

Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського»

Фізико-математичний факультет

Кафедра загальної фізики та моделювання фізичних процесів

Лабораторна робота № 2-3

**ВИЗНАЧЕННЯ ЄМНОСТІ КОНДЕНСАТОРА  
МЕТОДОМ БАЛІСТИЧНОГО ГАЛЬВАНОМЕТРА**

Виконана студ. групи \_\_\_\_\_ - \_\_\_\_\_

---

## ВИЗНАЧЕННЯ ЄМНОСТІ КОНДЕНСАТОРА МЕТОДОМ БАЛІСТИЧНОГО ГАЛЬВАНОМЕТРА

**Мета роботи:** оволодіти методикою вимірювання ємності конденсатора методом балістичного гальванометра.

**Прилади та пристрої:** балістичний гальванометр типу М 21/2, джерело струму УІП-2, вольтметр, конденсатори невідомої ємності, конденсатор відомої ємності, перемикач, вимикач кнопковий.

### Теоретичні відомості

Визначення ємності конденсатора ґрунтується на означенні:

$$q = CU, \quad (3.1)$$

де  $q$  – заряд конденсатора,  $U$  – різниця потенціалів між обкладками. З формули (3.1) маємо  $U = q/C$ . Якщо два конденсатора з різними ємностями  $C_1$  та  $C_2$  зарядити до однакової різниці потенціалів, то їхні заряди  $q_1$  та  $q_2$  будуть різними, але  $q_1/C_1 = q_2/C_2$ . Звідси маємо

$$C_2 = C_1 \frac{q_2}{q_1}. \quad (3.2)$$

Таким чином, якщо ємність одного з конденсаторів відома, то ємність другого можна обчислити за формулою (3.2), знаючи співвідношення зарядів цих конденсаторів (за умови, що конденсатори заряди до однакової різниці потенціалів  $U_1 = U_2$ . У даній роботі порівняння зарядів конденсаторів здійснюється балістичним методом, в якому реєструючим приладом є балістичний гальванометр – чутливий прилад, який реагує на силу струму  $10^{-6} - 10^{-12}$  А, але головним призначення балістичного гальванометра є вимірювання електричного заряду (кількості електрики).

### Скорочене описання балістичного гальванометра

Балістичний гальванометр використовується для вимірювання електричного заряду (кількості електрики), яка проходить у колі за проміжок часу, малий у порівнянні з періодом власних коливань рамки гальванометра. Короткочасні струми мають місце у схемах при розрядці конденсатора, швидких змінах магнітного потоку тощо. Балістичний гальванометр відноситься до приладів **магнітоелектричної системи** і від звичайного гальванометра відрізняється штучним збільшенням моменту інерції його

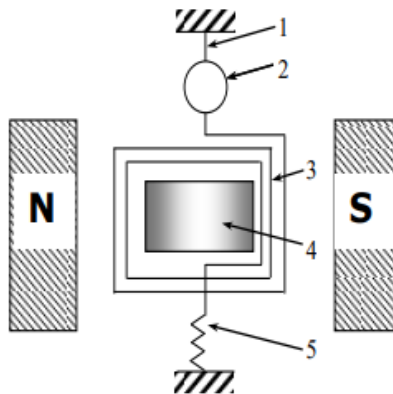


Рис.3.1

рухомої частини. Збільшення моменту інерції рамки гальванометра можна досягти прикріпленням до рамки 3 додаткових тягарців. Гальванометр зі збільшеним моментом інерції вимірює заряд, тобто тягарці діють як інтегратор, що і дозволяє визначати заряд, що пройшов по рамці.

Існують стрілочні та дзеркальні гальванометри, останні є більш чутливими. У дзеркальному гальванометрі (рис.3.1.) рухома рамка 3 підвішується в магнітному полі постійного магніту N-S на тонкій (товщина декілька мікрон) пружній нитці (підвісі) 1. Для підсилення магнітного поля, в якому знаходиться рамка, в ній розміщують залізне циліндричне осердя 4.

