

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ**  
**Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського**  
**«Харківський авіаційний інститут»**

**Д.О. Воронович, І.В. Луньов,**  
**А.М. Охрімівський, О.В. Подшивалова**

## **ЕЛЕКТРИКА Й МАГНЕТИЗМ**

**Навчальний посібник**  
**до лабораторного практикуму**

**Харків «ХАІ» 2011**

УДК [53 + 537 + 537.6] (076.5)  
Е45

Рецензенти: д-р фіз.-мат. наук, проф. М.І. Гришанов,  
доц. В.П. Олефір

**Воронович, Д. О.**

Е45 Електрика й магнетизм [Текст]: навч. посіб. до лаб. практикуму /  
Д.О. Воронович, І.В. Луньов, А.М. Охрімовський, О.В. Подшивалова.  
– Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т»,  
2011.– 140 с.

Наведено опис передбачених навчальною програмою лабораторних робіт, які виконуються під час вивчення розділу фізики «Електрика й магнетизм». Кожна лабораторна робота містить перелік необхідних приладів і обладнання, теоретичні відомості, що стосуються методики експерименту, опис лабораторної установки, порядок виконання робіт і контрольні запитання для самоперевірки.

Для студентів технічних вузів.

Іл. 67. Табл. 29. Бібліогр.: 12 назв

**УДК [53 + 537 + 537.6] (076.5)**

© Воронович Д.О., Луньов І.В.,  
Охрімовський А.М.,  
Подшивалова О.В., 2011

© Національний аерокосмічний  
університет ім. М.Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут», 2011

## ПЕРЕДМОВА

Пропоноване видання містить опис усіх лабораторних робіт, які виконуються на лабораторному практикумі кафедри фізики. Частина цих робіт розроблено в 60 – 90-ті роки ХХ століття старшим поколінням викладачів: О.Л. Рвачовим, Г.Д. Нікишовою, В.Г. Падалкою, О.М. Лібіною, І.Я. Мінцем, О.І. Тищенко, Л.С. Жиліною, Г.С. Тохтамишевою та ін. Зміст запропонованих лабораторних робіт охоплює всі розділи з теми «Електромагнетизм» курсу «Загальна фізика». Серед них: «Електростатика», «Постійний струм», «Магнітне поле постійних струмів», «Рух заряджених частинок в електричному й магнітному полях», «Явища електромагнітної індукції й самоіндукції», «Електромагнітні коливання й хвилі». В основі опису лабораторних робіт лежить матеріал попередніх видань посібників з цієї тематики, у розробленні яких брали участь І.Г. Гаврикова, М.І. Глущенко, М.М. Жуков, О.П. Кислицин, В.П. Мигаль, Т.С. Михайловська, О.І. Петрова, А.В. Попов, Є.П. Скидан, А.О. Таран, О.М. Чугай, В.Ю. Гресь. У цьому посібнику описи більшості робіт істотно перероблено, виправлено допущені раніше помилки, розширено та систематизовано коло запитань для самоперевірки.

Під час підготовки до виконання робіт студентам слід користуватися літературою, наведеною в бібліографічному списку.

Автори будуть вдячні за зауваження й побажання, висловлені із приводу змісту й оформлення цього навчального посібника.

# ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ Й ПРИЛАДИ

## 1. Класифікація електровимірювальних приладів

Під час проведення фізичних експериментів найважливіше значення мають правильно виконані вимірювання. Одержання досить надійних даних залежить від приладів, способів вимірювання й урахування похибок. Більша частина вимірювань як електричних, так і неелектричних величин сьогодні виконується за допомогою електровимірювальних приладів.

Електричне вимірювання – це порівняння електричної величини з її еталоном. Вимірювання можуть бути зроблені різними способами залежно від характеру вимірюваної величини, необхідної точності й т.д. Вимірювання бувають *прямими*, коли вимірювальний прилад показує безпосередньо числове значення вимірюваної величини, і *непрямими*, коли результат можна отримати після підстановки у формулу величин, одержаних під час прямих вимірювань. Вимірювання за допомогою градуйованих приладів мають назву *методу безпосереднього оцінювання*.

Електровимірювальні прилади класифікуються таким чином:

- 1) за видом вимірюваної величини – амперметри, вольтметри, омметри, мости для вимірювання опору, ємності, індуктивності;
- 2) принципом дії (за вимірювальною системою) – електромагнітні, магнітоелектричні, електродинамічні, електронні, індукційні, електростатичні й ін.;
- 3) ступенем точності (класом точності);
- 4) способом захисту від впливу зовнішніх магнітних або електричних полів – екрановані, неекрановані;
- 5) способом відліку – стрілкові, цифрові;
- 6) особливими вимогами експлуатації – пиловодонепроникні, вибухобезпечні й ін.

## 2. Основні параметри електровимірювальних приладів. Похибка приладів

Незважаючи на те, що прилади різних систем істотно відрізняються один від одного, є багато деталей і вузлів, спільних для всіх електровимірювальних приладів. Для захисту вимірювального механізму від механічних впливів, пилу, вологи використовують корпус, виготовлений зазвичай із пластмаси. На шкалу приладу наносять (рис. 1) найменування приладу, умовні позначки системи приладу, класу точності,

ступеня захищеності від магнітних або електричних полів; указують випробувану напругу ізоляції вимірювального кола відносно корпусу, вид

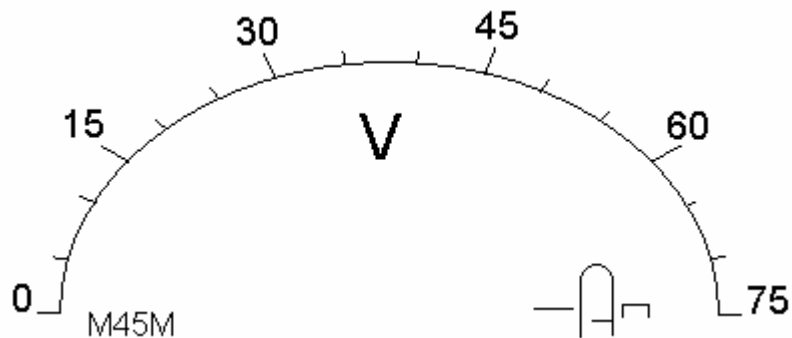


Рис. 1

струму (постійний, змінний) і кількість фаз, рік випуску й заводський номер.

Шкалу приладу градуують – біля деяких поділок шкали наносять цифри, що показують числове значення вимірюваної величини. Різницю значень величини, що відповідають двом сусіднім поділкам, називають ціною поділки. Якщо  $N_1$  і  $N_2$  – зазначені на шкалі числові значення вимірюваної величини, а  $n$  – кількість поділок між ними, то *ціна поділки* визначається за формулою

$$C = \frac{N_1 - N_2}{n}. \quad (1)$$

*Приклад.* Шкала вольтметра (див. рис. 1) складається з 15 поділок, номінальне значення шкали (верхня межа вимірювань) становить 75 В. Ціна поділки вольтметра  $C = \frac{75}{15} = 5$  В/под. Той самий вольтметр, увімкнений в режимі вимірювання з межею 300 В, матиме ціну поділки 20 В/под.

Похибка показань приладу є його важливою характеристикою й обумовлює ступінь наближення показань приладу до дійсного значення вимірюваної величини.

Абсолютна похибка приладу

$$\Delta A = |A_1 - A|, \quad (2)$$

де  $A_1$  – показання приладу;  $A$  – справжнє значення вимірюваної величини.

Відносна похибка приладу

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A} 100 \%. \quad (3)$$

Зведена відносна похибка приладу

$$\gamma_n = \frac{\Delta A}{A_n} 100 \%, \quad (4)$$

де  $A_n$  – номінальне (максимальне) значення вимірюваної величини. Оскільки величина відносної похибки тим більша, чим менше значення вимірюваної величини, на шкалі вимірювального приладу зазначено його зведену відносну похибку.

За ступенем точності прилади поділяють на вісім класів точності: 0,05; 0,01; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4,0. *Клас точності* визначає зведену відносну похибку певного приладу. За класом точності можна визначити максимально допустиму абсолютну похибку.

*Приклад.* Показання амперметра  $I_1 = 1$  А, номінальне значення шкали  $I_n = 5$  А, клас точності  $\gamma_n = 1,0$ . Згідно з формулою (4) абсолютна похибка приладу  $\Delta I = \frac{\gamma_n I_n}{100} = \frac{1,0 \times 5}{100} = 0,05$  А. Знаючи абсолютну похибку, дійсне значення вимірюваної величини можна записати у вигляді  $I = I_1 + \Delta I$ ; в цьому прикладі  $I = (1 \pm 0,05)$  А.

Важливою характеристикою приладу є його *чутливість* до вимірюваної величини. *Чутливістю* приладу  $S$  називають похідну від переміщення покажчика приладу за вимірюваною величиною  $A$ . Для приладів з кутовим переміщенням стрілки

$$S = \frac{d\alpha}{dA}. \quad (5)$$

Ціна поділки й чутливість приладу зв'язані співвідношенням

$$C = \frac{1}{S} = \frac{dA}{d\alpha}. \quad (6)$$

Слід знати, що поряд із приладами, у яких застосовуються стрілкові покажчики, існують прилади високої чутливості (наприклад, гальванометри), у яких роль стрілки виконує світловий промінь. На рухомій частині приладу прикріплюють дзеркальце, на яке від освітлювача спрямовують промінь світла. Відбитий промінь падає на шкалу, внаслідок чого на шкалі утворюється світловий відблиск (“зайчик”). Світловий покажчик дає можливість значно підвищити чутливість приладу.

Основним елементом вимірювального приладу є механізм, у якому електрична енергія перетворюється на механічну. Під дією останньої відбувається відхилення рухомої частини механізму з покажчиком (стрілкою). Розглянемо моменти, що виникають при цьому, – обертальний і протидійний. Обертальний момент  $M$ , який виникає під час вимірювань певної величини, повертає рухому частину приладу за годинниковою стрілкою. Момент  $M$  однозначно обумовлюється вимірюваною величиною  $A$  і залежить від кута повороту  $\alpha$  рухомої частини:

$$M = f(A, \alpha).$$

Для того щоб кут відхилення  $\alpha$  залежав від вимірюваної величини, у приладі під час повороту рухомої частини створюється протидійний момент  $M_\alpha$ , спрямований назустріч обертальному моменту й залежний від кута повороту  $\alpha$ . Здебільшого  $M_\alpha$  створюється за допомогою пружних елементів (спіральних пружинок або тонких ниток – розтяжок і підвісів), які під час повороту рухомої частини закручуються. Протидіючий момент

$$M_\alpha = D\alpha,$$

де  $D$  визначається пружними властивостями пружини (підвісу). В рівноважному положенні покажчика обертальний і протидійний моменти дорівнюють один одному:  $M = M_\alpha$ .

Залежно від принципу дії вимірювальних приладів їхні шкали можуть бути рівномірними й нерівномірними. Шкала рівномірна, якщо обертальний момент прямо пропорційний вимірюваній величині, а протидійний – куту повороту рухомої частини. Коли ці залежності мають степеневий, логарифмічний або інший складний характер, шкала приладу є нерівномірною.

Протидійний момент після вимикання приладу повертає рухому частину приладу у початкове положення. За відсутності протидійного моменту під час вимірювання стрілка приладу відхиляється на всю шкалу й не має певного нульового положення. У високочутливих приладах розтяжки й підвіси використовуються не тільки для створення протидійного моменту, але й для прикріплення рухомої частини й підведення до неї струму. Рухома частина приладу через наявність пружної сили протидії й сил тертя робить згасаючі коливання. Для скорочення часу встановлення стрілки у початкове положення застосовуються заспокоювачі. У приладах найчастіше використовуються заспокоювачі двох видів: повітряні й магнітоіндукційні.

## Лабораторна робота № 2-01 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ МОДЕЛЮВАННЯ

*Мета роботи* – дослідження електростатичного поля, яке створюється електродами різної форми; побудова екіпотенціальних поверхонь та ліній напруженості електростатичного поля.

*Прилади й обладнання:* електролітична ванна з електродами різної форми й координатною сіткою; осцилограф; вольтметр; мікроамперметр; зонди; джерело змінної напруги.

### Вивчення лабораторної установки й методики вимірювань

Електростатичне поле характеризується в кожній точці простору вектором напруженості електричного поля  $\vec{E}$  й потенціалом  $\varphi$ , які зв'язані один з одним співвідношенням

$$\vec{E}(x, y, z) = -\text{grad}\varphi. \quad (1.1)$$

Це поле графічно зображується за допомогою ліній напруженості  $\vec{E}$  (силових ліній) та екіпотенціальних поверхонь (ліній). Оскільки лінії напруженості та екіпотенціальні лінії взаємно перпендикулярні, то електростатичне поле можна зображувати за допомогою тільки силових або екіпотенціальних ліній.

У цій роботі для дослідження розташування силових та екіпотенціальних ліній використовується метод моделювання поля за допомогою електролітичної ванни, який базується на подібності полів у вакуумі й однорідному електроліті, що створюється однією й тією ж системою зарядів. На відміну від вакууму або діелектрика в електроліті є носії заряду, тому необхідно використовувати джерело струму для підтримки постійних потенціалів на електродах. Під дією досліджуваного електричного поля вільні носії створюють електричний струм, густина якого, відповідно до закону Ома,

$$\vec{j}(x, y, z) = \sigma \vec{E}(x, y, z), \quad (1.2)$$

де  $\sigma$  – питома електрична провідність електроліту.

Густина струму в кожній точці електроліту пропорційна напруженості поля  $\vec{E}$ , тому у ванні (за умови однорідності електроліту) формується поле густини струмів (розподіл у просторі густини струму  $\vec{j} = \vec{j}(x, y, z)$ ), подібне до електричного поля. Досліджувати поле густини струмів набагато легше, ніж електричне поле у вакуумі. Вигляд ліній струму можна визначити, вимірюючи сили струмів, що проходять через деяку плоску



площадку (невеликий плоский зонд), яку поміщують в різні точки електроліту.

Розподіл потенціалів можна знайти, вводячи в електроліт циліндричний металевий електрод (зонд), при цьому потенціал зонда стає таким, що дорівнює потенціалу тієї точки поля, у якій він знаходиться. Треба враховувати, що електричне коло зонда повинне мати більший опір порівняно з опором між точками в електроліті, а сам зонд повинен мати невеликі розміри порівняно з електродами, у протилежному випадку внесення зонда спотворить поле.

З метою запобігання поляризації електроліту використовується джерело змінної напруги частотою 50 Гц. При такій частоті розподіл струмів в електролітичній ванні можна розглядати як постійний у цей момент часу (квазістаціонарний).

Схему експериментальної установки зображено на рис. 1.1. У діелектричну ванну, заповнену електролітом (водою), поміщено металеві

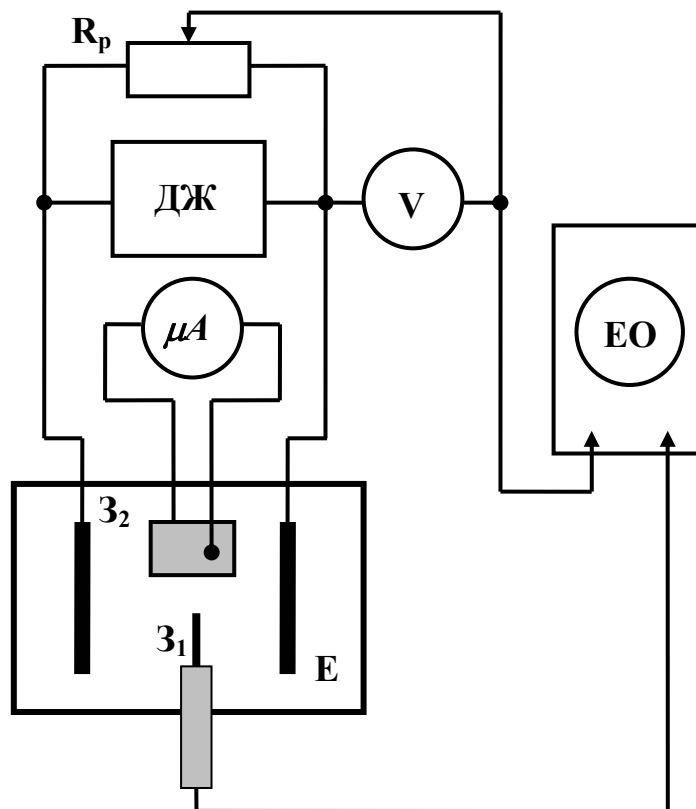


Рис. 1.1

електроди  $E$ . Джерелом живлення  $ДЖ$  створюється потрібна різниця потенціалів на електродах, поле між якими необхідно дослідити.

Положення екіпотенціальних ліній визначається за допомогою циліндричного зонда  $Z_1$ . На вхід осцилографа (при вимкненій

горизонтальній розгортці) подається сигнал, що дорівнює різниці потенціалів між рухомим контактом потенціометра  $R$  і зондом  $Z_1$ . На екрані осцилографа з'являється вертикальна лінія, довжина якої пропорційна цій різниці потенціалів. Якщо різниця потенціалів між зондом і рухомим контактом потенціометра дорівнює нулю, то на екрані спостерігається світна точка. Змінюючи положення зонда  $Z_1$ , можна знайти точки у ванні, у яких потенціал дорівнює потенціалу рухомого контакту потенціометра  $R$ . Ці точки лежать на еквіпотенціальній лінії досліджуваного поля. Потенціал поля на цій лінії визначається вольтметром  $V$ . Змінюючи положення рухомого контакту потенціометра  $R$ , можна визначити положення еквіпотенціальних ліній, які мають різні потенціали.

Розташування силових ліній поля, які збігаються з лініями густини струму, визначається за допомогою плоского зонда  $Z_2$  та мікроамперметра. Зонд  $Z_2$  складається із двох металевих пластин, розділених шаром діелектрика, які з'єднано через мікроамперметр (рис. 1.1). Щоб струм між пластинами йшов через мікроамперметр, а не через електроліт, його опір має бути значно меншим від опору між точками в електроліті, у яких знаходяться пластини. Якщо пластини розташовано паралельно до ліній густини струму (лінії струму не проходять через пластини), то через мікроамперметр струм не йде. У цьому випадку лінії струму  $i$ , відповідно, лінії напруженості електричного поля паралельні до площини пластин. Повертаючи зонд відносно вертикальної осі, можна добитися, щоб струм, який протікає через амперметр, був максимальним. У цьому випадку площина пластин буде перпендикулярною до ліній густини струму  $j$ , відповідно, до ліній напруженості.

## Порядок виконання роботи

### *Завдання 1. Побудова еквіпотенціальних ліній*

1. На міліметровому папері (зберігаючи масштаб) накреслити систему електродів (форму використовуваних електродів задає викладач).
2. Заповнити ванночку водою так, щоб пластина з координатною сіткою й електродами була занурена у воду на глибину 5 ... 10 мм. Увімкнути джерело живлення.
3. Увімкнути осцилограф і дати йому прогрітися протягом 2–3 хв. Відімкнувши розгортку по горизонталі, ручками керування добитися того, щоб електронний промінь попадав у центр екрана.
4. Визначити потенціали електродів, які задаються джерелом живлення. Для цього необхідно ручку регулювання потенціометра  $R$  установити в крайнє ліве положення й доторкнутися зондом  $Z_1$  до одного з електродів. При цьому на екрані осцилографа буде лінія або точка. Якщо на екрані осцилографа буде точка, то потенціал зонда дорівнює нулю (відхилення

стрілки вольтметра відсутнє). Якщо на екрані осцилографа буде лінія, то потенціал електрода відмінний від нуля. Щоб визначити потенціал цього електрода, треба, не відриваючи зонд від електрода, обертати ручку потенціометра доти, доки лінія на екрані не перетвориться на точку. При цьому вольтметр покаже потенціал цього електрода.

5. Ручкою регулювання потенціометра встановити напругу на вольтметрі 2 В. Переміщуючи зонд  $Z_1$  по дну ванни, знайти положення, у якому вертикальна лінія на екрані осцилографа перетвориться на точку. Це положення зонда, визначене за координатною сіткою, позначити на міліметровому папері із зображенням електродів. Переміщуючи зонд у просторі між електродами із кроком 10 мм, знайти 5 – 6 таких точок і з'єднати їх лінією. Це буде еквіпотенціальна лінія заданого потенціалу.
6. Збільшуючи напругу, побудувати 3 – 5 еквіпотенціальних ліній способом, описаним у п. 5.
7. Побудувати лінії напруженості досліджуваного поля, урахувавши, що вони перпендикулярні до еквіпотенціальних ліній.

### *Завдання 2. Побудова ліній напруженості електричного поля*

1. Помістити в електроліт плоский зонд  $Z_2$  і обертати його навколо осі доти, доки струм, що протікає через мікроамперметр, не буде дорівнювати нулю. У цьому випадку площина електрода буде напрямлена по дотичній до силової лінії електричного поля в певній точці електроліту.
2. Знайти напрямок силових ліній, переміщуючи зонд  $Z_2$  від одного електрода до іншого й уздовж електродів з кроком 10 мм.
3. Побудувати картину силових ліній напруженості електричного поля.
4. Порівняти отримані лінії напруженості електричного поля з лініями, побудованими в п. 7 завдання 1. Зробити висновки.

### *Завдання 3. Перевірка теореми Гаусса для електричного поля*

1. Вибрати замкнуту поверхню в електроліті між електродами, через яку буде визначатися потік вектора  $\vec{E}$  (рекомендується як таку поверхню вибрати замкнутий контур у площині ванни у вигляді квадрата зі стороною у дві ширини зонда  $Z_2$ ).
2. Розташували зонд  $Z_2$  таким чином, щоб одна й та сама його сторона була повернена всередину поверхні, виміряти величину сили струму за допомогою мікроамперметра.
3. Перемістивши зонд таким чином, щоб його послідовні положення, віддалені один від одного на ширину зонда, повністю описали замкнуту поверхню, виміряти величину сили струму для кожного положення зонда.

4. Визначити величину потоку  $\Phi_E$  через замкнуту поверхню, користуючись виразом  $\Phi_E = \rho \cdot I$ , де  $I$  – алгебраїчна сума струмів,  $\rho = 10^3$  Ом·м.
5. Зробити висновки.

### Контрольні запитання

#### Варіант 1

1. Що називають напруженістю й потенціалом електростатичного поля? Який між ними зв'язок?
2. Сформулюйте принцип суперпозиції електростатичних полів.
3. При якому розподілі зарядів напруженість електростатичного поля доцільно знаходити за допомогою теореми Гаусса в інтегральній формі?
4. *Задача.* Електричне поле задано у вигляді  $\vec{E} = a\vec{i} + b\vec{j} + c\vec{k}$ , де  $a, b, c$  – сталі. Знайдіть потенціал  $\varphi(x, y, z)$ , взявши, що  $\varphi(0, 0, 0) = 0$ .

*Відповідь:*  $\varphi = - (ax + by + cz)$ .

#### Варіант 2

1. Що називають потоком вектора напруженості? Сформулюйте теорему Гаусса для вектора напруженості електричного поля.
2. Поясніть, чому лінії напруженості й екіпотенціальні поверхні взаємно перпендикулярні.
3. У чому суть методу моделювання в електролітичній ванні?
4. *Задача.* Два однойменних точкових заряди  $q_1 = 100$  нКл і  $q_2 = 200$  нКл знаходяться на відстані 1 м один від одного. Знайдіть координату  $x$  точки, у якій напруженість поля, створеного цими зарядами, дорівнює нулю. Заряд  $q_1$  розмістити на початку координат.

*Відповідь:*  $x = 0,41$  м.

#### Варіант 3

1. Чому дорівнює циркуляція вектора напруженості електростатичного поля? Сформулюйте умову потенціальності поля.
2. Накресліть силові лінії й екіпотенціальні поверхні поля, створеного: а) точковим зарядом; б) рівномірно зарядженою площиною.
3. Знайдіть за допомогою теореми Гаусса напруженість поля, створеного кулею радіусом  $R$ , заряд якої розподілений по поверхні із густиною  $\sigma$ .
4. *Задача.* Електричне поле задано у вигляді  $\varphi = - (ax^3 + by^2 + cz)$ , де  $a, b, c$  – сталі. Знайдіть залежність  $\vec{E}(x, y, z)$ .

*Відповідь:*  $\vec{E} = 3ax^2\vec{i} + 2by\vec{j} + c\vec{k}$ .

## Лабораторна робота № 2-02 ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СЕГНЕТОЕЛЕКТРИКІВ

*Мета роботи* – вивчення залежності діелектричної проникності сегнетоелектрика від напруженості електричного поля, визначення залишкового електричного зміщення й коерцитивної сили.

*Прилади й обладнання:* джерело змінної напруги; конденсатор, між обкладками якого знаходиться досліджуваний сегнетоелектрик (титанат барію  $BaTiO_3$ ); вимірювальна схема; осцилограф.

### Вивчення установки й виведення робочих формул

Сегнетоелектрики – це кристалічні діелектрики, які мають у певному інтервалі температур спонтанну (довільну) поляризацію окремих областей цього кристала, яка істотно змінюється під впливом зовнішніх чинників. Характерною рисою сегнетоелектриків є різке зростання (до кількох тисяч) відносної діелектричної проникності  $\epsilon$  у цьому інтервалі температур. Наприклад, при 20 °С діелектрична проникність сегнетової солі дорівнює 6000, титанату барію – від 1700 до 2000.

Кристали сегнетоелектриків складаються з довільно поляризованих областей – доменів. Спонтанна поляризація доменів є результатом орієнтації дипольних моментів усіх молекул усередині домену в одному напрямку. За відсутності зовнішнього поля домени поляризовані таким чином, що сумарна поляризованість кристала дорівнює нулю. При внесенні кристала сегнетоелектрика у зовнішнє електричне поле межі доменів можуть зміщуватися, причому об'єм доменів, поляризованих за полем, збільшується за рахунок доменів, поляризованих проти поля. Можливим є також і зародження нових доменів, поляризація в яких орієнтована вздовж  $\vec{E}$  зовнішнього поля. Унаслідок цього в сегнетоелектрику з'являється відмінна від нуля результуюча поляризованість.

Залежність поляризованості  $\vec{P}$  від напруженості зовнішнього електричного поля  $\vec{E}$  для сегнетоелектриків нелінійна і має вигляд петлі гістерезису (від гр. *hystérēsis* – відставання, запізнювання) при циклічних змінах поля. Спочатку при збільшенні напруженості  $E$  числове значення поляризованості  $P$  зростає, як показує крива  $Oa$  на рис. 2.1. При деякому значенні напруженості електричного поля  $E_m$  поляризованість сегнетоелектрика перестає збільшуватися, тобто досягає насичення (точка  $a$  на рис. 2.1). При зменшенні  $E$  до нуля поляризованість  $P$  зменшується до деякої величини  $P_0$ , яку називають залишковою поляризованістю.

Поляризованість зникає повністю лише під дією електричного поля протилежного напрямку при напруженості  $E_k$ , яку називають коерцитивною силою (від лат. *coercitio* – утримання). При подальшому збільшенні електричного поля зворотного напрямку сегнетоелектрик знову поляризується за полем (крива  $cd$  на рис. 2.1) до насичення (точка  $d$ ). Зміна поляризованості зразка при зменшенні зворотного поля до нуля й увімкненні початкового поля відбувається вздовж кривої  $defa$ . Таким чином, при циклічній зміні електричного поля крива, що характеризує зміну поляризованості сегнетоелектрика, утворює петлю.

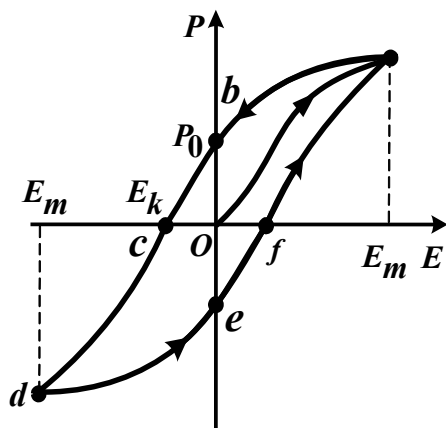


Рис. 2.1

Дослідження залежності поляризованості сегнетоелектрика від напруженості електричного поля здійснюється за допомогою експериментальної установки, електричну схему якої зображено на рис. 2.2. Напруга подається на подільник напруги, який складається з опорів  $R_1 = 510$  кОм і  $R_2 = 5,6$  кОм. Паралельно до подільника підімкнено дві послідовно з'єднані ємності: конденсатор  $C_1$  з досліджуваним сегнетоелектриком і еталонний конденсатор

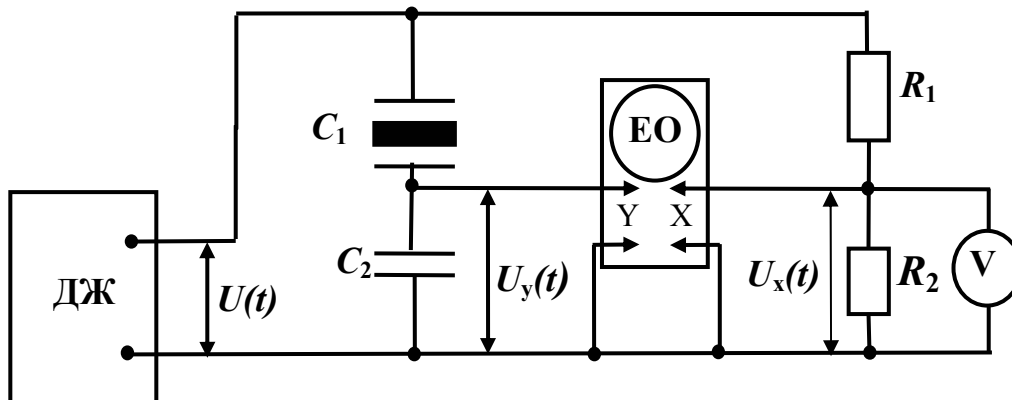


Рис. 2.2

$C_2 = 10$  мкФ, причому  $C_2 \gg C_1$ . Напругу, що подається на вхід X осцилографа EO з резистора  $R_2$ , можна обчислити в такий спосіб. Резистори  $R_1$  і  $R_2$  підімкнено послідовно, тому сила струму в них однакова. Тоді, користуючись законом Ома, можна записати

$$\frac{U(t)}{R_1 + R_2} = \frac{U_x(t)}{R_2},$$

звідки

$$U_x(t) = \frac{U(t)}{R_1 + R_2} R_2. \quad (2.1)$$

Отже, горизонтальне зміщення променя пропорційне миттєвому значенню напруги  $U(t)$ .

Змінна напруга  $U(t)$  прикладена в основному до  $C_1$  (тому що  $C_1 \ll C_2$ ) і створює в ньому електричне поле напруженістю

$$E(t) = \frac{U(t)}{d_1}, \quad (2.2)$$

де  $d_1$  – товщина пластини сегнетоелектрика. Підставивши  $U(t)$  з формули (2.1) в (2.2), одержимо

$$E(t) = \frac{R_1 + R_2}{R_2 d_1} U_x(t). \quad (2.3)$$

Вертикальне відхилення променя пропорційне напрузі  $U_y(t)$  на еталонному конденсаторі  $C_2$ :

$$U_y(t) = \frac{q_2(t)}{C_2},$$

де  $q_2(t)$  – заряд на обкладці конденсатора  $C_2$ . Оскільки конденсатори  $C_1$  і  $C_2$  підімкнено послідовно, то заряди на обкладках обох конденсаторів будуть однаковими:

$$q_1(t) = q_2(t) = q(t).$$

Тоді

$$U_y(t) = \frac{q(t)}{C_2} = \frac{\sigma_1(t) S_1}{C_2}, \quad (2.4)$$

де  $\sigma_1(t)$  – поверхнева густина вільних зарядів на обкладках конденсатора  $C_1$ ;  $S_1$  – площа пластин конденсатора  $C_1$ .

Унаслідок того, що поверхнева густина вільних зарядів  $\sigma_1(t)$  чисельно дорівнює нормальній складовій електричного зміщення  $D_n$  у сегнетоелектрику, із співвідношення (2.4) отримаємо

$$D(t) = \frac{C_2}{S_1} U_y(t). \quad (2.5)$$

Таким чином, електричне зміщення  $D(t)$  пропорційне вертикальному відхиленню променя на екрані осцилографа, а напруженість електричного поля в сегнетоелектрику пропорційна зміщенню променя по горизонталі (див. формулу (2.3)). Увімкнувши розгортку осцилографа, на екрані можна спостерігати залежність  $D = D(E)$ , що являє собою петлю гістерезису.

Оскільки  $\vec{P} = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \vec{D} \approx \vec{D}$  ( $\varepsilon \gg 1$ ), то спостережувана крива (петля) аналогічна залежності поляризованості  $P$  від напруженості електричного поля  $E$ .

Зміщення променя по осях  $X$  і  $Y$  залежить від чутливості даного осцилографа. Якщо чутливість осцилографа по осі  $X$  позначити через  $a_x$  [В/под.], а по осі  $Y$  – через  $a_y$  [В/под.], то за зміщенням променя можна обчислити напругу:

$$U_x = a_x x, \quad U_y = a_y y, \quad (2.6)$$

де  $x$  і  $y$  – кількість поділок (клітин) на екрані осцилографа.

З урахуванням співвідношень (2.6) формули (2.3) і (2.5) набувають вигляду

$$E(t) = \frac{1}{d_1} \frac{R_1 + R_2}{R_2} a_x x, \quad (2.7)$$

$$D(t) = \frac{C_2}{S_1} a_y y. \quad (2.8)$$

### Порядок виконання роботи

#### *Завдання 1. Визначення залежності діелектричної проникності сегнетоелектрика від напруженості поля*

1. Увімкнути джерело живлення й осцилограф.
2. На осцилографі встановити світну точку в центрі екрана. Регулюючи напругу  $U$ , одержати найбільше зображення петлі гістерезису (необхідно почекати кілька хвилин для того, щоб прогрівся сегнетоелектрик).
3. Записати використовувану чутливість  $a_y$  осцилографа по осі  $Y$ .
4. Визначити координату верхньої точки (точка  $a$  на рис. 2.1) петлі гістерезису  $x_0$  (при максимальному розмірі петлі) у поділках масштабної сітки. Виміряти за допомогою вольтметра значення  $U_x$ . За отриманими даними визначити чутливість  $a_x$  осцилографа по осі  $X$ .
5. Якщо петля гістерезису зміщується (“спливає”) відносно центра координатної сітки осцилографа, ручкою “Горизонтальне зміщення променя” зробити коректування.
6. Поступово зменшуючи напругу, провести 8 – 10 вимірювань координат  $x_0$  і  $y_0$  верхніх точок петель гістерезису (розмір петлі зменшувати з кроком 0,25 поділки по осі  $X$ ). Результати занести до табл. 2.1.

Таблиця 2.1

$x_0$ , под.	$E$ , В/м	$y_0$ , под.	$D$ , Кл/м <sup>2</sup>	$\varepsilon$



7. За формулами (2.7) і (2.8) обчислити відповідні значення  $E$  і  $D$ . Результати занести до табл. 2.1 ( $d_1 = 0,3$  мм,  $S_1 = 1$  см<sup>2</sup>). Побудувати графік залежності  $D = D(E)$ .
8. Користуючись співвідношенням  $\epsilon = \frac{D}{\epsilon_0 E}$  ( $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – електрична стала), розрахувати  $\epsilon$ . Занести отримані значення до табл. 2.1 і побудувати графік  $\epsilon = \epsilon(E)$ .
9. Зробити висновки.

*Завдання 2. Визначення залишкового електричного зміщення й коерцитивної сили сегнетоелектрика*

1. Отримати на екрані максимальну петлю гістерезису.
2. За координатною сіткою екрана осцилографа визначити координату  $y_{зал}$ , що відповідає залишковому електричному зміщенню, та координату  $x_k$ , яка відповідає коерцитивній силі.
3. Розрахувати коерцитивну силу й залишкове електричне зміщення сегнетоелектрика за формулами (2.7) і (2.8).

**Контрольні запитання**

*Варіант 1*

1. Що таке електричний диполь? Що таке електричний дипольний момент?
2. Що таке вектор електричного зміщення? Як він зв'язаний з векторами поляризованості й напруженості електричного поля?
3. Які особливості діелектричних властивостей сегнетоелектриків? Що таке залишкова поляризованість?
4. *Задача.* Скляну пластинку ( $\epsilon = 7$ ) розташували в плоскому повітряному конденсаторі таким чином, що вона щільно прилягає до його обкладок. Різниця потенціалів між обкладками конденсатора  $U = 3$  В, відстань між обкладками  $d = 10$  см. Знайдіть поверхневу густину зв'язаних зарядів  $\sigma'$  на скляній пластинці.

*Відповідь:* 1,59 нКл/м<sup>2</sup>.

*Варіант 2*

1. Яка фізична величина є кількісною мірою поляризації діелектрика?
2. Як діелектрик впливає на напруженість електричного поля? Який фізичний зміст діелектричної проникності середовища?
3. Поясніть причину виникнення діелектричного гістерезису сегнетоелектриків.
4. *Задача.* Обкладки плоского конденсатора площею  $S = 2 \cdot 10^{-2}$  м<sup>2</sup> кожна знаходяться у гасі на відстані  $d = 4$  мм одна від одної. Знайдіть силу  $F$ , з якою вони притягаються одна до одної, якщо напруга між ними  $U = 150$  В. Діелектрична проникність гасу  $\epsilon = 2$ .

Відповідь:  $2,5 \cdot 10^{-4}$  Н.

Варіант 3

1. Що таке домен?
2. Сформулюйте теорему Гаусса для вектора  $\mathbf{D}$ .
3. Опишіть залежність поляризованості сегнетоелектрика від напруженості зовнішнього поля при діелектричному гістерезисі.
4. *Задача.* Обкладки плоского конденсатора, зарядженого до різниці потенціалів 1 кВ, ізольовані одна від одної пластиною з діелектрика. Яка відносна діелектрична проникність матеріалу пластини, якщо при її видаленні різниця потенціалів між обкладками конденсатора зросте до 3 кВ?

Відповідь:  $\epsilon = 3$ .

### **Лабораторна робота № 2-03 ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЄМНОСТІ КОНДЕНСАТОРА ЗА ДОПОМОГОЮ БАЛІСТИЧНОГО ГАЛЬВАНОМЕТРА**

*Мета роботи* – визначення ємності конденсатора й батареї конденсаторів за допомогою балістичного гальванометра.

*Прилади й обладнання:* джерело живлення постійного струму; потенціометр; вольтметр; перемикач; дзеркальний балістичний гальванометр; набір конденсаторів; сполучні проводи.

#### **Опис установки й виведення робочої формули**

Електроємністю конденсатора називають величину, що чисельно дорівнює заряду  $q$ , який потрібно передати одній з обкладок конденсатора для того, щоб змінити напругу  $U$  між обкладками на одиницю. Електроємність конденсатора визначається співвідношенням

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

Ємність залежить від геометричних параметрів конденсатора і діелектричних властивостей середовища, що заповнює простір між обкладками.

В основу цієї роботи покладено метод визначення невідомої ємності конденсатора за відомою ємністю. Якщо ємність одного із двох конденсаторів, що знаходяться при однакових напругах ( $U_0 = U_1$ ), відома (наприклад,  $C_0$ ), то ємність другого конденсатора

$$C_1 = \frac{C_0 q_1}{q_0}. \quad (3.2)$$

Це означає, що для визначення невідомої ємності конденсатора  $C_1$  необхідно виміряти величину його заряду  $q_1$  і заряду  $q_0$  конденсатора з відомою ємністю.

Визначення зарядів конденсаторів у роботі здійснюється за допомогою балістичного гальванометра. Балістичний гальванометр відрізняється від звичайного гальванометра магнітоелектричної системи тим, що момент інерції його рухомої частини штучно збільшено шляхом додавання маси до обертової рамки (наприклад, завдяки застосуванню додаткових тягарців). Збільшення моменту інерції приводить до значного зростання періоду коливань рухомої частини. Це дає можливість застосовувати балістичний гальванометр для вимірювання заряду, що проходить по колу за проміжок часу, малий порівняно з періодом власних коливань рамки гальванометра. Основна властивість балістичного гальванометра – це пропорційність величини найбільшого кута повороту рамки  $\varphi$  заряду, що проходить через неї :

$$q = D\varphi,$$

де  $D$  – коефіцієнт пропорційності між величинами кута повороту й заряду.

Відхилення “зайчика” гальванометра на  $n$  поділок шкали визначається кутом повороту рамки  $\varphi$ . Воно також пропорційне заряду  $q$ , що пройшов через гальванометр під час розрядження конденсатора:

$$q = Bn, \quad (3.3)$$

де  $B$  – константа, яку називають сталою гальванометра;  $n$  – показання гальванометра.

Схему експериментальної установки зображено на рис. 3.1. Джерело постійного струму  $\mathcal{E}$  підімкнено до потенціометра  $R$ . Потенціометром регулюють напругу  $U$ , яка подається на конденсатор  $C$  і вимірюється

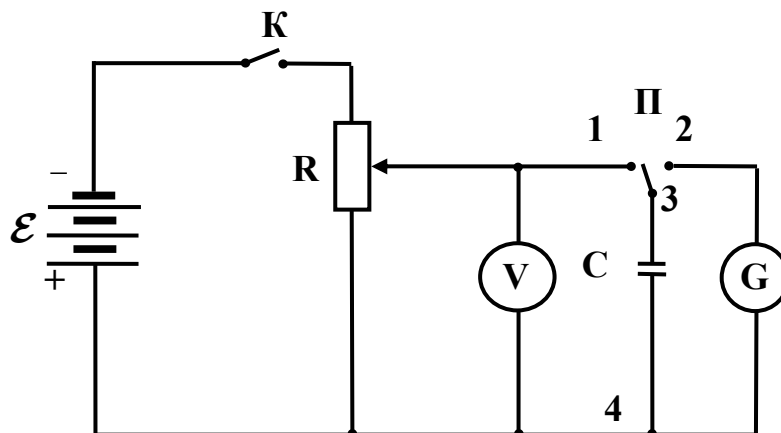


Рис. 3.1

вольтметром  $V$ . За допомогою перемикача  $\Pi$  коло зарядження розмикається, і конденсатор вмикається в коло з гальванометром  $G$ , через який розряджається. Увімкнувши в коло конденсатор з відомою ємністю  $C_0$ , можна визначити сталу гальванометра  $B$ , яку знаходять з рівняння (3.3) з використанням співвідношення (3.1):

$$B = \frac{q_0}{n_0} = \frac{C_0 U}{n_0}, \quad (3.4)$$

де  $U$  – напруга на конденсаторі, яка вимірюється вольтметром;  $n_0$  – показання гальванометра (у поділках шкали) під час розрядження конденсатора  $C_0$ .

Якщо конденсатор  $C_0$  замінити конденсатором з невідомою ємністю  $C_x$  або батареєю конденсаторів, то потрібну ємність можна знайти за формулою, отриманою шляхом комбінації формул (3.2), (3.3) і (3.4):

$$C_x = \frac{B n_x}{U} = \frac{C_0 U}{n_0} \cdot \frac{n_x}{U} = C_0 \frac{n_x}{n_0}, \quad (3.5)$$

де  $n_x$  – показання гальванометра під час розрядження конденсатора  $C_x$ .

