

Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
«Приазовський державний технічний університет»
Кафедра фізики

Зурнаджи В.І.

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЄМНОСТІ КОНДЕНСАТОРІВ БАЛІСТИЧНИМ ГАЛЬВАНОМЕТРОМ

Методичні вказівки
до виконання лабораторної роботи № 45
по курсу «Фізика»
для студентів усіх спеціальностей
всіх форм навчання

Маріуполь
2020

УДК 53.(076.5)

Визначення електроємності конденсаторів балістичним гальванометром [Електронний ресурс]: методичні вказівки до виконання лабораторної роботи № 45 з курсу «Фізика» для студентів усіх спеціальностей всіх форм навчання / уклад. Зурнаджи В.І., М.О. Савінков – Маріуполь: ПДТУ, 2020. – 15 с. – Режим доступу:

Містить короткі теоретичні відомості про електроємність, конденсатори; опис принципу дії балістичного гальванометру, установки і методики вимірювань.

Укладачі: В.І. Зурнаджи, канд.техн.наук
М.О. Савінков, канд. фіз.-матем. наук, доцент

Рецензент: О.В. Цветкова, канд. фіз.-матем. наук, доцент

Затверджено
на засіданні кафедри фізики,
протокол №14 від 7 квітня 2020 р.

Затверджено
методичною комісією
факультету інформаційних технологій,
протокол №9 від 9 квітня 2020 р.

©ДВНЗ «ПДТУ», 2020
©В.І.Зурнаджи, 2020

ВСТУП

Конденсатори – накопичувачі електричного заряду широко використовуються в радіотехніці, електротехніці, телебаченні та інших галузях техніки. За конструктивними особливостями існують різні типи конденсаторів: багатошарові плоскі конденсатори ємністю кілька десятків тисяч пікофарад; стрічкові конденсатори з тонкої металевої фольги ємністю десятки мікрофарад; конденсатори змінної ємності; електролітичні конденсатори дуже великої ємності (тисячі мікрофарад). На основі конденсаторів також створено прилади – електрометри, які дозволяють вимірювати великі різниці потенціалів в абсолютних одиницях, тобто без попереднього градування.

1 ЦІЛЬ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Ознайомитися з принципом роботи приладів магнітоелектричної системи і, зокрема, з пристроєм і принципом дії дзеркального балістичного гальванометра. А також за допомогою гальванометра вимірити електроємність конденсатору і батареї конденсаторів.

При підготовці до виконання лабораторної роботи необхідно: вивчити дане керівництво, а також теоретичний матеріал за темою лабораторної роботи; вивчити пристрій лабораторної установки і методику вимірювань.

2 ЗАГАЛЬНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

2.1 Призначення і принцип роботи конденсатора

Потенціал електростатичного поля φ , яке створене точковим зарядом q у вакуумі, дорівнює:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}, \quad (2.1)$$

де ϵ_0 – електрична постійна,

r – відстань від заряду до даної точки.

Якщо розглянути відокремлений заряджений провідник (або довільне заряджене тіло), то надання провіднику додаткового заряду q буде викликати у відповідність з виразом (2.1) пропорційне збільшення потенціалу φ . З експериментів випливає, що різні провідники (різної форми, об'єму і т.д.) при наданні їм одного і того ж заряду створюють різні потенціали. Тому можна записати:

$$\varphi = C \varphi, \quad (2.2)$$

де C – деякий коефіцієнт пропорційності, що залежить від форми провідника, який називається електроємністю (або ємністю) відокремленого провідника. З (2.2) випливає:

$$C = \frac{q}{\varphi}. \quad (2.3)$$

Як видно з виразу (2.3), ємність чисельно дорівнює заряду, надання якого провіднику підвищує його потенціал на одиницю. Одиницею ємності в системі СІ є фарада (Ф). 1 Ф – це ємність такого провідника, потенціал якого змінюється на 1 В при наданні йому заряду в 1 Кл.

Відокремлені провідники мають невелику ємність. Наприклад, навіть куля таких розмірів як Земля має ємність всього 700 мкФ. На практиці, однак, буває потреба в таких пристроях, які б при невеликих розмірах і невеликому потенціалі могли б накопичувати на собі («конденсувати») великі за величиною заряди. Такими пристроями є конденсатори. На ємність конденсатора не повинні впливати навколишні тіла, тому конденсатор складається з двох провідників (обкладок). Причому, обкладкам надають таку форму, щоб електричне поле, яке створене зарядом на провідниках, було в обмеженому

просторі між обкладками і було захищене від зовнішніх електричних полів. У відповідність з цією вимогою конденсатор може складатися з двох пластин – плоский конденсатор, двох коаксіальних циліндрів – циліндричний конденсатор, двох сфер – сферичний конденсатор. На рисунку 2.1 зображений плоский конденсатор. Показано, що його електричне поле (зображено силовими лініями) є однорідним і знаходиться всередині конденсатора.