Струм до рамки підводиться через підвіс 1 і тонку металеву нитку 5, що відтягує донизу рухома систему. До підвісу біля рамки прикріплюється легке дзеркало 2. На це дзеркало падає паралельний пучок променів світла від спеціального джерела, який після відбивання потрапляє на вимірювальну шкалу. Відхилення променя від нульової поділки шкали, тобто чутливість гальванометра до струму більша, чим більша відстань між дзеркалом і шкалою. Тому ціна поділки дзеркальних гальванометрів вказується переважно для певної відстані дзеркала від шкали. Наприклад: "Ціна міліметрової поділки шкали дорівнює  $2 \cdot 10^{-9}$  А/мм, якщо дзеркало знаходиться від шкали на відстані 1 м".

При проходженні струму по рамці гальванометра виникає момент сили Ампера і рамка починає обертатися. У загальному випадку на рух рамки балістичного гальванометра впливають три моменти сили:

- 1) момент сили Ампера, який має максимальне значення  $iBSn$ ;
- 2) момент сил кручення нитки, величина якого дорівнює  $D\varphi$ ;
- 3) момент сил гальмування, величина якого дорівнює  $P\dot{\varphi}$ .

Основне рівняння обертального руху рамки має вигляд

$$I \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -P \frac{d\varphi}{dt} - D\varphi + iBSn, \quad (3.3)$$

де  $\varphi$  - кут повороту рамки,  $I$  - момент інерції рухомої системи гальванометра,  $B$  - індукція магнітного поля, в якому знаходиться рамка,  $S$  - площа витка рамки,  $n$  - кількість витків рамки,  $D$  - момент сил кручення на одиницю кута повороту,  $i$  - сила струму, який протікає по витках рамки,  $P$  - момент сил гальмування на одиницю кутової швидкості.

Скористаємося формулою (3.1) для встановлення співвідношення між величиною заряду  $q$ , який проходить по витках рамки гальванометра, та першим максимальним відхиленням рамки від положення рівноваги  $\varphi_0$  за умови відсутності гальмування ( $P = 0$ ).

Оскільки за час проходження струму обважніла рамка гальванометра не встигає вийти зі стану рівноваги, то рівняння руху рамки за час  $\tau < T_0$ , ( $T_0$  - період власних коливань рамки, точніше - її першого відхилення), може бути записано приблизно так:

$$I \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = iBSn, \quad (3.4)$$

звідки

$$BSn \int_0^{\tau} i dt = I \frac{d\varphi}{dt}. \quad (3.5)$$

При цьому рамка набуде кінетичної енергії  $\frac{1}{2} I \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2$ . Ця енергія витрачається на закручування підвісу на кут  $\varphi$ . Оскільки момент сил кручення при повороті на кут  $\varphi$

дорівнює  $D\varphi$ , то при закручуванні на кут  $d\varphi$  робота сил кручення буде  $\delta A = D\varphi d\varphi$ . При повороті рамки на кут  $\varphi_0$  виконується робота

$$A = \int_0^{\varphi_0} D\varphi d\varphi = \frac{D\varphi_0^2}{2}. \quad (3.6)$$

Таким чином,

$$\frac{D\varphi_0^2}{2} = \frac{1}{2} I \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \Rightarrow \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = \frac{D}{I} \varphi_0^2. \quad (3.7)$$

З рівнянь (3.5) та (3.7) дістанемо

$$I = \frac{B^2 n^2 S^2 q^2}{D\varphi_0^2}. \quad (3.8)$$

Період власних коливань рамки гальванометра дорівнює  $T = 2\pi\sqrt{I/D}$ , звідки  $I = (T_0^2 \cdot D)/4\pi^2$ . Підставляючи цей вираз у (3.8), отримаємо

$$\frac{T_0^2 D}{4\pi^2} = \frac{B^2 n^2 S^2 q^2}{D\varphi_0^2} \Rightarrow q = \frac{T_0 D}{2\pi B n S} \cdot \varphi_0 = \frac{T_0}{2\pi} c \cdot \varphi_0 = b \cdot \varphi_0, \quad (3.9)$$

де  $b = (cT_0)/2\pi$ . Величина  $c = D/(BnS)$  називається динамічною сталою, а  $b$  – **балістичною сталою гальванометра**.