### Порядок виконання роботи

1. Ручку потенціометра  $R$  установити в крайнє положення проти годинникової стрілки. За допомогою сполучних проводів підімкнути до точок 3, 4 електричної схеми установки конденсатор з відомою ємністю  $C_0$ . Перемикач  $\Pi$  перевести в положення 1.
2. Увімкнути живлення і потенціометром установити напругу зарядження конденсатора (значення  $U$  вказано на робочому місці).
3. При незмінній напрузі  $U$  зробити п'ять вимірювань перших кидків “зайчика” гальванометра  $n_0$  переведенням перемикача  $\Pi$  з положення 1 (зарядження) у положення 2 (розрядження конденсатора). Визначити середнє значення показань гальванометра  $\langle n_0 \rangle$ . Заряджати конденсатор протягом 30 с. Результати досліду занести до табл. 3.1.

Таблиця 3.1

$C_0 = \dots$ мкФ	Номер вимірювання	1	2	3	4	5	$\langle n_0 \rangle$ , под.
	$n_0$ , под.						
$U = \dots$ В							

4. Підімкнути до точок 3, 4 схеми замість конденсатора  $C_0$  конденсатор з невідомою ємністю  $C_x$  і повторити вимірювання, описані в пп. 2 і 3. Визначити середнє значення  $\langle n_x \rangle$ . Результати дослідів занести до табл. 3.2.

Таблиця 3.2

$U = \dots В$	Номер вимірювання	1	2	3	4	5	$\langle n_x \rangle$ , под.
	$n_x$ , под.						

- Розрахувати ємність конденсатора  $C_x$  за формулою (3.5).
- З'єднати конденсатори  $C_0$  і  $C_x$  паралельно й зазначеним вище способом (пп. 4, 5) знайти ємність отриманої батареї конденсаторів  $C_{пар}^{експ}$ .
- Розрахувати теоретичне значення ємності батареї конденсаторів за формулою  $C_{пар}^{теор} = \sum_{i=1}^N C_i = C_0 + C_x$  і порівняти її з  $C_{пар}^{експ}$ .
- З'єднати конденсатори  $C_0$  і  $C_x$  послідовно і, повторивши завдання пп. 4, 5, знайти ємність отриманої батареї конденсаторів  $C_{посл}^{експ}$ .
- Розрахувати ємність цієї батареї конденсаторів за формулою

$$C_{посл}^{теор} = \left( \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i} \right)^{-1} = \frac{C_0 C_x}{C_0 + C_x}$$

і порівняти її з  $C_{посл}^{експ}$ .

- Проаналізувати отримані результати й зробити висновки.

### Контрольні запитання

#### Варіант 1

- Дайте визначення електроємності відокремленого провідника й конденсатора. Яка одиниця виміру електроємності?
- Виведіть формулу ємності батареї конденсаторів, з'єднаних послідовно.
- Чому дорівнює енергія зарядженого конденсатора?
- Задача.** Знайдіть ємність сферичного конденсатора, що складається з двох концентричних сфер радіусами  $R_1 = 10$  см і  $R_2 = 10,5$  см. Простір між сферами заповнено маслом з діелектричною проникністю  $\epsilon = 2$ . Який радіус повинна мати відокремлена куля, поміщена в масло, щоб її ємність була такою ж?

**Відповідь:**  $C = 470$  пФ,  $R = 2,1$  м.

#### Варіант 2

- Від чого залежать електроємності відокремленого провідника й конденсатора?

- Отримайте вираз для ємності батареї конденсаторів, з'єднаних паралельно.
- Виведіть формулу для визначення ємності плоского конденсатора.
- Задача.* Кулі радіусами  $R_1 = 30$  см і  $R_2 = 6$  см мають однойменні заряди:  $q_1 = q_2 = 2 \cdot 10^{-8}$  Кл. Які потенціали куль? Чому буде дорівнювати потенціал куль  $\varphi'$  після з'єднання їх проводом нескінченно малої ємності?  
*Відповідь:*  $\varphi_1 = 600$  В,  $\varphi_2 = 3000$  В,  $\varphi' = 1000$  В.

### Варіант 3

- Як впливає діелектрик, розміщений між обкладками конденсатора, на його ємність? Чому?
- Чому дорівнює об'ємна густина енергії електричного поля?
- Для яких цілей у науці й техніці використовуються конденсатори?
- Задача.* Конденсатор ємністю  $C_1 = 10^{-9}$  Ф, заряджений до напруги  $U = 100$  В, з'єднують паралельно з незарядженим конденсатором ємністю  $C_2 = 2 \cdot 10^{-9}$  Ф. Яка енергія  $\Delta W$  витрачається при цьому на утворення іскри, що виникає в момент з'єднання конденсаторів?  
*Відповідь:*  $\Delta W = 3,3$  мкДж.

## Лабораторна робота № 2-04 ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАРЯДЖЕННЯ Й РОЗРЯДЖЕННЯ КОНДЕНСАТОРА

*Мета роботи* – експериментальне вивчення процесів зарядження й розрядження конденсатора й визначення часу релаксації.

*Прилади й обладнання:* електронний осцилограф з генератором прямокутних імпульсів; набір конденсаторів і електричних опорів.

### Опис установки й виведення робочої формули

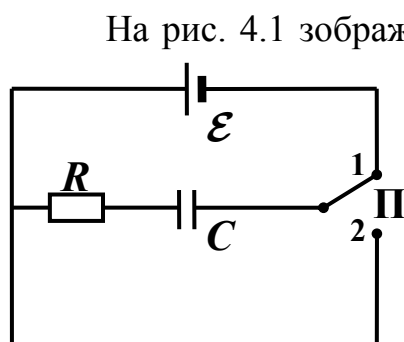


Рис. 4.1

На рис. 4.1 зображено схему, що дає можливість розглянути процеси зарядження й розрядження конденсатора. Вона містить джерело постійного струму, ЕРС якого  $\mathcal{E}$ , а також з'єднані послідовно конденсатор  $C$  та опір  $R$ . Перемикач  $\Pi$  призначено для підімкнення конденсатора до джерела струму (при цьому відбувається зарядження конденсатора (положення 1)) або для відімкнення конденсатора від джерела (при цьому відбувається розрядження конденсатора (положення 2)).

Розглянемо процес зарядження конденсатора. При перемиканні  $\Pi$  у положення 1 конденсатор починає заряджатися й у колі виникає струм, що змінюється згодом. При цьому сума різниці потенціалів на конденсаторі  $C$  і спаду напруги на опорі  $R$  дорівнює ЕРС джерела:

$$\mathcal{E} = U_C + U_R = \frac{q}{C} + IR, \quad (4.1)$$

де  $q$  – заряд конденсатора;  $I$  – сила струму в колі в цей момент часу. Під час зарядження конденсатора його заряд  $q$  зростає, а сила струму  $I$  зменшується. Щоб знайти залежність заряду  $q$  від часу, скористаємося

формулою (4.1). Оскільки  $I = \frac{dq}{dt}$ , то

$$\mathcal{E} = \frac{q}{C} + R \frac{dq}{dt}. \quad (4.2)$$

Розв'язком цього лінійного неоднорідного диференціального рівняння (з урахуванням початкової умови  $q(t=0) = 0$ ) є функція

$$q(t) = q_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}}), \quad (4.3)$$

де  $q_0 = \mathcal{E}C$  – максимальний заряд конденсатора.

Формула (4.3) виражає залежність заряду конденсатора від часу під час його зарядження. Графік цієї залежності зображено на рис. 4.2 (крива 1).

Щоб конденсатор почав розряджатися, перемикач  $\Pi$  необхідно перевести в положення 2 (див. рис. 4.1). Оскільки тепер у колі розрядження джерело ЕРС відсутнє, рівняння (4.1) матиме вигляд

$$\frac{q}{C} + IR = 0.$$

Оскільки  $I = \frac{dq}{dt}$ , то

$$\frac{dq}{dt} + \frac{1}{RC}q = 0.$$

Розв'язком цього рівняння, з урахуванням початкової умови  $q(t=0) = q_0$ , є функція

$$q(t) = q_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (4.4)$$

Формула (4.4) виражає залежність заряду на конденсаторі від часу в процесі його розрядження. Графік цієї залежності наведено на рис. 4.2 (крива 2).

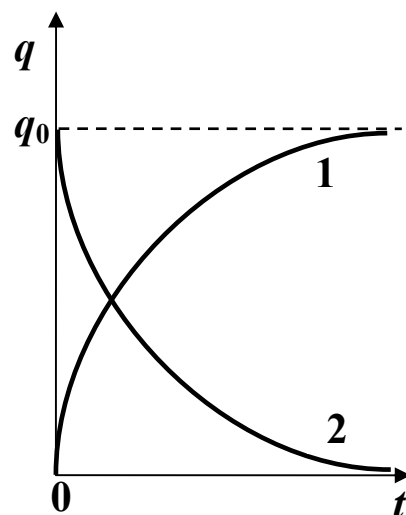


Рис. 4.2

Швидкість зарядження (розрядження) конденсатора характеризується сталою часу *RC*-кола:  $\tau = RC$ . Очевидно, що  $\tau$  – це час, протягом якого після відімкнення ЕРС заряд конденсатора зменшується в  $e$  разів.

Схему лабораторної установки, що використовується для експериментального вивчення процесів зарядження й розрядження конденсатора, зображено на рис. 4.3. У цій установці підімкнення й відімкнення джерела від вимірювального кола імітується подачею на *RC*-коло прямокутних імпульсів від генератора, що входить до складу осцилографа (рис. 4.4, крива 1). Розглянемо принцип роботи схеми, зображеної на рис. 4.3. Генератор прямокутних імпульсів протягом часу  $t_n$  (часу наростання напруги під час зарядження конденсатора) дає сталу за величиною напругу

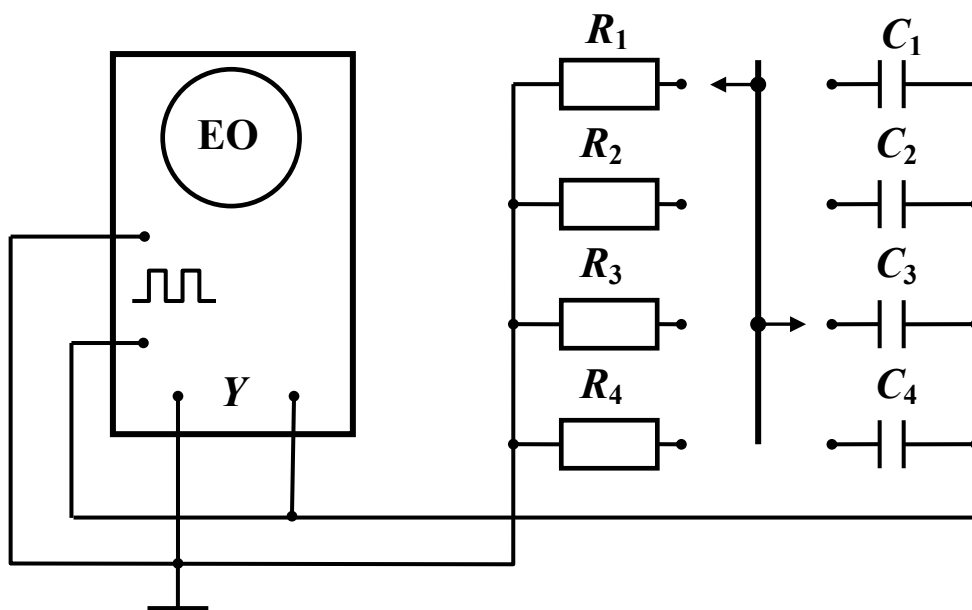


Рис. 4.3

$U_0$ . При цьому реалізується схема зарядження конденсатора (див. рис. 4.1, перемикач **П** у положенні 1). Після закінчення зарядження починається процес розрядження конденсатора, якому відповідає час спаду напруги  $t_{cn}$ . При цьому напруга, що дає генератор, дорівнює нулю. У цьому випадку реалізується схема розрядження конденсатора (див. рис. 4.1, перемикач **П** у положенні 2). Процеси зарядження й розрядження повторюються з періодом  $T = t_n + t_{cn}$ . У лабораторній роботі реалізовано електричну схему, для якої час наростання напруги під час зарядження дорівнює часу спаду напруги під час розрядження конденсатора:  $t_n = t_{cn} = \frac{T}{2}$ . Підмикаючи до генератора

поєднані послідовно опори  $R_i$  і  $C_j$ , можна досліджувати процеси зарядження й розрядження конденсатора при різних значеннях  $\tau = R_i C_j$ . Напруга з конденсатора подається на вхід осцилографа, на екрані якого відтворюється залежність  $U_c(t)$  для цього *RC*-кола. Оскільки напруга між обкладками конденсатора



пропорційна його заряду  $U_c(t) = q(t)/C$ , залежність напруги від часу  $U_c(t)$  подібна залежності заряду конденсатора від часу  $q(t)$  (рис. 4.4, крива 2).

Щоб дослідити цю залежність кількісно, скористаємося режимом роботи осцилографа, у якому безперервна крива зображується у вигляді пунктирної лінії (режим «Мітки») (рис. 4.4).

Часовий інтервал між мітками  $\Delta t_m$  відповідає відстані між *початками* сусідніх штрихів по горизонтальній осі часу; визначається положенням

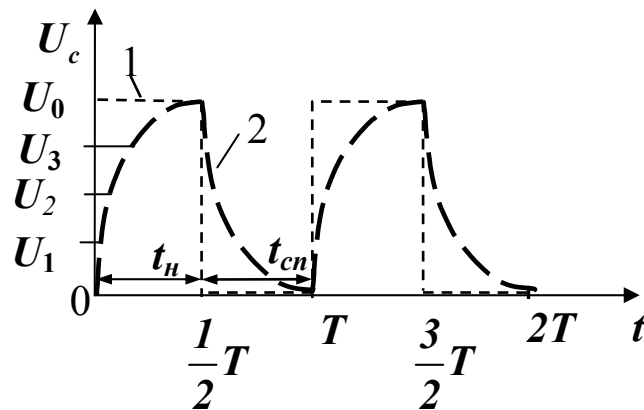


Рис. 4.4

перемикача «Мітки» ( $\Delta t_m = 20, 100$  мкс). За допомогою міток можна визначити час наростання (спаду) напруги на конденсаторі під час зарядження (розрядження). Наприклад, якщо на відрізку  $0 - t_n$  укладаються шість повних міток, часовий інтервал між якими становить  $\Delta t_m = 20$  мкс, то час наростання напруги під час зарядження конденсатора  $t_n = 20 \cdot 6 = 120$  мкс. За ординатими точок кривої  $U_k$  на рис. 4.4, що відповідають *початку* кожної мітки для моментів часу  $t_k = k \cdot \Delta t_m$  ( $k = 1, 2, \dots$ ), можна отримати залежність напруги на конденсаторі від часу

$$U_k = f(t). \quad (4.5)$$

Ці дані використовуються для розрахунку сталої часу  $\tau$ .

Після логарифмування виразів (4.3) і (4.4) отримаємо

$$\ln \frac{q_0}{q_0 - q} = \frac{t}{RC} = \frac{t}{\tau}, \quad \ln \frac{q_0}{q} = \frac{t}{\tau}.$$

Оскільки заряд  $q$  пропорційний напрузі на конденсаторі  $U_c$ , то можна записати таке:

$$\ln \frac{U_0}{U_0 - U_k} = \frac{t}{\tau} \quad (\text{під час зарядження}); \quad (4.6)$$

$$\ln \frac{U_0}{U_k} = \frac{t}{\tau} \quad (\text{під час розрядження}). \quad (4.7)$$

Для розрахунку сталої часу  $\tau$  будується графік залежності  $\ln \frac{U_0}{U_0 - U_k}$

(під час зарядження) або  $\ln \frac{U_0}{U_k}$  (під час розрядження) від часу  $t$ . Величина  $\tau$

визначається з відповідних графіків. Наприклад, для процесу зарядження конденсатора (рис. 4.5)

$$\tau_{\text{експ}} = \frac{\Delta t}{\Delta \left( \ln \frac{U_0}{U_0 - U_k} \right)}, \quad (4.8)$$

а для процесу розрядження конденсатора

$$\tau_{\text{експ}} = \frac{\Delta t}{\Delta \left( \ln \frac{U_0}{U_k} \right)}. \quad (4.9)$$

Тут  $\Delta t$  – довільно вибраний інтервал часу, якому на графіку відповідає зміна функцій  $\Delta \left( \ln \frac{U_0}{U_0 - U_k} \right)$  – під час зарядження або  $\Delta \left( \ln \frac{U_0}{U_k} \right)$  – під час розрядження конденсатора.

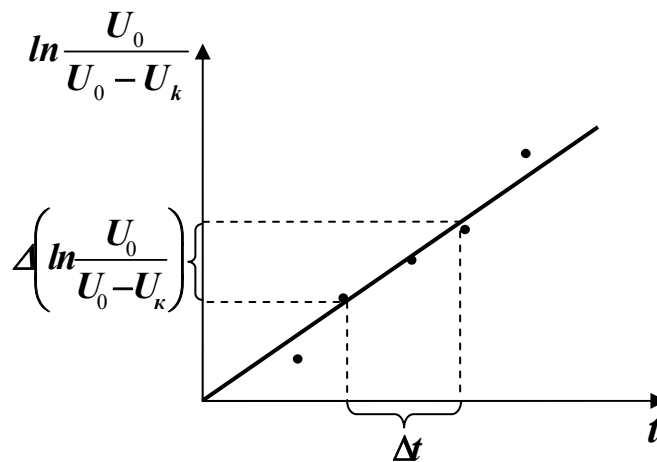


Рис. 4.5

## Порядок виконання роботи

### Завдання 1. Визначення сталої часу для процесу зарядження конденсатора

1. Підімкнути до електричної схеми резистор  $R_i$  і конденсатор  $C_j$  з набору, що є на лабораторній установці (значення  $R_i$  і  $C_j$  задає викладач).
2. Увімкнути стенд і осцилограф, дати осцилографу прогрітися 2–3 хв. Одержати стійку картину залежності напруги конденсатора від часу  $U_c(t)$  (див. рис. 4.4).
3. Визначити часові координати міток на кривій наростання напруги на конденсаторі за формулою  $t_k = k\Delta t_m$ , де  $k$  – номер мітки,  $\Delta t_m$  – часовий інтервал між мітками (задає викладач).
4. Визначити значення ординат  $U_k$  точок кривої  $U_c(t)$ , що відповідають початку кожної мітки, і максимальне значення напруги  $U_0$ . Дані занести до табл. 4.1.
5. Побудувати графік залежності  $\ln \frac{U_0}{U_0 - U_k}$  від часу  $t$ . Визначити за допомогою графіка величину  $\tau_{експ}$  за формулою (4.8).
6. Обчислити теоретичне значення сталої часу за формулою  $\tau_{теор} = R_i C_j$  і порівняти його з  $\tau_{експ}$ .
7. Зробити висновки.

Таблиця 4.1

Номер мітки $k$	$t_k = k\Delta t_m$ , мкс	$U_k$ , под.	$U_0$ , под.	$\ln \frac{U_0}{U_0 - U_k}$	$\tau_{експ}$ , с	$\tau_{теор}$ , с
1						
2						
...						
6						

### Завдання 2. Визначення сталої часу для процесу розрядження конденсатора

1. Підімкнути до електричної схеми резистор  $R_i$  і конденсатор  $C_j$  з набору, що є на лабораторній установці (значення  $R_i$  і  $C_j$  задає викладач).
2. Увімкнути стенд і осцилограф, дати осцилографу прогрітися 2–3 хв. Одержати стійку картину залежності напруги конденсатора від часу  $U_c(t)$  (див. рис. 4.4).
3. Визначити часові координати міток на кривій спаду напруги на конденсаторі за формулою  $t_k = k\Delta t_m$ , де  $k$  – номер мітки,  $\Delta t_m$  – часовий інтервал між мітками (задає викладач).

4. Визначити значення ординат  $U_k$  точок кривої  $U_c(t)$ , що відповідають початку кожної мітки, і максимальне значення напруги  $U_0$ . Дані занести до табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Номер мітки $k$	$t_k = k\Delta t_m$ , мкс	$U_k$ , ПОД.	$U_0$ , ПОД	$\ln \frac{U_0}{U_k}$	$\tau_{експ}$ , с	$\tau_{теор}$ , с
1						
2						
...						
6						

5. Побудувати графік залежності  $\ln \frac{U_0}{U_k}$  від часу  $t$ . Визначити за допомогою графіка величину  $\tau_{експ}$  за формулою (4.9).
6. Обчислити теоретичне значення сталої часу за формулою  $\tau_{теор} = R_i C_j$  і порівняти його з  $\tau_{експ}$ .
7. Зробити висновки.

### Контрольні запитання

#### Варіант 1

- Що називають конденсатором? Дайте означення електроємності конденсатора.
- Що називають сталою часу **RC-кола**? Який фізичний зміст цієї величини?
- Доведіть, що стала часу  $\tau$  для **RC-кола** має розмірність часу.
- Задача.** До джерела постійного струму послідовно приєднано конденсатор ємністю  $C = 2$  мкФ і опір  $R = 1,2$  кОм. Визначіть час, за який напруга на конденсаторі зменшується в 2 рази.  
*Відповідь:*  $t = 1,67$  мс.

#### Варіант 2

- Який конденсатор називають плоским? Виведіть формулу для визначення електроємності плоского конденсатора.
- Запишіть закони зміни заряду конденсатора з часом під час зарядження й розрядження конденсатора.
- Заряджений конденсатор відімкнено від джерела напруги. Що відбудеться з енергією конденсатора, якщо спочатку порожній проміжок між обкладками заповнити діелектриком із проникністю  $\epsilon > 1$ ?

4. *Задача.* Визначіть величину заряду, що накопичується за час  $t = 1,5$  мкс на конденсаторі, підімкненому до джерела струму з  $\mathcal{E} = 2$  В. Зовнішній опір кола  $R = 10$  Ом, ємність конденсатора  $C = 3$  мкФ.

*Відповідь:*  $q = 0,29$  мкКл.

### *Варіант 3*

1. Дайте означення електроємності відокремленого провідника. Виведіть формулу для визначення електроємності відокремленої кулі.
2. Запишіть диференціальні рівняння, що описують процеси зарядження й розрядження конденсатора.
3. Які параметри кола впливають на процеси зарядження й розрядження конденсатора?
4. *Задача.* Визначіть опір резистора, який потрібно послідовно підімкнути до конденсатора ємністю 1 мкФ, якщо відомо, що за 2 мс заряд на конденсаторі при відімкненні від джерела живлення зменшується в 2 рази.

*Відповідь:*  $R = 2,89$  кОм.

## **Лабораторна робота № 2-05 ВИЗНАЧЕННЯ ЕРС ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ КОМПЕНСАЦІЙНИМ МЕТОДОМ**

*Мета роботи* – ознайомлення з компенсаційним методом, застосування цього методу для вимірювання ЕРС джерела постійного струму.

*Прилади й обладнання:* нормальний елемент Вестона; елемент з невідомою ЕРС (батарея); джерело опорної напруги; два магазини опорів; мікроамперметр.

### **Опис установки й виведення робочих формул**

Компенсаційні методи широко використовуються для вимірювання електричних величин завдяки своїй універсальності (можна виміряти ЕРС, напругу, струм, опір, потужність), надійності й високій точності вимірювань. Основна ідея методу полягає в тому, що, наприклад, вимірювана ЕРС урівноважується (компенсується) спадом напруги на деякій ділянці так, що в результаті струм в колі з невідомою ЕРС відсутній.

Спрощену електричну схему для вимірювання ЕРС елемента компенсаційним методом зображено на рис. 5.1. Від джерела опорної напруги  $\mathcal{E}_0$  через опір зовнішнього кола  $R$ , що складається із двох змінних опорів  $R_1$  і  $R_2$  ( $R = R_1 + R_2$ ), протікає струм. До вузла В через

мікроамперметр приєднують елемент із відомою ЕРС –  $\mathcal{E}_N$  (до точки А джерела  $\mathcal{E}_N$  і  $\mathcal{E}_0$  підмикаються однойменними полюсами). Опір ділянок АВ ( $R_1$ ) і ВР ( $R_2$ ) зовнішнього кола можна підібрати таким чином, щоб спад напруги на ділянці АВ дорівнював ЕРС елемента  $\mathcal{E}_N$  (при цьому їхній сумарний опір  $R$  залишається незмінним). У цьому випадку мікроамперметр показує відсутність струму.

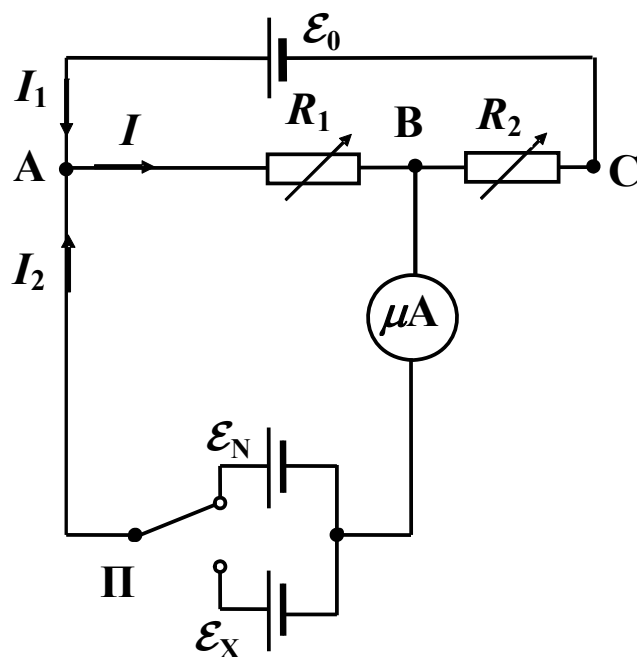


Рис. 5.1

За першим правилом Кірхгофа для вузла А

$$I_1 + I_2 - I = 0. \quad (5.1)$$

Застосувавши друге правило Кірхгофа до контуру  $B\mathcal{E}_NAB$ , отримаємо рівняння

$$\mathcal{E}_N = I_2(r + R_A) + IR_1, \quad (5.2)$$

де  $r$  – внутрішній опір елемента  $\mathcal{E}_N$ ;  $R_A$  – опір мікроамперметра.

Якщо компенсацію досягнуто, то струм у зазначеному контурі відсутній ( $I_2 = 0$ ) і рівняння (5.1) та (5.2) набувають такого вигляду:

$$I_1 = I; \quad \mathcal{E}_N = IR_1. \quad (5.3)$$

Заміняючи елемент  $\mathcal{E}_N$  за допомогою перемикача  $\Pi$  (див. рис. 5.1) на елемент із невідомою ЕРС  $\mathcal{E}_X$  та змінюючи величини опорів  $R_1$  і  $R_2$  (сумарне  $R$  залишається незмінним), можна знову добитися відсутності проходження струму через мікроамперметр. Це буде мати місце при іншому опорі  $R_X$  ділянки АВ. Тоді замість (5.3) можна записати

$$I_1 = I, \quad \mathcal{E}_X = IR_X. \quad (5.4)$$

З виразів (5.3) і (5.4) отримаємо формулу, за якою визначається невідома ЕРС:

$$\mathcal{E}_X = \frac{R_X}{R_1} \mathcal{E}_N. \quad (5.5)$$

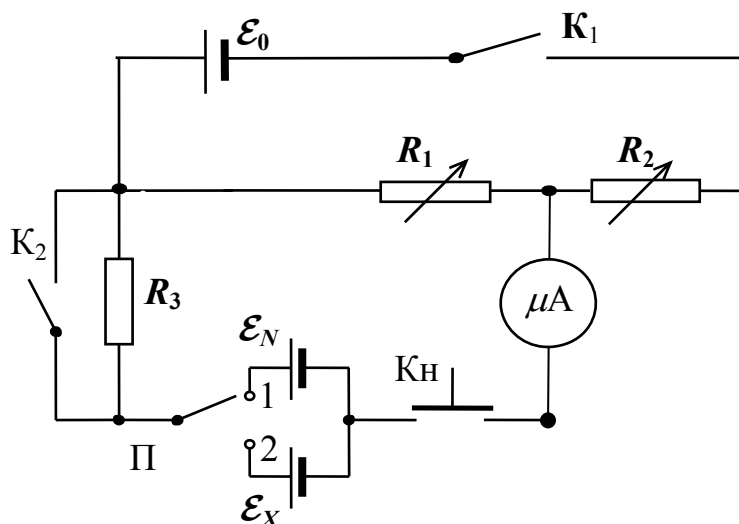


Рис. 5.2

Електричну схему лабораторної установки зображено на рис. 5.2. Як відома ЕРС  $\mathcal{E}_N$  використовується нормальний елемент Вестона, що є різновидом гальванічних елементів. Різниця потенціалів між електродами елемента виникає внаслідок окисно-відновних реакцій, які відбуваються у насиченому розчині сульфату кадмію з додаваннями ртуті й сульфату ртуті. Електрорушійна сила елемента Вестона відтворювана у високому ступені, що дає можливість використовувати елемент як еталон, ЕРС його при  $20\text{ }^\circ\text{C}$  буде  $\mathcal{E}_N = 1,0183\text{ В}$ .

Як елемент із невідомою ЕРС  $\mathcal{E}_X$  використовується батарейка, яка підмикається до джерела опорної напруги  $\mathcal{E}_0$  однойменними полюсами, як і нормальний елемент  $\mathcal{E}_N$ . Ключ  $K_1$  потрібен для ввімкнення опорної напруги. Кнопку  $K_N$  призначено для короткочасного замикання кола мікроамперметра;  $R_3$  – великий (близько  $10^4\text{ Ом}$ ) опір, що запобігає проходженню значних струмів через мікроамперметр і нормальний елемент при попередній грубій компенсації;  $K_2$  – ключ, призначений для замикання накоротко цього опору при точній компенсації. Як змінні опори використовуються магазини опорів  $R_1$  і  $R_2$ . Компенсація досягається підбором опорів цих магазинів за умови сталості їхнього сумарного опору.

## Порядок виконання роботи

1. На магазинах опорів  $R_1$  і  $R_2$  установити величини опорів по 20 кОм на кожному.
2. Помістити в робоче гніздо установки батарейку з невідомою ЕРС (необхідно забезпечити таку ж саму полярність, як і на установці у джерела  $\mathcal{E}_N$ ).
3. Замкнути ключ  $K_1$ .
4. Увімкнути в коло нормальний елемент, для чого перемикач  $\Pi$  перевести в положення 1. Ключ  $K_2$  залишається розімкнутим, що відповідає положенню “Грубо”.
5. При короткочасному натисканні кнопки  $K_n$  добитися відсутності проходження струму через мікроамперметр. Для цього, використовуючи перші три декади магазинів ( $\times 10000$ ,  $\times 1000$ ,  $\times 100$ ), змінювати опори  $R_1$  і  $R_2$  так, щоб їхня сума  $R$  залишалася незмінною, тобто дорівнювала 40 кОм.
6. Замкнувши ключ  $K_2$  (положення “Точно”), зробити більш точну компенсацію струму через мікроамперметр, повторивши операції п. 5 з використанням декад, що залишилися, магазинів опору. Записати величину опору  $R_1$  першого магазину опорів, при якому спостерігається компенсація струму.
7. Перемикачем  $\Pi$  замість нормального елемента  $\mathcal{E}_N$  увімкнути в коло батарейку.
8. Повторити операції пп. 5 і 6 і знайти значення опору  $R_x$  першого магазину опорів, при якому досягається компенсація струму через батарейку.
9. За формулою (5.5) знайти значення ЕРС досліджуваної батарейки.

## Контрольні запитання

### Варіант 1

1. Назвіть умови існування постійного електричного струму.
2. Запишіть закон Ома для замкнутого кола.
3. Що називають напруженістю поля сторонніх сил? Чому дорівнює циркуляція вектора напруженості поля сторонніх сил?
4. *Задача.* Джерело струму замикають спочатку на зовнішній опір  $R_1 = 2$  Ом, а – потім на зовнішній опір  $R_2 = 0,5$  Ом. У кожному із цих випадків потужність  $P$ , що виділяється в зовнішній частині кола, однакова й дорівнює 2 Вт. Знайдіть ЕРС джерела і його внутрішній опір.  
*Відповідь:* 3 В; 1 Ом.



### Варіант 2

1. Що називають електрорушійною силою джерела струму й напругою на ділянці кола?
2. Запишіть і сформулюйте правила Кірхгофа.
3. Запишіть закон Ома в диференціальній формі.
4. *Задача.* Якщо вольтметр з'єднати послідовно з опором  $R = 10^4$  Ом, то при напрузі  $U_0 = 120$  В на кінцях кола, утвореного опором і вольтметром, останній покаже  $U_1 = 40$  В. Якщо його з'єднати послідовно з невідомим опором  $R_x$ , то за тих самих умов вольтметр покаже  $U_2 = 10$  В. Визначіть величину опору  $R_x$ .

*Відповідь:*  $5,5 \cdot 10^4$  Ом.

### Варіант 3

1. Запишіть закон Ома для однорідної й неоднорідної ділянок кола.
2. Що називають спадом напруги на ділянці кола?
3. Поясніть причини помилок під час безпосереднього вимірювання ЕРС за допомогою вольтметра.
4. *Задача.* Наприкінці зарядження батареї акумуляторів струмом  $I_1 = 3$  А приєднаний до неї вольтметр показував напругу  $U_1 = 4,25$  В. На початку розрядження тієї ж батареї струмом  $I_2 = 4$  А вольтметр показував напругу  $U_2 = 3,9$  В. Визначіть ЕРС і внутрішній опір батареї, вважаючи їх постійними.

*Відповідь:* 4,1 В; 0,05 Ом.

## Лабораторна робота № 2-06 РОЗШИРЕННЯ МЕЖ ВИМІРЮВАННЯ МІКРОАМПЕРМЕТРА

*Мета роботи* – розширення меж вимірювання й градуювання мікроамперметра.

*Прилади й обладнання:* прилад FPM-01; мікроамперметр; магазин опорів.

### Опис лабораторної установки й виведення робочої формули

Лабораторна установка (рис. 6.1) складається із приладу FPM-01 (1), магазину опорів (6) і мікроамперметра (5), межі вимірювання якого необхідно розширити. До складу приладу FPM-01 входять такі елементи: регульоване джерело постійного струму, реохорд (2), вольтметр (3) і міліамперметр (4). Реохорд у роботі використовується як регульований шунт: за допомогою повзуна реохорда задається необхідна довжина дроту, що виконує роль шунта.

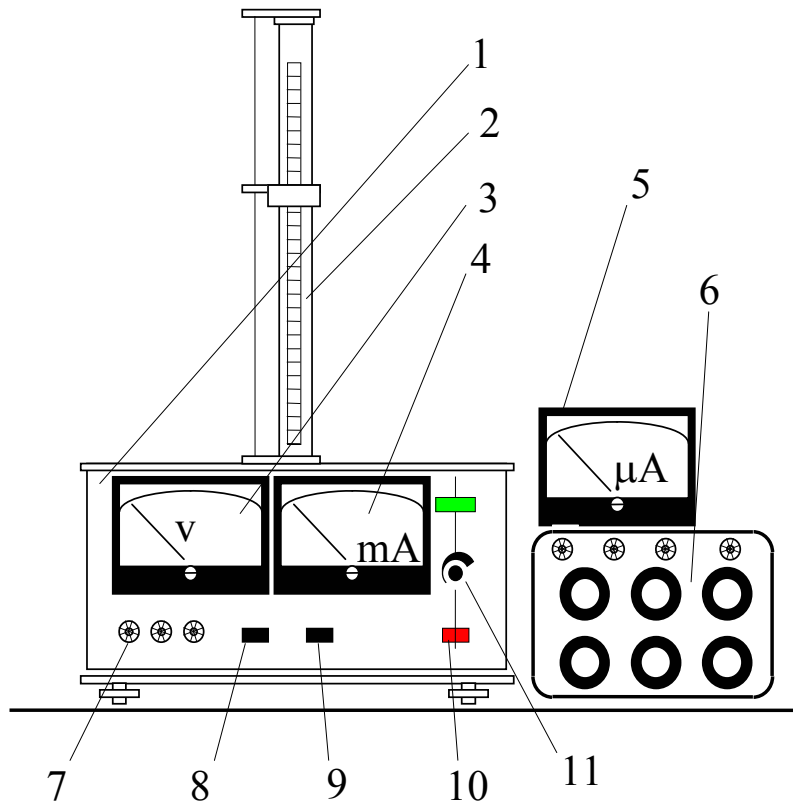


Рис. 6.1

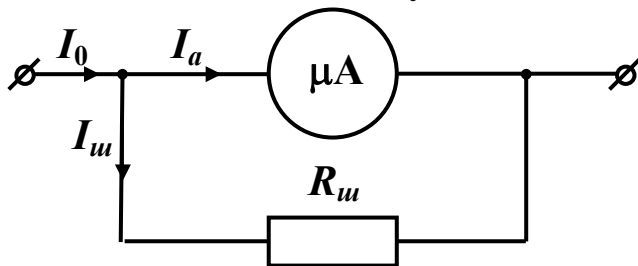
Розширення меж вимірювання мікроамперметра здійснюється в тих випадках, коли необхідно виміряти електричні струми, величина яких перевищує межу його вимірювань. Для цього паралельно до мікроамперметра приєднують провідник (шунт) з електричним опором  $R_{ш}$ , меншим, ніж опір амперметра  $R_a$ . Тоді вимірюваний струм силою  $I_0$  розгалужується на струм силою  $I_a$ , що проходить через амперметр, і струм силою  $I_{ш}$ , що протікає через шунт (рис. 6.2):

$$I_0 = I_a + I_{ш}. \quad (6.1)$$

Напруги на амперметрі й шунті, оскільки їх увімкнено паралельно, будуть однаковими:

$$U_a = U_{ш}. \quad (6.2)$$

Відповідно до закону Ома для однорідної ділянки кола співвідношення



(6.2) можна переписати в такому вигляді:

$$I_a R_a = I_{ш} R_{ш},$$

звідки

$$I_{ш} = \frac{R_a}{R_{ш}} I_a. \quad (6.3)$$

Рис. 6.2

Після підстановки

співвідношення (6.3) у формулу (6.1) одержимо

$$I_0 = I_a + \frac{R_a}{R_{ш}} I_a = I_a \left( 1 + \frac{R_a}{R_{ш}} \right) = n I_a, \quad (6.4)$$

де  $n = 1 + \frac{R_a}{R_{ш}}$  – коефіцієнт розширення меж вимірювання амперметра.

Цей результат означає, що через амперметр протікає струм, сила якого в  $n$  разів менша, ніж вимірюваний струм  $I_0$ . Для того щоб визначити величину вимірюваного струму  $I_0$ , необхідно показання амперметра помножити на величину  $n$ . Якщо опір амперметра  $R_a$  і значення  $n$  відомі, то опір шунта можна розрахувати за формулою

$$R_{ш} = \frac{R_a}{n - 1}. \quad (6.5)$$

### Порядок виконання роботи

1. Ручку “Регулювання струму” (див. поз. 11 рис. 6.1) на лицьовій панелі лабораторного пристрою перевести в крайнє положення проти годинникової стрілки.
2. Увімкнути лабораторний пристрій, для чого натиснути кнопку “Мережа” (див. поз. 10 рис. 6.1).
3. За допомогою кнопок комутації (див. поз. 8, 9 рис. 6.1) реалізувати схему, призначену для визначення електричного опору мікроамперметра (рис. 6.3). Стан кнопок на лабораторному пристрої: кнопка “V - мА” – віджата; кнопка “Изм. R - Град.” – натиснута.
4. На магазині опорів установити значення опору  $R_0 = 10$  кОм і, обертаючи ручку “Регулювання струму”, встановити максимальне відхилення стрілки мікроамперметра.
5. Записати в табл. 6.1 показання вимірювальних приладів: силу струму мікроамперметра  $I_a$ , напругу вольтметра  $U_0$ .

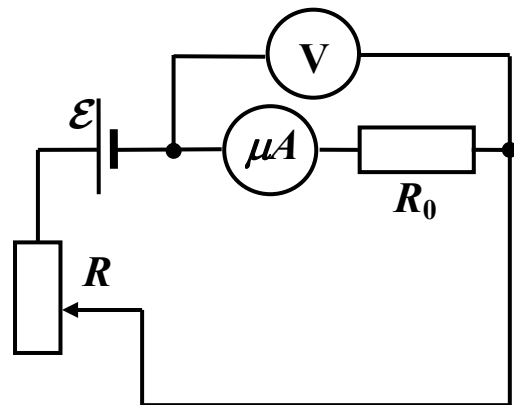


Рис. 6.3

Таблиця 6.1

$R_0$ , Ом	$U_0$ , В	$I_a$ , мкА	$R_a$ , Ом	$n$	$R_{ш}$ , Ом	$S$ , м <sup>2</sup>	$l$ , м

6. Визначити електричний опір мікроамперметра за формулою

$$R_a = \frac{U_0}{I_a} - R_0.$$

7. Для зазначеного викладачем значення коефіцієнта розширення меж вимірювання мікроамперметра  $n$  розрахувати необхідний опір шунта  $R_{ш}$  за формулою (6.5).

8. Визначити довжину дроту реохорда, що забезпечує отриманий опір шунта, за формулою  $l = \frac{R_{ш}S}{\rho}$ , де  $S$  і  $\rho$  – поперечний переріз і питомий опір дроту реохорда відповідно (їхні величини зазначено на стенді).

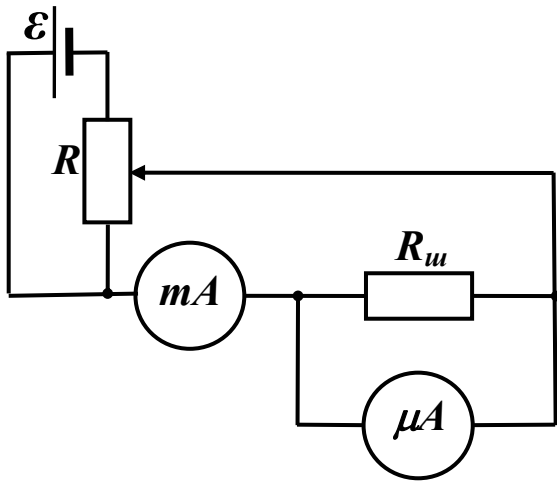


Рис. 6.4

9. За допомогою повзуна реохорда встановити розраховану довжину дроту  $l$ .

10. Кнопками комутації лабораторного пристрою реалізувати схему для градуювання мікроамперметра (рис. 6.4). Стан кнопок на лабораторному пристрої: кнопка “V – mA” – натиснута; кнопка “Изм. R - Град.” – натиснута.

11. Провести градуювання мікроамперметра, для чого зареєструвати величини струму в колі  $I$  (показання міліамперметра на лицьовій панелі пристрою) і відповідні їм показання мікроамперметра  $N$ , виражені в поділках шкали. Результати вимірювань занести до табл. 6.2.

Таблица 6.2

$N$ , под.	0	5	10	15	20	25	30
$I$ , мА							

12. За даними табл. 6.2 побудувати градуювальну криву – залежність величини струму від показань мікроамперметра  $I = f(N)$ .

13. За графіком визначити ціну поділки шкали шунтованого мікроамперметра. Для цього за допомогою графіка визначити для кількості поділок  $N = 30$  відповідне йому значення сили струму  $I$ , потім поділити величину сили струму  $I$  на кількість поділок  $N$ .

## Контрольні запитання

### Варіант 1

1. Як підмикаються в коло прилади, призначені для вимірювання сили струму? Накресліть електричну схему.
2. Сформулюйте закон Ома для однорідної й неоднорідної ділянок кола, для замкнутого кола.
3. Опишіть методику визначення електричного опору мікроамперметра, використану в цій роботі.
4. *Задача.* Знайдіть відношення власного споживання електричної потужності шунтом до потужності, що споживається амперметром (у загальному випадку), якщо струм, що протікає через амперметр, у  $n$  разів менший від струму, що вимірюється.