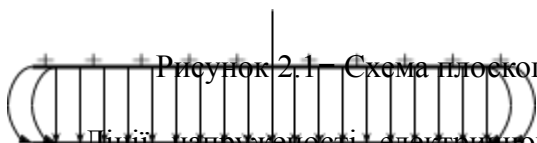


Рисунок 2.1 – Схема плоского конденсатора

Лінії напруженості електричного поля починаються на позитивно зарядженій пластині і закінчуються на негативно зарядженій пластині.

Основною характеристикою конденсатора є його ємність:

$$C = \frac{q}{\varphi_2 - \varphi_1}, \quad (2.4)$$

де q – заряд, накопичений в конденсаторі;

$(\varphi_2 - \varphi_1)$ – різниця потенціалів між обкладками конденсатора.

Ємність залежить від форми і розмірів конденсатора. Наприклад, для плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (2.5)$$

де S – площа пластин, d – відстань між пластинами,

ε – діелектрична проникність речовини між пластинами.

Конденсатори можна з'єднати в батарею. При цьому розрізняють паралельне а) і послідовне б) з'єднання конденсаторів (рис. 2.2).

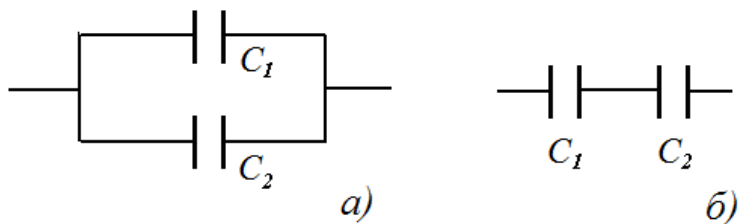


Рисунок 2.2 – Варіанти з'єднання конденсаторів

При паралельному з'єднанні конденсаторів ємністю C_1 і C_2 повна ємність C батареї визначається за формулою:

$$C = C_1 + C_2 + \dots \quad (2.6)$$

При послідовному з'єднанні повна ємність знаходиться з рівняння:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \quad (2.7)$$

При послідовному з'єднанні результуюча ємність C менша будь-якої ємності, включеної в батарею.

2.2 Пристрій і принцип дії балістичного гальванометра

Балістичний гальванометр зі світловим показчиком типу МІ36/2 відноситься до вимірювальних приладів магнітоелектричної системи. Принцип дії заснований на взаємодії магнітного поля в повітряному зазорі між полюсами постійного магніту 1 з рамкою 2 з декількох витків тонкого

провідника (обмотка рамки). По рамці протікає струм, що вимірюють (рис. 2.3 а). Рамка укріплена на рухомому механізмі 3 приладу, площа рамки збігається з напрямком вектору $\vec{B}$ – індукції магнітного поля. Рухомий механізм укріплений на повертаючих пружинах 4. Пружини одночасно служать для підведення струму до обмотки рамки.

В результаті взаємодії магнітного поля з рамкою зі струмом виникає обертальний момент, що відхиляє рухливий механізм приладу на кут φ . Промінь світла оптичної системи приладу потрапляє на дзеркало 5 рухомого механізму, відбивається (двічі) і потрапляє на шкалу приладу. При відхиленні рухомого механізму на кут φ , зайчик на шкалі приладу відхилиться на відповідне число поділок.

