когда ток практически уже прекратился. При этом оказывается, что баллистическое отклонение светового указателя пропорционально заряду, прошедшему через рамку.

Найдем связь между величиной заряда Q , который проходит через рамку, и углом первого максимального отклонения рамки от положения равновесия. Для этого запишем уравнение движения рамки гальванометра

$$I \frac{d^2\alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + D\alpha = SNBi, \quad (1)$$

где I — момент инерции рамки, $P \frac{d\alpha}{dt}$ — электромагнитный тормозящий момент, $D\alpha$ — тормозящий момент упругих сил, который возникает при закручивании нити, $SNBi$ — вращающий момент.

Если за время τ прохождения импульса тока рамка не успевает отклониться, то уравнение (1) можно записать в виде:

$$I \frac{d^2\alpha}{dt^2} = SNBi. \quad (2)$$

Интегрируя выражение (2), получим величину заряда Q , прошедшего через рамку за время τ :

$$I \frac{d\alpha}{dt} = SNB \int_0^\tau i dt = SNBQ,$$

откуда:

$$Q = \frac{I}{SNB} \frac{d\alpha}{dt}. \quad (3)$$

Из равенства (3) следует, что при кратковременном прохождении через рамку заряда Q , она приобретает момент импульса

$$I \frac{d\alpha}{dt} = NSBQ$$

и поэтому после прекращения действия электрического тока начинает двигаться, достигая максимального отклонения α_m .

Для определения угла максимального отклонения рамки α_m воспользуемся законом сохранения энергии. Будем считать, что начальная кинетическая энергия рамки равна потенциальной энергии закрученной нити подвеса. При максимальном угле отклонения рамки α_m будем иметь:

$$\frac{1}{2} I \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2 = \frac{1}{2} D \alpha_m^2$$

или

$$\frac{d\alpha}{dt} = \sqrt{\frac{D}{I}} \cdot \alpha_m. \quad (4)$$

С учетом (3) из соотношения (4) получим:

$$Q = \frac{\sqrt{ID}}{SNB} \alpha_m = C_b \alpha_m. \quad (5)$$

где C'_b — величина, равная заряду, который вызывает отклонение светового указателя на единичный угол. Эта величина называется *баллистической постоянной гальванометра*.

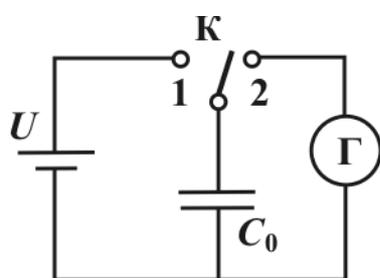


Рис. 3.24

Таким образом, величина заряда Q , проходящего через гальванометр, прямо пропорциональна первому максимальному отклонению светового указателя. Обычно баллистическую постоянную гальванометра определяют экспериментально. Угловое отклонение можно выразить через деления шкалы. Тогда баллистическая постоянная выразится в кулонах на деление

шкалы, и вместо (5) можно записать:

$$Q = C_b n. \quad (6)$$

Для определения баллистической постоянной можно использовать схему, приведенную на рис. 3.24. Поставив переключатель K в положение 1, эталонный конденсатор C_0 известной емкости заряжается до напряжения U . Если переключатель K установить в положение 2, конденсатор C_0 разрядится, и световой указатель гальванометра отклонится.

Как следует из (6), баллистическая постоянная гальванометра:

$$C_b = \frac{Q}{n_0} = \frac{C_0 U}{n_0}, \quad (7)$$

где n_0 — максимальное отклонение светового указателя гальванометра.

Если эталонный конденсатор C_0 заменить конденсатором C_x , емкость которого необходимо определить, то формула (7) примет вид:

$$C_b = \frac{C_x U}{n_x}, \quad (8)$$

где n_x — максимальное отклонение светового указателя при разрядке конденсатора C_x .

Из формул (7) и (8) следует:

$$C_x = C_0 \frac{n_x}{n_0}. \quad (9)$$

Таким образом, измерение емкости конденсатора сводится к сравнению баллистического отклонения светового указателя гальванометра при поочередном разряде через него эталонного и исследуемого конденсатора.

Описание установки. Схема установки для определения емкости конденсатора баллистическим методом приведена на рис. 3.25. При замыкании

переключателя K_1 в положение 1 эталонный конденсатор C_0 (или исследуемый C_x) заряжается от источника постоянного тока \mathcal{E} до напряжения U , величина которого регулируется потенциометром R и измеряется цифровым электронным вольтметром V . Если переключатель K_1 установить в положение 2, происходит разряд конденсатора C_0 (или C_x) через гальванометр Γ . Ключ K служит для успокоения подвижной системы гальванометра и находится в разомкнутом состоянии. Он замыкается на короткое время в тот момент, когда световой указатель проходит через нулевое положение.