Відповідь: 
$$\frac{N_{ш}}{N_a} = n - 1 .$$

### Варіант 2

1. Чи можна за допомогою вольтметра виміряти силу струму? Поясніть, як це можна виконати, накресліть електричну схему.
2. Сформулюйте правила Кірхгофа.
3. Яким чином можна розширити межі вимірювання амперметра?
4. *Задача.* Міліамперметр із внутрішнім опором 9,9 Ом може вимірювати силу струму не більше 10 мА. Що потрібно зробити, щоб цей прилад можна було застосовувати для вимірювання сили струму до 1 А?

Відповідь: підімкнути шунт опором 0,1 Ом.

### Варіант 3

1. Виведіть формулу для розрахунку величини опору шунта.
2. Як розширити межі вимірювання вольтметра? Накресліть електричну схему.
3. Як можна визначити ціну поділки амперметра із шунтом?
4. *Задача.* Амперметр із опором  $R_a = 0,16$  Ом зашунтовано опором  $R_{ш} = 0,04$  Ом. Амперметр показує струм  $I_a = 8$  А. Знайдіть струм  $I_0$ , що протікає у колі.

Відповідь:  $I_0 = 40$  А.

## Лабораторна робота № 2-07 ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ОПОРУ ПРОВІДНИКА

*Мета роботи* – вивчення методів визначення електричного опору за допомогою вольтметра, амперметра й моста постійного струму й визначення питомого електричного опору.

Прилади й обладнання: прилад FPM-01; міст постійного струму.

### Опис установки й методики експерименту

Лабораторна установка (рис. 7.1) складається із приладу FPM-01 (1) і приєднаного до нього за допомогою провідників мосту постійного струму (6). Прилад FPM-01 містить регульоване джерело постійного струму, реохорд (2) з метричною шкалою й досліджуваним проводом (5), вольтметр (3), міліамперметр (4).

Для визначення величин активних опорів з невисокою точністю застосовуються методи, основані на вимірюванні сили струму й напруги в колі провідника за допомогою амперметра й вольтметра. Висока точність вимірювання опорів досягається застосуванням мостових схем (або мостів), діапазон вимірюваних опорів при цьому дуже великий – від  $10^{-8}$  до  $10^{15}$  Ом. Міст є пристроєм, що дає можливість вимірювати опори методом порівняння їх із зразковою мірою. Він складається з кола послідовно з'єднаних опорів, до якого приєднано джерело живлення й гальванометр як нуль-індикатор.

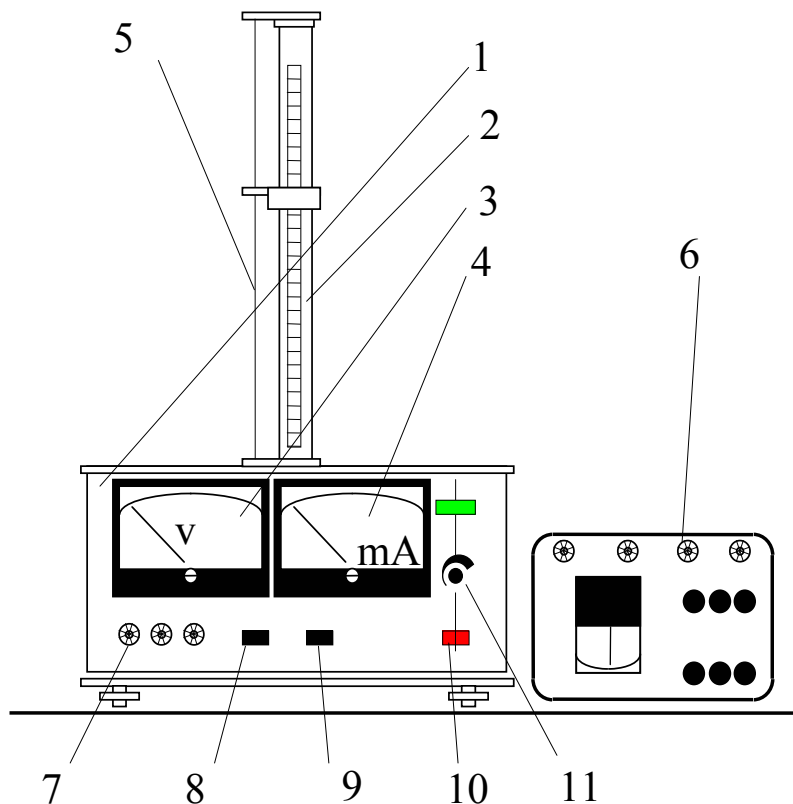


Рис. 7.1

Для визначення опору досліджуваного провідника за вимірюванням напруги й сили струму застосовують дві схеми ввімкнення вольтметра й амперметра в електричне коло. У першій схемі (рис. 7.2) вимірюваний опір

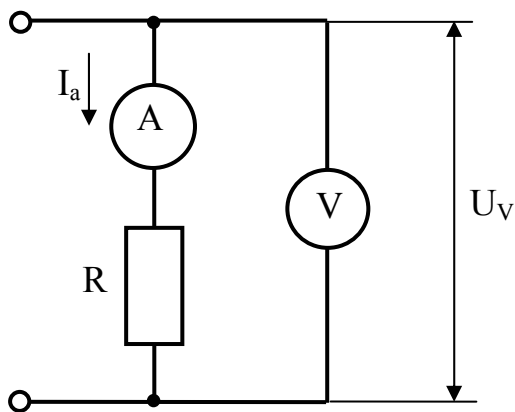


Рис. 7.2

$R$  і міліамперметр із опором  $R_a$  ( $R_a = 0,15$  Ом) увімкнено послідовно, а вольтметр із опором  $R_V$  ( $R_V = 2500$  Ом) – паралельно. За законом Ома отримаємо

$$I_a(R_a + R) = U_V,$$

де  $I_a$  – сила струму, що протікає через міліамперметр;  $U_V$  – напруга на даній ділянці кола. Звідси

$$R = \frac{U_V}{I_a} - R_a, \quad (7.1)$$

тобто з'являється похибка вимірювання на величину  $R_a$ . Тому цю схему застосовують для вимірювання опорів, більших порівняно з опором амперметра (у 100 разів і більше), що дає можливість знехтувати величиною  $R_a$ , тобто вважати, що  $R = \frac{U_V}{I_a}$ .

При використанні другої схеми ввімкнення вольтметра й амперметра в коло (рис. 7.3) досліджуваній провідник опором  $R$  і вольтметр опором  $R_V$  ввімкнено паралельно, а міліамперметр опором  $R_a$  – послідовно. За допомогою першого правила Кірхгофа, відповідно до якого алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулю, отримаємо

$$I_a = I_V + I, \quad (7.2)$$

де  $I_a$  – сила струму, що протікає через міліамперметр;  $I_V$  – сила струму, що протікає через вольтметр;  $I$  – сила струму, що протікає через опір  $R$ .

Застосувавши закон Ома, можемо записати

$$I_V = \frac{U_V}{R_V}, \quad I = \frac{U_V}{R}.$$

Тоді вираз (7.2) набуде вигляду

$$I_a = U_V \left( \frac{1}{R_V} + \frac{1}{R} \right),$$

звідки

$$R = \frac{U_V}{I_a - \frac{U_V}{R_V}} = \frac{U_V R_V}{I_a R_V - U_V}. \quad (7.3)$$

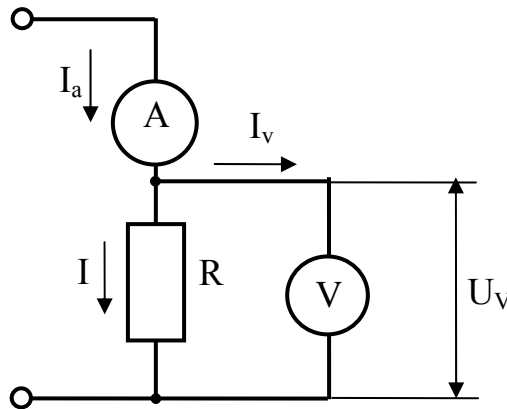


Рис. 7.3

Цю схему застосовують для вимірювання опорів, менших порівняно з опором вольтметра (в 100 разів і більше). У цьому випадку силою струму у вольтметрі можна знехтувати, тобто вважати, що  $R = \frac{U_V}{I_a}$ .

### Порядок виконання роботи

*Завдання 1. Визначення опору провідника за допомогою вольтметра й амперметра з точним вимірюванням струму*

1. Установити на реохорді (див. поз. 2 рис. 7.1) зазначену викладачем довжину проводу (див. поз. 5 рис.7.1).
2. Ручку “Регулювання струму” (див. поз. 11 рис. 7.1) на лицьовій панелі лабораторного пристрою перевести в крайнє положення проти годинникової стрілки.
3. Увімкнути лабораторний пристрій, натиснувши кнопку “Мережа” (див. поз. 10 рис. 7.1).
4. За допомогою кнопок комутації реалізувати схему, що відповідає рис. 7.2. Стан кнопок на приладі (див. рис. 7.1): кнопка 9 – віджата; кнопка 8 – натиснута.
5. За допомогою ручки “Регулювання струму” послідовно встановити значення напруг  $U_i$ : 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 У. Зняти відповідні їм показання міліамперметра  $I_i$ . Отримані величини занести до табл. 7.1.
6. Розрахувати за формулою (7.1) значення активних опорів  $R_i$  і занести їх до табл. 7.1.



Таблиця 7.1

$U_i, \text{В}$	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$I_i, \text{А}$					
$R_i, \text{Ом}$					
$\langle R_I \rangle, \text{Ом}$					
$\rho_I, \text{Ом}\cdot\text{м}$					

7. Визначити середнє значення опору провідника

$$\langle R_I \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i, \quad (7.4)$$

де  $N$  – кількість вимірювань.

8. Визначити питомий електричний опір провідника  $\rho_I$  за формулою

$$\rho_I = R_I \frac{S}{l}, \quad (7.5)$$

де  $l$  – довжина проводу;  $S$  – площа його поперечного перерізу, що обчислюється за зазначеним на установці діаметром проводу.

*Завдання 2. Визначення опору провідника за допомогою вольтметра й амперметра з точним вимірюванням напруги*

1. Повторити п. 2 завдання 1.
2. Кнопками комутації лабораторного пристрою реалізувати схему, що відповідає рис. 7.3. Стан кнопок на приладі (див. рис. 7.1): кнопка 9 – натиснута; кнопка 8 – натиснута.
3. Повторити дії п. 5 завдання 1. Отримані величини  $U_i'$  і  $I_i'$  занести до таблиці, аналогічної табл. 7.1.
4. Розрахувати за формулою (7.3) значення активних опорів  $R_i'$  і занести їх до таблиці.
5. Визначити середнє значення опору провідника  $\langle R_U' \rangle$  за формулою, аналогічною до формули (7.4).
6. Визначити питомий опір провідника  $\rho_U'$  за формулою, аналогічною до формули (7.5).

*Завдання 3. Визначення активного опору провідника за допомогою мосту постійного струму*

1. Кнопками комутації лабораторного пристрою реалізувати схему, необхідну для вимірювання опору за допомогою мосту постійного струму (кнопка 8 (див. рис. 7.1) – віджата).

2. Увімкнути міст постійного струму (інструкція з методики роботи з мостом додається до лабораторної установки).
3. Виміряти загальний опір  $R_{\Sigma}$  досліджуваного провідника й комутувальних проводів:  $R_{\Sigma} = R'' + R_{np}$ .
4. Установити рухомий контакт на реохорді в крайнє нижнє положення й виміряти активний опір комутувальних проводів  $R_{np}$ .
5. За даними вимірювань визначити активний опір  $R''$  провідника за формулою

$$R'' = R_{\Sigma} - R_{np}.$$

6. Знайти питомий опір провідника  $\rho'$  (за значенням  $R''$ ).
7. Отримані величини питомих опорів порівняти між собою, зробити висновки.

### Контрольні запитання

#### Варіант 1

1. Що називають струмом провідності? Сформулюйте умови його існування.
2. Сформулюйте правила Кірхгофа.
3. Запишіть формулу для розрахунку електричного опору провідника циліндричної форми.
4. *Задача.* Опір дроту  $R = 81$  Ом. Його розрізали на кілька рівних частин і з'єднали ці частини паралельно, внаслідок чого опір став  $R_1 = 1$  Ом. На скільки частин розрізали дріт?

*Відповідь:* 9.

#### Варіант 2

1. Яка причина існування електричного опору провідників з погляду класичної електронної теорії? Яка справжня природа електричного опору?
2. Сформулюйте закон Ома для однорідної й неоднорідної ділянок кола, для замкнутого кола.
3. Виведіть формулу для розрахунку загального опору резисторів, з'єднаних паралельно.
4. *Задача.* По мідному провіднику з площею перерізу  $S = 0,64$  мм<sup>2</sup> тече струм  $I = 2,4$  А. Визначіть середню швидкість упорядкованого руху електронів, вважаючи, що кількість вільних електронів в одиниці об'єму дорівнює кількості атомів  $n$  в одиниці об'єму провідника ( $\rho = 8,93 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu = 6,4 \cdot 10^{-2}$  кг/моль).

*Відповідь:*  $2,8 \cdot 10^{-4}$  м/с.

### Варіант 3

1. Дайте порівняльну характеристику методів визначення опору провідника, що використовуються у цій роботі.
2. Яке явище називають надпровідністю? Де воно застосовується?
3. Виведіть формулу для розрахунку загального опору резисторів, з'єднаних послідовно.
4. *Задача.* Визначіть питомий опір  $\rho$  провідника довжиною  $l = 2$  м, якщо при напрузі  $U = 2$  В, прикладеній до його кінців, густина струму в провіднику  $j = 10^6$  А/м<sup>2</sup>.  
*Відповідь:*  $10^{-6}$  Ом·м.

## Лабораторна робота № 2-08 ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ ВИХОДУ ЕЛЕКТРОНІВ З ПОВЕРХНІ МЕТАЛУ

*Мета роботи* – дослідження явища термоелектронної емісії й визначення роботи виходу електронів з поверхні металу.

*Прилади й обладнання:* вакуумний діод; регульоване джерело живлення розжарення катода; регульоване джерело живлення анодного кола; вимірювальні прилади.

### Опис лабораторної установки й методики вимірювань

Дослідження термоелектронної емісії й визначення роботи виходу електрона з поверхні металу виконуються на установці, схему якої зображено на рис. 8.1. Основним вузлом установки є двохелектродна вакуумна

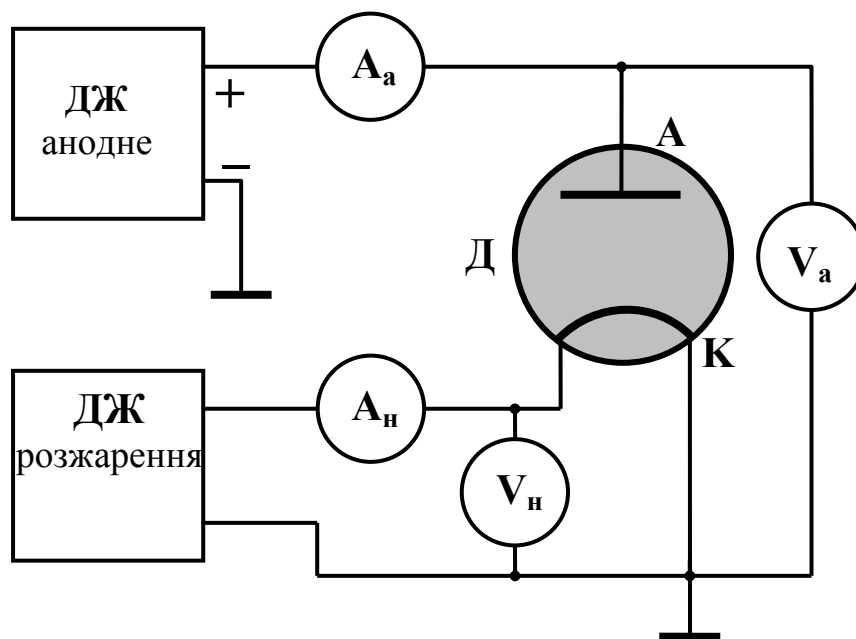


Рис. 8.1

електронна лампа (вакуумний діод) Д. Вакуумний діод має два металевих електроди, запаяних у скляну колбу, з якої відкачано повітря. Катод лампи ДО (негативний електрод) розігрівається прямим пропусканням струму, силу якого можна регулювати джерелом живлення розжарення й контролювати відповідними приладами. При цьому температура катода  $T$  визначається електричною потужністю, що підводиться:

$$P_p = I_p U_p, \quad (8.1)$$

де  $I_p$  – сила струму розжарення катода;  $U_p$  – напруга розжарення.

З поверхні нагрітого катода емітуються електрони. Між катодом **К** і анодом **А** (позитивним електродом) за допомогою анодного джерела живлення створюється електричне поле. Змінюючи величину різниці потенціалів між електродами (анодна напруга), можна регулювати кількість термоелектронів, які досягають анода, тобто силу анодного струму. Типовий вигляд залежності анодного струму  $I_a$  від анодної напруги  $U_a$  (вольтамперну характеристику (ВАХ)) показано на рис. 8.2. На кривих є дві характерні ділянки: **АВ** – ділянка, що відповідає наявності просторового заряду електронів поблизу поверхні катода; **СД** – ділянка струму насичення.

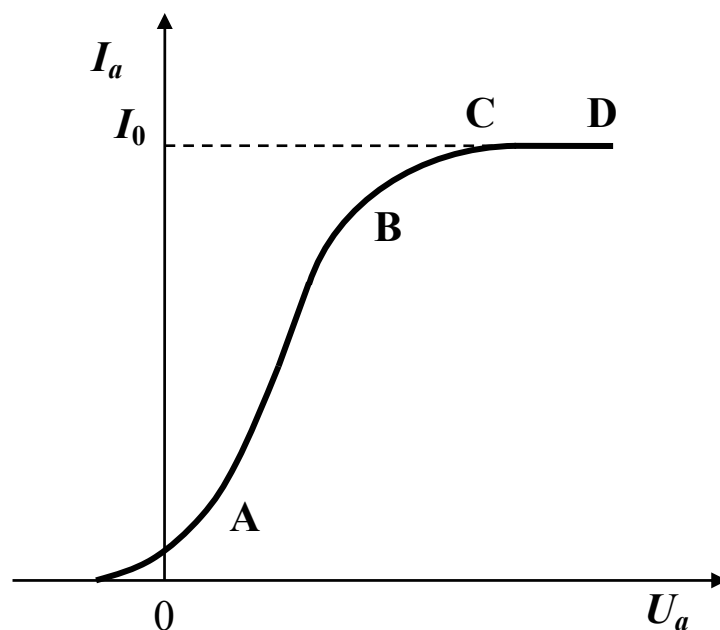


Рис. 8.2

Залежність анодного струму від напруги на ділянці **АВ** теоретично отримали Богуславський і Ленгмюр:

$$I_a = \alpha U_a^{3/2},$$

де  $\alpha$  – константа, що залежить від форми електродів і геометрії міжелектродного проміжку. Із цього співвідношення видно, що залежність анодного струму від анодної напруги в умовах наявності просторового заряду не підпорядковується закону Ома.

В області насичення анодного струму всі електрони, емітовані катодом, досягають анода. Значення струму насичення  $I_0$  можна одержати, продовживши ділянку **CD** до осі ординат, що проходить через точку  $U_a = 0$  В.

Величина сили струму насичення характеризує емісійну здатність катода й залежить від температури. Ця залежність описується законом Річардсона–Дешмана:

$$I_0 = AST^2 \exp\left(-\frac{A_{вих}}{kT}\right), \quad (8.2)$$

де  $A = 1,2 \cdot 10^6$  А/(м<sup>2</sup> К<sup>2</sup>) – стала Річардсона–Дешмана;  $S$  – площа поверхні катода;  $T$  – температура катода;  $k$  – стала Больцмана;  $A_{вих}$  – робота виходу електрона з поверхні катода.

Визначивши експериментально силу струму насичення  $I_0$  і температуру катода й перетворивши формулу (8.2), можна розрахувати роботу виходу

$$A_{вих} = kT \ln\left(\frac{AST^2}{I_0}\right). \quad (8.3)$$

### Порядок виконання роботи

1. Перевірити правильність підімкнення елементів лабораторної установки за схемою, зображеною на рис. 8.1. Ручки регулювання напруги в джерелах живлення мають бути встановлені в крайнє положення проти годинникової стрілки.
2. Увімкнути джерело живлення розжарення катода й встановити силу струму розжарення  $I_p$  у діапазоні 0,9...1,05 А. Виміряти вольтметром величину напруги розжарення  $U_p$  на панелі джерела живлення.
3. За формулою (8.1) обчислити потужність розжарення катода  $P_p$ . Користуючись графіком, наведеним на робочому місці, за допомогою отриманої величини  $P_p$  визначити температуру катода  $T$ .
4. Увімкнути джерело анодної напруги. Змінюючи значення анодної напруги  $U_a$  від 0 до 150 В з кроком 10 В, виміряти силу анодного струму  $I_a$ . Результати вимірювань занести до табл. 8.1.

Таблиця 8.1

$U_a$ , В	0	10	20	...	150
$I_a$ , мА					

5. Повторити вимірювання, аналогічні пп. 2 – 4, при іншому значенні сили струму розжарення з цього діапазону.
6. Результати вимірювань занести до таблиці, подібної до табл. 8.1.

7. Використовуючи отримані дані, на одному графіку побудувати дві ВАХ для різних температур і визначити значення сили струму насичення  $I_0(T)$ .
8. За формулою (8.3) обчислити відповідні значення роботи виходу  $A_{вих}$  і знайти їхню середню величину (величину площі поверхні катода  $S$  вказано на робочому місці).
9. Проаналізувати отримані результати, зробити висновки.

### Контрольні запитання

#### Варіант 1

1. Що називають термоелектронною емісією, де вона використовується?
2. Накресліть і поясніть ВАХ вакуумного діода.
3. Які причини виникнення області просторового заряду біля поверхні термокатода?
4. *Задача.* Визначіть роботу виходу електрона з поверхні катода, якщо у вакуумному діоді при температурі катода 2000 К густина струму насичення  $j_{нас} = 0,12 \text{ А/см}^2$ .  
*Відповідь:*  $A_{вих} = 3,81 \text{ еВ}$ .

#### Варіант 2

1. Що називають роботою виходу електрона?
2. Чому залежність  $I(U)$  у вакуумному діоді не підпорядковується закону Ома?
3. Що характеризує величина струму насичення у вакуумному діоді? Від чого вона залежить?
4. *Задача.* Температуру розжарення вольфрамового катода у вакуумному діоді збільшили в 1,2 рази. У скільки разів збільшиться густина струму насичення, якщо початкова температура дорівнювала 2000 К, а робота виходу для вольфраму  $A_{вих} = 4,5 \text{ еВ}$ ?  
*Відповідь:* в 111,33 рази.

#### Варіант 3

1. Рухом яких заряджених частинок обумовлений електричний струм у вакуумному діоді? Які процеси є джерелом цих частинок?
2. Запишіть закон Богуславського–Ленгмюра. У чому його відмінність від закону Ома? З чим вона пов'язана?
3. Поясніть механізм термоелектронної емісії. Які фактори впливають на процес емісії електронів?
4. *Задача.* Катод вакуумного діода виконано з молібдену. Температура катода  $T = 1723 \text{ }^\circ\text{С}$ . Скільки електронів емітується за секунду з  $1 \text{ см}^2$  поверхні катода? Робота виходу для молібдену  $A_{вих} = 4,27 \text{ еВ}$ .  
*Відповідь:*  $N = 5,33 \cdot 10^{16}$ .

## Лабораторна робота № 2-09 ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВТОРИННОЇ ЕМІСІЇ

*Мета роботи* – вивчення динатроного ефекту у вакуумному тріоді й визначення коефіцієнта вторинної емісії електронів.

*Прилади й обладнання:* вакуумний тріод; джерело струму розжарення катода; регульовані джерела живлення анодного й сіткового кіл; вимірювальні прилади.

### Опис лабораторної установки й методики вимірювань

При бомбардуванні електронами матеріалів, що містять вільні електрони, спостерігається емісія електронів з їхньої поверхні. Електрони, що бомбардують поверхню, називають первинними. Емітовані електрони називають вторинними, а це явище – вторинною електронною емісією. Для виходу вторинного електрона з поверхні матеріалу первинний електрон повинен передати йому енергію, що перевищує роботу виходу. Тому вторинна емісія починається лише при певних значеннях енергії первинних електронів. Кількість вторинних електронів залежить від природи матеріалу, стану поверхні, енергії первинних електронів і кута їх падіння. Для характеристики вторинної емісії вводиться коефіцієнт  $k$ , що дорівнює відношенню кількості вторинних електронів  $N_2$  до кількості первинних  $N_1$ :

$$k = \frac{N_2}{N_1}. \quad (9.1)$$

Значення коефіцієнта вторинної емісії може бути як меншим, так і більшим від одиниці.

Наявність вторинної електронної емісії використовується в роботі електронних ламп із керувальним електродом (сіткою). Вплив вторинної емісії на характеристики електронних ламп називають динатроном ефектом.

У цій роботі на прикладі трьохелектродної лампи (тріода) досліджується вплив вторинних електронів на анодну й сіткову вольт-амперні характеристики (ВАХ). Дослідження здійснюються на установці, електричну схему якої зображено на рис. 9.1. Для живлення сіткового й анодного кіл використовуються джерела постійної напруги. Нагрівання катода  $K$  лампи здійснюється побічно за допомогою нитки розжарення  $P$ , по якій пропускається змінний струм постійної амплітуди (джерело живлення нитки розжарення на схемі не зображено). Напруга в колі сітки  $C$  регулюється потенціометром  $R_c$ , а в колі анода  $A$  – потенціометром  $R_a$ . Сили анодного  $I_a$  й сіткового  $I_c$  струмів реєструються міліамперметрами  $A_a$  й  $A_c$  відповідно. Різниці потенціалів між катодом і сіткою  $U_c$  і між катодом і анодом  $U_a$  реєструються вольтметрами  $V_c$  і  $V_a$  відповідно.

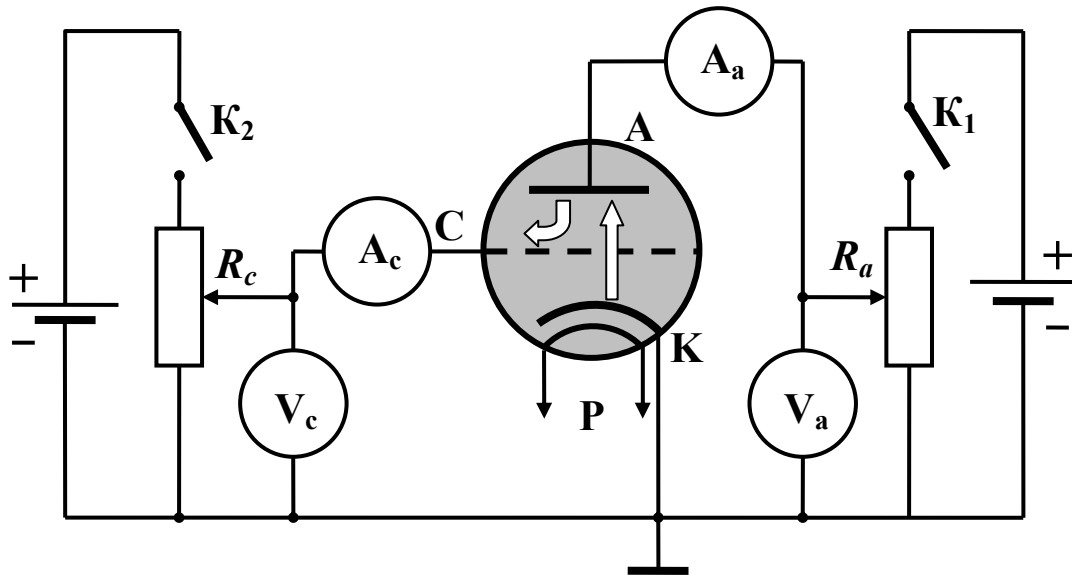


Рис. 9.1

Розглянемо зміну анодного  $I_a$  й сіткового  $I_c$  струмів у тріоді при зміні анодної напруги  $U_a$ . Нехай напруга на сітці має сталу додатну величину (наприклад,  $U_c = 100$  В). Типовий вигляд анодної (крива 1) і сіткової (крива 2) ВАХ показано на рис. 9.2.

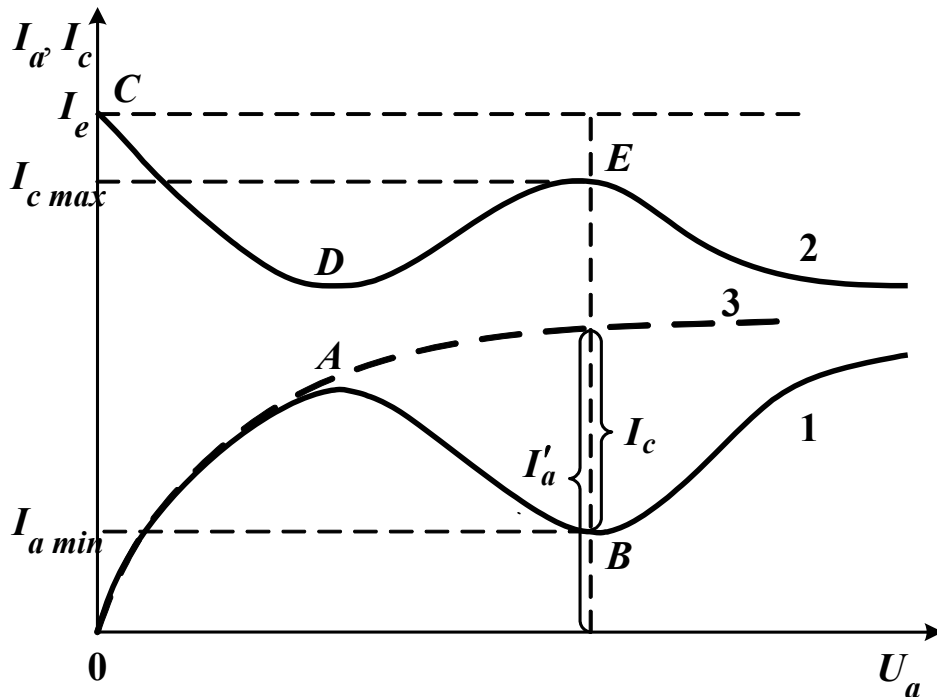


Рис. 9.2

Первинні електрони, що емітуються з катода, прискорюються електричним полем у міжелектродному проміжку лампи й потрапляють або на анод, або на сітку, створюючи відповідно анодний або сітковий струм. Залежно від співвідношення анодної й сіткової напруг величини цих струмів



можуть змінюватися, але їхня сума буде сталою величиною, що дорівнює повному струму емісії:

$$I_e = I_c + I_a. \quad (9.2)$$

Коли анодна напруга  $U_a = 0$ , струм сітки дорівнює повному струму емісії (всі первинні електрони збираються сіткою). При збільшенні анодної напруги різниця потенціалів між сіткою й анодом  $\Delta\varphi = U_c - U_a$  зменшується й частина первинних електронів починає досягати анода. Ці електрони мають малі кінетичні енергії, які є недостатніми для вибивання вторинних електронів під час бомбардування анода. Подальше зростання анодної напруги приводить до збільшення як кількості первинних електронів, що досягають анода, так і величини їхньої кінетичної енергії. На аноді починається процес вторинної електронної емісії. Оскільки потенціал сітки більший від потенціалу анода, вторинні електрони рухаються в напрямку сітки. Це приводить до зростання сіткового (ділянка **DE** кривої 2, рис. 9.2) і спаду анодного (ділянка **AB** кривої 1) струмів. Таким чином, у тріоді з'являються два зустрічних потоки: потік первинних електронів на анод і потік вторинних електронів на сітку (їхні напрямки показано стрілками на рис. 9.1).

На рис. 9.2 пунктиром зображено анодну ВАХ за відсутності вторинної емісії (крива 3). При напрузі  $U_a$ , що відповідає мінімальному значенню анодного струму  $I_{a \min}$  (точка В на кривій 1), струм первинних електронів від катода до анода визначається величиною  $I'_a$ , а струм вторинних електронів від анода до сітки – величиною  $I'_c$ . Оскільки сила струму пропорційна кількості електронів, що приходять на електрод лампи в одиницю часу, то вираз (9.1) для коефіцієнта вторинної емісії можна записати у вигляді

$$k = \frac{I'_c}{I'_a}.$$

Через те, що величини цих струмів виміряти не можна, на практиці коефіцієнт вторинної електронної емісії визначають за відношенням  $I_{c \max}$  до повного струму емісії  $I_e$  (див. рис. 9.2):

$$k = \frac{I_{c \max}}{I_e}. \quad (9.3)$$

### Порядок виконання роботи

1. Установити ручки регулювання напруги в джерелах живлення в крайнє положення проти годинникової стрілки.
2. Увімкнути живлення лабораторної установки. Увімкнути ключ  $K_2$  і потенціометром  $R_c$  установити величину напруги на сітці  $U_c = 100$  В. Під час вимірювань стежити за її сталістю.

- Увімкнути ключ  $K_1$  і, збільшуючи анодну напругу  $U_a$  потенціометром  $R_a$  (в інтервалі  $0 \dots 10$  В із кроком 2 В, а в інтервалі  $10 \dots 100$  В із кроком 10 В), виміряти сили анодного  $I_a$  й сіткового  $I_c$  струмів. Дані, отримані під час вимірювань, занести до табл. 9.1.
- Використовуючи отримані дані, на одному графіку побудувати дві залежності  $I_a = f(U_a)$  і  $I_c = f(U_a)$  при сталому значенні  $U_c = 100$  В.
- Використовуючи побудовані залежності й вираз (9.3), обчислити значення коефіцієнта вторинної емісії  $k$ .

Таблиця 9.1

$U_a$ , В	0	2	...	10	20	...
$I_a$ , мА						
$I_c$ , мА						

- Проаналізувати отримані результати, зробити висновки.

### Контрольні запитання

#### Варіант 1

- Що називають вторинною електронною емісією?
- Дайте визначення роботи виходу електрона з поверхні матеріалу.
- Чому при малих значеннях анодної напруги в тріоді порівняно з напругою на сітці динатронний ефект не спостерігається?
- Задача.* Яку максимальну кількість вторинних електронів  $N_{max}$  може вибити електрон з поверхні анода, виготовленого з нікелю, якщо електрон прискорений різницею потенціалів  $\Delta\phi = 100$  В? Робота виходу електрона з поверхні нікелю дорівнює 4,84 еВ.

*Відповідь:*  $N_{max} = 20$ .

#### Варіант 2

- Дайте визначення коефіцієнта вторинної електронної емісії. Від чого він залежить?
- Яке явище називають динатронним ефектом?
- Чому при зміні напруги на аноді повний емісійний струм залишається сталим? Чим він визначається?
- Задача.* У вакуумному тріоді електрон, що пролітає сітку, має кінетичну енергію  $W_k = 8 \cdot 10^{-18}$  Дж. Чи буде спостерігатися вторинна електронна емісія на аноді, якщо затримна різниця потенціалів між анодом і сіткою  $\Delta\phi = 20$  В? Анод виготовлено з танталу ( $A_{вих} = 4,12$  еВ).

*Відповідь:* буде.

## Лабораторна робота № 2-10 ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

*Мета роботи* – визначення питомого заряду електрона.

*Прилади й обладнання:* вакуумний діод; регульоване джерело струму розжарення катода; регульоване джерело живлення анодного кола; вимірювальні прилади.

### Опис лабораторної установки й методики вимірювань

Питомим зарядом елементарної частинки називають відношення заряду частинки до її маси. У цій роботі визначення питомого заряду електрона проводиться методом магнетрона. У цьому методі використовуються особливості руху заряджених частинок у схрещених електричному й магнітному полях. Експеримент проводиться на установці, схему якої показано на рис. 10.1. Основним елементом установки є вакуумний діод Д з коаксіальними циліндричними електродами: катодом **К** та анодом **А** (рис. 10.2).

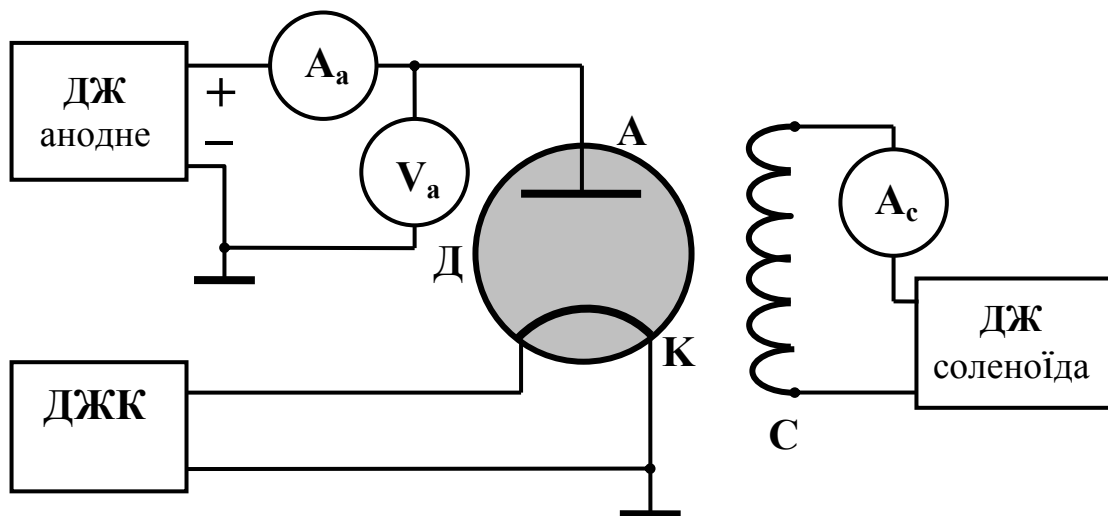


Рис. 10.1

Електроди поміщено в скляну колбу, з якої відкачано повітря. Катод розігрівається прямим пропусканням струму розжарення сталої сили від свого джерела живлення ДЖК. З поверхні нагрітого катода відбувається термоемісія електронів, які біля поверхні катода утворюють електронну хмару (область просторового заряду). Розміри цієї області змінюються залежно від різниці потенціалів між катодом і анодом і в умовах експерименту порівнянні з розмірами катода. Емітовані електрони в області просторового заряду рухаються хаотично, і їхній розподіл за швидкостями відповідає розподілу Максвелла.

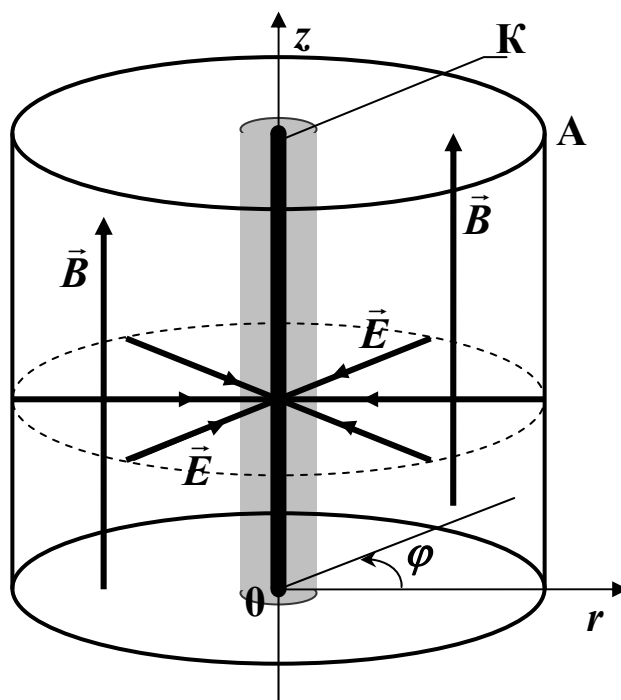


Рис. 10.2

Під дією зовнішнього радіального електричного поля (його силові лінії показано на рис. 10.2), що створюється електродами лампи, електрони “витягуються” із хмари й прискорюються в напрямку до анода. Величина напруженості електричного поля в міжелектродному проміжку визначається виразом

$$E = -\frac{U_a}{r \ln(r_a / r_k)}, \quad (10.1)$$

де  $U_a$  – різниця потенціалів між анодом і катодом (анодна напруга);  $r_a$  і  $r_k$  – радіуси анода й катода відповідно;  $r$  – відстань від осі системи до досліджуваної точки.

Вакуумний діод поміщено у середину соленоїда С. При пропусценні електричного струму в соленоїді виникає магнітне поле. Величина магнітної індукції  $B$  регулюється зміною струму соленоїда  $I_c$ .

Для опису руху електрона в проміжку між коаксіальними циліндричними електродами зручно користуватися циліндричною системою координат  $(r, \varphi, z)$  (див. рис. 10.2).

З боку електричного поля на електрон, що має заряд  $q$ , буде діяти сила  $F_e$ , спрямована вздовж радіуса системи. Радіальна складова цієї сили

$$F_{er} = qE, \quad (10.2)$$

інших складових немає:  $F_{e\varphi} = F_{ez} = 0$ .

З боку магнітного поля, силиві лінії якого спрямовані вздовж осі  $z$ , на електрон, що рухається зі швидкістю  $v$ , діє сила Лоренца. Проекції цієї сили в циліндричній системі координат будуть

$$F_{mz} = 0, F_{m\varphi} = -qv_r B_z, F_{mr} = qv_\varphi B_z. \quad (10.3)$$

Уважатимемо, що початкова швидкість руху електрона біля поверхні катода дорівнює нулю. Тоді електрон під дією цих сил буде рухатися тільки в площині  $(r, \varphi)$ . Розв'язавши задачу про рух електрона, одержимо

$$v_\varphi = -\frac{qBr}{2m} \left( 1 - \frac{r_k^2}{r^2} \right). \quad (10.4)$$

Оскільки сила Лоренца роботу не виконує, а робота сили, що діє на електрон з боку електричного поля, приводить до збільшення його кінетичної енергії, можна записати

$$qU_a = \frac{m}{2} (v_r^2 + v_\varphi^2),$$

або, урахувавши (10.4),

$$qU_a = \frac{m}{2} \left( v_r^2 + \frac{q^2 B^2}{4m^2 r_a^2} (r_a^2 - r_k^2)^2 \right). \quad (10.5)$$

Розглянемо траєкторію руху електрона в міжелектродному проміжку при різниці потенціалів  $U_a$  (рис. 10.3).