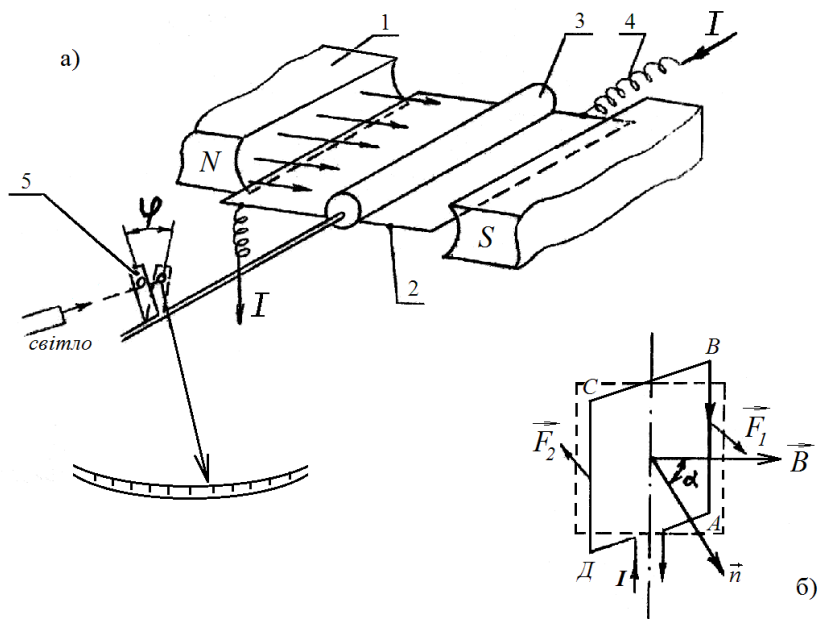


Рисунок 2.3 – Пристрій і принцип дії балістичного гальванометра: а) схема балістичного гальванометра; б) сили, що діють на рамку зі струмом в магнітному полі

Обертальний момент виникає завдяки дії на сторони АВ і CD рамки пар сил $\vec{F}_1$ і $\vec{F}_2$ (рис. 2.3 б), які представляють собою силу Ампера ($F_A = I l B \sin \varphi$), що діє на провідник зі струмом в магнітному полі. Напрямок цих сил визначається за правилом лівої руки: сила $\vec{F}_2$ спрямована від нас за рисунок; сила $\vec{F}_1$ спрямована з площини рисунка до нас.

2.3 Виведення розрахункової формули

Механічний обертальний момент, що діє на рамку зі струмом в магнітному полі, в векторному вигляді визначається формулою:

$$\vec{M}_{ep} = [\vec{P}_m, \vec{B}] \quad (2.8)$$

В скалярній формі маємо

$$M_{ep} = P_m B \sin \alpha, \quad (2.9)$$

де $P_m = NIS$ – магнітний момент плоскої рамки, що має N витків; I – сила струму; S – площа рамки; B – індукція магнітного поля; α – кут між вектором $\vec{B}$ і вектором нормалі $\vec{n}$ до рамки.

Вираз (2.9) перепишемо у вигляді:

$$M_{ep} = N I S B \sin \alpha \quad (2.10)$$

При розрядці конденсатора в колі, в якому включений гальванометр, протікає короткочасний струм. Тому, внаслідок інерційності рамки, вона відхиляється від положення рівноваги лише на невеликий кут. Тобто, кут α між векторами $\vec{B}$ і $\vec{n}$ (рис 2.3 б) близький до 90° , тому $\sin \alpha \approx 1$ і тоді з (2.7) отримуємо:

$$M_{вр} = NSIB \quad M_{вр} = NSIB \quad (2.11)$$

Під дією обертального моменту рухливий механізм 3 приладу повертається навколо поздовжньої осі на кут φ . В межах пружної деформації пружин 4 кут закручування φ пропорційний обертальному моменту $M_{вр}$

$$\varphi = \kappa \cdot M_{вр}, \quad (2.12)$$

де κ – коефіцієнт, що залежить від пружних властивостей матеріалу пружини.

Підставимо вираз (2.11) в (2.12), отримаємо:

$$\varphi = \kappa NSIB = \beta I,$$

де β – деяка постійна приладу, що визначається при його градуюванні.

Знайдемо зв'язок між кутом відхилення φ рухомого механізму гальванометра і зарядом q , що протікає через поперечний переріз рамки при короткочасному струмі I .

Нехай τ_0 – час проходження струму через гальванометр;
 $T_0 \ll \tau_0$ – $\tau_0 = T_0$, де T_0 – період вільних коливань рамки гальванометра. Момент імпульсу рамки за час dt проходження через рамку короткочасного струму I дорівнює:

$$L_{\text{рамки}} = \int_0^{\tau} M_{\text{ep}} dt = \int_0^{\tau} N S I B dt = N S B \int_0^{\tau} I dt \quad (2.13)$$

За визначенням $I = \frac{dq}{dt}$, тому з рівняння (2.13) запишемо:

$$\int_0^{\tau} M_{\text{ep}} dt = N S B q \quad (2.14)$$

де q – заряд, що визначають.