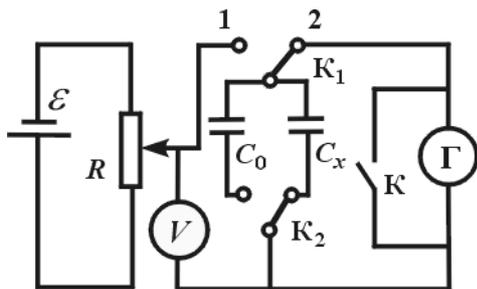


Рис. 3.25

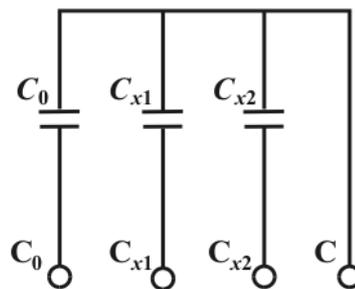


Рис. 3.26

Исследуемые конденсаторы C_{x1} и C_{x2} , а также эталонный конденсатор C_0 закреплены на общей панели. Выводы от одной из пластин каждого конденсатора соединены вместе и подведены к клемме C (рис. 3.26). Выводы от других пластин каждого из конденсаторов подведены соответственно к клеммам C_0 , C_{x1} и C_{x2} .

Порядок выполнения упражнения

1. Соберите схему согласно рис. 3.25. Переключатели K_1 и K_2 поставьте в положение 1. Подготовьте электронный цифровой прибор М890G для измерения постоянного напряжения до 2 В. Включите источник тока \mathcal{E} . Перемещением подвижного контакта потенциометра R установите напряжение, которое подводится к конденсаторам C_0 и C_x , не более 1 В.

2. Включите вилку осветительного шнура гальванометра в сеть 220 В. Установите переключатель чувствительности гальванометра в положение « $\times 100$ », а световой указатель — на нулевое деление шкалы.

3. Переключатель K_2 замкните в положение 2 и наблюдайте отклонение светового указателя гальванометра. При необходимости увеличьте чувствительность гальванометра (нажмите кнопки « $\times 10$ »), чтобы отклонение светового указателя было не менее 5 — 10 делений. Можно также изменить напряжение потенциометром R .

4. Повторите последовательно зарядку и разрядку конденсатора C_0 , наблюдайте и записывайте баллистическое отклонение n_0 не менее 5 раз. Найдите среднее значение n_0 .

5. Переключатель K_1 поставьте в положение 2 и выполните аналогичные измерения для конденсатора C_{x1} , а затем C_{x2} .

6. Определите емкость конденсаторов C_{x1} и C_{x2} по формуле (9).

7. Выполните аналогичные измерения емкости батарей конденсаторов при параллельном (C'_x) и последовательном (C''_x) их соединении.

8. Проверьте результаты измерений, используя формулы:

$$C'_x = C_{x1} + C_{x2} \quad \text{и} \quad C''_x = \frac{C_{x1}C_{x2}}{C_{x1} + C_{x2}}.$$

9. По формуле (7) определите баллистическую постоянную гальванометра C_b .

У п р а ж н е н и е 2. *Определение емкости конденсатора методом периодической зарядки и разрядки.*

Оборудование. Панель с конденсаторами и поляризованным реле РП-5, источник постоянного тока, источник переменного напряжения (6,3 В), реостат, электронный цифровой вольтметр, гальванометр, соединительные провода.

Введение

Если конденсатор емкости C зарядить до напряжения U и разрядить через рамку гальванометра, то по виткам рамки пройдет заряд $Q = CU$. Если последовательно заряжать и разряжать конденсатор m раз в секунду, то по виткам рамки каждую секунду будет проходить заряд $Q = mCU$. Если период собственных колебаний рамки гальванометра значительно больше, чем время разряда конденсатора, то гальванометр покажет среднее значение тока $i = mCU$, которое с течением времени не изменяется. Последнее выражение дает возможность определить емкость конденсатора:

$$C = \frac{i}{mU}.$$

Для этого необходимо измерить напряжение U , до которого заряжается конденсатор, среднее значение разрядного тока i , а также знать, сколько раз на протяжении одной секунды переключатель автоматически заряжает и разряжает конденсатор.