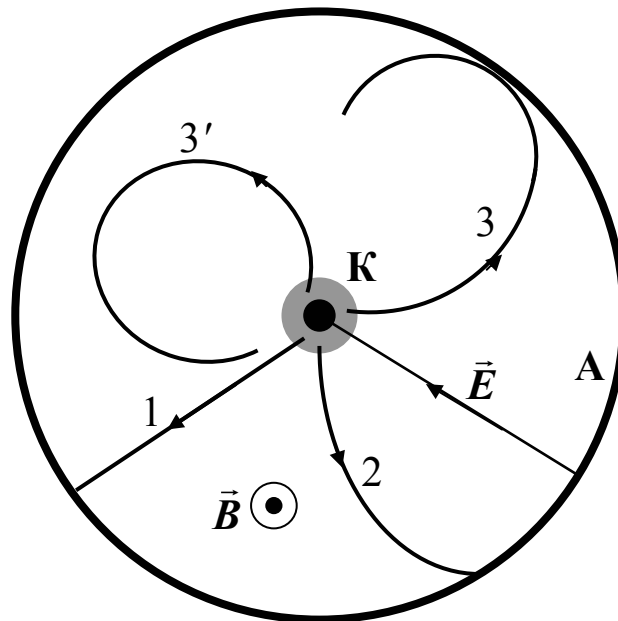


Рис. 10.3

За відсутності магнітного поля електрон рухається прямолінійно вздовж радіуса системи (траєкторія 1). При збільшенні магнітної індукції  $B$  траєкторія викривляється (траєкторія 2) і з деякого критичного значення магнітної індукції  $B_{кр}$  радіус кривизни траєкторії стає малим настільки, що

електрон без зіткнення з анодом повертається на катод (траєкторії 3 і 3'). Очевидно, що при  $B = B_{кр}$  радіальна складова швидкості електрона перетворюється на нуль і вираз (10.5) набуває вигляду

$$qU_a = \frac{q^2 B_{кр}^2}{8mr_a^2} (r_a^2 - r_k^2)^2. \quad (10.6)$$

Таким чином, вимірявши величину  $B_{кр}$ , можна за допомогою формули (10.6) визначити питомий заряд електрона:

$$\frac{q}{m} = \frac{8U_a r_a^2}{B_{кр}^2 (r_a^2 - r_k^2)^2}. \quad (10.7)$$

Струм у вакуумному діоді зумовлений рухом термоелектронів від катода до анода. При величині магнітної індукції, більшій від критичного значення, електрони перестають потрапляти на анод і струм у лампі припиняється.

На рис. 10.4 зображено залежність струму діода  $I_a$  від величини магнітної індукції  $B$ . Пунктирна крива відповідає випадку, коли початкова швидкість електронів на поверхні катода дорівнює нулю, як і передбачалося раніше. Однак у реальному випадку, при максвелівському розподілі електронів за швидкостями, критичні умови досягаються для різних електронів при різних величинах магнітної індукції. Залежність  $I_a(B)$  у цьому випадку має вигляд кривої, зображеної на рис. 10.4 суцільною лінією.

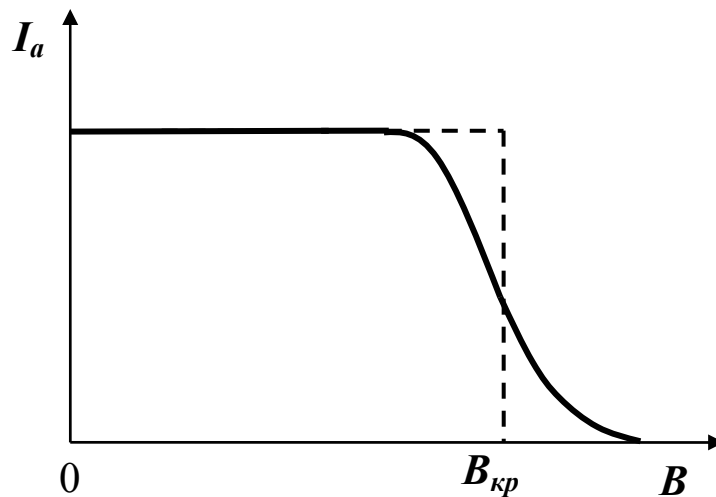


Рис. 10.4

Неідеальні коаксиальність електродів лампи, співвісність електродів лампи й соленоїда, а також ряд інших факторів приводять до додаткового згладжування кривої. Проте при хорошому виконанні обладнання установки злам функції  $I_a(B)$  залишається досить різким для визначення критичної величини магнітної індукції.

## Порядок виконання роботи

1. Перевірити правильність підімкнення елементів лабораторної установки за схемою, зображеною на рис. 10.1. Ручки регулювання напруги в джерелах анодної напруги й живлення соленоїда мають бути встановлені в крайнє положення проти годинникової стрілки.
2. Увімкнути лабораторний стенд.
3. Увімкнути джерело анодної напруги й установити значення  $U_a$ , указане на установці (одночасно ввімкнеться й розжарення катода лампи). Дати прогрітисся установці не менше п'яти хвилин. Під час проведення вимірювань стежити за сталістю анодної напруги.
4. Увімкнути джерело живлення соленоїда. Змінюючи силу струму в соленоїді від нуля до максимально можливого значення, зняти залежність сили анодного струму від сили струму в соленоїді  $I_a(I_c)$ .
5. За отриманим даними побудувати графік залежності  $I_a(I_c)$ .
6. За графіком визначити критичне значення струму соленоїда  $I_{скр}$ , при якому спостерігається найбільший нахил кривої  $I_a(I_c)$ .
7. Для знайденого значення  $I_{скр}$  розрахувати критичне значення магнітної індукції  $B_{кр}$  за формулою

$$B_{кр} = k I_{скр}.$$

Значення константи  $k$  указано на установці.

8. За формулою (10.7) обчислити величину питомого заряду електрона.
9. Проаналізувати отримані результати, зробити висновки.

## Контрольні запитання

### Варіант 1

1. Запишіть вираз для сили, що діє на заряджену частинку в електричному полі.
2. Поясніть, чому сила Лоренца не виконує роботу.
3. Електрон влітає в однорідне магнітне поле під гострим кутом до силових ліній. Нарисуйте його траєкторію. Поясніть отриманий рисунок.
4. *Задача.* Протон і електрон, рухаючись з однаковою швидкістю, влітають в однорідне магнітне поле перпендикулярно до силових ліній. У скільки разів радіус кривизни  $R_1$  траєкторії протона більше радіуса кривизни  $R_2$  траєкторії електрона?

*Відповідь:*  $R_1/R_2 = 1836$ .

### Варіант 2

1. Напишіть вираз для сили Лоренца.
2. Як визначається робота сили, що діє на заряджену частинку в електричному полі?

3. Протон влітає в однорідні електричне й магнітне поля, схрещені під прямим кутом, уздовж силової лінії електричного поля. Нарисуйте траєкторію його руху. Поясніть рисунок.
4. *Задача.* Циклотрон призначено для прискорення протона до енергії 5 МеВ. Яким має бути радіус  $R$  дуантів циклотрона, якщо магнітна індукція  $B = 1$  Тл?  
Відповідь:  $R > 0,32$  м.

### Варіант 3

1. Запишіть вираз для сили, що діє на заряджену частинку, що рухається в схрещених електричному й магнітному полях.
2. В однорідне магнітне поле вздовж силової лінії влітає  $\alpha$ -частинка. Поясніть поведінку частинки, нарисуйте її траєкторію.
3. Наведіть приклади використання в техніці особливостей руху заряджених частинок у схрещених електричному й магнітному полях.
4. *Задача.* Електрон влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярно до силових ліній. Знайдіть кутову швидкість обертання електрона по колу, якщо магнітна індукція  $B = 2 \cdot 10^{-2}$  Тл.  
Відповідь:  $\omega = 3,5 \cdot 10^9$  рад/с.

## Лабораторна робота № 2-11 ВИВЧЕННЯ ЕФЕКТУ ХОЛЛА

*Мета роботи* – визначення сталої Холла й концентрації носіїв струму в напівпровіднику.

*Прилади й обладнання:* напівпровідникова пластина із кремнію  $Пл$ ; гальванометр  $G$ ; ключ вимірювального кола  $K$ ; джерело робочого струму пластини  $ДЖ_0$ ; джерело живлення електромагніта  $ДЖ_{ем}$ ; реостат кола живлення пластини  $R_0$ ; реостат кола живлення електромагніта  $R_{ем}$ ; амперметри  $A_0$  і  $A_{ем}$  у колах живлення пластини й електромагніта відповідно; перемикачі напрямку струму  $\Pi_0$  і  $\Pi_{ем}$  у колах живлення пластини й електромагніта відповідно.

### Опис установки й виведення робочої формули

Лабораторну установку, електричну схему якої зображено на рис. 11.1, призначено для вивчення ефекту Холла в напівпровідникових матеріалах. В установці використовуються три електричних кола: коло живлення пластини; коло живлення електромагніта; вимірювальне коло.

У колах живлення пластини й електромагніта передбачено можливість регулювання й контролю величини струму, перемикачі  $\Pi_0$  і  $\Pi_{ем}$  дають



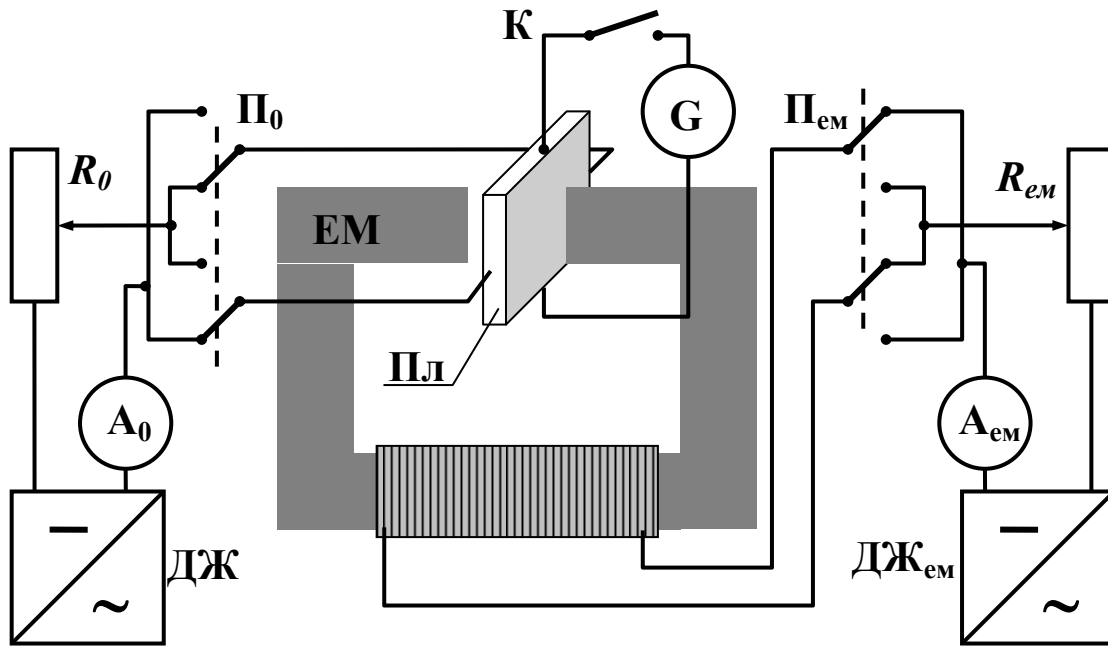


Рис. 11.1

можливість змінювати напрямок цих струмів. У вимірювальному колі використовується гальванометр магнітоелектричної системи із середнім нульовим положенням, що дає можливість вимірювати різницю потенціалів обох полярностей з визначенням її знака.

Ефект Холла полягає в тому, що в провіднику зі струмом, поміщеному в магнітне поле, силові лінії якого перпендикулярні до напрямку струму, виникає поперечна різниця потенціалів (її також називають холівською різницею потенціалів). Отримаємо вираз для холівської різниці потенціалів. Розглянемо однорідну пластину, уздовж якої тече електричний струм (рис. 11.2).

Нехай носіями струму в пластині є електрони. Під дією електричного поля електрони рухаються упорядковано в напрямку, протилежному вектору напруженості електричного поля  $\vec{E}$ . У цьому випадку всі точки поперечного перерізу пластини будуть мати однаковий потенціал, тому можна вибрати на протилежних гранях пластини будь-які точки (позначимо їх **C** і **D**), для яких  $U_{CD} = 0$ . При ввімкненні магнітного поля з індукцією  $\vec{B}$  в місці розташування пластини на електрони буде діяти сила Лоренца

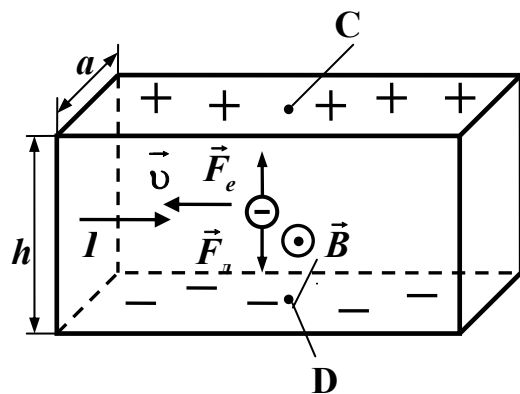


Рис. 11.2

$$\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}],$$

відхиляючи електрони від їхнього прямолінійного руху. Унаслідок цього відбудеться перерозподіл електронів у пластині: відповідно до напрямків струму й магнітного поля, заданих на рис. 11.2, концентрація електронів у верхній частині пластини зменшиться, а в нижній – збільшиться. Такий перерозподіл електронів буде супроводжуватися появою поперечної різниці потенціалів  $U_{CD}$  (поперечного електричного поля напруженістю  $\vec{E}_H$ ).

Поперечне електричне поле напруженістю  $\vec{E}_H$  приведе до появи кулонівської сили  $\vec{F}_e = e\vec{E}_H$ , яка буде спрямована протилежно силі Лоренца. Коли напруженість цього поля досягне такого значення, що його дія на електрони буде врівноважувати силу Лоренца, спільна дія кулонівської сили й сили Лоренца забезпечить динамічну рівновагу в поперечному русі електронів. При цьому величини цих сил будуть рівні й значення  $E_H$  можна знайти із співвідношення

$$eE_H = evB, \quad (11.1)$$

де  $v$  – швидкість упорядкованого руху електронів;  $e$  – заряд електрона.

Для однорідного ізотропного матеріалу пластини величина напруженості поперечного електричного поля  $E_H$  зв'язана з поперечною різницею потенціалів між точками **C** і **D** співвідношенням

$$U_{CD} = E_H h,$$

де  $h$  – відстань між точками **C** і **D** (висота пластини). З урахуванням співвідношення (11.1) отримаємо

$$U_{CD} = vBh. \quad (11.2)$$

Відповідно до класичної теорії електропровідності середня швидкість упорядкованого руху електронів

$$\langle u \rangle = \frac{j}{ne}, \quad (11.3)$$

де  $j$  – густина струму;  $n$  – концентрація носіїв струму в пластині. Відповідно до означення густина струму

$$j = \frac{I}{S}, \quad (11.4)$$

де  $S = ah$  – площа поперечного перерізу пластини;  $a$  – її ширина. Вважаючи  $\langle u \rangle \approx v$  і враховуючи (11.3) і (11.4), вираз (11.2) можна записати так:

$$U_{CD} = \frac{IB}{nea} = R \frac{IB}{a}. \quad (11.5)$$

У цьому виразі коефіцієнт пропорційності  $R = \frac{I}{ne}$  називають сталою

Холла.

Таким чином, поперечна різниця потенціалів, що реєструється при ефекті Холла, виникає завдяки особливостям руху заряджених частинок у схрещених електричному й магнітному полях. Її величина прямо пропорційна силі струму, що протікає через досліджуваний зразок, величині магнітної індукції й обернено пропорційна концентрації носіїв струму в зразку.

Носії струму можуть бути як негативними (електрони), так і позитивними (дірки). Якщо носіями струму в зразку є дірки, то ситуація виявляється подібною до описаної вище, тільки тепер при тих самих напрямках струму й силових ліній магнітного поля не електрони, а дірки відхиляються до нижньої грані й знак різниці потенціалів змінюється на протилежний. Таким чином, визначивши знак холівської різниці потенціалів, можна встановити тип носіїв струму в напівпровідниках, а на основі отриманого експериментально числового значення сталої Холла

$$R = \frac{U_{cd}a}{IB} \quad (11.6)$$

визначити концентрацію носіїв струму за формулою

$$n = \frac{1}{eR}. \quad (11.7)$$

### Порядок виконання роботи

1. Установити перемикачі  $\Pi_0$ ,  $\Pi_{em}$  і ключ  $K$  у положення 1. **Увага!** Тумблери  $\Pi_0$  і  $\Pi_{em}$  можна перемикати тільки за відсутності струму у відповідних колах, а саме при відімкнених джерелах живлення.
2. Увімкнути джерело живлення струму пластини  $ДЖ_0$  і за допомогою реостата  $R_0$  встановити силу струму  $I$  через пластину (її величину зазначено на установці).
3. Увімкнути джерело живлення електромагніта  $ДЖ_{em}$ .
4. За допомогою потенціометра  $R_{em}$  збільшити силу струму електромагніта  $I_{em}$  до величини, значення якої вказано на установці. При цьому зафіксувати кількість поділок  $N_1$ , на яку зміститься „зайчик” гальванометра.
5. Повторити вимірювання при протилежному напрямку магнітного поля (перемикач  $\Pi_{em}$  установити в положення 2) і зафіксувати значення  $N_2$ . Обчислити середнє значення  $\langle N \rangle$ .
6. Повторити вимірювання пп. 4, 5 при іншій величині сили струму електромагніта  $I_{em}$ , значення якої також вказано на установці.

7. За допомогою графіка залежності  $B = f(I_{em})$ , що є на робочому місці, визначити величину магнітної індукції поля  $B$ , яка відповідає значенню струму живлення електромагніта  $I_{em}$ .
8. Розрахувати холівську різницю потенціалів  $U_X$  за формулою
 
$$U_{CD} = C_V \langle N \rangle,$$
 де  $C_V$  – стала гальванометра (її значення вказано на установці).
9. Обчислити сталу Холла  $R$  за формулою (11.6) і концентрацію носіїв струму  $n$  за формулою (11.7).
10. Зробити висновки.

### Контрольні запитання

#### Варіант 1

1. Яка сила діє на заряд, що рухається в магнітному полі? Запишіть вираз для цієї сили й перелічіть її властивості.
2. Використовуючи класичну теорію електропровідності металів, поясніть ефект Холла (виведіть формулу для холівської різниці потенціалів).
3. Запишіть вираз для сталої Холла. Яку інформацію можна одержати, обчисливши сталу Холла для певного зразка?
4. *Задача.* Електрон з енергією  $W = 10^3$  еВ влітає в однорідне електричне поле напруженістю  $E = 800$  В/см перпендикулярно до силових ліній поля. Якими мають бути величина й напрямок магнітної індукції  $B$ , щоб електрон не відхилився від свого початкового напрямку руху?  
Відповідь:  $B = 4,27$  мТл.

#### Варіант 2

1. Поясніть суть ефекту Холла й наведіть приклади його застосування.
2. Отримайте вираз для радіуса кривизни траєкторії й періоду обертання заряду, що рухається зі швидкістю  $\vec{v}$  в магнітному полі з індукцією  $\vec{B}$ , якщо  $\vec{v} \perp \vec{B}$ . Яка траєкторія руху заряду в цьому випадку?
3. Виведіть закон Ампера (сила, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі), використовуючи силу Лоренца.
4. *Задача.* Електрон, прискорений різницею потенціалів  $\Delta\phi = 10^5$  В, влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярно до силових ліній. Знайдіть радіус траєкторії електрона й частоту його обертання по орбіті, якщо магнітна індукція поля  $B = 2$  Тл.  
Відповідь:  $R = 0,53$  мм,  $\nu = 5,6 \cdot 10^{10}$  об/с.

#### Варіант 3

1. Запишіть вираз для сили, що діє на заряд з боку електростатичного поля, і поясніть, як визначити її напрямок.

2. Чи здійснює роботу сила Лоренца? Відповідь поясніть.
3. Отримайте вираз для радіуса кривизни траєкторії й періоду обертання заряду, що рухається зі швидкістю  $\vec{v}$  в магнітному полі з індукцією  $\vec{B}$ , якщо  $\vec{v}$  і  $\vec{B}$  утворять кут  $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ . Яка траєкторія руху заряду в цьому випадку?
4. *Задача.* В однорідне магнітне поле з магнітною індукцією  $B = 0,8$  Тл поміщено мідну пластинку, по якій тече струм  $I = 5$  А. Вектор магнітної індукції перпендикулярний до площини пластинки. Товщина пластинки  $a = 1$  мм. Визначіть концентрацію вільних електронів у міді, якщо поперечна різниця потенціалів на пластинці  $U = 2$  мкВ.  
Відповідь:  $n = 1,25 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ .

### Лабораторна робота № 2-12 ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОЇДА Й ВИЗНАЧЕННЯ МАГНІТНОЇ СТАЛОЇ

*Мета роботи* – дослідження магнітної індукції поля на осі соленоїда й визначення магнітної сталої.

*Прилади й обладнання:* соленоїд з біфілярною обмоткою; джерело змінного струму; амперметр; зонд для вимірювання магнітної індукції; мілівольтметр.

#### Опис лабораторної установки й методики вимірювань

Соленоїд являє собою порожнистий циліндр довжиною  $l$  і діаметром  $D$ , на бічну поверхню якого рівномірно намотано  $N$  витків проводу (рис. 12.1). Біфілярна обмотка намотується одночасно двома проводами, унаслідок чого утворюються дві суміщені обмотки, які можна підімкнути до джерела живлення як послідовно, так і паралельно.

Коли по одній обмотці тече струм силою  $I$ , усередині соленоїда та навколо нього виникає магнітне поле. Величина магнітної індукції цього поля на осі соленоїда (точка  $O$ )

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2} nI(\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2), \quad (12.1)$$

де  $n = \frac{N}{l}$  – кількість витків на одиницю довжини соленоїда;  $\mu$  – магнітна

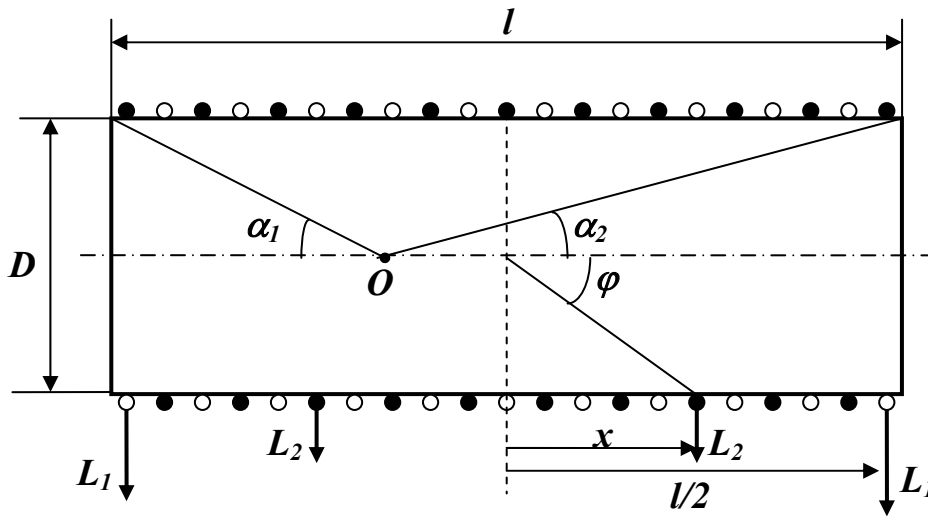


Рис. 12.1

проникність середовища, у якому знаходиться соленоїд;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 12,566 \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна стала. Для нескінченно довгого соленоїда ( $D \ll l$ )  $\cos \alpha_1 \approx \cos \alpha_2 \approx 1$ , тоді

$$B = \mu\mu_0 n. \quad (12.2)$$

У цій роботі використовується соленоїд, описаний вище. Діаметр соленоїда  $D = 50$  мм, довжина  $l = 406$  мм. Обидві обмотки містять по  $N = 190$  витків. Середовище немагнітне:  $\mu = 1$ . Одна з обмоток ( $L_1$ ) має тільки крайні виводи, друга ( $L_2$ ) – проміжні виводи в точках, розташованих симетрично відносно центра соленоїда на відстані  $x$ . Таким чином, підмикаючи джерело струму до різних пар виводів соленоїда  $L_2$ , можна змінювати його довжину. У табл. 12.1 наведено параметри соленоїда  $L_2$ .

Таблиця 12.1

Номера клем (від центра вліво і вправо)	Кількість витків	$x$ , мм	$\cos \varphi$
1	5	11	0,403
2	10	22	0,660
3	20	43	0,865
4	30	63	0,929
5	50	106	0,973
6	70	148	0,986
7	95	203	0,993

Величина магнітної індукції  $B$  поля на осі соленоїда визначається за допомогою зонда, що являє собою індукційну котушку, у якій виникає змінна напруга  $U$  під дією змінного магнітного поля. При цьому

$$B = \kappa U, \quad (12.3)$$

де  $\kappa = 1,227 \cdot 10^{-2}$  Тл/В – коефіцієнт пропорційності.

На рис. 12.2 показано схему установки. Із джерела живлення ДЖ на відповідну обмотку соленоїда подається змінна напруга, величину якої можна регулювати. У соленоїді виникає струм, силу якого вимірюють амперметром. Струм створює магнітне поле всередині соленоїда. Магнітну індукцію поля вимірюють за допомогою зонда  $Z$ , розташованого у центрі соленоїда.

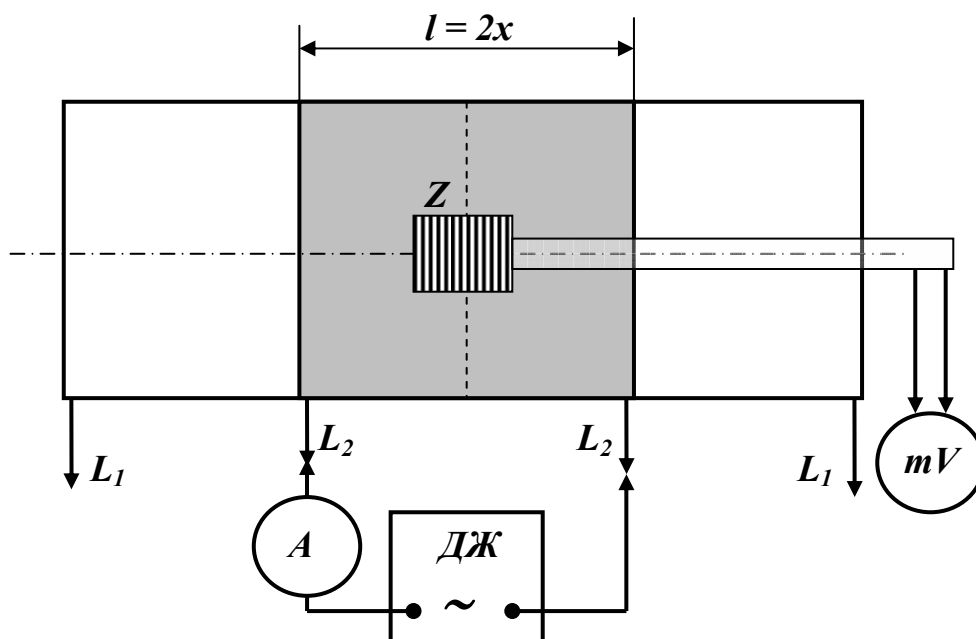


Рис. 12.2

### Порядок виконання роботи

#### Завдання 1. Вивчення магнітного поля соленоїда

1. Зібрати схему, зображену на рис. 12.2. Перевірити розташування зонда (він має знаходитися по середині соленоїда).
2. Джерело живлення підімкнути до виводів 1 соленоїда  $L_2$  (див. табл. 12.1) і встановити в колі соленоїда струм  $I = 1 \dots 1,5$  А.
3. За допомогою мілівольтметра виміряти напругу зонда.
4. Повторити вимірювання, підмикаючи джерело живлення послідовно до інших пар виводів соленоїда  $L_2$ . **Увага!** У момент перемикання проводів джерело живлення має бути відімкнено! Вимірювання проводити при однаковому значенні струму соленоїда.
5. Результати вимірювань занести до табл. 12.2.

Таблиця 12.2

Номер клеми	Довжина ввімкненої частини соленоїда $l = 2x$ , мм	Напруга зонда $U$ , мВ	Магнітна індукція $B_{експ}$ , Тл	Магнітна індукція $B_{теор}$ , Тл
1				
2				
...				
7				

- За формулою (12.3) знайти відповідні значення магнітної індукції  $B_{експ}$ .
- За формулою (12.1) обчислити відповідні теоретичні значення магнітної індукції  $B_{теор}$  і занести їх до таблиці. (У цьому завданні  $\alpha_1 = \alpha_2 = \varphi$ .)
- Побудувати графіки залежностей  $B_{експ}$  і  $B_{теор}$  від довжини соленоїда  $l$ . Порівняти експериментальну й теоретичну криві й зробити висновки.
- Обчислити значення магнітної індукції за формулою (12.2). Порівняти отриманий результат з результатом п. 8 і оцінити співвідношення довжини й діаметра соленоїда, при якому останній можна вважати нескінченно довгим.

#### Завдання 2. Визначення магнітної сталі

- Підімкнути джерело живлення до виводів соленоїда  $L_1$  (рис. 12.2).
- Змінюючи силу струму  $I$  у колі соленоїда від 0 до 1,6 А с кроком 0,2 А, знайти значення магнітної індукції в центрі соленоїда (використовуйте методику, описану раніше). Дані занести до табл. 12.3.
- З'єднати обмотки соленоїдів  $L_1$  і  $L_2$  послідовно, для чого лівий вивід обмотки  $L_1$  з'єднати із крайнім правим виводом обмотки  $L_2$ . До других виводів обмоток підімкнути джерело живлення ДЖ. При такому з'єднанні соленоїдів кількість витків на одиницю довжини  $n$  збільшується в 2 рази.
- Повторити вимірювання, описані в п. 2.

Таблиця 12.3

$I$ , А	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
$U$ , мВ									
$B$ , Тл									

- Побудувати на одному графіку залежності  $B(I)$  для обох випадків. Зробити висновки.



6. Для кожної залежності при значенні сили струму  $I = 1,5$  А знайти коефіцієнт пропорційності  $a = \frac{B}{nI}$  й порівняти його з магнітною сталою  $\mu_0$ .

*Завдання 3. Дослідження просторового розподілу магнітного поля вздовж осі соленоїда*

1. Підімкнути джерело живлення ДЖ до клем 5 соленоїда  $L_2$ . Встановити струм в обмотці силою  $I = 1,5$  А.
2. Переміщаючи зонд  $Z$  від центра соленоїда із кроком 2 см, записати показання мілівольметра. Результати вимірювань занести до табл. 12.4.

Таблиця 12.4

$x$ , см	0	2	4	6	8	10
$U$ , мВ						
$B$ , Тл						

3. За формулою (12.3) обчислити відповідні значення магнітної індукції. Побудувати графік залежності  $B(x)$ .

### Контрольні запитання

#### Варіант 1

1. Що таке магнітне поле? Дайте означення його характеристик.
2. Сформулюйте й запишіть теорему про циркуляцію вектора магнітної індукції для магнітного поля у вакуумі (закон повного струму). Який її фізичний зміст?
3. Що називають соленоїдом, якими параметрами визначається його магнітне поле? У чому відмінність магнітних полів, що створюються коротким і довгим соленоїдами?
4. *Задача.* Струм силою  $I = 20$  А, протікаючи по кільцю з мідного дроту ( $\rho_m = 1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом м) перерізом  $S = 1,0$  мм<sup>2</sup>, створює в центрі кільця магнітне поле з напруженістю  $H = 178$  А/м. Яку різницю потенціалів  $U$  прикладено до кінців дроту, що утворює кільце?

*Відповідь:*  $U = 0,12$  В.

#### Варіант 2

1. Дайте означення силовій лінії магнітного поля. Зобразіть графічно магнітні поля прямолінійного струму, колового струму, довгого соленоїда.

2. Виведіть вираз для напруженості магнітного поля нескінченно довгого соленоїда.
3. Наведіть приклади використання соленоїдів у техніці.
4. *Задача.* В однорідному магнітному полі перпендикулярно до силових ліній розташовано виток площею  $S = 10 \text{ см}^2$ . Знайдіть силу струму у витку, якщо напруженість магнітного поля зменшується зі сталою швидкістю  $1 \text{ А/м}$  за одну секунду. Опір витка  $R = 1 \text{ Ом}$ .  
*Відповідь:*  $I = 1,26 \cdot 10^{-9} \text{ А}$ .

### Варіант 3

1. Дайте порівняльну характеристику електростатичних і магнітних полів.
2. Сформулюйте й запишіть закон Біо–Савара–Лапласа. Який напрямок має вектор магнітної індукції поля  $d\vec{B}$ , що створюється елементом струму  $I d\vec{l}$  в досліджуваній точці простору?
3. У чому полягає явище електромагнітної індукції? Як воно використовується в цій роботі?
4. *Задача.* Знайдіть величину магнітної індукції поля на середній лінії тороїда, що має  $N = 100$  витків. Зовнішній діаметр тороїда  $d_1 = 30 \text{ см}$ , внутрішній –  $d_2 = 20 \text{ см}$ . По тороїду тече електричний струм силою  $I = 5 \text{ А}$ .  
*Відповідь:*  $B = 0,8 \cdot \text{мТл}$ .

## Лабораторна робота № 2-13 ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНІДА Й СИСТЕМИ ДВОХ СОЛЕНІДІВ

*Мета роботи* – дослідження магнітної індукції поля на осі короткого соленоїда, перевірка закону Біо–Савара–Лапласа й принципу суперпозиції полів.

*Прилади й обладнання:* два однакових коротких соленоїди; джерело змінного струму; амперметр; зонд для вимірювання магнітної індукції; мілівольтметр.

### Опис лабораторної установки й методики вимірювань

Дослідження магнітного поля соленоїда й системи двох соленоїдів проводиться на установці, схему якої подано на рис. 13.1. Два соленоїди (дві котушки)  $K_1$  і  $K_2$  мають однакові параметри: середній радіус обмотки  $R = 6,5 \text{ см}$ , довжина соленоїдів  $l = 2,5 \text{ см}$ , кількість витків  $N = 290$ . Соленоїд  $K_1$  нерухомий, соленоїд  $K_2$  може переміщатися вздовж осі  $x$  системи. Відстань між центрами котушок визначають за шкалою на стенді. Для вимірювання магнітної індукції використовується зонд  $Z$ , що може рухатися

вздовж осі соленоїдів. Положення зонда (координата  $x$  точки, у якій вимірюється магнітна індукція) визначається за шкалою на його тримачі.

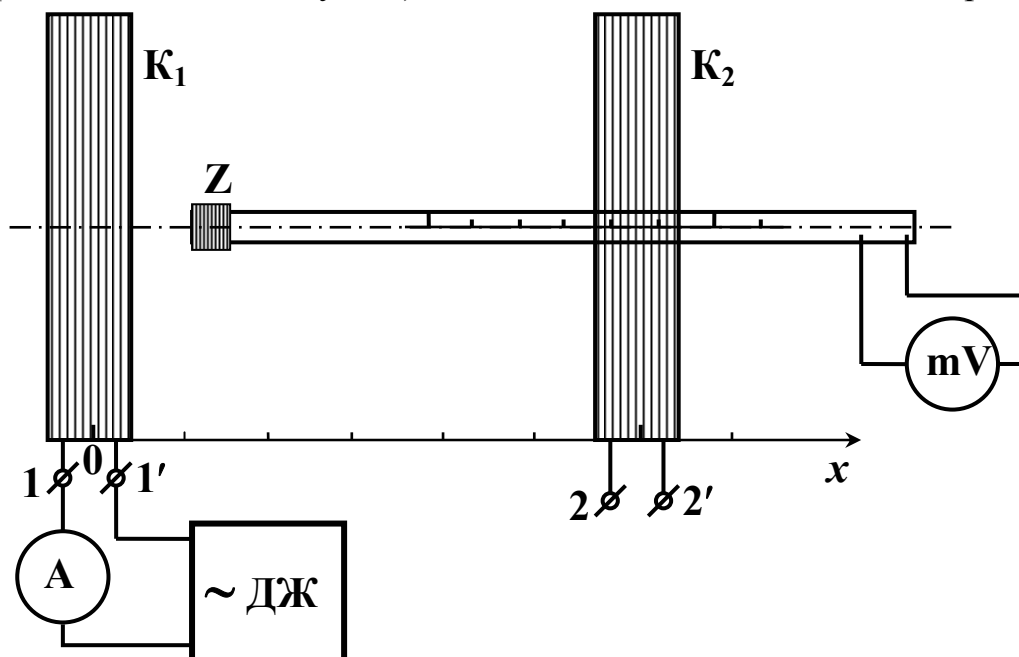


Рис. 13.1

В основі методики вимірювання магнітної індукції лежить явище електромагнітної індукції. Зонд являє собою малого розміру котушку з великою кількістю витків (у цьому випадку кількість витків котушки зонда становить 1500). Якщо зонд помістити в змінне магнітне поле, у ньому виникне ЕРС, що визначається за законом Фарадея–Ленца:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Psi_m}{dt} = -NS\frac{dB}{dt},$$

де  $\Psi$  – потокозчеплення;  $S$  – площа перерізу котушки зонда;  $N$  – кількість її витків.

У цій роботі по соленоїду пропускають змінний синусоїдальний струм промислової частоти (50 Гц). Виникає змінне магнітне поле. Магнітна індукція цього поля

$$B(t) = B_{max}\cos(\omega t + \varphi_0),$$

де  $B_{max}$  – амплітудне значення магнітної індукції. Тоді

$$\frac{dB}{dt} = -\omega B_{max} \sin(\omega t + \varphi_0)$$

і в зонді, розташованому поблизу соленоїда, виникає ЕРС

$$\mathcal{E} = NS\omega B_{max} \sin(\omega t + \varphi_0),$$

де  $NS\omega B_{max} = \mathcal{E}_0$  – її амплітудне значення. ЕРС зонда вимірюється за допомогою мілівольтметра, що показує ефективне значення цієї величини:

$$U = \frac{\mathcal{E}_o}{\sqrt{2}} = \frac{NS\omega}{\sqrt{2}} B_{max}.$$

Таким чином, вимірюючи величину  $U$  зонда, можна знайти амплітудне значення магнітної індукції в точці поля, де розташовано зонд:

$$B_{max} = \frac{\sqrt{2}}{NS\omega} U.$$

Вираз для магнітної індукції поля на осі колового струму можна отримати, використовуючи закон Біо–Савара–Лапласа й принцип суперпозиції полів:

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}, \quad (13.1)$$

де  $R$  – радіус колового струму;  $x$  – відстань від центра колового струму до точки спостереження А (рис. 13.2).

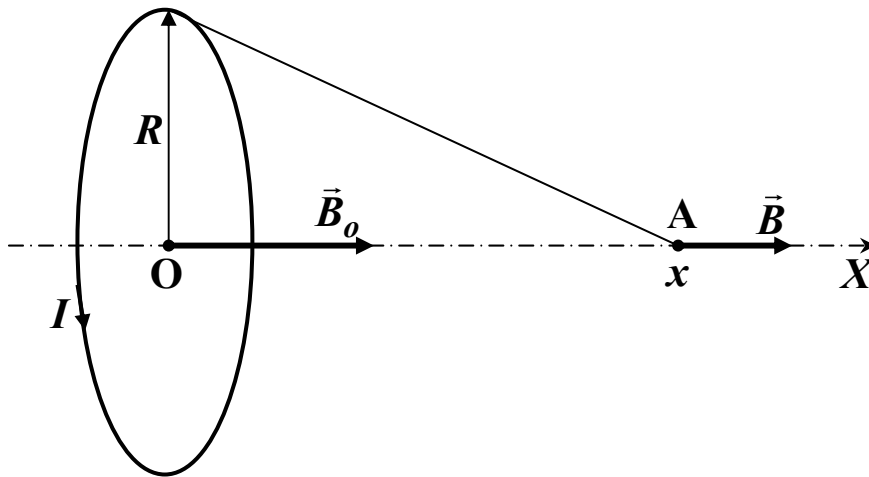


Рис. 13.2

Магнітна індукція в центрі колового струму ( $x = 0$ )

$$B_0 = \frac{\mu_0 I}{2R}. \quad (13.2)$$

З урахуванням (13.2) рівняння (13.1) можна переписати у вигляді

$$B = \frac{B_0}{\left[1 + (x/R)^2\right]^{3/2}}. \quad (13.3)$$

Коли довжина соленоїда  $l$  значно менша за його діаметр (короткий соленоїд), магнітне поле, що створюється ним, приблизно дорівнює магнітному полю витка зі струмом силою  $I_{витка} = NI_{соленоїда}$ , де  $N$  – кількість витків соленоїда. Тому магнітну індукція на осі соленоїда можна приблизно розрахувати за формулою (13.3). Визначивши експериментально залежність

$$\left(\frac{B(x)}{B_0}\right)_{\text{експ}} = \frac{U(x)}{U_0} \quad (13.4)$$

( $U(x)$  – ефективне значення ЕРС зонда в точці з координатою  $x$ ) і порівнявши її з функцією

$$f(x) = \left(\frac{B(x)}{B_0}\right)_{\text{теор}} = \frac{1}{\left(1 + (x/R)^2\right)^{3/2}}, \quad (13.5)$$

можна зробити висновок про справедливість припущень.

Для перевірки принципу суперпозиції полів використовуються два коаксіальних коротких соленоїди  $K_1$  і  $K_2$  (див. рис. 13.1). За принципом суперпозиції магнітна індукція результуючого поля системи двох соленоїдів буде

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2. \quad (13.6)$$

У випадку, якщо соленоїди коаксіальні й напрямком струму в них однаковий,  $\vec{B}_1$  і  $\vec{B}_2$  в точках на осі системи збігаються за напрямком. Тоді вираз (13.6) можна переписати у вигляді

$$B(x) = B_1(x) + B_2(x), \quad (13.7)$$

тобто величина магнітної індукції результуючого поля на осі системи дорівнює сумі магнітних індукцій полів кожного соленоїда.

Це твердження можна перевірити, вимірявши значення магнітної індукції полів окремо взятих соленоїдів у різних точках на осі системи й додавши отримані залежності за формулою (13.7). Отриманий теоретичний результат можна порівняти з експериментальною величиною магнітної індукції результуючого поля двох соленоїдів.

## Порядок виконання роботи

### Завдання 1. Вивчення магнітного поля соленоїда

1. Підімкнути джерело живлення до клем «1» і «1'» котушки  $K_1$  і встановити в колі струм силою  $I = 1$  А.
2. Перевірити розташування зонда (він має бути в середині соленоїда  $K_1$ , що відповідає координаті  $x = 0$  см) і підімкнути його до мілівольтметра.
3. За допомогою мілівольтметра виміряти напругу зонда  $U_I(x)$ .
4. Повторити вимірювання, зміщаючи зонд уздовж осі соленоїда із кроком 2 см. Результати вимірювань занести до табл. 13.1.
5. З урахуванням формули (13.4) обчислити відповідні відношення  $\frac{B_1(x)}{B_0}$ .

Результати занести до табл. 13.1. Тут  $B_1(0) = B_0$ .

Таблиця 13.1

$x$ , см	0	2	4	6	...	...	...	30
$U_1$ , мВ								
$\frac{B_1(x)}{B_0}$	1							
$f(x)$								

- Для всіх значень  $x$  з табл. 13.1 обчислити відповідні значення функції  $f(x)$  (формула (13.5)) і занести їх до таблиці ( $R = 6,5$  см).
- На одній системі координат побудувати графіки залежностей  $\frac{B_1(x)}{B_0}$  і  $f(x)$ . Порівняти криві й зробити висновки.

*Завдання 2. Вивчення магнітного поля системи двох соленоїдів.*

*Перевірка принципу суперпозиції полів*

- Підімкнути джерело живлення до виводів «2» і «2'» котушки  $K_2$  (див. рис. 13.1).
- Установити силу струму  $I$  у колі соленоїда 1 А. Провести вимірювання напруги зонда  $U_2(x)$  і розрахувати відношення  $\frac{B_2(x)}{B_0}$  для котушки  $K_2$  аналогічно пп. 2–5 попереднього завдання, занести дані до табл. 13.2.
- Вимкнути джерело живлення.
- З'єднати обмотки котушок  $K_1$  і  $K_2$  послідовно (при цьому важливо, щоб напрямок струму в котушках був однаковим). Схему підімкнення котушок зображено на робочому місці. Підімкнути джерело живлення й установити силу струму в колі котушок 1 А.
- Провести вимірювання  $U_{1+2}(x)$  і розрахунки  $\frac{B_{1+2}(x)}{B_0}$  за методикою, описаною в п. 2. Одержані дані занести до табл. 13.2.
- Побудувати на одному графіку залежності  $\frac{B_1(x)}{B_0}$ ,  $\frac{B_2(x)}{B_0}$ ,  $\frac{B_{1+2}(x)}{B_0}$ .
- У цій самій системі координат побудувати графік залежності  $\frac{B_1(x) + B_2(x)}{B_0}$  результуючого поля двох соленоїдів, отриманої теоретично додаванням (на графіку) відповідних ординат функцій  $\frac{B_1(x)}{B_0}$  і  $\frac{B_2(x)}{B_0}$ .

