

Електрика і магнетизм

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з фізики
для студентів технічних спеціальностей
денної та заочної форм навчання

Обговорено і рекомендовано на засіданні
кафедри інформаційно-вимірювальних тех-
нологій, метрології та фізики
протокол №4 від 19.11.2013 р

Електрика і магнетизм. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з фізики для студентів технічних спеціальностей денної та заочної форми навчання /Укл.: Ушаков В.Г. – Чернігів: ЧНТУ, 2014. – 60 с.

Укладач: Ушаков Віктор Григорович, кандидат технічних наук, старший викладач

Відповідальний за випуск: Приступа А. Л., завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, метрології та фізики, кандидат технічних наук, доцент

Рецензент: Красножон А.В. кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електричних систем і мереж Чернігівського національного технологічного університету

©ЧНТУ, 2014

© ІВТМФ, 2014

ЗМІСТ

Вступ	
Загальні вимоги до виконання лабораторних робіт	4
Обробка результатів вимірювань	5
1 Лабораторна робота № 11	
Вивчення електровимірювальних приладів	8
2 Лабораторна робота № 12	
Вивчення правил Кірхгофа для розгалужених електричних кіл постійного струму	21
3 Лабораторна робота № 13	
Визначення електрорушійної сили джерела компенсаційним методом	27
4 Лабораторна робота №14	
Вивчення роботи електронного осцилографа	32
5 Лабораторна робота № 15	
Визначення питомого заряду електрона методом магнетрона	43
6 Лабораторна робота № 16	
Визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі ...	49
Рекомендована література	54
Додаток А – Зразок оформлення титульної сторінки звіту про виконання лабораторних робіт	55
Додаток Б – Коефіцієнти Стьюдента	56
Додаток В – Виведення робочої формули для розрахунку питомого заряду електрона (лабораторна робота №15)	57

ВСТУП

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Лабораторні роботи виконуються за розкладом занять, тому кожний студент заздалегідь знає послідовність та терміни виконання робіт протягом семестру і має можливість вчасно підготуватися до них. Найбільш важливі теоретичні положення, доведення основних формул, порядок виконання вимірювань слід законспектувати у протоколі лабораторної роботи.

Наприкінці підготовки треба вміти відповісти на контрольні запитання.

Без належної попередньої підготовки студент до виконання лабораторної роботи не допускається.

Під час виконання лабораторних робіт слід дотримуватись таких правил:

- 1) студенти починають виконувати лабораторні роботи лише з дозволу керівника заняття;
- 2) не можна брати без дозволу прилади з інших робочих місць;
- 3) результати вимірювань заносяться до таблиць, форму яких слід заздалегідь продумати. Величини, які при вимірюваннях залишаються сталими (константи, параметри приладів тощо) записують у примітках до таблиці;
- 4) після закінчення вимірювань, не розбираючи установки (схеми), слід одразу ж обчислити кінцевий результат і показати розрахунки викладачу. Якщо вони будуть незадовільні, вимірювання і розрахунки треба повторити. За умови отримання правильного результату лабораторна робота вважається виконаною;
- 5) при складанні заліку з лабораторної роботи студент повинен подати оформлений протокол (звіт) про виконання роботи, в якому, крім даних попередньої підготовки, мають бути первісні дані експерименту (таблиця), кінцеві показники експерименту (розрахункові результати, графіки, розрахунки абсолютної і відносної похибок), правильно записаний результат вимірювань та основні висновки.

Повністю оформлена лабораторна робота має бути подана викладачеві не пізніше наступного (чергового) заняття.

Лабораторна робота оформлюється відповідно до вимог [1] Державного стандарту України ДСТУ 3008-95 (Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення).

Лабораторна робота оформлюється чорнилом (пастою) з одного боку аркуша формату А4 (297×210 мм). Поля: ліве – 25 мм, праве – не менше 10 мм, верхнє та нижнє – 20 мм.

Схеми, рисунки та графіки виконуються олівцем. Скорочення слів в тексті, крім загальноприйнятих, не дозволяється.

Для побудови графіків слід користуватися папером з масштабною сіткою (міліметрівка або аркуш у клітинку). При цьому слід насамперед раціонально вибрати масштаб, а саме – експериментальна крива має бути не дуже крутою і не дуже пологою, бо на таких кривих важко робити відліки. Потрібно намагатися використовувати всю площу графіка, тому в багатьох випадках відлік масштабних поділок на координатних осях доцільно починати не з нуля, а з деякого значення, трохи меншого від одержаних експериментальних значень. При виборі масштабу слід пам'ятати, що згідно з вимогами стандарту одна поділка шкали має відповідати лише $0,1$; $0,2$; $0,5$ або 1 ; 2 ; 5 , або 10 ; 20 ; 50 і т.д. одиницям вимірюваної величини, але ні в якому разі не $2,5$; 3 ; 4 ; 7 тощо. На шкалі, як правило, наносять лише “круглі” мітки. Наприклад, $0,5$; 1 ; $1,5$; 2 і т.д. На кінцях координатних осей (шкал) наносять позначення величин, які відкладаються, і відповідні одиниці виміру.

Наприкінці семестру усі захищені і підписані викладачем роботи студент зшиває у єдиний загальний «Звіт про виконання лабораторних робіт...», який надалі зберігається на кафедрі. На титульній сторінці Звіту, форма якої наведена нижче (дивись *Додаток А*), вказуються назва розділу курсу, прізвище та ініціали студента, номер групи, прізвище та ініціали викладача (керівника), а також дата, коли Звіт був поданий викладачеві.

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

При будь-яких вимірюваннях фізичної величини, як би старанно їх не проводити, неминучі похибки, тобто виміряти величину абсолютно точно неможливо. Причиною похибок є недосконалість методів і засобів вимірювань, неповнота наших знань або труднощі врахування усіх факторів, які зумовлюють перебіг певного явища, а також обмежені можливості наших органів чуттів та інші причини.

Важливо усвідомити, що фізика є точною наукою не тому, що вимірювання фізичних величин абсолютно точні – цього досягти взагалі неможливо, а тому, що в кожному окремому випадку можна вказати граничні значення, між якими перебуває вимірювана величина. Йдеться про надійні межі похибки результату вимірювання – верхню і нижню межі інтервалу, який накриває із заданою ймовірністю похибку вимірювання.

Розглянемо приклад. Нехай в результаті повторюваних однакових за точністю n -кратних вимірювань деякої фізичної величини X одержано послідовність значень:

$$x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n.$$

Середнім арифметичним значенням вимірюваної величини X будемо називати величину

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (1)$$

При $n \rightarrow \infty$ істинне значення фізичної величини X дорівнює середньому арифметичному. Тоді $X = \bar{x}$.

У реальній практиці число вимірювань n є величиною скінченою $n \neq \infty$. Через це обробка результатів вимірювань зводиться до оцінки ступеня наближення вимірюваного значення до істинного.

Розсіяння, або розкид, вимірюваних значень x_i відносно \bar{x} характеризують величиною *середньої квадратичної* (або стандартної) похибки:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i - \bar{x}^2},$$

а також стандартним відхиленням:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n x_i - \bar{x}^2}. \quad (2)$$

Чим більші S і $S_{\bar{x}}$, тим менш точні вимірювання.

Для оцінки точності результату вимірюваного значення фізичної величини використовують такі характеристики, як надійний інтервал та граничну (надійну) похибку середнього арифметичного.

Надійний інтервал – це інтервал, який містить істинне значення X вимірюваної фізичної величини із заданою ймовірністю p , яка називається *надійною ймовірністю* (або коефіцієнтом надійності), тобто

$$\bar{x} - \Delta x \leq X \leq \bar{x} + \Delta x$$

з ймовірністю p , де Δx – *абсолютна* (або *гранична*) похибка вимірювання.

При заданих n і p абсолютну похибку можна знайти за формулою:

$$\Delta x = t(p, n) \cdot S_{\bar{x}}, \quad (3)$$

де $S_{\bar{x}}$ – стандартне відхилення, розраховане за формулою (2); $t(p, n)$ – коефіцієнт Стюдента, який береться із таблиці (дивись *Додаток Б, таблиця Б1*); n – число вимірювань, що обробляються.

Отже коефіцієнт Стюдента, а разом з ним і гранична похибка залежать від надійної ймовірності p та кількості вимірювань n .

Якщо надійний інтервал збільшується, то зростає надійність (ймовірність) того, що істинне значення величини попаде в розглянутий інтервал. Надійну ймовірність прийнято задавати такою, що дорівнює $0,80; 0,90; 0,95; 0,98; 0,99$.

Поряд з абсолютною похибкою (граничним відхиленням) точність результату вимірювань характеризує також *відносна похибка* вимірювань, яка дорівнює відношенню абсолютної похибки (3) до середнього арифметичного значення (1):

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\bar{x}}. \quad (4, a)$$

Вона може бути виражена також у процентах:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (4, б)$$

Електрика і магнетизм

Після обробки і округлення експериментальних даних кінцевий результат вимірювань подають у вигляді

$$X = \bar{x} \pm \Delta x \dots; \varepsilon = \dots\%; p = \dots; n = \dots$$

Наприклад:

швидкість $v = 7,26 \pm 0,04 \text{ м/с}; \varepsilon = 0,6\%; p = 0,95; n = 6$

або

густина $\rho = 7,8 \pm 0,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \varepsilon = 10\%; p = 0,90; n = 5.$

При округленні результатів вимірювань слід додержуватись таких правил:

- величина граничної (абсолютної) похибки Δx округлюється до першої значущої цифри¹ в усіх випадках, крім таких, коли першою значущою цифрою є одиниця. В останньому випадку при округленні зберігають дві значущі цифри;
- величина \bar{x} округлюється до такого ж ступеня точності, як і Δx , тобто обидві величини – \bar{x} і Δx – треба вказувати з однаковою точністю.

Наприклад, в результаті обробки вимірювань одержано величини $\bar{x} = 0,03782$ та $\Delta x = 0,00674$. У цьому випадку Δx має першу значущу цифру “6” у третьому розряді після коми. Округляємо $\Delta x \approx 0,007$. Після цього округляємо до такого ж ступеня точності основний результат: $\bar{x} \approx 0,038$. Правильно записаний результат вимірювань буде мати вигляд: $X = (0,038 \pm 0,007)$, або краще $X = (3,8 \pm 0,7) \cdot 10^{-2}$.

Інші приклади:

Одержано величини		Правильно записаний результат
\bar{x}	Δx	$X = \bar{x} \pm \Delta x$
0,2963	0,0321	$X = 0,30 \pm 0,03$
7682	147	$X = 7680 \pm 150$, або $X = (7,68 \pm 0,15) \cdot 10^3$
0,2682	0,0362	$X = 0,27 \pm 0,04$, або $X = (2,7 \pm 0,4) \cdot 10^{-1}$

¹ Першою значущою цифрою при чисельному представленні величини вважається *перша зліва* цифра, не рівна нулю. Наприклад, для величини 3,245 першою значущою буде цифра 3; для величини 0,00279 першою значущою буде цифра 2. Перша значуща цифра дає найбільший внесок у величину, яка розглядається.

1 Лабораторна робота № 11

ВІВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОВІМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

Прилади:

- 1) випрямляч ВС-24М;
- 2) вольтметр М45 (для градуювання);
- 3) мікроамперметр М906 (для градуювання);
- 4) вольтамперметр М2018 (контрольний);
- 5) магазин опорів Р-33;
- 6) реостат (1000 Ом).

1.1 Теоретичні відомості

1.1.1 Загальна характеристика електровимірювальних приладів

Найбільш розповсюдженими електровимірювальними приладами є амперметри, вольтметри, гальванометри та ватметри, тобто прилади, за допомогою яких здійснюються вимірювання певних електричних величин: сили струму, напруги, електричної потужності. Вони дуже різноманітні за принципом дії та конструктивними особливостями. Але незалежно від конструкції будь-який електровимірювальний прилад складається з двох основних частин – рухомої та нерухомої, які в процесі вимірювань взаємодіють між собою, внаслідок чого положення рухомої частини змінюється в залежності від значення вимірюваної величини (сили струму, напруги тощо). Залежно від принципу взаємодії між рухомою і нерухомою частинами, який застосовано у приладі, розрізняють такі системи електровимірювальних приладів: *магнітоелектричну, електромагнітну, електродинамічну, індукційну, електростатичну* та ін.

Якість електровимірювальних приладів визначається такими характеристиками як межа вимірювань, чутливість, похибки вимірювань, внутрішній опір, стійкість до перевантажень, реагування на зовнішні електричні і магнітні поля та зміну температури тощо. Найважливіші з характеристик електровимірювального приладу вказують на шкалі та/або корпусі приладу (*Таблиця 11.1*).

Чутливістю S електровимірювального приладу називають відношення кількості $\Delta\alpha$ поділок, лінійного або кутового зміщення покажчика (стрілки) приладу до зміни вимірюваної величини ΔX , яка зумовила це зміщення:

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta X}. \quad (11.1)$$


Одиниця вимірювання чутливості залежить від вимірюваної величини, наприклад, *под/В, под/мА, мм/В, град/А* тощо.

Ціною поділки C називається величина, обернена до чутливості:

$$C = \frac{\Delta X}{\Delta \alpha}. \quad (11.2)$$

Ціна поділки показує, яка зміна вимірюваної величини зумовлює зміщення покажчика (стрілки) приладу на 1 поділку шкали (або 1 мм, 1 град) і вимірюється, наприклад, у $V/\text{под}$, $mA/\text{под}$, $V/\text{мм}$, $A/\text{град}$.

Таблиця 1.1 – Умовні позначення на шкалах електровимірювальних приладів

Зміст умовного позначення	Умовне позначення
Амперметр	A
Вольтметр	V
Ватметр	W
Прилад магнітоелектричний з рухомою рамкою	
Прилад електромагнітний	
Клас точності у % при нормуванні похибки від межі вимірювання; наприклад, 1,5	1,5
Захист від зовнішніх магнітних полів	
Захист від зовнішніх електричних полів	
Випробувальна напруга ізоляції між електричним колом приладу та корпусом, кВ; наприклад, не менше 2 кВ	
Струм постійний	—
Струм змінний однофазний	~
Струм постійний і змінний	~
Робоче положення шкали приладу горизонтальне	
Робоче положення шкали приладу вертикальне	
Затискач для заземлення	
Коректор	

Чутливість та ціну поділки легко розрахувати за вказаними на приладі кількістю поділок N його шкали та *межею вимірювань* X_m , тобто максимальним (допустимим) значенням вимірюваної величини, при якому стрілка приладу ві-

дхиляється на повну шкалу: $C = \frac{X_m}{N}$. У деяких випадках чутливість вказують на шкалі приладу, наприклад, гальванометрів.

Точність електровимірювальних приладів не може бути однозначно охарактеризована абсолютною або відносною похибкою вимірювань. Абсолютна похибка нічого не говорить про точність вимірювань, а відносна похибка залежить від значення вимірюваної величини, тобто буде різною на різних ділянках шкали приладу. Тому для характеристики точності електровимірювальних приладів користуються *зведеною похибкою* γ , яка дорівнює відношенню абсолютної похибки приладу ΔX до межі вимірювань X_m і виражається у процентах:

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_m} \cdot 100\%. \quad (11.3)$$

При цьому під величиною ΔX розуміють максимально можливу абсолютну похибку вимірювань в усьому інтервалі вимірюваної величини від нуля до X_m . Ця похибка обумовлена конструктивними особливостями приладу.

Відносна похибка ε приладу в окремому вимірюванні розраховується за формулою:

$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\%, \quad (11.4)$$

де X – значення вимірюваної величини у даному вимірюванні. Відносна похибка окремого вимірювання ε залежить від значення вимірюваної величини X , тобто не є сталою. Користуючись формулами (11.3), (11.4), величину ε можна представити у вигляді:

$$\varepsilon = \gamma \frac{X_m}{X} \cdot 100\%, \quad (11.5)$$

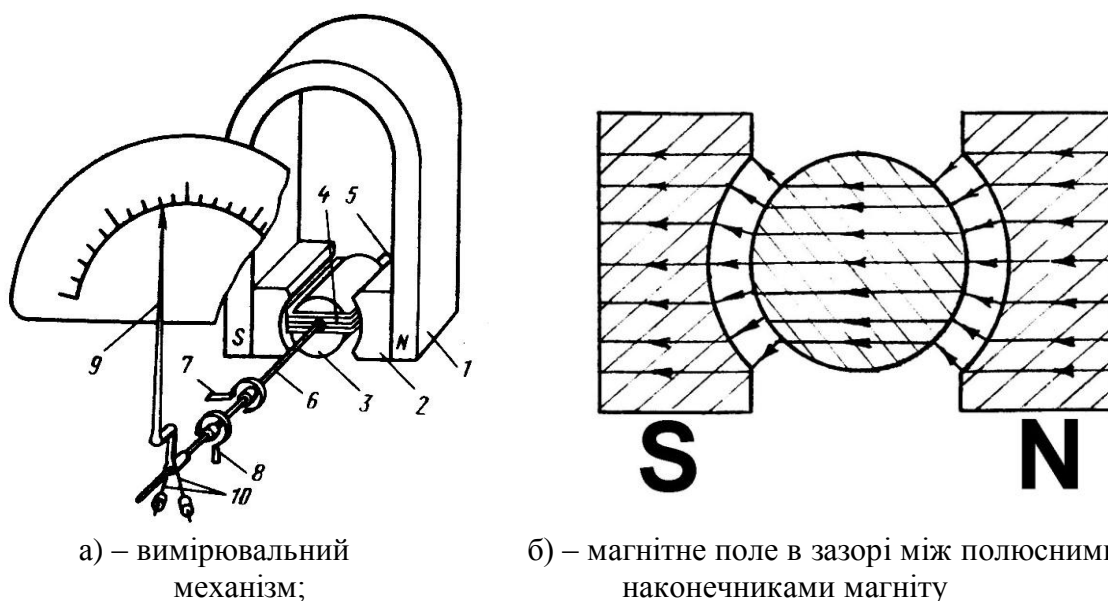
звідки легко бачити, що ε значно зростає якщо $X \ll X_m$. Це означає, що при вимірюванні величини, значення якої набагато менше ніж межа вимірювань приладу (стрілка приладу ледве відхиляється від нуля), відносна похибка вимірювання буде великою. Про це слід пам'ятати і намагатися встановлювати таку межу вимірювань X_m , яка забезпечує відхилення стрілки приладу більш ніж на половину шкали.