Так як $\tau = T_0$, то за час τ рамка практично не встигає вийти з положення рівноваги, а лише набуває початковий момент імпульсу $L_{\text{рамки}} = \mathfrak{I}_0 \omega_0$, де $\mathfrak{I}_0$ момент інерції рухомого механізму, ω_0 – кутова швидкість, набута механізмом за час τ . Тоді, використовуючи основний закон динаміки обертального руху твердого тіла, вираз (2.14) перепишемо у вигляді:

$$\mathfrak{I}_0 \omega_0 = \int_0^{\tau} M_{\text{ep}} dt = N S B q \quad (2.15)$$

Кінетична енергія рухомого механізму визначається:

$$W_k = \frac{\mathfrak{I}_0 \omega_0^2}{2} \quad (2.16)$$

Виразимо з рівняння (2.15) кутову швидкість ω_0 і підставимо в (2.16). Після чого отримаємо вираз для кінетичної енергії:

$$W_{\kappa} = \frac{N^2 S^2 B^2}{2l_0} q^2 \quad (2.17)$$

При русі рамки відбувається деформація пружин, що супроводжується переходом кінетичної енергії рухомого механізму в потенційну енергію W_n пружної деформації:

$$W_{\Pi} = \int_0^{\varphi} \kappa \varphi \quad (2.18)$$

Підставимо вираз (2.12) в (2.18), проінтегруємо і отримаємо:

$$W_{\Pi} = \int_0^{\varphi} \frac{\varphi d\varphi}{\kappa} = \frac{1}{\kappa} \frac{\varphi^2}{2}$$

Для максимального кута відхилення φ_0 рухомого механізму згідно із законом збереження енергії запишемо:

$$W_{\Pi} = W_{\kappa} ,$$

$$\frac{1}{\kappa} \frac{\varphi_0^2}{2} = \frac{N^2 S^2 B^2}{2l_0} q^2 \quad (2.19)$$

$$W_{\kappa} \frac{1}{2} \frac{\varphi_0^2}{\kappa} = \frac{N^2 S^2 B^2}{2l_0} q^2$$

Виразимо з (2.19) заряд через кут відхилення φ_0

$$q = A_{\delta} \varphi_0 \quad (2.20)$$

де $A_{\delta} = \frac{1}{NSB} \sqrt{\frac{T_0}{\kappa}} - A_{\delta} = \frac{1}{NSB} \sqrt{\frac{I_0}{\kappa}}$ – балістична постійна приладу.

Для двох конденсаторів C_0 – відомої ємності і C_x – невідомої, заряджених до однакової напруги U , можна записати:

$$C_0 = \frac{q_0}{U}, \quad C_x = \frac{q_1}{U}.$$

Тоді відношення ємностей з використанням виразу (2.20)

$$\frac{C_x}{C_0} = \frac{q_1}{q_0} = \frac{A_{\delta} \varphi_1}{A_{\delta} \varphi_0} = \frac{\varphi_1}{\varphi_0},$$

звідки отримаємо

$$C_x = C_0 \frac{\varphi_1}{\varphi_0} \quad (2.21)$$

Кут відхилення φ рамки пропорційний відхиленню зайчика на шкалі гальванометра. Якщо через m_0 позначимо початкове положення зайчика і через m – значення його при розрядці конденсатора C_x , то $\varphi_1 : m - m_0$; аналогічно для C_0 : $\varphi : n - n_0$. І тоді остаточна розрахункова формула (2.21) буде мати вигляд:

$$C_x = C_0 \frac{m - m_0}{n - n_0} \quad (2.22)$$

3 ОПИС РОБОЧОЇ УСТАНОВКИ І МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАНЬ

Для виконання лабораторної роботи використовується установка, схема якої приведена на рисунку 3.1.

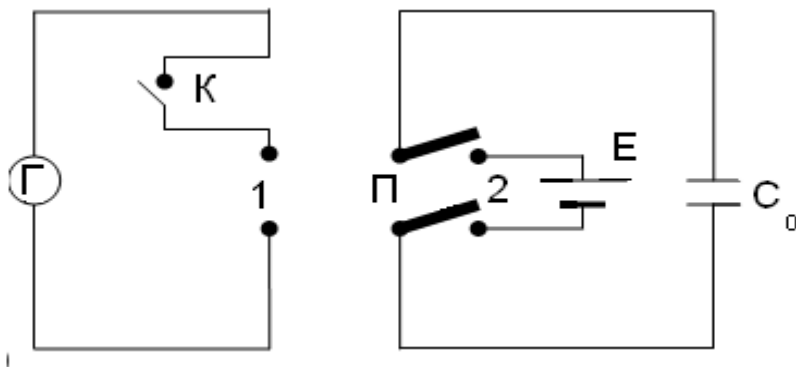


Рисунок 3.1 – Схема робочої установки

Схема робочої установки складається з вимірювального приладу – балістичного дзеркального гальванометра Γ (рис. 3.1), джерела постійної напруги E , перекидного перемикача Π , кнопкового ключа K . Схема дозволяє включати для зарядки і наступних вимірювань конденсатори різної ємності, а також батарею послідовно або паралельно з'єднаних конденсаторів.