Таблиця 13.2

$x, \text{ см}$	0	2	4	6	...	...	...	30
$U_2, \text{ мВ}$								
$\frac{B_2(x)}{B_0}$								
$U_{1+2}, \text{ мВ}$								
$\frac{B_{1+2}(x)}{B_0}$								

8. Порівняти теоретичну й експериментальну криві результуючого поля. Зробити висновки.

### Контрольні запитання

#### Варіант 1

- Сформулюйте й запишіть закон Біо–Савара–Лапласа. Зробіть пояснювальний рисунок.
- Отримайте вираз для магнітної індукції на осі витка зі струмом.
- Яке явище лежить в основі методу вимірювання магнітної індукції, що використовується в цій роботі?
- Задача.* Струм силою  $I = 31.4 \text{ А}$  тече по довгому проводу, зігнутому під кутом  $\alpha = 60^\circ$ . Визначіть напруженість магнітного поля в точці, що лежить на бісектрисі кута, на відстані  $a = 5 \text{ см}$  від його вершини.

*Відповідь:*  $H = 373 \text{ А/м}$ .

#### Варіант 2

- Що таке магнітна індукція? Який її фізичний зміст?
- Сформулюйте принцип суперпозиції полів. Запишіть, як визначається магнітна індукція результуючого поля декількох джерел.
- Використовуючи закон повного струму, отримайте вираз для магнітної індукції нескінченно довгого соленоїда.
- Задача.* По прямолінійному відрізку проводу довжиною  $l = 80 \text{ см}$  тече струм силою  $I = 30 \text{ А}$ . Знайдіть магнітну індукцію поля в точці, що рівновіддалена від кінців відрізка й знаходиться на відстані  $r_0 = 30 \text{ см}$  від нього.

*Відповідь:*  $B = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$ .

#### Варіант 3

- Що називають магнітним полем? Дайте його загальну характеристику.

2. Запишіть і сформулюйте теорему про циркуляцію вектора  $\vec{B}$ . Який її фізичний зміст?
3. У чому полягає явище електромагнітної індукції? Яким законом воно описується?
4. *Задача.* Електричний струм силою  $I = 1$  А тече по проводу, зігнутому у формі квадрата зі стороною  $a = 1$  м. Знайдіть величину й напрямок магнітної індукції в центрі квадрата.  
*Відповідь:*  $B = 1,13 \cdot \mu\text{кТл}$ .

## Лабораторна робота № 2-14 ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ СТОЛЕТОВА

*Мета роботи* – вивчення балістичного методу Столетова й вимірювання величини напруженості магнітного поля між полюсами електромагніта за допомогою цього методу.

*Прилади й обладнання:* джерело живлення ДЖ; електромагніт ЕМ; довгий соленоїд С; амперметр А; нормальна котушка  $K_1$ ; балістична котушка  $K_2$ ; балістичний гальванометр Г; перемикач джерела живлення П; перемикач кола гальванометра К.

### Опис установки й виведення робочої формули

Для експериментального визначення напруженості магнітного поля застосовуються різні методи. У цій лабораторній роботі використовується одна з модифікацій балістичного методу Столетова, основана на комутації (вмиканні й вимиканні) струму в намагнічувальному колі.

Схему лабораторної установки наведено на рис. 14.1. У ній є три силових кола, які живляться від єдиного джерела ДЖ: коло електромагніта ЕМ; коло соленоїда С та електричне коло гальванометра, до складу якого входять гальванометр Г і дві котушки – нормальна  $K_1$  і балістична  $K_2$ . В роботі необхідно виміряти напруженість котушки  $K_2$ , тому будемо називати її вимірювальною котушкою. Комутація струму виконується за допомогою перемикача П, завдяки якому здійснюється подача живлення від джерела ДЖ на електромагніт (у положенні «1») або на соленоїд (у положенні «2»). Перемикач П може бути у нейтральному положенні «0», при якому обидва кола відімкнено.

Фізична суть балістичного методу Столетова полягає в такому. Балістичний гальванометр вмикається в коло вимірювальної котушки  $K_2$ , яка знаходиться в досліджуваному магнітному полі. При зміні магнітного потоку  $\Phi_m$  крізь поверхню поперечного перерізу вимірювальної котушки в



останній з'являється індукційний струм (якщо коло котушки замкнуто). Величина заряду  $q$ , що переноситься при цьому в колі гальванометра, пропорційна зміні магнітного потоку  $\Delta\Phi_m$ . Це дає можливість на основі вимірювань величини заряду визначити зміну магнітного потоку  $\Delta\Phi_m$  і, відповідно, пов'язану із цим зміну магнітної індукції  $\Delta B$  поля. У випадку, коли початкове значення  $B_0$  відоме, можна визначити її кінцеве значення  $B_k$  і навпаки.

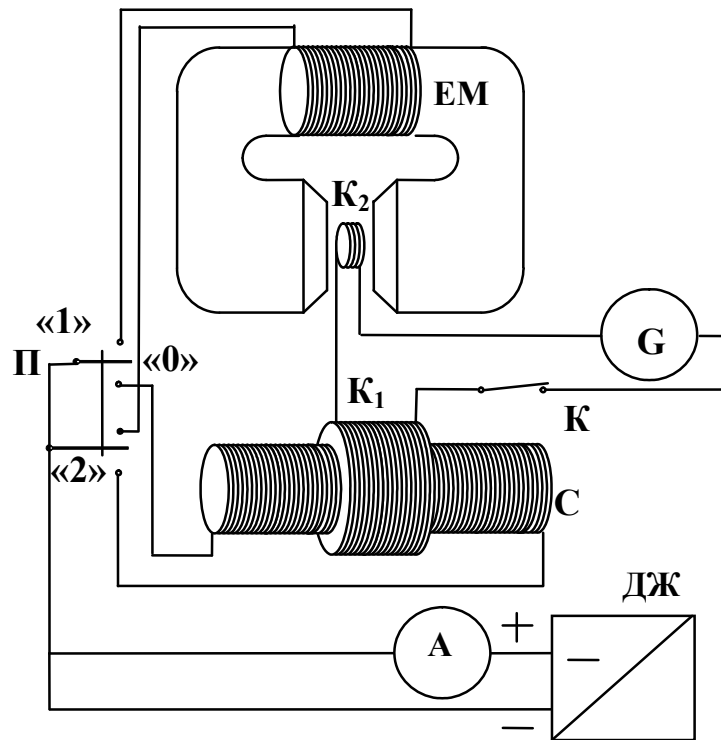


Рис. 14.1

Розглянемо процеси, що відбуваються при зміні магнітного потоку, що пронизує поверхню поперечного перерізу котушки  $K_2$ , і визначимо зв'язок між зміною цього потоку й зарядом, що переноситься у колі гальванометра.

Магнітна індукція поля весь час напрямлена перпендикулярно до площини поперечного перерізу  $K_2$  і в початковий момент часу її величина дорівнює  $B_0$ . При зміні магнітної індукції поля відбувається зміна магнітного потоку, яку можна записати як

$$\Delta\Phi_m = \Phi_{mk} - \Phi_{m0} = (B_k - B_0)S_\delta, \quad (14.1)$$

де  $S_\delta$  – площа поперечного перерізу балістичної котушки  $K_2$ . Оскільки котушка  $K_2$  складається з  $N_\delta$  витків, ЕРС індукції, що виникає в  $K_2$ , буде

$$\mathcal{E}_i = -N_\delta \frac{d\Phi_m}{dt} = -\frac{d\Psi_m}{dt}, \quad (14.2)$$

де  $\Psi_m = N_\delta \Phi_m$  – потокозчеплення котушки.

В електричному колі гальванометра в цьому випадку буде протікати індукційний струм

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R},$$

де  $R$  – повний опір цього кола.

За означенням сила електричного струму

$$I = \frac{dq}{dt},$$

отже, заряд  $dq$ , що протікає в колі при елементарній зміні потокозчеплення  $d\Psi_m$ , буде

$$dq = Idt = -\frac{d\Psi_m}{R}.$$

Інтегрування цього виразу дає зв'язок між зарядом, що переноситься у вимірювальному колі, і зміною потокозчеплення  $\mathbf{K}_2$ :

$$q = -\int_{\Psi_{m0}}^{\Psi_{mk}} \frac{d\Psi_m}{R} = \frac{\Psi_{m0} - \Psi_{mk}}{R} = \frac{(\Psi_{m0} - \Psi_{mk})}{R}. \quad (14.3)$$

З урахуванням (14.1) – (14.3) отримаємо

$$q = \frac{N_{\delta} S_{\delta}}{R} (B_0 - B_k). \quad (14.4)$$

Таким чином, експериментально визначити величину магнітної індукції  $B$  можна, вимірявши величину заряду  $q$ , що переноситься при протіканні індукційного струму у вимірювальному колі, яке містить котушку  $\mathbf{K}_2$ . Для цього додатково необхідно знати початкові або кінцеві характеристики поля й характеристики вимірювального кола. Так, зі співвідношення (14.4) за умови, що  $B_k = 0$ , як наслідок маємо

$$B_0 = \frac{qR}{N_{\delta} S_{\delta}}. \quad (14.5)$$

Для балістичної котушки  $\mathbf{K}_2$  кількість витків  $N_{\delta}$  і її площа  $S_{\delta}$  відомі, а невідомим виявляється опір електричного кола гальванометра  $R$ . Безпосередні вимірювання цього опору пов'язані з певними технічними труднощами, і тому в роботі здійснюється непряме визначення величини  $R$ , що потребує наявності додаткової нормальної котушки  $\mathbf{K}_1$  у вимірювальному колі гальванометра. Ця котушка індуктивно пов'язана із соленоїдом. Підімкнення соленоїда до джерела живлення ДЖ здійснюється переведенням перемикача  $\Pi$  з нейтрального положення «0» у положення «2» і супроводжується появою магнітного поля  $B_c$ , силові лінії якого пронизують поверхню поперечного перерізу нормальної котушки  $\mathbf{K}_1$ . При цьому в колі гальванометра переноситься заряд  $q_c$ , який пов'язаний з магнітною індук-

цією поля соленоїда. Використання в установці довгого соленоїда, для якого  $B_c = \mu\mu_0 n I_c$ , дає можливість записати співвідношення (14.5) у вигляді

$$B_c = \frac{q_c R}{N_0 S_0} = \mu_0 \mu n I_c, \quad (14.6)$$

де  $N_0$  – кількість витків у нормальній котушці;  $S_0$  – площа поперечного перерізу нормальної котушки;  $n$  – кількість витків, що припадають на одиницю довжини соленоїда;  $I_c$  – сила струму, який установився в колі соленоїда.

Зі співвідношення (14.6) для електричного опору кола гальванометра отримаємо

$$R = \mu_0 \mu \frac{n I_c N_0 S_0}{q_c}.$$

Тоді на основі (14.5) можна визначити зв'язок між магнітною індукцією  $B_m$  поля в проміжку електромагніта й зарядом  $q_m$ , що пройшов у балістичній котушці під час підімкнення електромагніта до джерела живлення або відімкнення від нього:

$$B_m = \mu_0 \mu \frac{N_0 S_0 n I_c}{N_\delta S_\delta q_c} q_m.$$

В обох випадках вимірювання здійснюються одним і тим самим балістичним гальванометром, тому справедливим є співвідношення

$$\frac{q_m}{q_c} = \frac{m_m}{m_c},$$

де  $m_m$  і  $m_c$  – кількість поділок гальванометра, що відповідають величинам кидків “зайчика” гальванометра для випадків магніту й соленоїда. Тоді

$$B_m = \mu_0 \mu \frac{N_0 S_0 n I_c m_m}{N_\delta S_\delta m_c}. \quad (14.7)$$

Якщо ввести сталу вимірювального кола

$$\beta = \frac{N_0 S_0 n I_c}{N_\delta S_\delta m_c}, \quad (14.8)$$

то співвідношення (14.7) можна подати у вигляді  $B_m = \mu\mu_0 \beta m_m$ .

Через те, що напруженість магнітного поля зв'язана з магнітною індукцією співвідношенням  $H = \frac{B}{\mu\mu_0}$ , справедлива формула

$$H_m = \beta m_m. \quad (14.9)$$

Одиницю вимірювання  $\beta$  можна встановити, використовуючи (14.9):

$$[\beta] = \frac{A}{m \cdot \text{под.}}$$

### Порядок виконання роботи

#### Завдання 1. Визначення сталої вимірювального кола

1. Перемикач **П** установити в нейтральне положення, а ручки грубого й точного регулювання сили струму джерела живлення **ДЖ** перевести в крайнє ліве положення проти годинникової стрілки.
2. Увімкнути джерело живлення **ДЖ** у мережу.
3. Підімкнути **ДЖ** до соленоїда, перевівши перемикач **П** у положення «2».
4. Установити значення сили струму  $I_c$ , що протікає через соленоїд, яке вказано на установці.
5. Зафіксувати абсолютне значення кидка “зайчика” гальванометра  $m_1$  (у поділках шкали), що відбувається при цьому.
6. Перевести перемикач **П** в нульове положення й знову зафіксувати абсолютне значення кидка “зайчика” гальванометра  $m_2$ .
7. Дослід проробити три рази й визначити середнє значення  $\langle m_c \rangle$  за даними

попередніх дослідів (відповідно до формули  $\langle m_c \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n}$ ). Результати вимірювань і обчислень занести до табл. 14.1.

8. Розрахувати значення сталої вимірювального кола за формулою (14.8) (необхідні для розрахунку дані наведено на установці).

Таблиця 14.1

Номер дослідів	$m_{ci}$ , под.	$\langle m_c \rangle$ , под.	$I_c$ , А	$\beta$ , $\frac{A}{m \cdot \text{под.}}$
1				
2				
...				
6				

#### Завдання 2. Вивчення залежності напруженості магнітного поля електромагніта від сили струму в обмотці

1. Підімкнути джерело живлення до електромагніта, установивши перемикач **П** у положення 1.
2. Установити одне зі значень сили струму, що протікає через електромагніт (значення сили струму вказано на установці).

3. Для цього значення сили струму провести вимірювання абсолютних величин кидків “зайчика” гальванометра (при послідовній зміні положень перемикача П: «1» – «0» і «0» – «1», за аналогією з п. 5 завдання 1).
4. Виконавши дослід три рази, обчислити середнє значення  $\langle m_m \rangle$ . Результати вимірювань і обчислень занести до табл. 14.2.
5. За формулою (14.9) розрахувати значення напруженості магнітного поля електромагніта  $H$ , що відповідає цьому значенню  $I_m$  (підставляючи замість  $m_m$  середнє значення  $\langle m_m \rangle$ ). Результати обчислень занести до табл. 14.2.
6. Для кожного вказаного на установці значення сили струму  $I_m$ , що протікає через електромагніт, провести вимірювання  $\langle m_m \rangle$  і  $H$  за аналогією із пп. 3–5.
7. Побудувати графік залежності напруженості магнітного поля в проміжку електромагніта від величини струму, що протікає через його обмотку:  $H = f(I_m)$ .

Таблиця 14.2

$I_m$ , А	0,2					0,3					...				
$m_{mi}$ , ПОД.															
$\langle m_m \rangle$ , ПОД.															
$H$ , А /м															

### Контрольні запитання

#### Варіант 1

1. У чому полягає явище електромагнітної індукції і як воно використовується в цій роботі?
2. Виведіть формулу, яка дає можливість обчислити магнітну індукцію всередині нескінченно довгого соленоїда.
3. Що називають потокозчепленням? У яких одиницях воно вимірюється ?
4. *Задача.* Відрізок проводу довжиною  $l = 4$  м складають удвічі, і його кінці замикають. Потім його розтягують і надають йому форми квадрата, що лежить у горизонтальній площині. Який максимальний заряд  $q$  пройде при цьому через провід, якщо його опір  $R = 2$  Ом? Вертикальна складова магнітного поля Землі  $B = 50$  мкТл.

*Відповідь:*  $q = 25$  мкКл.

#### Варіант 2

1. Чим створюється магнітне поле? У чому відмінність магнітного поля від

електростатичного?

2. Виведіть формулу для величини заряду, що протікає у вимірювальному колі внаслідок зміни магнітного потоку.
3. Дайте означення магнітної індукції й напруженості магнітного поля, укажіть фізичний зміст і одиниці вимірювання цих величин.
4. *Задача.* Знайдіть магнітний потік через поверхню, обмежену одним витком нескінченно довгого соленоїда із площею поперечного перерізу  $S = 10 \text{ см}^2$  при силі струму  $I = 20 \text{ А}$ . Щільність намотки витків соленоїда  $n = 10 \text{ см}^{-1}$ .

*Відповідь:*  $\Phi = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}$ .

*Варіант 3*

1. Що називають магнітним потоком? Запишіть формулу для обчислення магнітного потоку. У яких одиницях вимірюється магнітний потік?
2. Сформулюйте закон електромагнітної індукції Фарадея й правило Ленца.
3. У чому полягає явище самоіндукції? Що називають індуктивністю контуру? Назвіть одиницю вимірювання індуктивності.
4. *Задача.* Невелика вимірювальна котушка площею поперечного перерізу  $S$  з кількістю витків  $N$  з'єднана з балістичним гальванометром і знаходиться в однорідному магнітному полі, магнітна індукція якого дорівнює  $B$ . Вісь котушки напрямлена вздовж поля. Котушка дуже швидко повертається на  $180^\circ$ . Знайдіть повний заряд, що пройшов по колу, якщо його повний опір  $R$ .

*Відповідь:*  $q = \frac{2BNS}{R}$ .

## **Лабораторна робота № 2-15** **ВИВЧЕННЯ ЗАКОНУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ**

*Мета роботи* – експериментальне дослідження явища електромагнітної індукції й перевірка закону Фарадея–Ленца.

*Прилади й обладнання:* соленоїд із двома коаксіальними обмотками; генератор пилкоподібної напруги; двоканальний осцилограф.

### **Опис лабораторної установки й методики вимірювань**

Схему установки, яка використовується в цій роботі, зображено на рис. 15.1. До її складу входить соленоїд з двома обмотками  $L_1$  і  $L_2$ , які намотано одна на одну. Параметри обмоток (довжини  $l_1$ ,  $l_2$  і кількість витків  $N_1$ ,  $N_2$ ) наведено на установці.

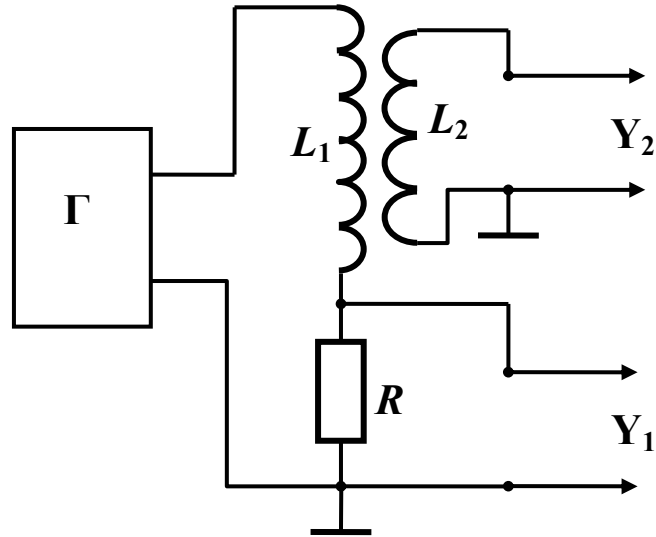


Рис. 15.1

З генератора  $\Gamma$  на обмотку соленоїда  $L_1$  подається пилкоподібна напруга частотою  $\nu = 500 \dots 1000$  Гц. При цьому через обмотку соленоїда й резистор  $R = 50$  Ом тече змінний струм (залежність сили струму від часу має пилкоподібну форму). Магнітна індукція поля, створеного струмом силою  $I_1$  в обмотці  $L_1$ , буде

$$B_1 = \mu_0 \frac{N_1 I_1}{l_1}.$$

Потокозчеплення обмотки  $L_2$ , що створюється полем  $B_1$ ,

$$\Psi_{m2} = N_2 B_1 S = \mu_0 \frac{N_1 N_2}{l_1} S I_1,$$

де  $S$  – площа поперечного перерізу соленоїда. Якщо величина потокозчеплення змінюється з часом, то в обмотці  $L_2$  виникає ЕРС індукції, що визначається за законом Фарадея–Ленца:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Psi_{m2}}{dt} = -\mu_0 \frac{N_1 N_2 S}{l_1} \frac{dI_1}{dt}. \quad (15.1)$$

Оскільки сила струму в першій обмотці пропорційна спаду напруги на резисторі  $R$ , тобто

$$I_1 = \frac{U_1}{R},$$

то вираз (15.1) можна записати у вигляді

$$\mathcal{E}_i = -\mu_0 \frac{N_1 N_2 S}{l_1 R} \frac{dU_1}{dt}. \quad (15.2)$$

Порівнюючи величини  $\frac{dU_1}{dt}$  і  $\mathcal{E}_i$ , можна перевірити справедливість закону електромагнітної індукції й правила Ленца.

Залежність сили струму в обмотці  $L_1$  від часу досліджується за допомогою осцилографа. На вхід першого каналу ( $Y_1$ ) осцилографа подається сигнал, що дорівнює спаду напруги  $U_1$  на резисторі, на вхід другого каналу ( $Y_2$ ) – ЕРС індукції, що виникає в другій обмотці  $L_2$ . Вибір пилкоподібної форми напруги на першій обмотці пов'язаний з тим, що  $\mathcal{E}_i \sim \frac{dU_1}{dt}$  і дорівнює сталій величині протягом половини періоду (рис. 15.2).

У цьому випадку вираз (15.2) можна переписати у вигляді

$$\mathcal{E}_i = -\mu_0 \frac{N_1 N_2 S}{l_1 R} \frac{\Delta U_1}{\Delta t}. \quad (15.3)$$

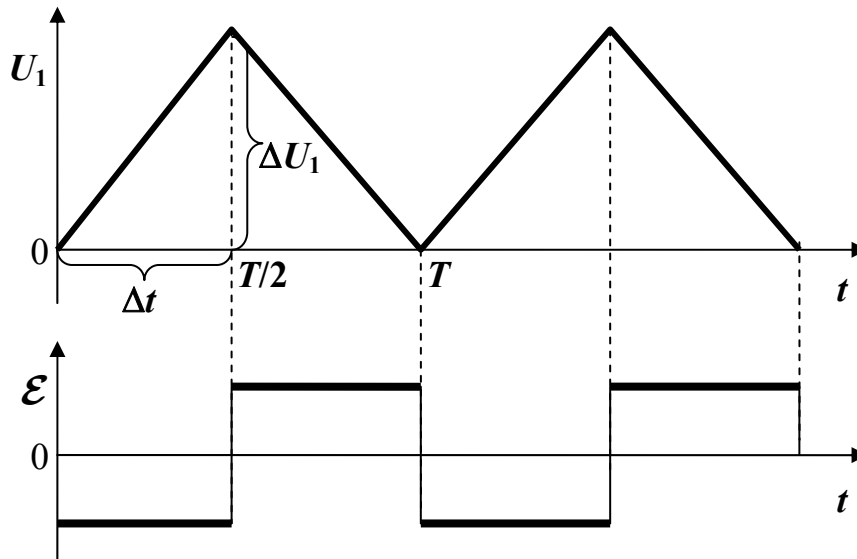


Рис. 15.2

### Порядок виконання роботи

1. Перевірити правильність під'єднання генератора й осцилографа і ввімкнути їхнє живлення. Установити на генераторі частоту вихідної напруги  $\nu_1 = 500$  Гц. Для вимірювання частоти використовувати осцилограф.
2. Добитися на екрані осцилографа стабільної картинки, аналогічної рис. 15.2. Використовувати для цього ручки регулювання масштабів по



осях  $t$  (вісь  $x$  – ручка часової розгортки “ms/под.”) і  $U$  (вісь  $y$  – ручка підсилувача “V/под.”) і ручку “Стабілізація”.

3. За осцилограмами визначити величини  $\Delta U_1$ ,  $\mathcal{E}_{експ\ 1}$  й інтервал часу  $\Delta t$ , протягом якого напруга на першому соленоїді змінюється на  $\Delta U_1$ .
4. Підставивши величини  $\Delta U_1$  і  $\Delta t$  у формулу (15.3), обчислити середнє значення  $\langle \mathcal{E}_{теор} \rangle_1$ .
5. Порівняти отримані величини  $\mathcal{E}_{експ\ 1}$  і  $\langle \mathcal{E}_{теор} \rangle_1$ .
6. Повторити вимірювання  $\mathcal{E}_{експ\ 2}$  і  $\langle \mathcal{E}_{теор} \rangle_2$  при частоті пилкоподібної напруги  $\nu_2 = 1000$  Гц. Порівняти отримані результати.
7. Повторити ті ж самі вимірювання при частоті пилкоподібної напруги  $\nu_3 = 500$  Гц, збільшивши амплітуду пилкоподібної напруги  $\Delta U_1$  у два рази. Порівняти отримані результати для  $\mathcal{E}_{експ\ 3}$  і  $\langle \mathcal{E}_{теор} \rangle_3$ .
8. Перевірити рівність таких відношень:  $\frac{\mathcal{E}_{експ2}}{\mathcal{E}_{експ1}}$  і  $\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}$ ,  $\frac{\mathcal{E}_{експ1}}{\mathcal{E}_{експ3}}$  і  $\frac{\Delta U_1}{\Delta U_3}$ .

Зробити висновки.

### Контрольні запитання

#### Варіант 1

1. Дайте означення магнітного потоку. Запишіть вираз для магнітного потоку через довільну поверхню.
2. Сформулюйте правило Ленца.
3. Наведіть приклади використання в техніці явища електромагнітної індукції.
4. *Задача.* У круглому контурі радіусом  $R = 1$  м, розташованому в однорідному змінному магнітному полі, виникає ЕРС  $\mathcal{E}_i = \pi t$ . Всі величини в одиницях СІ. Кут між нормаллю до площини контуру й магнітною індукцією  $\alpha = 60^\circ$ . Визначіть залежність  $B(t)$ , якщо в момент часу  $t = 0$   $B_0 = 0$ .  
*Відповідь:*  $B = t^2$ .

#### Варіант 2

1. Що називають магнітним потоком? Який його фізичний зміст?
2. Сформулюйте й запишіть закон електромагнітної індукції.
3. Сформулюйте й запишіть теорему Гаусса для магнітної індукції. Яку інформацію про магнітне поле розкриває ця теорема?
4. *Задача.* В однорідному магнітному полі, магнітна індукція якого  $B = 0,06$  Тл, знаходиться соленоїд діаметром  $d = 8$  см, що має  $N = 80$  витків. Соленоїд повертають на кут  $180^\circ$  за час  $\Delta t = 0,2$  с так, що його

вісь залишається напрямленою вздовж силових ліній. Знайдіть середнє значення ЕРС індукції, що виникає в соленоїді.

*Відповідь:*  $\langle \mathcal{E} \rangle = 0,24 \text{ В}$ .

### *Варіант 3*

1. Дайте означення поточозчеплення.
2. Чому магнітний потік через замкнуту поверхню завжди дорівнює нулю?
3. Чому в цій роботі в другому соленоїді виникають прямокутні імпульси напруги?
4. *Задача.* Виток з дроту радіусом  $r = 4 \text{ см}$ , що має опір  $R = 3,14 \text{ Ом}$ , знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією  $B = 0,125 \text{ Тл}$ . Площина рамки утворює із силовими лініями поля кут  $\alpha = 30^\circ$ . Який заряд пройде по витку, якщо магнітне поле зникне?

*Відповідь:*  $q = 10^{-4} \text{ Кл}$ .

## **Лабораторна робота № 2-16 ВИЗНАЧЕННЯ КУТА МАГНІТНОГО НАХИЛУ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗЕМНОГО ІНДУКТОРА**

*Мета роботи* – вивчення балістичного методу й визначення силових характеристик природного магнітного поля Землі за допомогою цього методу.

*Прилади й обладнання:* земний індуктор **ЗІ**; балістичний гальванометр **Г**.

### **Опис установки й виведення робочої формули**

В першому наближенні можна вважати, що Земля це величезний магніт з магнітною віссю, нахиленою під деяким кутом відносно географічної осі обертання Землі. Карта земного магнітного поля, побудована за допомогою компаса, являє собою ряд ліній, які замкнуті і майже скрізь ідуть не горизонтально, а нахилені до поверхні Землі. Лінії магнітного поля Землі спрямовані з півдня на північ, тому північний магнітний полюс Землі **N** знаходиться в області південного географічного полюса **Пд**, а південний магнітний полюс **S** – в області північного географічного полюса **Пн**.

Магнітне поле формується в ядрі Землі, де речовина перебуває в провідному стані. Тут можливі переміщення речовини, що несе електричні заряди, а також утворення термоелектричних струмів. Очевидно, ці процеси є причиною виникнення в надрах Землі електричних струмів, які на поверхні й в атмосфері Землі утворюють земне магнітне поле. Хоча це поле досить слабе, воно може помітно скривити шлях електронного пучка, у

тому числі й потоки заряджених частинок космічного випромінювання. Це дає можливість використовувати Землю в багатьох експериментах з космічними променями як гігантський магніт (рис. 16.1).

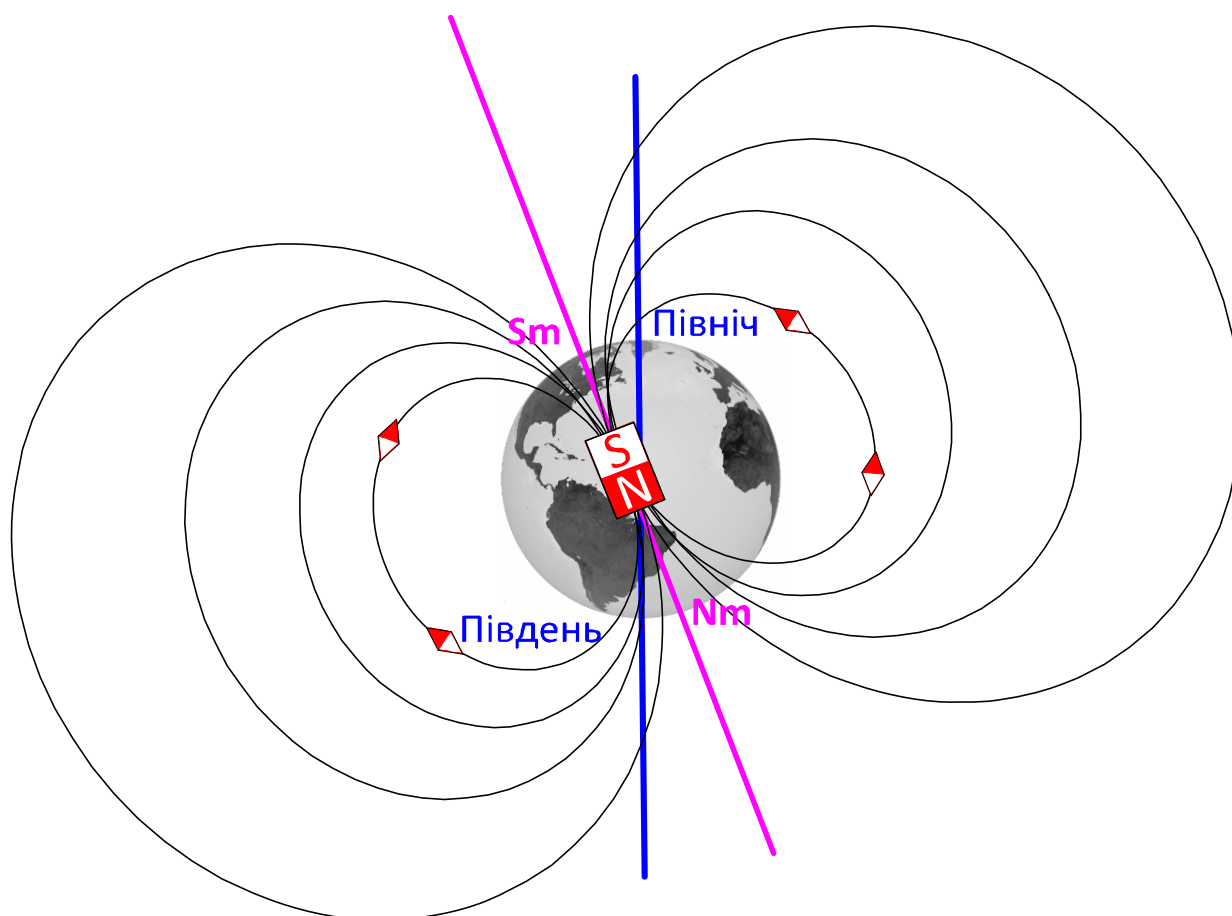


Рис. 16.1

Лінії магнітного поля Землі перетинають її поверхню. Дотичні до ліній розташовуються під деяким кутом  $\varphi$  до горизонту, який називають *магнітним нахилом*. З наближенням до магнітного полюса кут магнітного нахилу зростає. За означенням, магнітний полюс, це така точка поверхні Землі в якій лінія магнітного поля вертикальна.

Магнітну індукцію поля Землі  $\vec{B}_z$  можна розкласти на вертикальну  $\vec{B}_{\text{верт}}$  й горизонтальну  $\vec{B}_{\text{гор}}$  складові, причому  $\vec{B}_z = \vec{B}_{\text{верт}} + \vec{B}_{\text{гор}}$ . Щоб знайти  $\varphi$ , необхідно виміряти величини вертикальної  $B_{\text{верт}}$  і горизонтальної  $B_{\text{гор}}$  складових магнітної індукції  $\vec{B}_z$ .

Від магнітного нахилу  $\varphi$  слід відрізняти *магнітне схилення* – кут  $\theta$  між напрямком магнітного меридіану (проекції лінії магнітного поля на

поверхню планети) й напрямком географічного меридіана (див. рис. 16.2). Кожна точка земної поверхні має своє магнітне схилення.

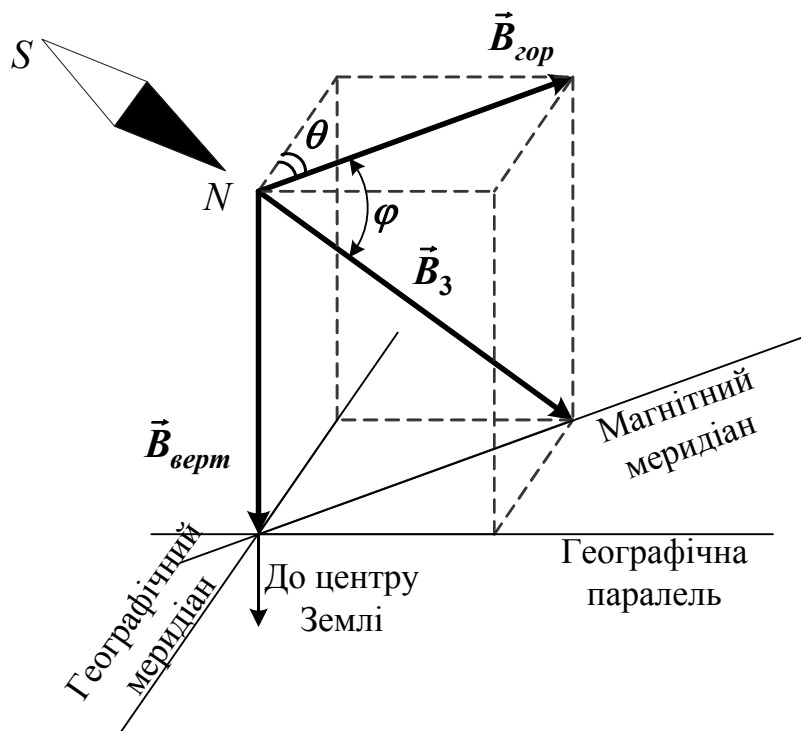


Рис. 16.2

Із рис. 16.2 видно, що кут магнітного нахилу

$$\varphi = \arctg \frac{B_{\text{верт}}}{B_{\text{гор}}} \quad (16.1)$$

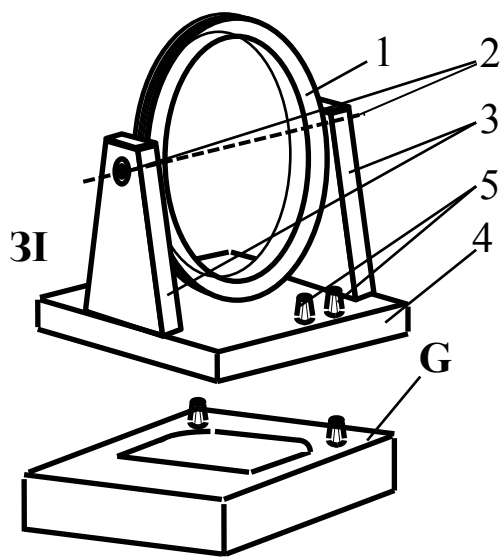


Рис. 16.3

Для вимірювання величин вертикальної  $B_{\text{верт}}$  і горизонтальної  $B_{\text{гор}}$  складових магнітної індукції у лабораторній роботі використовується модифікація балістичного методу, в основу якого покладено явище електромагнітної індукції. Загальний вигляд лабораторної установки, призначеної для вимірювання величин силових характеристик постійних магнітних полів, наведено на рис. 16.3.

Головною частиною установки є земний індуктор **ЗІ**, який складається із колової котушки (1), що є основною частиною індуктора, струмознімальних втулок (2), підтримувальних стійок (3) і

платформи (4). Котушка за допомогою втулок і підтримувальних стійок встановлюється на платформі й може вільно обертатися. Для зручності виконання вимірювань вісь обертання проходить через центр мас котушки вздовж її діаметра. На котушку намотано  $N$  витків проводу, кінці обмотки з'єднано із клемми (5), до яких підімкнено гальванометр  $G$ . Під час повороту котушки навколо осі обертання за проміжок часу  $\Delta t$  змінюється магнітний потік  $\Phi_m$  поля Землі, що пронизує кожний виток котушки, отже, змінюється й потокозчеплення котушки  $\Psi_m = N\Phi_m$  на величину  $\Delta\Psi_m = \Psi_k - \Psi_0$ , де  $\Psi_0$  – початкове значення потокозчеплення, а  $\Psi_k$  – кінцеве. У загальному випадку, відповідно до закону електромагнітної індукції Фарадея, зміна потокозчеплення, що відбувається протягом часу  $dt$ , приводить до появи в котушці ЕРС індукції

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Psi_m}{dt}.$$

Під дією  $\mathcal{E}_i$  у колі протікає індукційний струм

$$I_i = -\frac{d\Psi_m}{Rdt}.$$

Оскільки сила струму

$$I_i = \frac{dq}{dt},$$

то

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{d\Psi_m}{Rdt}.$$

Величина заряду  $dq$ , що переноситься в котушці за нескінченно малим проміжком часу  $dt$ , буде

$$dq = -\frac{1}{R}d\Psi_m.$$

Після інтегрування останнього виразу за часом, протягом якого спостерігається зміна потокозчеплення від  $\Psi_0$  до  $\Psi_k$ , можна отримати для величини заряду, що пройде в контурі, вираз

$$q = -\int dq = -\frac{1}{R}\int_{\Psi_0}^{\Psi_k} d\Psi_m = \frac{1}{R}(\Psi_0 - \Psi_k) = \frac{1}{R}\Delta\Psi_m. \quad (16.2)$$

Для земного індуктора зміна потокозчеплення  $\Delta\Psi_m$  пов'язана зі зміною орієнтації площини котушки відносно силових ліній магнітного поля, тобто змінюється тільки кут між нормаллю до площини індуктора й вектором магнітної індукції. Отже, якщо котушку індуктора повернути на  $180^\circ$ , то

знак потокозчеплення зміниться на протилежний, а величина потокозчеплення не зміниться. Тоді

$$\Delta\Psi_m = 2\Psi = 2B_nSN, \quad (16.3)$$

де  $B_n$  – проекція  $\vec{B}_{\text{земл}}$  на напрямок нормалі до площини котушки у початковому стані;  $S$  – площа витка;  $N$  – кількість витків котушки земного індуктора (рис. 16.4).

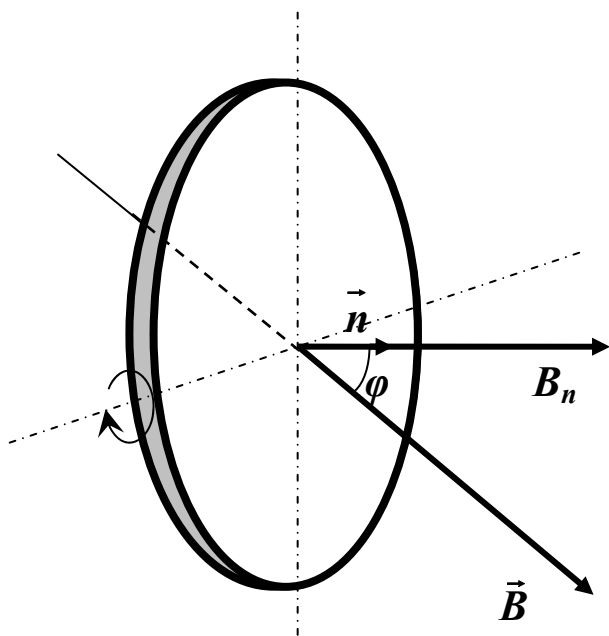


Рис. 16.4

Якщо початкове положення котушки таке, що вектор нормалі  $\vec{n}$  напрямлено вертикально, то проекцією  $B_n$  буде вертикальна проекція магнітної індукції поля Землі  $B_{\text{земл}}$ , якщо  $\vec{n}$  напрямлено горизонтально, то –  $B_{\text{гор}}$ .

Зіставивши співвідношення (16.2) і (16.3), доходимо висновку, що величина заряду, що проходить в котушці під час її повороту на кут  $180^\circ$ , залежить від величини складової магнітної індукції поля, що перпендикулярна до площини початкового положення котушки. Тому, вимірявши заряд, що виникає у вимірювальному колі під час повороту котушки індуктора на  $180^\circ$ ,

можна визначити величину цієї складової:

$$B_{\text{гор}} = \frac{\Delta\Psi_m}{2SN} = \frac{Rq}{2SN}. \quad (16.4)$$

Змінюючи напрямок осі обертання котушки, можна визначити величини складових магнітної індукції поля, які збігаються з відповідними напрямками.

Величину заряду  $q$ , що проходить в котушці завдяки явищу електромагнітної індукції, знаходять за допомогою балістичного гальванометра. Балістичний гальванометр відрізняється від звичайного тим, що він має більший момент інерції рухомої системи, отже, й більший період коливань. Якщо час протікання струму через рамку гальванометра малий порівняно з періодом коливань рамки, величина першого кидка “зайчика” гальванометра  $n$  пропорційна заряду, що пройшов через гальванометр:

$$q = Cn, \quad (16.5)$$

де  $C$  – стала гальванометра.