Точність (зведена похибка) електровимірювальних приладів є найголовнішою їх характеристикою. Відповідно до величини зведеної похибки електровимірювальні прилади поділяються на вісім класів точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4. Показник класу точності дорівнює величині зведеної похибки приладу в процентах і звичайно вказується на його шкалі. Прилади класів точності 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 використовуються головним чином для точних лабораторних вимірювань і називаються *прецизійними*; прилади класів 1,0; 1,5; 2,5; 4 мають назву *технічних*.

У даній лабораторній роботі вивчаються прилади магнітоелектричної та електромагнітної систем як найбільш поширені у практиці.

1.2 Прилади магнітоелектричної системи

Вимірювальний механізм приладів магнітоелектричної системи складається з двох основних частин: магнітної системи (нерухома частина) і котушки у вигляді рамки (рухома частина). Принцип дії вимірювального механізму таких приладів заснований на взаємодії сильного магнітного поля постійного магніту з слабким магнітним полем рамки, по якій проходить вимірюваний струм (рисунок 11.1, а).



а) – вимірювальний механізм;

б) – магнітне поле в зазорі між полюсними наконечниками магніту

Рисунок 11.1 – Будова приладу магнітоелектричної системи

Магнітна система вимірювального механізму складається з сильного постійного магніту I з висококоерцитивної сталі, полюсних наконечників 2 і нерухомого циліндричного осердя 3 . Полюсні наконечники та осердя виготовляються з м'яких феромагнітних матеріалів (низькокоерцитивної сталі). Полюсні наконечники і циліндр дають змогу у малому зазорі між ними створити рівномірне радіальне магнітне поле (рисунок 11.1, б). Між полюсним наконечником і осердям розміщується рухома рамка (котушка) 4 , яка являє собою легенький алюмінієвий каркас прямокутної форми, на який намотано тонкий мідний або алюмінієвий ізольований дріт діаметром від $0,03$ до $0,2$ мм. Рамка закріплена з протилежних боків на півосях $5, 6$, які забезпечують її вільне обертання навколо осердя, а отже і відхилення скріпленої з нею стрілки 9 відносно шкали. Вимірюваний струм підводиться до котушки через дві спіральні пружини $7, 8$, які одночасно створюють протидіючий момент сил при повороті рамки. Для балансування рухомої частини передбачені пересувні важки 10 .

При проходженні струму I через рамку на сторони рамки діють сили Ампера, які створюють обертальний момент сил:

$$M_1 = NBSI,$$

де N – кількість витків рамки; B – індукція магнітного поля; S – площа рамки. Цей момент сил врівноважується протидіючим моментом деформації спіральних пружин при повороті рамки на кут φ , тобто

$$M_2 = -k\varphi,$$

де k – сумарна жорсткість пружин. За умови $M_1 + M_2 = 0$ стрілка приладу зупиняється на якійсь поділці шкали. Тоді $NBSI = k\varphi$, звідки

$$\varphi = \frac{NBS}{k} \cdot I. \quad (11.6)$$

Отже кут φ повороту рамки (кут відхилення стрілки) пропорційний силі струму I , що проходить по рамці.

З рівняння (11.6) безпосередньо випливає, що прилади магнітоелектричної системи придатні для вимірювань тільки *постійних* струмів і їх шкала є рівномірною. Зміна напрямку струму веде до зміни напрямку повороту рамки. Коефіцієнт пропорційності $S_I = \frac{NBS}{k}$ є чутливістю приладу до струму (формула 11.1) і залежить лише від конструктивних параметрів вимірювального механізму.

Магнітоелектричні прилади відносяться до найбільш точних (клас точності до 0,1). Важливими перевагами таких приладів є висока чутливість (у цьому відношенні магнітоелектричні прилади не мають рівних собі), рівномірність шкали, нечутливість до зовнішніх магнітних та електричних полів, мале споживання електричної енергії.

До недоліків приладів магнітоелектричної системи слід віднести дещо ускладнену і дорогую конструкцію, невисоку стійкість до перевантажень (при перевантаженнях перегоряють пружинки або розтяжки для створення протидіючого моменту, по яких протікає струм) і, найголовніше, можливість застосування лише для вимірювань у мережах постійного струму.

1.3 Прилади електромагнітної системи

Прилади електромагнітної системи складаються з плоскої або круглої нерухомої котушки, на яку намотаний мідний провід, і рухомого осердя, виготовленого з м'яких феромагнітних матеріалів (електротехнічна сталь, пермалой).

Принцип дії приладів цієї системи заснований на взаємодії магнітного поля котушки, по якій проходить вимірюваний струм, з рухомим феромагнітним осердям, ексцентрично закріпленим на осі (рисунки 11.2).

Вимірюваний струм, який проходить по котушці 1, створює магнітне поле. Під дією магнітного поля закріплене на осі рухоме осердя 2 намагнічується і втягується всередину котушки. Протидіючий момент сил створюється спіральною пружиною 3. Для швидкого заспокоювання рухомої частини приладу і

стрілки застосовують повітряні демпфери (заспокоювачі) 4. Демпфер – це камера, в якій рухається, не торкаючись стінок, поршень. При повороті осердя поршень зазнає опору повітря.

Магнітне поле в котушці та намагніченість рухомого осердя пропорційні силі вимірюваного струму I . Отже, обертальний момент сил, який діє на осердя, буде пропорційний *квадрату* сили струму:

$$M_1 = k_1 I^2,$$

де k_1 – коефіцієнт пропорційності, який залежить від конструкції приладу.

Протидіючий момент сил, який створює пружинка, пропорційний куту повороту рухомої частини приладу:

$$M_2 = -k_2 \varphi,$$

де k_2 – коефіцієнт жорсткості пружини.

За умови рівноваги рухомої частини приладу, $M_1 + M_2 = 0$, отримаємо

$$\varphi = \frac{k_1}{k_2} \cdot I^2. \quad (11.7)$$

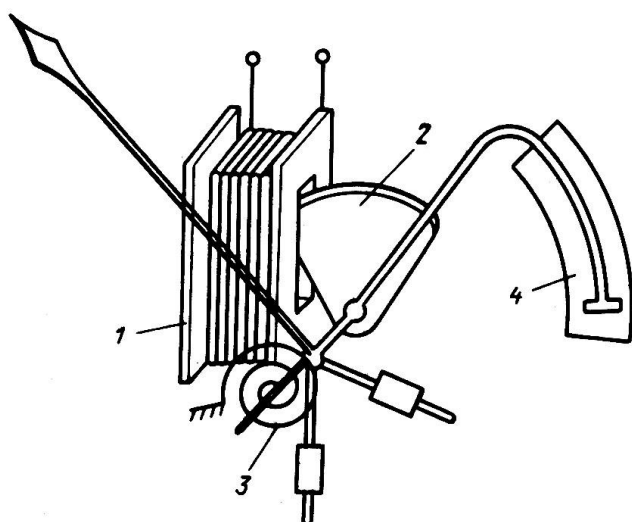


Рисунок 11.2 – Будова вимірювального механізму приладів електромагнітної системи

Отже, шкала приладу електромагнітної системи нерівномірною, *квадратичною*. Підбираючи оптимальну форму осердя та його розташування у магнітному полі котушки, можна одержати практично рівномірну шкалу, починаючи з 20...25% верхньої межі діапазону вимірювань. Із зміною напрямку струму змінюється як напрям магнітного поля котушки, так і намагніченість осердя, в результаті чого напрям дії обертального моменту M_1 зберігається, і стрілка приладу відхиляється у той самий бік (у формулі 11.7 знак φ не залежить від знаку I). Прилади цієї системи

застосовуються для вимірювань як *постійного*, так і *змінного* струмів. В останньому випадку вони реагують на *діюче (ефективне)* значення змінного струму.

Розповсюджені також інші конструктивні модифікації вимірювальних механізмів цієї системи. Але незалежно від будови електромагнітні вимірювальні пристрої є найбільш простими серед вимірювальних пристроїв різних систем.

Серед інших переваг електромагнітних приладів слід назвати порівняно невисоку вартість, надійність в роботі, здатність витримувати перевантаження, що пояснюється відсутністю струму у рухомих частинах. До недоліків приладів

електромагнітної системи слід віднести нерівномірність шкали, меншу точність (клас точності 0,5...2,5), недостатню чутливість при вимірюваннях малих струмів, залежність показів від зовнішніх магнітних полів (прилади потребують магнітного екранування або інших заходів).

1.4 Експериментальна частина

Вимірювальний механізм приладів магнітоелектричної системи при включенні безпосередньо в електричне коло дозволяє вимірювати невеликі постійні струми, не більше 20...50 мА, або напруги, які не перевищують 0,05 В. Перевищення вказаних значень веде до пошкодження проводу рамки або спіральної пружинки і виходу з ладу вимірювального механізму. Таким чином, сам магнітоелектричний механізм може виступати тільки в ролі гальванометра, мікроамперметра, міліамперметра або мілівольтметра. Для вимірювань великих струмів або для використання магнітоелектричного механізму в якості вольтметра (тобто для зміни масштабу вимірюваних величин) застосовують так звані *масштабні вимірювальні перетворювачі*. Масштабним називають вимірювальний перетворювач, призначений для зміни значень вимірюваних величин у певне число разів. До масштабних вимірювальних перетворювачів відносяться: шунти, подільники напруги, вимірювальні трансформатори, вимірювальні підсилювачі тощо. В даній роботі вивчаються простіші з масштабних перетворювачів: *шунти та подільники напруги*.

1.4.1 Розширення межі вимірювань амперметра за допомогою шунтів

Шунтом (від англ. *shunt* – запасний шлях) називається опір, який підключається *паралельно* до амперметра, внаслідок чого через амперметр проходить тільки частина вимірюваного струму, величина якого не перевищує дозволених значень (рисунки 11.3).

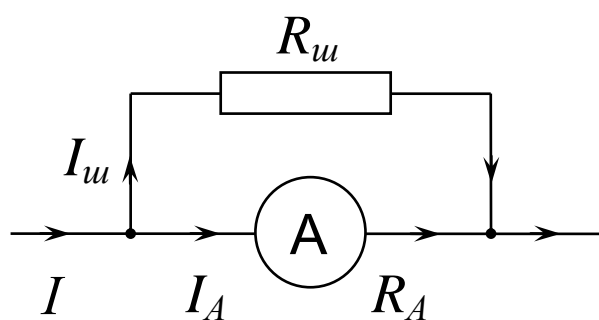


Рисунок 11.3 – Схема підключення шунта до амперметра

Нехай потрібно виміряти силу струму I , величина якого у n разів більша, ніж межа вимірювань (максимально допустимий струм) I_A амперметра. Відношення $n = \frac{I}{I_A}$ називають *коефіцієнтом шунтування*. Опір амперметра R_A вважається відомим (R_A вказується на шкалі приладу). Треба розрахувати опір шунта $R_{ш}$, який забезпечить необхідний коефіцієнт шунтування n .

Оскільки амперметр і шунт включені паралельно, падіння напруги на опорах $R_{ш}$ та R_A однакові, тобто

$$I_{ш} R_{ш} = I_A R_A.$$

Крім того, $I = I_{ш} + I_A$. З цих двох рівнянь знаходимо:

$$R_{ш} = \frac{R_A}{n-1}. \quad (11.7)$$

При цьому, очевидно, ціна поділки шкали амперметра з шунтом збільшується також у n разів.

При виготовленні амперметрів шунт часто монтується всередині приладу – *внутрішній шунт*. Прилад може мати і декілька внутрішніх шунтів, вони підключаються за допомогою перемикача, що забезпечує кілька діапазонів вимірювання струму. В разі необхідності додаткового розширення межі вимірювання до амперметра підключають *зовнішній шунт*.

Застосування шунтів з приладами інших систем – електромагнітних, електродинамічних, індукційних тощо – недоцільно через велике споживання потужності такими приладами, що веде до збільшення розмірів шунтів та додаткових втрат потужності. Крім того, в мережах змінного струму виникають додаткові похибки від зміни частоти, оскільки при зміні частоти струму опори шунта та приладу будуть змінюватись неоднаково.

Амперметр завжди включають у коло вимірюваного струму *послідовно*, а шунт до амперметра підключають *паралельно*. Прилад повинен мати якомога менший внутрішній опір, щоб зменшити похибки вимірювань.

1.4.2 Розширення межі вимірювань вольтметра за допомогою додаткового опору

Для розширення межі вимірювань вимірювального механізму по напрузі застосовують додаткові опори, які включають послідовно з вимірювальним механізмом. У цьому випадку вимірювальний прилад разом з додатковим резистором утворюють *подільник напруги*. Схема найпростішого подільника напруги показана на *рисунку 11.4, а*.

Між точками a та b (*вхід подільника*) включені послідовно опори R_1 та R_2 . Якщо на вхід подільника подати напругу $U_{вх}$, то на ділянці $a - b$ з'явиться електричний струм силою $I = \frac{U_{вх}}{R_1 + R_2}$. При протіканні струму I падіння напруги на

кожному з опорів становитиме лише певну частку $U_{вх}$. Так, на схемі, (*рисунок 11.4, а*), величина падіння напруги між точками c та d (*вихід подільника напруги*) буде дорівнювати

$$U_{вих} = IR_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{вх} = \frac{U_{вх}}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \quad (11.8)$$

Отже, в залежності від відношення опорів R_1 та R_2 на виході подільника напруги можна одержати будь-яку напругу в інтервалі $0 < U_{вих} < U_{вх}$.

Розглянемо тепер схему (*рисунок 11.4, б*), на якій замість опорів R_1 та R_2 включені відповідно додатковий опір R_0 та вольтметр з внутрішнім опором R_V ,

розрахований на максимальну напругу U_V (межа вимірювань вольтметра). В цьому випадку формула (11.8) набуває вигляду:

$$U_V = \frac{U}{1 + \frac{R_\partial}{R_V}}. \quad (11.9)$$

Виберемо величину додаткового опору R_∂ такою, щоб вхідна напруга U була у n разів більша за межу вимірювань U_V вольтметра, тобто:

$$n = \frac{U}{U_V}. \quad (11.10)$$

Тоді з формул (11.9) та (11.10) одержимо

$$R_\partial = R_V \cdot (n - 1). \quad (11.11)$$

Число n називають коефіцієнтом розширення.

Вольтметр з таким додатковим опором можна застосовувати для вимірювань напруги у межах $0 < U < nU_V$. В такому випадку ціна поділки шкали вольтметра збільшується також у n разів.

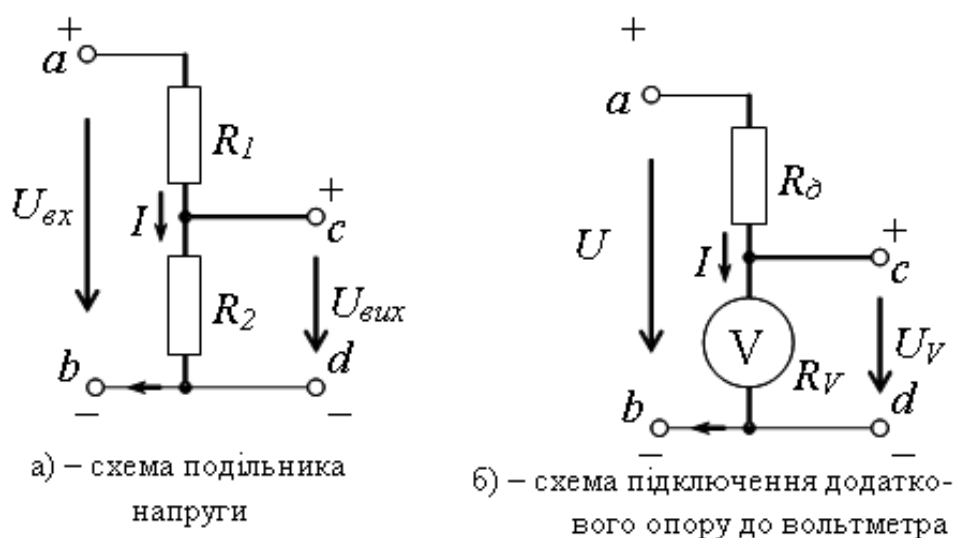


Рисунок 11.4 – Розширення межі вимірювання вольтметра

При виготовленні вольтметрів додатковий опір часто монтують всередині приладу (*внутрішній додатковий опір*). Очевидно, при цьому загальний внутрішній опір вольтметра буде складатися з внутрішнього додаткового опору та опору рамки вимірювального механізму. Прилад може мати декілька внутрішніх додаткових опорів, вони підключаються за допомогою перемикача, що забезпечує кілька діапазонів вимірювання напруги. В разі необхідності додаткового розширення межі вимірювання вольтметра до нього підключають *зовнішній додатковий опір*.

Величину внутрішнього опору вольтметра R_V вказують на шкалі приладу. Але частіше на шкалі вольтметра вказують не R_V , а силу струму, який проходить

через вольтметр при відхиленні стрілки приладу на повну шкалу (*струм повного відхилення*). У таких випадках внутрішній опір вольтметра легко розрахувати за величинами межі вимірювань та струму повного відхилення, скориставшись законом Ома.

Вольтметри завжди підключають *паралельно* до ділянки кола, на якій вимірюється напруга, а додатковий опір до вольтметра підключають *послідовно*. Для зменшення впливу вольтметра на режим роботи кола опір вольтметра у вибраному діапазоні вимірювань має бути набагато більший за опір кола.

1.5 Порядок виконання вимірювань

Завдання полягає у розширенні меж вимірювань мікроамперметра та вольтметра за допомогою зовнішнього шунта та зовнішнього додаткового опору відповідно. Варіанти завдань наведені у *таблицях 3.1 та 3.2*. В якості шунта або додаткового опору використовується магазин опорів Р-33. Джерелом живлення є випрямляч ВС-24М. В якості зразкового (контрольного) вимірювального приладу для перевірки показів мікроамперметра та вольтметра використовується вольтамперметр М2018 з високим класом точності. Для обмеження сили струму при роботі з мікроамперметром в електричне коло включається захисний реостат опором ~ 1000 Ом.

На початку роботи слід ознайомитись з електровимірювальними приладами – мікроамперметром, вольтметром та контрольним вольтамперметром. Основні технічні дані приладів занести до протоколу лабораторної роботи.

