

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ФІЗИКИ

ЧАСТИНА 2

**ЕЛЕКТРИКА
ТА ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ**

За редакцією
проф.Зачека І.Р., доц.Українець Н.А.

Львів
2022

УДК 53 (076.5) *Рекомендовано Науково-методичною радою*
ББК 22.3я 73 *Національного університету “Львівська політехніка”*
Л 77 *як навчальний посібник для студентів усіх форм навчання*
 (протокол № 65 від 20 жовтня 2022 року)

**Автори: Зачек І.Р., Кашуба А.І., Покладок Н.Т., Романюк М.М.,
Семків І.В., Соловійов М.В., Товстюк Н.К., Українець Н.А.,
Чекайло М.В.**

Рецензенти:

Волошиновський А.С., завідувач кафедри експериментальної фізики Львівського національного університету імені І. Франка, д-р фіз.-мат. наук, професор

Болеста І.М., професор кафедри радіофізики та комп'ютерних технологій Львівського національного університету імені Івана Франка, д-р фіз.-мат. наук, професор

Льчук Г.А., професор кафедри загальної фізики Національного університету “Львівська політехніка”, д-р фіз.-мат. наук, професор

Зачек І. Р., Кашуба А.І., Покладок Н.Т. і ін.

Лабораторний практикум з фізики. Ч. 2: Електрика та електромагнетизм, навч. посібник / Зачек І.Р., Кашуба А.І., Покладок Н.Т., і ін. – Львів: видавництво «Львівська політехніка», 2022. – 190 с.

У посібнику подано інструкції до виконання лабораторних робіт у лабораторії електричних та магнітних явищ Національного університету “Львівська політехніка”. Крім того, наведені основні вимірювальні прилади, а також теоретична частина до блоків лабораторних робіт. Посібник для студентів очної, заочної та дистанційної форм навчання.

ISBN 978-617-607-697-1

© Зачек І.Р., Кашуба А.І., Покладок Н.Т.,
Романюк М.М., Семків І.В., Соловійов М.В.,
Товстюк Н.К., Українець Н. А., Чекайло М.В.
© Видавництво «Львівська політехніка», 2022

ЗМІСТ

Вступ	7
Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола	
1. Будова і принцип роботи основних електровимірювальних приладів ..	8
1.1. Магнітоелектрична система	8
1.2. Електромагнітна система	10
1.3. Електродинамічна система	12
1.4. Теплові прилади	14
1.5. Індукційна система	16
1.6. Вібраційна система	17
1.7. Електростатична система	18
1.8. Термостатична система	19
1.9. Детекторна система	19
1.10. Дзеркальні гальванометри	19
2. Ціна поділки та клас точності електровимірювальних приладів	22
2.1. Чутливість вимірювальних приладів	23
2.2. Ціна поділки шкали приладу	23
2.3. Клас точності	24
3. Шунти і додаткові опори	26
3.1. Амперметри	26
3.2. Вольтметри	28
3.3. Ватметри	29
3.4. Цифрові вимірювальні прилади	29
4. Умовні позначення електричного кола	32
5. Правила, поради та вказівки	35
5.1. Правила внутрішнього розпорядку в електричній лабора торії	35
5.2. Правила техніки безпеки	36
5.3. Поради та вказівки при виконанні робіт в електричній лабора торії	37

Розділ 1. Електростатика

§ 1.1. Взаємодія електричних зарядів. Закон Кулона.....	40
§ 1.2. Характеристики електричного поля.....	41
§ 1.3. Теорема Остроградського- Гауса та її застосування.....	45
§ 1.4. Електроємність провідника.....	47
§ 1.5. Зарядження і розрядження конденсатора.....	49
Лабораторна робота № 1. Вивчення властивостей електростатичного поля.....	53
Лабораторна робота № 14. Вивчення процесів зарядження і розрядження конденсатора через опір.....	60

Розділ 2. Постійний струм

§ 2.1. Електричний струм і його характеристики.....	65
§ 2.2. Закон Ома для ділянки кола. Опір провідників.....	66
§ 2.3. Розгалуження струму. Правила Кіргофа.....	69
Лабораторна робота № 21. Розширення діапазону вимірювання амперметра і вольтметра.....	71
Лабораторна робота № 3. Перевірка закону Ома для постійного струму.....	79
Лабораторна робота № 4. Визначення опору резисторів за допомогою містка постійного струму (містка Уітстона).....	82
Лабораторна робота № 5. Перевірка правил Кірхгофа.....	87
Лабораторна робота № 8. Визначення електрорушійної сили джерела струму методом компенсації.....	91

Розділ 3. Термоелектричні та контактні явища

§ 3.1. Робота виходу. Явище термоелектронної емісії.....	97
§ 3.2. Контактні явища.....	100
§ 3.3. Явище Зеебека.....	102
§ 3.4. Явище Пельтьє.....	104
§ 3.5. Явище Томсона.....	105

Лабораторна робота № 7. Визначення роботи виходу електронів з металу за допомогою явища термоелектронної емісії.....	106
Лабораторна робота № 9. Градування термопари і спостереження явища Пельтьє.....	110

Розділ 4. Магнітні явища

§ 4.1. Магнітне поле.....	114
§ 4.2. Магнітне поле постійного струму. Закон Біо-Савара-Лапласа.....	116
§ 4.3. Потік магнітної індукції. Робота струму в магнітному полі.....	118
§ 4.4. Дія магнітного поля на електричний струм. Закон Ампера.....	119
§ 4.5. Дія магнітного поля на рухомий електричний заряд.....	120
§ 4.6. Явище електромагнітна індукція.....	121
§ 4.7. Явище самоіндукції. Індуктивність контуру.....	122
Лабораторна робота № 10. Вивчення явища електромагнітної індукції.....	125
Лабораторна робота № 11. Визначення горизонтальної і вертикальної складових індукції магнітного поля Землі за допомогою земного індуктора.....	131

Розділ 5. Електромагнітні коливання

§ 5.1. Вільні електромагнітні коливання в коливальному контурі.....	140
§ 5.2. Вимушені електромагнітні коливання.....	145
Лабораторна робота № 16. Дослідження власних коливань у коливальному контурі.....	150
Лабораторна робота № 17. Вивчення вимушених електричних коливань у коливальному контурі.....	153

Розділ 6. Змінний електричний струм

§ 6.1. Змінний струм.....	156
§ 6.2. Коло змінного струму з активним опором.....	158
§ 6.3. Коло змінного струму з активним опором і індуктивністю.....	159

§ 6.4. Коло змінного струму з конденсатором.....	161
§ 6.5. Коло змінного струму з активним опором і ємністю.....	163
§ 6.6. Потужність у колі змінного струму.....	165
Лабораторна робота № 13. Визначення коефіцієнту потужності і перевірка закону Ома для кола змінного струму.....	167
Лабораторна робота № 15. Перевірка закону Ома для електричного кола змінного струму з R і C	170
Лабораторна робота № 2. Визначення електроємності конденсаторів.....	174
Лабораторна робота № 18. Визначення індуктивності соленоїда.....	179
Лабораторна робота № 12. Вивчення лічильника змінного струму.....	183
Додаток	186
Література	189

ВСТУП

Навчальний посібник «Лабораторний практикум з фізики», частина 2, рекомендований для студентів інженерно-технічних спеціальностей Національного університету «Львівська політехніка».

Посібник складається з шести розділів, кожний з яких містить **теоретичну частину** і відповідні **інструкції до лабораторних робіт**. У **теоретичній частині** описано явища і ефекти, які досліджуються в даному розділі, пояснюється фізична суть явищ і виводяться основні формули, що використовуються у відповідних лабораторних роботах. В **інструкціях до лабораторних робіт** висвітлюється мета досліджень, що здійснюються в даній роботі, подано детальний опис вимірювальних пристроїв, описано послідовність виконання робіт, подано взірці таблиць для записів результатів вимірювань і розрахунків, а також контрольні запитання. Окремі роботи містять перелік необхідних дій, що стосуються техніки безпеки при виконанні даної роботи.

Щоб підготуватися до виконання лабораторної роботи і знайти відповіді на контрольні запитання, які можуть бути поставлені викладачем при допуску до виконання роботи або зарахуванні результатів дослідження, необхідно ґрунтовно опрацювати відповідний розділ даного посібника. При потребі, для більш глибокого вивчення відповідного явища можна використати підручники, список яких подано в кінці цього посібника.

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

1. Будова і принцип роботи основних електровимірювальних приладів

У залежності від того, яке фізичне явище використовується в даному приладі для вимірювання, електровимірювальні прилади поділяються на системи. Розрізняють такі основні системи електровимірювальних приладів.

1.1 Магнітоелектрична система

Принцип дії приладів магнітоелектричної системи ґрунтується на

дії магнітного поля постійного магніту на рухому котушку, по якій протікає струм, величину якого необхідно виміряти. Схема будови такого приладу приведена на рис.1.

Магнітне поле створюється сильним постійним магнітом підковоподібної форми. До ніжок цього магніту прикріплені полюсні наконечники (*N*, *S*), які вгнутими циліндричними поверхнями обернені один до одного. Між цими наконечниками нерухомо закріплено залізний циліндр дещо меншого радіуса. Цей циліндр служить магнітопроводом, і тим самим зменшує втрати магнітного поля між полюсними наконечниками.

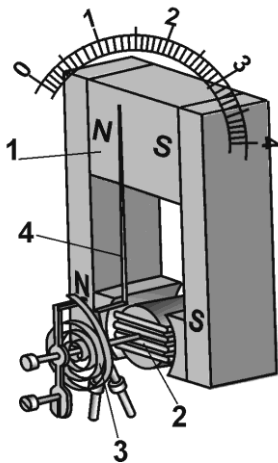


Рис.1

У невеликій повітряній щілині між залізним циліндром і полюсними наконечниками може вільно обертатися закріплена на осі котушка 2, яка охоплює залізний циліндр. Котушка складається з алюмінієвого каркаса прямокутної форми, на якому намотана тонка дро-

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

тина. На осі котушки закріплена стрілка 4, кінець якої переміщується над шкалою з поділками. Взаємодія струму, що проходить по обмотці котушки, і магнітного поля в повітряній щілині зумовлює виникнення обертового моменту, під дією якого котушка намагається обертатися на осі. Момент протидії створюють дві спіральні пружини 3, які закручені в протилежні сторони і одночасно служать для підведення струму. При пропусканні постійного струму через котушку, за рахунок взаємодії струму з магнітним полем магніту котушка буде обертатись навколо осі доти, поки момент протидії пружин, який зростає із збільшенням кута повороту котушки, не стане рівним обертовому моменту. Оскільки момент протидії пружин є пропорційним до кута закручування, то кут відхилення котушки і з'єднаної з нею стрілки буде пропорційним силі струму, що протікає по котушці.

Лінійна залежність між струмом і кутом відхилення стрілки дає можливість зробити шкалу приладу рівномірною. Через те, що каркас рухомої котушки виготовлений з алюмінію, тобто, з провідника, то при русі в магнітному полі індукційні струми, що виникають у ньому створюють гальмівний момент, який обумовлює швидке заспокоєння стрілки.

Прилади магнітоелектричної системи використовують для вимірювань лише у колах постійного струму. Постійний струм необхідно пропускати через котушку в одному визначеному напрямі. Прилади, які мають такі властивості, називаються поляризованими і мають на своїх затискачах позначення “+” і “-“. Якщо дивитися на прилад зі сторони шкали, то знак “+” ставиться біля правого затискача (клеми). При вмиканні приладу в коло до цього затискача підводять провідник від додатного затискача джерела струму. Ця вимога не стосується приладів, в які мають нульову поділку посередині шкали.

До переваг приладів магнітоелектричної системи відносяться:

а) висока чутливість і точність показів;

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

- б) нечутливість до зовнішніх магнітних полів;
- в) мале споживання енергії;
- г) рівномірність шкали;
- д) аперіодичність (стрілка швидко встановлюється на певній поділці шкали практично без коливань).

До недоліків приладів цієї системи можна віднести:

- а) можливість проводити вимірювання тільки в колі постійного струму;
- б) чутливість до перевантажень.

1.2 Електромагнітна система

Принцип дії приладів електромагнітної системи ґрунтується на взаємодії магнітного поля котушки, по якій протікає вимірюваний струм, і залізного осердя, яке є одночасно

рухомою частиною. На рис. 2 приведена конструкція приладу цієї системи, яка найчастіше зустрічається. Струм, який необхідно виміряти, протікає по котушці 1, що має плоску форму з вузькою щілиною. Залізне осердя 2, яке має форму еліпса, закріплене ексцентрично на осі і може входити в щілину котушки, обертаючись навколо цієї осі. Під дією магнітного поля котушки осердя намагається розміститися так, щоб його поверхню перети-

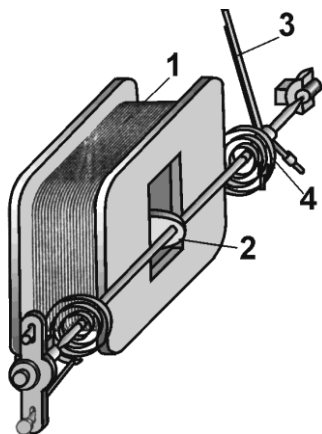


Рис.2 ноло як найбільше ліній індукції. Із зростанням сили струму в котушці 1 осердя 2 буде з більшою силою втягуватись в щілину котушки, і тим самим повертати на більший кут вісь, до якої прикріплена тоненька алюмінієва стрілка 3. Момент протидії створюється спіральною пружиною 4.

Прилади електромагнітної системи мають повітряний заспокоювач - циліндричну камеру, в якій рухається легкий алюмінієвий поршень.

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

.При обертанні осердя на поршень діє сила опору повітря, внаслідок чого коливання рухомої частини приладу швидко згасає.

Залізне осердя 2 втягується в щілину котушки 1 тим сильніше, чим більша величина магнітного потоку всередині щілини і чим більша намагніченість самого осердя. У першому наближенні можна вважати, що і величина магнітного потоку всередині щілини, і намагніченість осердя пропорційні напруженості магнітного поля, яке створюється котушкою, а, значить, і силі струму в котушці. Отже, обертовий момент буде пропорційним до квадрату сили струму, що протікає в котушці.

Оскільки при зміні напрямку струму в котушці міняється як напрям магнітного поля, так і полярність намагнічення осердя, то зміна напрямку струму не викличе зміни напрямку обертового моменту, що діє на рухому частину приладу. Отже, прилади електромагнітної системи можуть бути використані як при вимірюванні на постійному, так і на змінному струмах. Через квадратичну залежність обертового моменту від сили струму, шкала приладів даної системи є нерівномірною.

Переваги приладів електромагнітної системи:

- а) можливість проводити вимірювання як постійного, так і змінного струму;
- б) простота конструкції;
- в) механічна стійкість (міцність);
- г) витривалість до перевантажень.

Недоліки приладів даної системи:

- а) нерівномірність шкали;
- б) недостатня аперіодичність;
- в) дещо менша точність, порівняно з приладами магнітоелектричної системи;
- г) залежність показів від зовнішніх магнітних полів.

1.3 Електродинамічна система

Будова приладу електромагнітної системи показана на рис. 3.

Всередині нерухомо закріпленої котушки 1 може обертатись на осі рухома котушка 2, до якої жорстко прикріплена стрілка 4, що переміщається над шкалою 5. Момент протидії створюється двома спіральними пружинами 3, як і в приладах магнітоелектричної системи. Струм, який необхідно виміряти, проходить через обидві котушки. У результаті взаємодії магнітного поля нерухомої котушки 1 і струму в рухомій створюється обертовий момент, під впливом якого рухома котушка буде намагатись повернутися так, щоб площина її витків встановилась паралельно до площини витків нерухомої котушки, а їх магнітні поля співпадали б за напрямом. Цьому протидіють пружинки 3, внаслідок чого рухома котушка встановиться в такому положенні, коли обертовий момент буде дорівнювати протидіючому.

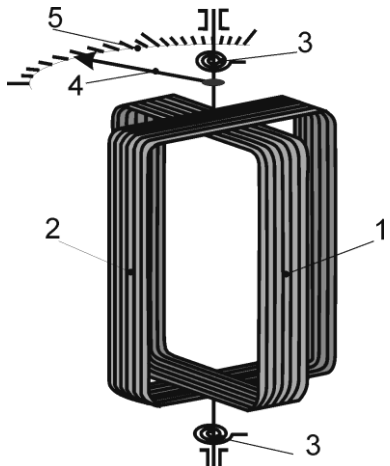


Рис.3

Котушки в приладах електродинамічної системи, в залежності від призначення, можуть бути з'єднані між собою як паралельно, так і послідовно. Якщо котушки приладу з'єднати паралельно, то такий прилад може бути використаний як амперметр. Якщо котушки з'єднати послідовно і приєднати до них додатковий опір, то такий прилад може бути використаний як вольтметр.

При зміні напрямку струму в обох котушках напрям обертового моменту не змінюється. Тому прилади електродинамічної системи можуть використовуватись як для вимірювань на постійному, так і на змінному струмах. Аперіодичність в цих приладах, аналогічно як і в елект-

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

ромагнітних, досягається за допомогою повітряного заспокоювача.

При вимірюванні в електричному колі потужності, що споживається з електричної мережі, широко використовується електродинамічний ватметр. Схема вмикання ватметра в електричне коло приведена на рис. 4. Він має дві котушки: нерухому 1-2, яка має

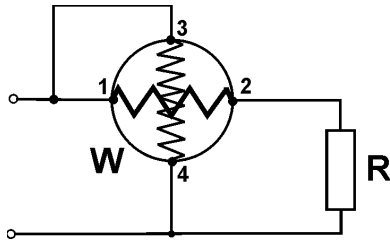


Рис.4

невелике число витків з товстого дроту і вмикається послідовно з тією ділянкою кола, в якій необхідно виміряти споживану потужність; і рухому котушку 3-4, яка має велику кількість витків з тонкого дроту і розміщена на осі нерухомої котушки. На цій же осі закріплена стрілка, поршень повітряного заспокоювача і дві спіральні пружинки, які служать для створення протидіючого моменту і підведення струму до рухомої котушки. Рухома котушка вмикається в електричне коло паралельно до цієї ділянки, де вимірюється споживана потужність. Для збільшення опору рухомої котушки послідовно з нею в приладі ввімкнено додатковий опір R_d .

У такому разі сила взаємодії між котушками, а, значить, і кут обертання рухомої котушки є пропорційними до сили струму в нерухомій котушці і напруги на затискачах рухомої котушки, тобто, до потужності, що споживається в електричному колі. Отже, відхилення рухомої частини приладу є пропорційним до потужності і тому шкалу приладу можна проградувати у ватах. З цього також випливає, що ватметр цієї системи має рівномірну шкалу.

Переваги приладів електродинамічної системи:

- а) можливість проводити вимірювання у колах постійного струму і змінного струму;
- б) достатня точність.

Недоліки приладів електродинамічної системи:

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

- а) нерівномірність шкали амперметрів і вольтметрів цієї системи;
- б) чутливість до зовнішніх магнітних полів;
- в) велика чутливість до перевантажень;
- г) висока ціна цих приладів.

Переважаючо електродинамічні амперметри і вольтметри використовуються, як контрольні прилади при вимірюваннях у колах змінного струму. Для вимірювання постійного струму такі прилади використовувати недоцільно, оскільки вони мають більшу вартість, ніж магнітоелектричні і не мають у порівнянні з ними жодних переваг.

Є електродинамічні прилади, що складаються з трьох котушок (рис. 5): двох нерухомих 1 і однієї рухомої 2, сполученої з легенькою алюмінієвою стрілкою 4. Котушка 2 обертається всередині двох нерухомих. По котушках 1 проходить струм однакового напрямку, а по рухомій 2 – у напрямі, перпендикулярному до згаданого. Чим більший іде струм, тим на більший кут повертається рухома котушка, розкручуючи спіральні пружинки 3, які створюють протидіючий момент. Ці ж пружинки за відсутності струму повертають рухома котушку і сполучену з нею стрілку у вихідне положення. Шкала цих приладів теж є нерівномірною.

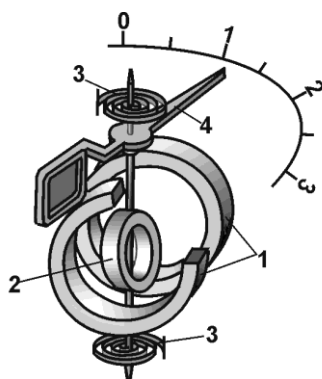


Рис.5

нерівномірною.