Підставивши співвідношення (16.5) в (16.4), отримаємо

$$B_{гор} = \frac{CR}{2NS} n = \beta n, \quad (16.6)$$

де  $\beta$  – стала вимірювального кола установки (її зазначено на робочому місці). Очевидно, що аналогічна залежність справедлива й для  $B_{верт}$ :

$$B_{верт} = \beta n. \quad (16.7)$$

### Порядок виконання роботи

1. Увімкнути в мережу балістичний гальванометр, попередньо приєднавши його до клем земного індуктора.
2. Провести вимірювання величини вертикальної складової  $B_{верт}$  магнітної індукції поля Землі. Для цього:
  - а) розташувати індуктор таким чином, щоб вісь обертання котушки була розташована горизонтально, уздовж географічного меридіана (напрямок меридіана зазначено на робочому місці), при цьому площина котушки має бути також горизонтальною;
  - б) швидко повернути котушку відносно осі на кут  $180^\circ$ , визначити абсолютне значення першого кидка “зайчика” гальванометра  $n_1$ ;
  - в) швидко повернути котушку у початкове положення й визначити абсолютне значення другого кидка “зайчика” гальванометра  $n_2$ ; дослід виконати п’ять разів і знайти середнє значення  $\langle n_{верт} \rangle$  (за даними 10 вимірювань  $n_i$ ), результати вимірювань занести до табл. 16.1.
3. Провести вимірювання величини горизонтальної складової  $B_{гор}$  магнітної індукції поля Землі. Для цього розташувати вісь обертання котушки вертикально й перпендикулярно до площини географічного меридіана. Провести вимірювання, аналогічні п. 2 (б, в), і знайти середнє значення  $\langle n_{гор} \rangle$ .
4. За формулами (16.6) і (16.7) обчислити величини  $B_{верт}$  і  $B_{гор}$ .
5. Розрахувати значення кута магнітного нахилу  $\phi$  за формулою (16.1).

Таблиця 16.1

Номер вимірювання	Вимірювання $B_{верт}$			Вимірювання $B_{гор}$			$\phi$
	$n_{i\text{ верт}}$ , ПОД.	$\langle n_{верт} \rangle$ , ПОД.	$B_{верт}$ , Тл	$n_{i\text{ гор}}$ , ПОД.	$\langle n_{гор} \rangle$ , ПОД.	$B_{гор}$ , Тл	
1							
∴							
10							

## Контрольні запитання

### Варіант 1

1. Сформулюйте й запишіть закон електромагнітної індукції Фарадея. Сформулюйте правило Ленца.
2. У чому полягає фізична суть методу визначення кута магнітного нахилу за допомогою земного індуктора?
3. Яку фізичну величину можна виміряти за допомогою гальванометра? Чому в роботі використовується саме балістичний гальванометр?
4. *Задача.* Коловий контур радіусом  $r = 2$  см знаходиться в однорідному магнітному полі, магнітна індукція якого  $B = 0,25$  Тл. Площина контуру перпендикулярна до силових ліній магнітного поля, опір контуру  $R = 3,14$  Ом. Який заряд пройде через контур під час повороту його навколо осі на  $90^\circ$ ?

*Відповідь:*  $q = 0,1 \cdot \text{мКл}$ .

### Варіант 2

1. Нарисуйте силові лінії магнітного поля Землі. Покажіть на рисунку розташування географічних і магнітних полюсів Землі, кут магнітного нахилу.
2. Дайте визначення: а) магнітного потоку; б) потокозчеплення. Назвіть одиниці вимірювання цих величин і запишіть формули для їх обчислення. Чим зумовлено змінення потокозчеплення під час повороту земного індуктора?
3. У чому полягає явище самоіндукції? Запишіть формулу для ЕРС самоіндукції.
4. *Задача.* Через котушку, індуктивність якої  $L = 0,02$  Гн, протікає струм, що змінюється з часом за законом  $I(t) = I_0 \sin(\omega t)$ , де  $I_0 = 5$  А,  $\omega = 300$  рад/с. Знайдіть залежність від часу ЕРС самоіндукції, що виникає в котушці.

*Відповідь:*  $\mathcal{E} = -30 \cos(300 t)$ .

### Варіант 3

1. У чому полягає явище електромагнітної індукції і як воно використовується в цій роботі?
2. Виведіть вираз для величини заряду, що пройде в контурі під час його повороту в магнітному полі.
3. Наведіть вихори магнітного поля. Що називають лініями магнітної індукції? Як визначається їхній напрямок?
4. *Задача.* Мідний обруч масою  $m = 5$  кг знаходиться у площині магнітного меридіана. Який заряд пройде в обручі під час його повороту навколо



вертикальної осі на  $90^\circ$ ? Величина горизонтальної складової магнітного поля Землі  $B_{гор} = 20$  мкТл, густина міді  $\rho = 8,9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, її питома електропровідність  $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$  См/м.

Відповідь:  $q = 52$  мКл.

## Лабораторна робота № 2-17 ВИМІРЮВАННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОЯСА РОГОВСЬКОГО

*Мета роботи* – вивчення явища електромагнітної індукції й вимірювання сили змінного струму за допомогою пояса Роговського.

*Прилади й обладнання:* пояс Роговського **ПР**; прямокутна рамка **Р**, утворена витками проводу; лабораторний автотрансформатор **ЛАТР**; реостат **Р**; амперметр **А**; мілівольтметр змінного струму **mV**.

### Опис установки й виведення робочої формули

У багатьох випадках вимірювання змінних струмів звичайними методами виявляється неможливим або утрудненим (змінних струмів у високовольтних лініях, імпульсних струмів заряджених частинок у плазмі й прискорювачах). Оскільки в таких випадках увімкнення амперметра неможливе, здійснюється безконтактне вимірювання величини змінного струму за допомогою пояса Роговського. Безконтактний метод базується на реєстрації змінних магнітних полів, що збуджуються змінним струмом.

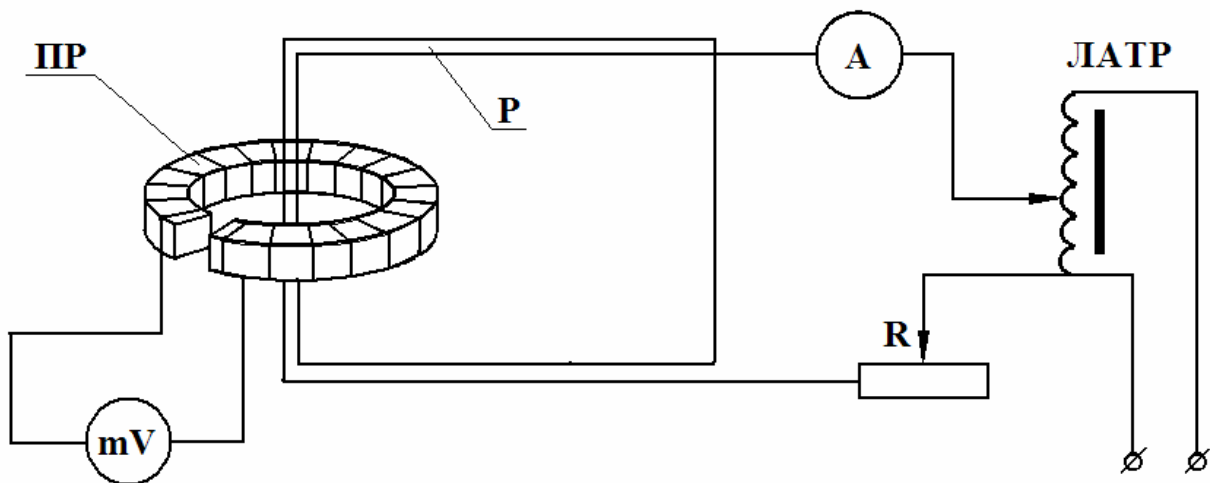


Рис. 17.1

Схему лабораторної установки, призначеної для безконтактного вимірювання величини змінного струму, наведено на рис. 17.1. Вона містить рамку **Р**, що складається з  $N$  витків мідного дроту. По рамці пропускається

змінний електричний струм, величина якого може регулюватися ЛАТРом (грубо) і реостатом  $R$  (точно). Один з боків рамки охоплює тороїдальна котушка квадратного перерізу із кількістю витків  $N_1$  – пояс Роговського (ПР).

Розглянемо принцип дії ПР. Під час протікання змінного електричного струму по рамці навколо неї виникає змінне магнітне поле. Площина одного витка ПР буде перетинати магнітний потік

$$\Phi_m = \langle \mathbf{B} \rangle S \cos \varphi, \quad (17.1)$$

де  $\langle \mathbf{B} \rangle$  – величина магнітної індукції поля на поверхні  $S$ , обмеженій витком;  $\varphi$  – кут між напрямком магнітної індукції  $\vec{B}$  і нормаллю до поверхні  $S$ .

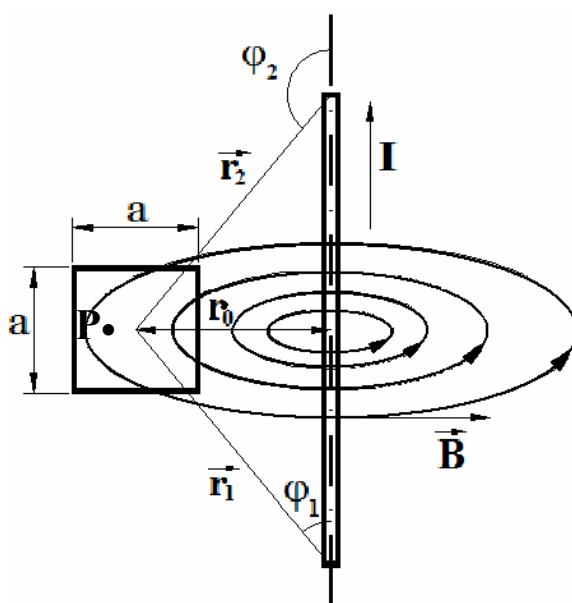


Рис. 17.2

Виток ПР має вигляд квадратного контуру зі стороною  $a$  (рис. 17.2). Оскільки розміри рамки істотно більші за розміри ПР і  $a < r_0$ , де  $r_0$  – найкоротша відстань від провідника зі струмом до середньої лінії тороїда (пояса Роговського), величину магнітної індукції в точці  $P$ , яка створюється одним витком рамки, можна визначити за формулою для магнітної індукції прямолінійного відрізка провідника зі струмом:

$$\langle \mathbf{B} \rangle = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2),$$

де  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$  – кути між радіусами-векторами  $\vec{r}_1$  і  $\vec{r}_2$ , проведеними з початку й кінця провідника в точку спостереження  $P$ , і напрямком струму в провіднику.

Відповідно величина магнітної індукції в точці **P**, що створюється  $N$  витками рамки, буде

$$\langle \mathbf{B} \rangle = N \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2). \quad (17.2)$$

Розташували виток так, щоб його площа була перпендикулярною до силових ліній, отримуємо максимальний потік крізь нього (оскільки  $\varphi = 0$ ,  $\cos \varphi = 1$  і  $\Phi_m = \Phi_{m \max}$ ). Потокочеплення **ПР**, що складається з  $N_1$  витків, можна записати у вигляді

$$\Psi_m(t) = N_1 \langle \mathbf{B} \rangle S = N_1 N \frac{\mu_0 S}{4\pi r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) I_{\max} \cos \omega t, \quad (17.3)$$

де  $I = I_{\max} \cos \omega t$  – миттєве значення змінного електричного струму в рамці,  $\omega$  – його циклічна частота.

Під час протікання змінного електричного струму по рамці **P** у поясі Роговського відповідно до закону електромагнітної індукції виникає ЕРС індукції

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Psi_m}{dt} = NN_1 \frac{\mu_0 S}{4\pi r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \omega I_{\max} \sin \omega t.$$

Величина  $\mathcal{E}$  пропорційна миттєвому значенню струму  $I$ , що тече по рамці:

$$\mathcal{E} = DI.$$

Звідси

$$I = \frac{\mathcal{E}}{D}, \quad (17.4)$$

де  $D = \frac{NN_1 \mu_0 S \omega (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2)}{4\pi r_0}$  – стала, яка використовується в роботі

(значення  $D$  указано на робочому місці).

Оскільки внутрішній опір мілівольтметра  $mV$ , підімкненого до клем пояса, істотно перевершує омичний та індуктивний опори пояса, мілівольтметр реєструє ефективно значення ЕРС, що наводиться в поясі:

$\mathcal{E}_{ef} = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{\sqrt{2}}$ . Тому, використовуючи показання мілівольтметра, за формулою

(17.4) можна обчислити  $I$  – сумарний струм, що тече по  $N$  витках рамки, і визначити  $I_{p.теор}$  – струм, що тече по одному витку рамки:

$$I_{p.теор} = \frac{I}{N} = \frac{\mathcal{E}}{ND}.$$

Через пропорційність миттєвих значень  $\mathcal{E}$  і  $I$  (17.4) справедливим є співвідношення

$$I_{max} = \frac{\mathcal{E}_{max}}{D},$$

тому

$$I_{p.теор} = \frac{\mathcal{E}_{max}}{ND} = \frac{\mathcal{E}_{ef} \sqrt{2}}{ND}. \quad (17.5)$$

### Порядок виконання роботи

1. Установити повзунок реостата в середнє положення, а ручку ЛАТРа – у нульове положення (крайнє проти годинникової стрілки).
2. Увімкнути живлення установки.
3. Зауважимо, що під час протікання по колу змінного струму амперметром А (рис. 17.1) вимірюється ефективне значення сили струму  $I_{ef} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$ , тому струм, що тече через рамку, буде  $I_{p.експ} = I_{ef} \sqrt{2}$ . Установлюючи послідовно значення сили струму в рамці  $I_{ef} = 2, 3, 4, 5$  А, виміряти величини  $\mathcal{E}_{ef}$  відповідної ЕРС, що виникає у поясі Роговського. Розрахувати значення  $I_{p.експ}$ , результати вимірювань і обчислень занести до табл. 17.1.
4. За виміряними значеннями  $\mathcal{E}_{ef}$  розрахувати величину струму в рамці  $I_{p.теор}$  за формулою (17.5). Результати розрахунків занести до табл. 17.1.
5. Порівняти значення  $I_{p.експ}$  із  $I_{p.теор}$ .

Таблиця 17.1

Номер досліду	$I_{ef}$ , А	$\mathcal{E}_{ef}$ , В	$I_{p.експ}$ , А	$I_{p.теор}$ , А
1	2			
2	3			
3	4			
4	5			

### Контрольні запитання

#### Варіант 1

1. Сформулюйте принцип суперпозиції для магнітного поля.
2. Виведіть формулу для магнітної індукції поля, що створюється відрізком прямолінійного провідника зі струмом.

3. Сформулюйте й запишіть закон електромагнітної індукції. Сформулюйте правило, за допомогою якого можна визначити напрямок індукційного струму.
4. *Задача.* В однорідному магнітному полі з магнітною індукцією  $B = 0,05$  Тл знаходиться плоский контур, площа якого  $S = 20$  см<sup>2</sup>. Визначіть магнітний потік, що пронизує поверхню, обмежену контуром, якщо площина контуру з лініями магнітної індукції утворює кут  $\alpha = 30^\circ$ .  
*Відповідь:*  $\Phi_m = 5 \cdot 10^{-5}$  Вб.

#### *Варіант 2*

1. Сформулюйте й запишіть закон Біо–Савара–Лапласа.
2. Отримайте формулу для потокозчеплення пояса Роговського, якщо по провіднику, охопленому поясом, протікає змінний струм.
3. Для яких практичних цілей може бути використано пояс Роговського?
4. *Задача.* По проводу, зігнутому у вигляді кільця радіусом  $R = 11$  см, тече струм  $I = 14$  А. Знайдіть магнітну індукцію поля  $B$ , створеного цим струмом у центрі кільця.  
*Відповідь:*  $B = 80$  мкТл.

#### *Варіант 3*

1. У чому полягає явище електромагнітної індукції?
2. Дайте означення магнітного потоку й потокозчеплення і запишіть формули для їх обчислення. У яких одиницях вимірюються ці величини?
3. Чи можна використовувати пояс Роговського для вимірювання постійного струму? Відповідь поясніть.
4. *Задача.* Із дроту довжиною  $l = 1$  м зроблено квадратну рамку. По рамці тече струм  $I = 10$  А. Знайдіть магнітну індукцію поля в центрі рамки.  
*Відповідь:*  $B = 45,25$  мкТл.

### **Лабораторна робота № 2-18 ВИВЧЕННЯ ЯВИЩА САМОІНДУКЦІЇ**

*Мета роботи* – дослідження процесів зростання й спадання сили струму в колі, що містить індуктивність, визначення індуктивності котушки.

*Прилади й обладнання:* генератор прямокутних імпульсів напруги; осцилограф; **RL-коло**.

#### **Опис лабораторної установки й методики вимірювань**

Відомо, що змінення сили струму в колі, що містить індуктивність, при підімкненні або відімкненні джерела струму відбувається не миттєво. Така поведінка пояснюється наявністю явища самоіндукції.

Отримаємо вирази для залежності струму в **RL-колі** від часу при підімкненні або відімкненні джерела струму (рис. 18.1). Нехай у початковий момент часу джерело струму підімкнено (ключ **К** у положенні **1**). У колі тече постійний струм

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R}. \quad (18.1)$$

Тут під **R** мається на увазі повний опір кола, при цьому через малість опір джерела струму не враховуємо. Якщо сила струму в **RL-колі** буде змінюватися, то закон Ома набуде вигляду

$$I = \frac{\mathcal{E} + \mathcal{E}_{si}}{R}, \quad (18.2)$$

де  $\mathcal{E}_{si}$  – ЕРС самоіндукції, що виникає в соленоїді під час змінення струму. Оскільки

$$\mathcal{E}_{si} = -L \frac{dI}{dt},$$
 вираз (18.2) можна переписати

так:

$$L \frac{dI}{dt} + RI - \mathcal{E} = 0. \quad (18.3)$$

Розв'язком цього диференціального рівняння (з урахуванням початкової умови  $I(t=0) = I_0$ ) є функція

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{\mathcal{E}}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right). \quad (18.4)$$

Таким чином, сила струму в **RL-колі** при підімкненні або відімкненні джерела змінюється не миттєво, а за експонентою (рис. 18.2). Величина

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (18.5)$$

має розмірність часу й характеризує швидкість змінення струму в **RL-колі**. Її називають сталою часу, або часом релаксації. З рівняння (18.4) видно, що час релаксації – це час, протягом якого сила струму в колі зменшується в  $e \approx 2,718$  разів при відімкненні джерела.

Розглянемо два випадки:

1. Спочатку ключ **К** знаходиться в положенні **2** (див. рис. 18.1). Струму у колі немає, тобто  $I(t=0) = 0$ . При замиканні ключа **К** в положення **1** сила струму в колі почне зростати, рівняння (18.4) набуде вигляду

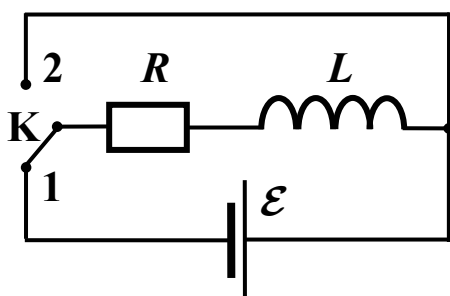


Рис. 18.1

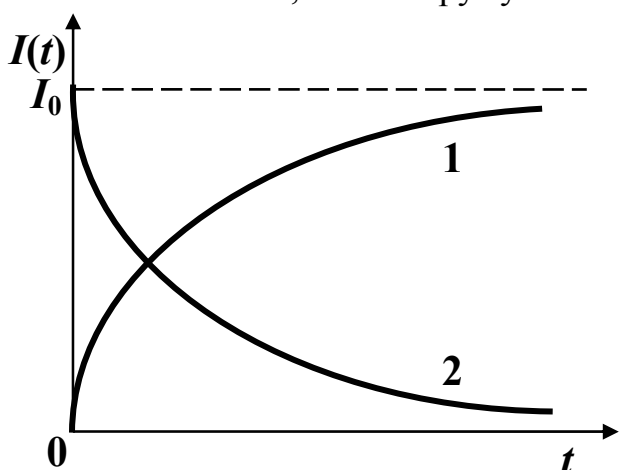


Рис. 18.2

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right). \quad (18.6)$$

Графік цієї функції показано на рис. 18.2 (крива 1).

2. Спочатку ключ **К** знаходиться в положенні 1. По котушці **L** (див. рис. 18.1) тече постійний струм силою  $I(t = 0) = I_0$ . У момент розмикання ключа джерело струму відмикається від **RL-кола** й  $\mathcal{E} = 0$ . У цьому випадку рівняння (18.4) набуде вигляду

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (18.7)$$

Графік цієї функції наведено на рис. 18.2 (крива 2).

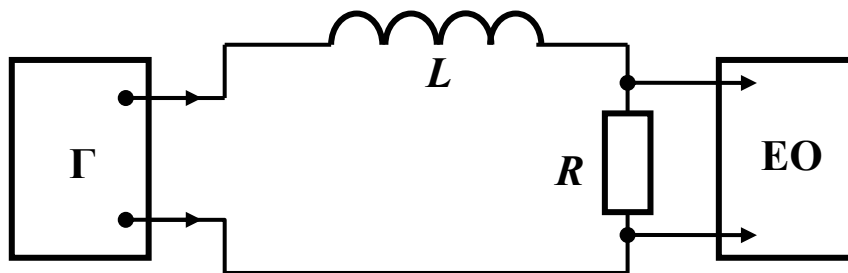


Рис. 18.3

На рис. 18.3 зображено схему установки, що використовується в цій роботі. З генератора **Г** на **RL-коло** подаються прямокутні імпульси напруги

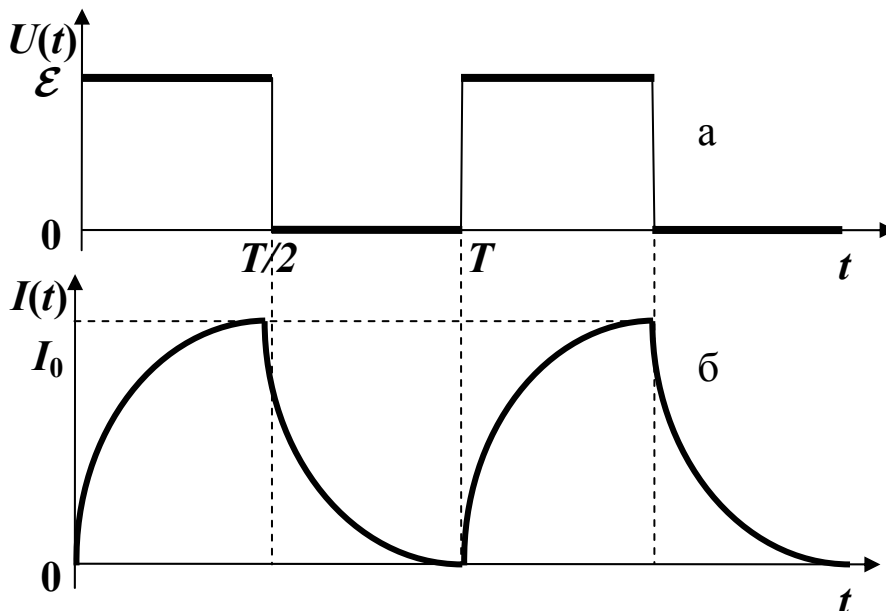


Рис. 18.4

частотою  $\nu = 1000$  Гц (рис. 18.4, а). Подача прямокутних імпульсів напруги аналогічна комутації джерела струму ключем **К**. Через обмотку соленоїда й

резистор  $R$  тече струм. Залежність сили струму від часу досліджується за допомогою осцилографа, на вхід якого подається сигнал, що дорівнює спаду напруги на резисторі  $I(t)R$ , тобто пропорційний силі струму (рис. 18.4, б). Вимірявши за точками на екрані осцилографа залежність  $I(t)$ , можна визначити сталу часу кола, індуктивність  $L$ , якщо відомий опір  $R$ , або повний опір кола, якщо відома індуктивність.

Для спрощення процесу вимірювання залежності  $I(t)$  в осцилографі використовується функція міток часу. Методику подібних вимірювань із застосуванням міток описано в лабораторній роботі № 2-04. Виходячи з формул (18.4), (18.5) і (18.6) маємо таке:

$$\tau = \frac{\Delta t}{\Delta \ln \frac{I_0}{I_0 - I(t)}} \quad (\text{при зростанні сили струму}); \quad (18.8)$$

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{\Delta t}{\Delta \ln \frac{I_0}{I(t)}} \quad (\text{при спаданні сили струму}), \quad (18.9)$$

де  $\Delta t$  – інтервал часу змінення відповідного логарифма на величину  $\Delta \ln \dots$ . За отриманими даними  $I(t)$  можна знайти залежності відповідних логарифмів від часу. Теоретично залежності  $\ln \frac{I_0}{I_0 - I(t)} = f_1(t)$  і  $\ln \frac{I_0}{I(t)} = f_2(t)$  мають бути лінійними, однак через похибку вимірювань виникають відхилення експериментальних точок від лінійної залежності (рис. 18.5).

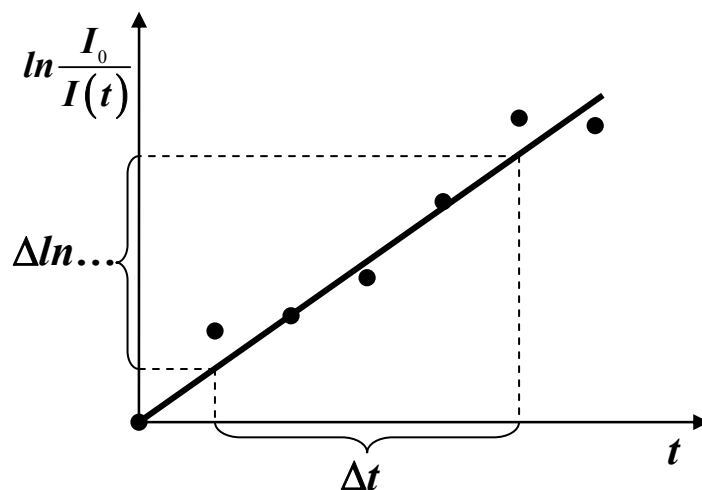


Рис. 18.5

Тому експериментальні точки наносяться на графік і графічно екстраполюються лінійною залежністю. Далі, користуючись формулами (18.8) і (18.9), за отриманими графіками визначається стала часу  $\tau_{\text{експ}}$ .



## Порядок виконання роботи

*Завдання 1. Визначення сталої часу  $RL$ -кола  
й індуктивності котушки за залежністю сили струму від часу  
при наростанні струму*

1. Перевірити правильність підімкнення генератора й осцилографу до  **$RL$ -кола** й увімкнути їхнє живлення. Установити на генераторі частоту імпульсів напруги  $\nu = 1000$  Гц.
2. Добитися на екрані осцилографу стабільної картинки, аналогічної рис. 18.4, б. Увімкнути функцію міток часу й установити тривалість міток 20 мкс (ручка “Мітки” на осцилографі).
3. На осцилограмі кривій збільшення сили струму визначити координати перших 5–10 міток, тобто значення часу (координата по горизонтальній осі на екрані) і сили струму (координата по вертикальній осі). Дані занести до табл. 18.1.

Таблиця 18.1

Номер мітки $n$	$t = n \cdot 20$ , мкс	$I_n(t)$ , под.	$\frac{I_0}{I_0 - I_n}$	$\ln \frac{I_0}{I_0 - I_n}$	$\tau_{експ}$ , с
1	0				
2	20				
...	...				

4. Для всіх вимірних величин струму знайти значення відношення  $\frac{I_0}{I_0 - I_n}$  і його логарифм. Результати розрахунків занести до табл. 18.1.
5. За отриманими даними побудувати графік залежності  $\ln \frac{I_0}{I_0 - I(t)} = f_1(t)$ .
6. За формулою (18.8) визначити сталу часу цього  **$RL$ -кола**.
7. Використовуючи отримане значення сталої часу, за формулою (18.5) розрахувати величину індуктивності  $L$  соленоїда (величину повного опору кола  $R$  задано на установці).

*Завдання 2. Визначення сталої часу  $RL$ -кола  
й індуктивності котушки за залежністю сили струму від часу  
при спаданні струму*

1. Перевірити правильність підімкнення генератора й осцилографу до  **$RL$ -кола** й увімкнути їхнє живлення. Установити на генераторі частоту імпульсів напруги  $\nu = 1000$  Гц.

- Добитися на екрані осцилографа стабільної картинки, аналогічної рис. 18.4, б. Увімкнути функцію міток часу й установити тривалість міток 20 мкс (ручка “Мітки” на осцилографі).
- На осцилограмі кривій зменшення сили струму визначити координати перших 5–10 міток, тобто значення часу (координата по горизонтальній осі на екрані) і сили струму (координата по вертикальній осі). Дані занести до табл. 18.2.

Таблиця 18.2

Номер мітки $n$	$t = n \cdot 20$ , мкс	$I_n(t)$ , под.	$\frac{I_0}{I_n}$	$\ln \frac{I_0}{I_n}$	$\tau_{\text{експ}}$ , с
1	0				
2	20				
...	...				

- Для всіх вимірних величин струму знайти значення відношення  $\frac{I_0}{I_n}$  і його логарифм. Результати розрахунків занести до табл. 18.2.
- За отриманими даними побудувати графік залежності  $\ln \frac{I_0}{I(t)} = f_2(t)$ .
- За формулою (18.9) визначити сталу часу цього **RL-кола**.
- Використовуючи отримане значення сталої часу, за формулою (18.5) розрахувати величину індуктивності  $L$  соленоїда (величину повного опору кола  $R$  указано на установці).

### Контрольні запитання

#### Варіант 1

- У чому полягає явище самоіндукції?
- Що таке індуктивність контуру, який її фізичний зміст?
- Запишіть закон Ома для кола, що містить індуктивність. Поясніть його.
- Задача.** Через котушку, індуктивність якої  $L = 0,021$  Гн, тече струм, що змінюється з часом за законом  $I = I_0 \sin \omega t$  (де  $I_0 = 5$  А і  $T = 0,02$  с). Знайдіть залежність від часу ЕРС самоіндукції, що виникає в котушці.  
**Відповідь:**  $\mathcal{E}_{si} = -33 \cos 100\pi t$ , В.

#### Варіант 2

- Запишіть вирази для ЕРС самоіндукції.
- Які параметри визначають індуктивність контуру? Запишіть вирази для індуктивності соленоїда.
- Запишіть залежності спадання й зростання струму в **RL-колі**.

4. *Задача.* Котушку індуктивністю  $L = 3$  мГн і опором  $R = 150$  Ом підімкнено до джерела постійної напруги. Протягом якого часу струм у котушці досягне половини максимального значення?

*Відповідь:*  $\Delta t = 13,86$  мкс.

*Варіант 3*

1. Чим відрізняється явище самоіндукції від явища електромагнітної індукції?

2. Як визначається стала часу *RL-кола*? Який її фізичний зміст?

3. Наведіть приклади використання явища самоіндукції в техніці.

4. *Задача.* Всі геометричні розміри котушки зменшили вдвічі, а кількість витків і силу струму в котушці залишили попередніми. Як при цьому змінилися індуктивність котушки й енергія магнітного поля котушки?

*Відповідь:* зменшилися вдвічі.

### Лабораторна робота № 2-19 ВИЗНАЧЕННЯ ІНДУКТИВНОСТІ СОЛЕНОЇДА

*Мета роботи* – вивчення залежності індуктивності соленоїда від кількості витків і геометричних розмірів з використанням явища електромагнітної індукції.

*Прилади й обладнання:* генератор прямокутних імпульсів Г; осцилограф ЕО; котушка збудження; набір соленоїдів  $L_i$  (див. табл. 19.1); конденсатори  $C_1, C_2, C_3$ .

#### Опис установки й виведення робочої формули

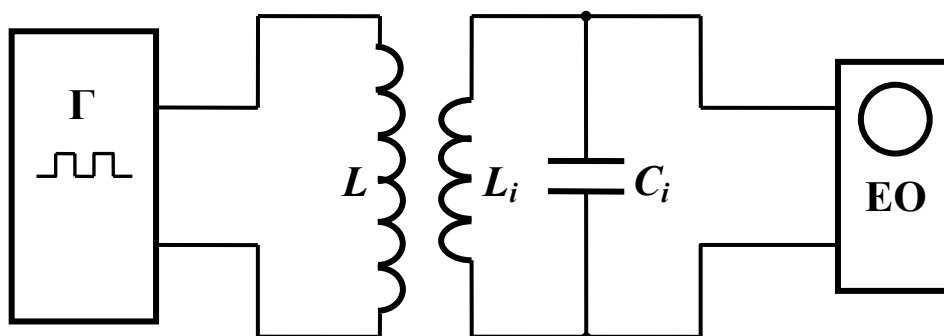


Рис. 19.1

Лабораторна установка (схему наведено на рис. 19.1) складається з котушки збудження  $L$ , яку підімкнено до генератора Г. Генератор створює прямокутні імпульси із частотою 100 Гц. Котушка збудження  $L$  індуктивно

зв'язана з одним із соленоїдів  $L_i$ . Під час проходження змінного електричного струму по котушці збудження в соленоїді наводиться ЕРС індукції. Це приводить до виникнення електромагнітних коливань у коливальному контурі, що складається з конденсатора ємністю  $C_i$  і соленоїда індуктивністю  $L_i$ . Коливання напруги реєструються осцилографом **ЕО**, на екрані якого можна спостерігати криву  $U(t)$ .

Змінний електричний струм, протікаючи по котушці збудження, створює всередині неї магнітне поле. При цьому відповідно до закону електромагнітної індукції Фарадея в індуктивно зв'язаному з нею соленоїді наводиться ЕРС

$$\mathcal{E}_i = -N_i \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt},$$

де  $\Phi_m$  – магнітний потік через поверхню, обмежену одним витком соленоїда;  $\Psi_m$  – потокозчеплення соленоїда;  $N_i$  – кількість витків у соленоїді. Потокозчеплення соленоїда визначається за формулою

$$\Psi = N_i S_i B,$$

де  $S_i = \pi r_i^2$  – площа поперечного перерізу соленоїда. Магнітна індукція поля в соленоїді довжиною  $l_i$  із кількістю витків  $N_i$ , по якому протікає струм  $I$ , буде  $B = \mu\mu_0 \frac{N_i}{l_i} I$ . Тоді вираз для ЕРС індукції набуде вигляду

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Psi}{dt} = -\mu\mu_0 \frac{N_i^2}{l_i} \pi r_i^2 \frac{dI}{dt} = -L_i \frac{dI}{dt},$$

де

$$L_i = \mu\mu_0 \frac{N_i^2}{l_i} \pi r_i^2 \quad (19.1)$$

– індуктивність соленоїда.

ЕРС індукції, що виникає в соленоїді  $L_i$ , приводить до збудження електромагнітних коливань у коливальному контурі, що складається з конденсатора ємністю  $C_j$  і соленоїда індуктивністю  $L_i$ . Через наявність активного опору проводів і обмотки соленоїда коливання, які збуджуються в контурі, будуть згасати. Але оскільки величина активного опору невелика, а тривалість інтервалу часу, протягом якого розглядається коливальний процес, мала (~мкс або мс), можна вважати, що коефіцієнт згасання  $\beta \ll \omega_0$ , де  $\omega_0$  – власна циклічна частота коливань у контурі. Циклічна частота згасаючих коливань  $\omega$  майже збігається з  $\omega_0$  ( $\omega \approx \omega_0$ ) і період коливань  $T$  – з періодом  $T_0$  незгасаючих коливань у контурі ( $T \approx T_0$ ), причому відповідно до формули Томсона

$$T_0 = 2\pi\sqrt{L_i C_j}. \quad (19.2)$$

Визначивши експериментально період цих коливань, розраховують індуктивність соленоїда

$$L_i = \frac{T^2}{4\pi^2 C_j}. \quad (19.3)$$

Потім досліджують залежність індуктивності соленоїда від кількості витків і від радіуса соленоїда. Параметри соленоїдів  $L_i$  наведено в табл. 19.1.

Таблиця 19.1

Соленоїд	Кількість витків $N$	Діаметр соленоїда $d$ , мм
$L_1$	300	40
$L_2$	300	32
$L_3$	300	26
$L_6$	150	26
$L_7$	75	26

### Порядок виконання роботи

#### *Завдання 1. Вивчення залежності індуктивності від кількості витків соленоїда*

Для вивчення залежності  $L=f(N)$  використовувати соленоїди  $L_3, L_6, L_7$ .

1. Увімкнути живлення стенда, осцилографа й генератора.
2. Установити на генераторі частоту  $\nu = 100$  Гц.
3. Підімкнути  $L_3$  і  $C_1$  до вимірювальної схеми (див. рис. 19.1), для чого вставити котушку збудження в соленоїд  $L_3$ . Підбираючи тривалість розгортки осцилографа й посилення, отримати стійке зображення згасаючих коливань на екрані осцилографа.
4. Обчислити період згасаючих коливань  $T$  за кривою залежності  $U(t)$  на екрані осцилографа, використовуючи формулу

$$T = \frac{\tau m}{n},$$

де  $\tau$  – тривалість розгортки (в “мс/под.” або “мкс/под.”);  $m$  – кількість поділок (великих клітинок) на екрані осцилографа, що відповідає  $n$  періодам.

5. Виконати аналогічні вимірювання періоду згасаючих коливань при підімкненні до  $L_3$  ємностей  $C_2$  і  $C_3$ . Результати вимірювань занести до табл. 19.2.
6. За формулою (19.2) розрахувати для кожної ємності  $C_1, C_2, C_3$  значення  $L_3$ . Обчислити середнє значення  $\langle L_3 \rangle$ , а також значення  $\ln(\langle L_3 \rangle)$  і  $\ln N_3$ . Результати занести до табл. 19.2.

7. Виконати вимірювання  $T$  і розрахунки  $L$  для соленоїдів  $L_6$  і  $L_7$  аналогічно пп. 3 – 6. Результати занести до табл. 19.2 (для кожного соленоїда окремо).

Таблиця 19.2

Номер соленоїда $i$	$C$ , мкФ	$\tau$ , мкс/под.	$m$	$n$	$T$ , мкс	$L_i$ , мГн	$\langle L_i \rangle$ , мГн	$\ln \langle L \rangle$	$\ln N_i$ для $i = 3, 6, 7$ ( $\ln r_i$ для $i = 1, 2, 3$ )
	$C_1$								
	$C_2$								
	$C_3$								

8. Побудувати графік  $\ln L_i$  від  $\ln N_i$  для  $i = 3, 6, 7$ . Ураховуючи, що залежність  $L(N)$  має вигляд  $L = aN^x$ , де  $a = \text{const}$ , визначити з кожного графіка показник степеня  $x$  за формулою  $x = \frac{\Delta \ln L_i}{\Delta \ln N_i}$  (аналогічно тому, як зображено на рис. 19.2, а).

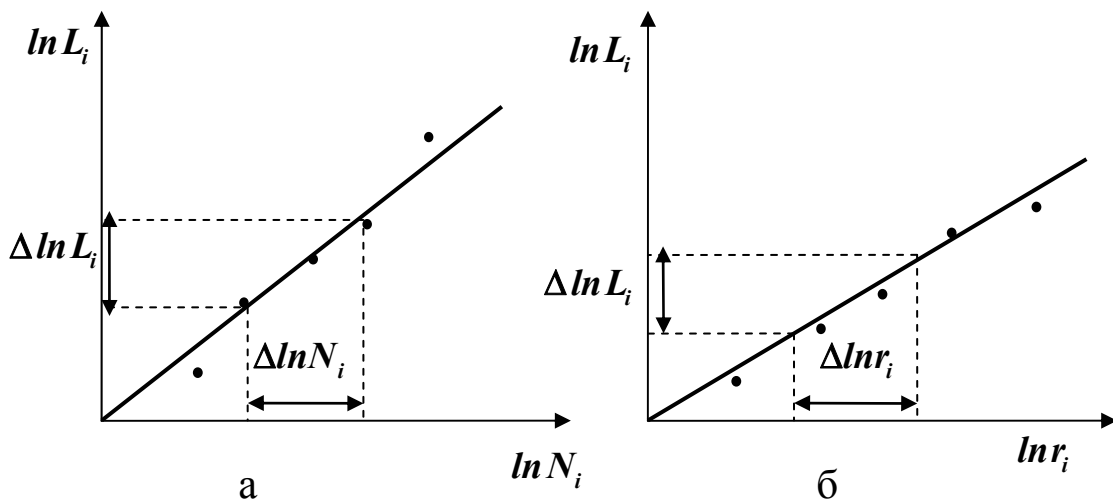


Рис. 19.2

9. На основі отриманих даних зробити висновок про залежність індуктивності  $L$  від кількості витків соленоїда  $N$ .
10. Розрахувати теоретичні значення  $L_i$  (формула (19.1)) і порівняти експериментально отримані результати з теоретичними.

*Завдання 2. Вивчення залежності індуктивності від радіуса соленоїда*

Дослідження залежності  $L = f(r)$  проводити на соленоїдах  $L_1, L_2, L_3$ .

1. Вимірювання  $T$  і розрахунки  $L_1$  і  $L_2$  зробити аналогічно пп. 3 – 6 завдання 1. Значення для  $L_3$  взяти з табл. 19.2.

- Усі дані занести до табл. 19.2 (для кожного соленоїда окремо), у якій в останній графі замінити  $\ln N$  на  $\ln r$ .
- Побудувати графік  $\ln L_i$  від  $\ln r_i$  для  $i = 1, 2, 3$ . Ураховуючи, що залежність  $L(r)$  має вигляд  $L = br^y$ , де  $b = \text{const}$ , визначити з кожного графіка показник степеня  $y$  за формулою  $y = \frac{\Delta \ln L_i}{\Delta \ln r_i}$  (подібно до того, як це зображено на рис. 19.2, б).
- На основі отриманих даних зробити висновок про залежність індуктивності  $L$  від радіуса соленоїда  $r$ .
- Розрахувати теоретичні значення  $L_i$  (формула (19.1)) і порівняти експериментально отримані результати з теоретичними.

### Контрольні запитання

#### Варіант 1

- Що називають індуктивністю соленоїда? За якою формулою її обчислюють?
- Що називають коливальним контуром і яке його призначення? Опишіть коливальний процес в ідеальному коливальному контурі.
- Якими параметрами визначається індуктивність соленоїда?
- Задача.* Знайдіть індуктивність котушки довжиною 20 см, що має 400 витків, усередину якої введено залізне осердя (магнітна проникність заліза дорівнює 400). Площа поперечного перерізу котушки 9 см<sup>2</sup>.  
*Відповідь:*  $L = 0,36$  Гн.

#### Варіант 2

- Що називають магнітним потоком? Запишіть формулу для обчислення магнітного потоку. У яких одиницях вимірюється магнітний потік?
- Як можна збудити незгасаючі коливання в ідеальному коливальному контурі? Запишіть формули для визначення періоду й частоти коливань такого контуру.
- У чому полягає явище самоіндукції? Як зв'язані ЕРС самоіндукції й індуктивність соленоїда?
- Задача.* Соленоїд без осердя довжиною 20 см і діаметром 3 см має 400 витків. По соленоїду тече струм  $I = 2$  А. Знайдіть: 1) індуктивність соленоїда; 2) потокозчеплення соленоїда.  
*Відповідь:* 1)  $L = 7,1 \cdot 10^{-4}$  Гн; 2)  $\Psi = 1,42$  мВб.

#### Варіант 3

- Чим створюється магнітне поле в соленоїді? Охарактеризуйте таке поле. Запишіть формулу для обчислення магнітної індукції поля в соленоїді нескінченної довжини.