1.5.1 Розширення межі вимірювань мікроамперметра

- 1) За формулою (11.7) розрахувати опір зовнішнього шунта $R_{ш}$ відповідно до варіанту завдання (*таблиця 3.1*). Номер варіанту попередньо узгоджується з викладачем.

Таблиця 3.1 – Варіанти завдань для розширення межі вимірювань мікроамперметра

№ варіанта	1	2	3	4	5	6
Межа вимірювань, I_{max} , мА	3	6	7,5	12	15	30

- 2) Скласти схему (*рисунок 11.5*), не підключаючи до мережі випрямляча ВС-24М та звертаючи увагу на полярність підключення приладів. Під час складання схеми регулятор виходу ВС-24М встановити у крайнє ліве положення, ввести максимальний опір реостата.
- 3) Встановити перемикачі режиму роботи контрольного амперметра в положення, необхідні для точного вимірювання величини струму від нуля до I_{max} відповідно до обраного варіанту. В разі необхідності визначити кількість поділок шкали контрольного приладу, яка відповідає обраній величині I_{max} .

- 4) Перевести усі перемикачі (декади) магазину опорів Р-33 у нульові положення, після чого встановити попередньо розраховане (пункт 1) значення опору $R_{ш}$ зовнішнього шунта.

Увага! Завжди ретельно перевіряйте надійність контактів та провідників, за допомогою яких шунт підключено до приладу.

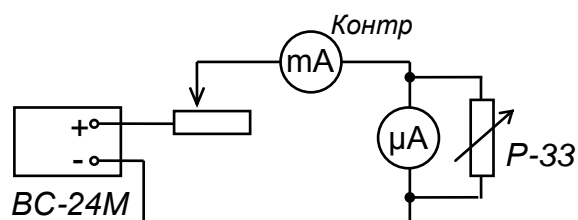


Рисунок 11.5 – Електрична схема підключення шунта для розширення межі вимірювання мікроамперметра

- 5) Перевірити положення стрілок вимірювальних приладів. Вони повинні відповідати нульовим поділкам шкал.

Дозвіл на подальше виконання роботи дає керівник занять після перевірки схеми. Без перевірки схеми викладачем вмикати схему в електричну мережу не дозволяється.

- 6) Увімкнути схему і, обертаючи повільно регулятор напруги випрямляча ВС-24М, поступово збільшувати силу струму в колі. При цьому слід уважно стежити за відхиленням стрілок обох приладів – досліджуваного мікроамперметра та контрольного міліамперметра. При встановленні у колі сили струму I_{max} (за показами контрольного приладу) стрілка мікроамперметра повинна відхилитись до кінця шкали. Для точного встановлення у колі максимальної сили струму I_{max} можна скористатись реостатом. Якщо при цьому стрілка досліджуваного мікроамперметра не встановлюється точно на останню поділку шкали, треба скорегувати, змінивши у невеликих межах опір шунта (магазин опорів Р-33). Записати у протокол роботи розраховане і експериментально визначене значення опору $R_{ш}$.
- 7) Визначити нову ціну поділки шкали досліджуваного мікроамперметра з шунтом. Перевірити і записати у таблицю відповідність показів мікроамперметра з шунтом та контрольного приладу для 4...5 значень сили струму в межах вимірювань. Побудувати графік залежності показів мікроамперметра з шунтом від показів контрольного міліамперметра.

1.5.2 Розширення межі вимірювань вольтметра

- 1) За формулою (11.11) розрахувати величину зовнішнього додаткового опору R_0 відповідно до варіанту завдання (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 – Варіанти завдань для розширення межі вимірювань вольтметра

№ варіанта	1	2	3	4	5	6
Межа вимірювань, U_{max} , В	6	7,5	9	12	15	18

2) Скласти схему (рисунком 11.6), не підключаючи випрямляча ВС-24М до мережі і звертаючи увагу на полярність підключення приладів. Регулятор виходу ВС24М встановити у крайнє ліве положення.

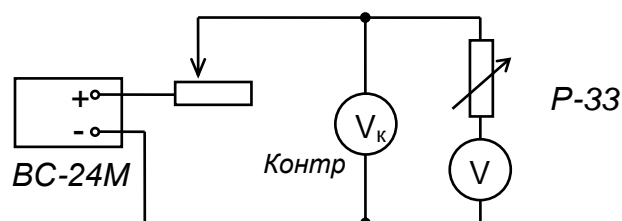


Рисунок 11.6 – Електрична схема підключення додаткового опору для розширення межі вимірювання вольтметра

3) Встановити перемикачі режиму роботи контрольного вольтметра у положення, необхідні для точного вимірювання величини напруги від нуля до U_{max} відповідно до обраного варіанту. В разі необхідності визначити кількість поділок шкали контрольного приладу, яка відповідає обраній величині U_{max} .

4) Перевести усі перемикачі (декади) магазину опорів Р-33 у нульові положення, після чого встановити на магазині опорів Р-33 попередньо розраховане (пункт 1) значення R_0 зовнішнього додаткового опору.

5) Перевірити нульові положення стрілок вимірювальних приладів.

Дозвіл на подальше виконання роботи дає керівник заняття після перевірки схеми.

6) Увімкнути схему і за допомогою регулятора виходу випрямляча ВС-24М збільшувати поступово напругу у колі, уважно стежачи за відхиленням стрілок обох приладів. Встановити необхідне значення напруги U_{max} (за показом контрольного приладу) і перевірити, чи знаходиться стрілка досліджуваного вольтметра на останній поділці шкали. В разі необхідності слід скорегувати величину додаткового опору (магазин опорів Р-33). Записати у протокол роботи розраховану і експериментально визначену величини R_0 додаткового опору.

7) Визначити нову ціну поділки шкали вольтметра з додатковим опором. Перевірити і записати у таблицю відповідність показів вольтметра з додатковим опором та контрольного вольтметра для 4...5 значень напруги в межах вимірювань. Побудувати графік залежності показів вольтметра з розширеною межею вимірювань та контрольного вольтметра.

Електрика і магнетизм
КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 1) Назвіть основні характеристики електровимірювальних приладів. Які з них і як позначаються на корпусі та шкалі приладу?
- 2) Що таке клас точності електровимірювального приладу? Як розрахувати абсолютну та відносну похибку окремого вимірювання?
- 3) Який принцип дії вимірювальних механізмів магнітоелектричної та електромагнітної систем. Порівняйте їх вади і переваги.
- 4) Сформулюйте основні властивості паралельного та послідовного з'єднання опорів.
- 5) Що таке масштабні вимірювальні перетворювачі. Як розширити межу вимірювань амперметра або вольтметра?
- 6) Що таке коефіцієнт шунтування амперметра; коефіцієнт розширення межі вимірювань вольтметра? Як розрахувати опір шунта до амперметра та додатковий опір до вольтметра?

2 Лабораторна робота № 12

ВИВЧЕННЯ ПРАВИЛ КІРХГОФА ДЛЯ РОЗГАЛУЖЕНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Прилади і приладдя:

- 1) пульт з джерелами \mathcal{E} та набором резисторів;
- 2) вольтметр;
- 3) з'єднувальні провідники.

Метою роботи є вивчення правил Кірхгофа, які встановлюють співвідношення для струмів та напруг у розгалужених електричних колах *постійного* або *квазістаціонарного* струму.

Правила Кірхгофа дозволяють аналізувати складні електричні кола: визначати силу та напрям струму в будь-якій ділянці розгалуженої системи провідників, якщо відомі опори та \mathcal{E} на усіх її ділянках. Перше правило Кірхгофа витікає з закону збереження заряду. Друге правило Кірхгофа є результатом застосування узагальненого закону Ома до різних ділянок замкнутого кола.

2.1 Теоретичні відомості

Перш ніж розглянути безпосередньо правила Кірхгофа, проаналізуємо структурні особливості розгалужених кіл. Розглянемо довільне розгалужене електричне коло, в окремих ділянках якого включені відомі опори та джерела з відомими \mathcal{E} (рисунок 12.1).

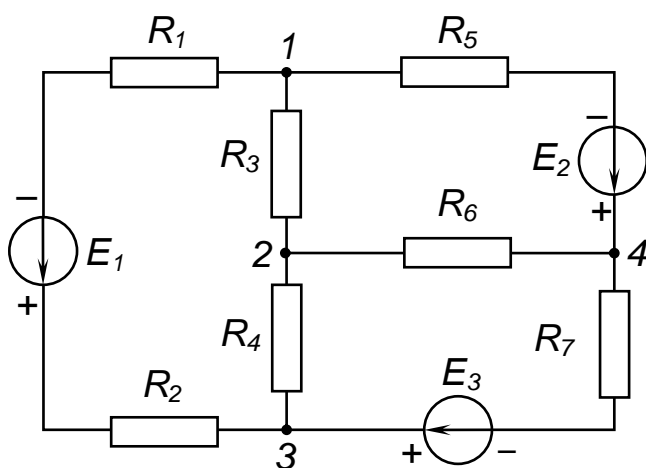


Рисунок 12.1 – Розгалужене електричне коло постійного струму

Основними структурними елементами будь-якого розгалуженого кола є *вузли*, *вітки* і *контури*. В розгалуженому колі є точки, в яких з'єднані три або більше провідників. Такі точки називають *точками розгалуження*, або *вузлами*. Окремі частини кола між двома суміжними (сусідніми) вузлами називають *ділянками*, або *вітками*. В схемі, зображеній на рисунку, чотири вузла – це точки 1, 2, 3, 4 та шість віток: $(R_1 - E_1 - R_2)$; (R_3) ; (R_4) ; $(R_5 - E_2)$; (R_6) та $(E_3 - R_7)$. Звернімо увагу на те, що всі елементи, які містяться в окремій ділянці (вітці), з'єднані послідовно і тому сила струму в усіх елементах вітки однакова. В той же час сили струмів в різних вітках кола будуть, очевидно, не однакові.

Отже кількість струмів у розгалуженому колі дорівнює кількості ділянок (віток), з яких складається це коло.

Крім вузлів і віток у розгалуженому колі можна виділити замкнуті *контури*. В схемі на *рисунок 12.1* такими контурами будуть, наприклад, контури $(E_1 - R_1 - R_3 - R_4 - R_2)$ або $(R_3 - R_5 - E_2 - R_6)$, або $(E_3 - R_4 - R_6 - R_7)$ тощо.

Перше правило Кірхгофа: алгебраїчна сума сил струмів, які сходяться у вузловій точці, дорівнює нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0, \quad (12.1)$$

де n – кількість струмів, які сходяться у вузловій точці.

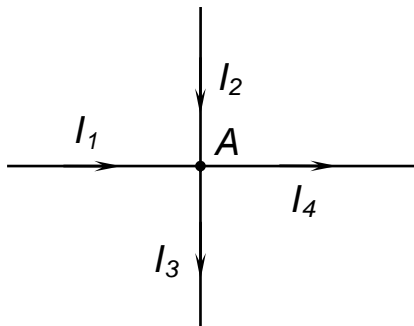


Рисунок 12.2 – Вузол розгалуженого кола

Струми, які входять до вузла, вважаються *додатними*, а струми, які виходять з нього, – *від’ємними*, або навпаки. Наприклад, для вузлової точки A (*рисунок 12.2*) на основі закону (12.1) можна записати:

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0.$$

Перше правило Кірхгофа впливає із закону збереження електричного заряду і фактично стверджує, що у будь-якому вузлі заряди не накопичуються, а потенціали вузлів не змінюються з часом.

Друге правило Кірхгофа: у будь-якому замкнутому контурі розгалуженого електричного кола алгебраїчна сума спадів напруг на окремих ділянках контуру дорівнює алгебраїчній сумі *ерс* у цьому контурі:

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{k=1}^m E_k, \quad (12.2)$$

де n та m – кількість ділянок та кількість джерел *ерс* в замкнутому контурі відповідно. При відсутності *ерс* у k -ій ділянці слід вважати $E_k = 0$. Для вибору знаків струмів та *ерс* у сумах закону (12.2) треба спочатку у кожному контурі обрати довільно певний напрям обходу контуру – за або проти руху стрілки годинника. Будемо вважати додатними такі струми, напрями яких збігаються з обраним напрямом обходу контуру, і від’ємними – у протилежному випадку. Аналогічно додатними вважаються такі *ерс*, які підвищують потенціал у напрямку обходу контуру (тобто діють в напрямку обраного обходу), і від’ємними – у протилежному випадку. Наприклад, в замкнутому контурі (*рисунок 12.3*) напрямом обходу (показаний всередині) обрано за стрілкою годинника. У цьому випадку струми I_1, I_4 – від’ємні, I_2, I_3 – додатні, *ерс* E_1, E_2 – додатні, E_3 – від’ємна.

Отже рівняння (12.2), складене за другим правилом Кірхгофа для цього контуру, буде мати вигляд:

$$-I_1R_1 + I_2R_2 + I_3R_3 - I_4R_4 = E_1 + E_2 - E_3.$$

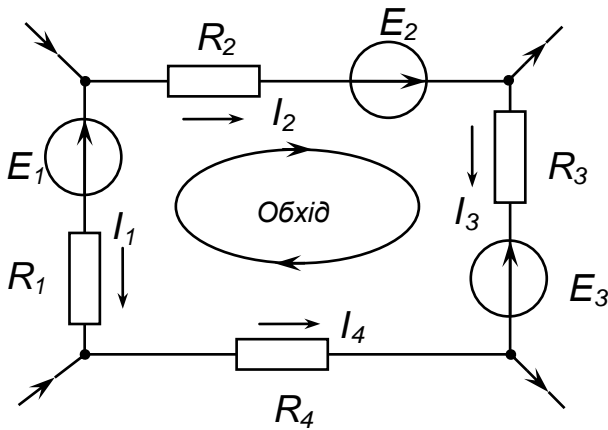


Рисунок 12.3 – Замкнутий контур у розгалуженому колі

Тепер з'ясуємо, як слід застосовувати правила Кірхгофа при розрахунках струмів у розгалуженому колі. На перший погляд для правильного вибору знаків у рівняннях (12.1) і (12.2) треба заздалегідь знати напрями струмів в усіх ділянках кола, але вони заздалегідь не відомі. Тому напрями струмів у окремих ділянках вибирають довільно, а рівняння складають, виходячи з цих напрямів. Дійсні напрями струмів стануть відомі після виконання розрахунків, а саме: якщо розрахована

величина сили струму виявиться додатною, це означатиме, що насправді напрям струму на даній ділянці контуру збігається з вибраним; якщо ж одержана величина струму буде від'ємною, то дійсний напрямок струму у вітці буде протилежний обраному.

На *рисунку 12.4* наведена схема розгалуженого електричного кола, яке складається з шести віток і має чотири вузлові точки ($n = 6$, та $r = 4$). Кількість невідомих струмів у цьому колі дорівнює кількості віток, тобто шести. Для визначення цих струмів потрібно скласти систему шести *лінійно незалежних* рівнянь – три рівняння за першим правилом та три рівняння за другим правилом Кірхгофа.

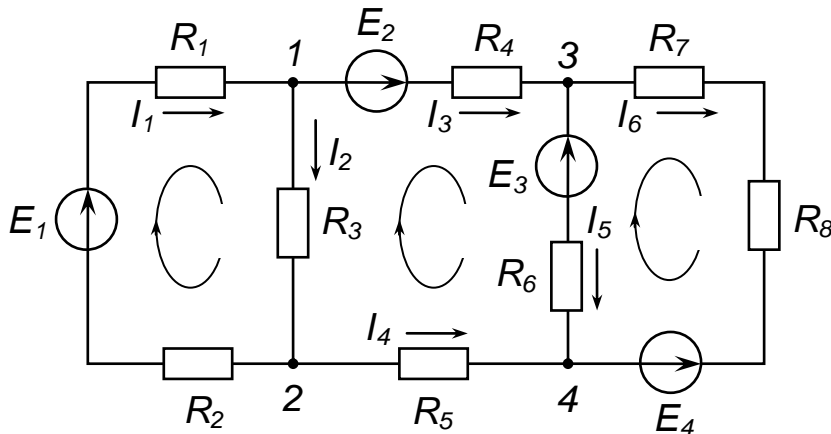


Рисунок 12.4 – Розгалужена електрична схема з $r = 4$ вузлами та $n = 6$ вітками

Задача розрахунку розгалуженого електричного кола полягає у визначенні величин і напрямів струмів в усіх ділянках кола, якщо відомі опори та *ерс* усіх ділянок. Для розгалуженого кола, яке складається з n віток і містить r вузлів, складають систему n рівнянь, а саме: $r - 1$ рівнянь для вузлів на основі першого правила Кірхгофа (рівняння для останнього вузла не є незалежним, а витікає з попередніх) та $n - (r - 1)$ рівнянь для незалежних замкнутих контурів на основі

другого правила Кірхгофа; кожна з n віток має входити в ці останні рівняння принаймні один раз.

Спочатку вибираємо довільно та позначаємо на схемі напрями струмів в усіх вітках кола і напрями обходу незалежних замкнутих контурів (див. *рисунок 12.4*).

Складаємо три рівняння за першим правилом Кірхгофа, наприклад для вузлів 1, 2 та 3:

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 = 0 & \text{для вузла 1;} \\ -I_1 + I_2 - I_4 = 0 & \text{для вузла 2;} \\ I_3 - I_5 - I_6 = 0 & \text{для вузла 3.} \end{cases}$$

Решту рівнянь (три рівняння) складаємо за другим правилом Кірхгофа для незалежних контурів. При цьому зручно розглядати найбільш прості контури і, записуючи рівняння для чергового контуру, стежити, щоб в нього входила принаймні одна нова вітка, яка не розглядалась у попередніх рівняннях. Складеними рівняннями слід охопити всі *ерс* і всі вітки розгалуженого кола. Для трьох незалежних контурів кола, зображеного на *рисунок 12.4*, можна скласти, наприклад, такі рівняння:

$$\begin{cases} R_1 I_1 + R_2 I_1 + R_3 I_2 = E_1 & \text{для контуру R1 - R2 - R3;} \\ -R_3 I_2 + R_4 I_3 - R_5 I_4 + R_6 I_5 = E_2 - E_3 & \text{для контуру R3 - R4 - R6 - R5;} \\ -R_6 I_5 + R_7 I_6 + R_8 I_6 = E_3 - E_4 & \text{для контуру R5 - R7 - R8.} \end{cases}$$

Об'єднуючи рівняння, складені для вузлів та контурів, отримуємо систему шести лінійно незалежних рівнянь, у якій невідомими є величини струмів $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$. Систему розв'язують будь-яким відомим методом.