1.4 Теплові прилади

Як вказує сама назва, у цих приладах використано теплову дію струму. Основною частиною в цих приладах є тонка дротинка, що витримує високу температуру (переважно її виготовляють із сплаву срібла

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

і платини), закріплена в двох точках A і B (рис.6). До середини цієї

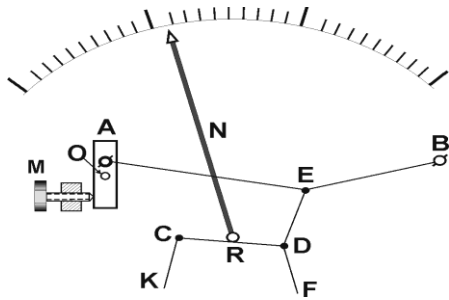


Рис.6

дротинки припаяна металева нитка EF , яка відтягується тонкою шовковою ниткою CD , перекинutoю через кільцатко R . Другий кінець цієї нитки прикріплений до сталевій пружини K , яка створює натяг нитки. До кільцатка прикріплена легенька стрілка N , кінець якої переміщується по шкалі S . Якщо проходить струм по

дротинці AB , то вона видовжується внаслідок нагрівання її струмом, і пружина, відтягуючи металеву нитку EF , приводить до обертання кільцатка R і, тим самим, до відхилення стрілки N . Оскільки кількість теплоти, що виділяється струмом, пропорційна квадрату сили струму, то приладами теплової системи можна вимірювати як постійний, так і змінний струм. З тієї самої причини шкала теплових приладів є нерівномірною. Слабким місцем цих приладів є те, що положення стрілки на шкалі залежить від температури довкілля. Тому перед початком роботи необхідно за допомогою спеціального пристрою M (рис.6) встановити стрілку на нульову поділку шкали.

Переваги приладів теплової системи:

- а) можливість вимірювань як на постійному, так і на змінному струмах;
- б) незалежність показів від частоти і форми кривої змінного струму;
- в) нечутливість до зовнішніх магнітних полів.

До недоліків теплових приладів можна віднести:

- а) нерівномірність шкали;
- б) наявність теплової інерції, в зв'язку з тим необхідно вичікувати деякий час, щоб стрілка приладу остаточно встановилася;
- в) залежність показів від температури;
- г) висока ціна приладів.

1.5 Індукційна система

Будова приладів індукційної системи заснована на взаємодії струмів, що індукуються в рухомій частині приладу, з магнітними потоками нерухомих електромагнітів. Схематичне зображення такого приладу приведене на рис. 7. Алюмінієвий диск *A* жорстко скріплений з віссю, на якій закріплена пружина *B* і стрілка *C*. Цей диск може пере-

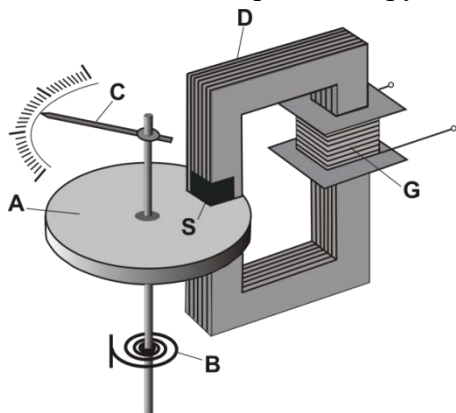


Рис.7

вміщатися в повітряній щілині електромагніту *D* з обмоткою *G*. Частина поверхонь обох полюсів електромагніту прикривається мідними або алюмінієвими пластинками *S*, тобто, ці пластинки виконують роль електромагнітних екранів. Змінний струм, що проходить по обмотці котушки *G*, створює магнітний потік, який екранами розділяється на два потоки, зсунуті між собою за фазою деякий кут. Внаслідок цього на диск буде діяти обертовий момент.

До індукційної системи відносяться електричні лічильники

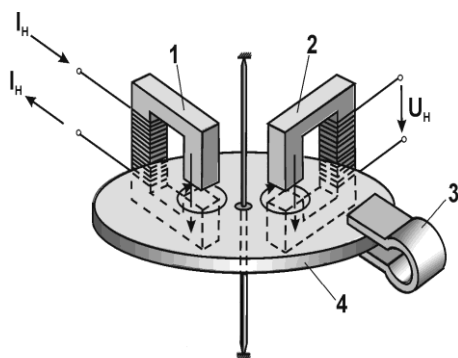


Рис.8

змінного струму. Використовуються також і ватметри цієї системи. Електричний лічильник (рис.8) складається з двох електромагнітів 1 і 2, між полюсами яких може вільно обертатись алюмінієвий диск 4 (в електричних лічильниках протидіючий момент, що створюється спіральною пружиною, відсутній).

На осердя 1 електромагніту на-

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

саджено котушку з малою кількістю витків, виготовленою з товстого дроту. Цю котушку вмикають в коло електромережі послідовно з тією ділянкою кола, де необхідно виміряти витрачену електричну енергію. На електромагніт 2 насаджена ще одна котушка з великою кількістю витків з тонкого дроту, яку вмикають паралельно до вказаної ділянки кола.

Коли пропускати змінний струм по цих котушках, утворюються два змінні магнітні потоки, які пронизують диск та індують у ньому вихрові струми. Внаслідок взаємодії вихрових струмів з магнітними потоками електромагнітів диск починає обертатись. Магнітний потік котушки, ввімкненої послідовно, пропорційний величині струму I , а магнітний потік котушки, ввімкненої паралельно, пропорційний напрузі U . Оскільки обидва потоки діють на диск одночасно, тому швидкість його обертання в кожний момент часу пропорційна і величині струму I , і напрузі U , тобто, потужності $P=IU$. Кількість обертів диску пропорційна електричній енергії $W=IUt$, що споживається, і фіксується лічильним механізмом.

В приладах індукційної системи використовується електромагнітне заспокоєння, яке здійснюється за допомогою постійного магніту 3, між полюсами якого обертається диск. Індукційні струми, що виникають при русі диска, створюють гальмуючий момент.

Особливістю приладів індукційної системи є те, що вони можуть використовуватися тільки при вимірюваннях у колах змінного струму.

1.6 Вібраційна система

Робота цих приладів ґрунтується на явищі резонансу, який виникає при співпаданні власної частоти коливань рухомої частини приладу з частотою змінного струму. Прилади цієї системи в основному використовуються як герцметри, тобто, як прилади для вимірювання частоти струму. Герцметр складається з електромагніта 1 (рис.9а), що

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

живиться струмом, частоту якого необхідно виміряти. Перед полюсами розміщено залізний ярмір 2, кінець якого з'єднаний з планкою 3. Ця планка одночасно є основою ряду тонких сталевих пластинок – язичків

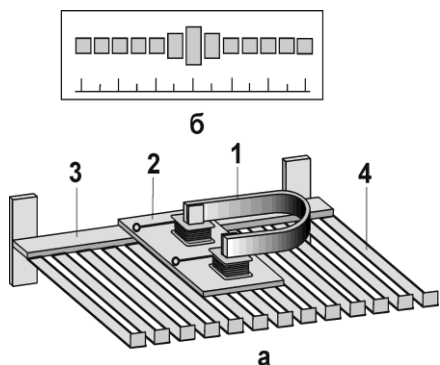


Рис.9

4, що мають різну частоту власних коливань. При проходженні струму через обмотку ярмір здійснює коливання і разом з ним коливаються язички. При цьому з найбільшою амплітудою буде коливатись той язичок, частота якого дорівнює подвоєній частоті змінного струму. Значення вимірюваної частоти визначається за амплітудою язичків, що коливаються, як показано на рис.9,б.

1.7 Електростатична система

Будова приладів цієї системи ґрунтується на взаємодії двох або декількох електрично заряджених провідників. Під дією сил електростатичного поля рухомі

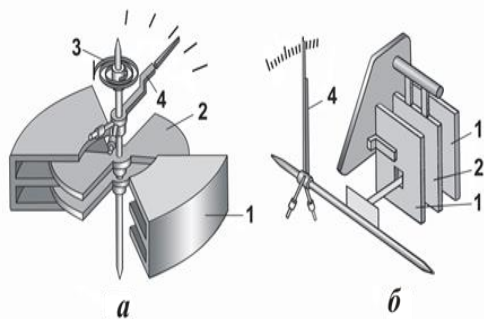


Рис.10

провідники 2 переміщуються відносно нерухомих провідників 1 (рис.10,а,б). Рухомі провідники жорстко закріплені на осі обертання, на якій закріплена стрілка 4, що переміщається над шкалою. Електростатичні прилади служать вольтметрами для безпосереднього вимірювання високих на-

пруг.

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

1.8 Термоелектрична система

Ця система характеризується використанням однієї або декількох термопар, які є в тепловому контакті з провідником зі струмом. Під дією тепла, що виділяється струмом, який необхідно виміряти, в термопарах виникає термоелектрорушійна сила (явище Зеєбека). Величина термоелектрорушійної сили є прямо пропорційною до різниці температур між контактами термопар. Постійний струм, що виникає за рахунок термоелектрорушійної сили в колі термопар, подається у вимірювальний прилад магнітоелектричної системи. Прилади термоелектричної системи використовуються, переважно, при вимірюванні змінних струмів високої частоти.

1.9 Детекторна система

Будова приладів цієї системи ґрунтується на тому, що змінний струм перетворюється за допомогою випрямляча, вмонтованого в самому приладі. Отриманий постійний пульсуючий струм після випрямлення вимірюється за допомогою чутливого приладу магнітоелектричної системи.

1.10 Дзеркальні гальванометри

Для вимірювання дуже малих струмів, напруг і величини заряду використовують дзеркальні гальванометри. У переважній більшості випадків дзеркальні гальванометри є приладами магнітоелектричної системи, у яких рухома частина виготовлена дуже легкою і закріплена не на осі, що повертається в підшипниках, а підвішена на дуже тонкій пружній металевій дротині. Будова такого гальванометра схематично показана на рис. 11.

На пружній металевій нитці A , закріплена рухома котушка B , що може повертатися між полюсами сильного постійного магніту NS .

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

Металева нитка одночасно підводить струм до одного з кінців котушки. Другий кінець котушки приєднаний до тонкої пружинки C , яка, в свою чергу, з'єднана з відповідним затискачем приладу.

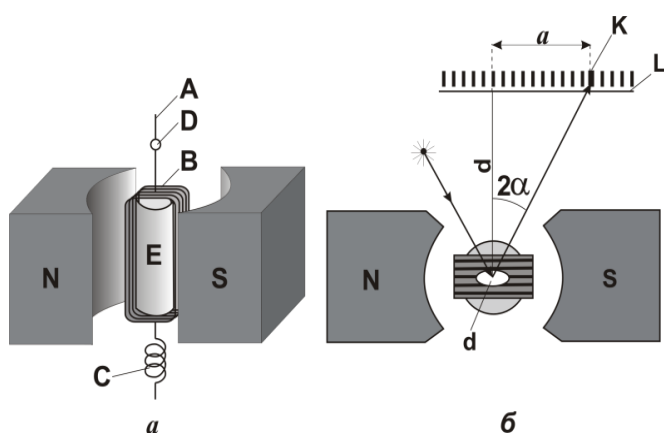


Рис. 11

Коли дзеркальце повертається на кут α , то світловий зайчик K відхилиться по шкалі L на величину a (рис. 11,б), яку визначають із співвідношення:

$$a = dtg(2\alpha),$$

де a – відлік по шкалі; d – відстань від дзеркала до шкали; α – кут повороту рухомої частини (дзеркальця).

Як вже згадувалось вище, гальванометри призначені для вимірювання малих струмів та малих напруг. Їх чутливість, тобто, величина струму, що відповідає одній поділці шкали, лежить в межах $10^{-4} \div 10^{-10}$, а в деяких випадках навіть 10^{-14} А.

Якщо необхідно виміряти малу величину заряду, що протікає за невеликий проміжок часу (частки секунди), то використовують балістичний гальванометр. Від звичайного дзеркального гальванометра він відрізняється тим, що його рухома частина має значно більший мо-

Котушка може обертатись навколо нерухомого циліндра E , який використовують для зменшення магнітного опору. На рухомій частині гальванометра закріплюють невелике дзеркальце D , за допомогою якого проводять відлік кута відхилення системи.

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

мент інерції. Тому період коливань балістичного гальванометра знаходиться в межах $10 \div 20$ секунд, тоді як у звичайного гальванометра він дорівнює декілька секунд.

Наявність достатньо великого періоду коливань приводить до того, що імпульс струму, якщо він короткочасний, припиняється раніше, ніж рухома частина встигне відхилитись від положення рівноваги на помітний кут. При виконанні цієї умови можна записати:





$$q = C_B \cdot \alpha,$$

тобто, заряд q , що протікає через обмотку гальванометра, є пропорційною до кута відхилення його рухомої частини. Величина C_B називається балістичною сталою гальванометра, яка числово дорівнює величині електричного заряду, який протікаючи через котушку гальванометра, зумовлює максимальне відхилення світлового зайчика на 1 мм шкали, яка знаходиться від дзеркальця на відстані 1м.

Умовні позначення різних систем електровимірювальних приладів, що подано в табл. 1, вказуються на шкалі відповідного приладу.

Таблиця 1

Система приладу та її умовне позначення

Магнітоелектрична		з механічною протидіючою силою	
Електромагнітна		з механічною протидіючою силою	
Електродинам	без заліза	з механічною протидіючою силою	
		без механічної протидіючої сили	

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

	фєродинамічна	з механічною протидіючою силою	
		без механічної протидіючої сили	
Індукційна		з механічною протидіючою силою	
		без механічної протидіючої сили	
Теплова			
Термоелектрична		з контактним термоперетворювачем	
		з ізолюваним термоперетворювачем	
Детекторна			
Електростатична			

2. Ціна поділки та клас точності електровимірювальних приладів

Розвиток електричних вимірювань призводить до підвищення вимог до якості електровимірювальних приладів. Перша основна вимога, що ставиться до всіх електричних вимірювальних приладів, полягає в

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

тому, щоб вмикання їх якнайменше впливало на режим в електричному колі. Друга вимога стосується до підвищення вимог до чутливості і точності приладів. Третя вимога – це незалежність роботи і показів приладу від зовнішніх умов (температури, магнітного або електричного поля і т. ін.).

2.1 Чутливість електровимірювального приладу

Чутливістю приладу називають величину, яка вказує, яка кількість поділок шкали приладу dN або який кут повороту стрілки приладу $d\varphi$ – залежно від способу задання чутливості, відповідає приросту вимірюваної величини на одиницю:

$$S_{I_N} = \frac{dN}{dI}, S_{I_\varphi} = \frac{d\varphi}{dI},$$

$$S_{U_N} = \frac{dN}{dU}, S_{U_\varphi} = \frac{d\varphi}{dU}.$$

Розмірність чутливості залежить від характеру вимірюваної величини: чутливість приладу до струму, чутливість приладу до напруги і т.д. Наприклад, якщо стрілка міліамперметра відхилилась на одну поділку при протіканні через нього струму величиною $0,5 \text{ mA}$, то чутливість буде: $S = 1 / 0,5 = 2 \text{ под/mA}$.

2.2 Ціна поділки шкали приладу

Перед початком проведення електричних вимірювань необхідно визначити ціну поділки шкали приладу, тобто, *значення вимірюваної електричної величини, що викликає відхилення стрілки (вказівника) приладу на одну поділку.*

$$G_I = \frac{I_g}{N_{uu}}, G_U = \frac{U_g}{N_{uu}},$$

де I_B – верхня межа вимірювання сили струм у даному діапазоні вимірювань; U_B – верхня межа вимірювання напруги у даному діапазоні

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола вимірювань; $N_{ш}$ – число поділок шкали.

Отже, якщо стрілка приладу відхилилася на N поділок, то результат вимірювання буде

$$I = NG_I = N \frac{I_г}{N_{ш}}, \quad U = N G_U = N \frac{U_г}{N_{ш}}.$$

У загальному випадку ціна поділки є різницею значень вимірної величини для двох сусідніх поділок шкали.

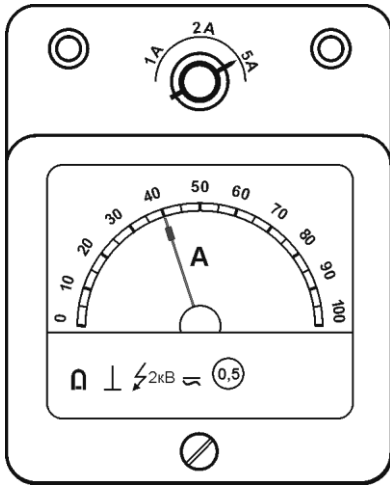


Рис. 12
дорівнюватиме:

Ціна поділки залежить від верхньої і нижньої межі вимірювання приладу і від числа поділок шкали. Особливо це треба мати на увазі тоді, коли використовується при вимірюванні прилад, в якого верхня межа вимірювань має декілька значень (рис. 12).

Наприклад, в електричне коло ввімкнено амперметр, верхня межа якого встановлена на $5A$ (рис. 12), а шкала приладу має 100 поділок. Тоді ціна поділки такого приладу дорівнює:

$$G_I = \frac{5}{100} = 0,05 \frac{A}{под}.$$

Чутливість приладу в даному випадку

$$S = \frac{1}{G} = \frac{1}{0,05} = 20 \frac{под}{A}.$$

2.3 Клас точності

Однією з важливих характеристик електровимірювального приладу є клас точності, який необхідно знати при визначенні похибки вимірюва-

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

ної величини. Залежно від ступеня точності показів електровимірювальні прилади поділяються на сім класів, що позначаються відповідно числами: **0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0**.

Клас точності приладу вказують на його шкалі числом у колі або без нього. Наприклад, клас точності приладу, показаного на рис.12, дорівнює 0,5.

Клас точності приладу, це задане у відсотках відношення допустимої основної абсолютної похибки приладу в робочій частині шкали до верхньої межі вимірювального приладу. Наприклад, клас точності

амперметра $K_I = \frac{\Delta I}{I_{\text{верх}}} \cdot 100\%$, вольтметра $K_U = \frac{\Delta U}{U_{\text{верх}}} \cdot 100\%$.

Для знаходження відносної похибки, заданої у відсотках, необхідно величину класу точності помножити на відношення верхньої межі вимірювання до значення виміряної величини. Наприклад, якщо амперметр з класом точності 0,5 і верхньою межею 5А показує 2,0А (рис.12), то відносна похибка дорівнює:

$$\delta I = 0,5 \cdot \frac{5}{2,0} = 1,25\%.$$

Відносна похибка в різних ділянках шкали, тобто для різних показів приладу, має різне значення, причому, при наближенні показів приладу до початку шкали відносна похибка збільшується. Наприклад, якщо амперметр показує 0,5А, то основна відносна похибка буде вже дорівнювати:

$$\delta I = 0,5 \cdot \frac{5}{0,5} = 5\%.$$

Звідси випливає, що користуватися початковою частиною шкали приладу небажано. Тому для одержання точніших вимірювань рекомендується користуватися такими приладами, для яких шукана вимірю-

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

вимірювана величина наближається до номінального (граничного) показу їх шкали. Наприклад, якщо необхідно виміряти силу струму, величина якого біля $2,5\text{A}$, то при наявності двох амперметрів з однаковим класом точності і з верхньою межею у одного 10A , а в другого – 3A , доцільніше для більшої точності вимірювань використати амперметр з верхньою межею 3A . Цю вимогу задовольняють прилади, що мають кілька меж вимірювань.

На шкалі електровимірювального приладу також вказується, для якого струму призначений даний прилад. Постійний струм позначається умовно однією рисою (—) або двома паралельними рисками (=), а змінний струм – (\sim). Якщо на приладі є обидва знаки (\sim) або (\cong), то це означає, що прилад придатний як для постійного, так і для змінного струму. На приладі ще позначається його робоче положення – вертикальне (\uparrow) або горизонтальне (\rightarrow) і величина напруги, при якій перевірялась ізоляція приладу ($\nless 2\text{kV}$), а також умовне позначення, системи до якої відноситься прилад (див.табл.1).

3. Шунти і додаткові опори.

Часто на практиці доводиться вимірювати струми чи напруги, значення яких перевищують за величиною можливості вимірювання приладу, тому при проведенні вимірювань необхідно розширювати верхню межу вимірювання цього приладу. Розширення межі вимірювання для амперметрів досягається за допомогою шунтів, а для вольтметрів – додаткових опорів.

3.1 Амперметри

Амперметри вмикаються в електричне коло завжди послідовно (рис.13). Щоб вмикання амперметра в електричне коло не зменшувало значно силу струму, то амперметр повинен мати дуже ма-

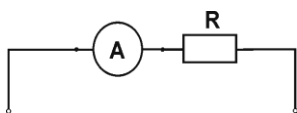
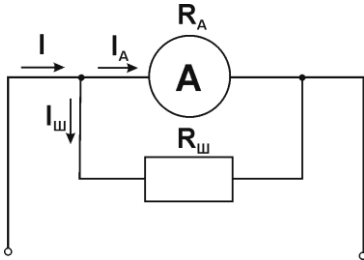


Рис. 13

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

лий опір. Опір сучасних амперметрів буває порядку 10^{-3} Ом , а іноді й менше.

Якщо за допомогою даного амперметра треба виміряти силу струму, яка перевищує верхню межу даного приладу, то паралельно до амперметра вмикається певний резистор (шунт) (рис.14).



Розрахунок опору шунта проводиться із таких міркувань. Нехай верхню межу вимірювань струму наявним амперметром необхідно збільшити в n разів.