2. Опишіть метод визначення індуктивності соленоїда, що використовується у лабораторній роботі.
3. Сформулюйте й запишіть теорему про циркуляцію вектора магнітної індукції.
4. *Задача.* Скільки витків має соленоїд індуктивністю  $L = 0,001$  Гн, якщо при силі струму  $I = 1$  А магнітний потік через один виток  $\Phi_m = 2 \cdot 10^{-6}$  Вб?  
*Відповідь:*  $N = 500$ .

## Лабораторна робота № 2-20 ВИВЧЕННЯ МАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФЕРОМАГНІТИКІВ

*Мета роботи* – визначення основних характеристик феромагнітних матеріалів (коерцитивної сили, залишкової намагніченості, залежності магнітної проникності від зовнішнього магнітного поля) за петлею магнітного гістерезису.

*Прилади й обладнання:* електронний осцилограф (ЕО); регульоване джерело змінної напруги (генератор); набір трансформаторів з різними феромагнітними осерддями; інтегрувальна *RC*-ділянка кола; опір.

### Теоретичний вступ

Усі речовини в природі виявляють магнітні властивості, тобто є магнетиками. Різноманітність типів магнетиків зумовлена різними магнітними властивостями мікрочастинок, що утворюють речовину, а також характером їх взаємодії. Відомо, що магнітна індукція  $\vec{B}$ , намагніченість  $\vec{J}$  і напруженість магнітного поля  $\vec{H}$  зв'язані співвідношеннями

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}) = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad \vec{J} = (\mu - 1) \vec{H} = \chi \vec{H}, \quad (20.1)$$

де  $\mu$  – магнітна проникність магнетика;  $\chi$  – його магнітна сприйнятливість. Знаючи одну із цих характеристик магнітного поля в середовищі, можна знайти інші залежно від поставленого завдання.

Усі магнетики умовно поділяють на два класи:

I. Слабкі магнетики, у яких за відсутності зовнішнього магнітного поля не існує магнітного впорядкування магнітних моментів атомних носіїв магнетизму. До них належать:

1. Діамагнетики (інертні гази,  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $NaCl$ ,  $Cu$ ,  $Au$ ,  $Ag$  та ін.) – магнетики, для яких за відсутності зовнішнього магнітного поля ( $\vec{B}_{зовн} = \mathbf{0}$ ) магнітний момент атомів  $\vec{p}_m$ , а отже, і намагніченість  $\vec{J}$  дорівнюють нулю; при



$\vec{B}_{зовн} \neq 0$  в діамагнетику намагніченість  $\vec{J}$  напрямлена назустріч  $\vec{B}_{зовн}$  (магнітна проникність діамагнетика  $\mu < 1, \mu \approx 1$ ).

2. Парамагнетики (Al, Li, Na, K, газоподібний O<sub>2</sub> та ін.) – магнетики, для яких при  $\vec{B}_{зовн} = 0, \vec{p}_m \neq 0$ , але магнітні моменти атомів орієнтовані хаотично й тому  $\vec{J} = 0$ ; при  $\vec{B}_{зовн} \neq 0$  в парамагнетику  $\vec{J}$  співнаправлена з  $\vec{B}_{зовн}$  (магнітна проникність парамагнетика  $\mu > 1, \mu \approx 1$ ).

II. Сильні магнетики, у яких при температурі, нижчій за певну, магнітні моменти атомних носіїв магнетизму впорядковані яким-небудь чином. До них належать:

1. Феромагнетики (Fe, Co, Ni, деякі рідкоземельні метали та ін.) – магнетики (зазвичай у твердому кристалічному стані), у яких при температурі нижчій за температуру Кюрі, магнітні моменти атомів (іонів, електронів) паралельні один до одного. Особливостями феромагнетиків є здатність намагнічуватися навіть у слабких полях (тому що  $\mu \gg 1$ ), нелінійна залежність  $\vec{B}$  від  $\vec{H}$  ( $\mu$  залежить від  $\vec{H}$  і може досягати значень  $10^6$ ) і помітно виражений магнітний гістерезис — відставання зміни намагніченості  $\vec{J}$  й магнітної індукції  $\vec{B}$  від зміни  $\vec{H}$  при циклічному перемагнічуванні феромагнетика (рис. 20.1). Якщо враховувати співвідношення (20.1) і те, що для феромагнетика  $\mu \gg 1$ , то

$$\vec{J} \approx \mu \vec{H} \quad \text{і} \quad \vec{B} \approx \mu_0 \vec{J}.$$

Тому замість залежності намагніченості магнетика  $\vec{J}$  від напруженості магнітного поля  $\vec{H}$  можна вивчати залежність магнітної індукції  $\vec{B}$  поля всередині магнетика від  $\vec{H}$ .

2. Антиферомагнетики (твердий O<sub>2</sub>, Cr, деякі рідкоземельні метали та ін.) – магнетики, для яких при температурі, нижчій за температуру Нееля, і при  $\vec{B}_{зовн} = 0, \vec{p}_m \neq 0$ , магнітні моменти сусідніх атомів антипаралельні, рівні за величиною й тому  $\vec{J} \approx 0$ ; при  $\vec{B}_{зовн} \neq 0$  у антиферомагнетика  $\vec{J}$  співнаправлена з  $\vec{B}_{зовн}$  (магнітна

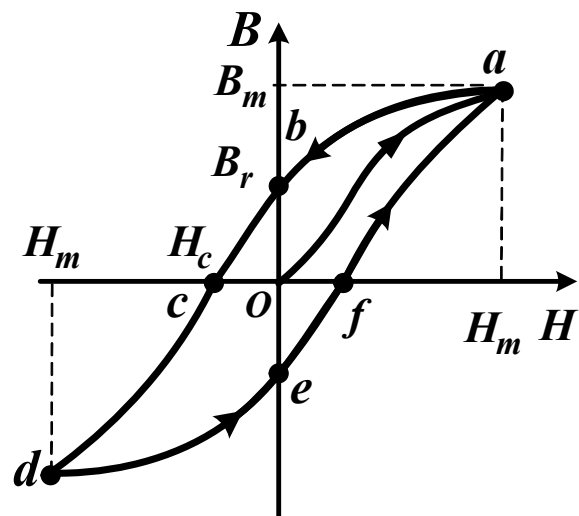


Рис. 20.1

проникність антиферомагнетика  $\mu > 1$ ,  $\mu \approx 1$ ). При температурі, вищій за температуру Нееля, антиферомагнетик стає парамагнетиком.

3. Феримагнетики (ферити, наприклад  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ , гексагональні подвійні фториди, наприклад  $\text{RbNi}_3$ ) – магнетики (в основному, іонні кристали), у яких при температурі, нижчій за температуру Кюрі, магнітні моменти атомів утворюють дві підсистеми або більше – магнітні підґрати. Кожна з підґрат містить іони одного сорту з однаково орієнтованими магнітними моментами, тобто  $\vec{p}_m \neq 0$  й  $\vec{J}_{\text{підґрат}} \neq 0$ . При цьому  $\vec{J}_{\text{підґрат}}$  різних підґрат напрямлені назустріч один одному або (у більш загальному випадку) утворюють складну просторову конфігурацію. Тому при  $\vec{B}_{\text{зовн}} = 0$  можливий стан, у якому магнітний момент феримагнетика відмінний від нуля. Магнітна проникність феримагнетиків  $\mu \gg 1$ . Ці магнетики мають властивості, досить схожі на властивості звичайних феромагнітних металів і сплавів, лише з тією різницею, що майже всі ці речовини є неметалічними (напівпровідники). При температурі, вищій за температуру Кюрі, феримагнетик стає парамагнетиком.

Розглянемо тепер поведінку феромагнетика в магнітному полі. За відсутності магнітного поля зразок феромагнітного матеріалу складається з доменів – областей мимовільної однорідної намагніченості з певним напрямком  $\vec{J}_{\text{домен}}$  (лінійні розміри домену для більшості феромагнетиків становлять  $10^{-3} \dots 10^{-2}$  см). При цьому вектори магнітних моментів окремих доменів можуть бути орієнтовані в просторі таким чином, що результуючий магнітний момент усього магнетика дорівнює нулю.

У магнітному полі у феромагнетиках відбувається зміна об'єму доменів з різною орієнтацією  $\vec{J}_{\text{домен}}$  завдяки зміщенню меж доменів, а також обертання векторів  $\vec{J}_{\text{домен}}$  доменів. При цьому магнітна індукція зростає відповідно до кривої  $Oa$  на рис. 20.1, яку називають *кривою первісного намагнічування*. Вище деякого значення напруженості магнітного поля  $H_m$  магнітна індукція поля  $B$  усередині феромагнетика не змінюється – досягається магнітне насичення зразка (при цьому феромагнетик складається з одного домену, у якому магнітна індукція насичення  $\vec{B}_m$  напрямлена за полем).

Зі зменшенням  $H$  до нуля магнітна індукція  $B$  зменшується до деякої величини  $B_r$ , що називають *залишковою індукцією*. Для того щоб розмагнітити феромагнетик, первісно намагнічений до насичення, необхідно прикласти магнітне поле, величину напруженості якого  $H_c$  називають *коерцитивною силою*. При подальшому збільшенні магнітного поля

зворотного напрямку феромагнетик знову намагнічується вздовж поля до насичення (точка *d*). Перемагнічування зразка (із точки *d* у точку *a*) відбувається вздовж кривої *defa*. Таким чином, при циклічній зміні магнітного поля крива, що характеризує зміну магнітної індукції всередині зразка, утворить *петлю магнітного гістерезису* (петля *abcdefa*).

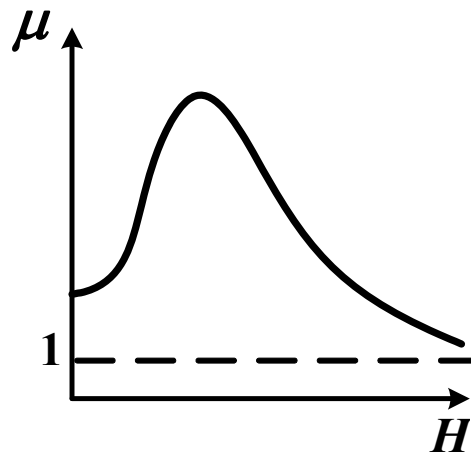


Рис. 20.2

Як було зазначено, магнітна проникність  $\mu$  феромагнетика залежить також від напруженості  $H$  зовнішнього магнітного поля (рис. 20.2). Щоб одержати цю залежність, користуються кривою первісного намагнічування *Oa* (див. рис. 20.1), підставляючи координати точок цієї кривої у формулу

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}. \quad (20.2)$$

При необмеженому зростанні  $H$  значення  $\mu$  прямує до одиниці (див. рис. 20.2).

Схему установки для одержання на екрані осцилографа петлі гістерезису зображено на рис. 20.3. Для дослідження магнітних властивостей

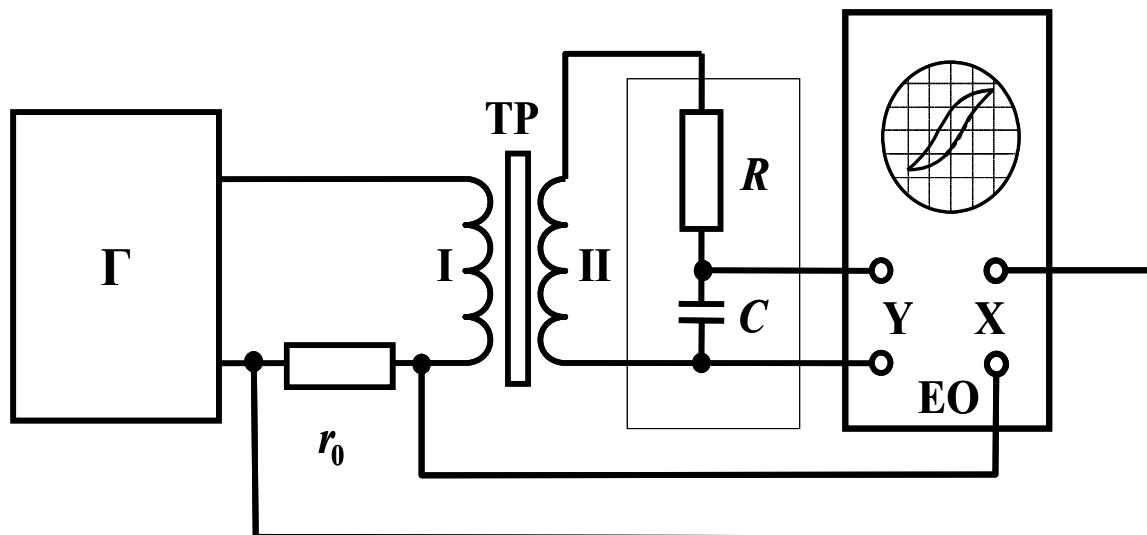


Рис. 20.3

феромагнетика використовують трансформатор (ТР) з феромагнітним осердям. Первинна обмотка I трансформатора, що має кількість витків  $N_1$ , живиться від джерела змінного струму. Ця обмотка створює змінне магнітне поле, що намагнічує осердя трансформатора.

Зв'язок напруженості магнітного поля  $H$  зі спадом напруги  $U_x$  на резисторі опором  $r_0$  у колі первинної обмотки можна отримати із закону повного струму (теореми про циркуляцію напруженості магнітного поля  $\vec{H}$ ):

$$H = \frac{N_1}{l} I_1 = \frac{N_1}{l} \frac{U_x}{r_0},$$

звідки

$$U_x = \frac{r_0 l}{N_1} H, \quad (20.3)$$

де  $l$  – довжина котушки первинної обмотки трансформатора;  $N_1$  – кількість її витків.

Різниця потенціалів на резисторі опором  $r_0$  подається на горизонтальну розгортку осцилографа ЕО (на вхід  $X$ ). Тому згідно з (20.3) горизонтальне відхилення променя на екрані осцилографа пропорційне напруженості магнітного поля  $H$ .

Для вимірювання магнітної індукції  $B$  у феромагнітному осерді використовується вторинна обмотка  $\Pi$  трансформатора. ЕРС індукції, що виникає в ній, можна знайти відповідно до закону Фарадея:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\partial \Psi}{\partial t} = -N_2 S \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (20.4)$$

де  $\Psi = N_2 \Phi = N_2 B S$  – потокозчеплення вторинної обмотки;  $\Phi$  – магнітний потік через один виток вторинної обмотки;  $N_2$  і  $S$  – кількість витків вторинної обмотки й площа поперечного перерізу осердя трансформатора відповідно.

Напруга, що пропорційна  $B$ , подається на вертикальну розгортку осцилографа (вхід  $Y$ ). Для цього у вторинне коло трансформатора ввімкнено інтегрувальну  $RC$ -ділянку кола.

Струм у вторинному колі трансформатора

$$I_2 = \mathcal{E}_i / \sqrt{R^2 + \left( \frac{1}{\omega C} - \omega L \right)^2}.$$

Параметри інтегрувальної  $RC$ -ділянки кола підбираються так, щоб виконувалися співвідношення  $R \gg \frac{1}{\omega C}$ ,  $R \gg \omega L$ , тоді  $I_2 = \mathcal{E}_i / R$ , а напруга на конденсаторі  $U_C = q/C$ , де  $q = \int_0^t I_2 dt$  — заряд конденсатора.

Напруга конденсатора  $U_C$  подається безпосередньо на вхід  $Y$  осцилографа. З урахуванням (20.4) отримаємо

$$U_y = U_C = \frac{q}{C} = \frac{1}{RC} \int_0^t \mathcal{E}_i dt = -\frac{N_2 S}{RC} B. \quad (20.5)$$

Таким чином, на входи ЕО з горизонтальним і вертикальним відхиленнями променя подаються сигнали, пропорційні відповідно напруженості зовнішнього магнітного поля  $H$  і магнітній індукції  $B$  магнітного поля в осерді трансформатора. За один період зміни струму промінь на екрані ЕО відтворює в деякому масштабі петлю гістерезису.

### Порядок виконання роботи

#### *Завдання 1. Побудова кривої первісного намагнічування*

1. Зібрати схему (див. рис. 20.3) з одним із трьох трансформаторів, указаним викладачем, і увімкнути осцилограф (схему підімкнення зазначено на робочому місці).
2. Прибрати розгортку променя й отримати на екрані ЕО світну точку, помістити її за допомогою відповідних ручок регулювання ЕО в центр екрана. Стежити під час виконання роботи за тим, щоб світна точка за відсутності розгортки променя знаходилася в центрі екрана ЕО.
3. Увімкнути генератор і встановити для сигналу частоту, величину якої зазначено на робочому місці.
4. Подати напругу на первинну обмотку трансформатора. За допомогою відповідних ручок регулювання напруги на панелі генератора й чутливості осцилографа добитися на екрані максимального розміру петлі гістерезису.
5. Знайти ціну поділки шкали ЕО для осей  $B$  і  $H$  за формулами

$$k_H = \frac{N_1 a_x}{l r_0}, \quad k_B = \frac{RC a_y}{N_2 S}, \quad (20.6)$$

де  $a_x$  і  $a_y$  – коефіцієнти підсилення по осях  $X$  і  $Y$  (визначаються на робочому місці за відповідною ручкою “Посилення” ЕО, одиниця вимірювання – В/под.). Якщо феромагнітне осердя являє собою замкнуте кільце (тор), то тоді  $l_{тор} = \pi D$ , де  $D$  – діаметр середньої лінії тора. Значення  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $r_0$ ,  $R$ ,  $C$ ,  $S$ ,  $l$  (або  $D$ ) зазначено на робочому місці. Результати занести до табл. 20.1.

6. Зменшуючи напругу на первинній обмотці трансформатора до нуля в кількість разів, зазначену викладачем, отримати сім’ю кривих гістерезису, для кожної з яких виміряти координати прямих вершин петель у поділках  $(x, y)$ . Результати занести до табл. 20.2.

Таблиця 20.1

$N_1$	$l,$ м	$r_0,$ Ом	$a_x,$ $\frac{B}{\text{под.}}$	$k_H,$ $\frac{A/\text{м}}{\text{под.}}$	$N_2$	$S,$ м <sup>2</sup>	$R,$ Ом	$C$ Ф	$a_y,$ $\frac{B}{\text{под.}}$	$k_B,$ $\frac{Tл}{\text{под.}}$

7. Для кожного значення напруги у вторинній обмотці за отриманими  $x$  і  $y$ , ураховуючи (20.6), обчислити  $B$  і  $H$  за формулами

$$H = k_H x, \quad B = k_B y.$$

Результати занести до табл. 20.2.

8. За отриманими  $B$  і  $H$  побудувати криву первісного намагнічування ( $B = f(H)$ ), а також на цьому графіку зобразити петлю гістерезису.

Таблиця 20.2

$x,$ под.	$y,$ под.	$H,$ А/м	$B,$ Тл	$\mu$

*Завдання 2. Вивчення залежності магнітної проникності від напруженості магнітного поля*

1. За розрахованими  $B$  і  $H$  (завдання 1) обчислити магнітну проникність, використовуючи формулу

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{k_B}{\mu_0 k_H} \frac{y}{x}.$$

Результати занести до табл. 20.2.

2. Використовуючи отримані значення  $\mu$ , побудувати графік  $\mu = f(H)$ .

*Завдання 3. Визначення коерцитивної сили й залишкової індукції*

- Одержати на екрані ЕО петлю гістерезису максимального розміру.
- Визначити координати  $x_c$ , а також  $y_r$  (див. рис. 20.4).
- Розрахувати  $B_r$  і  $H_c$  за формулами

$$H_c = k_H x_c, \quad B_r = k_B y_r.$$

- Проаналізувати отримані результати й зробити висновки.

### Контрольні запитання

*Варіант 1*

- Назвіть відомі типи магнетиків.

2. Який фізичний зміст магнітної проникності? Яка її залежність від напруженості магнітного поля для діа-, пара- та феромагнетиків?
3. Що таке залишкова намагніченість феромагнетика?
4. *Задача.* Визначіть магнітний момент мідної кульки радіусом 2 см, якщо вона знаходиться в магнітному полі  $\mathbf{B} = 2 \text{ Тл}$  (магнітна сприйнятливість міді  $\chi = -1,03 \cdot 10^{-5}$ ).

*Відповідь:*  $p_m = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ .

#### *Варіант 2*

1. Які відмінні риси феромагнетиків порівняно з іншими магнетиками?
2. Нарисуйте криві намагнічування для пара-, діа- і феромагнетиків.
3. Що таке коерцитивна сила феромагнетика?
4. *Задача.* Шматок сталі помістили в магнітне поле напруженістю  $\mathbf{H} = 1400 \text{ А/м}$ . Визначіть при цьому магнітну сприйнятливість сталі, якщо магнітна індукція поля всередині зразка  $\mathbf{B} = 1,24 \text{ Тл}$ .

*Відповідь:*  $\chi = 704$ .

#### *Варіант 3*

1. Що являють собою домени у феромагнетику і яка природа їхнього походження?
2. Який фізичний зміст магнітної сприйнятливості? Яка її залежність від напруженості магнітного поля для діа-, пара- і феромагнетиків?
3. У чому полягає явище магнітного гістерезису?
4. *Задача.* На постійний магніт, що має форму циліндра довжиною  $l = 15 \text{ см}$ , намотали рівномірно  $N = 1500$  витків тонкого проводу. Під час пропускання по ньому струму  $I = 3 \text{ А}$  поле поза магнітом зникло. Знайти коерцитивну силу  $H_c$  матеріалу магніту.

*Відповідь:*  $H_c = 30 \text{ кА/м}$ .

### **Лабораторна робота № 2-21 СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛОГРАФА**

*Мета роботи* – ознайомлення із будовою і принципом роботи електронного осцилографа; вимірювання за допомогою осцилографа параметрів синусоїдальної напруги; спостереження биття і фігур Ліссажу.

*Прилади й обладнання:* електронний осцилограф (ЕО); вольтметр; трансформатор; два генератори.

## Теоретичний вступ

Електронний осцилограф – прилад, що використовується для дослідження електричних величин, що періодично змінюються, шляхом спостереження форми коливань, визначення їхньої амплітуди й частоти.

Основними частинами електронного осцилографа є: електронно-променева трубка (ЕПТ); блоки вертикального (Y) і горизонтального (X) відхилень променя; генератор розгортки; блок живлення й блок синхронізації.

Електронно-променева трубка (рис. 21.1) являє собою скляну колбу, всередині якої розміщено електроди для отримання електронного пучка й керування його рухом. Повітря з колби відкачано. Електрони в ЕПТ випускаються катодом **1**, що підігрівається стороннім волоском розжарення **2**. Катод поміщено всередині циліндричного електрода **3**. Змінюючи від’ємний потенціал на ньому, регулюють кількість електронів, що досягають екрана **8**, тобто регулюють яскравість зображення. Перший анод **4** використовується для фокусування, а другий анод **5** – для прискорення електронів.

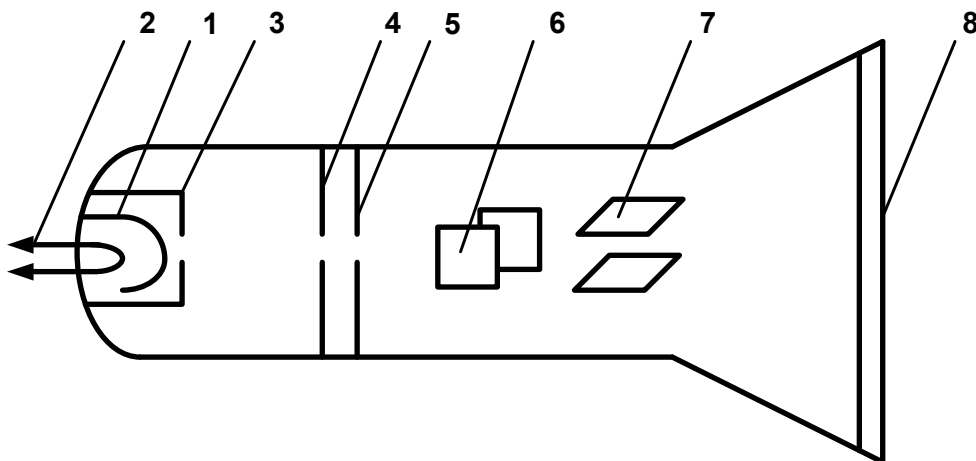


Рис. 21.1

Після проходження анода **5** електрони утворюють промінь, що йде потім між двома парами пластин **6** і **7**. Вертикально розташовані пластини **6** застосовуються для відхилення променя в горизонтальній площині (пластини X), а горизонтально розташовані пластини **7** – у вертикальній площині (пластини Y). За відсутності електричного поля між пластинами електронний промінь не відхиляється й попадає в центр екрана **8** ЕПТ. Поверхню екрана із внутрішнього боку покрито люмінесцентною речовиною, під час потрапляння електронів на люмінофор відбувається його світіння.



Відхилення променя пропорційне напрузі на відхильних пластинах. Відхилення плями на екрані ЕПТ, под., спричинене напругою 1 В на відхильних пластинах, називають чутливістю осцилографа:

$$S = \frac{y}{U}, \quad [S] = \left[ \frac{\text{под.}}{\text{В}} \right]. \quad (21.1)$$

Величину, зворотну чутливості  $S$ , називають коефіцієнтом відхилення  $K$ :

$$[K] = \left[ \frac{\text{В}}{\text{под.}} \right].$$

Для того щоб на екрані осцилографа можна було побачити, як у деякому фізичному процесі величина  $y$  змінюється залежно від зміни іншої фізичної величини  $x$  (тобто  $y = f(x)$ ), необхідно на пластини горизонтального відхилення подати напругу  $U_x$ , пропорційну  $x$ , а на пластини вертикального відхилення одночасно подати напругу  $U_y$ , пропорційну  $y$ . Тоді електронний промінь накреслить на екрані криву, що відповідає залежності  $y = f(x)$ .

На практиці часто доводиться спостерігати зміну різних фізичних величин від часу, тобто  $y = f(t)$ . При цьому на пластини вертикального відхилення необхідно подати напругу, пропорційну досліджуваній фізичній величині  $y$ , а на пластини горизонтального відхилення – напругу, що змінюється пропорційно часу.

Система зору людини інерційна, тобто сприймаються миготіння частотою 50 – 60 Гц, тому передача зорової інформації будується з урахуванням цієї особливості. Повне одноразове зображення становить один кадр, що утворюється із двох неповних зображень, так званих напівкадрів, або полів. У першому полі відбувається послідовна розгортка всіх непарних рядків розкладання зображення, у другому – всіх парних рядків, які розташовуються в проміжках між рядками першого. Відеосигнал модулює електронний промінь ЕПТ тільки під час прямого ходу променя кадрової розгортки; під час зворотного ходу електронний промінь гаситься й вертається до початку наступного поля. Частота полів вибирається такою, що дорівнює номінальній частоті живильної електричної мережі. При частоті 50 Гц кадр передається за  $1/25$  с, а при 60 Гц – за  $1/30$  с (відповідно одне поле – за  $1/50$  і  $1/60$  с). Якщо за одну секунду при частоті 50 Гц буде передано на екран 25 кадрів, то людина побачить неперервне зображення. Зокрема, якщо електронний промінь неодноразово буде повторювати той самий шлях на екрані із частотою понад 50 Гц, то внаслідок інерційності зору спостерігач побачить нерухомий графік залежності  $y = f(t)$ , який називають осцилограмою. Найчастіше осцилограма зображує форму електричного сигналу в часі. За нею можна визначити амплітуду й тривалість сигналу.

Для створення напруги, що змінюється пропорційно часу, в осцилографі є генератор розгортки. Для одержання стійкої картини на екрані

осцилографа необхідно, щоб частота напруги генератора розгортки збігалася із частотою повторення досліджуваного фізичного процесу або була меншою від цієї частоти в ціле число разів. Тому частота напруги, що виробляється генератором розгортки, може змінюватися в широкому діапазоні. За допомогою спеціального блоку синхронізації частота напруги генератора розгортки синхронізується з досліджуваною напругою будь-якої форми, що подається на пластини вертикального відхилення.

Відомо, що за допомогою вольтметра змінної напруги й ЕО дає можливість провести експериментальну перевірку співвідношення (21.2).

$$U_a = \sqrt{2} U_{ef}. \quad (21.2)$$

За допомогою ЕО можна спостерігати складання декількох електричних коливань. При складанні коливань одного напрямку із близькими частотами  $\omega$  і  $\omega + \Delta\omega$  ( $\Delta\omega \ll \omega$ )

$$\begin{aligned} x_1 &= a \cos \omega t, \\ x_2 &= a \cos(\omega + \Delta\omega)t \end{aligned}$$

результуюче коливання описується рівнянням

$$x = x_1 + x_2 = 2a \cos \frac{\Delta\omega}{2} t \cos \omega t, \quad (21.3)$$

де  $A_{биття} = \left| 2a \cos \frac{\Delta\omega}{2} t \right|$  – амплітуда результуючого коливання.

Коливання, що виникають унаслідок складання двох гармонічних коливань із близькими частотами, називають *биттями* (рис. 21.2).

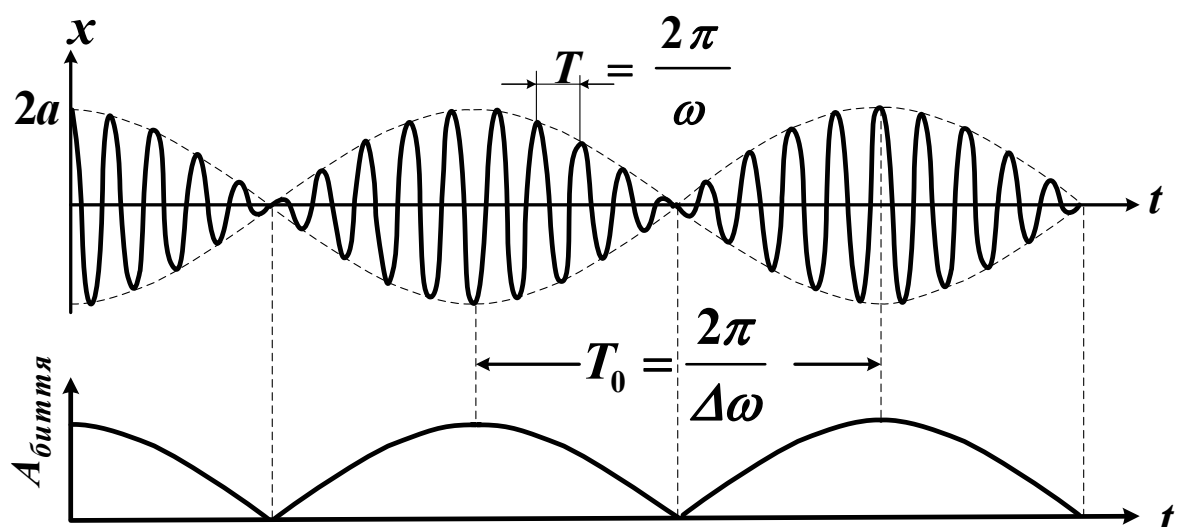


Рис. 21.2

Електронний осцилограф дає можливість також спостерігати складання взаємно перпендикулярних електричних коливань. При складанні взаємно перпендикулярних коливань із однаковими або кратними частотами на екрані ЕО промінь накреслить замкнуті траєкторії, які мають назву *фігур Ліссажу*.

Якщо складаються взаємно перпендикулярні коливання однакової частоти

$$x = a \cos(\omega t + \varphi_1),$$

$$y = b \cos(\omega t + \varphi_2),$$

то рівняння траєкторії має вигляд

$$\frac{x^2}{a^2} - 2\frac{xy}{ab}\cos(\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{y^2}{b^2} = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1),$$

що є рівнянням еліпса, орієнтація якого залежить від різниці фаз коливань. У загальному випадку вигляд фігури Ліссажу залежить від співвідношень між частотами, фазами й амплітудами коливань. Деякі окремі випадки фігур Ліссажу для коливань однакової амплітуди й різних частот при  $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi/2$  показано на рис. 21.3.

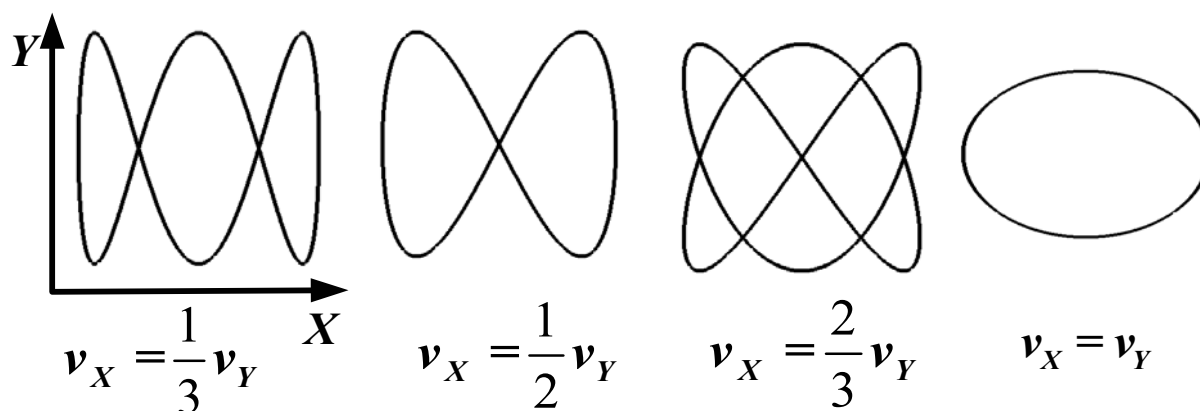


Рис. 18.1

### Порядок виконання роботи

#### Завдання 1. Визначення чутливості ЕО

1. Ознайомитися з розташуванням ручок керування ЕО (схему панелі керування ЕО зображено на робочому місці). Увімкнути ЕО й після того, як він прогріється, перевірити роботу ручок “Яскравість”, “Фокус”, “ $\leftrightarrow$ ” (зміщення променя вліво-вправо), “ $\updownarrow$ ” (зміщення променя вгору-вниз).
2. Підімкнути до входу ЕО джерело постійної напруги (схему підімкнення зазначено на робочому місці). Перевести тумблер вибору режиму роботи ЕО в положення “ $\perp$ ” (або “Закор.”). Спостерігати на екрані ЕО світну

точку (або горизонтальну пряму). Перемикаючи тумблер вибору режиму роботи ЕО, спостерігати на екрані зміщення точки (або горизонтальної прямої) від початкового положення. Визначивши за шкалою на екрані ЕО зміщення променя  $y$  (под.) і величину напруги  $U$ , що подається на вольтметр, обчислити чутливість ЕО по вертикалі відповідно до формули

$$S = \frac{y}{U}.$$

*Завдання 2. Визначення частоти й амплітуди електричних коливань, що подаються на ЕО. Перевірка зв'язку ефективних і амплітудних значень електричних величин змінних електричних сигналів*

1. Подати на вхід ЕО напругу, що змінюється гармонічно (схему підімкнення зазначено на робочому місці). Спостерігати на екрані ЕО осцилограму досліджуваної напруги (це буде синусоїда), забезпечивши її надійну синхронізацію.
2. Виміряти  $N_1$  поділок по горизонталі (великих клітинок) шкали, що відповідає  $N$  періодам синусоїди.
3. Обчислити частоту подаваної напруги за формулою

$$\nu = \frac{N}{N_1 \tau},$$

де  $\tau$  – стала часу розгортки ЕО.

4. Виміряти в поділках шкали амплітуду  $A$  сигналу. Обчислити амплітудне значення напруги, що подається, за формулою

$$U_a = \frac{A}{S}.$$

Визначивши за вольтметром ефективне значення напруги  $U_{ef}$  і знайшовши за шкалою екрана ЕО  $U_a$ , перевірити співвідношення (21.2).

*Завдання 3. Визначення частоти биття під час спостереження складання коливань однакового напрямку із близькими частотами*

1. Підімкнути виводи сигналів генераторів до первинної й вторинної обмоток трансформатора (схему підімкнення зображено на робочому місці).
2. Увімкнути один з генераторів. Установити певне значення частоти й амплітуди сигналу за допомогою ручок регулювання генератора.
3. Відімкнути перший і увімкнути другий генератори. Установити за осцилограмою таке саме значення частоти й амплітуди сигналу, як і для першого генератора.

4. Увімкнути обидва генератори. При однакових значеннях частот і амплітуд сигналів на екрані ЕО не буде відбуватися зміна амплітуди результуючого коливання.
5. Плавно змінюючи частоту одного з генераторів, добитися виникнення на екрані ЕО биттів. Використовуючи методику п. 3 завдання 2, визначити частоту биттів  $\Delta\nu$  і частоту коливань  $\nu$  і порівняти їх між собою. Спостерігати зміни періоду биттів при зміні різниці частот коливань, що складаються.
6. Визначити максимальне значення амплітуди результуючого коливання.

*Завдання 4. Спостереження складання взаємно перпендикулярних коливань*

1. Для спостереження фігур Ліссажу за допомогою ЕО необхідно подати з одного генератора сигнал на вхід Х, а з іншого – на вхід Y (при цьому генератор розгортки осцилографа має бути вимкнений). Схему під'єднання осцилографа до генератора вказано на робочому місці.
2. Змінюючи частоту одного з генераторів, спостерігати фігури Ліссажу, зображені на рис. 21.3.
3. Для кожної з отриманих фігур нарисувати їхню форму, визначити частоти сигналів  $\nu_X$  і  $\nu_Y$ , використовуючи методику п. 3 завдання 2, а також знайти відношення  $\nu_X/\nu_Y$ .

### Контрольні запитання

*Варіант 1*

1. Поясніть призначення, будову і принцип роботи електронно-променевої трубки.
2. Що таке чутливість осцилографа й коефіцієнт відхилення променя?
3. Що таке биття й унаслідок чого вони виникають? Виведіть рівняння результуючого коливання при биттях.
4. *Задача.* Який буде мати вигляд на ЕО фігура Ліссажу, якщо на Х пластини ЕО подати сигнал  $U_x = U_1 \cos \omega t$ , а на Y пластини –  $U_y = U_2 \sin \omega t$ ? Отримати рівняння траєкторії.

Відповідь: еліпс,  $\frac{U_x^2}{U_1^2} + \frac{U_y^2}{U_2^2} = 1$ .

*Варіант 2*

1. Для чого призначено генератор розгортки в осцилографі?
2. Виведіть формулу, що зв'яже ефективне й амплітудне значення змінної напруги.

3. За яких умов виникають фігури Ліссажу? Виведіть рівняння фігури Ліссажу, якщо частоти коливань, що складаються, дорівнюють одна одній.
4. *Задача.* Два електричних гармонійних коливання  $U_1 = U_0 \cos(50\pi t)$  й  $U_2 = U_0 \cos(51\pi t)$  подаються на первинну обмотку трансформатора. Чому дорівнює період биттів?  
*Відповідь:* 2 с.

### Варіант 3

1. Які переваги використання ЕО під час вивчення електричних сигналів порівняно з іншими електровимірювальними приладами?
2. Яким чином за допомогою ЕО можна визначити частоту електричних коливань?
3. Поясніть метод вектора амплітуди, що обертається, під час розгляду складання коливань одного напрямку.
4. *Задача.* На яку максимальну кількість поділок відхилиться промінь на екрані ЕО чутливістю  $S = 0,5$  под./В, якщо підімкнений до нього вольтметр змінної напруги показав  $U = 1,42$  В?  
*Відповідь:* на одну поділку.

## Лабораторна робота № 2-22 ЗГАСАЮЧІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛИВАННЯ

*Мета роботи* – вивчення згасаючих коливань у коливальному контурі при різних величинах активного опору контуру й визначення логарифмічного декременту згасання.

*Прилади й обладнання:* осцилограф (ЕО); генератор прямокутних імпульсів; котушка індуктивності  $L$ ; набір резисторів; конденсатор; сполучні проводи.

### Теоретичний вступ

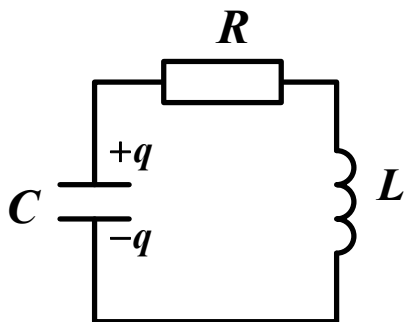


Рис. 22.1

Розглянемо контур з послідовно з'єднаних резистора  $R$ , котушки індуктивності  $L$  і конденсатора  $C$  (рис. 22.1). Нехай у момент часу  $t = 0$  заряд конденсатора дорівнює  $q_0$ . Різниця потенціалів між обкладками конденсатора  $U_0 = q_0/C$ . Визначимо залежність заряду конденсатора  $q$  і різниці потенціалів  $U$  від часу  $t$ . Відповідно до закону Ома

$$IR + U = \mathcal{E}. \quad (22.1)$$

Як ЕРС  $\mathcal{E}$  у контурі діє ЕРС самоіндукції  $\mathcal{E}_S = -L \frac{dI}{dt}$ . Ураховуючи, що

$I = \frac{dq}{dt}$ , рівняння (22.1) можна записати у вигляді

$$R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (22.2)$$

Поділивши (22.2) на  $L$  з урахуванням рівності  $\frac{dI}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2}$ , отримаємо

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0, \quad \text{або} \quad \frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0, \quad (22.3)$$

де  $\beta = \frac{R}{2L}$  – коефіцієнт згасання;  $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$  – власна циклічна частота електричних коливань у коливальному контурі. Розв'язок рівняння (22.3) має вигляд

$$q = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi), \quad (22.4)$$

де  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ . Оскільки

$$\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2} > 0,$$

тобто для збудження коливань необхідне виконання умови

$$\frac{1}{LC} > \frac{R^2}{4L^2} \quad \text{або} \quad \omega_0^2 > \beta^2. \quad (22.5)$$

Поділивши вираз (22.4) на ємність  $C$ , отримаємо напругу на конденсаторі

$$U = \frac{q_0}{C} e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi). \quad (22.6)$$

Графік цієї функції зображено на рис. 22.2. Період згасаючих коливань

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}. \quad (22.7)$$

Очевидно, що зі збільшенням коефіцієнта згасання  $\beta$  період  $T$

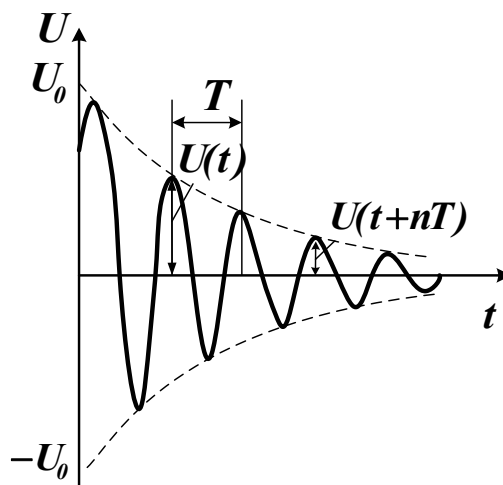


Рис. 22.2

збільшується.