2.2 Експериментальна частина

Перевірка правил Кірхгофа проводиться на лабораторній установці, яка складається з двох незалежних джерел постійної *ерс*, набору опорів, електричних ключів. Величина *ерс* кожного джерела встановлюється ступінчастим перемикачем в межах 5...24 В. Клеми джерел *ерс*, резисторів та ключів виведені на пульт установки і при виконанні лабораторної роботи з'єднуються між собою за допомогою провідників. Для вимірювань величин *ерс* та спадів напруги на опорах використовується вольтметр з великим вхідним опором, що забезпечує відсутність впливу процесу вимірювань на розподіл струмів у ділянках кола.

Варіанти схем розгалужених електричних кіл наведені на *рисунок 12.5*. Номер варіанту, а також можливі зміни в схемі попередньо узгоджуються з викладачем. Вибраний варіант схеми слід накреслити в протоколі лабораторної роботи заздалегідь, під час підготовки до роботи.

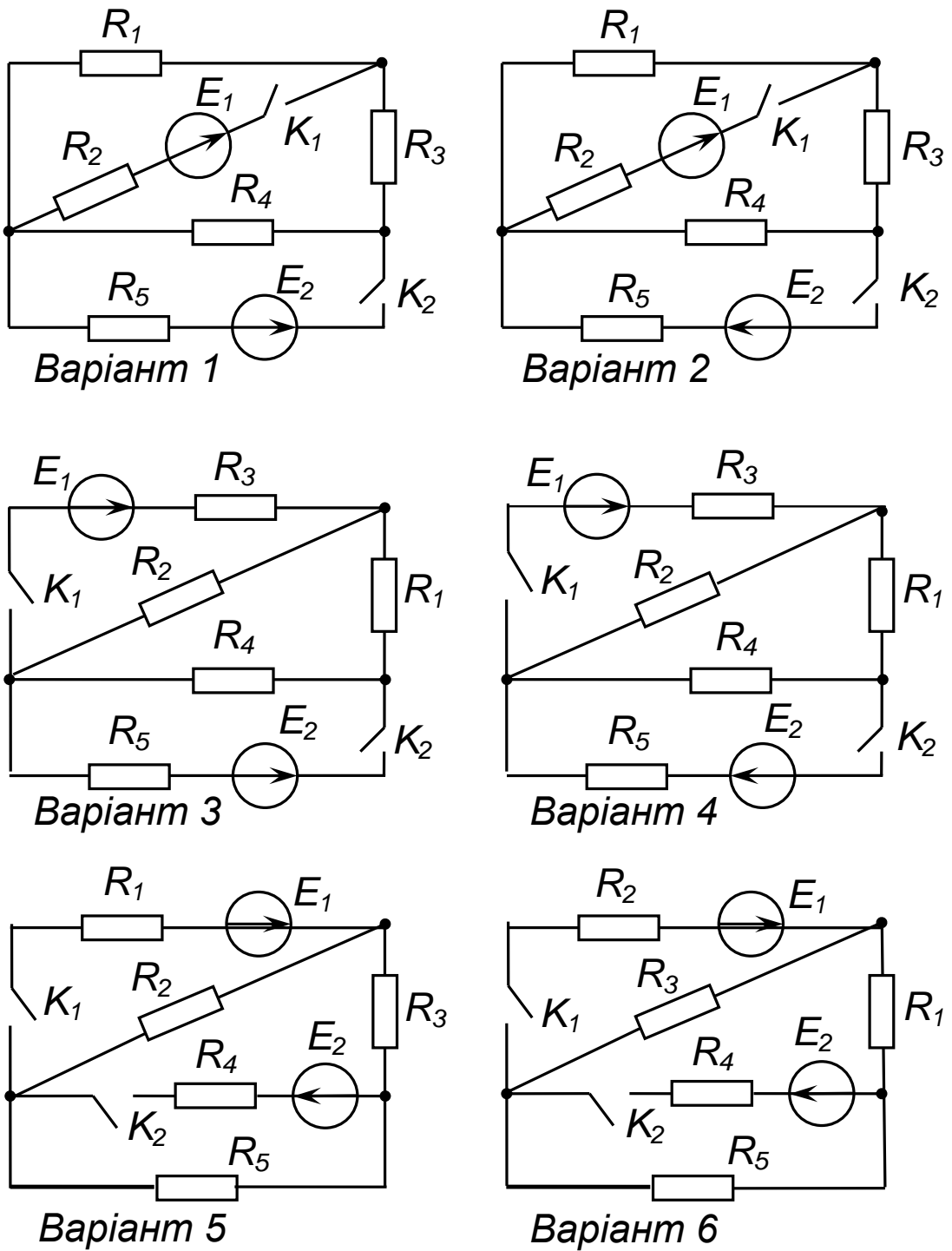


Рисунок 12.5 – Варіанти завдань до виконання лабораторної роботи

2.3 Порядок виконання роботи

- 1) Скласти електричне коло згідно з вибраним варіантом. Під час монтажу схеми лабораторний пульт слід відключити від електричної мережі, а ключі K_1 і K_2 – розімкнути.

Увага! Без перевірки складеного кола викладачем або лаборантом підключати його до електричної мережі не дозволяється.

- 2) Підготувати вольтметр для вимірювань постійної напруги до 24 В. Після перевірки схеми викладачем підключити установку до мережі живлення.
- 3) Установити (за вказівкою викладача) величини *ерс* E_1 і E_2 , після чого заміряти їх вольтметром (під час вимірювань *ерс* ключі K_1 і K_2 мають бути розімкнені). Звернути увагу на полярність щупів вольтметра.
- 4) Замкнути ключі K_1 і K_2 . Заміряти вольтметром спади напруги U_k на кожному опорі R_k і записати результати в таблицю. При цьому, беручи до уваги полярність щупів вольтметра, визначити напрямок струму в кожному опорі і показати його стрілкою на рисунку схеми в протоколі лабораторної роботи.
- 5) Користуючись законом Ома, розрахувати сили струмів I_k в кожному опорі і записати в таблицю.

2.4 Обробка результатів вимірювань

- 1) Перевірити справедливість першого правила Кірхгофа, для чого за одержаними результатами вимірювань та розрахунків обчислити алгебраїчні суми сил струмів $\sum I_k$ для вузлів кола. Зробити висновки.
- 2) Перевірити справедливість другого правила Кірхгофа, підрахувавши для кожного з незалежних замкнутих контурів алгебраїчну суму спадів напруги на окремих ділянках $\sum U_k$ та алгебраїчну суму *ерс* $\sum E_k$. Порівняти одержані результати. Зробити висновки.

Всі розрахунки *п.п.* 1, 2 та висновки записати до протоколу лабораторної роботи.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 1) Який електричний струм називається постійним; квазістаціонарним?
- 2) Назвіть основні структурні елементи розгалуженого кола.
- 3) Як визначити кількість струмів в розгалуженому колі?
- 4) Сформулюйте перше правило Кірхгофа. Який його фізичний зміст?
- 5) Сформулюйте друге правило Кірхгофа і поясніть, як вибирати знаки величин у відповідних рівняннях.
- 6) Як складається система рівнянь для розрахунку сил струмів в розгалуженому колі?
- 7) Як визначити дійсні напрями струмів в окремих ділянках розгалуженого кола?

3 Лабораторна робота № 13

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ ДЖЕРЕЛА КОМПЕНСАЦІЙНИМ МЕТОДОМ

Прилади і приладдя:

- 1) акумулятор або джерело постійної \mathcal{E} на 2...4 В;
- 2) акумулятор або джерело з невідомою \mathcal{E} ;
- 3) еталонне джерело – нормальний елемент (елемент Вестона);
- 4) реохорд з масштабною лінійкою;
- 5) нуль-гальванометр з чутливістю $\sim 0,1$ мкА/под;
- 6) реостат або захисний резистор з опором ~ 100 кОм;
- 7) ключ та перемикач.

Компенсаційний метод вимірювань базується на компенсації² (зрівнюванні) вимірюваної напруги (\mathcal{E}) напругою, яка утворюється струмом від допоміжного джерела на відомому опорі. Компенсаційний метод вимірювань застосовують не тільки для електричних величин (\mathcal{E} , напруг, струмів, опорів, ємностей), але і для інших фізичних величин (механічних, світлових, температури тощо), які попередньо перетворюються в електричні величини. Компенсаційний метод вимірювань є по суті нульовим методом вимірювань – в ньому результуючий ефект дії величин, що порівнюються, на прилад порівнювання (нульовий прилад) доводять до нуля. Компенсаційним методам вимірювань притаманна висока точність, яка залежить від чутливості нульового приладу та від точності визначення еталонної величини, яка компенсує вимірювану величину.

3.1 Теоретичні відомості та опис приладів

Електрорушійну силу джерела на практиці звичайно визначають за допомогою вольтметра, вимірюючи різницю електричних потенціалів на клеммах джерела. Але показ вольтметра при таких вимірюваннях лише наближено відповідає справжній величині \mathcal{E} джерела. Тому такий спосіб завжди є неточний. Причини розбіжностей можна з'ясувати, розглядаючи закон Ома для повного кола:

$$I = \frac{E}{R + r}, \quad \text{або} \quad E = IR + Ir, \quad (13.1)$$

де E – \mathcal{E} джерела; R – опір вольтметра; r – внутрішній опір джерела. В цьому випадку вольтметр розглядається як зовнішня ділянка електричного кола, а величина $IR = U_V$ – є показ вольтметра. З рівняння (13.1) одержимо:

² Компенсація, від лат. *compensatio* – відшкодування, зрівноваження

$$U_V = E - Ir, \quad (13.2)$$

тобто різниця потенціалів на клеммах джерела з підключеним навантаженням відрізняється від \mathcal{E} на величину спаду напруги на внутрішньому опорі джерела, і лише у тих випадках, коли сила струму в джерелі дорівнює нулю, величина U_V буде точно дорівнювати \mathcal{E} джерела. Отже точне вимірювання \mathcal{E} джерела можливе тільки за умов відсутності струму в ньому.

Одним із методів точного вимірювання \mathcal{E} джерела є *компенсаційний метод*, який належить до так званих *порівнювальних* методів вимірювань і зводиться до порівнювання невідомої \mathcal{E} джерела з відомою \mathcal{E} еталонного джерела. В якості еталонного джерела \mathcal{E} у електричних вимірюваннях часто використовують *нормальний елемент* – ртутно-кадмієвий гальванічний елемент Вестона, \mathcal{E} якого відтворюється дуже точно (до 0,0005%), майже не змінюється в процесі вимірювань, а також з часом (менше 5 мкВ за рік). Внутрішній опір нормальних елементів не більше 1000 Ом. При температурі 20 °C \mathcal{E} елемента Вестона $E_N = 1,0186$ В. При проходженні значних струмів елемент легко поляризується і його \mathcal{E} стає нестабільною. Поновлення стабільності потребує значного часу. Нормальний елемент зберігає гарантовану точність при струмах, менших 0,04 мА. Для попередження перевантажень рекомендується послідовно з елементом включати захисний опір (~ 100 кОм), а вимірювання проводити при короткочасних проходженнях струму.

Принцип компенсаційного методу вимірювань \mathcal{E} можна пояснити на прикладі роботи схеми, наведеної на *рисунку 13.1*.

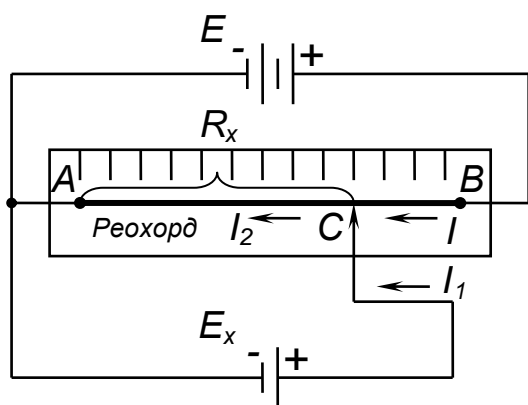


Рисунок 13.1 – Принцип компенсаційного методу вимірювання \mathcal{E} джерела

Акумулятор (джерело) з невідомою \mathcal{E} E_x та допоміжне джерело з \mathcal{E} E ($E > E_x$) підключені до різних ділянок реохорда AB. Реохорд являє собою однорідний дріт, який натягується на лінійку з масштабними поділками. Вздовж реохорда може переміщуватися рухомий контакт C. Реохорд, включений як потенціометр, виконує роль подільника напруги (дивись *лаб. роботу №11*), тобто величина спаду напруги U_{AC} на ділянці AC буде змінюватися в залежності

від положення рухомого контакту. Розглядаючи замкнутий контур (A – C – E_x), бачимо, що \mathcal{E} E_x , яка підключена до ділянки AC реохорда, і спад напруги U_{AC} на цій ділянці діють у протилежних напрямках. Отже, напрямок і величина струму I_1 , який тече через E_x , залежать від співвідношення між величинами E_x та U_{AC} ($U_{AC} < E_x$, або $U_{AC} > E_x$). Очевидно, за умови $E > E_x$ можна завжди знайти таке положення рухомого контакту на реохорді, при якому $U_{AC} = E_x$ і сила

струму I_1 через джерело E_X дорівнюватиме нулю. У таких випадках говорять, що спад напруги на ділянці реохорда U_{AC} компенсує дію ерс E_X .

В умовах компенсації (рисунки 13.1) $I_1 = 0$, звідси $I_2 = I$. Позначимо загальний опір реохорда $R_{AB} = R_0$, а опір ділянки $AC - R_{AC} = R_x$. Спад напруги на цій ділянці $U_{AC} = I \cdot R_x$, де струм I визначається за формулою (13.1):

$$U_{AC} = \frac{E}{R_0 + r} \cdot R_x.$$

де r – внутрішній опір джерела E .

Оскільки вимірювання виконувались при відсутності струму в джерелі E_X (в умовах компенсації), можна стверджувати, що $E_x = U_{AC}$, тобто

$$E_x = \frac{R_x}{R_0 + r} \cdot E. \quad (13.3)$$

Одержане рівняння (13.3) дозволяє виразити величину невідомої ерс E_X через характеристики допоміжного джерела (E та r) і опори ділянок реохорда R_0 та R_x . Зважаючи на те, що величини E , r , R_0 у більшості випадків невідомі, їх намагаються виключити з розрахунків. Для цього дослід повторюють, замінивши у схемі джерело з невідомою ерс E_X на допоміжне (еталонне) джерело з відомою ерс $E_N < E$, залишаючи решту параметрів схеми незмінними. Пересуваючи рухомий контакт C у нове положення, знову врівноважують (компенсують) схему. Позначимо опір ділянки A_1C_1 реохорда в цьому випадку R_N . Тоді формула (13.3) набуває вигляду:

$$E_N = \frac{R_N}{R_0 + r} \cdot E. \quad (13.4)$$

Поділивши рівняння (13.3) на (13.4), отримаємо відношення

$$\frac{E_x}{E_N} = \frac{R_x}{R_N}, \quad (13.5)$$

яке не залежить від E , r , R_0 , а залежить лише від опорів R_x та R_N .

Опір ділянки реохорда можна знайти за відомою формулою для опору однорідного провідника довжиною L , площею перерізу S та питомим опором ρ :

$$R = \rho \frac{L}{S}.$$

Відношення опорів двох ділянок AC та A_1C_1 однорідного реохорда (ρ і S – сталі величини) дорівнює відношенню відповідних довжин ділянок:

$$\frac{R_x}{R_N} = \frac{L_x}{L_N}. \quad (13.6)$$

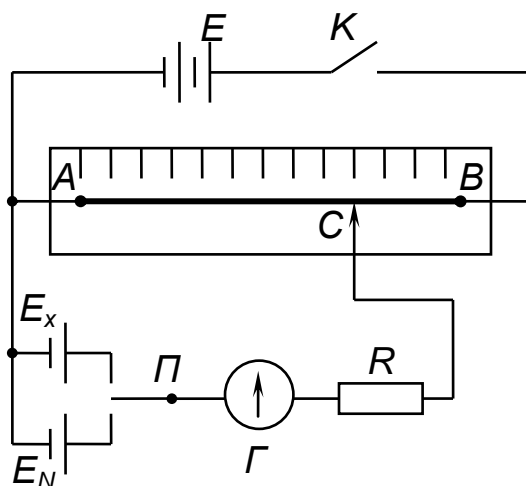
З врахуванням (13.6) формула (13.5) набуває вигляду:

$$E_x = \frac{L_x}{L_N} \cdot E_N. \quad (13.7)$$

Отримана формула (13.7) показує, що при наявності еталонного джерела з відомою *ерс* E_N , вимірювання невідомої *ерс* E_x зводиться до порівнювання довжин відповідних ділянок реохорда скомпенсованої схеми. Необхідними умовами для застосування методу компенсації є $E_x < \frac{R_0}{R_0 + r} \cdot E$ та $E_N < \frac{R_0}{R_0 + r} \cdot E$, які при $r \ll R_0$ спрощуються до $E_x < E$ та $E_N < E$.

3.2 Порядок виконання роботи

- 1) Скласти електричне коло за схемою (рисунком 13.2). При цьому ключ K розімкнути, перемикач Π поставити у нейтральне (середнє) положення, а рухомий контакт C – посередині реохорда.



K – ключ;
 Π – перемикач;
 Γ – гальванометр
 (нуль-індикатор);
 R – захисний опір в
 колі гальванометра,
 ~ 100 кОм.
 Решта позначень
 відповідає розділу 1

Рисунок 13.2– Електрична схема для вимірювання *ерс* джерела компенсаційним методом

- 2) Після перевірки схеми викладачем замкнути ключ K . Ключ K слід замикати перед початком вимірювань першим і вимикати після вимірювань в останню чергу.
- 3) Підключити за допомогою перемикача Π джерело з невідомою *ерс* E_x до реохорда. Пересуваючи рухомий контакт C вздовж реохорда, врів-

Електрика і магнетизм

новажити схему – встановити стрілку гальванометра на нульову поділку. Записати в таблицю відповідну довжину L_X ділянки АС реохорда.