Описание установки. В данном упражнении в качестве автоматического переключателя используется поляризованное реле РП-5. Схема установки приведена на рис. 3.27. Конденсатор C_x заряжается от источника тока \mathcal{E} до

напряжения U , которое регулируется потенциометром R и измеряется электронным цифровым вольтметром V . Разрядный ток измеряется зеркальным гальванометром Γ . Обмотка питания реле включается в сеть переменного тока напряжением 6,3 В. При частоте колебаний напряжения сети 50 Гц число переключений конденсатора $m = 50$. Исследуемые конденсаторы C_{x1} и C_{x2} и поляризованное реле укреплены на общей панели. Схема соединения конденсаторов и реле приведена на рис. 3.28.

Порядок выполнения упражнения

1. Соберите схему согласно рис. 3.27.
2. Включите вилку шнура питания гальванометра в сеть 220 В. Установите переключатель чувствительности в положение « $\times 100$ », а световой указатель на нулевую отметку шкалы.
3. На клеммы обмотки питания поляризованного реле подайте переменное напряжение 6,3 В. Подвижный контакт потенциометра установите в положение, соответствующее минимальному напряжению. Включите источник питания \mathcal{E} .

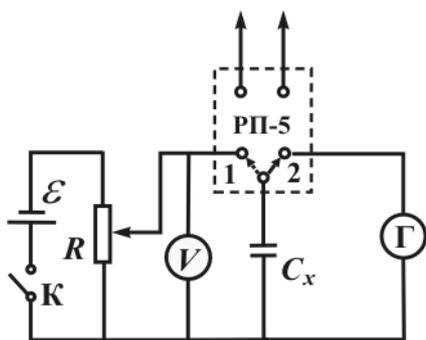


Рис. 3.27

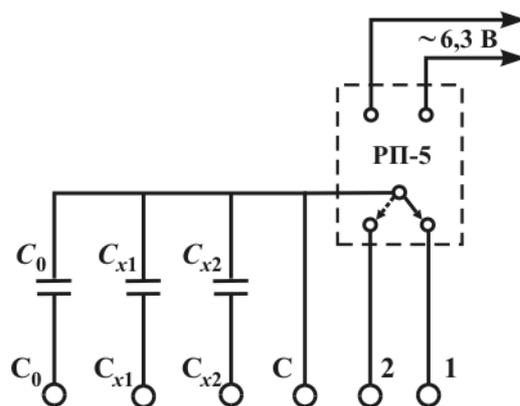


Рис. 3.28

4. С помощью потенциометра R увеличивайте напряжение, пока отклонение светового указателя гальванометра не станет равным 6 — 8 делений шкалы. При необходимости переключатель чувствительности гальванометра поставьте в положение « $\times 10$ ».

5. Измерьте напряжение U и рассчитайте среднее значение тока $i = C_i n$, где C_i — постоянная гальванометра по току, n — количество делений шкалы. Определите емкость конденсатора C_{x1} по формуле:

$$C_{x1} = \frac{i}{mU} = \frac{C_i n}{mU}.$$

6. Выполните аналогичные измерения для конденсатора C_{x2} . Вычислите погрешности измерений.

Упражнение 3. *Определение емкости конденсатора методом моста переменного тока.*

Оборудование: звуковой генератор, эталонный конденсатор, два конденсатора неизвестной емкости C_{x1} и C_{x2} , осциллограф, реохорд, соединительные провода.

Введение

Мостовой метод измерения емкости конденсатора C_x основан на сравнении его с емкостью эталонного конденсатора C_0 . Исследуемый C_x и эталонный C_0 конденсаторы включаются в плечи моста (рис. 3.29), который дает возможность сравнить их сопротивления R_{Cx} и R_{C0} переменному току.

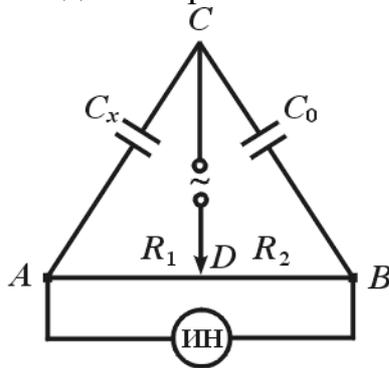


Рис. 3.29

В отличие от моста постоянного тока переменное напряжение питания подводится к точкам C и D , а индикатор нуля (ИИ) включается параллельно реохорду AB . Это улучшает условия измерений, так как источник питания замыкается на разветвлении, участки которого CBD и CAD имеют практически одинаковые сопротивления.