Рис. 14 Якщо I – сила вимірюваного струму; I_A – сила струму, що протікає через амперметр; $I_{ш}$ – сила струму, що протікає через шунт; R_A – опір амперметра; $R_{ш}$ – опір шунта, тоді:

$$I = n \cdot I_A \quad \text{або} \quad I = I_A + I_{ш}.$$

Оскільки при паралельному з'єднанні опорів сили струмів, що протікають через них, є обернено пропорційними до опорів:

$$\frac{I_A}{I_{ш}} = \frac{R_{ш}}{R_A}$$

то

$$R_{ш} = R_A \cdot \frac{I_A}{I_{ш}} = R_A \cdot \frac{I_A}{(I - I_{ш})} = R_A \cdot \frac{I_A}{(nI_A - I_A)} = \frac{R_A}{(n-1)}$$

Звідси

$$R_{ш} = \frac{R_A}{(n-1)}.$$

Для прикладу розв'яжемо таку задачу: нехай амперметр дозволяє вимірювати силу струму, значення якої не перевищує 5 А ($I_A=5 \text{ А}$). Опір амперметра $R_A=0,1 \text{ Ом}$. Яким повинен бути опір шунта $R_{ш}$, щоб можна було даним амперметром вимірювати струм до 100 А ? ($I=I_{ш}+I_A=100 \text{ А}$).

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

На основі цих міркувань можна записати:

$$\frac{I_A}{I_{uu}} = \frac{R_{uu}}{R_A},$$

звідси

$$R_{uu} = R_A \cdot \frac{I_A}{I_{uu}} = 5 \cdot \frac{0,1}{95} \approx 0,0053 \text{ Ом.}$$

3.2 Вольметри

Вольметри завжди вмикають в електричне коло паралельно (рис. 15), вони мають великий опір.

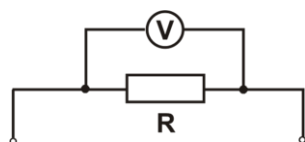


Рис. 15

Великий опір у цьому випадку повинен мінімізувати зміну (зменшення) силу струму в ділянці електричного кола, де ввімкнено вольтметр. Опір якісних вольтметрів становить порядку 10^3 Ом, а в спеціальних вольтметрах досягає до 10^5 Ом.

Для розширення межі вимірювання напруги за допомогою вольметра використовують додаткові опори (R_d), що вмикаються послідовно з ним (рис.16).

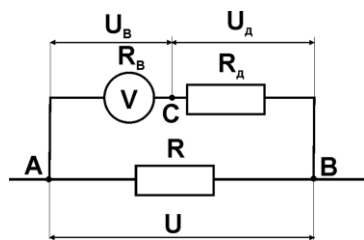


Рис. 16

Розрахунок додаткового опору здійснюється на основі наступних міркувань. Припустимо, що верхню межу вимірювання напруги вольтметром треба збільшити в n разів. Нехай U – вимірювана напруга (різниця потенціалів між точками A і B), U_d – напруга на додатковому опорі (різниця потенціалів між точками B і C); U_v – покази вольметра (різниця потенціалів на затискачах вольметра); R_B – опір вольметра; R_d – величина додаткового опору.

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

Напруга U на ділянці AB складається з напруги на вольтметрі U_e і напруги на додатковому опорі U_∂ :

$$U = U_e + U_\partial.$$

Враховуючи $U = nU_e$, а також те, що при послідовному з'єднанні напруга на ділянці кола є прямо пропорційною до відповідних опорів:

$$\frac{U_\partial}{U_B} = \frac{R_\partial}{R_B}.$$

Звідси

$$R_\partial = R_B \frac{U_\partial}{U_B} = R_B \left(\frac{U - U_B}{U_B} \right) = R_B \left(\frac{nU_B - U_B}{U_B} \right).$$

Таким чином, отримуємо вираз:

$$R_\partial = R_e (n - 1).$$

3.3 Ватметр

Ватметр є приладом, що поєднує в собі амперметр і вольтметр (рис.1.4). Ватметр має чотири клеми. Дві клеми 1, 2 вмикають в коло послідовно (як амперметр), тому біля цих клем на ватметрі вказується максимальне значення сили струму для нього (верхня межа струму). Інші дві клеми 3, 4 вмикають в коло паралельно (як вольтметр). Біля цих клем вказують верхню межу напруги. Ціну поділки ватметра визначають так: нехай верхня межа струму $5A$, напруги $150B$, а на шкалі є 150 поділок. Тоді ціна поділки дорівнює:

$$G_p = \frac{IU}{N_{\text{под}}} = \frac{5 \cdot 150}{150} = 5 \text{ Вт}.$$

3.4 Цифрові вимірювальні прилади

Однією з тенденцій розвитку фізичного експерименту є впровадження цифрових вимірювальних приладів (ЦВП). Цифровими називаються вимірювальні прилади, які здійснюють дискретне кодуван-

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

ня вимірюваної величини, що дозволяє відображати її значення на цифровому таблодисплеї і вводити її в розрахункові математичні схеми. Вони широко застосовуються в сучасних наукових дослідженнях і в технологічних процесах для вимірювання електричних і неелектричних величин: частоти, інтервалів часу, температури, напруги і т.д. Крім суто технічних вони мають низку переваг у порівнянні з аналоговими вимірювальними приладами.

Цифрові вимірювальні прилади позбавлені впливу суб'єктивного фактора на якість відліку показів зі шкали приладу, що забезпечує швидкість і точність вимірювання.

До переваг ЦВП можна віднести також досить широкий діапазон вимірюваних величин з високою точністю вимірювання, можливість представлення результатів вимірювання в цифровому вигляді, запис їх друкуємим пристроєм, а також уведення в ЕОМ з наступною обробкою одержуваної інформації й подальшим її використанням.

Цифровий прилад містить у собі, як правило, два обов'язкових функціональних вузли: аналого-цифровий перетворювач (АЦП) і цифровий показуючий пристрій. Аналогово-цифрові перетворювачі перетворюють аналогові сигнали у відповідні їм цифрові, тобто, перетворюють сигнали з неперервним спектром значень у сигнали, що мають дискретну шкалу значень. А показуючий пристрій подає значення вимірюваної величини в цифровій формі.



Рис. 17
владу (рис. 17).

Розглянемо роботу ЦВП на прикладі електронного цифрового вольтметра з час-імпульсним перетворенням, за якого вимірювана напруга U_x спочатку перетворюється в часовий інтервал, а потім - набуває цифрового ви-

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

Функціональна схема такого вольтметра представлена на рис.18.

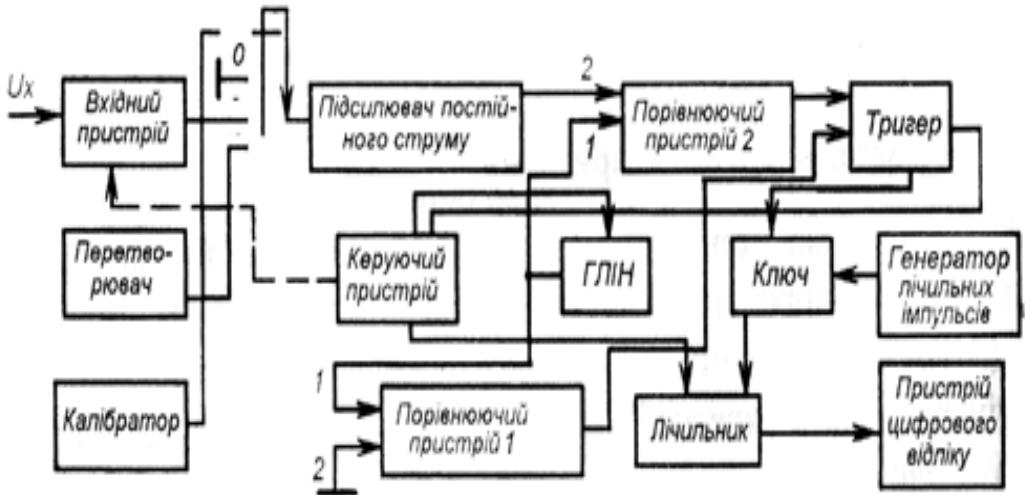


Рис.18

Основними вузлами цифрового вольтметра, що здійснюють зв'язок вимірюваної напруги з часовим інтервалом, є: два порівнюючі пристрої, генератор лінійно наростаючої напруги "ГЛІН" і тригер. До подачі на вхідний пристрій вимірюваної постійної напруги U_x керуючий пристрій забезпечує скидання попередніх показів лічильника, запускає "ГЛІН" і встановлює тригер у положення "0".

Вимірювана напруга U_x через вхідний пристрій (дільник напруги) і підсилювач постійного струму подається на вхід 2 пристрою порівняння 2. Вхід 2 пристрою порівняння 1 заземлений. На входи 1 пристроїв порівняння 1 і 2 подається лінійно наростаюча напруга U_n . При рівності вхідних напруг пристрої порівняння на своїх виходах виробляють короткий імпульс. Таким чином, перший імпульс виникає від пристрою порівняння 1 ($U_n=0$), другий імпульс - від пристрою порівняння 2 при $U_n=U_x$. При цьому перший імпульс за допомогою тригера забезпечує початок роботи ключа і на лічильник протягом періо-

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

ду часу T_N надходять імпульси з генератора лічильних імпульсів. При подачі на тригер другого імпульсу ключ закривається, а отже, припиняється рахунок імпульсів. Чим більша вимірювана напруга, тим більше імпульсів надходить на лічильник, який їх підраховує, а результати видає на цифровому дисплеї.

Принцип дії цифрового вольтметра покладений в основу будови інших електричних ЦВП.



Цифровий амперметр - прилад для вимірювання сили струму з цифровою індикацією (рис.19). У ньому використовується прямий метод вимірювання сили струму, який полягає у вимірюванні за допомогою цифрового вольтметра напруги на еталонному резисторі з відомим значенням опору.

Рис.19

Цифровий омметр - прилад для вимірювання опору з цифровою індикацією (рис.20). Найчастіше використовують два методи вимірювання опорів. По-перше, компенсаційний з використанням вимірювального містка Уїтстона.



Рис. 20

Він забезпечує автоматичне зрівнювання напруг на еталонному резисторі і резисторі, опір якого визначається. Для цього з'єднані відповідно до коду опори поєднуються за командою пристрою керування до містка по черзі, поки не забезпечується рівновага схеми.

Другий спосіб полягає в пропусканні через вимірюваний опір струму певного значення. Напруга ви-

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

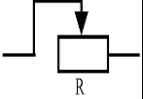
мірюється за допомогою АЦП й виводиться в цифровій формі в одиницях опору.

4. Умовні позначення елементів електричного кола


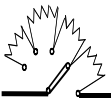

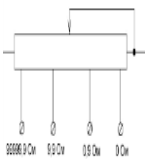



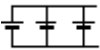




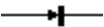

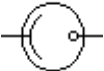


Електричні схеми до кожної лабораторної роботи наведені в даному практикумі і, також, на робочому місці. При складанні електричних схем слід додержуватись умовних позначень (див.табл.2), які здебільшого вибираються так, щоб відображати основні риси будови певного елемента електричного кола. З'єднувальні проводи на схемі прийнято зображати прямими лініями.

Таблиця 2

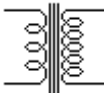

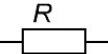

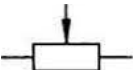





Умовні позначення деталей електричного кола

Умовне позначення	Що означає умовне позначення	Умовне позначення	Що означає умовне позначення
	З'єднувальний провід (пряма лінія)		Клема
	Проводи з'єднуються		Ключ
	Проводи не з'єднуються		Перемикач
	Перемикач на два напрями (з трьома клемами).		Перемикач двополюсний
	Генератор змінного струму (альтернатор)	 R	Реостат з ковзним контактом

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

	Генератор постійного струму (динамо машина)		Реостат “каскадний”
	Опір активний (безіндуктивний) в постійному струмі. Опір мішаний. Опір індуктивний		Магазини опорів
	Гальванічний елемент або акумулятор		Заземлення
	Батарея послідовно сполучених гальванічних елементів або акумуляторів		Батарея паралельно сполучених гальванічних елементів або акумуляторів
	Мережа змінного струму		Мережа постійного струму
	Конденсатор постійної ємності		Конденсатор змінної ємності
	Електрична лампа		Детектор
	Двоелектродна лампа (діод-кенотрон)		Фотоелемент
	Триелектродна лампа		Котушка індуктивності

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

	Трансформатор		Плавкий запобіжник
 	Резистор Амперметр	 	Змінний резистор Гальванометр
	Вольтметр		Ватметр
	Струм іде до нас		Струм іде від нас

5. Правила, поради і вказівки

5.1. Правила внутрішнього розпорядку в електричній лабораторії

1. Студенти працюють у лабораторії за певним розкладом і тільки зі своєю групою.
2. Для відроблення пропущених лабораторних занять та на консультації кафедра може встановлювати додаткові години.
3. Для проведення заданої лабораторної роботи студенти можуть об'єднуються в групи.
4. Кожний студент повинен підготуватися до виконання свого завдання, знати його зміст, хід роботи та опис потрібної апаратури. Під час роботи в лабораторії керівник занять може дати лише основні вказівки щодо роботи і користування приладами.

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

5. Кожна група працює з тими приладами, які вона одержала від чергового по лабораторії і у визначеному місці. Переносити прилади з одного місця на інше заборонено.
6. Під час роботи в лабораторії студенти можуть одержувати для виконання деяких завдань ще й допоміжні прилади (амперметри, вольтметри і т.д.), а також з'єднувальні провідники.
7. Закінчивши роботу, студент повинен упорядкувати своє робоче місце, показати керівникові заняття результати своєї роботи і повернути допоміжні прилади.
8. Якщо під час роботи студент допустився помилки, що привело до виходу з ладу приладів, то про це необхідно негайно повідомити керівника заняття і скласти акт. Студентам забороняється самим лагодити прилади, щоб запобігти ще більшому їх псуванню.
9. Студенти повинні поводитися з приладами уважно та обережно.
10. Вносити з лабораторії прилади, інструкції категорично забороняється.
11. Кожний студент повинен мати зошит, в який записується необхідний для виконання лабораторної роботи матеріал, звітна таблиця вимірювань і результати проведеної роботи.
12. У приміщенні лабораторії студенти повинні дотримуватись тиші, порядку й чистоти.

5.2. Правила техніки безпеки

1. При недостатній ізоляції провідників, а також при використанні незадовільно відремонтованих приладів або саморобних запобіжників, існує небезпека виникнення пожежі.
2. При перевантаженні, тобто при пропусканні по провідниках струму, який перевищує граничне значення, виникає пере-

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

грівання і руйнування ізоляції. Зруйнування ізоляції рано чи пізно призведе до коротких замикань, які при несправності запобіжників можуть спричинити горіння провідників. В таких випадках насамперед треба вимкнути струм і потім загасити ізоляцію, що загорілася.

3. Сигналом про перегрівання провідників служить слабкий запах нагрітої гуми. При появі такого запаху треба негайно вимкнути струм, знайти ділянку, де виникло перегрівання, і замінити існуюче з'єднання провідниками більшого діаметра.
4. Велика небезпека виникає при контакті з неізольованими ділянками електричного кола у вологих приміщеннях.
5. Не можна залишати без нагляду ввімкненими електричні прилади, особливо електронагрівальні.
6. Неприпустимо робити будь-який ремонт при ввімкненому джерелі електричного струму.

Пам'ятайте: небезпека ураження струмом людини, іноді є смертельною і цілком реальною при напрузі 127 В, а особливо при напрузі 220 В.

5.3. Поради та вказівки при роботах в електричній лабораторії

1. З'єднання в електричному колі слід робити за схемою і тільки суцільними ізольованими провідниками з наконечниками.
2. Гайки і клеми мають бути загвинчені повністю і не хитатись.
3. Електричну схему складати **обов'язково** при вимкненому джерелі струму. Джерело струму вмикати останнім і лише після перевірки схеми керівником занять (щоб у випадку неправильних з'єднань не пошкодити вимірювальні прилади).

Основні вимірювальні прилади та елементи електричного кола

4. Після проведення вимірювань, електричне коло негайно розімкнути.
5. Якщо спостерігається надмірне нагрівання або пахне горілим, струм негайно вимкнути, повідомивши про це викладача.
6. Розбирати електричну схему тільки після перевірки результатів вимірювань викладачем після його дозволу.
7. Пам'ятайте: при розбиранні електричної схеми необхідно наперед вимкнути джерело струму.

Розділ 1

ЕЛЕКТРОСТАТИКА



Електростатика

Електростатика вивчає властивості і взаємодію нерухомих у певній системі координат електричних зарядів.

Електричним зарядом називається скалярна фізична величина, яка визначає здатність заряджених частинок вступати в електромагнітну взаємодію між собою. У природі існує два види електричних зарядів: додатні і від'ємні.

У процесі електризації тертям одне тіло набуває додатного заряду, а друге від'ємного. Величина додатного заряду одного тіла точно дорівнює величині від'ємного заряду другого тіла. Це положення відоме від назвою закону збереження електричного заряду: *електричні заряди не виникають і не зникають, вони можуть лише передаватися від одного тіла до іншого або переміщатися всередині даного тіла.* Тому алгебраїчна сума зарядів, які виникають на всіх тілах, що беруть участь у цьому процесі, завжди дорівнює нулю. Експериментально доведено, що всі так звані “елементарні” заряджені частинки (електрони, позитрони, протони) мають заряд $\pm 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл.

§ 1.1. Взаємодія електричних зарядів. Закон Кулона

Кулон експериментально встановив закон взаємодії електричних зарядів. Закон Кулона справджується для точкових зарядів. Під точковим зарядом розуміють заряджене тіло, розміри якого досить малі порівняно з іншими зарядами. Вивчаючи взаємодію заряджених тіл за допомогою крутильних терезів, Кулон встановив: *величина сили взаємодії двох точкових зарядів прямо пропорційна добутку величин цих зарядів і обернено пропорційна квадратові відстані між ними, тобто:*

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2},$$

де k – коефіцієнт пропорційності, $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon}$, ϵ - діелектрична проник-

Електростатика

ність середовища, $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{H \cdot m^2}{Kл^2}$ - електрична стала.

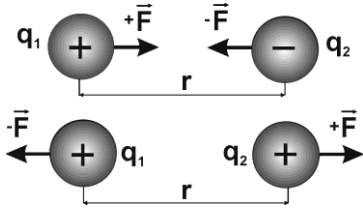


Рис. 1.1

Кулонівські сили – центральні, тобто вони спрямовані вздовж прямої, яка сполучає точкові заряди. Однойменні заряди відштовхуються, а різнойменні притягуються (рис. 1.1).

З цього закону випливає, що одиницею електричного заряду (кулон - Кл) вважають такий точковий заряд, який діє у вакуумі на такий самий заряд, розміщений на відстані 1 м з силою $9 \cdot 10^9 H$.

§ 1.2. Характеристики електричного поля

Кожний електричний заряд завжди змінює властивості простору, який його оточує, створюючи в ньому електричне поле. Це поле проявляється таким чином, що при вміщенні в будь-яку його точку електричного заряду на нього буде діяти сила. Будь-яка точка електричного поля характеризується напруженістю \vec{E} і потенціалом ϕ .

Напруженість \vec{E} електричного поля є його силовою характеристикою, оскільки вона числово дорівнює силі \vec{F} , яка діє на одиничний додатній точковий заряд, розміщений в даній точці поля. Напрямок вектора \vec{E} в даній точці простору співпадає з напрямком сили \vec{F} , яка діє на додатній пробний заряд, вміщений у цю точку (рис. 1.2):

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{np}}$$

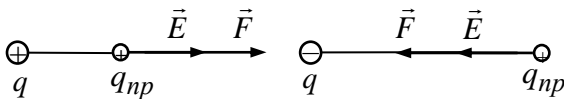


Рис. 1.2

Вектор \vec{E} завжди напрямлений вздовж прямої, яка проходить через заряд q і

Електростатика

дану точку поля: якщо заряд q додатній, то вектор \vec{E} напрямлений від заряду, а коли заряд q від'ємний – до заряду.

Якщо електричне поле створюється нерухомим точковим зарядом q , то напруженість поля в точці, яка віддалена від цього заряду на відстань r , дорівнюватиме:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}.$$

Напруженість електричного поля створена системою зарядів $q_1; q_2; \dots q_n$ дорівнює векторній сумі напруженостей полів, які створювали би кожен із зарядів зокрема в даній точці поля:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i.$$

Останнє твердження називається принципом суперпозиції електричних полів, який дає можливість визначати напруженість електричного поля будь-якої системи зарядів.

Електричне поле можна графічно зобразити за допомогою ліній напруженості. Їх проводять таким чином, щоб дотична до них у кожній точці співпадала з напрямом вектора \vec{E} . Лінії напруженості електричного поля починаються на додатному заряді і закінчуються на від'ємному або радіально розходяться в безмежність (рис. 1.3).

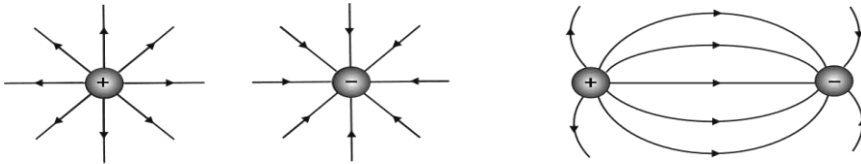


Рис. 1.3

У полі точкового заряду q потенціальна енергія пробного заряду q_{np} визначається таким співвідношенням:

$$E_n = \frac{qq_{np}}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}.$$

Електростатика

Якщо поле створюється додатним зарядом, то його потенціальна енергія $E_n > 0$, а коли від'ємним - то $E_n < 0$.