- 4) Підключити за допомогою перемикача Π до реохорда джерело з еталонною $\text{ерс } E_N$ і знову збалансувати схему. Записати в таблицю відповідну величину L_N .
- 5) Повторити вимірювання *n.n.* 3, 4 не менше трьох разів, звертаючи увагу на відтворюваність результатів.
- 6) Відключити схему від реохорда – перемикач Π поставити в нейтральне положення, ключ K — розімкнути.
- 7) Обчислити величину невідомої $\text{ерс } E_X$ та похибку вимірювань. Записати результат. Зробити висновки.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 1) Що таке електрорушійна сила джерела? Поясніть фізичний зміст електрорушійної сили. В яких одиницях вимірюють ерс ?
- 2) Сформулюйте закон Ома для замкненого кола.
- 3) Чи співпадають по величині ерс джерела і різниця електричних потенціалів на клеммах джерела?
- 4) В чому полягає компенсаційний метод вимірювання ерс джерела? Які методи вимірювань називають порівнювальними, їх вади і переваги?
- 5) Які основні характеристики елемента Вестона? Яких правил слід дотримуватись при роботі з елементом?
- 6) Яким умовам повинні задовольняти величини ерс допоміжного джерела та невідомої ерс при застосуванні компенсаційного методу вимірювань?

4 Лабораторна робота №14

ВИВЧЕННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛОГРАФА

Прилади:

- 1) електронний осцилограф;
- 2) генератор сигналів.

Електронно-променеві осцилографи є універсальними електровимірювальними приладами з широкими межами використання і призначені для візуального спостереження електричних сигналів. Сучасні технічні методи дозволяють перетворювати змінні фізичні величини (механічні, звукові, оптичні, термічні) в пропорційні їм електричні напруги, тому осцилограф може використовуватись для вивчення залежностей між різноманітними фізичними величинами, вимірювань напруги, інтервалів часу, тривалості або частоти надходження імпульсів, фазового зсуву між синусоїдальними сигналами тощо.

4.1 Електронно-променеві осцилографи. Загальні поняття

Досліджуваний сигнал відображується на екрані електронного осцилографа у вигляді світних ліній або фігур, які називаються *осцилограмами*. По суті осцилограма відображує на екрані графік функціональних залежностей між двома або трьома величинами:

$$y = f(x, z) \text{ або } y = \varphi(x, z), \quad (14.1)$$

де y – відхилення по вертикалі; x – відхилення по горизонталі; z – зміна яскравості зображення на екрані.

Більшість сигналів зручно розглядати у реальному масштабі часу, тому частіше використовують функціональні залежності виду

$$y = f(t) \text{ або } y = \varphi(t, z), \quad (14.2)$$

де t – час.

Широке розповсюдження електронних осцилографів зумовлено можливістю їх використання в інтервалі частот від нуля до десятків ГГц, у межах амплітуд досліджуваних сигналів від часток мілівольт до сотень вольт при тривалості сигналів від одиниць наносекунд до кількох секунд.

4.2 Будова та основні режими роботи електронного осцилографа

Електронний осцилограф складається з електронно-променевої трубки, трьох каналів керування електронним променем (канали X , Y , Z) та блока живлення.

4.2.1 Електронно-променева трубка

Основною складовою частиною будь-якого електронного осцилографа є *електронно-променева трубка (ЕПТ)*, або *осцилографічна трубка*. ЕПТ – це електровакуумний прилад, призначений для перетворення електричних сигналів у видиме графічне зображення. Будова ЕПТ дозволяє формувати вузький пучок електронів, керувати ним та створювати візуальне зображення досліджуванних електричних сигналів на екрані. Позитивна якість ЕПТ – легкість керування як густиною струму майже безінерційного електронного променя, так і його напрямом при незначних витратах електричної енергії. Конструкція ЕПТ схематично показана на *рисунку 14.1*. ЕПТ складається з електронної гармати, системи відхилення та екрана, які знаходяться всередині скляної вакуумованої колби 1.

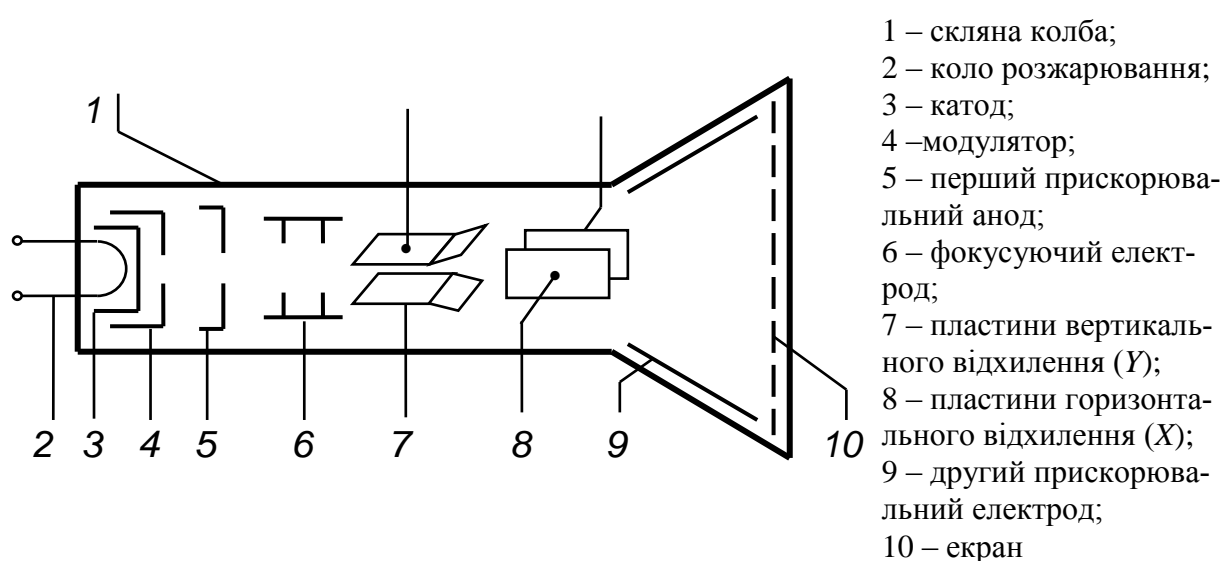


Рисунок 14.1 – Конструкція електронно-променевої трубки

4.2.2 Електронна гармата

Електронна гармата – це система електродів, призначених для формування вузького електронного променя, керування яскравістю та фокусування зображення на екрані. До складу електронної гармати входять: коло розжарення, катод, модулятор, перший прискорювальний анод та фокусуєчий електрод (дивись *рисунку 14.1*). Дія електричних полів на електронний промінь аналогічна дії оптичних лінз на світловий промінь, тому електронній схемі електронної гармати можна поставити у відповідність еквівалентну оптичну систему.

Коло розжарювання (2) – нагрівна спіраль, пропускаючи через яку електричний струм, розігрівають катод.

Катод (3) – циліндричний електрод, з поверхні якого при нагріванні електрони виходять у вакуум (явище термоелектронної емісії).

Модулятор (4) – керуючий електрод – співвісний (коаксіальний) з катодом циліндричний електрод з невеликим отвором у торці, розташований поблизу катода.

Джерелом електронів у *ЕПТ* є розігрітий катод. Електрони, які вириваються з поверхні розжареного катода внаслідок явища термоелектронної емісії, проходять крізь отвір у модуляторі, утворюючи попередній, несфокусований електронний пучок. На модулятор подається невеликий негативний (по відношенню до катода) потенціал. Змінюючи цей потенціал, можна керувати інтенсивністю електронного пучка і, відповідно, яскравістю світлової плями на екрані. Таким чином, модулятор відіграє роль, аналогічну ролі керуючої сітки в електровакуумних лампах.

Перший прискорювальний електрод (5) – служить для розгону електронів у пучку після модулятора сильним електричним полем.

Фокусуєчий електрод (6) – разом з прискорювальним електродом утворює електростатичну збирну лінзу, яка фокусує електрони у вузький промінь на екрані електронно-променевої трубки. Обидва електроди співвісні і мають циліндричну форму. Таким чином, призначення цих електродів – прискорювати електрони, які пройшли крізь модулятор, і сконцентрувати їх у вузький пучок.

Відхилення електронного променя у межах площини екрану забезпечує система відхилення, до складу якої входять дві пари пластин:

пластини вертикального відхилення (7) – *Y*-пластини та

пластини горизонтального відхилення (8) – *X*-пластини (дивись далі, розділ 4.2.3).

Для збільшення яскравості світлової плями на екрані при збереженні відносно високої чутливості електронного променя до зміни напруги у сучасних *ЕПТ* передбачено додаткове прискорення електронів після їх відхилення пластинами. З цією метою на внутрішню бічну поверхню скляної колби між пластинами відхилення та екраном наносять кільцевий шар з провідного матеріалу – *другий прискорювальний електрод (9)*, до якого прикладають напругу в кілька разів більшу, ніж напруга фокусуєчого електрода. Таким чином можна одержати зростання яскравості світлого зображення на екрані у десятки разів при втраті чутливості усього на кілька процентів.

Після фокусування, проходження системи відхилення та додаткового прискорення другим прискорювальним електродом електронний промінь потрапляє на *екран (10)* електронно-променевої трубки (дивись далі, розділ 4.2.4).

В деяких осцилографах застосовують магнітне фокусування за допомогою спеціальної зовнішньої фокусуєчої котушки. Змінюючи силу струму в котушці, можна змінювати магнітне поле, а відповідно і фокусування променя.

4.2.3 Система відхилення (керування променем)

Керування електронним променем, тобто формування зображення на екрані *ЕПТ* здійснюється за допомогою *системи відхилення*, яка забезпечує необхідне відхилення електронного променя у двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Для відхилення сформованого електронною гарматою пучка електронів по вертикалі (по осі *Y*) та по горизонталі (по осі *X*) використовують дві пари па-

паралельних металевих пластин, на які безпосередньо або після підсилення (послаблення) подають відповідні напруги. При цьому у просторі між двома пластинами утворюється рівномірне електричне поле, як у плоскому конденсаторі. Під дією цього поля пучок електронів, рухаючись між пластинами, відхиляється у той чи інший бік. Перша пара пластин (розташованих горизонтально) відхиляє пучок у вертикальному напрямку і називається *Y*-пластинами, друга пара пластин (розташованих вертикально) спричиняє відхилення пучка у горизонтальному напрямку і називається *X*-пластинами. В обох випадках величина відхилення пучка буде *пропорційна* прикладеній до відповідних пластин напрузі. Ця залежність і покладена в основу різноманітних використань осцилографа. Пластини *X*- та *Y*-відхилення розташовані всередині скляної колби *ЕПТ* між фокусуючим електродом і екраном (7, 8 на *рисунку 14.1*).

Відношення відхилення електронного променя на екрані до відповідної різниці потенціалів на пластинах називається *чутливістю* до напруги. Чутливість *ЕПТ* обумовлена її будовою і в значній мірі залежить від напруги на другому аноді.

Крім розглянутого вище *електростатичного* методу відхилення електронного променя існує також *електромагнітний* метод, в якому відхилення променя здійснюється магнітним полем, створеним котушками спеціальної форми, по яким пропускають відповідний електричний струм. Такі котушки розташовують ззовні скляної колби поблизу електронної гармати. В електронних осцилографах здебільшого використовують електростатичний метод відхилення, а у телевізорах – електромагнітний, що дозволяє зменшити довжину кінескопа.

4.2.4 Екран осцилографа

Електронний промінь в кінці свого шляху потрапляє на торцеву скляну поверхню розширеного кінця *ЕПТ* – екран. Екран – це вікно скляної колби електронно-променевої трубки, призначене для перетворення кінетичної енергії електронів променя у світлову енергію. Поверхня екрану вкрита зсередини тонким шаром порошкоподібного люмінофора – спеціальної речовини, наприклад, сульфїду цинку, здатної світитися на тих ділянках, куди потрапляє електронний промінь. При потраплянні на екран електрони внаслідок різкого гальмування в речовині люмінофора втрачають свою енергію, збуджуючи частинки люмінофора. Через короткий проміжок часу енергія збудження випромінюється у вигляді світлових квантів видимої ділянки спектру. Електронний промінь, рухаючись по площині екрану, випикує на ньому світні лінії різноманітного вигляду (синусоїди, телевізійні зображення тощо). Для виготовлення екранів *ЕПТ* застосовують неорганічні люмінофори. Матеріал люмінофора вибирають такий, щоб колір його випромінювання був або зеленим (максимальна чутливість людського ока), або синім (максимальна чутливість фотоплівки при фотографуванні осцилограм). Яскравість світної плями на екрані залежить як від інтенсивності потоку електронів, так і від кінетичної енергії електронів.

Часто на зовнішню поверхню екрана наносять масштабну сітку, яка полегшує виконання вимірювань по осях Y та X .

4.3 Керування електронним променем

Пластини вертикального та горизонтального відхилення *ЕПТ* самі по собі мають невелику чутливість до напруги. Для збільшення чутливості осцилограф обладнують підсилювачами напруги. Для кожної пари пластин передбачені власні підсилювачі. Підсилювач для X -пластин має звичайно невеликий коефіцієнт підсилення, так як він призначений головним чином для підсилення доволі великого сигналу, який подається від генератора розгортки (дивись далі, *розділ 4.3.4*). Сигнал, який надходить на Y -пластини, навпаки, потребує великого коефіцієнта підсилення (кілька тисяч), що дозволяє досліджувати слабкі електричні сигнали. Якщо ж досліджуваний сигнал досить великий, його можна подавати безпосередньо на Y -пластини або попередньо послабити.

Електронно-променева трубка, обладнана підсилювачами та послаблювачами сигналів, може бути використана як чутливий безінерційний вимірювальний прилад, який дозволяє вимірювати напругу, силу струму, активний опір тощо.

4.3.1 Канал вертикального відхилення (канал Y)

Канал вертикального відхилення (канал Y) призначений для формування з досліджуваних (вхідних) імпульсів сигналу, амплітуда напруги якого буде достатня для відхилення електронного променя в межах усього екрана по вертикалі. Y -канал складається з кількох каскадів.

Досліджуваний сигнал подають на вхід каналу Y через гніздо «ВХОД Y » на лицьовій панелі осцилографа. На вході каналу встановлений перемикач, який має два положення: « \cong » – *відкритий Y -вхід* та « \sim » – *закритий Y -вхід* осцилографа. При відкритому вході в Y -канал осцилографа подається як змінна, так і постійна складова вхідного сигналу. При закритому вході в Y -канал осцилографа буде надходити лише змінна складова вхідного сигналу, а постійна складова вилучається за допомогою розділювального конденсатора. Закритим входом користуються у тих випадках, коли змінна складова досліджуваного сигналу набагато менша від постійної складової, і саме її необхідно спостерігати або вимірювати.

При дослідженні сигналів з великою амплітудою для запобігання перевантаження каналу Y вхідні сигнали попередньо послаблюють, для чого до Y -входу підключають *атенюатор* (послаблювач) сигналів. Атенюатор зменшує амплітуду вхідних імпульсів у певному відношенні, наприклад, «1:10» або «1:100». Найпростіший атенюатор – подільник напруги (дивись *лаб. роботу № 11*). Якщо вхідні сигнали не потребують послаблення, вони передаються через атенюатор без послаблення. У таких випадках перемикач атенюатора встановлюють у положення «1:1».

Далі вхідний сигнал надходить на перший каскад Y -каналу – попередній підсилювач каналу Y .

Попередній підсилювач каналу Y призначений для підсилення вхідного сигналу в задане число разів. Коефіцієнт підсилення може сягати кількох сотень. Він визначається положенням перемикача «Усилитель Y, V/дел») на лицьовій панелі осцилографа і показує, якій кількості вольт відповідає одна вертикальна велика поділка (клітинка) шкали на екрані осцилографа. В склад попереднього підсилювача каналу Y також входить регулятор « \updownarrow » для зміщення зображення на екрані *вгору/вниз*.

Підсилювач вертикального відхилення (ПВВ) – кінцевий каскад каналу вертикального відхилення, який використовується в разі необхідності додаткового підсилення слабких сигналів. ПВВ збільшує амплітуду сигналу до потрібної величини (кілька сотень вольт). Отриманий таким чином сигнал подається на Y-пластини ЕПТ.

4.3.2 Канал горизонтального відхилення (канал X). Генератор розгортки

Канал горизонтального відхилення (канал X) призначений для формування сигналу горизонтального відхилення, амплітуда напруги якого буде достатньою (кілька сотень вольт) для відхилення електронного променя по горизонталі в межах повного екрану. Електронна схема, яка створює сигнал горизонтального відхилення, називається *генератором розгортки (ГР)*. Осцилограф може працювати як від внутрішнього, так і від зовнішнього генератора розгортки. Вибір джерела сигналів розгортки здійснюється за допомогою перемикача. *Внутрішній генератор розгортки (ГР)* міститься у самому осцилографі і формує періодичні сигнали тільки з *лінійною* залежністю напруги від часу – *пилкоподібну напругу* (дивись розділ 4.3.4). Від *зовнішнього генератора розгортки* можна отримати напругу, яка змінюється за будь-яким іншим законом (наприклад, *синусоїдальним*). Сигнали від внутрішнього або зовнішнього генератора розгортки спочатку надходять на *підсилювач горизонтального відхилення* і далі на X-пластини ЕПТ.

Якщо осцилограф працює при включеному внутрішньому генераторі розгортки, то сигнал розгортки надходить безпосередньо на X-пластини ЕПТ. При роботі із зовнішнім генератором розгортки сигнал від нього подають в канал X через гніздо «ВХОД X» на лицьовій панелі осцилографа. При цьому внутрішній генератор розгортки відключають.