Равновесие моста достигается перемещением подвижного контакта D реохорда и наступает при условии равенства потенциалов точек A и B . При равновесии моста ток через индикатор нуля не проходит. Однако следует иметь в виду, что если мост питается переменным током, то при его равновесии потенциалы точек A и B должны быть одинаковыми в любой момент времени. Это означает, что они должны совпадать не только по амплитуде, но и по фазе. Поэтому перемещением контакта D мост можно уравновесить только при условии, что конденсаторы C_x и C_0 по своим характеристикам практически не отличаются. Будем считать, что это условие выполняется. Тогда при равновесии моста

$$\frac{R_{Cx}}{R_{C0}} = \frac{R_1}{R_2}$$

или с учетом, что $R_{Cx} = \frac{1}{\omega C_x}$, $R_{C0} = \frac{1}{\omega C_0}$, имеем:

$$\frac{C_0}{C_x} = \frac{R_1}{R_2},$$

откуда

$$C_x = C_0 \frac{R_2}{R_1} = C_0 \frac{l_2}{l_1}.$$

Описание установки. Для определения емкости конденсатора собирается схема, приведенная на рис. 3.30. Источником переменного напряжения служит звуковой генератор $ЗГ$, а в качестве индикатора нуля используется электронный осциллограф $ЭО$. Исследуемый и эталонный конденсаторы укреплены на панели, которая использовалась ранее. При произвольном положении подвижного контакта D реохорда потенциалы точек A и B не совпадают, и на вертикальный вход осциллографа подается переменное напряжение. На экране осциллографа видна светлая вертикальная линия. Размер ее зависит от положения ручки осциллографа «Усиление Y » и величины выходного напряжения звукового генератора. При равновесии моста вертикальная линия на экране превращается в точку.

Порядок выполнения упражнения

1. Соберите схему согласно рис. 3.30, включите в качестве исследуемого конденсатор C_{x1} .

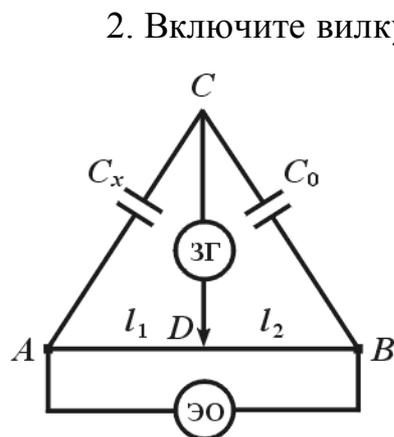


Рис. 3.30

2. Включите вилку шнура питания осциллографа в сеть 220 В. Ручки осциллографа установите следующим образом: «Яркость», «Фокус», «Смещение X », «Смещение Y » — в средние положения; «Усиление X », «Усиление Y » — в крайние левые положения; «Диапазон» — в положение «0»; «Ослабление» — в положение «1:1». Включите тумблер «Сеть». Когда на экране возникнет светящаяся точка, ручками «Смещение X » и «Смещение Y » установите ее в центре экрана.

3. Включите в сеть 220 В звуковой генератор, на его выходе установите напряжение 10 В, частоту — (1 — 2) кГц.

4. Ручкой «Усиление Y » осциллографа получите отклонение луча по вертикали на 6 — 8 делений шкалы.

5. Перемещением подвижного контакта реохорда добейтесь, чтобы вертикальная линия на экране осциллографа превратилась в точку. При необходимости можно увеличить чувствительность установки поворотом ручки «Усиление Y » по часовой стрелке.

6. Сделайте отсчет плеч реохорда l_1 и l_2 и вычислите C_{x1} .

7. Сделайте аналогичные измерения для конденсатора C_{x2} .

8. Сделайте вывод относительно точности измерений емкости конденсаторов разными методами.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ УИР

Исследуйте процесс зарядки и разрядки конденсатора и определите его емкость.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называют электроемкостью уединенного проводника? Конденсатора?
2. Получите формулу для измерения емкости двух последовательно и параллельно соединенных конденсаторов.
3. С какой целью в установке к гальванометру присоединяется кнопочный ключ K ?
4. Какой режим работы гальванометра называют баллистическим?
5. Как определить баллистическую постоянную гальванометра?
6. Объясните принцип действия поляризованного реле.
7. Какое условие должно выполняться, чтобы при периодической зарядке и разрядке конденсатора прибор показывал среднее значение тока?
8. Почему при определении емкости конденсатора методом моста используется источник переменного тока?
9. Почему в качестве индикатора для определения состояния равновесия моста используется осциллограф?
10. Почему в упражнении 3 используется звуковой генератор, а не источник переменного тока частотой 50 Гц?