Фізична величина, яка числово дорівнює потенціальній енергії, яку має одиничний додатний заряд, вміщений в певну точку електростатичного поля, називається потенціалом поля в цій точці. Потенціал є енергетичною характеристикою поля:

$$\varphi = \frac{E_n}{q_{np}}.$$

Для поля точкового заряду потенціал дорівнює

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}.$$

Потенціал електростатичного поля, створеного системою зарядів, в довільній точці поля дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів, створених кожним із зарядів у цій точці:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i}.$$

Потенціальна енергія пробного додатного заряду:

$$E_n = q_{np}\varphi.$$

Коли пробний заряд перемістити з однієї точки поля в іншу, то матимемо роботу сил електричного поля, яка виконується при переміщенні цього заряду:

$$A_{12} = E_{n1} - E_{n2} = q_{np}(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Потенціал точкового заряду є функцією відстані від заряду, який створює поле, до точки, в якій визначається потенціал. *Геометричне місце точок однакового потенціалу називають еквіпотенціальною поверхнею.* Лінії напруженості електричного поля завжди перпендикулярні до еквіпотенціальної поверхні (рис. 1.4).

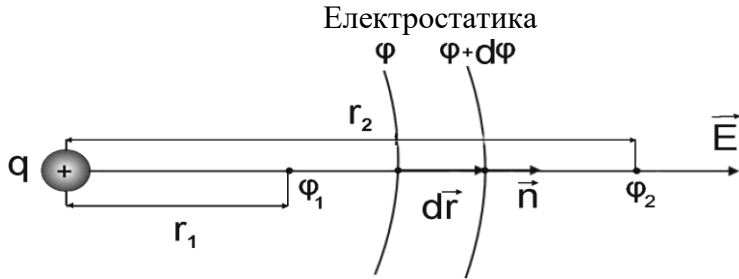


Рис. 1.4

Напруженість електричного поля \vec{E} і потенціал φ зв'язані співвідношенням:

$$\vec{E} = E_x \vec{i} + E_y \vec{j} + E_z \vec{k} = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} - \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j} - \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{k} = -\text{grad} \varphi,$$

(знак „-“ вказує на те, що напрям вектора \vec{E} збігається з напрямом зменшення потенціалу), \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} – одиничні вектори, напрямлені по осях координат.

Елементарна робота переміщення заряду в електричному полі на відстань dl дорівнює (рис. 1.5):

$$dA = (\vec{F}, d\vec{l}) = q_{np} (\vec{E}, d\vec{l}).$$

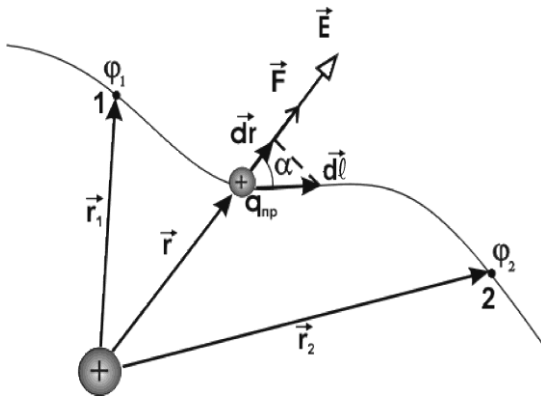


Рис. 1.5

Тоді робота переміщення пробного заряду з точки 1 в точку 2, в яких потенціали будуть відповідно φ_1 і φ_2 визначається співвідношенням:

$$\begin{aligned} A_{12} &= q_{np} \int_1^2 (\vec{E}, d\vec{l}) = \\ &= q_{np} (\varphi_1 - \varphi_2). \end{aligned}$$

Звідси випливає, що:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 (\vec{E}, d\vec{l}).$$

Електростатика

Якщо пробний заряд переміщується в електричному полі по замкнутій траєкторії і повертається у вихідну точку, то $\varphi_1 = \varphi_2$, і

$$\oint_{(l)} (\vec{E}, d\vec{l}) = 0.$$

Вираз $\oint_{(l)} (\vec{E}, d\vec{l})$ називається циркуляцією вектора напруженості вздовж замкнутого контуру. Отже, в електричному полі циркуляція вектора напруженості вздовж замкнутого контуру дорівнює нулю.

§ 1.3. Теорема Остроградського-Гауса та її застосування

Основне завдання електростатики полягає в тому, щоб за заданим розподілом у просторі і величиною електричних зарядів знайти величину і напрямок вектора напруженості в кожній точці поля. Використання принципу суперпозиції для обчислення електричних полів пов'язано із значними математичними труднощами. Значно простіший метод розрахунку полів ґрунтується на використанні теореми Остроградського-Гауса.

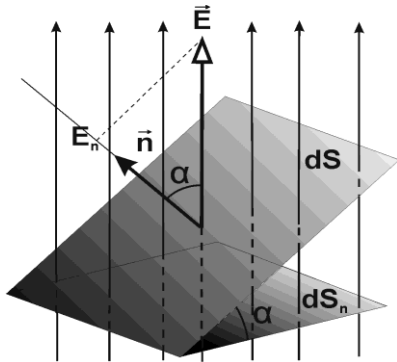


Рис.1.6

Нехай в однорідному електричному полі ($\vec{E} = const$) проведена довільна площа dS . Одиничний вектор \vec{n} нормалі до площини складає з вектором \vec{E} кут α (рис. 1.6).

Потоком вектора напруженості будемо називати величину

$$d\Phi_E = E dS \cos \alpha = E_n dS = (\vec{E}, d\vec{S}),$$

де E_n – проекція вектора \vec{E} на напрямок

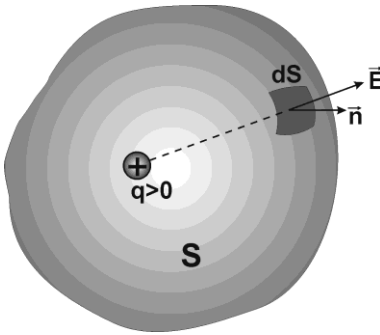
Електростатика

вектора нормалі, а вектор $d\vec{S} = dS\vec{n}$.

Для замкнених поверхонь

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \oint_S (\vec{E}, d\vec{S}).$$

Відповідно до теореми Остроградського-Гауса, *потік вектора напруженості електростатичного поля \vec{E} через довільну замкнену поверхню S дорівнює алгебраїчній сумі зарядів, які обмежені цією поверхнею* (рис.1.7), *поділеній на електричну сталу ϵ_0* :

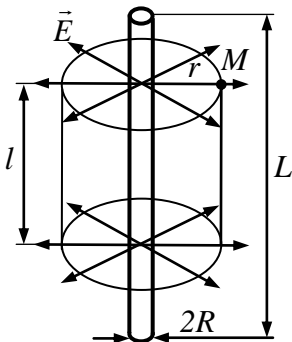


$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{\epsilon_0}.$$

Теорема Остроградського – Гауса використовується для розрахунку електростатичних полів, створених зарядженими тілами нарізноманітніших конфігурацій.

Рис.1.7

Розглянемо циліндр радіуса R і довжиною L , на якому знаходиться заряд q , який рівномірно розподілений на його поверхні вздовж всієї довжини L (рис. 1.8). Лінійна густина заряду



$\tau = \frac{q}{L}$. Якщо відстань r від осі циліндра до точки M значно менша за довжину L зарядженого циліндра ($r \ll L$), то циліндр з достатньою точністю можна вважати нескінченно довгим. Виділимо довільну ділянку циліндра довжиною l і охопимо її допоміжною охопимо її допоміжною поверхнею у вигляді

Рис.1.8

Електростатика

циліндра радіуса r . Ця поверхня охоплює заряд q' , який дорівнює $q' = \tau l$.

Оскільки лінії вектора напруженості нормальні до поверхні зарядженого тіла в кожній його точці, то потік пронизує лише бічну поверхню допоміжного циліндра.

Отже,

$$E = \frac{\Phi_E}{S} = \frac{q'}{\varepsilon_0 S} = \frac{q'}{\varepsilon_0 2\pi r l} = \frac{\tau l}{\varepsilon_0 2\pi r l}.$$

Звідси

$$E = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0 r}.$$

Різниця потенціалів між двома точками поля, що лежать на відстані r_1 і r_2 від осі зарядженого провідника, дорівнює

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

§ 1.4. Електроємність провідника

Здатність провідника накопичувати електричні заряди характеризується фізичною величиною, яка називається його електроємністю. Електроємність провідника визначається його геометричними розмірами, діелектричною проникливістю середовища, в якому знаходиться цей провідник а також присутністю інших провідників. Електрична ємність відокремленого провідника (провідника, розміщеного вдалині від інших провідників) дорівнює відношенню величини заряду провідника до його потенціалу

Електростатика

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

Електроємністю відокремленого провідника називається фізична величина, яка вимірюється зарядом, потрібним для зміни його потенціалу на одиницю.

Електроємність відокремленої кулі:

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R,$$

де R – радіус кулі; ε – діелектрична проникливість середовища, в якому знаходиться куля.

Електрична ємність навіть досить габаритних провідників є незначною. Крім цього на її значення впливають сторонні тіла. Тому для одержання великих електроємностей в малих об'ємах широко використовуються електричні прилади, що називаються конденсаторами. Найпростішим варіантом конденсатора є відповідної форми два провідники – обкладки, розділені шаром діелектрику. Електричне поле конденсатора повністю локалізоване між його обкладками і тому на нього не впливають зовнішні поля. На обкладки подаються рівні за величиною і протилежні за знаком електричні заряди.

Електрична ємність конденсатора визначається за формулою

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}$$

де q – величина заряду на одній з обкладинок конденсатора; U – різниця потенціалів між обкладками. Якщо обкладками є дві металеві пластинки, між якими знаходиться тонкий шар діелектрика, то такий конденсатор називається плоским.

На основі теореми Остроградського-Гауса можна легко довести, що ємність плоского конденсатора дорівнює:

$$C = \frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{d},$$

де ε_0 – електрична стала, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ε – відносна діелектрична

Електростатика

проникливість середовища, що розділяє пластини конденсатора; d – віддаль між обкладками.

§ 1.5. Зарядження і розрядження конденсатора

Зарядження і розрядження конденсатора пов'язанні зі зміною величини заряду на його обкладках. Під час зарядження і розрядження конденсатора через опір зміна заряду на обкладках і різниця потенціалів між ними відбувається не миттєво, а за певний скінчений проміжок часу.

Розглянемо процеси зарядження і розрядження конденсатора через опір і виведемо відповідні формули, які встановлюють залежність цих процесів від параметрів електричного кола.

Зарядження конденсатора

Розглянемо електричне коло, показане на рис.1.9. Воно містить конденсатор з ємністю C , резистор з опором R і джерело постійного струму з ЕРС \mathcal{E} . Будемо вважати, що до моменту вмикання ключа, конденсатор незаряджений. У разі вмикання ключа K у колі з'явиться струм, викликаний зарядженням конденсатора. Якщо заряд нагромадиться на обкладках конденсатора, між ними буде різниця потенціалів

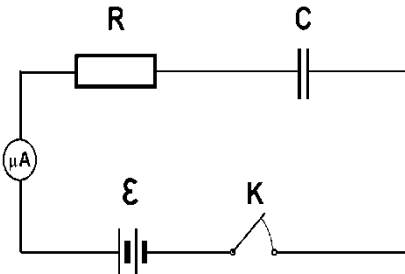


Рис. 1.9

$$U_c = \varphi_1 - \varphi_2,$$

яка з часом буде наростати. Встановимо закон зміни різниці потенціалів від часу при зарядці конденсатора. Застосуємо закон Ома

$$(\varphi_1 - \varphi_2) + IR = \mathcal{E} \quad (1.1)$$

для електричного кола, показаного на рис.1.9, при замкнутому ключі K . Оскільки $q = CU_c$, то

Електростатика

$$I = \frac{dq}{dt} = C \frac{dU_c}{dt}. \quad (1.2)$$

З рівнянь (1.1) і (1.2) отримаємо диференціальне рівняння

$$RC \frac{dU_c}{dt} = \mathcal{E} - U_c.$$

Розділивши в цьому рівнянні змінні

$$\frac{dU_c}{\mathcal{E} - U_c} = \frac{1}{RC} dt$$

і проінтегрувавши його, отримуємо:

$$\ln(\mathcal{E} - U_c) = -\frac{t}{RC} + B.$$

З початкових умов $t = 0$, $U_c = 0$ визначимо сталу інтегрування $B = \ln \mathcal{E}$. Тоді

$$\ln\left(\frac{\mathcal{E} - U_c}{\mathcal{E}}\right) = -\frac{t}{RC}.$$

Після потенціювання цього виразу отримаємо

$$U_c(t) = \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \mathcal{E}. \quad (1.3)$$

Звідси видно, що при $t = 0$ $U_c = 0$, а при $t \rightarrow \infty$ напруга на конденсаторі асимптотично наближається до EPC джерела.

Підставивши вираз (1.3) у (1.1), отримаємо залежність струму заряджання від часу

$$I_3(t) = \frac{\mathcal{E}}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (1.4)$$

З рівняння (1.4) видно, що максимальне значення струму заряджання має в початковий момент часу і з часом воно зменшується, асимптотично наближаючись до нуля.

Використавши співвідношення (1.3) і (1.4), отримаємо закон зміни заряду на конденсаторі під час заряджання:

Електростатика

$$q_3(t) = C \left(1 - \frac{I_3(t)}{I_0} \right) \mathcal{E} = C \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \mathcal{E}$$

Розрядження конденсатора

Нехай конденсатор з ємністю C заряджений до різниці потенціалів U_{c_0} . Здійснимо розрядження через опір R , так як це показано на рис.1.10.

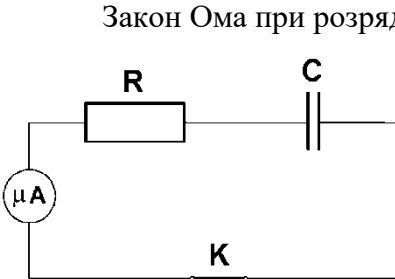


Рис. 1.10

Закон Ома при розряджанні конденсатора запишемо у вигляді

$$IR + U_c = 0.$$

Враховуючи (2), запишемо

$$RC \frac{dU_c}{dt} + U_c = 0.$$

Розділимо змінні в цьому диференціальному рівнянні

$$\frac{dU_c}{U_c} = -\frac{1}{RC} dt$$

і після його інтегрування отримаємо:

$$\ln U_c = -\frac{t}{RC} + B_1. \quad (1.5)$$

З початкових умов $t = 0$, $U_c = U_{c_0}$, отримаємо, що $B_1 = \ln U_{c_0}$.

В результаті рівняння (1.5) набере вигляду

$$\ln \left(\frac{U_c}{U_{c_0}} \right) = -\frac{t}{RC}$$

і після його потенціювання

$$U_c = U_{c_0} e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (1.6)$$

Під час розрядження конденсатора напруга на ньому зменшується і асимптотично наближається до нуля. Поділивши обидві частини рівняння (1.6) на величину опору R , отримаємо:

Електростатика

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}, \quad (1.7)$$

де $I_0 = \frac{U_0}{R}$ початкове значення сили струму.

Оскільки $q = CU_c$, то з врахуванням (1.6) а також (1.7) отримаємо закон зміни заряду конденсатора при розряджанні:

$$q_p(t) = CU_{c0} \frac{I_p(t)}{I_0} = CU_{c0} e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (1.8)$$

З (1.8) видно, що при $t = RC$

$$\frac{q_0}{q} = e,$$

де $q_0 = CU_{c0}$.

Час, протягом якого заряд зменшується в $e = 2,71$ разів, називається часом релаксації. Отже час релаксації в електричному колі, що містить ємність C і опір R

$$\tau = RC.$$

Час релаксації можна визначити графічним методом. З виразу (1.7) і (1.8) отримаємо

$$\ln\left(\frac{CU_{c0}}{q_p}\right) = \ln \frac{I_0}{I} = \frac{t}{\tau}. \quad (1.9)$$

При $t = \tau$

$$\ln\left(\frac{CU_{c0}}{q_p}\right) = \ln \frac{I_0}{I} = 1.$$

Лабораторна робота №1

ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ ТА ЙОГО ГРАФІЧНЕ ЗОБРАЖЕННЯ

Мета роботи: вивчити основні закономірності електростатичного поля за допомогою експериментальної побудови кривих однакового потенціалу і силових ліній поля між різнойменно зарядженими тілами різної конфігурації

Прилади та матеріали: 1) пристрій із закріпленим електропровідним папером, 2) набір тіл, 3) вольтметр, 4) провідники з металевими наконечниками (зонди).

Теоретичні відомості, що стосуються даної лабораторної роботи, приведені в §§ 1.1 – 1.3.

Виведення розрахункової формули

Електростатичне поле можна зобразити графічно, використовуючи лінії напруженості \vec{E} . Їх проводять таким чином, щоб дотична до них у кожній точці була напрямлена вздовж вектора \vec{E} . Через кожну точку поля можна провести тільки одну лінію. Лінії напруженості не перетинаються між собою. Лінія напруженості є кривою, яку описав би пробний додатний заряд, рухаючись під дією електростатичних сил. Лінії електростатичного поля завжди починаються на додатних зарядах, а закінчуються на від'ємних. Ці лінії проводять з такою густиною, щоб кількість ліній, які пронизують одиничну площу, перпендикулярну до вектора напруженості, число дорівнювала величині напруженості електричного поля в місці розміщення площини.

Вектор напруженості електричного поля перпендикулярний до екіпотенціальної поверхні (рис.1.4). Таким чином, лінії напруженості

Електростатика

електростатичного поля є множиною ліній, ортогональних до еквіпотенціальних поверхонь. Ортогональність ліній напруженості і еквіпотенціальних поверхонь суттєво полегшує як експериментальне, так і теоретичне дослідження електростатичного поля.

У даній роботі вимірюють розподіл потенціалу електричного поля, а лінії напруженості досліджуваного поля будують ортогонально до експериментально знайдених кривих однакового потенціалу.

Вектор напруженості електричного поля \vec{E} напрямлений вздовж дотичної до лінії напруженості в кожній її точці у бік зменшення потенціалу (знак "-" перед градієнтом). Тому для визначення модуля вектора \vec{E} будемо використовувати співвідношення, яким зв'язані напруженість \vec{E} і потенціал ϕ у кожній точці електричного поля:

$$\vec{E} = E_x \vec{i} + E_y \vec{j} + E_z \vec{k} = -\frac{\partial \phi}{\partial x} \vec{i} - \frac{\partial \phi}{\partial y} \vec{j} - \frac{\partial \phi}{\partial z} \vec{k} = -\text{grad} \phi.$$

У нашому випадку можна припустити, що модуль вектора \vec{E} дорівнює його проєкції на вісь ОУ:

$$E = E_y = -\frac{\partial \phi}{\partial y}.$$

Замінімо позначення диференціалів на позначення зміни потенціалу і зміни координати:

$$E_y = -\frac{\Delta \phi}{\Delta y}.$$

І одержимо формулу для розрахунку модуля вектора напруженості електричного поля в заданій точці:

$$E_y = -\frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{d_{\perp}}, \quad (1)$$

де d_{\perp} – вимірювана вздовж перпендикуляра (найкоротша) відстань між еквіпотенціальними лініями ($d_{\perp} = \Delta y$).

Опис обладнання

Пристрій, який використовується для вивчення картини електростатичного поля зображений на рис.1. Основу пристрою складають дві діелектричні пластини, у верхній з яких вирізані три вікна (два прямокутної (*a*, *б*) і одне круглої (*в*) форми), а в нижній у цих вікнах змонтовані електроди (2,3– у вікні *в* 4,5 – у вікні *a* 6,7- у вікні *б*) та провідники їх підключення до джерела живлення.

Між цими пластинами діелектрика затиснений електропровідний папір 8, за допомогою якого моделюється

електричні поля різної конфігурації. Для забезпечення надійного електричного контакту папір щільно притискають до електродів гвинтами.

Під'єднанням зовнішнього джерела живлення ($U=24V$) між електродами створюють різницю потенціалів. Виникає струм через електропровідний папір, лінії якого моделюють електростатичне електричне поле.

Для знаходження еквіпотенціальних лі-

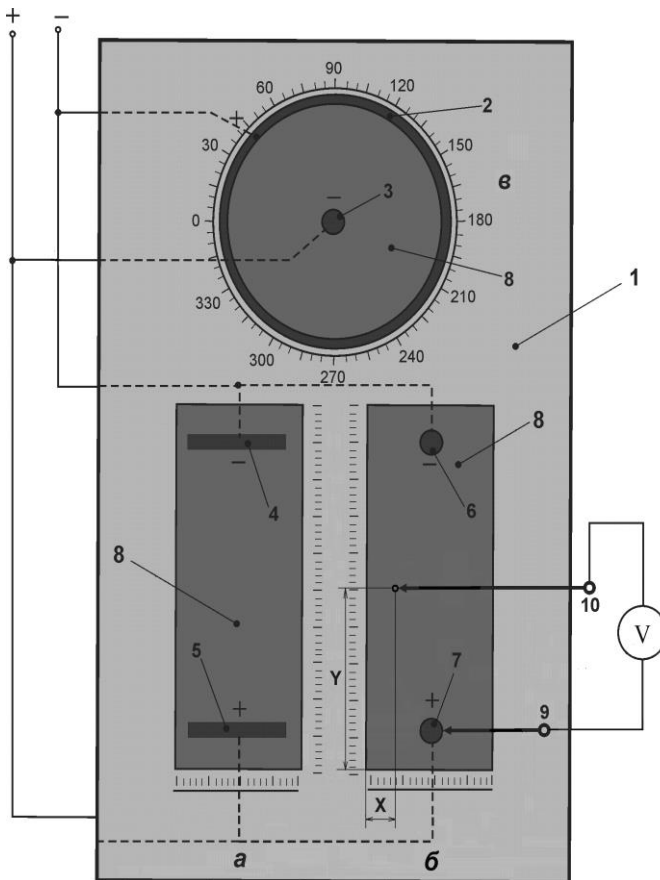


Рис.1.