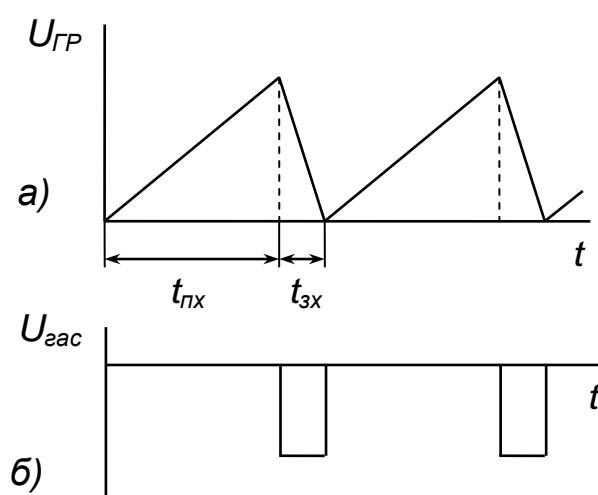
4.3.3 Канал керування яскравістю (канал Z)

При дослідженні швидкозмінних процесів за допомогою осцилографа часто виникає потреба у вимірюванні їх тривалості. З цією метою використовують генератор міток часу, який наносить через рівні проміжки часу мітки на осцилограмі. Частіше всього такі мітки наносять способом засвічування або гасіння променя. З цією метою на модулятор ЕПТ подають періодичну послідовність коротких імпульсів від'ємної (або додатної) полярності. Кожний з таких імпуль-

сів на короткий час блокує (або підсилює) електронний промінь, і на лінії зображення сигналу утворюється послідовність прогалів – *міток часу*. Якщо відомі тривалість маркерних міток та кількість міток, які вкладаються на досліджуваному сигналі, можна визначити тривалість сигналу. Для зручності вимірювань тривалість міток часу можна змінювати. Для цього на модулятор подають електричні імпульси від *генератора міток*, які періодично змінюють інтенсивність електронного променя, – на екрані утворюється пунктирна лінія. Генератор міток часу може бути вмонтований в осцилограф, або підключається ззовні через канал керування яскравістю променя, який називається *каналом Z* – гніздо «ВХОД Z» на лицьовій панелі осцилографа. Для створення міток на Z-вхід осцилографа подають сигнали від зовнішнього генератора імпульсів, які після проходження підсилювача каналу Z надходять на модулятор.

4.3.4 Синхронізація сигналів

Для спостереження процесів, змінних у часі, на X-пластини осцилографа треба подавати напругу, лінійно зростаючу з часом – *напругу розгортки*. Якщо одночасно з цим подати на Y-пластини досліджувану напругу, то на екрані осцилографа промінь відтворить графічну залежність досліджуваної напруги від часу. Так як звичайно з допомогою осцилографа вивчають швидкозмінні періодичні процеси, то і напруга розгортки теж має бути періодичною. Таку напругу називають *пилкоподібною* (рисунк 14.2). Пилкоподібну напругу розгортки виробляє внутрішній *генератор розгортки (ГР)*. Робочу частоту розгортки можна змінювати в широких межах, що дозволяє досліджувати періодичні сигнали в широкому діапазоні частот.



- а) – пилкоподібна напруга розгортки;
 б) – імпульси гасіння променя при зворотному ході

Рисунок 14.2 – Робота внутрішнього генератора розгортки

За час прямого ходу електронний промінь під дією рівномірно зростаючої напруги розгортки переміщується по екрану з постійною швидкістю зліва направо. Після проходження по горизонталі екрану до певної точки промінь повинен швидко повернутись у початкове положення (зворотній хід). Ці вимоги виконуються, якщо напруга розгортки змінюється за законом, графічно зображеним на *рисунку 14.2, а*. Імпульси пілкоподібної форми характеризуються *часом прямого ходу* (t_{nx}), та *часом зворотного ходу* (t_{zx}), причому завжди $t_{nx} \gg t_{zx}$ (*рисунок 14.2, а*). Тривалість прямого ходу променя (швидкість розгортки) залежить від частоти $ГР$, яка вибирається за допомогою ступінчатого перемикача «ВРЕМЯ/ДЕЛ» на панелі «РАЗВЕРТКА» осцилографа. Для того щоб на зворотному ході електронний промінь не залишав сліду на екрані і не заважав спостереженню досліджуваного сигналу, $ГР$ окремо формує імпульси гасіння – імпульси від'ємної полярності $U_{гас}$ (*рисунок 14.2, б*), які подається на модулятор і гасять промінь, тобто перешкоджають формуванню електронного променя на час зворотного ходу, а на екрані спостерігається лише прямий хід променя. Отже внаслідок блокування електронного променя імпульсом гасіння на екрані не буде спостерігатися горизонтальна світна лінія зворотного ходу.

Для того щоб зображення досліджуваного сигналу на екрані осцилографа було нерухоме (не пливло), генератор розгортки повинен працювати з періодом, рівним або кратним періоду досліджуваного сигналу.

$$n = \frac{T_{ГР}}{T_{вх}}, \quad (14.3)$$

де $T_{ГР}$ – період генератора розгортки; $T_{вх}$ – період вхідного сигналу; $n = 1, 2, 3, \dots$

Це співвідношення періодів має залишатись постійним протягом всього часу спостереження. Якщо ж періоди досліджуваного сигналу та сигналу розгортки не будуть кратні між собою (n – не ціле число), зображення на екрані буде рухатись вправо або вліво. Але навіть якщо домогтися у певний момент часу виконання умови (14.3), надалі ця умова поступово порушується внаслідок впливу різноманітних дестабілізуючих факторів: нестабільність частоти вхідного сигналу та періоду розгортки, вплив температури та шумів на роботу електронних схем тощо. Для отримання нерухомих осцилограм, навіть в умовах дії дестабілізуючих факторів, служить блок синхронізації.

Блок синхронізації (БС) – це електронна схема, яка забезпечує синхронне надходження досліджуваного сигналу та сигналу від $ГР$ на пластини вертикального та горизонтального відхилення. На виході $БС$ формуються короткі імпульси, які подаються на вхід $ГР$ і примушують його спрацьовувати. Роль $БС$ полягає в тому, що він примушує $ГР$ спрацьовувати саме в ті моменти часу, коли досліджуваний сигнал на Y -вході досягає певного стану, наприклад, збільшується або зменшується (*фронт* або *зріз* імпульсу), стає додатнім або від'ємним (*полярність* імпульсу), сягає заданого рівня тощо. Таким чином моменти запуску $ГР$

щоразу підпорядковуються зміні вхідного сигналу і робота *ГР* стає взаємопов'язаною з моментами надходження вхідного сигналу.

Основні джерела запуску блока синхронізації (способи синхронізації) такі:

- *внутрішня (синхронізація досліджуваним сигналом)* – в цьому випадку *БС* запускається досліджуваним сигналом. Внутрішня синхронізація може бути використана у більшості випадків;
- *зовнішня (синхронізація від зовнішнього сигналу)* – синхронізація здійснюється сигналом від зовнішнього джерела, який подається на вхід зовнішньої синхронізації. Зовнішня синхронізація застосовується у тих випадках, коли внутрішній синхронізуючий сигнал занадто малий або містить компоненти, небажані для синхронізації;
- *синхронізація від мережі* – синхронізація здійснюється сигналом, який надходить на *БС* з частотою мережі живлення (*50 Гц*). Синхронізація від мережі використовується у випадках коли досліджуваний сигнал змінюється з частотою мережі живлення, або тоді, коли в досліджуваному сигналі присутні складові з такою ж частотою, як і частота мережі.

Джерело синхронізації вибирається за допомогою перемикача «ВНУТР.; – СЕТЬ.; – ВНЕШ. 1:1; – ВНЕШ. 1:10» на панелі «СИНХРОНІЗАЦІЯ». Полярність сигналу для синхронізації розгортки вибирають тумблером «+; –», а рівень досліджуваного сигналу, від якого відбувається запуск розгортки, – регулятором «УРОВЕНЬ».

Генератор розгортки може працювати у двох режимах: режимі *очікування* «ЖДУЩИЙ» або режимі *автоколивань* «АВТОМАТИЧЕСКИЙ» (перемикач на панелі осцилографа). У режимі очікування *ГР* по вхідному імпульсу формує один імпульс розгортки, причому якщо надалі імпульсів запуску не буде, то і імпульсів від *ГР* також не буде (на екрані спостерігатиметься нерухома світна точка у крайньому лівому положенні, на початку розгортки). В автоколивальному режимі *ГР* може також синхронізуватися імпульсами запуску з *БС*, однак якщо після чергового прямого та зворотного ходу розгортки протягом часу блокування не прийде наступний імпульс запуску від *БС*, генератор розгортки все одно сформує черговий імпульс розгортки. При цьому синхронізація буде втрачена і осцилограма почне переміщуватися вправо або вліво по екрану. Тому автоколивальний режим застосовується рідше.

4.3.5 Блок живлення

Живлення осцилографа здійснюється від спеціального блока, до складу якого входить цілий ряд пристроїв, що забезпечують нормальну роботу всіх систем. Напруги живлення першого прискорювального та фокусувального електродів *ЕПТ* можуть сягати кількох сотень вольт, а другого прискорювального елек-

трода – кількох тисяч вольт (до 15 кВ). Звичайно *ЕПТ* живлять від окремого високовольтного блоку живлення.

4.3.6 Калібратор

Калібратор (К) – це електронний блок, вмонтований в схему осцилографа, який генерує періодичну послідовність імпульсів (частіше у вигляді «меандру» – імпульсів прямокутної форми), високостабільних по амплітуді і частоті. Висока стабільність параметрів забезпечується застосуванням у калібраторі кварцових генераторів.

Використовується *К* для перевірки та корегування правильності настройки відхилення променя по вертикалі (при осцилографічних вимірюваннях амплітуди імпульсів) та по горизонталі (при вимірюваннях інтервалів часу). Параметри сигналу від калібратора – амплітуда і тривалість імпульсів – відомі заздалегідь. Якщо осцилограф відрегульований правильно, то і меандр на екрані буде мати певні, заздалегідь відомі розміри по горизонталі та вертикалі, що легко перевірити за допомогою масштабної сітки на екрані *ЕПТ*. Якщо ж параметри меандру не відповідають цим вимогам, то перед виконанням вимірювань амплітуди або тривалості досліджуваних імпульсів вдаються до корегування підсилення в каналі вертикального або горизонтального відхилення. В режимі калібрування (тестування) осцилографа у канал вертикального відхилення надходить сигнал від калібратора, а досліджуваний сигнал на цей час блокується.

4.4 Порядок виконання роботи

- 1) Включити осцилограф (тумблер «СЕТЬ») і дати прогрітися 2 – 3 хвилини.
- 2) Встановити ручки регуляторів на лицьовій панелі осцилографа у середні положення.
- 3) Навчитись виконувати такі операції:
 - а) одержувати на екрані світну точку або горизонтальну лінію розгортки (нерухому яскраву світну точку не рекомендується довго лишати в одному місці екрану, оскільки екран може вигоряти);
 - б) пересувати лінію (точку) у площині екрану та регулювати її яскравість і фокусування;
 - в) регулювати грубо та плавно ступінь підсилення вертикального та горизонтального входів осцилографа;
 - г) синхронізувати розгортку осцилографа в залежності від характеру імпульсів, які спостерігаються.
- 4) Подати на вхід осцилографа від генератора сигналів синусоїдальний сигнал та одержати на екрані нерухоме зображення сигналу в автоколивальному режимі з синхронізацією досліджуваним сигналом.

Увага! Переключення ступінчатих перемикачів «ВРЕМЯ/ДЕЛ» та «ВОЛЬТ/ДЕЛ» з одного фіксованого положення в інше можна робити тільки після легкого натиску на перемикач від себе.

- 5) Виміряти період та амплітуду синусоїдального сигналу. Визначити частоту сигналу.

Увага! При вимірюваннях тривалості та амплітуди сигналів регулятори «ПЛАВНО» перемикачів «ВРЕМЯ/ДЕЛ» та «ВОЛЬТ/ДЕЛ» треба встановити у крайнє праве положення (фіксоване). Лише у такому випадку ціна поділки (клітинки) на шкалі екрану осцилографа відповідатиме значенню, вибраному на відповідному ступінчатому перемикачі.

- 6) Подати на вхід осцилографа від генератора сигналів послідовність імпульсів прямокутної форми. Частота, амплітуда та тривалість імпульсів встановлюються за вказівкою викладача. Одержати нерухоме зображення сигналу та виміряти амплітуду U_0 , період T та тривалість t_i імпульсів. Обчислити частоту та скважність імпульсів. *Скважність* (S) – це безрозмірна характеристика періодичної послідовності імпульсів несинусоїдальної форми, яка дорівнює відношенню періоду повторення імпульсів до тривалості окремого імпульсу:
$$S = \frac{T}{t_i}.$$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 1) Які вимірювання можна виконувати за допомогою осцилографа?
- 2) Основні вузли та блоки функціональної схеми осцилографа.
- 3) Будова та призначення електронно-променевої трубки.
- 4) Будова та призначення електронної гармати.
- 5) Будова та призначення екрану електронно-променевої трубки.
- 6) Керування яскравістю зображення на екрані.
- 7) Канали керування відхиленням електронного променя.
- 8) Призначення лінії затримки сигналів.
- 9) Генератор розгортки та його призначення. Види розгортки.
- 10) Синхронізація сигналів. Види синхронізації.
- 11) Блок синхронізації. Режими роботи розгортки та синхронізації.
- 12) Калібратор та його призначення.

5 Лабораторна робота № 15

ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Прилади і приладдя:

- 1) лабораторна установка, яка складається з електронної лампи-діода з циліндричним анодом, соленоїда, вольтметра, амперметра та міліамперметра;
- 2) джерел живлення лампи і соленоїда.

Мета лабораторної роботи – визначити питомий заряд електрона через вивчення його руху у взаємно перпендикулярних електричному і магнітному полях. Конфігурація електричного і магнітного полів у даному випадку нагадує конфігурацію схрещених полів у магнетронах – генераторах електромагнітних коливань в області надвисоких частот. Звідси і походить назва методу.

5.1 Теоретичні відомості

На заряджену частинку з зарядом q у електричному полі з напруженістю \vec{E} діє сила $\vec{F}_E = q\vec{E}$. Якщо частинка рухається у магнітному полі з індукцією \vec{B} , на неї діє сила Лоренца $\vec{F}_n = q[\vec{v}, \vec{B}]$, де \vec{v} – вектор швидкості руху частинки. Застосувавши для такої частинки другий закон Ньютона, легко помітити, що прискорення частинки, яка рухається в електричному або магнітному полі, або в обох полях одночасно, залежить від відношення $\frac{q}{m}$ – заряду частинки до її маси.

Це відношення називається *питомим зарядом частинки*. З курсу механіки відомо, що, знаючи прискорення руху частинки, можна розрахувати її швидкість, траєкторію і т. ін. Отже, в усіх випадках дослідження руху заряджених частинок в електромагнітних полях, наприклад, в електронно-вакуумних приладах, електрофізичних установках, у магнітному полі Землі, необхідно знати питомий заряд частинки. До того ж визначити експериментально питомий заряд простіше, ніж заряд і масу частинки окремо.

Для вимірювань питомого заряду електрона можна використовувати електронну лампу – вакуумний діод або тріод (типу 2Ц2С, СО-118, 3Ц18П). Особливістю цих ламп є те, що електроди цих ламп – катод і анод – виготовлені у вигляді двох коаксіальних (співвісних) циліндрів. Лампу розташовують всередині довгого соленоїда. Якщо подати на лампу анодну напругу, а по обмотці соленоїда пропустити електричний струм, то у просторі між катодом і анодом лампи утворяться взаємно перпендикулярні електричне і магнітне поля. Магнітне поле \vec{B} , утворене електричним струмом в соленоїді, орієнтоване вздовж осі соленої-

да. Електричне поле \vec{E} в лампі буде напрямлене вздовж радіусів циліндрів, перпендикулярно до їх спільної осі (рисунки 15.1). Отже, в кожній точці міжелектродного простору вектори \vec{B} і \vec{E} будуть взаємно перпендикулярні (схрещені поля).

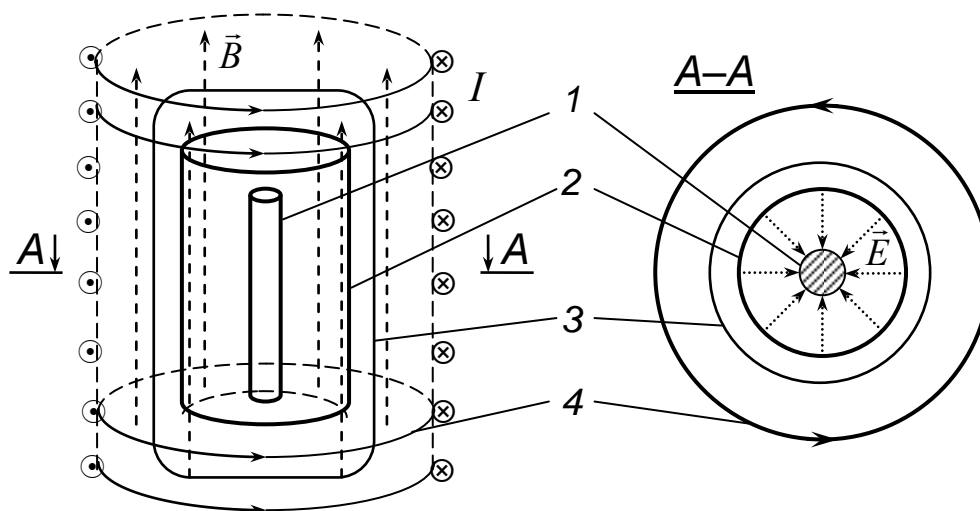


Рисунок 15.1 – Форма електродів і напрями електричного \vec{E} та магнітного \vec{B} полів у міжелектродному просторі лампи 2Ц2С. На рисунку 1 – катод; 2 – анод; 3 – скляна колба лампи; 4 – витки соленоїда

Розглянемо характер руху електронів у лампі. Електрони вилітають з поверхні розжареного катода внаслідок явища термоелектронної емісії і мають порівняно невелику швидкість. Тому можна вважати, що поблизу поверхні катода початкова швидкість емітованих електронів дорівнює нулю. При відсутності у соленоїді магнітного поля ($B = 0$) на електрони діятиме лише електрична сила \vec{F} , яка примушує їх рухатись прямолінійно – від катода до анода у радіальних напрямках вздовж ліній електричного поля (рисунки 15.2, а).

