

Лабораторна робота № 2-3

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:

$$C = \frac{q}{U}, \quad (3.1)$$

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 , C_2) зарядити до однакової різниці потенціалів, то їхні заряди (q_1 , 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 $U_1 = U_2 = U$).

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.

Скорочене описання балістичного гальванометра

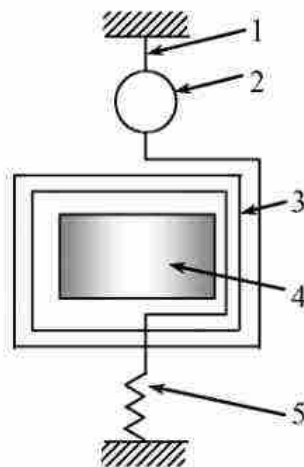


Рис. 3.1

Балістичний гальванометр використовується для вимірювання кількості електрики (електричного заряду), яка проходить колом за проміжок часу, малий у порівнянні з періодом власних коливань рамки. 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 рухомої частини.

Існують стрілкові і дзеркальні гальванометри, останні є чутливішими. У дзеркальному гальванометрі (рис.3.1.) рухома рамка 3 підвішується в магнітному полі сталого магніту на тонкій (товщина декілька мікрон) пружній нитці (підвісці). 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 система. До підвісу біля рамки прикріплюється легке дзеркало 2. Промінь світла, що прямує від приладу, тим більше його чутливість до струму, 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".

Збільшення моменту інерції рамки гальванометра можна досягти прикріпленням до рамки 3 додаткових тягарців. Гальванометр зі збільшеним моментом інерції вимірює заряд, тобто діє як інтегратор струму.

На рух рамки балістичного гальванометра у загальному випадку впливають три моменти сили:

- 1) обертальний момент, який діє на рамку при проходженні по ній струму і має максимальне значення $iBSn$;
- 2) момент сил кручення, величина якого дорівнює $D\varphi$;
- 3) момент сил гальмування, величина якого дорівнює $P\dot{\varphi}$.

Основне рівняння обертального руху рамки має вигляд

$$I\ddot{\varphi} = -P\dot{\varphi} - D\varphi + iBSn, \quad (3.3)$$

де I – момент інерції рухомої системи гальванометра, B – індукції магнітного поля у повітряному зазорі, S – площа витка рамки, n – число витків, D – момент сил кручення на одиницю кута повороту, i – сила струму, який протікає по виткам рамки, P – момент сил гальмування на одиницю кутової швидкості.

Скористаємося формулою (3.1) для встановлення співвідношення між величиною заряду q , який проходить через обмотку рамки гальванометра, та першим максимальним відхиленням рамки від положення рівноваги φ_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 $\tau < T_0$, де T_0 – період власних коливань рамки (точніше – її першого відхилення), може бути записано приблизно так:

$$I\ddot{\varphi} = iBSn, \quad (3.4)$$

звідки

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

При цьому рамка набуде кінетичної енергії $I\dot{\varphi}^2/2$. Ця енергія витрачається на закручування підвісу на кут φ . Оскільки момент сил кручення при повороті на кут φ 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 φ_0 виконується робота

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

Таким чином,

$$\frac{D\varphi_0^2}{2} = \frac{I \cdot \dot{\varphi}^2}{2} \Rightarrow I \cdot \dot{\varphi}^2 = D\varphi_0^2. \quad (3.7)$$

З рівнянь (3.5) та (3.7), дістанемо:

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

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

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

де $b = (cT_0)/2\pi$. Величина $c = D/(B \cdot n \cdot S)$ 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 (числом поділок) $n_0^{(1)}/n_0^{(2)}$ світлового штриха по шкалі гальванометра, оскільки під час експерименту відстань від рамки з дзеркалом до шкали гальванометра залишається сталою. Кут повороту рамки φ пов'язаний з величиною зміщення l світлового штриха шкалою приладу й відстанню від шкали до дзеркала l співвідношенням, яке легко одержати з рис. 3.2.