Електростатика

ній утвореного електричного поля та вимірювання різниці потенціалів використовують вольтметр V та два провідники з металевими наконечниками (зонди) 9, 10. **Прикладаючи зонд 10 до різних точок електропровідного паперу, можна за допомогою вольтметра виміряти різницю потенціалів $\varphi_i - \varphi_0$ між цими точками та потенціалом електрода 7 (або 3, 5).** Вікна зовнішньої пластини пристрою доповненні шкалами, на основі яких можна реалізувати систему координат для визначення координат досліджуваних точок електричного поля.

Послідовність виконання роботи

Переконайтеся, що у вікнах пристрою є електропровідний папір.

1. Під'єднати провідники з металевими наконечниками – зондами до вольтметра, вибравши безпечну верхню границю вимірювань ($\geq 24\text{ В}$).
2. Після перевірки викладачем зібраної схеми та одержання дозволу ввімкнути вилку пристрою у розетку з напругою 24 В .
3. Для вибору **значень потенціалів** $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5$ (для вікна a і для вікна b) використати два зонди. Перший зонд (9) нерухомий. Його встановити в точці з координатами $Y = 2\text{ см}$, $X = 6\text{ см}$. Другий зонд (10) треба пересувати вздовж осі OY і спостерігати за допомогою вольтметра збільшення різниці потенціалів $\varphi_i - \varphi_0$. Визначити найбільше значення різниці потенціалів для кожного вікна і вибирати в цих межах **значення потенціалів** $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5$ з рівномірним кроком. Записати їх у табл. 1 і табл. 2.
4. Для знаходження координат **точок однакового потенціалу** (для вікна a) використати два зонди. Перший зонд (9) - нерухомий. Його встановити в точці з найнижчим потенціалом (приймаємо $\varphi_0 = 0$). Це буде точка з координатами $Y = 2\text{ см}$, $X = 6\text{ см}$. Другий зонд (10) встановити почергово в точки з координатами по осі X рівними 2, 4, 6, 8

Електростатика

10 та 12 см та, пересуваючи його паралельно осі OY , знайти координати точок із заданими в табл.1 значеннями потенціалу. Визначені таким чином координати Y занести в табл.1.

5. Аналогічно провести вимірювання для вікон b та v . Результати занести в табл. 2 і табл.3.

6. Побудувати систему координат у лабораторному зошиті (використати міліметровий папір) і за даними таблиць знайти точки з однаковим потенціалом. З'єднуючи їх плавно, побудувати систему ліній з однаковим потенціалом для всіх вікон. Позначити на графіках потенціали φ_i еквіпотенціальних ліній.

7.Обчисліть за формулою (1) та занесіть в табл.4. значення модуля напруженості електричного поля E в проміжках між еквіпотенціальними лініями для вікна a і значення координати $X = 6$ см.

8. Побудовану модель електричного поля для вікна a доповнити лініями напруженості електричного поля. Їх провести так, щоб кут між дотичними до силової лінії і еквіпотенціальної лінії в точці проведення становив 90° .

Таблиця 1

Координати точок з однаковим потенціалом для вікна a

$X, \text{ см}$	$Y, \text{ см}$				
	Потенціал $\varphi, \text{ В}$				
	$\varphi_1 = ___$	$\varphi_2 = ___$	$\varphi_3 = ___$	$\varphi_4 = ___$	$\varphi_5 = ___$
2					
4					
6					
8					
10					

Координати точок з однаковим потенціалом для вікна б

X, см	Y, см				
	Потенціал φ , В				
	$\varphi_1 = _$	$\varphi_2 = _$	$\varphi_3 = _$	$\varphi_4 = _$	$\varphi_5 = _$
2					
4					
6					
8					
10					

Таблиця 3

Координати точок з однаковим потенціалом для вікна в

Координати					
α , град	R, см				
	Потенціал φ , В				
	$\varphi_1 = _$	$\varphi_2 = _$	$\varphi_3 = _$	$\varphi_4 = _$	$\varphi_5 = _$
0					
45					
90					
135					
180					
225					
270					
315					

Модуль напруженості електричного поля E

Таблиця 4

	$\varphi_1 - 0$	$\varphi_2 - \varphi_1$	$\varphi_3 - \varphi_2$	$\varphi_4 - \varphi_3$	$\varphi_5 - \varphi_4$
$\Delta\varphi$, В					
d_{\perp} , м					
E, В/м					

Контрольні питання

1. Що називається напруженістю електричного поля? Чому дорівнює напруженість електричного поля точкового заряду?
2. У чому полягає принцип суперпозиції електричних полів?
3. Що називається лінією напруженості електричного поля (силовою лінією)?
4. Що називається потенціалом електричного поля? Чому дорівнює потенціал електричного поля точкового заряду?
5. Що називається еквіпотенціальною поверхнею?
6. Який зв'язок між напруженістю і потенціалом?
7. Суть поняття "циркуляція вектора напруженості вздовж замкнутому контуру".
8. Доведіть, що силові лінії і еквіпотенціальні поверхні є ортогональними між собою.

Лабораторна робота № 14

ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАРЯДЖЕННЯ І РОЗРЯДЕННЯ КОНДЕНСАТОРА ЧЕРЕЗ ОПІР

Мета роботи: вивчення процесів заряджання і розряджання конденсатора через опір.

Прилади і обладнання: 1) конденсатор, 2) опір, 3) мікроамперметр, 4) вольтметр, 5) секундомір, 6) з'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості і розрахункові формули, що стосуються даної лабораторної роботи приведені в § 1.4, §1.5.

Теоретичні відомості

Закон зміни заряду на конденсаторі під час заряджання:

$$q_z(t) = C\mathcal{E} \left(1 - \frac{I_z(t)}{I_0} \right). \quad (1)$$

Закон зміни заряду конденсатора при розряджанні:

$$q_p(t) = CU_{C0} \frac{I_p(t)}{I_0}. \quad (2)$$

Час релаксації можна визначити з графіч-

ної залежності $\ln\left(\frac{I_0}{I_p}\right) = f(t)$ (рис. 1.).

Відповідно до цієї залежності, час релаксації τ дорівнює абсцисі точки на

прямій, для якої $\ln\frac{I_0}{I_p} = 1$.

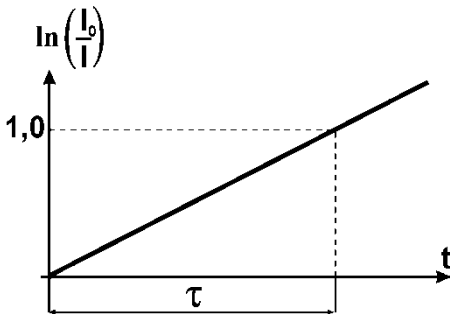
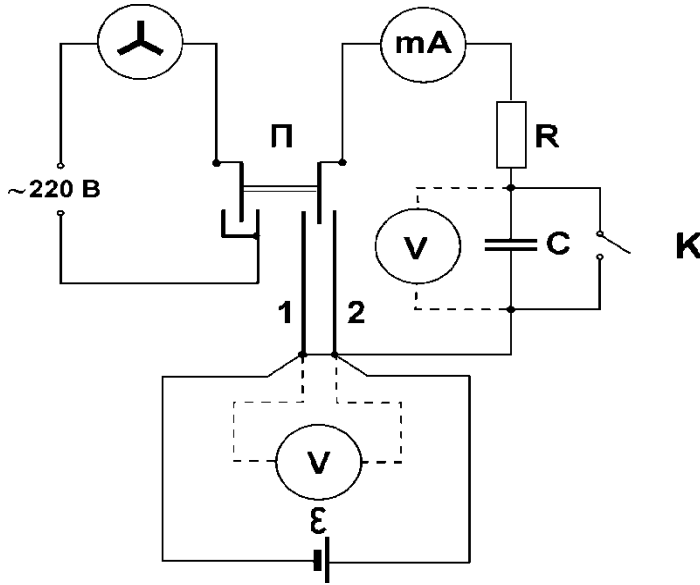


Рис.1

Схема електричного кола

На рис.2 зображена одна з можливих схем установки для визначення залежності струму зарядки (розрядки) конденсатора від часу.

Конденсатор заряджається з моменту увімкнення в коло джерела



ЕРС перемикачем *П* (позиція 1) і розряджається при перемикаванні *П* на землю (позиція 2). Час зарядки або розрядки конденсатора відраховується за електричним секундоміром з контактним пристроєм, що вмикається перемикачем *П* одночасно з увімкненням конденсатора в режимі його

Рис. 2

зарядки.

У схемі установки передбачений розряд конденсатора за допомогою кнопки *К*, яка шунтує конденсатор на землю. Зміна струму з часом під час зарядки (розрядки) конденсатора фіксується за допомогою мікроамперметра, рухома частина якого відхиляється в обидві сторони від нульової позначки.

Послідовність виконання роботи

1. Зібрати схему, зображену на рис.1.
2. Підготувати мікроамперметр μA для вимірювань. Для цього перемикач *П* перевести у позицію 2 і переконатися, що конденсатор повністю розряджений. Якщо необхідно, зняти заряд з обкладок конденсатора за допомогою розрядної кнопки.

Електростатика

3. Зняти залежність $I_s = f(t)$.

Для цього перемикач Π переводиться в позицію 1 з одночасним увімкненням електричного секундоміра. Перед початком відліку часу стрілки секундоміра повинні бути повернуті в нульову позицію з допомогою кнопки скидання на корпусі приладу.

Стрілка мікроамперметра μA буде відхилитися спочатку з великою швидкістю, а потім швидкість зарядки конденсатора зменшиться. І тому доцільно фіксувати значення струму через однакові проміжки часу, наприклад, через 2-3 с.

4. Виміряти вольтметром значення напруги на конденсаторі U_{co} при повній зарядці конденсатора і значення записати в табл.2.

5. Зняти залежність $I_p = f(t)$.

Для цього після повної зарядки конденсатора перемикач Π перевести в позицію 2. Секундомір теж попередньо повинен бути підготовлений до роботи. І в цьому випадку слід зняти біля 10 показів струму через однакові проміжки часу.

6. Результати вимірювань $I_s(t)$ і $I_p(t)$ внести до табл.1.

7. Виміряти вольтметром EPC \mathcal{E} джерела струму. Для цього треба приєднати вольтметр до 1 і 2 перемикача. Значення \mathcal{E} записати в табл.2.

8. Розрахувати на основі (1) і (2) $q_s(t)$ і $q_p(t)$ і побудувати графіки залежності заряду від часу при зарядці і розрядці конденсатора. Значення C вказане на панелі пристрою і це значення записати в табл.2.

9. Побудувати графік залежності $\ln \frac{I_s}{I_p} = f(t)$ і за цим графіком (див.

рис. 1) визначити значення часу релаксації.

10. На основі рівняння $\tau = RC$ знайти значення опору.

Електростатика

Таблиця 1

$t,$ c	$I_z,$ $10^{-6} A$	$I_p,$ $10^{-6} A$	$q_z,$ $10^{-6} Кл$	$q_p,$ $10^{-6} Кл$	$\ln \frac{I_0}{I_p}$
0					
3					
6					
9					
12					
15					
18					
21					
24					
27					
30					

Таблиця 2

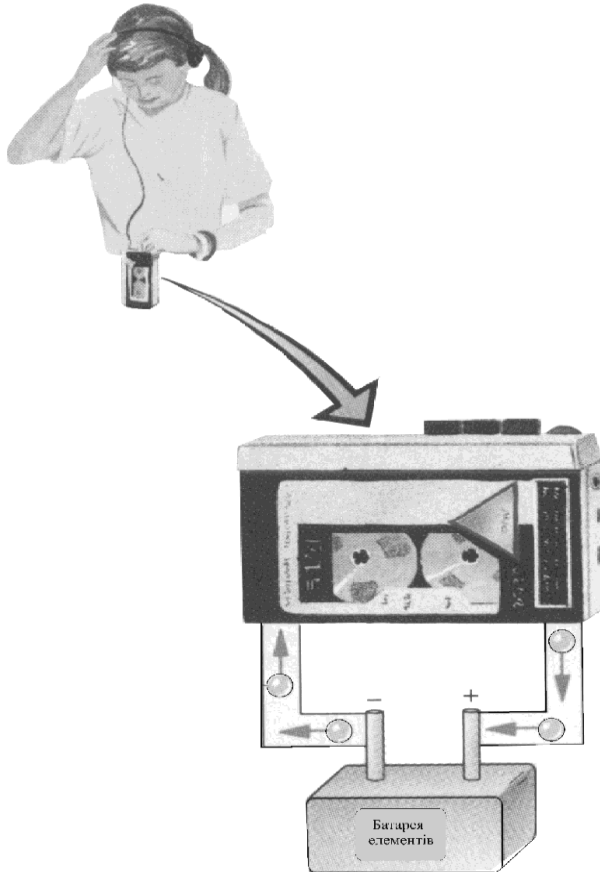
$U_{co},$ B	$\varepsilon,$ B	$C,$ $10^{-6} \Phi$	$\tau,$ c	$R,$ $Ом$	$\delta R,$ $\%$

Контрольні питання

1. Що називається електроємністю конденсатора?
2. Записати закон Ома для кола, що містить послідовне з'єднання ємності, опору і джерела постійного струму.
3. Якою є залежність струму заряджання від часу.
4. Якою є залежність від часу напруги на конденсаторі при його розрядці.
5. Що називається часом релаксації?

Розділ 2

Постійний струм



§ 2.1. Електричний струм і його характеристики

Електричним струмом називається напрямлений (впорядкований) рух електричних зарядів.

Для кількісної оцінки електричного струму введено поняття сили струму. Силою струму називають скалярну величину, яка чисельно дорівнює електричному заряду, що проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу:

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

де dq – електричний заряд, dt – час, протягом якого проходить заряд.

Для характеристики розподілу електричного струму по перерізу провідника вводять вектор густини струму \vec{j} .

Густиною струму є вектор \vec{j} , напрямлений у напрямку протікання струму, числово рівний силі струму, що протікає через одиницю площі поперечного перерізу провідника, перпендикулярної до напрямку протікання.

$$j = \frac{I}{S}.$$

Для постійного струму $I = j_1 S_1 = j_2 S_2$, звідки $\frac{j_1}{j_2} = \frac{S_2}{S_1}$, тобто

густини струмів у різних перерізах провідника обернено пропорційні площам цих перерізів. Візьмемо однорідний циліндричний провідник довжиною l і поперечним перерізом S . Нехай в одиниці об'єму цього провідника буде n елементарних заряджених частинок (концентрація зарядів). Тоді сумарний заряд цих частинок $q = en Sl$. Густина струму:

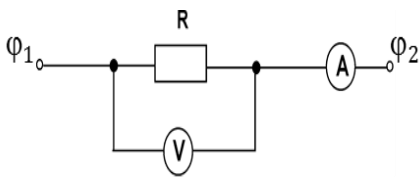
Постійний електричний струм

$$\vec{j} = \frac{en \vec{l}}{S} = en \langle \vec{u} \rangle,$$

де $\langle \vec{u} \rangle = \frac{\vec{l}}{t}$ – середня дрейфова швидкість руху зарядів, e – елементарний заряд. Отже, густина струму визначається густиною носіїв заряду і швидкістю їх впорядкованого руху. Одиницею вимірювання густини струму в системі СІ $[j] = 1 \frac{A}{m^2}$.

§ 2.2. Закон Ома для ділянки кола. Опір провідників

Закон Ома для однорідної ділянки кола (тобто ділянки, яка не



містить ЕРС) (рис. 2.1) формулюється так: сила струму I на ділянці кола прямо пропорційна напрузі (різниці потенціалів) на його кінцях і обернено пропорційна опору R цієї ділянки:

Рис. 2.1

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\phi_1 - \phi_2}{R},$$

де R – опір однорідної ділянки кола, причому

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

де l – довжина провідника, S – площа поперечного перерізу, ρ – питомий електричний опір матеріалу провідника, який числово дорівнює опору провідника одиничної довжини, з перерізом одиничної площі.

Величина σ , обернена до питомого опору ρ , називається питомою електропровідністю речовини:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}.$$

Постійний електричний струм

Питома електропровідність σ характеризує здатність речовини проводити струм. Вона пов'язує густину струму в будь-якій точці провідника з напруженістю електричного поля в цій точці, яка зумовлює електричний струм у провіднику. Розглянемо елемент провідника довжиною dl і площею поперечного перерізу S . Опір dR цього елемента дорівнює

$$dR = \rho \frac{dl}{S}.$$

Якщо в провіднику проходить струм I , то відповідно до закону Ома для ділянки кола маємо:

$$I = \frac{dU}{dR},$$

де dU – напруга на елементі провідника dl .

Оскільки $I = jS$, то

$$jS = \frac{dU}{\rho \frac{dl}{S}} \text{ або } j = \frac{1}{\rho} \frac{dU}{dl}.$$

Величина $\frac{dU}{dl}$ числово дорівнює напруженості E електричного поля в провіднику зі струмом. Тоді

$$j = \frac{1}{\rho} E \text{ або } j = \sigma E.$$

Цей вираз є законом Ома в диференціальній формі: *густина струму в провіднику дорівнює добутку питомої електропровідності провідника на напруженість електричного поля.*

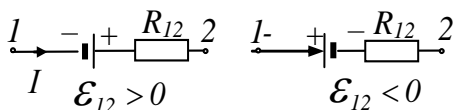


Рис. 2.2

Закон Ома для неоднорідної ділянки кола (тобто ділянки, яка містить джерело з електрорушійною силою (ЕРС) \mathcal{E}_{12} (рис.2.2) записується так:

Постійний електричний струм

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathcal{E}_{12}}{R} = \frac{U_{12}}{R}, \quad (2.1)$$

де $\varphi_1 - \varphi_2$ – різниця потенціалів на кінцях цієї ділянки, R – опір неоднорідної ділянки кола, \mathcal{E}_{12} – ЕРС, яка діє на ділянці 1-2, причому:

$$\mathcal{E}_{1,2} = \int_1^2 (\vec{E}_{стор}, d\vec{l}).$$

Електрорушійна сила $\mathcal{E}_{1,2}$ числово дорівнює роботі, виконаній сторонніми силами при переміщенні вздовж ділянки кола одиничного додатного заряду із точки 1 в точку 2.

Якщо ЕРС сприяє руху додатних зарядів у вибраному напрямку, то $\mathcal{E}_{1,2} > 0$. Якщо ЕРС протидіє руху позитивних зарядів в даному напрямку, то $\mathcal{E}_{1,2} < 0$.

Напрягою U_{12} на ділянці кола 1 - 2 називають фізичну величину, яка числово дорівнює роботі, виконаній сумарним полем кулонівських і сторонніх сил при переміщенні вздовж кола одиничного додатного заряду з точки 1 у точку 2:

$$U_{12} = \int_1^2 (\vec{E}_{кул} + \vec{E}_{стор}), d\vec{l}, \text{ або } U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}.$$

З формули (2.1) отримуємо:

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathcal{E}_{12}. \quad (2.2)$$

Формула (2.2) є математичним виразом узагальненого закону Ома для довільної ділянки кола: *добуток електричного опору ділянки кола на силу струму в ньому дорівнює різниці електричних потенціалів на цій ділянці і алгебраїчній сумі ЕРС всіх джерел електричної енергії, які ввімкнені на цій ділянці.*

Якщо електричне коло замкнене, тоді точки 1 і 2 збігаються, тому

Постійний електричний струм

$\varphi_1 = \varphi_2$ і закон Ома для замкненого електричного кола матиме такий вигляд:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{повн}}},$$

де \mathcal{E} - алгебраїчна сума всіх ЕРС, включених у цьому колі, а $R_{\text{повн}}$ - повний опір кола, який дорівнює сумі опору R зовнішньої частини кола і внутрішніх опорів r всіх джерел.

Якщо коло розімкнене, і отже у ньому немає струму ($I = 0$), то

$$\mathcal{E}_{12} = \varphi_1 - \varphi_2.$$

§ 2.3. Розгалуження струму. Правила Кірхгофа

Закон Ома дає можливість здійснити розрахунки характеристик нерозгалуженого електричного кола. Але на практиці досить часто зустрічаються складні електричні мережі. Розгалужені електричні кола зручно розрахувати, користуючись двома законами (правилами) Кірхгофа.