Амплітуда коливань напруги, як видно із співвідношення (22.6), зменшується з часом за експонентним законом (див. пунктирну лінію на рис. 22.2):

$$U(t) = U_0 e^{-\beta t}. \quad (22.8)$$

Відношення амплітуд, які відповідають моментам часу, що відрізняється на один період, буде

$$\frac{U(t)}{U(t+T)} = e^{\beta T}. \quad (22.9)$$

Це відношення називають *декрементом згасання*, а його натуральний логарифм – *логарифмічним декрементом згасання*, тобто

$$\lambda = \ln \frac{U(t)}{U(t+T)} = \beta T. \quad (22.10)$$

Швидкість згасання коливань можна також охарактеризувати часом релаксації  $\tau$ , протягом якого амплітуда коливань зменшується в  $e$  разів, тобто

$$\frac{U(t)}{U(t+\tau)} = e, \quad (22.11)$$

але аналогічно формулі (22.9)

$$\frac{U(t)}{U(t+\tau)} = e^{\beta \tau}. \quad (22.12)$$

Порівнявши (22.11) і (22.12), одержимо

$$\tau = \frac{1}{\beta}, \quad (22.13)$$

тоді

$$\lambda = \beta T = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N_e}, \quad (22.14)$$

де  $N_e$  – кількість коливань, протягом яких амплітуда зменшується в  $e$  разів.

Для експериментального вивчення згасаючих електричних коливань використовується електрична схема, зображена на рис. 22.3. На вхід “1 – 2” коливального конуру

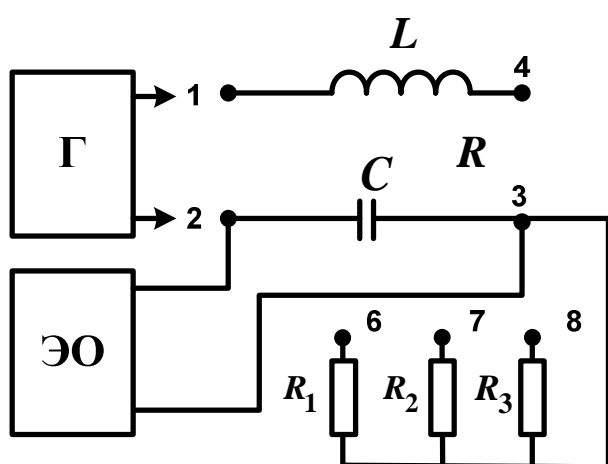


Рис. 22.3



подаються прямокутні імпульси напруги із частотою 1 кГц від генератора Г. Напруга, що знімається з конденсатора (між точками 2 і 3), подається на вхід У осцилографа. Згасаючі коливання, що виникають у контурі, спостерігаються на екрані ЕО.

### Порядок виконання роботи

*Завдання 1. Визначення параметрів згасаючих коливань, які спостерігаються на екрані ЕО*

1. Увімкнути живлення лабораторного стенда, осцилографа, генератора.
2. З'єднати перемичкою клеми "4" і "3" (див. рис. 22.3). При цьому прямокутні імпульси від генератора подаються на коливальний контур, що складається з котушки індуктивності, величину  $L$  якої необхідно визначити, конденсатора  $C = 680$  пФ, власного активного опору  $R_L$  індуктивності  $L$ .
3. Спостерігаючи на екрані ЕО зображення сигналу, визначити його період  $T$  за формулою

$$T = \frac{\tau m}{n}, \quad (22.15)$$

де  $\tau$  – тривалість розгортки, мкс/под. (визначається за положенням відповідної ручки ЕО);  $m$  – кількість великих поділок (клітинок) на екрані ЕО, що відповідає  $n$  періодам (рекомендується користуватися розгортку тривалістю 20 мкс/под.).

4. Виміряти в поділках шкали екрана ЕО амплітуди  $U(t)$  і  $U(t + nT)$  коливань, віддалених на  $n$  періодів, після чого розрахувати коефіцієнт згасання  $\beta$  за виразом

$$\beta = \frac{1}{nT} \ln \frac{U(t)}{U(t + nT)}. \quad (22.16)$$

5. За отриманими  $T$  і  $\beta$  розрахувати логарифмічний декремент згасання  $\lambda$  за співвідношенням

$$\lambda = \beta T. \quad (22.17)$$

Результати вимірювань і обчислень занести до табл. 22.1.

*Завдання 2. Визначення індуктивності  $L$  і активного опору  $R_L$  котушки індуктивності*

1. За відомим значенням ємності конденсатора  $C$  і даними, отриманими у завданні 1, розрахувати індуктивність  $L$  і активний опір  $R_L$  котушки індуктивності за формулами

$$L = \frac{T^2}{4\pi^2 C}, \quad R_L = 2\beta L. \quad (22.18)$$

Результати занести до табл. 22.1.

Таблиця 22.1

Параметри згасаючих коливань	З'єднання клем			
	“4” – “3” $R_{\text{доп}} = 0$	“4” – “6” $R_{\text{доп}} = R_1$	“4” – “7” $R_{\text{доп}} = R_2$	“4” – “8” $R_{\text{доп}} = R_3$
Тривалість розгортки $\tau$ , с				
Кількість великих поділок $m$				
Кількість періодів $n$				
Період $T$ , с				
Коефіцієнт згасання $\beta$ , с <sup>-1</sup>				
Логарифмічний декремент згасання $\lambda$				
Індуктивність $L$ , Гн				
Опір котушки $R_L$ , Ом				

*Завдання 3. Вивчення залежності параметрів згасаючих коливань від опору контуру*

1. Відімкнути перемичку клем “4” і “3”. З'єднати перемичкою клеми “4” і “6”, при цьому в коливальному контурі  $R_1 = 200$  Ом. Визначити період, коефіцієнт згасання й логарифмічний декремент згасаючих коливань, використовуючи методику завдання 1.
2. Повторити дослід і розрахувати параметри згасаючих коливань для випадків, коли перемичка з'єднує клеми “4” і “7” ( $R = R_L + R_2$ ), а також клеми “4” і “8” ( $R = R_L + R_3$ ), результати занести до табл. 22.1 ( $R_2 = 600$  Ом,  $R_3 = 1100$  Ом).

3. Побудувати графік  $\lambda = \lambda(R)$ . Зробити висновки.

### Контрольні запитання

#### Варіант 1

1. Поясніть, як відбувається виникнення згасаючих електричних коливань у коливальному контурі.
2. Запишіть диференціальне рівняння згасаючих електричних коливань і його розв'язок.
3. Зобразіть графічно процес зміни струму в колі, в якому виникають згасаючі електричні коливання.
4. *Задача.* Через який час амплітуда коливань напруги на конденсаторі в реальному коливальному контурі зменшиться в 2 рази, якщо  $L = 0,1$  мГн,  $C = 4$  мкФ,  $R = 2$  Ом?

*Відповідь:*  $t = 69,3$  мкс.

#### Варіант 2

1. Що таке коефіцієнт згасання? Від чого він залежить?
2. Яким чином у коливальному контурі можна одержати монотонне зменшення заряду конденсатора, тобто відсутність коливань?
3. Що таке логарифмічний декремент згасання? Чому він дорівнює, якщо відомі  $R$ ,  $L$  і  $C$  коливального контуру?
4. *Задача.* Знайдіть час одного коливання амплітуди напруги на конденсаторі в реальному коливальному контурі, якщо  $L = 0,2$  мГн,  $C = 2$  мкФ,  $R = 0,5$  Ом.

*Відповідь:*  $t = 126$  мкс.

#### Варіант 3

1. Вивести рівняння згасаючих електричних коливань.
2. Що таке час релаксації електричних коливань? Чому він дорівнює, якщо відомі  $R$ ,  $L$  і  $C$  коливального контуру?
3. Поясніть залежність  $\lambda = \lambda(R)$  на прикладі графіка, отриманого в завданні 3.
4. *Задача.* Чому дорівнює ємність конденсатора в реальному коливальному контурі, якщо  $L = 0,4$  мГн,  $R = 1$  Ом? Період коливань напруги на конденсаторі  $T = 200$  мкс.

*Відповідь:*  $C = 2,5$  мкФ.

## Лабораторна робота № 2-23 ВИВЧЕННЯ ВИМУШЕНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОЛИВАНЬ

*Мета роботи* – вивчення вимушених коливань і резонансу струмів та напруг у колі, що містить ємність, індуктивність і омичний опір.

*Прилади й обладнання:* генератор Л-31; конденсатори  $C_1$  і  $C_3$  з відомою ємністю й конденсатор  $C_2$  з невідомою ємністю; котушка індуктивності  $L$  із власним активним опором  $R$ ; цифровий вольтметр В 7-16А; цифровий ампервольтметр В 7-21А.

### Теоретичний вступ

Щоб збудити в електричному колі, що містить ємність, котушку індуктивності й омичний опір, вимушені коливання струму, достатньо ввімкнути послідовно з елементами кола джерело змінної напруги (рис. 23.1), величина якого

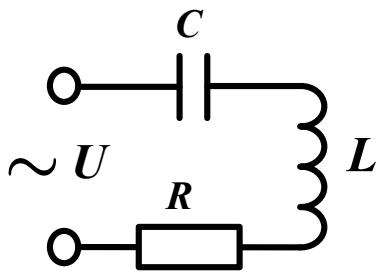


Рис. 23.1

$$U = U_m \cos \omega t. \quad (23.1)$$

Запишемо диференціальне рівняння вимушених коливань:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \frac{U_m}{L} \cos \omega t, \quad (23.2)$$

де  $\beta = \frac{R}{2L}$  – коефіцієнт згасання;  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  –

циклічна частота власних незгасаючих коливань.

Частинний розв'язок рівняння (23.2) має вигляд

$$q = q_m \cos(\omega t - \psi), \quad (23.3)$$

де

$$q_m = \frac{U_m}{L \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}, \quad \text{tg } \psi = \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}.$$

Продиференціювавши вираз (23.3) за  $t$ , знайдемо силу струму в контурі при встановлених коливаннях:

$$I = -\omega q_m \sin(\omega t - \psi) = I_m \cos(\omega t - \varphi), \quad (23.4)$$

де  $I_m = \omega q_m$ ;  $\varphi = \psi - \frac{\pi}{2}$  – зсув за фазою між струмом і прикладеною напругою.

Відповідно до рівності (23.4)

$$U_R = R I_m \cos(\omega t - \varphi). \quad (23.5)$$

Поділивши вираз (23.3) на ємність конденсатора, отримаємо напругу на конденсаторі

$$U_C = \frac{q_m}{C} \cos(\omega t - \psi) = U_{Cm} \cos\left(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}\right). \quad (23.6)$$

Помноживши похідну функції (23.4) на  $L$ , одержимо напругу на котушці індуктивності

$$U_L = L \frac{dI}{dt} = -\omega L I_m \sin(\omega t - \varphi) = U_{Lm} \cos\left(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right), \quad (23.7)$$

де

$$U_{Lm} = \omega L I_m.$$

Із порівняння формул (23.4) – (23.7) видно, що напруга на конденсаторі відстає за фазою від струму на  $\pi/2$ , а напруга на індуктивності випереджає струм на  $\pi/2$ . Напруга на активному опорі знаходиться у фазі зі струмом.

Резонансна частота для заряду  $q$  й напруги на конденсаторі  $U_C$  буде

$$\omega_{\text{рез}} = \omega_{U_{\text{рез}}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} < \omega_0. \quad (23.8)$$

Резонансні криві для  $U_C$  при різних значеннях коефіцієнта згасання  $\beta$  зображено на рис. 23.2 (резонансні криві для  $q$  мають такий самий вигляд). При  $\omega \rightarrow 0$  резонансні криві збігаються в одній точці з ординатою  $U_{Cm} = U_m$ , що дорівнює напрузі, яка виникає на конденсаторі під час підімкнення його до джерела постійної напруги  $U_m$ . Під час резонансу максимум буде тим вищим і гострішим, чим меншою буде величина  $\beta$ , тобто чим меншим буде активний опір і більшою індуктивність контуру.

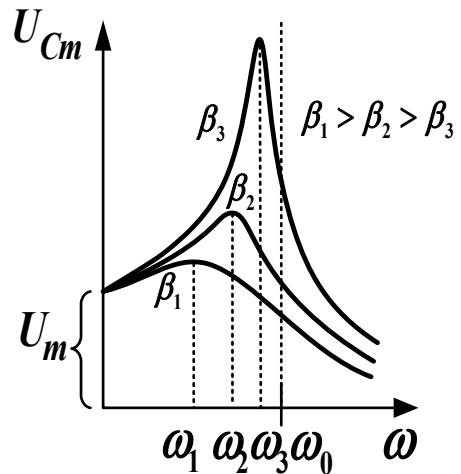


Рис. 23.2

Амплітуда сили струму має максимальне значення при  $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$ .

Отже, резонансна частота для сили струму збігається з власною частотою контуру  $\omega_0$ :

$$\omega_{I_{рез}} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (23.9)$$

Резонансні криві для сили струму показано на рис. 23.3, з якого видно, що при  $\omega = 0$  сила струму  $I_m = 0$  (при постійній напрузі сталий струм у колі з конденсатором текти не може).

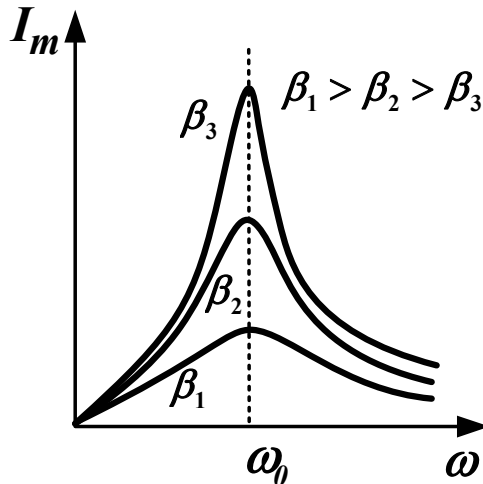


Рис. 23.3

### Порядок виконання роботи

*Завдання 1. Вивчення залежності сили струму в коливальному контурі від частоти джерела*

1. Зібрати схему відповідно до рис. 23.4. Як ємність використовувати конденсатор  $C_1 = 0,22 \text{ мкФ}$ . Під час монтажу схеми звернути увагу на те, щоб “нульові” клеми всіх приладів були з’єднані разом. Ампервольтметр В 7-21А переключити в режим вимірювань змінного струму. Генератор Л-31 увімкнути в режим генерації синусоїдальних коливань.

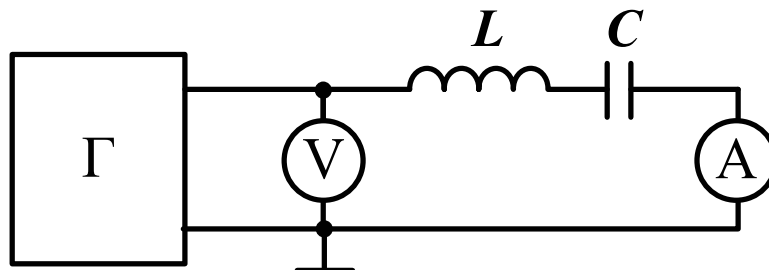


Рис. 23.4

2. Увімкнути живлення приладів. Установити вихідну напругу генератора Л-31 такою, що дорівнює 1 В, шляхом обертання ручки регулювання

“Рівень” і підтримувати її постійною під час вимірювань. Змінюючи частоту коливань за допомогою ручки регулювання на генераторі, за показаннями ампервольтметра В 7-21А добитися максимального значення сили струму. Визначити при цьому резонансну частоту сили струму  $\nu_{01}$ .

3. Послідовно замінюючи конденсатор  $C_1$  конденсаторами  $C_2$  і  $C_3 = 0,068$  мкФ і проводячи аналогічні вимірювання, знайти резонансні частоти струмів  $\nu_{02}$  і  $\nu_{03}$ .
4. За отриманим значенням резонансних частот  $\nu_{01}$ ,  $\nu_{02}$  і  $\nu_{03}$  обчислити величини ємності  $C_2$  та індуктивності  $L$ . Для цього зробити таке:
  - розрахувати циклічні частоти  $\omega_{0i} = 2\pi\nu_{0i}$ ;
  - знайти значення  $1/\omega_{0i}^2$  (результати занести до табл. 23.1);
  - нанести на графіку  $1/\omega_{0i}^2 = f(C_i)$  точки, що відповідають  $C_1$  і  $C_3$ .

Таблиця 23.1

$C_i$	$\nu_{0i}$	$\omega_{0i}$	$1/\omega_{0i}^2$
$C_1$			
$C_2$			
$C_3$			

Із формули 23.9 видно, що

$$L = \frac{\Delta(1/\omega_0^2)}{\Delta C}, \quad (23.10)$$

де  $\Delta(1/\omega_0^2)$  – зміна  $(1/\omega_0^2)$  при відповідній зміні ємності конденсатора на величину  $\Delta C$ . Теоретично залежність  $1/\omega_0^2 = f(C)$  має бути лінійною.

Експериментальні точки  $(1/\omega_{01}^2, C_1)$  і  $(1/\omega_{03}^2, C_3)$  наносять на графік і екстраполюють лінійною залежністю. За графіком визначається ордината  $1/\omega_{02}^2$  і відповідне їй значення абсциси  $C_2$ .

За формулою (23.10) і графіком визначається індуктивність котушки  $L$  (рис. 23.5).

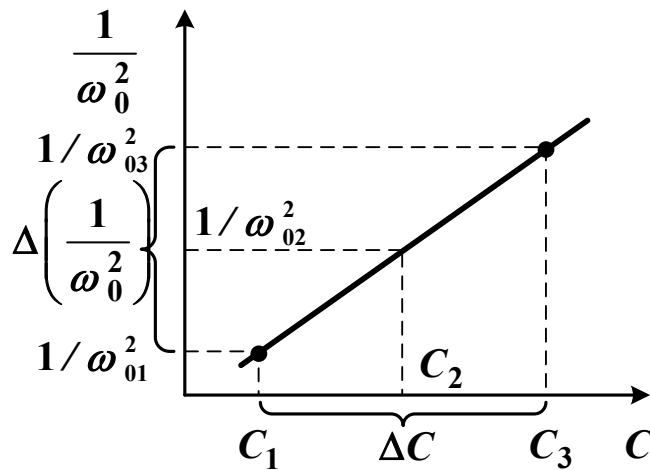


Рис. 23.5

*Завдання 2. Вивчення залежності напруги на конденсаторі від частоти джерела*

1. Зібрати схему відповідно до рис. 23.6. Як ємність використовувати конденсатор  $C_3$ . Під час монтажу схеми звернути увагу на те, щоб “нульові” клеми всіх приладів були з'єднані разом. Ампервольтметр В 7-21А перемкнути в режим вимірювання змінної напруги. Генератор Л-31 увімкнути в режим генерації синусоїдальних коливань.

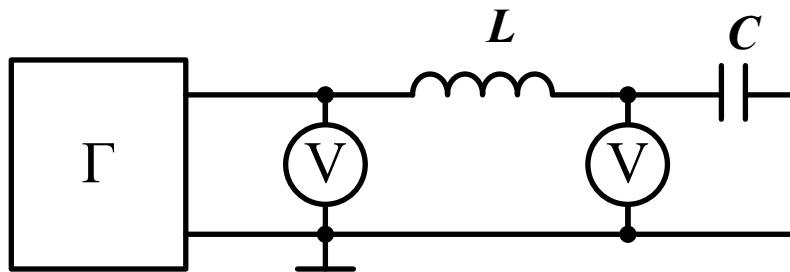


Рис. 23.6

2. Увімкнути живлення приладів. Установити вихідну напругу генератора Л-31 такою, що дорівнює 1 В, шляхом обертання ручки регулювання “Рівень” і підтримувати її постійною під час вимірювань. Змінюючи частоту коливань за допомогою ручки регулювання на генераторі, за показаннями ампервольтметра В 7-21А добитися максимального значення напруги на конденсаторі. Визначити при цьому резонансну частоту напруги  $\nu_{рез}$  на конденсаторі.
3. Розрахувати циклічну резонансну частоту  $\omega_{рез} = 2\pi \nu_{рез}$ .
4. Використовуючи отримане під час виконання завдання 1 значення резонансної частоти струму  $\omega_{03}$  й урахуваючи формулу (23.8),



обчислити за відмінністю частот  $\omega_{рез}$  і  $\omega_{03}$  коефіцієнт згасання  $\beta$  за формулою

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega_0^2 - \omega_{рез}^2}{2}}$$

5. Ураховуючи, що  $\beta = R/2L$ , за отриманим в завданні 1 значенням індуктивності  $L$  й розрахованою в цьому завданні величиною  $\beta$  визначити омичний опір кола  $R = 2\beta L$ .

### Контрольні запитання

#### Варіант 1

1. Які коливання називають вимушеними? Як збуджуються незгасаючі коливання в коливальному контурі?
2. Що називають коефіцієнтом згасання  $\beta$  коливального контуру?
3. Запишіть значення зсуву фаз між струмом і напругою на конденсаторі.
4. *Задача.* До складу коливального контуру входять котушка індуктивності  $L = 2$  мкГн, конденсатор ємністю  $C = 0,08$  мкФ. Визначіть довжину хвилі, на якій резонує контур.  
*Відповідь:*  $\lambda = 754$  м.

#### Варіант 2

1. Поясніть методику визначення ємності конденсатора  $C$ , використовуючи кілька конденсаторів відомої ємності й котушку індуктивності.
2. Що називають резонансом струму й за якої умови він досягається? Зобразіть відповідний графік.
3. Який зсув фаз між струмом і напругою на індуктивності?
4. *Задача.* До складу коливального контуру входять конденсатор ємністю  $C = 5$  мкФ, котушка індуктивності  $L = 0,2$  Гн. Визначіть максимальну силу струму  $I_m$  в контурі, якщо максимальна різниця потенціалів на обкладках конденсатора  $U_m = 90$  В. Омичним опором  $R$  контуру знехтувати.  
*Відповідь:*  $I_m = 0,45$  А.

#### Варіант 3

1. Отримайте диференціальне рівняння вимушених коливань у коливальному контурі.
2. Чому дорівнює резонансна частота для напруги на конденсаторі?
3. Як виділяється електромагнітне коливання потрібної довжини хвилі в радіоприймальних пристроях?

4. *Задача.* Яка має бути ємність конденсатора коливального контуру, щоб можна було настроїти приймач на частоту  $\nu = 106,6$  МГц, якщо  $L = 2$  мкГн,  $R = 20$  Ом?  
*Відповідь:*  $C = 1,1$  пкФ.

### Лабораторна робота № 2-24 ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ У ПРОВІДНИКАХ

*Мета роботи* – вивчення закономірностей поширення електромагнітного поля в провідниках; визначення товщини скін-шару залежно від частоти змінного електромагнітного поля всередині провідників.

*Прилади й обладнання* – генератор; соленоїд; вимірювальна котушка; мілівольтметр; порожнисті циліндричні металеві екрани з різною товщиною стінок.

#### Теоретичний вступ

Під час проходження по провіднику постійного струму сила струму стала й при цьому магнітне поле всередині провідника не змінюється в часі. Під час проходження по провіднику змінного струму магнітне поле всередині провідника змінюється в часі й у провіднику виникають вихрові струми самоіндукції.

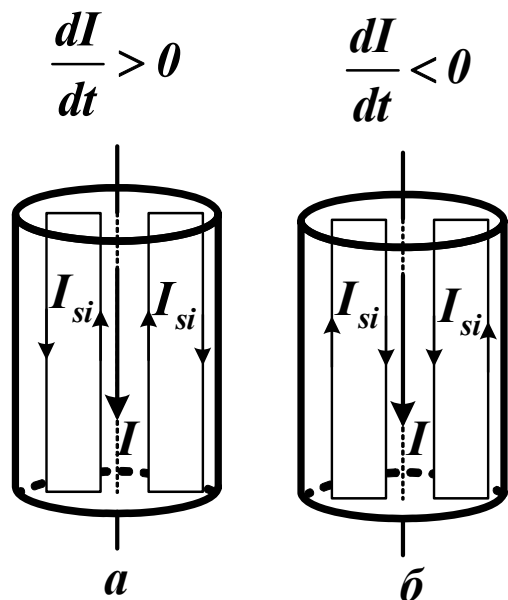


Рис. 24.1

Для циліндричного провідника вихрові струми лежать у площинах, що проходять через вісь циліндра. Напрямок струмів можна визначити за правилом Ленца. На рис. 24.1, а показано напрямки вихрових струмів при зростанні основного струму, а на рис. 24.1, б – при його спаданні. В обох випадках вихрові струми напрямлені таким чином, що вони протидіють зміні основного струму всередині провідника й сприяють його зміні поблизу поверхні. Чим далі від осі провідника, тим більша амплітуда коливань сили струму. Максимальною густиною змінного струму буде на по-

верхні провідника й мінімальною – на його осі. Такий перерозподіл струму по перерізу провідника отримав назву *скін-ефекту* (від англ. *skin* – шкіра).

Для теоретичного опису скін-ефекту й визначення товщини скін-шару (глибини проникнення поля в металевий провідник) розглянемо поширення електромагнітного поля в однорідному провідному неферомагнітному середовищі, у якому немає електричних зарядів (при цьому діелектрична й магнітна проникності  $\epsilon = \mu = 1$ , об'ємна густина заряду в середовищі  $\rho_{вiл} = 0$ , питома електрична провідність середовища  $\sigma = \text{const}$ ).

Електромагнітна хвиля в загальному випадку описується системою рівнянь Максвелла:

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}; \quad \text{rot}\vec{H} = \vec{j}_{np} + \vec{j}_{зм}; \quad \text{div}\vec{D} = \rho_{вiл}; \quad \text{div}\vec{B} = 0. \quad (24.1)$$

$$\text{Крім того, } \vec{D} = \epsilon\epsilon_0\vec{E}, \quad \vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}, \quad \vec{j}_{np} = \sigma\vec{E}, \quad \vec{j}_{зм} = \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}.$$

Ураховуючи вибрані властивості середовища, у якому відбувається поширення електромагнітної хвилі, та нехтуючи струмом зміщення для провідників, після деяких перетворень одержимо рівняння для  $\vec{E}$  і  $\vec{H}$ :

$$\Delta\vec{E} = \mu_0\sigma\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}; \quad \Delta\vec{H} = \mu_0\sigma\frac{\partial\vec{H}}{\partial t}. \quad (24.2)$$

Розглянемо поширення плоскої монохроматичної хвилі в провідному середовищі в напрямку  $\mathbf{z} > 0$  (рис. 24.2), вважаючи амплітуду напруженості магнітного поля на межі  $\mathbf{z} = 0$  заданою й такою, що дорівнює  $H_0$ .

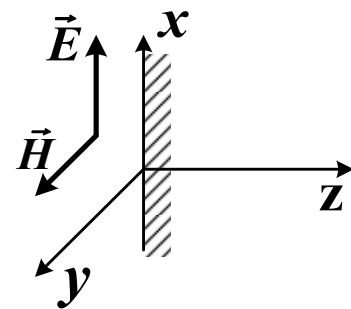


Рис. 24.2

У цьому випадку рівняння магнітного поля одновимірної плоскої хвилі можна записати так:

$$\frac{\partial^2\vec{H}(z,t)}{\partial z^2} = \mu_0\sigma\frac{\partial\vec{H}(z,t)}{\partial t}. \quad (24.3)$$

Розв'язок цього рівняння має вигляд

$$H(z,t) = H_0 e^{-z/\gamma} \cos\left(\omega t - \frac{z}{\gamma}\right), \quad (24.4)$$

де

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu_0\sigma\nu}}; \quad (24.5)$$

$H_0 e^{-z/\gamma}$  – закон зміни амплітуди вздовж осі  $z$ ;

$\cos\left(\omega t - \frac{z}{\gamma}\right)$  визначає зміну напруженості магнітного поля в часі в певній

точці середовища;  $\omega = 2\pi\nu$  – циклічна частота електромагнітного поля;  $\nu$  – частота електромагнітного поля.

З виразу (24.4) випливає, що амплітуда напруженості магнітного поля експоненціально спадає вглиб провідника. Амплітуда поля зменшується в  $e$  разів на відстані  $z = \gamma$  від поверхні провідного середовища. Цю відстань  $\gamma$  називають товщиною скін-шару.

Напруженість електричного поля хвилі завжди перпендикулярна до напруженості магнітного поля. Електричне поле згасає за таким самим законом, як і магнітне поле. Тому майже весь струм зосереджений у скін-шарі товщиною  $\gamma$ . Глибина проникнення електромагнітного поля в речовину згідно з (24.5) залежить як від частоти зміни електромагнітного поля, так і від провідних властивостей середовища. Візьмемо як приклад мідь, для якої  $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$  См/м. Для “побутового” струму ( $\nu = 50$  Гц)  $\gamma \approx 1$  см, а для струму частотою  $\nu = 5$  кГц  $\gamma \approx 1$  мм, для електромагнітних хвиль побутової мікрохвильової печі частотою  $\nu = 2,2$  ГГц товщина скін-шару  $\gamma \approx 1,5$  мкм. Для фарфору з  $\sigma = 10^{-12}$  См/м при такій же частоті мікрохвиль ця товщина  $\gamma = 10$  км. Таким чином, струми високої частоти течуть тільки в поверхневому шарі провідника.

Схему установки для вивчення згасання електромагнітного поля зображено на рис. 24.3.

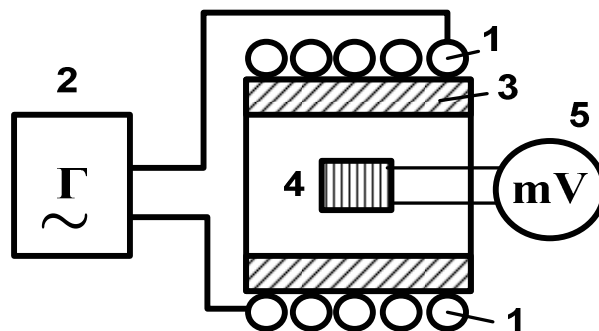


Рис. 24.3

Змінне електромагнітне поле низької частоти створюється всередині довгого соленоїда **1** при підімкненні до нього генератора **2** (типу ГЗ-24). Силкові лінії магнітного поля при цьому орієнтовані паралельно до осі соленоїда. Усередині соленоїда розташовано металевий екран **3**, товщину стінок якого зазначено на ньому.

Напруженість магнітного поля на осі соленоїда вимірюється за величиною ЕРС індукції, наведеної у вимірювальній котушці **4**. Величина ЕРС фіксується мілівольтметром змінного струму **5** (типу МВЛ-2М).

За законом Фарадея величина ЕРС індукції, наведеної у вимірювальній котушці **4**, буде

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d}{dt} [B_0 SN \cos \omega t] = 2\pi\nu\mu_0 SN H_0 \sin \omega t = \mathcal{E}_0 \sin \omega t,$$

де  $\mathcal{E}_0 = 2\pi\nu\mu_0 SN H_0 = kH_0$  – амплітуда ЕРС;  $S$  – площа поперечного перерізу вимірювальної котушки;  $N$  – кількість витків вимірювальної котушки;  $H_0$  – амплітуда напруженості магнітного поля на осі соленоїда.

Амплітуда  $H_0$  на осі соленоїда залежить від провідних властивостей металевих екрана й товщини його стінок. Тому відношення ЕРС, що вимірюються за наявності металевих екранів і його відсутності, дорівнює відношенню амплітуд напруженості магнітного поля зовні й усередині екрана:

$$\frac{\mathcal{E}(z)}{\mathcal{E}_0} = \frac{H(z)}{H_0} = e^{-z/\gamma} = e^{-z\sqrt{\pi\mu_0\sigma\nu}}. \quad (24.6)$$

Із формул 24.5 і 24.6 випливає, що

$$\gamma_{екс} = \frac{\Delta z}{\Delta \ln \frac{\mathcal{E}_0}{\mathcal{E}(z)}}, \quad (24.7)$$

де  $\Delta z$  – приріст  $z$  при відповідній зміні логарифма на величину  $\Delta \ln \dots$ .

Теоретично залежність  $\ln \frac{\mathcal{E}_0}{\mathcal{E}(z)} = f(z)$  має бути лінійною (рис. 24.4).

Однак через похибки вимірювань виникають відхилення експериментальних точок від лінійної залежності. Тому експериментальні точки наносять на графік і графічно екстраполюють лінійною залежністю. Далі за формулою (24.7) і графіком визначається товщина скін-шару  $\gamma_{екс}$ .

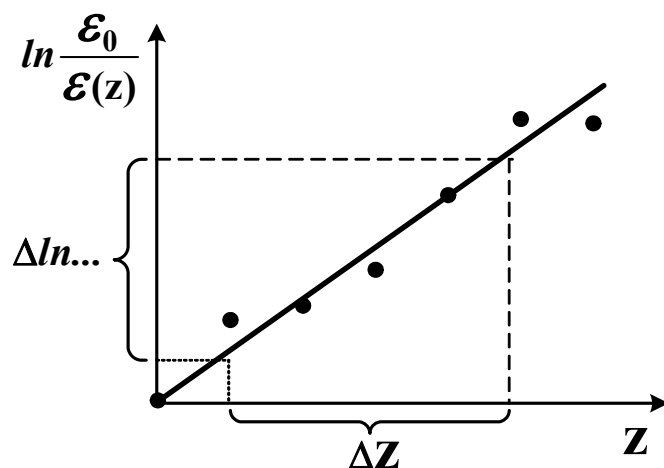


Рис. 24.4

### Порядок виконання роботи

*Визначення товщини скін-шару залежно*

*від частоти змінного електромагнітного поля всередині провідників*

1. Увімкнути генератор. Подати в обмотку соленоїда сигнал частотою, зазначеною викладачем (зазвичай  $\nu = 50$  Гц ). Виміряти ЕРС  $\mathcal{E}_0$ , індуковану у вимірювальній котушці 4. Результати занести до табл. 24.1.

Таблиця 24.1

$\nu$ , Гц	$\mathcal{E}_0$ , В	z, мм	1	1,5	2	3	$\gamma_{екс}$	$\gamma_{теор}$
		$\mathcal{E}(z)$ , В						
		$\frac{\mathcal{E}_0}{\mathcal{E}(z)}$						
		$\ln \frac{\mathcal{E}_0}{\mathcal{E}(z)}$						

2. Установити екран з товщиною стінки  $z = 1$  мм. Визначити величину ЕРС  $\mathcal{E}(z_1)$ . Аналогічні вимірювання виконати з екранами товщиною 1,5; 2;

3 мм. Розрахувати  $\frac{\mathcal{E}_0}{\mathcal{E}(z)}$  і  $\ln \frac{\mathcal{E}_0}{\mathcal{E}(z)}$ . Дані занести до табл. 24.1.

3. Побудувати графік залежності  $\ln \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon(z)} = f(z)$ . За графіком визначити

$$\gamma_{\text{екс}} = \frac{\Delta z}{\Delta f(z)} \text{ для даного значення частоти } \nu.$$

4. Порівняти експериментальне значення товщини скін-шару  $\gamma_{\text{екс}}$  з теоретичним  $\gamma_{\text{теор}}$ , яке розраховується за формулою (24.5) (для алюмінію  $\sigma = 3,6 \cdot 10^7$  Ом/м).
5. Установити інше значення частоти за вказівкою викладача й виконати пп. 1 – 4.
6. Зробити висновки.

### Контрольні запитання

#### Варіант 1

1. Що називають скін-ефектом і за яких умов він виникає?
2. Напишіть систему рівнянь Максвелла для електромагнітної хвилі у вакуумі. Поясніть фізичний зміст кожного з рівнянь.
3. Як здійснити екранування від зовнішніх електромагнітних полів?
4. *Задача.* Чому дорівнює об'ємна густина зарядів, які утворюють у вакуумі поле з напруженістю  $\vec{E} = \alpha \vec{r}$  ( $\alpha$  – постійна,  $\vec{r}$  – радіус-вектор)?

*Відповідь:*  $\rho = 3\varepsilon_0\alpha$ .

#### Варіант 2

1. Якими параметрами визначається глибина проникнення електромагнітної хвилі в металі?
2. Напишіть систему рівнянь Максвелла в диференціальній формі. Поясніть фізичний зміст кожного з рівнянь.
3. Як експериментально можна визначити товщину скін-шару в металевому провіднику?
4. *Задача.* Напруженість електричного поля у вакуумі визначається виразом  $\vec{E} = -a(y\vec{i} - x\vec{j})$ , де  $a = \text{const}$ . Визначіть характер силових ліній

цього поля (обчисліть  $\text{rot } \vec{E}$ ), а також наявність джерел (стоків) електричного поля (обчисліть  $\text{div } \vec{E}$ ).

*Відповідь:*  $\text{rot } \vec{E} = 2a\vec{k}$ ,  $\text{div } \vec{E} = 0$ .

*Варіант 3*

1. Чому для струмів високої частоти можна використовувати порожнисті провідники?
2. Напишіть хвильові рівняння для напруженості електричного й магнітного полів під час проходження електромагнітної хвилі в провіднику.
3. Чому при виведенні рівнянь (24.2) можна нехтувати струмом зміщення для провідників?
4. *Задача.* Визначіть для алюмінію товщину шару, при проходженні якого амплітуда коливань напруженості електричного поля електромагнітної хвилі частотою  $\nu = 5,5$  кГц зменшується в 2 рази.

*Відповідь:*  $z_{1/2} = 0,8$  мм.



## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

Детлаф, А.А. Курс физики [Текст]/ А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Высш. шк., 1989. – 607 с.

Савельев, И.Б. Курс общей физики [Текст]: в 3 т. / И.Б. Савельев. – М.: Наука, 1989. – Т. 2: Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика. – 479 с.

Сивухин, Д.В. Общий курс физики [Текст]: в 6 т. / Д.В. Сивухин. – М.: Наука, 1983. – Т. 3: Электричество. – 688 с.

Головко, Д.Б. Загальні основи фізики. Електродинаміка [Текст]: навч. посіб./ Д.Б. Головко, Ю.Л. Ментківський. – К.: Либідь, 1994. – 128 с.

Зисман, Г.А. Курс общей физики [Текст]: в 3 т. / Г.А. Зисман, О.М. Тодес. – М.: Физматгиз, 1969. – Т. 2: Электричество и магнетизм. – 366 с.

Астахов, А.В. Курс физики [Текст]: в 2 т. / А.В. Астахов, Ю.М. Широков. – М.: Наука, 1980. – Т. 2: Электромагнитное поле. – 359 с.

Яворский, Б.М. Основы физики [Текст]: учеб. пособие: в 2 т. / Б.М. Яворский, А.А. Пинский. – М.: Наука, 1981. – Т. 1: Механика. Молекулярная физика. Электродинамика. – 480 с.

Виноградов, Ю.К. Практикум по физике. Электричество и магнетизм [Текст]: учеб. пособие для вузов/ Ю.К. Виноградов. – М.: Высш. шк., 1991. – 150 с.

Иверонова, И.В. Физический практикум по физике. Электричество и оптика [Текст]/ И.В. Иверонова. – М.: Наука, 1968. – 806 с.

Черкашин, В.П. Физика. Электричество и магнетизм [Текст]: учеб. пособие для вузов/ В.П. Черкашин. – К.: Вища шк., 1986. – 168 с.

Гольдин, Л.Л. Лабораторные занятия по физике [Текст]: учеб. пособие/ Л.Л. Гольдин. – М.: Наука, 1983. – 704 с.

Базакуца, В.А. Лабораторный практикум по физике [Текст]: в 2 ч. / В.А. Базакуца. – Х.: ХГУ, 1969. – Ч. 1. – 244 с.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕДМОВА .....</b>	<b>3</b>
<b>ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ Й ПРИЛАДИ.....</b>	<b>4</b>
<b>Лабораторна робота № 2-01. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ МОДЕЛЮВАННЯ.....</b>	<b>8</b>
<b>Лабораторна робота № 2-02. ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СЕГНЕТОЕЛЕКТРИКІВ .....</b>	<b>13</b>
<b>Лабораторна робота № 2-03. ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЄМНОСТІ КОНДЕНСАТОРА ЗА ДОПОМОГОЮ БАЛІСТИЧНОГО ГАЛЬВАНОМЕТРА.....</b>	<b>18</b>
<b>Лабораторна робота № 2-04. ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАРЯДЖЕННЯ Й РОЗРЯДЖЕННЯ КОНДЕНСАТОРА.....</b>	<b>22</b>
<b>Лабораторна робота № 2-05. ВИЗНАЧЕННЯ ЕРС ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ КОМПЕНСАЦІЙНИМ МЕТОДОМ.....</b>	<b>29</b>
<b>Лабораторна робота № 2-06. РОЗШИРЕННЯ МЕЖ ВИМІРЮВАННЯ МІКРОАМПЕРМЕТРА .....</b>	<b>33</b>
<b>Лабораторна робота № 2-07. ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ОПОРУ ПРОВІДНИКА.....</b>	<b>37</b>
<b>Лабораторна робота № 2-08. ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ ВИХОДУ ЕЛЕКТРОНІВ З ПОВЕРХНІ МЕТАЛУ.....</b>	<b>43</b>
<b>Лабораторна робота № 2-09. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВТОРИННОЇ ЕМІСІЇ .....</b>	<b>47</b>
<b>Лабораторна робота № 2-10. ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА .....</b>	<b>51</b>
<b>Лабораторна робота № 2-11. ВИВЧЕННЯ ЕФЕКТУ ХОЛЛА .....</b>	<b>56</b>
<b>Лабораторна робота № 2-12. ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОЇДА Й ВИЗНАЧЕННЯ МАГНІТНОЇ СТАЛОЇ.....</b>	<b>61</b>
<b>Лабораторна робота № 2-13. ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОЇДА Й СИСТЕМИ ДВОХ СОЛЕНОЇДІВ.....</b>	<b>66</b>
<b>Лабораторна робота № 2-14. ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ СТОЛЕТОВА.....</b>	<b>72</b>
<b>Лабораторна робота № 2-15. ВИВЧЕННЯ ЗАКОНУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ.....</b>	<b>78</b>
<b>Лабораторна робота № 2-16. ВИЗНАЧЕННЯ КУТА МАГНІТНОГО НАХИЛУ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗЕМНОГО ІНДУКТОРА .....</b>	<b>82</b>

<b>Лабораторна робота № 2-17. ВИМІРЮВАННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОЯСА РОГОВСЬКОГО .....</b>	<b>89</b>
<b>Лабораторна робота № 2-18. ВИВЧЕННЯ ЯВИЩА САМОІНДУКЦІЇ .....</b>	<b>93</b>
<b>Лабораторна робота № 2-19. ВИЗНАЧЕННЯ ІНДУКТИВНОСТІ СОЛЕНОЇДА .....</b>	<b>99</b>
<b>Лабораторна робота № 2-20. ВИВЧЕННЯ МАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФЕРОМАГНЕТИКІВ .....</b>	<b>104</b>
<b>Лабораторна робота № 2-21. СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛОГРАФА.....</b>	<b>111</b>
<b>Лабораторна робота № 2-22. ЗГАСАЮЧІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛИВАННЯ .....</b>	<b>118</b>
<b>Лабораторна робота № 2-23. ВИВЧЕННЯ ВИМУШЕНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОЛИВАНЬ .....</b>	<b>124</b>
<b>Лабораторна робота № 2-24. ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ У ПРОВІДНИКАХ.....</b>	<b>130</b>
<b>БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК .....</b>	<b>137</b>

Навчальне видання

**Воронович Данило Олександрович  
Луньов Ігор Валентинович  
Охрїмовський Андрій Михайлович  
Подшивалова Оксана Володимирівна**

## **ЕЛЕКТРИКА Й МАГНЕТИЗМ**

Редактор А.М. Ємленінова

Зв. план, 2011

Підписано до друку 20.05.2011

Формат  $60 \times 84^{1/16}$ . Папір офс. № 2. Офс. друк

Ум. друк. арк. 7,8. Обл.-друк. арк. 8,75. Наклад 300 пр.

Замовлення 178. Ціна вільна

---

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського

“Харківський авіаційний інститут”

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Видавничий центр "Х А І"

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

[izdat@khai.edu](mailto:izdat@khai.edu)

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру  
видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції,  
серія ДК № 391, видане Державним комітетом інформаційної політики,  
телебачення та радіомовлення України від 30.03.2001 р.