Вище було показано, що за певних умов ( $U_1 = U_2$ ) вимірювання ємності конденсаторів зводиться до вимірювання відношення зарядів двох конденсаторів, ємність одного з яких вважається відомою. З формули (3.9) виходить, що визначення відношення зарядів може бути замінено визначенням максимальних кутових відхилень рамки гальванометра, яке викликане проходженням через рамку струму. Отже,

$$C_2 = C_1 \frac{\varphi_0^{(2)}}{\varphi_0^{(1)}}. \quad (3.10)$$

Відношення максимальних кутових відхилень рамки гальванометра  $\varphi_0^{(2)}/\varphi_0^{(1)}$  може бути замінено відношенням максимальних лінійних відхилень (кількістю поділок)  $n_0^{(2)}/n_0^{(1)}$  світлового штриха по шкалі гальванометра, оскільки під час експерименту

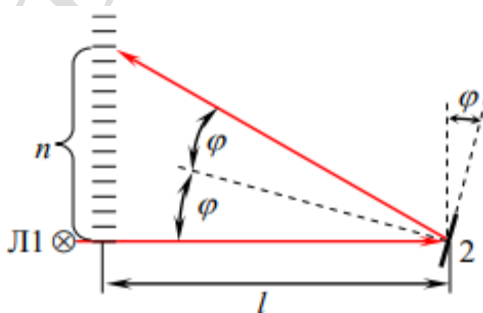


Рис. 3.2

відстань від рамки з дзеркалом до шкали гальванометра залишається сталою. Кут повороту рамки  $\varphi$  пов'язаний з величиною зміщення  $n$  світлового штриха шкалою приладу та відстанню від шкали до дзеркала  $l$  співвідношенням, яке легко одержати з рис. 3.2.

Очевидно, що кількість поділок, на яку відхилився «зайчик» гальванометра, прямо пропорційна куту відхилення дзеркальця  $n \sim \varphi$ , а оскільки кут відхилення пропорційний заряду,

що пройшов у колі, то і кількість поділок пропорційна заряду:  $n \sim q$ . Якщо через гальванометр розряджати конденсатори, що мають ємності  $C_1$  та  $C_2$  і заряди  $q_1$  та  $q_2$ , то можна записати

$$q_1 = bn_1, \quad q_2 = bn_2, \quad (3.11)$$

де  $b$  – коефіцієнт пропорційності. Тепер, скориставшись формулою (3.2), одержимо

$$C_2 = C_1 \frac{n_2}{n_1}. \quad (3.12)$$

### Опис експериментальної установки

На рис. 3.3 зображено схему електричного кола, що використовується для визначення ємності конденсаторів.

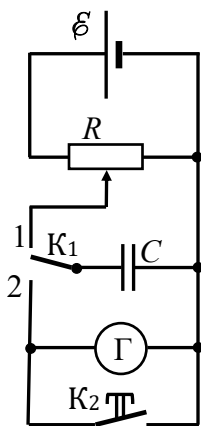


Рис. 3.3

Постійна напруга від джерела живлення  $\mathcal{E}$  підводиться до змінного резистора  $R$ , включеного за схемою потенціометра (дільника напруги). Якщо ключ  $K_1$  поставити у положення 1, то напруга з потенціометра подаватиметься на конденсатор  $C$  і він буде заряджатися. Зарядну напругу можна змінювати, переміщуючи повзунок реостата, або іншим способом (зауважимо, що в лабораторії у якості джерела напруги використовується стабілізоване джерело регульованої напруги УИП-2). При перемиканні  $K_1$  в позицію 2 конденсатор замикається на гальванометр і розряджається.

Паралельно до гальванометра підключено кнопковий вимикач  $K_2$ , який замикає коло індукційних струмів, що виникають у рамці гальванометра під час її коливань завдяки явищу електромагнітної індукції. Гальмування коливань рамки здійснюється в результаті дії магнітного поля магніту гальванометра на індукційні струми (індукційне тертя). Вимикач  $K_2$  замикаємо в момент проходження світлового штриха через нульову поділку шкали.