Перше правило Кірхгофа стосується вузлів (точок з'єднання трьох і більше провідників) і є наслідком закону збереження заряду, відповідно до якого в жодній точці провідника не можуть накопичуватися заряди:

алгебраїчна сума струмів, у вузлі електричного кола дорівнює нулю:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0.$$

Струми, що входять у вузол вважають додатними, струми, які виходять з вузла – від'ємними. Напрями струмів вибираємо довільно.

Постійний електричний струм

За першим правилом Кірхгофа слід складати на одне рівняння менше, ніж число вузлів, що є у колі.

Друге правило Кірхгофа застосовують до контурів (замкнутих ділянок кола); воно є узагальненням закону Ома:

у кожній замкнутій ділянці кола (контурі) алгебраїчна сума напруг дорівнює алгебраїчній сумі всіх ЕРС, які діють у контурі:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i .$$

Записуючи рівняння за другим правилом Кірхгофа, слід вибрати довільно напрямок обходу контуру, і треба дотримуватись такого правила знаків:

а) якщо обраний напрямок обходу контуру збігається з напрямком струму I_i , то напруги $I_i R_i$ беруть зі знаком “+” і навпаки;

б) \mathcal{E}_i беруть зі знаком “+”, якщо при обході контуру ідемо всередині джерела від від’ємної клеми до додатної, тобто, на шляху обходу контуру потенціал зростає.

Кількість незалежних рівнянь, які потрібно скласти за другим правилом Кірхгофа, є меншою за кількість замкнених контурів. Але треба дотримуватись такого правила: для написання рівнянь вибираємо контури так, щоб до кожного наступного контуру входила б одна ділянка, що не використовувалась у жодному з попередніх контурів.

Загальна кількість рівнянь для вузлів і контурів має відповідати кількості невідомих величин (сил струму). У результаті розв’язування складених рівнянь деякі сили струму можуть вийти від’ємними, що вказує на те, що напрямок струму на цих ділянках є протилежними вибраним.

Лабораторна робота №21

РОЗШИРЕННЯ ДІАПАЗОНУ ВИМІРЮВАННЯ АМПЕРМЕТРА І ВОЛЬТМЕТРА

Мета роботи: ознайомлення з будовою та принципом дії приладів для вимірювання сили струму та напруги і здобуття практичних навичок розширення діапазону вимірювання амперметра та вольтметра, розрахунок опору шунта і додаткового резистора.

Прилади і матеріали : 1) джерело постійної напруги 24В, 2) амперметр, 3) міліамперметр, 4) вольтметр, 5) магазин опорів, 6) реостат (потенціометр), 7) з'єднувальні провідники.

Перед виконанням роботи необхідно вивчити теоретичний матеріал поданий у розділі «**Основні вимірювальні прилади**», теми 2.1 - 2.3 і 3.1 - 3.2 та § 2.2, § 2.3 .

Теоретичні відомості

Прилади для вимірювання *сили струму* називають *амперметрами*. Для вимірювання слабких електричних струмів використовують більш чутливі прилади – міліамперметри та мікроамперметри. Для вимірювання сили струму *амперметр вмикають у коло послідовно*. У цьому випадку сила струму у ділянці кола дорівнює силі струму в амперметрі. Для того, щоби ввімкнення амперметра суттєво не вплинуло на режим роботи досліджуваного кола, його опір R_A повинен бути набагато меншим за опір решти кола.

Напругу вимірюють за допомогою *вольтметрів* та *мілівольтметрів*. *Вольтметр слід вмикати паралельно* до ділянки кола, напругу на якій вимірюють, оскільки напруги на усіх паралельно з'єднаних пристроях співпадають. Для того, щоби ввімкнення вольтметра суттєво

Постійний електричний струм

не вплинуло на режим роботи досліджуваної ділянки кола, опір вольтметра R_V повинен бути набагато більшим за опір ділянки кола, до якої його приєднують: $R_V \gg R_d$. Найбільше значення фізичної величини, яке може виміряти даний прилад, називається *верхня межа* (I_V , U_V). Часто використовують комбіновані прилади, у яких за допомогою перемикача або відповідних клем можна вибрати верхню межу вимірювань із деякого числа можливих значень, передбачених



Рис. 1

конструкцією приладу. Такі прилади називають *багатодіапазонними* (рис.1): а) аналоговий (стрілковий) мультиметр (тестер) Samwa Samwa YX-960TR з ручним вибором верхньої межі (діапазону) вимірювання; б) мультиметр цифровий UNI-T UT890D з ручним вибором верхньої межі (діапазону) вимірювання; в) цифровий мультиметр UNI-T UT139A з автоматичним вибором верхньої межі (діапазону) вимірювання.

Постійний електричний струм

При користуванні багатодіапазонними приладами вимірювання починають із діапазону з найвищою верхньою межею вимірювання, і далі переходять на діапазони з меншою верхньою межею вимірювання. Оптимальним є такий діапазон вимірювання, при якому стрілка відхиляється більше, ніж на половину шкали приладу (для аналогового приладу), а для приладу з цифровою шкалою результат вимірювання повинен заповнювати усі розряди дисплея відмінними від нуля цифрами.

Для стрілкових (аналогових) приладів слід визначити насамперед шкалу, по якій будемо читати результати вимірювань, оскільки таких шкал у мультиметрах може бути декілька. Слід звернути увагу, що шкали для вимірювання постійних струмів чи постійних напруг звичайно є лінійними (рівномірними), та позначені символами I – (DCA), або U – (DCV) тоді, як шкали для змінних струмів або напруг є, як правило, нерівномірними, та позначені символами $I\sim$ (ACA) або $U\sim$ (ACV) відповідно.

Зауважимо, що при перемиканні діапазону вимірювання автоматично змінюється також і ціна поділки приладу. Отже при вимірюванні стрілковим багатодіапазонним приладом *слід обов'язково записати:*

- 1) режим роботи приладу (струм, напруга, потужність, постійний, чи змінний струм);
- 2) діапазон (верхню межу вимірювання I_B, U_B);
- 3) повне число поділок відповідної шкали $N_{ш}$;
- 4) показане стрілкою при вимірюваннях число поділок N ;
- 5) клас точності K (0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0).

Звернемо увагу, що абсолютна похибка вимірювань у межах діапазону вимірювання залишається постійною, а показ приладу – ні. Тому, якщо відхилення стрілки є меншим за половину шкали приладу, то відносна похибка таких вимірювань істотно зростає.

Для збільшення точності вимірювань потрібно використовувати багатодіапазонні прилади, щоб стрілка приладу перебувала у межах від 50 до 100% верхньої межі діапазону вимірювання приладу. У випадку

Постійний електричний струм
вимірювання сили струму з цією метою використовують прилад з високою чутливістю та комплект допоміжних резисторів – шунтів, які вмикаються паралельно до приладу за необхідності підвищити верхню межу вимірювання.

Послідовність виконання роботи

Завдання 1 Записати характеристики амперметрів у табл.1 і вольтметрів у табл.2.

Прилад, межі вимірювання якого слід розширити, описати двічі: як міліамперметр та як вольтметр.

Таблиця 1

Система	Клас точності	Верхня межа	Число поділок шкали	Ціна поділки	Чутливість	Абсолютна похибка
	$K_I, \%$	I_B, A	$N_{ш}$	$I_{под}, A/под$	$S_I, под/A$	$\Delta I, A$
Контрольний амперметр						
Шунтований міліамперметр						

Таблиця 2

Система	Клас точності	Верхня межа	Число поділок шкали	Ціна поділки	Чутливість	Абсолютна похибка
	$K_U, \%$	U_B, B	$N_{ш}$	$I_{под}, B/под$	$S_U, под/B$	$\Delta U, B$
Контрольний вольтметр						
Шунтований вольтметр						

Постійний електричний струм

Завдання 2. Розрахувати опір шунта і виконати градування шунтованого амперметра.

1. Встановити за допомогою перемикача діапазонів вимірювання градуйованого міліамперметра максимальне значення верхньої межі I_B ($I_B = 100 \text{ мА}$). У цьому випадку внутрішній опір міліамперметра $R_A = 3,1 \text{ Ом}$.

2. Користуючись заданим значенням сили струму $I = 1 \text{ А}$ на контрольному амперметрі, обчислити необхідний опір шунта $R_{\text{ш}}$ за формулою

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_A}{\left(\frac{I}{I_B} - 1\right)} = \frac{R_A}{\left(\frac{I}{I_B} - 1\right)}.$$

3. Скласти електричне коло для градування шунтованого міліамперметра (рис.2)

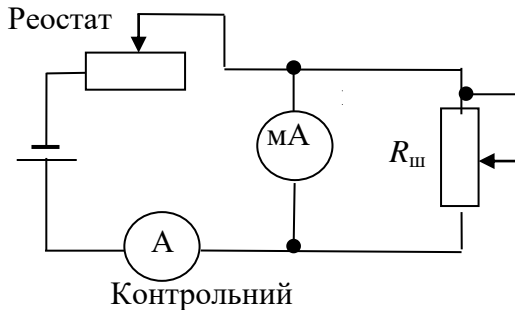


Рис. 2

4. Встановити на магазині опорів, який вистовується як шунт, розраховане значення опору шунта. Встановити повзунок реостата у положення з найбільшим опором. Після перевірки схеми викладачем увімкнути живлення.

5. Зменшуючи опір реостатта, вивести стрілку контрольного амперметра на значення сили струму $I = 0,8 \text{ А}$, слідкуючи, щоб він не зашкалював. Якщо показ градуйованого міліамперметра помітно відрізняється від значення $I = 0,8 \text{ А}$, збільшувати опір шунта за допомогою магазину опорів, доки не досягнемо цього значення сили

Постійний електричний струм

струму. Записати уточнене значення опору шунта $R_{\text{ш}}^{\text{ут}}$ у табл.3.

Таблиця 3

Внутрішній опір	Опір шунта	Уточнений опір шунта
$R_A, \text{ Ом}$	$R_{\text{ш}}, \text{ Ом}$	$R_{\text{ш}}^{\text{ут}}, \text{ Ом}$
Шунтований амперперметр		

6. Встановити за допомогою реостата різні значення сили струму на шкалі градуйованого приладу (0,4 А - 0,9 А), та записати його покази та покази контрольного амперметра у табл.4.

На міліметровому папері після закінчення усієї роботи побудувати графік залежності $I_{\text{гр}}$ від $I_{\text{контр}}$.

Таблиця 4

Номер виміру	1	2	3	4	5	6
$I_{\text{гр}}, \text{ А}$						
$I_{\text{контр}}, \text{ А}$						
$\frac{I_{\text{гр}}}{I_{\text{контр}}}$						

Завдання 3. Розрахувати додатковий опір та провести градування вольтметра (у ролі градуйованого вольтметра вико ристовуємо міліамперметр).

1. Обчислити верхню межу вимірювання напруги даним приладом і записати значення U_B та R_B ($R_B = R_A$) у табл.2.

$$U_B = I_B R_A.$$

Постійний електричний струм

2. Користуючись заданим викладачем значенням напруги $U = 10\text{ В}$,

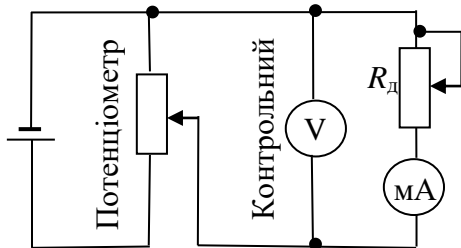


Рис. 3

яку потрібно виміряти даним приладом, обчислити опір додаткового резистора за формулою

$$R_{\text{д}} = (n - 1)R_{\text{В}} = \left(\frac{U}{U_{\text{В}}} - 1 \right) R_{\text{В}}.$$

3. Скласти електричне коло для градуювання вольтметра (рис.3). У ролі додаткового резистора вико ристати магазин опорів.

4. Встановити на магазині опорів розраховане значення додаткового опору. Встановити повзунок потенціометра у положення з найменшим опором (тобто, вивести напругу на виході потенціометра на нуль). Після перевірки схеми викладачем увімкнути живлення.

5. Збільшуючи опір потенціометра, вивести стрілку контрольного вольтметра на показ $U = 8\text{ В}$. Якщо показ градуйованого приладу відрізняється від значення $U = 8\text{ В}$, що відповідає 80 поділкам шкали, то необхідно поступово збільшувати на магазині опорів величину додаткового опору, доки не досягнемо цього значення напруги.

Уточнене значення додаткового опору $R_{\text{д}}^{\text{УТ}}$ запишіть у табл.5.

Таблиця 5

Внутрішній опір	Додатковий опір	Уточнений додатковий опір
$R_{\text{А}}, \text{ Ом}$	$R_{\text{ш}}, \text{ Ом}$	$R_{\text{ш}}^{\text{УТ}}, \text{ Ом}$
Шунтований вольтметр		

6. Проградуйте вольтметр, для цього встановлюйте за допомогою потенціометра різні значення напруги по шкалі градуйованого приладу ($4\text{В} - 9\text{В}$) та записуйте покази градуйованого та контрольного приладів у

Постійний електричний струм

табл.6. На міліметровому папері після закінчення усієї роботи побудуйте графік залежності $U_{\text{гр}}$ від $U_{\text{контр}}$.

Таблиця 6

Номер виміру	1	2	3	4	5	6
$U_{\text{гр}}, B$						
$U_{\text{контр}}, B$						
$\frac{U_{\text{гр}}}{U_{\text{контр}}}$						

Контрольні питання

1. Поясніть значення термінів верхня межа вимірювання, ціна поділки шкали приладу, клас точності приладу
2. Сформулюйте закон Ома для ділянки електричного кола постійного струму.
3. Сформулюйте і поясніть перше правило Кірхгофа.
4. Для чого застосовують шунт? Як його підключити? За якою формулою розрахувати?
5. Для чого застосовують додатковий опір? Як його підключити? За якою формулою розрахувати?

Лабораторна робота №3

ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ ОМА ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи: необхідно перевірити закон Ома для постійного струму.

Прилади та обладнання: 1) джерело $EPC\mathcal{E}$, 2) вольтметр, 3) амперметр, 4) магазин опорів, 5) резистори R_1, R_2, R_3 , 6) з'єднувальні провідники.

Перед виконанням лабораторної роботи необхідно вивчити теоретичний матеріал § 2.1, § 2.2.

Послідовність виконання роботи

1. Скласти електричне коло, яке зображене на рис. 1.

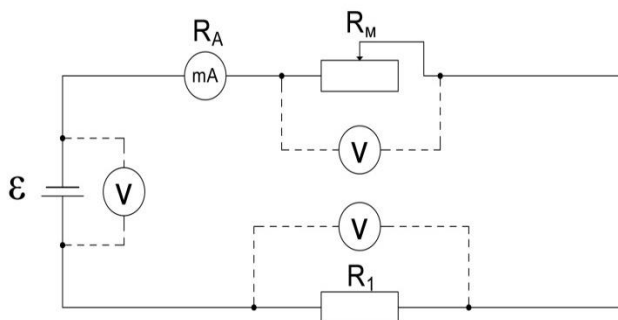


Рис.1

2. За допомогою магазину опорів встановити опір R_M , значення якого вказане на робочому місці, та записати його у таблицю.
3. Записати в таблицю значення опорів R_1 і R_A .
4. Виміряти силу струму I^B в колі за допомогою амперметра.
5. За допомогою вольтметра виміряти:
 - а) напругу U_R^B на опорі R_1 ,

Постійний електричний струм

б) напругу $U_{R_m}^B$ на клеммах магазину опорів,

в) ЕРС \mathcal{E}^B джерела струму. Для цього треба вийняти вилку з розетки " 24 В " і приєднати вольтметр до цієї розетки.

6. Обчислити за формулою $U_{R_A} = I^B R_A$ напругу на амперметрі.
7. Обчислити $\mathcal{E}^{ob} = U_{R_m}^B + U_R^B + U_{R_A}$, враховуючи, що внутрішній опір джерела струму малий порівняно з зовнішнім. Порівняти обчислене значення \mathcal{E}^{ob} з виміряним.
8. Перевірити справедливість закону Ома для замкнутого кола, обчисливши на основі формули (10) величину струму

$$I^{ob} = \frac{\mathcal{E}^B}{R_1 + R_m + R_A}$$

і порівняти це значення з виміряним.

9. Перевірити справедливість закону Ома для однорідної ділянки кола. Для цього обчислити

$$U_R^{ob} = I^{ob} R_1$$

і порівняти обчислене значення з виміряним.

10. Результати вимірювань і обчислень записати у табл. 1.
11. Визначити відносну і абсолютну похибки I^B і \mathcal{E}^B і записати у табл. 2.

Таблиця 1

$R_m,$ <i>Ом</i>	$R_A,$ <i>Ом</i>	$R_1,$ <i>Ом</i>	$I^B,$ $10^{-3} A$	$I^{ob},$ $10^{-3} A$	$U_R^B,$ <i>В</i>	$U_R^{ob},$ <i>В</i>	$U_{R_m}^B,$ <i>В</i>	$U_{R_A},$ <i>В</i>	$\mathcal{E}^B,$ <i>В</i>	$\mathcal{E}^{ob},$ <i>В</i>

Таблиця 2

$\Delta I,$ $10^{-3} A$	$\delta I,$ %	$\Delta \mathcal{E},$ <i>В</i>	$\delta \mathcal{E},$ %

Постійний електричний струм

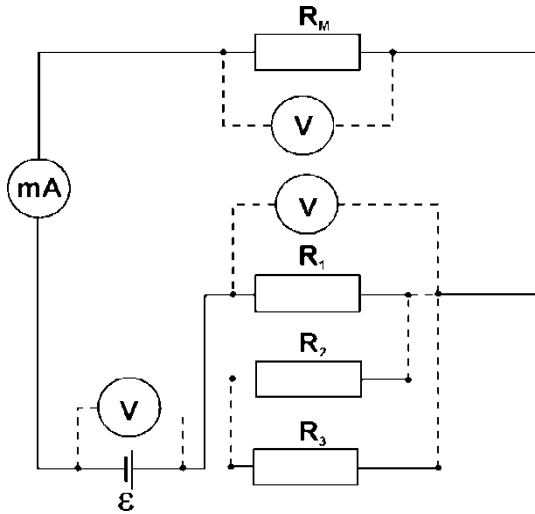


Рис. 2

12. Скласти електричне коло, зображене на рис. 2.

13. Усі вимірювання і обчислення (п.п.3 - 9) провести у випадку послідовного з'єднання трьох резисторів з відомими опорами R_1, R_2, R_3 , причому результуючий опір $R = R_1 + R_2 + R_3$.

14. Результати вимірювань і обчислень записати у табл.3.

Таблиця 3

$R_m,$ <i>Ом</i>	$R_A,$ <i>Ом</i>	$R,$ <i>Ом</i>	$I^B,$ $10^{-3} A$	$I^{об},$ $10^{-3} A$	$U_R^B,$ <i>В</i>	$U_R^{об},$ <i>В</i>	$U_{R_m}^B,$ <i>В</i>	$U_{R_A},$ <i>В</i>	$\mathcal{E}^B,$ <i>В</i>	$\mathcal{E}^{об},$ <i>В</i>

15. Визначити відносну і абсолютну похибки I^B і \mathcal{E}^B і записати у табл. 4.

Таблиця 4

$\Delta I,$ $10^{-3} A$	$\delta I,$ %	$\Delta \mathcal{E},$ <i>В</i>	$\delta \mathcal{E},$ %

Контрольні питання

1. Що називається густиною струму?
2. Записати закон Ома в диференціальній формі.
3. Записати закон Ома для неоднорідної ділянки кола.
4. Чому числово дорівнює напруга і електрорушійна сила ?
5. Записати закон Ома для замкненого кола.

Лабораторна робота № 4

ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ РЕЗИСТОРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МІСТКА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ (МІСТКА УІТСТОНА)

Мета роботи: ознайомитись з принципом роботи містка Уїтстона, скласти схему, за її допомогою визначити опори трьох резисторів.

Прилади та обладнання: 1) джерело ЕРС, 2) гальванометр, 3) магазин опорів, 4) реохорд, 5) резистори, 6) з'єднувальні провідники.

Перед виконанням цієї роботи, необхідно вивчити теоретичний матеріал, приведений в §§ 2.1 - 2.3.

Теоретичні відомості

Одним з найпростіших і найточніших методів визначення опору резисторів є метод за допомогою містка постійного струму (Уїтстона), принципова схема якого зображена на рис. 1.

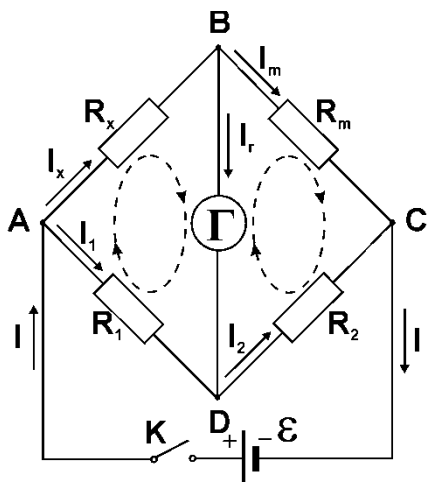


Рис.1

Для практичного застосування правил Кірхгофа вибирають, умовний напрям „обходу” контуру (на рис.1 зображено стрілками всередині відповідних контурів).