При утворенні всередині соленоїда слабкого магнітного поля, напрямленого вздовж осі лампи, на електрони поряд з силою \vec{F}_E дії електричного поля починає діяти і сила Лоренца \vec{F}_L , напрямлена перпендикулярно швидкості руху електронів, внаслідок чого траєкторії руху електронів викривлюються у площині, перпендикулярній напрямку магнітного поля (рисунки 15.2, б). Але слабке магнітне поле не буде впливати на величину анодного струму лампи, оскільки незначне викривлення траєкторій руху електронів не перешкоджає їм досягати анода. Збільшення індукції магнітного поля веде до поступового збільшення кривизни траєкторій руху електронів, і при наближенні магнітної індукції B до певного (критичного) значення $B_{кр}$, коли електрони втрачають можливість досягати анода, анодний струм лампи починає спадати. За умови $B > B_{кр}$ електро-

Електрика і магнетизм

ни не досягають анода і повертаються до катода (рисуюнок 15.2, в). За цих умов анодний струм лампи спадає майже до нуля.

Для виведення робочої формули застосуємо другий закон Ньютона для зарядженої частинки, яка рухається під дією сил електричного і магнітного полів:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}_E + \vec{F}_L, \quad \text{або} \quad \frac{d\vec{p}}{dt} = q\vec{E} + q \vec{v} \times \vec{B}$$

Заряд електрона $q = -e$, отже рівняння руху набуває вигляду:

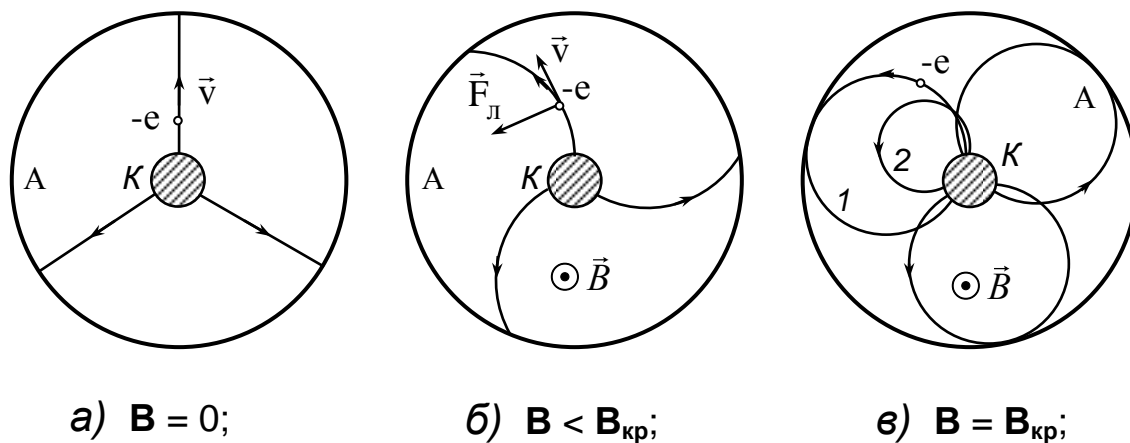
$$\frac{d\vec{p}}{dt} = -e\vec{E} - e \vec{v} \times \vec{B} \quad (15.1)$$

Розв'язок цього рівняння при певних значеннях анодної напруги, радіусів катода і анода лампи та за умови $B = B_{кр}$ відносно величини $\frac{e}{m}$ має вигляд:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{B_{кр}^2 \cdot a^2 \left(1 - \frac{c^2}{a^2}\right)^2}, \quad (15.2)$$

де U – анодна напруга лампи; $B_{кр}$ – критична індукція магнітного поля; c і a – радіуси катода і анода лампи відповідно.

Докладне доведення формули (15.2) розглянуто у Додатку В.



Рисуюнок 15.2 – Вплив магнітного поля на траєкторії руху електронів у просторі між катодом і анодом

Індукцію магнітного поля в середній частині соленоїда, де розташована лампа, можна знайти за формулою:

$$B = \mu_0 \frac{N}{L} I, \quad (15.3)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала; N – кількість витків соленоїда; L – довжина соленоїда; I – сила струму в соленоїді.

Враховуючи співвідношення (15.3), формула (15.2) набуває вигляду:

$$\frac{e}{m} = \frac{8UL^2}{\mu_0^2 N^2 a^2 \left(1 - \frac{c^2}{a^2}\right)^2 I_{\text{кр}}^2}, \quad (15.4)$$

де $I_{\text{кр}}$ – критичний струм, тобто сила струму в соленоїді, при якому $B = B_{\text{кр}}$. Отже для експериментального визначення питомого заряду електрона необхідно встановити величину критичного струму $I_{\text{кр}}$ соленоїда.

5.2 Експериментальна частина

Для визначення величини критичного струму $I_{\text{кр}}$ будують графік залежності сили анодного струму I_a лампи від сили струму I_c соленоїда при сталій анодній напрузі – *криву спаду* анодного струму.

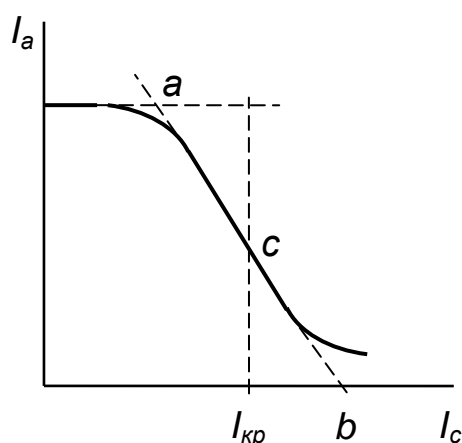


Рисунок 15.3 – Залежність анодного струму I_a лампи від сили струму I_c у соленоїді при сталій анодній напрузі

Загальний вигляд цієї залежності показаний на *рисунок 15.3*. В ідеальних умовах, коли катод і анод точно співвісні, а усі електрони вилітають перпендикулярно до поверхні катода і з однаковими початковими швидкостями, анодний струм повністю припиняється при $I_c \geq I_{\text{кр}}$ (пунктирна лінія). Але в реальних умовах витримати усі вищезгадані вимоги неможливо. Тому анодний струм при збільшенні сили струму у соленоїді припиниться не одразу, а буде спадати поступово. Порядок визначення $I_{\text{кр}}$ за допомогою графіка

залежності $I_a = f(I_c)$ пояснює *рисунок 15.3*, на якому величина $I_{\text{кр}}$ визначається умовою рівності відрізків: $ac = bc$.

Схема лабораторної установки для визначення питомого заряду електрона показана на *рисунок 15.4*. Клеми для підключення зовнішніх джерел живлення лампи та соленоїда, а також шкали вимірювальних приладів розташовані на передній панелі установки.

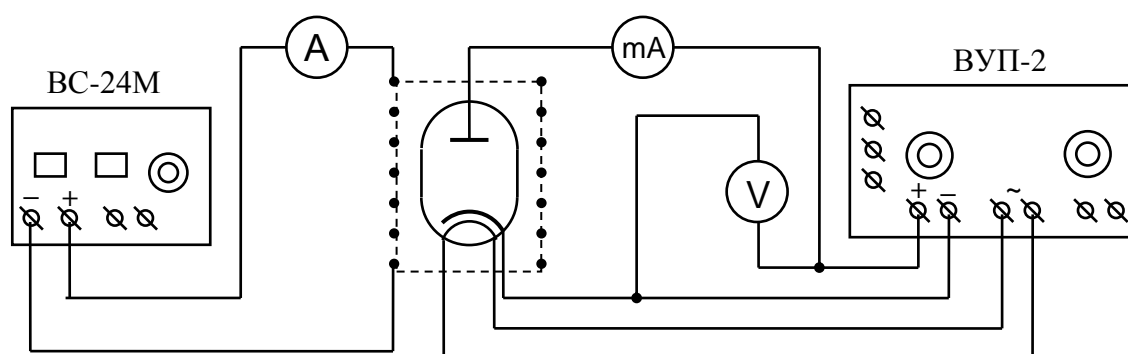


Рисунок 15.4 – Схема установки для вимірювання питомого заряду електрона методом магнетрона

5.3 Порядок виконання роботи

- 1) Підключити лабораторну установку до зовнішніх джерел живлення: соленоїд – до випрямляча ВС-24М, лампу – до випрямляча ВУП-2. Для живлення кола розжарення лампи використовувати клема « $\sim 6,3$ В». Усі регулятори напруги на приладах встановити у нульові (крайні ліві) положення.
- 2) Після перевірки схеми викладачем або лаборантом ввімкнути живлення лампи (ВУП-2) і прогріти катод лампи 1 – 2 хвилини.
- 3) Установити анодну напругу лампи в межах $40 \dots 70$ В – за вказівкою викладача. Записати у таблицю початковий анодний струм за показом міліамперметра в анодному колі лампи.
- 4) Ввімкнути коло соленоїда (ВС-24М). **Підтримуючи сталюю** анодну напругу і збільшуючи поступово силу струму соленоїда від 0 до $1,5 \dots 2$ А через кожні $0,2$ А, знайти залежність анодного струму лампи I_a від сили струму I_c у соленоїді. Одержані дані записати у таблицю.

Увага! Для запобігання перегріву соленоїда усі вимірювання слід виконувати без зайвих витрат часу.

- 5) Зменшити струм соленоїда до нуля і зробити паузу в роботі на 2 – 3 хвилини для охолодження соленоїда. Тим часом змінити анодну напругу лампи на $5 \dots 10$ В, записати у таблицю нове значення початкового анодного струму.
- 6) Повторити вимірювання п.п. 3 – 5 при різних величинах анодної напруги (3 – 4 залежності).

- 7) За одержаними результатами вимірювань побудувати на графіку залежності $I_a = f I_c$ і визначити для кожного випадку величину критичного струму $I_{кр}$.
- 8) Розрахувати за формулою (15.4) питомий заряд електрона, беручи кожного разу для розрахунку відповідні значення U та $I_{кр}$. Решта даних, необхідних для розрахунку, вказана на установці.
- 9) Обчислити похибки вимірювань і записати результат роботи. Зробити висновки.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 1) Які сили діють на електрон в електричному і магнітному полях? Як знайти величину цих сил та напрям дії?
- 2) Як буде рухатись заряджена частинка, яка влітає у однорідне магнітне поле з швидкістю \vec{v} , якщо:
 - $\vec{v} \parallel \vec{B}$;
 - $\vec{v} \perp \vec{B}$;
 - вектори \vec{v} і \vec{B} утворюють між собою кут α ?
 Чи буде змінюватись швидкість частинки у цих випадках:
 - за величиною;
 - за напрямком?
- 3) Як буде рухатись заряджена частинка, яка влітає у однорідне електричне поле з швидкістю \vec{v} , якщо:
 - $\vec{v} \parallel \vec{E}$;
 - $\vec{v} \perp \vec{E}$;
 - вектори \vec{v} і \vec{E} утворюють між собою кут α ?
 Чи буде змінюватись швидкість частинки у цих випадках:
 - за величиною;
 - за напрямком ?
- 4) Що таке питомий заряд частинки? Які фізичні основи методу магнетрона для визначення питомого заряду електрона?
- 5) Як визначити індукцію магнітного поля у довгому соленоїді? Як визначити напрями силових ліній електричного і магнітного полів у просторі між катодом і анодом лампи? Чи є ці поля однорідними?
- 6) Чому залежність $I_a = f I_c$, одержана експериментально, відрізняється від ідеальної залежності на *рисунку 15.3*? За яких умов експериментальна крива буде наближатися до ідеальної?
- 7) Що таке критична величина індукції магнітного поля? Як її визначити експериментально?

6 Лабораторна робота № 16

ВИЗНАЧЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ

Прилади і приладдя:

- 1) тангенс-бусоль;
- 2) акумулятор;
- 3) реостат;
- 4) міліамперметр;
- 5) двополюсний перемикач.

6.1 Теоретичні відомості

Земля являє собою величезний магніт, полюси якого лежать поблизу географічних полюсів. Вісь геомагнітного поля нахилена відносно географічної осі, навколо якої обертається земна куля, під кутом $11,5^\circ$. Південний полюс магнітного поля Землі S_M знаходиться у північній півкулі, біля північних берегів Америки, а північний магнітний полюс N_M – в Антарктиді (рисунок 16.1). У першому наближенні магнітне поле Землі можна уявити як поле рівномірно намагніченої кулі.

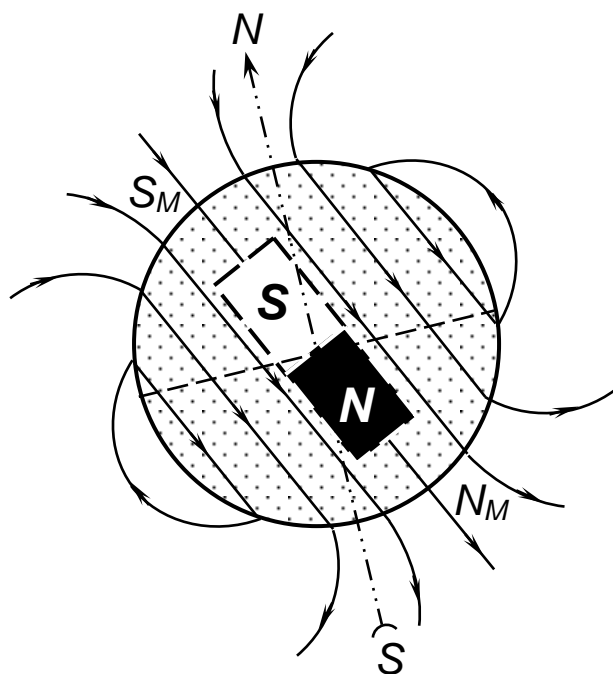


Рисунок 16.1 – Геомагнітне поле і розташування географічних та магнітних полюсів на земній кулі

Положення магнітних полюсів Землі повільно змінюється з часом. Основний внесок у магнітне поле Землі, $\sim 99\%$, складає постійне поле, яке створюють процеси, що протікають в рідкому металічному ядрі Землі. Решту, $\sim 1\%$, складають змінні поля, які створюються електричними струмами в іоносфері, магнітосфері, земній корі та океанах. Основне геомагнітне поле протягом століть повільно змінюється, а через інтервали часу $\sim 10^5 \dots 10^7$ років відбувається зміна полярності магнітного поля Землі. Вимірювання характеристик геомагнітного поля у різних точках земної кулі застосовують у навігації, геології, геофізиці тощо.

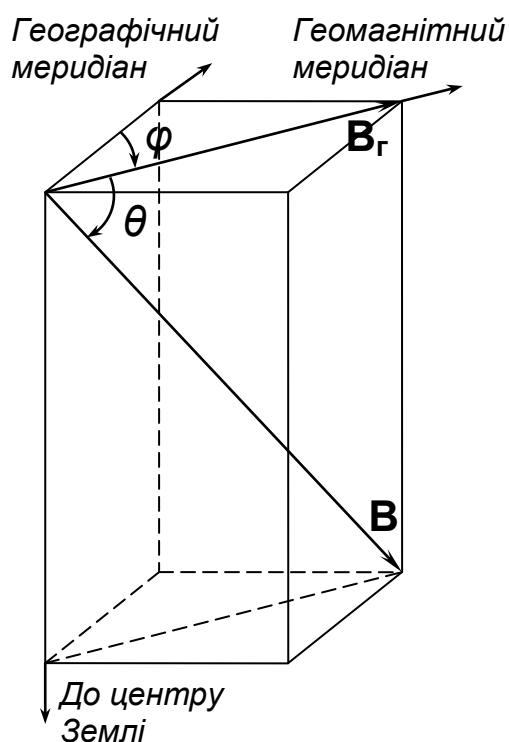


Рисунок 16.2 – Напрямок магнітного поля поблизу поверхні Землі у північній півкулі

У кожній точці навколоземного простору геомагнітне поле характеризується вектором магнітної індукції \vec{B} , величина і напрям якого визначаються трьома елементами: горизонтальною складовою \vec{B}_r , магнітним схиленням φ (кутом між \vec{B}_r та площиною географічного меридіана) і магнітним нахиленням θ (кутом між вектором \vec{B} та площиною горизонту). У північній півкулі на поверхні Землі вектор \vec{B} майже скрізь направлений під кутом вниз (рисунок 16.2). Значення індукції \vec{B} магнітного поля Землі невеликі і змінюються від 42 мТл на магнітному екваторі до 70 мТл поблизу магнітних полюсів. На магнітних полюсах $\theta = \pm 90^\circ$, $\vec{B}_r = 0$, а на магнітному екваторі $\theta = 0^\circ$, $\vec{B}_r = B$.

6.2 Експериментальна частина

У даній лабораторній роботі горизонтальну складову індукції магнітного поля Землі визначають за допомогою приладу, який називається *тангенс-бусоллю* (тангенс-гальванометром). Тангенс-бусоль складається з багатовиткового кільцевого контуру – короткої котушки, розташованої у *вертикальній* площині. Якщо по котушці пропустити постійний електричний струм, то у центрі котушки виникає магнітне поле, величина і напрям якого залежать від величини і напрямку струму у котушці. В центрі контуру знаходиться компас (італ. *bussola* – компас), магнітна стрілка якого може вільно обертатися у *горизонтальній* площині. Стрілка має бути невелика за розмірами, щоб магнітне поле кругового струму контура, яке діє на полюси стрілки, майже не відрізнялося від поля у центрі контура. Перед початком вимірювань кільцевий контур тангенс-бусолі встановлюють у площині магнітного меридіана (рисунок 16.3, а). Цю площину легко знайти за напрямом магнітної стрілки компаса у полі Землі при відсутності струму у котушці. При протіканні по контуру струму на магнітну стрілку будуть діяти два поля, розташованих у горизонтальній площині, а саме – горизонтальна складова магнітного поля Землі \vec{B}_r та магнітне поле кільцевого струму \vec{B}_k . Під дією цих двох полів магнітна стрілка відхиляється від попереднього напрямку і встановлюється під деяким кутом α до напрямку магнітного поля Землі

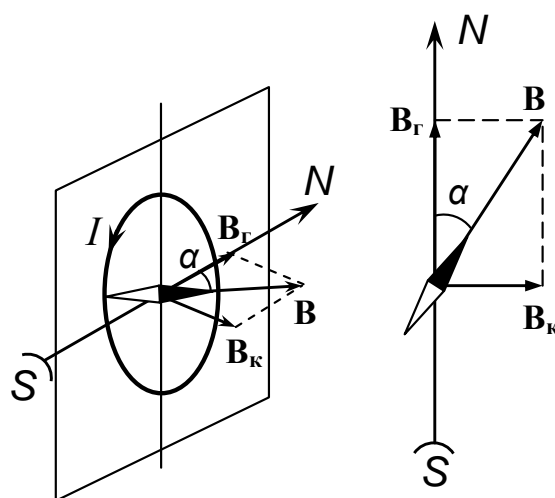
(рисунок 16.3, б). Визначимо цей кут. З *рисунка 16.3* видно, що горизонтальна складова магнітного поля Землі $B_{\Gamma} = B_{\kappa} \cdot \text{ctg} \alpha$. Індукція магнітного поля в центрі кільцевого контуру

$$B_{\kappa} = \frac{\mu_0 N I}{2R},$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1}$ – магнітна стала; N – кількість витків у контурі; I – сила струму в контурі; R – радіус контуру. Отже, формула для визначення величини горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі має вигляд:

$$B_{\Gamma} = \frac{\mu_0 N I}{2R} \cdot \text{ctg} \alpha. \quad (16.1)$$

Величини N і R вказані на приладі.