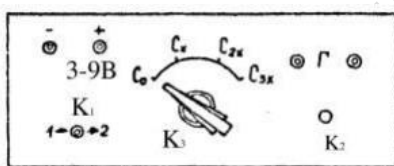


Рис. 3.4

Передня панель експериментальної установки зображена на рис. 3.4. Вона живиться від виходу УИПа “3...9 В”. Балістичний гальванометр під’єднаємо до клем “Г”. Перемикач  $K_3$  дозволяє послідовно від’єднувати до схеми еталонний конденсатор  $C_0$  та конденсатори  $C_{1x}$ ,  $C_{2x}$ ,  $C_{3x}$ ,  $C_{4x}$ , ємності яких треба виміряти.

### Порядок виконання роботи на реальному обладнанні

1. Увімкнути УИП в мережу 220 В.
2. Установити за допомогою потенціометра  $R$  (розміщений на панелі УИПа над виходом УИПа “3...9 В”) задану викладачем напругу  $U_1$  (рис. 3.4).
3. Перемикач  $K_3$  поставити в позицію  $C_0$ .
4. Поставити перемикач  $K_1$  у позицію 1, щоб зарядити конденсатор.
5. Перемкнути  $K_1$  в позицію 2, розряджаючи конденсатор через гальванометр. Максимальне відхилення світлового штриха на шкалі  $n_0^0$  занести до таблиці 3. Вимірювання повторити згідно з п.п.4, 5 двічі та визначити середнє значення  $n_0^0$ .

*Зауваження.* Не забувайте користуватись кнопковим вимикачем К2 для заспокоєння коливань рамки гальванометра.

6. Замість еталонного конденсатора перемикачем К3 підключити до кола конденсатор невідомої ємності  $C_{1x}$ .

7. Не змінюючи напруги  $U_1$ , виконати вимірювання, описанні в пп. 4, 5 і обчислити середнє значення  $n_0^{(1)}$ .

8. Дії, описані в пп.3 – 7, виконати для конденсаторів  $C_{2x}, C_{3x}, C_{4x}$ , заносючи дані у таблиці 3.2, 3.3 і 3.4 відповідно.

9. Установити за допомогою потенціометра  $R$  (див. п.2) іншу напругу  $U_2$  і повторити вимірювання згідно з пп. 3-8. Результати заносити до табл.3.1, 3.2, 3.3 і 3.4.

### Порядок виконання роботи на віртуальному макеті

- Після завантаження програми введіть своє прізвище, ім'я та групу.
- Натисніть кнопку «Увімкнути» і множник шкали «x1».
- Натисніть кнопку U1. Майте на увазі, що напруга живлення є індивідуальною для кожного студента.
- Натисніть кнопку C0, і далі «Заряд».
- Натисніть кнопку «Розряд» і фіксуйте максимальне відхилення «зайчика» по шкалі. У рядок 1 табл. 3.1 запишіть значення  $n_0^0$  у поділках шкали. Для зупинки коливань «зайчика» натисніть кнопку «Стоп». Повторіть вимірювання ще раз і запишіть значення  $n_0^0$  у рядок 2 табл.3.1.
- Натискаючи по чергово кнопки C1, C2 і т. д. проводьте вимірювання відповідно до п.5. Результати вимірювань записуйте у табл. 3.2, 3.3 і т. д. Якщо зайчик виходить за межі шкали натисніть кнопку множника шкали. У такому разі результат вимірювання буде більшим у відповідну кількість разів.
- Натисніть кнопку U2 і повторіть вимірювання, описані в пп. 5,6.

Табл. 3.1

Вимірювання ємності $C_{1x}$				
	$U_1$		$U_2$	
	$n_0^0$	$n_0^{(1)}$	$n_0^0$	$n_0^{(1)}$
1				
2				
$\langle n \rangle$				
$\langle C_{1x}(U_1) \rangle =$			$\langle C_{1x}(U_2) \rangle =$	

Табл. 3.2

Вимірювання ємності $C_{2x}$				
	$U_1$		$U_2$	
	$n_0^0$	$n_0^{(2)}$	$n_0^0$	$n_0^{(2)}$
1				
2				
$\langle n \rangle$				
$\langle C_{2x}(U_1) \rangle =$			$\langle C_{2x}(U_2) \rangle =$	