Складаємо рівняння за першим правилом Кірхгофа (напрями струмів через резистори R_x , R_m , R_1 і R_2 вибирають умовно) для вузлів A , B , C :

$$\text{для вузла } A: \quad I = I_x + I_1, \quad (1)$$

$$\text{для вузла } B: \quad I_x = I_m + I_r, \quad (2)$$

$$\text{для вузла } C: \quad I = I_m + I_2. \quad (3)$$

Постійний електричний струм

Складаємо рівняння за другим правилом Кірхгофа :

$$I_x R_x + I_\Gamma R_\Gamma - I_1 R_1 = 0 \quad (\text{для контуру } ABDA), \quad (4)$$

$$I_m R_m - I_2 R_2 - I_\Gamma R_\Gamma = 0 \quad (\text{для контуру } BCDB). \quad (5)$$

Якщо змінювати опори R_m , R_1 , R_2 , то при певних значеннях цих опорів потенціали точок B і D будуть однаковими, тоді струм $I_\Gamma = 0$. Врахувавши це у формулах (1) – (5), отримаємо :

$$I_x = I_m;$$

$$I_1 = I_2;$$

$$I_1 R_1 = I_x R_x;$$

$$I_2 R_2 = I_m R_m.$$

Розв'язавши цю систему, дістаємо: $R_x = R_m \frac{R_1}{R_2}$.

Коли ділянкою ADC є однорідна прокалібрована дротина (реохорд), то відношення $\frac{R_1}{R_2}$ можна замінити відношенням довжин відповідних відрізків дроту AD і DC . Справді,

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho \frac{l_1}{S}}{\rho \frac{l_2}{S}} = \frac{l_1}{l_2},$$

де ρ - питомий опір матеріалу, з якого виготовлений реохорд; S – площа поперечного перерізу дротину (реохорду).

Остаточно невідомий опір

$$R_x = R_m \frac{l_1}{l_2}.$$

Якщо довжина реохорду l , то $l_2 = l - l_1$,

$$R_x = R_m \frac{l_1}{l - l_1}. \quad (6)$$

Оскільки опір реохорду порівняно невеликий, місток Уітстона, опи-

Постійний електричний струм

саного типу застосовується, як правило, для вимірювання невеликих опорів (від 1 до 1000 Ом).

Проаналізуємо умову найменшої похибки, зумовленої відліком довжин l_1 і l_2 , відповідних відрізків реохорда. Відносна похибка вимірювань

$$\begin{aligned} \delta R_x &= \frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_m}{R} + \frac{\Delta l_1}{l_1} + \frac{\Delta l}{l-l_1} + \frac{\Delta l_1}{l-l_1} = \\ &= \frac{\Delta R_m l_1 (l-l_1) + \Delta l_1 R_m (l-l_1) + \Delta l R_m l_1 + \Delta l_1 R_m l_1}{R_m l_1 (l-l_1)} \end{aligned} \quad (7)$$

буде мінімальною тоді, коли знаменник виразу (7) буде максимальним. Знаходимо умову максимуму для функції $f(l_1) = R_m l_1 (l-l_1)$:

$$\frac{df(l_1)}{dl_1} = R_m l - 2R_m l_1 = 0.$$

Звідси $l_1 = \frac{l}{2}$. Таким чином, похибка буде мінімальною, коли при нульовому струмі через гальванометр бігунок D стоятиме посередині реохорду ($l_1 = l_2$). У цьому випадку вираз (6) набуде вигляду $R_x = R_m$.

Послідовність виконання роботи

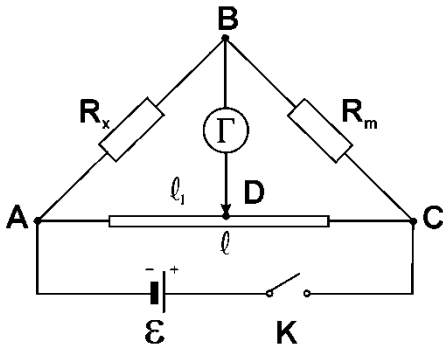


Рис. 2

1. Скласти електричне коло відповідно до схеми (рис.2), увікнувши замість R_x один з запропонованих резисторів.
2. Установити показник реохорду D $l_1 = 1,0$ і за допомогою магазину опору підібрати такий опір R_m , щоб стрілка гальванометра встановилась на поділці 0. ($l_2 = l-l_1$, де $l = 2$ - довжина

Постійний електричний струм

реохорда). Вимірювання провести ще для $l_1=0,9$ і $1,1$.

3. Результати вимірювань та розрахунків на основі формули (6) записати у табл.1.

Таблиця 1

№ з/п	l_1 , под	R_m , Ом	R_x , Ом	ΔR_x , Ом	δR_x , %
1	1,0				
2	0,9				
3	1,1				
Сер.					

4. Аналогічні вимірювання провести ще для двох невідомих резисторів. Вимірювання кожного з невідомих резисторів слід провести тричі й результати занести до табл.2 і табл.3.

Таблиця 2

№ з/п	l_1 , под	R_m , Ом	R_x , Ом	ΔR_x , Ом	δR_x , %
1	1,0				
2	0,9				
3	1,1				
Сер.					

Таблиця 3

№ з/п	l_1 , под	R_m , Ом	R_x , Ом	ΔR_x , Ом	δR_x , %
1	1,0				
2	0,9				
3	1,1				
Сер.					

4. Визначити похибки вимірювань.

Постійний електричний струм

Контрольні питання

1. Що таке сила струму, напруга, електрорушійна сила?
2. Записати закон Ома для неоднорідної ділянки електричного кола.
3. Сформулювати правила Кірхгофа.
4. Записати рівняння за першим правилом Кірхгофа для вузла D .
5. Вивести розрахункову формулу для визначення опору резистора містком Уїтстона.

Лабораторна робота № 5

ПЕРЕВІРКА ПРАВИЛ КІРХГОФА

Мета роботи: перевірити правила Кірхгофа для кола постійного струму.

Прилади та обладнання: 1) джерела ЕРС \mathcal{E}_1 і \mathcal{E}_2 , 2) вольтметр, 3) магазин опорів, 4) опір R_0 ,

Перед виконанням цієї роботи, необхідно вивчити теоретичний матеріал, приведений в §§ 2.1 - 2.3.

Теоретичні відомості

У цій лабораторній роботі досліджується розгалужене коло постійного струму, схема якого зображена на рис.1. Опір R_0 - баластний, опори R_1, R_2 і R_3 підбираємо за допомогою магазинів опорів.

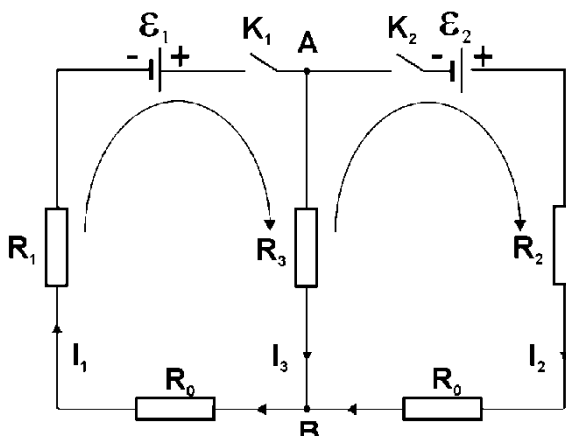


Рис.1

Вибираємо вказані на рисунку напрями обходу контурів. Застосуємо

Постійний електричний струм

перше правило Кірхгофа до вузла B :

$$I_2 + I_3 - I_1 = 0;$$

а друге – відповідно до обох контурів:

$$I_1 R_0 + I_1 R_1 + I_3 R_3 = \mathcal{E}_1,$$

$$-I_3 R_3 + I_2 R_2 + I_2 R_0 = \mathcal{E}_2.$$

При записі рівнянь враховані знаки струмів і EPC . Перепишемо систему рівнянь у стандартному вигляді :

$$(-1) \cdot I_1 + 1 \cdot I_2 + 1 \cdot I_3 = 0,$$

$$(R_1 + R_0)I_1 + 0 \cdot I_2 + R_3 I_3 = \mathcal{E}_1,$$

$$0 \cdot I_1 + (R_0 + R_2)I_2 + (-R_3)I_3 = \mathcal{E}_2.$$

Розв'язок даної системи для струмів I_1, I_2, I_3 можна знайти за формулами Крамера:

$$I_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}; I_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta}; I_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta}, \quad (1)$$

де

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ \mathcal{E}_1 & 0 & R_3 \\ \mathcal{E}_2 & R_0 + R_2 & -R_3 \end{vmatrix}, \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ R_1 + R_0 & \mathcal{E}_1 & R_3 \\ 0 & \mathcal{E}_2 & -R_3 \end{vmatrix},$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} -1 & 1 & 0 \\ R_1 + R_0 & 0 & \mathcal{E}_1 \\ 0 & R_0 + R_2 & \mathcal{E}_2 \end{vmatrix}, \quad \Delta = \begin{vmatrix} -1 & 1 & 1 \\ R_1 + R_0 & 0 & R_3 \\ 0 & R_0 + R_2 & -R_3 \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Після обчислення детермінантів (2) отримаємо вирази:

$$\Delta_1 = \mathcal{E}_1(R_2 + R_0) + R_3(\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2);$$

$$\Delta_2 = \mathcal{E}_2(R_1 + R_0) + R_3(\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2);$$

$$\Delta_3 = \mathcal{E}_1(R_2 + R_0) + \mathcal{E}_2(R_1 + R_0);$$

$$\Delta = R_3(R_1 + 2R_0 + R_2) + (R_1 + R_0)(R_2 + R_0).$$

Постійний електричний струм

Якщо якесь значення сили струму виявиться від'ємним, то це означає, що напрям струму є протилежним до вибраного на рис. 2.

Обчисливши сили струмів, визначимо відповідні напруги на опорах R_1, R_2 і R_3 :

$$U_1 = I_1 R_1, \quad U_2 = I_2 R_2, \quad U_3 = I_3 R_3, \quad (3)$$

де I_1, I_2, I_3 визначаються за (1).

Величини U_1, U_2 і U_3 можна також виміряти безпосередньо вольтметром.

Послідовність виконання роботи

1. Скласти електричне коло (рис.1), звернути увагу на полярність джерел струму.
2. Підібрати опори R_1, R_2 і R_3 за допомогою магазину опорів; замкнути ключі K_1 і K_2 і виміряти спади напруг $U_{1вим}$, $U_{2вим}$ і $U_{3вим}$ на цих опорах вольтметром.
3. Розімкнути ключі K_1 і K_2 і виміряти ЕРС \mathcal{E}_1 і \mathcal{E}_2 джерел струму, приєднуючи клеми вольтметра до клем батарей.
4. Змінюючи опори, дослід повторити три рази. Результати вимірювань записати в таблицю 1.

Таблиця 1

№ з/п	R_0 , <i>Ом</i>	R_1 , <i>Ом</i>	R_2 , <i>Ом</i>	R_3 , <i>Ом</i>	\mathcal{E}_1 , <i>В</i>	\mathcal{E}_2 , <i>В</i>
1						
2						
3						

5. Обчислити за формулами (1), (2) сили струмів I_1, I_2, I_3 , їх значення записати в табл. 2.

Постійний електричний струм

Перевірити перше правило Кірхгофа.

6. Обчислити за (3), напруги $U_{1обч.}$, $U_{2обч.}$, $U_{3обч.}$ і їх значення записати в табл. 3.
7. Порівняти виміряні і обчислені значення напруг U_1, U_2, U_3 і визначити відносне відхилення у відсотках.

$$\delta U_i = \frac{U_i - U_{iобч.}}{U_i} \cdot 100\% , (i = 1, 2, 3).$$

Таблиця 2

Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ	$I_1,$ A	$I_2,$ A	$I_3,$ A	$\sum I,$ A

Таблиця 3

$U_{1вим.},$ B	$U_{1обч.},$ B	$\delta U_1,$ %	$U_{2вим.},$ B	$U_{2обч.},$ B	$\delta U_2,$ %	$U_{3вим.},$ B	$U_{3обч.},$ B	$\delta U_3,$ %

Контрольні питання

1. Дати означення сили електричного струму.
2. Записати закон Ома для неоднорідної ділянки електричного кола
3. Сформулювати перше правило Кірхгофа.
4. Скільки незалежних рівнянь можна записати за першим правилом Кірхгофа.
5. Сформулювати друге правило Кірхгофа
6. Яким є правило знаків для ЕРС ?

Лабораторна робота № 8

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ ДЖЕРЕЛА СТРУМУ МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦІЇ

Мета роботи: вивчення компенсаційного методу та визначення електрорушійної сили джерела струму.

Прилади: 1) джерела струму з відомою електрорушійною силою \mathcal{E} , \mathcal{E}_0 ; 2) джерела струму з невідомою електрорушійною силою \mathcal{E}_{x_1} та \mathcal{E}_{x_2} ; 3) гальванометр; 4) змінний опір реохорд; 5) магазин опорів R_0 , 6) провідники, 7) вимикачі.

Перед виконанням цієї роботи, необхідно вивчити теоретичний матеріал, приведений в §§ 2.1 - 2.3.

Теоретичні відомості

Електрорушійна сила джерела струму дорівнює різниці потенціалів на розімкнутих затискачах джерела струму (коли струм у колі дорівнює нулю). Якщо для вимірювання *EPC* до джерела під'єднати вольтметр, то в отриманому замкненому колі потече струм і виміряна вольтметром напруга на затискачах джерела $U = \mathcal{E} - Ir$, відрізняється від *EPC* \mathcal{E} джерела на величину спаду напруги Ir на внутрішньому опорі r .

EPC можна визначити точніше шляхом її порівняння з відомою, еталонною *EPC* так званого „нормального” елемента. Для такого порівняння використовується компенсаційна схема (рис. 1).

Батарея з *EPC* \mathcal{E} замикається на зовнішній опір $R = R_0 + R_1 + R_2$. Нормальний елемент з \mathcal{E}_0 і джерело струму, *EPC* \mathcal{E}_x якого необхідно визначити, почергово вмикають в схему так, що в точці *A* з'єднуються однойменні полюси \mathcal{E} та \mathcal{E}_0 (або \mathcal{E}_x). Використовуючи правила

Постійний електричний струм

Кірхгофа, проаналізуємо умови, при яких сила струму на ділянці, що містить \mathcal{E}_0 (або \mathcal{E}_x) і гальванометр Γ , дорівнює нулю.

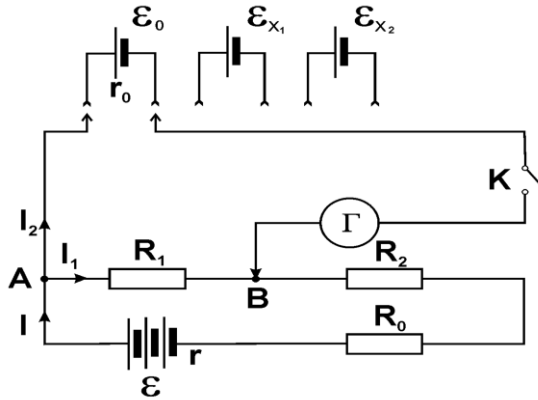


Рис. 1

За першим правилом Кірхгофа у точці A

$$I = I_1 + I_2. \quad (1)$$

Для контурів $AB\mathcal{E}A$ і $AB\mathcal{E}_0A$ за другим правилом Кірхгофа

$$\begin{aligned} I_1 R_1 + I(R_0 + R_2 + r) &= \mathcal{E}; \\ I_2(r_0 + r_2) - I_1 R_1 &= -\mathcal{E}_0, \end{aligned} \quad (2)$$

де r, r_0 - внутрішні опори, відповідно \mathcal{E} і нормального елемента; r_2 - опір гальванометра.

Повертаючи ручку реохорда, тобто змінюючи одночасно опори R_1 і R_2 (довжини плечей реохорда), можемо досягти того, що струм $I_2 = 0$. Тоді з (1) випливає, що $I_1 = I$ і система рівнянь (2) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} IR + r &= \mathcal{E} \\ I R_1 &= \mathcal{E}_0, \end{aligned}$$

де $R = R_0 + R_1 + R_2$.

Звідси

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}; \quad I_1 = \frac{\mathcal{E}_0}{R_1}.$$

Постійний електричний струм

Оскільки $I_1 = I$, то
$$\frac{\mathcal{E}}{R+r} = \frac{\mathcal{E}_0}{R_1}. \quad (3)$$

Струм $I_2 = 0$, коли протилежні за знаком, але однакові за величиною спади напруг, створені джерелами \mathcal{E} та \mathcal{E}_0 на даній ділянці, зрівноважують (компенсують) один одного.

Якщо замість елемента з \mathcal{E}_0 увімкнути в схему джерело з невідомою ЕРС \mathcal{E}_x , то умови $I_2 = 0$ можна досягти при іншому значенні опору R'_1 . При цьому повний опір R залишається незмінним. Здійснивши заміну в правій частині виразу (3), отримаємо.

$$\frac{\mathcal{E}}{R+r} = \frac{\mathcal{E}_x}{R'_1}. \quad (4)$$

Прирівнявши праві частини виразів (3) та (4), дістанемо:

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_0 \frac{R'_1}{R_1}. \quad (5)$$

Таким чином порівняння двох ЕРС зводиться до порівняння двох опорів R та R'_1 .

Описаний метод компенсації в застосуванні до визначення ЕРС має ряд переваг:

- 1) сила струму I_2 через джерела, ЕРС яких порівнюються, в момент вимірювання дорівнює нулю, тому спад напруги на внутрішньому опорі джерела відсутній;
- 2) при вимірюваннях непотрібно градувати шкалу гальванометра, оскільки він фіксує лише відсутність струму;
- 3) ЕРС допоміжної батареї \mathcal{E} не використовується при обчисленні кінцевого результату за формулою (5). Проте необхідно, щоб під час проведення вимірювань вона залишалася постійною.

Послідовність виконання роботи

1. Скласти схему відповідно до рис.1, вмикаючи в коло нормальний

Постійний електричний струм

елемент з $\mathcal{E}_0 = 1.018 \text{ В}$ і допоміжне джерело з $\mathcal{E} = 24 \text{ В}$. На магазині опорів встановити значення $R_0 = 0 \text{ Ом}$.

2. Поворотом ручки реохорда досягти такого значення R_1 , при якому струм, що протікає через гальванометр, відсутній (R_1 пропорційний довжині плеча реохорда, тобто кількості поділок реохорда від „0” шкали до поділки, на яку вказує стрілка вказівника). Записати R_1 .
3. Замінити нормальний елемент джерелом з невідомою ЕРС \mathcal{E}_{x_1} .
4. Поворотом ручки реохорда знову досягти умови $I_2 = 0$. Записати R'_1 .
5. Визначити невідому ЕРС \mathcal{E}_{x_1} , використовуючи співвідношення $\mathcal{E}_{x_1} = \mathcal{E}_0 R'_1 / R_1$, підставивши в нього $\mathcal{E}_0 = 1.018 \text{ В}$.
6. Увімкнути в коло джерело з невідомою ЕРС \mathcal{E}_{x_2} і записати значення R''_1 , при якому $I_2 = 0$. Обчислити \mathcal{E}_{x_2} за формулою $\mathcal{E}_{x_2} = \mathcal{E}_0 R''_1 / R_1$.
7. Змінивши значення опору магазину опорів R_0 , повторити попередні вимірювання й обчислення \mathcal{E}_{x_1} і \mathcal{E}_{x_2} .
8. Знайти середні значення \mathcal{E}_{x_1} та \mathcal{E}_{x_2} , і оцінити точність виконаних \mathcal{E}_{x_2} вимірювань, визначивши абсолютну та відносну похибки вимірювань.
9. Результати вимірювань і обчислень занести в табл.1.

Таблиця 1

№ з/п	R_0 , Ом	R_1 , Ом	R'_1 , Ом	R''_1 , Ом	\mathcal{E}_{x_1} , В	$\Delta \mathcal{E}_{x_1}$, В	$\delta \mathcal{E}_{x_1}$, %	\mathcal{E}_{x_2} , В	$\Delta \mathcal{E}_{x_2}$, В	$\delta \mathcal{E}_{x_2}$, %
1										
2										
3										
4										
5										
Сер.										

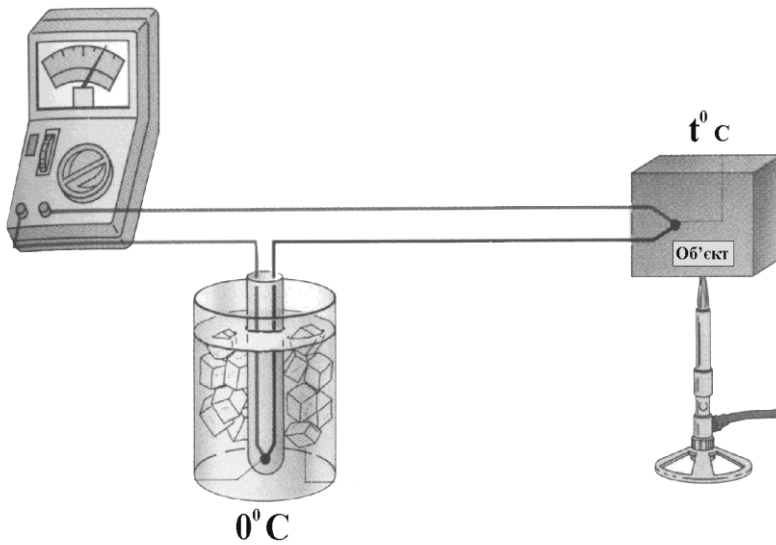
Постійний електричний струм

Контрольні питання

1. Яка величина називається *EPC* ?
2. Записати *EPC*, що діє на ділянці 1-2 електричного кола.
3. Якою є напруга на затискачах джерела струму ?
4. Сформулювати перше правило Кіхгофа.
5. Сформулювати друге правило Кіхгофа.