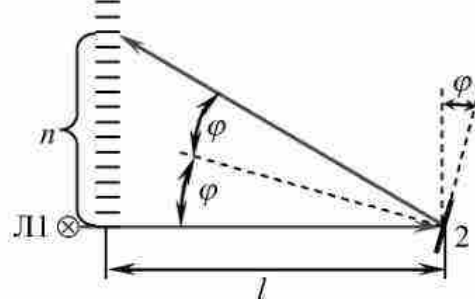


Рис. 3.2

Очевидно, що кількість поділок, на яку відхилився «зайчик» гальванометра, прямо пропорційна куту відхилення дзеркальця $n \propto \varphi$, а оскільки кут відхилення пропорційний заряду, що пройшов у колі, то і кількість поділок пропорційна заряду: $n \propto q$. Якщо через гальванометр розряджати конденсатори C_1 і C_2 , заряджені відповідно до зарядів q_1, q_2 , то можна записати

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

де b – коефіцієнт пропорційності.

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.

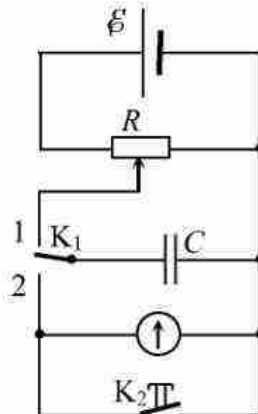


Рис. 3.2

Сталий струм від джерела живлення \mathcal{E} підводиться змінного резистора, 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.

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

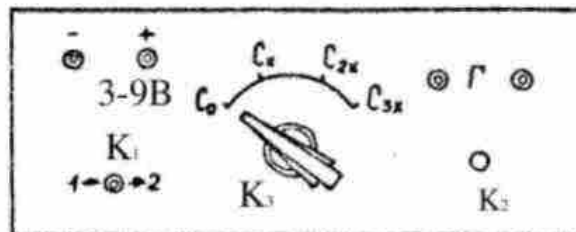


Рис. 3.4

Передня панель експериментальної установки зображена на рис. 3.4. Вона живиться від виходу УИПа "3...9 В". Балістичний гальванометр під'єднуємо до клем "Г". Перемикач K_3 дозволяє послідовно під'єднувати до схеми етальонні конденсатори C_0 і конденсатори $C_{1x}, C_{2x}, C_{3x}, C_{4x}$, ємності яких треба виміряти.

Порядок виконання роботи

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. Пережкнути K_1 в позицію 2, розряджаючи конденсатор через гальванометр. Максимальне відхилення світлового штриха на шкалі n_0^0 занести до таблиці 3.1. Вимірювання повторити згідно з п.п.4, 5 двічі та визначити середнє значення $\langle n_0^0 \rangle$.

Зауваження. Не забувайте користуватись кнопковим вимикачем K_2 для заспокоєння коливань рамки гальванометра.

6. Замість еталонного конденсатора перемикачем K_3 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 $\langle n_0^1 \rangle$.

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.

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_0^1		n_0^0	n_0^1
1					
2					
$\langle n \rangle$					
$\langle C_{2x}(U_1) \rangle =$			$\langle C_{2x}(U_2) \rangle =$		

Табл.3.3

Вимірювання ємності C_{3x}					
U_1			U_2		
	n_0^0	n_0^1		n_0^0	n_0^1
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^i		n_0^0	n_0^i
1					
2					
$\langle n \rangle$					
$\langle C_{4x}(U_1) \rangle =$			$\langle C_{4x}(U_2) \rangle =$		

Обробка результатів вимірювання

Використовуючи формулу

$$\langle C_{ix}(U_i) \rangle = C_0 \cdot \frac{\langle n_0^i \rangle}{\langle n_0^0 \rangle},$$

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

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

Визначення похибки результатів вимірювання

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

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

2. Повторити розрахунки п.1. для $\langle C_{2x} \rangle$, $\langle C_{3x} \rangle$, $\langle C_{4x} \rangle$; визначити похибки ε_2 , ε_3 , ε_4 і записати.
3. Остаточнo: похибки вимірювань

$$\varepsilon_1 = \dots\dots\dots; \varepsilon_2 = \dots\dots\dots; \varepsilon_3 = \dots\dots\dots; \varepsilon_4 = \dots\dots\dots$$

Контрольні запитання

1. Що таке електрична ємність і 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?
5. Що таке динамічна й балістична сталі гальванометра?
6. Яке призначення кнопкового вимикача K_2 у схемі?
7. Який принцип роботи 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. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.3. –М.: Наука, 1989.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.3. –М.: Наука, 1977.
4. Черкашин В.П. Физика. Электричество и магнетизм. §2. – К.: Выща школа, 1986.