Табл. 3.1

Вимірювання ємності $C_{3x}$				
	$U_1$		$U_2$	
	$n_0^0$	$n_0^{(3)}$	$n_0^0$	$n_0^{(3)}$
1				
2				
$\langle n \rangle$				
$\langle C_{3x}(U_1) \rangle =$			$\langle C_{3x}(U_2) \rangle =$	

Табл. 3.4

Вимірювання ємності $C_{4x}$				
	$U_1$		$U_2$	
	$n_0^0$	$n_0^{(4)}$	$n_0^0$	$n_0^{(4)}$
1				
2				
$\langle n \rangle$				
$\langle C_{4x}(U_1) \rangle =$			$\langle C_{4x}(U_2) \rangle =$	

### Обробка результатів вимірювань

Використовуючи формулу

$$C_{ix}(U_j) = C_0 \langle n_0^{(i)} \rangle / \langle n_0^{(0)} \rangle$$

визначити за наведеною пропорцією середні значення невідомих ємностей (для значень від  $i = 1$  до  $i = 4$ ) для двох різних напруг зарядки  $U_1$  і  $U_2$ . Остаточні усереднені експериментально виміряні значення ємностей обчислити за формулою

$$\langle C_{ix} \rangle = \frac{1}{2} (\langle C_{ix}(U_1) \rangle + \langle C_{ix}(U_2) \rangle).$$

Остаточні результати записати у вигляді

$$C_{ix}(\text{конд}) = \dots\dots\dots; \quad \langle C_{ix} \rangle(\text{вимір}) = \dots\dots\dots$$

### Визначення похибки результатів вимірювання

1. Порівняти отримані виміряні середні значення ємності, наприклад,  $\langle C_{1x} \rangle$  з ємністю, вказаною на конденсаторі  $C_1$  (конд), – і обчислити відносну похибку вимірювання

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta C}{\langle C_{1x} \rangle} \cdot 100 \% = \frac{C_1(\text{конд}) - \langle C_{1x} \rangle}{C_1(\text{конд})} \cdot 100 \% =$$

2. Повторити розрахунки п.1. для  $\langle C_{2x} \rangle$ ,  $\langle C_{3x} \rangle$ ,  $\langle C_{4x} \rangle$  і записати визначені похибки:

$$\varepsilon_1 = \quad , \varepsilon_2 = \quad , \varepsilon_3 = \quad , \varepsilon_4 = \quad .$$

## Контрольні запитання

1. Що таке електрична ємність провідника і конденсатора? В яких одиницях вона вимірюється?
2. У чому полягає сутність запропонованого методу вимірювання ємності конденсатора?
3. Виведіть формулу, яка підтверджує, що величина першого відхилення балістичного гальванометра пропорційна заряду, який пройшов по його рамці.
4. Як влаштований балістичний гальванометр і яке його призначення? Які відміни є у конструкціях «звичайного» та балістичного гальванометрів?
5. Що таке динамічна й балістична сталі гальванометра?
6. Яке призначення кнопкового вимикача  $K_2$  у схемі? Поясніть фізичні причини гальмування рамки гальванометра при натисканні кнопки  $K_2$ .
7. У чому полягає явище електромагнітної індукції? Поясніть принцип «індукційного тертя».
8. Поясніть призначення елементів схеми на рис. 3.3.

## Рекомендована література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Т.2. –К.:, “Техніка”, 2001.
2. Бушок Г. В. Венгер. Курс фізики : у 3 кн. Кн. 2. Електрика і магнетизм: Навч. посіб. – К: Вища школа, 2003. §§ 16-17, С. 39 – 46;. §§ 80-81, С. 206 – 208.  
[https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2015/Byshok\\_P2\\_2003\\_278.pdf](https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2015/Byshok_P2_2003_278.pdf)
3. Бригінець В. П., Подласов С. О. ФІЗИКА ДЛЯ БАКАЛАВРІВ. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ. Електрична ємність. Конденсатори.  
<https://physics.zffft.kpi.ua/mod/book/view.php?id=297&chapterid=442#e52>