Методика вимірювання ємності в лабораторній роботі заснована на протіканні короткочасного струму через рухливий механізм балістичного гальванометра при розрядці досліджуваного конденсатора. Методика є дуже чутливою.

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ ТА ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Ознайомитися з установкою для лабораторної роботи. Включити в схему конденсатор з відомою ємністю C_0 (рис. 3.1).

2. Перекидний перемикач П замкнути на гальванометр Г (положення 1), натиснути кнопку К і в натиснутому стані визначити нульовий відлік n_0 за шкалою гальванометра. Вимірювання занести в таблицю.

3. За допомогою перемикача П підключити конденсатор до джерела струму (положення 2) і зарядити конденсатор.

4. Перекиданням перемикача П в перше положення включити конденсатор в коло гальванометра (кнопка К при цьому повинна бути натиснута!). Конденсатор буде розряджатися; в момент замикання ключа П потрібно зафіксувати максимальний відхил n зайчика за шкалою гальванометра. Дослід по пунктам (2-4) виконати три рази. Вимірювання занести в таблицю.

5. Аналогічні вимірювання виконати для двох конденсаторів з невідомими ємностями C_{x1} і C_{x2} , включивши їх по черзі в коло замість конденсатора C_0 . Вимірювання занести в таблицю.

6. Включити в коло гальванометра замість конденсатора C_0 два послідовно з'єднаних конденсатора C_{x1} і C_{x2} . Провести аналогічні вимірювання по пунктам (2-4).

7. Включити в коло гальванометра два паралельно з'єднаних конденсатора C_{x1} і C_{x2} . Виконати аналогічні вимірювання по пунктам (2-4).

8. За розрахунковою формулою (2.22) визначити ємності конденсаторів C_{x1} і C_{x2} , а також ємності паралельно і послідовно з'єднаних конденсаторів C_{x1} і C_{x2} . Остаточний результат представити у вигляді середніх за трьома дослідом значень для кожної визначуваної ємності C_0 , C_{x1} , C_{x2} , $C_{\text{пар}}$, $C_{\text{посл}}$ з таблиці.

Таблиця 4.1 – Таблиця вимірювань і обчислень

Величина, що вимірюється		n_0	n	$n - n_0$	m_0	m	$m - m_0$	$C, \text{ мкФ}$
Визначувана ємність								
C_0	1							
	2							
	3							
	сер.							
C_{x1}	1							
	2							
	3							
	сер.							
C_{x2}	1							
	2							
	3							
	сер.							
C послідовне з'єднання	1							
	2							
	3							
	сер.							
C паралельне з'єднання	1							
	$\frac{1}{C_{x1}} +$							
	2							
	3							

	сер							
--	-----	--	--	--	--	--	--	--

9. Визначте ємність батареї конденсаторів за формулами (2.6) та (2.7). Порівняйте з результатами експерименту. Зробіть висновки по роботі.

5 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що таке конденсатор? Навіщо він потрібен?
2. Якими фізичними величинами можна охарактеризувати конденсатор; який зв'язок між ними?
3. Зобразіть паралельне і послідовне з'єднання конденсаторів. Як визначається ємність батареї конденсаторів в кожному з цих випадків?
4. Поясніть, на якому принципі заснована дія приладів магнітоелектричної системи.
5. Запишіть закон Ампера в векторній і скалярній формах з рисунком.
6. За яким правилом визначається напрямок сили Ампера? Сформулюйте це правило.
7. Запишіть вираз для обертового моменту, що діє на рамку з струмом в однорідному магнітному полі.
8. Поясніть, що таке магнітний момент рамки зі струмом?
9. Розкажіть порядок вимірювань в лабораторній роботі за схемою робочої установки.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Савельєв И. В. Курс физики. Т. 2 / И. В. Савельев. – М.: Наука, 1989. – 496 с.
2. Трофимова Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 1990. – 432 с.

3. Детлаф А. А. Курс физики. Т. 2 / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский, Л. В. Милковская. – М.: Высш. шк., 1973. – 316 с.
4. Гольдин Л. Л. Лабораторные занятия по физике / Л. Л. Гольдин. – М.: Наука, 1983. – 704 с.
5. Кунце Х. И. Методы физических измерений / Х. И. Кунце. – М.: Мир, 1989. – 214 с.