а) – розташування бусолі відносно магнітного поля Землі;

б) – напрями дії полів на магнітну стрілку бусолі

Рисунок 16.3 – Вимірювання магнітного поля Землі за допомогою тангенс-бусолі

Відмітимо далі, що поряд з випадками, коли зазначений прилад використовується як *тангенс-бусоль*, тобто для вимірювань магнітних полів, його можна застосувати також як *тангенс-гальванометр*, тобто прилад для вимірювань сили струму, в якому величину струму визначають за відхиленням магнітної стрілки, вміщеної в центрі кільцевого провідника, по якому протікає вимірюваний струм. Дійсно, з формули (16.1) маємо

$$I = \frac{2RB_{\Gamma}}{\mu_0 N} \text{tg} \alpha, \quad \text{або} \quad I = C \cdot \text{tg} \alpha, \quad (16.2)$$

де $C = \frac{2RB_{\Gamma}}{\mu_0 N}$ – величина стала у даній точці земної кулі для даного приладу, яка

називається *сталою тангенс-гальванометра*. Для визначення величини C будують графік залежності $I = f \operatorname{tg} \alpha$, який, згідно з формулою (16.2), має вигляд прямої. Нахил прямої дозволяє розрахувати константу C з високою точністю. У тих випадках, коли висока точність не потрібна, стало тангенс-гальванометра можна визначити без допомоги графіка. Як видно з формули (16.2), за умови $\alpha = 45^\circ$, тобто при $\operatorname{tg} \alpha = 1$, значення $C = I_1$. Це означає, що стала C тангенс-гальванометра чисельно дорівнює силі струму I_1 в контурі, при якій магнітна стрілка бусолі відхиляється на кут 45° від площини магнітного меридіана. У такому випадку, очевидно, виконується умова

$$B_{\Gamma} = B_{\kappa}.$$

Схема лабораторної установки для вимірювання горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі наведена на *рисунку 16.4*. Живлення контуру тангенс-бусолі B здійснюється від акумуляторної батареї або будь-якого іншого джерела постійної напруги з ерс $E \sim 1,5 \dots 2$ В. Для зміни напрямку струму в контурі на протилежний використовується двополосний перемикач Π . Сила струму регулюється реостатом R і контролюється за показами міліамперметра.

6.3 Порядок виконання роботи

- 1) Скласти електричне коло за схемою, наведеною на *рисунку 16.4*. Коло тангенс-бусолі слід підключити до середньої пари клем двополосного перемикача.
- 2) Встановити кільцевий контур тангенс-бусолі у площині магнітного меридіана, тобто знайти положення, в якому магнітна (коротка) стрілка компасу буде розташована у площині контуру.
- 3) Ввімкнути живлення і за допомогою реостата встановити такий струм I , при якому кут відхилення магнітної стрілки становитиме $\alpha \approx 10 \dots 15^\circ$. Записати значення I та α_1 в таблицю.
- 4) Змінити *напря*м струму у котушці на протилежний, для чого перевести перемикач Π у протилежну позицію. При цьому сила струму в контурі повинна лишитися незмінною (зміняться на протилежні тільки напрям струму в контурі і напрям відхилення магнітної стрілки). Записати в таблицю кут α_2 .

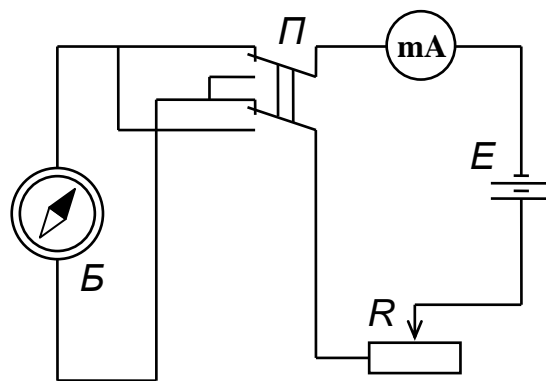


Рисунок 16.4 – Схема підключення тангенс-бусолі для вимірювань горизонтальної складової магнітного поля Землі

Відлік двох показів α_1 і α_2 – вправо та вліво – при однаковій силі струму дає можливість уникнути похибки, обумовленої неточністю установки контуру в площині магнітного меридіана (похибки установки нуля). Для виключення такої похибки у подальших розрахунках кут відхилення беруть рівним

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}.$$

- 5) Вимірювання п.п. 3, 4 повторити 4...5 разів, змінюючи силу струму в контурі кожного разу так, щоб кут відхилення магнітної стрілки не перевищував $45...50^\circ$ (при великих кутах відхилення точність вимірювань значно знижується).
- 6) Обчислити за формулою (16.1) величину горизонтальної складової магнітного поля Землі \vec{B}_r для кожного досліджу.
- 7) Визначити сталу тангенс-гальванометра, користуючись розрахунковим або графічним методом, розглянутих у розділі 6.2 (за вказівкою викладача).
- 8) Опрацювати отримані дані. Оцінити похибки вимірювань. Зробити висновки.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 1) Охарактеризуйте основні властивості магнітного поля Землі.
- 2) Як визначають напрям магнітного поля за допомогою магнітної стрілки? за допомогою рамки зі струмом?
- 3) Яка будова і принцип дії тангенс-бусолі (тангенс-гальванометра)?
- 4) Як визначити величину і напрям магнітної індукції в центрі кільцевого контуру зі струмом?
- 5) Сформулюйте принцип суперпозиції для магнітного поля і поясніть, як він застосовується у даному методі вимірювань.
- 6) Чому перед початком вимірювань контур приладу треба встановити у площині магнітного меридіана? Чи можливо виконати вимірювання при інших орієнтаціях площини контуру відносно площини магнітного меридіана?
- 7) Чому вимірювання горизонтальної складової магнітного поля Землі доцільно виконувати при кутах відхилення стрілки не більших $40...50^\circ$? Відповідь обґрунтуйте, проаналізувавши формулу (16.1).
- 8) Поясніть, як можна використовувати тангенс-бусоль в якості тангенс-гальванометра? Чи будуть співпадати між собою покази тангенс-гальванометра при вимірюваннях однакових струмів у різних пунктах земної кулі?

Рекомендована література

1. ДСТУ 3008-95 (Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення).
2. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. – М.: Наука, 1975. – 872 с.
3. Елементи векторної алгебри. Методичні вказівки до самостійної роботи з фізики для студентів технічних спеціальностей денної та заочної форм навчання / Укл.: Ушаков В.Г., Григоренко В.А., Тепла Т.М. – Чернігів: ЧДТУ, 2012. – 24 с.
4. Зачек І.Р., Кравчук І.М., та ін. Курс фізики: навчальний підручник. – Львів: «Бескид Біт», 2002. – 376 с.
5. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. – М.: Высш.шк., 1991. – 288 с.
6. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Наука, 1985. – 576 с.
7. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики; Навч. посібник для студентів вищих техн. і пед. закладів освіти / За ред. І.М. Кучерука. – К.: Техніка, 1999. Т.2: Електрика і магнетизм. – 2001. – 452 с.
8. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. – М.: Высш. шк., 1983. – 463 с.
9. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1977 – 1979. – Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика.

Додаток А – Зразок оформлення титульної сторінки звіту про виконання лабораторних робіт

Міністерство освіти та науки України
Чернігівський національний технологічний університет

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,
метрології та фізики

ЗВІТ

про виконання лабораторних робіт з фізики

Розділ (назва розділу: механіка; електромагнетизм, ...)

Виконав:

студент групи

(№ групи)

(підпис)

(дата)

.....

(Прізвище, ініціали студента)

Викладач:

.....

(підпис)

(дата)

.....

(Прізвище, ініціали викладача)

Чернігів ЧНТУ

(рік)

Додаток Б – Коефіцієнти Стьюдента

Таблиця Б1 – Значення $t(p, n)$ для надійної ймовірності p при кількості вимірювань n

	$p = 0,80$	$0,90$	$0,95$	$0,98$
$n = 2$	3,08	6,31	12,71	31,82
3	1,89	2,92	4,30	6,96
4	1,64	2,35	3,18	4,54
5	1,53	2,13	2,78	3,75
6	1,48	2,02	2,57	3,36
7	1,44	1,94	2,45	3,14
8	1,41	1,90	2,36	3,00
9	1,40	1,86	2,31	2,90
10	1,38	1,83	2,26	2,82
11	1,37	1,81	2,23	2,76
12	1,36	1,80	2,20	2,72
13	1,36	1,78	2,18	2,68
14	1,35	1,77	2,16	2,65
15	1,34	1,76	2,14	2,62

Додаток В – Виведення робочої формули для розрахунку питомого заряду електрона (лабораторна робота №15)

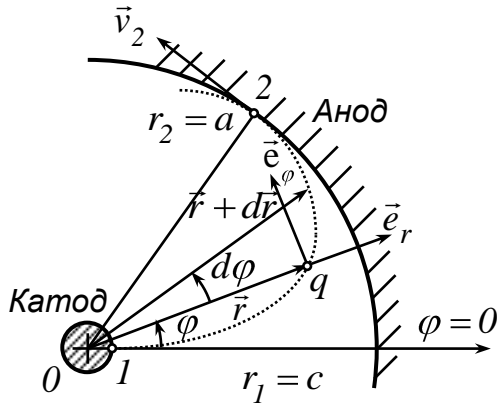


Рисунок В.1 – Рух електрона у просторі між катодом і анодом

Для виведення формули (15.2) лабораторної роботи №15 будемо вважати, що початкова швидкість електрона, який вилетів з катода, дорівнює нулю. Тоді очевидно, що при даній орієнтації електричного і магнітного полів, електрон рухатиметься в площині, перпендикулярній до осі електродів. Для розрахунків скористаємося полярною системою координат, тобто будемо характеризувати положення електрона в площині руху відстанню r від осі катода та полярним кутом φ (рисунок В.1).

У просторі між катодом і анодом електрон рухається у взаємно перпендикулярних електричному і магнітному полях. На *рисунок В.1* вектори напруженості електричного поля \vec{E} лежать у площині рисунка і направлені вздовж радіусів від анода до катода (радіально-симетричне поле). Вектор індукції магнітного поля \vec{B} направлений перпендикулярно площині рисунка, до нас. Отже рух електрона відбувається під дією двох сил: сили $\vec{F}_E = -e\vec{E}$ з боку електричного поля і сили Лоренца $\vec{F}_L = -e \vec{v} \times \vec{B}$ з боку магнітного поля. Застосуємо до електрона що рухається рівняння моментів:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}_E + \vec{M}_L,$$

де $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$ – момент імпульсу електрона відносно осі катода; $\vec{M}_E = \vec{r} \times \vec{F}_E$ – момент сили \vec{F}_E , яка діє на електрон з боку електричного поля; $\vec{M}_L = \vec{r} \times \vec{F}_L$ – момент сили Лоренца \vec{F}_L , що діє на електрон з боку магнітного поля. Або інакше

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{r} \times \vec{F}_E + \vec{r} \times \vec{F}_L, \quad (\text{В.1})$$

Сила \vec{F}_E , з якою діє на електрон електричне поле, напрямлена радіально від катода до анода, тобто $\vec{F}_E \parallel \vec{r}$, і тому вона не створює моменту сили відносно осі. Отже, в будь-якому положенні електрона $\vec{M}_E = 0$.

Момент сили Лоренца \vec{M}_L подамо у вигляді:

$$\vec{M}_L = \vec{r} \times \vec{F}_L = \vec{r} \times q \vec{v} \times \vec{B} = q \vec{r} \times \vec{v} \times \vec{B} = -e \vec{r} \times \vec{v} \times \vec{B} ,$$

а момент імпульсу електрона – відповідно:

$$\vec{L} = J\vec{\omega} = mr^2\vec{\omega} ,$$

де $J = mr^2$ – момент інерції електрона відносно осі системи, $\vec{\omega}$ — кутова швидкість електрона відносно осі системи.

Рівняння (В.1) тепер набуває вигляду:

$$\frac{d mr^2\vec{\omega}}{dt} = -e \vec{r} \times \vec{v} \times \vec{B} . \quad (\text{В.2})$$

Зробимо математичні перетворення подвійного векторного добутку у правій частині рівняння (В.2), скориставшись відомим правилом для подвійного векторного добутку:

$$\vec{a} \times \vec{b} \times \vec{c} = \vec{b} \cdot \vec{a}, \vec{c} - \vec{c} \cdot \vec{a}, \vec{b} .$$

Отримаємо:

$$\vec{r} \times \vec{v} \times \vec{B} = \vec{v} \cdot \vec{r}, \vec{B} - \vec{B} \cdot \vec{r}, \vec{v} .$$

Скалярний добуток $\vec{r}, \vec{B} = 0$ внаслідок взаємної перпендикулярності векторів \vec{r} та \vec{B} в усіх точках траєкторії руху електрона. З врахуванням сказаного, рівняння (В.2) змінюється:

$$\frac{d mr^2\vec{\omega}}{dt} = e \vec{v}, \vec{B} .$$

Беручи до уваги, що $\vec{\omega} \parallel \vec{B}$ і обидва вектори орієнтовані вздовж осі системи, подальший розв'язок рівняння зручно проводити у скалярній формі, тобто замість векторів $\vec{\omega}$ та \vec{B} розглядати їх проекції на вісь системи:

$$\frac{d mr^2\omega}{dt} = e \vec{r}, \vec{v} B . \quad (\text{В.3})$$

Для перетворення скалярного добутку \vec{r}, \vec{v} у правій частині рівняння запишемо вектор швидкості електрона \vec{v} через його складові у полярній системі координат – вздовж одиничних ортів \vec{e}_r та \vec{e}_φ (рисунок В.1):

$$\vec{v} = \frac{dr}{dt} \cdot \vec{e}_r + r \frac{d\varphi}{dt} \cdot \vec{e}_\varphi .$$

Тоді

$$\vec{r}, \vec{v} = \left(\vec{r}, \left(\frac{dr}{dt} \cdot \vec{e}_r + r \frac{d\varphi}{dt} \cdot \vec{e}_\varphi \right) \right) = \frac{dr}{dt} \vec{r}, \vec{e}_r + r \frac{d\varphi}{dt} \vec{r}, \vec{e}_\varphi .$$

Електрика і магнетизм

Скалярний добуток $\vec{r}, \vec{e}_r = r$, оскільки вектори $\vec{r} \parallel \vec{e}_r$ і збігаються за напрямком, а добуток $\vec{r}, \vec{e}_\varphi = 0$, оскільки $\vec{r} \perp \vec{e}_\varphi$ (рисунок В.1). Отже $\vec{r}, \vec{v} = r \frac{dr}{dt}$, і рівняння (В.3) можна записати у вигляді:

$$\frac{d}{dt} mr^2 \omega = erB \frac{dr}{dt}. \quad (\text{В.4})$$

Ми отримали диференціальне рівняння руху електрона у просторі між катодом і анодом лампи. Аби проінтегрувати це рівняння, перетворимо праву частину рівняння (В.4), врахувавши, що у цьому рівнянні величина r є змінною, тобто $r = r(t)$:

$$r \frac{dr}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} r^2 \right).$$

Отже рівняння В.4) можна подати у вигляді

$$\frac{d}{dt} mr^2 \omega = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} eBr^2 \right). \quad (\text{В.5})$$

Після інтегрування (В.5) по часу отримаємо рівняння

$$mr^2 \omega + C = \frac{1}{2} er^2 B. \quad (\text{В.6})$$

У цьому рівнянні дві величини, які змінюються з часом: $r = r(t)$ та $\omega = \omega(t)$. Сталу інтегрування C можна знайти з початкових умов: у початковий момент руху (точка 1 на рисунку В.1) $r(0) = c$ – радіусу катода, а лінійна і кутова швидкості, $v(0) = 0$ і $\omega(0) = 0$, дорівнюють нулю. Звідси

$$C = \frac{1}{2} ec^2 B.$$

Підставляємо це значення у рівняння (В.6) і, розв'язавши рівняння відносно ω , одержимо:

$$\omega = \frac{Be}{2m} \left(1 - \frac{c^2}{r^2} \right). \quad (\text{В.8})$$

За умови $B = B_{\text{кр}}$ траєкторія електрона майже торкається внутрішньої поверхні анода (точка 2 на рисунку В.1). У цій точці $v_2 \perp r_2$ і $r_2 = a$ – радіусу анода. Кутову швидкість у цей момент можна виразити як $\omega = \frac{v_2}{a}$. Рівняння (В.8) набуває вигляду:

$$\frac{v_2}{a} = \frac{B_{\text{кр}} e}{2m} \left(1 - \frac{c^2}{a^2} \right). \quad (\text{А.8})$$

Швидкість v_2 електрона у точці 2 визначимо з таких міркувань. Магнітне поле не виконує роботу над електроном, оскільки сила Лоренца весь час перпе-

Електрика і магнетизм

ндикулярна до вектора швидкості електрона. В той же час робота електричного поля при переміщенні електрона від катода до анода (від точки 1 до точки 2 на *рисунку В.1*) витрачається на збільшення кінетичної енергії електрона, тобто

$$eU = \frac{mv_2^2}{2}, \quad \text{отже} \quad v_2 = \sqrt{\frac{2eU}{m}}.$$

де U – різниця потенціалів між катодом і анодом лампи (анодна напруга);
 $\frac{e}{m}$ – питомий заряд електрона.

Підставивши це значення швидкості v_2 у рівність (В.8) і розв'язавши отримане рівняння відносно $\frac{e}{m}$, одержимо формулу (15.2):

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{B_{кр}^2 \cdot a^2 \left(1 - \frac{c^2}{a^2}\right)^2}.$$