Розділ 3

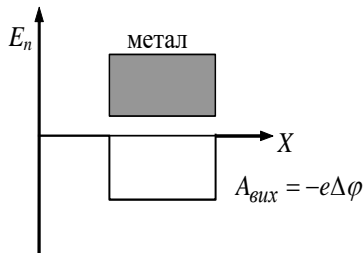
ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ТА КОНТАКТНІ ЯВИЩА



§ 3.1. Робота виходу. Явище термоелектронної емісії

Електрони провідності в металі весь час перебувають в хаотичному тепловому русі. Електрони з найбільшою кінетичною енергією, що знаходяться близько від поверхні, можуть вирватись з металу у навколишній простір.

Потенціальну енергію E_n вільних електронів $-e$ у вакуумі вважають такою, що дорівнює нулю (бо $\varphi = 0$).



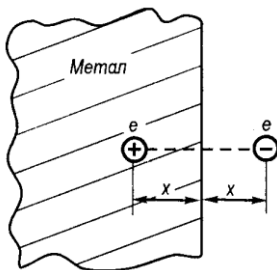
Тоді всередині металу з позитивним внутрішнім потенціалом $\Delta\varphi$ потенціальна енергія електронів провідності від'ємна (рис. 3.1):

$$E_n = (-e)\Delta\varphi = -e\Delta\varphi.$$

Щоб вийти з металу, електрон повинен витратити енергію, яка називається *роботою виходу*.

Рис.3.1
роботою виходу.

Одна із причин виникнення роботи виходу полягає в наступному.



Якщо при тепловому русі електрон вилетить з металу, то він індукує на його поверхні заряд, який називається *зарядом дзеркального відображення* (рис. 3.2). Між електронем і цим зарядом виникає сила притягання, що називається силою електричного зображення і яка намагається повернути електрон назад в метал.

Рис.3.2

Друга причина зумовлена тим, що біля

Термоелектронна емісія

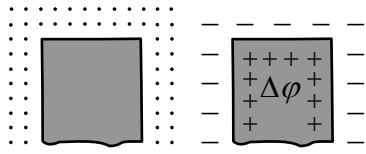


Рис. 3.3

поверхні металу у вакуумі існує "електронна хмарка", яка заряджена негативно (рис. 3.3). Розміри цієї хмарки одного порядку з розмірами атомів (10^{-10} м). При цьому метал, охоплений

негативною електронною хмаринкою, відносно вакууму заряджений позитивно. Позитивний потенціал внутрішньої частини металу відносно вакууму називається внутрішнім потенціалом $\Delta\varphi$. Хмарка електронів разом із зовнішнім шаром позитивних іонів утворює подвійний електричний шар. Сили, які діють на електрон у такому шарі, напрямлені всередину металу. Тому в разі виходу електрона з металу він повинен виконати роботу проти цих сил електричного поля.

Роботою виходу називається величина $A_{вих}$, що дорівнює тій найменшій додатковій енергії, яку потрібно надати електрону провідності в металі для його виходу у вакуум.

Отже, числово робота виходу дорівнює

$$A_{вих} = e\Delta\varphi, [A_{вих}] = 1eB.$$

Робота виходу $A_{вих}$ є різною для різних металів, і залежить від температури та від стану їх поверхні. При підвищенні температури деякі електрони внаслідок хаотичного руху набувають достатньо велику кінетичну енергію і можуть вилетіти за межі металу.

Емісія – це вихід електронів з металу під дією зовнішніх факторів.

Явище термоелектронної емісії полягає в тому, що нагріті метали випускають електрони.

Електрон провідності може вилетіти з будь-якого металу тоді, коли його кінетична енергія перевищує роботу виходу електрона з

Термоелектронна емісія

металу. Це явище використовується в електронних лампах та у багатьох інших електровакуумних приладах..

Сила термоелектронного струму I_a в двохелектродній лампі (діоді) залежить від напруги U_a , яка прикладена між катодом та анодом, температури катода і матеріалу, з якого виготовлений катод.

На рис. 3.4 подано залежність термоелектронного струму I_a від

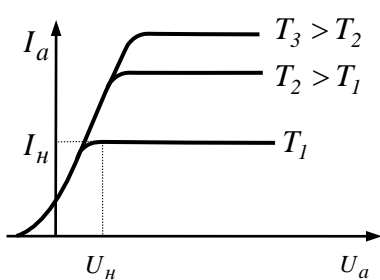


Рис.3.4

напруги U_a при різних температурах катода. Ця крива називається *вольт-амперною характеристикою діода*. При малих значеннях U_a криві при різних температурах збігаються.

При невеликих анодних напругах сила струму спочатку повільно зростає з підвищенням напруги. Це пояснюється тим, що при невеликих значеннях U_a не всі електрони, які вийшли з катода, досягають анода. Частина електронів між катодом і анодом утворює електронну хмаринку (просторовий заряд), яка перешкоджає руху до анода електронів, які знову вилітали з катода. Із збільшенням напруги U_a електронна хмаринка поступово розсіюється і струм I_a зростає. При $U_a = U_n$ зростання струму припиняється. Це пов'язано з тим, що кількість електронів, які долітають до анода за одиницю часу, дорівнює кількості електронів, що вилітають за той самий час з катода.

Максимальний термоелектронний струм, можливий при даній температурі катода, називають *струмом насичення* I_n .

При малих значеннях $U_a \ll U_n$ залежність термоелектронного

Термоелектронна емісія

струму від анодної напруги описується законом Богуславського-Ленгмюра:

$$I_a = BU_a^{3/2},$$

де B – коефіцієнт, який залежить від форми електродів та їх взаємного розміщення.

Математично залежність густини струму насичення описується за класичною електронною теорією формулою Річардсона:

$$j_n = A\sqrt{T}e^{-\frac{e\Delta\phi}{kT}},$$

де $A = ne\sqrt{\frac{k}{2\pi m}}$, тут e , m , n - відповідно заряд, маса та концентрація електронів в металі, k - стала Больцмана.

§ 3.2. Контактні явища

Якщо привести в тісний контакт два різного роду провідники, між ними виникне різниця потенціалів, яка називається *контактною різницею потенціалів*. Ця різниця потенціалів не залежить від форми і розмірів провідників, а залежить лише від хімічного складу провідників і температури контакту.

Розглянемо причини виникнення контактної різниці потенціалів.

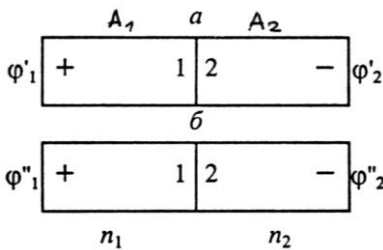


Рис.3.5

Для кожного металу характерна певна робота виходу електронів. Якщо робота виходу першого металу A_1 (рис.3.5 а) менша від роботи виходу другого металу A_2 , то перший метал покидає більше електронів і він заряджається при цьому позитивно.

Другий метал нагромаджує електрони і

Термоелектронна емісія заряджається негативно. Унаслідок цього між двома контактуючими металами виникає різниця потенціалів

$$\varphi'_1 - \varphi'_2 = \frac{A_1}{e} - \frac{A_2}{e} = \frac{A_1 - A_2}{e}.$$

Якщо контактуючі метали, при однаковій роботі виходу ($A_1 = A_2$), мають різну концентрацію вільних електронів (наприклад $n_1 > n_2$), то внаслідок дифузії з першого металу буде переходити більше електронів у другий, ніж навпаки (рис. 3.5 б). Перший метал зарядиться позитивно, другий – негативно. Різниця потенціалів, яка при цьому утвориться, дорівнює:

$$\varphi''_1 - \varphi''_2 = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}.$$

Сумарна різниця потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2$, яка зумовлена обома факторами (різною роботою виходу і різними концентраціями) рівна:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}.$$

Цей вираз є математичним визначенням *першого закону Вольта*:
при з'єднанні двох провідників, виготовлених з різних металів, між ними виникає контактна різниця потенціалів, яка залежить лише від їхнього хімічного складу і температури.

Якщо сполучити послідовно декілька контактуючих металевих провідників, які мають однакову температуру, то сума контактних різниць потенціалів дорівнює різниці потенціалів на кінцях цього розімкнутого кола: $(\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3) + \dots + (\varphi_{n-1} - \varphi_n) = \varphi_1 - \varphi_n$.

Різниця потенціалів на кінцях розімкнутого кола, що складене з декількох послідовно сполучених провідників, дорівнює контактній

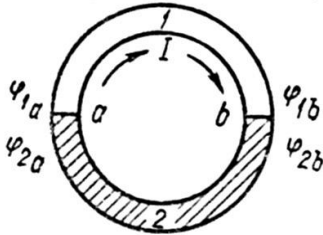
Термоелектронна емісія

різниці потенціалів, що створюється кінцевими провідниками і не залежить від проміжних провідників.

Це твердження є другим законом Вольта.

§ 3.3. Явище Зеебека

Розглянемо замкнене коло, яке складається з двох провідників 1 і 2 (Рис. 3.6). За законом Ома електрорушійна сила \mathcal{E} , прикладена до цього кола, дорівнює сумі напруг U_1 і U_2 відповідно на ділянках $a1b$ і $b2a$, тобто у першому і другому провідниках (напрямок обходу контура подано на рис. 3.6 стрілками)



$$\mathcal{E} = U_1 + U_2.$$

Значення U_1 і U_2 можна визначити за допомогою закону Ома для ділянки кола, якщо врахувати, що на ділянках $a1b$ і $b2a$ не прикладена ЕРС:

Рис. 3.6

$$U_1 = \varphi_{1a} - \varphi_{1b} \quad \text{і} \quad U_2 = \varphi_{2b} - \varphi_{2a},$$

тому

$$\mathcal{E} = (\varphi_{1a} - \varphi_{2a}) + (\varphi_{2b} - \varphi_{1b}).$$

Отже, у розглядуваному колі діє електрорушійна сила, яка дорівнює алгебраїчній сумі всіх внутрішніх контактних різниць потенціалів.

Якщо температура обох спаїв однакова, тобто $T_a = T_b = T$, то маємо

$$\mathcal{E} = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_2}{n_1} = 0.$$

Отже, у замкненому колі, утвореному кількома металевими провідниками, всі спаї яких перебувають при однаковій температурі,

Термоелектронна емісія
електрорушійна сила виникнути не може.

Але, коли температури спаїв T_a і T_b різні, наприклад $T_a > T_b$, тоді
електрорушійна сила виникає:

$$\mathcal{E} = \left(\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT_a}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} \right) - \left(\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT_b}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} \right) = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} (T_a - T_b).$$

Величина $\alpha = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$ є сталою величиною для даної пари металів

і називається *питомою термоелектрорушійною силою*. Врахувавши це
одержимо:

$$\mathcal{E} = \alpha(T_a - T_b).$$

Отже, явище Зеебека полягає в тому, що у замкнутому колі, що
складене з різних провідників, контакти яких мають неоднакові
температури, створюється термоелектрорушійна сила, пропорційна
різниці температури спаїв. Такий пристрій з двох різних провідників з
неоднаковими температурами контактів називається *термопарою* або
термоелементом.

Якщо для даної пари металів відомі стала α і температура одного
контактів, наприклад T_b , то легко знайти T_a іншого контакту (його

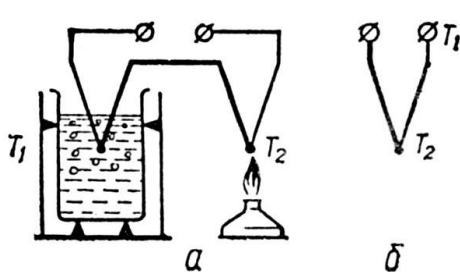


Рис. 3.7

називається диференціальною (рис.3.7а).

поміщають у середовище, температура якого треба виміряти):

$$T_a = \frac{\mathcal{E} + \alpha T_b}{\alpha}.$$

Термопара, яка має два спаї і під час роботи один з них підтримується при сталій температурі 0°C , називається диференціальною (рис.3.7а).

Термоелектронна емісія

Термопара з одним спаєм, в якій роль другого спаю відіграють клеми для вмикання в коло, називається простою (рис. 3.7 б). Другий “спай” має температуру навколишнього середовища.

Металеві термопари використовують, як правило, для вимірювання температур. У різних температурних інтервалах застосовуються термопари з різних матеріалів.

За виміряною термо - EPC з таблиць визначають або відразу невідому температуру T_2 (диференціальна термопара), або різницю між невідомою температурою і температурою навколишнього середовища (проста термопара).

Термопари мають ряд переваг порівняно із звичайними термометрами. Вони дають змогу вимірювати температури в широкому діапазоні – від десятків до тисяч градусів абсолютної шкали. Термопари мають велику чутливість і тому дають змогу вимірювати дуже малі різниці температур (до 10^{-6} градуса). Так, термопари залізо-констант застосовують для вимірювання температур до 500°C і мають чутливість $5,3 \cdot 10^{-5} \text{ В/град}$. Термопара платина – платини і 10% родію має чутливість $6 \cdot 10^{-6} \text{ В/град}$, її використовують для вимірювання температур від дуже низьких до тисяч градусів.

§ 3.4. Явище Пельтьє

Явище Пельтьє полягає в тому, що при протіканні струму через неоднорідне коло, складене з двох провідників, виготовлених з різних металів, на одному контакті виділяється, а на іншому поглинається кількість теплоти, що пропорційна до сили струму і до часу:

$$Q_n = Pq = PIt,$$

де Q_n - теплота, яка виділяється (поглинається) на контакті; q - заряд, що

Термоелектронна емісія проходить через спай; P - коефіцієнт Пельтьє.

На відміну від теплоти Джоуля ($Q = I^2Rt$), теплота Пельтьє пропорційна першому степеню струму ($Q_n = IRt$) і змінює знак при зміні напрямку струму. Причина явища Пельтьє полягає у тому, що середня енергія електронів в різних металах - різна. Якщо при переході через контакт середня енергія електрона зменшується, то спай нагрівається, і навпаки.

§ 3.5. Явище Томсона

Суть явища Томпсона полягає у тому, що під час протіканні струму по однорідному провіднику з градієнтом температури виділяється або поглинається кількість теплоти, яка є пропорційною до градієнта температури і до величини заряду:

$$Q_T = \tau \frac{dT}{dx} q,$$

де Q_T - кількість теплоти, що виділяється додатково до теплоти Джоуля; τ - коефіцієнт Томсона; $\frac{dT}{dx}$ - градієнт температури; q - заряд, який пройшов по провіднику.

Причина явища полягає в тому, що електрони разом з зарядом переносять кінетичну енергію теплового руху: якщо струм тече в напрямку збільшення температури, то зростання енергії електронів відбувається за рахунок теплової енергії провідника і приводить до його охолодження, а якщо напрямок струму співпадає з напрямком зменшенням температури, то провідник нагрівається.

Лабораторна робота №7

ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ ВИХОДУ ЕЛЕКТРОНІВ З МЕТАЛУ ЗА ДОПОМОГОЮ ЯВИЩА ТЕРМОЕЛЕКТРОННОЇ ЕМІСІЇ

Мета роботи: дослідження явища термоелектронної емісії та визначення роботи виходу електронів з вольфраму.

Прилади і матеріали: 1) двохелектродна електронна лампа, 2) випрямляч, 3) потенціометр, 4) вольтметр, 5) міліамперметр, 6) реостат, 7) з'єднувальні провідники.

Перед виконанням лабораторної роботи необхідно вивчити матеріал з § 3.1 .

Виведення розрахункової формули

Для обчислення роботи виходу A потрібно виміряти струм насичення при двох різних парах температур катода T_i і T_j ($i, j=1,2,3$).

$$I_{нас i} = BST_i^2 e^{-\frac{A}{kT_i}},$$

$$I_{нас j} = BST_j^2 e^{-\frac{A}{kT_j}}.$$

Розв'язавши цю систему рівнянь, визначимо роботу виходу

$$A_{ij} = \frac{kT_i T_j}{T_j - T_i} \left(2 \ln \frac{T_i}{T_j} - \ln \frac{I_{нас i}}{I_{нас j}} \right). \quad (1)$$

Температури катода T_i , T_j визначаємо за залежністю його опору R_t від температури розжарювання $R_t = R_0 (1 + \alpha t)$, $T = (t + 273) K$.

$$T = \left(\frac{R_t + R_0}{R_0 \alpha} + 273 \right). \quad (2)$$

Тут R_0 - опір нитки розжарювання при $0^\circ C$; α - температурний

Термоелектронна емісія

коефіцієнт опору металу (для вольфраму $\alpha = 4,2 \cdot 10^{-3} K^{-1}$) За законом Ома

$$R_t = \frac{U_p}{I_p}, \quad (3)$$

де U_p - напруга розжарювання катоду, вимірювана вольтметром V ; I_p - струм розжарювання, вимірюваний амперметром A_p .

Для проведення вимірювань використовується електричне коло, схема якого зображена на рис. 1.

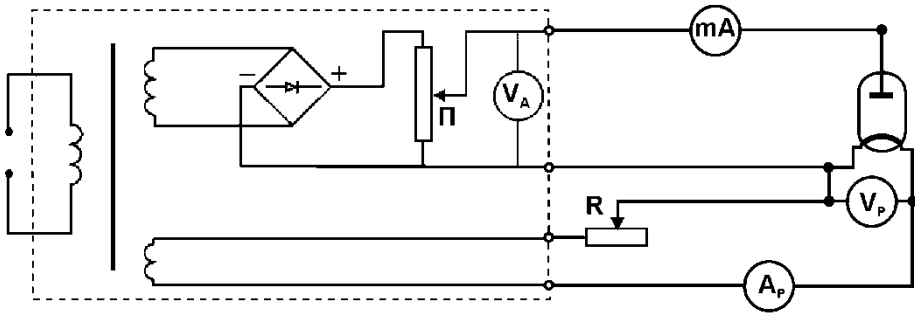


Рис.1

Об'єктом досліджень є вольфрамова нитка, що служить катодом двохелектродної електронної лампи. Подача анодної напруги і нагрівання катоду здійснюється від випрямляючого пристрою типу УІП-2, спрощена електрична схема якого показана на рис. 1 всередині пунктирного прямокутника. Анодна напруга регулюється потенціометром Π і вимірюється вольтметром V_a . Анодний струм вимірюється міліамперметром mA , сила струму розжарювання регулюється реостатом R .

Послідовність виконання роботи

1. Зібрати схему згідно з рис. 1.
2. За допомогою реостата R встановити вказану на установці силу струм I_p і виміряти падіння напруги на катоді U_p . Результати

Термоелектронна емісія

занести в табл.1.

3. Виміряти значення сили анодного струму I_a при різних значеннях анодної напруги U_a на ділянці струму насичення. Результати вимірювань занести в табл.1.

Таблиця 1

	Перший режим катода		Другий режим катода		Третій режим катода	
	I_p, A	U_p, B	I_p, A	U_p, B	I_p, A	U_p, B
№ з/п	U_a, B	I_a, A	U_a, B	I_a, A	U_a, B	I_a, A
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						

4. Вимірювання, вказані в п. 3, провести для всіх значень сили струму розжарення I_p , зазначених на щиті, де розміщені прилади.
5. Побудувати графік залежності $I_a = f(U_a)$ для трьох режимів розжарення катода.
6. За графіком визначити величину струму насичення $I_{нас}$ при даному значенні U_p для трьох режимів розжарення катода.
7. Для кожної пари значень U_p і I_p знайти за формулою (3) R_{ti} ($i=1,2,3$), потім за формулою (2) визначити температуру катоду T_i .

Термоелектронна емісія

Значення величини R_0 вказане на щиті приладів. Результати вимірювань і розрахунків занести в табл.2.

Таблиця 2

№ з/п	I _{насі} , мА	R ₀ , Ом	R _{ті} , Ом	T _i , К
1				
2				
3				

8. За формулою (1) обчислити роботи виходу A_{12} , A_{13} , A_{23} для трьох різних пар значень T_i , $I_{насі}$, а також визначити її середнє значення.

9. Результати обчислень записати в табл.3.

Таблиця 3

i, j	T _i , К	I _{насі} , мА	T _j , К	I _{насі} , мА	A _{ij} , еВ	Δ A _{ij} , еВ	δ A, %
1,2							
1,3							
2,3							
Сер.							

Контрольні питання

1. Що таке робота виходу електрона з металу?
2. Які причини існування роботи виходу?
3. Пояснити явище термоелектронної емісії.
4. Як пояснити існування струму насичення?
5. Записати закон Богуславського-Ленгмюра.

Лабораторна робота № 9

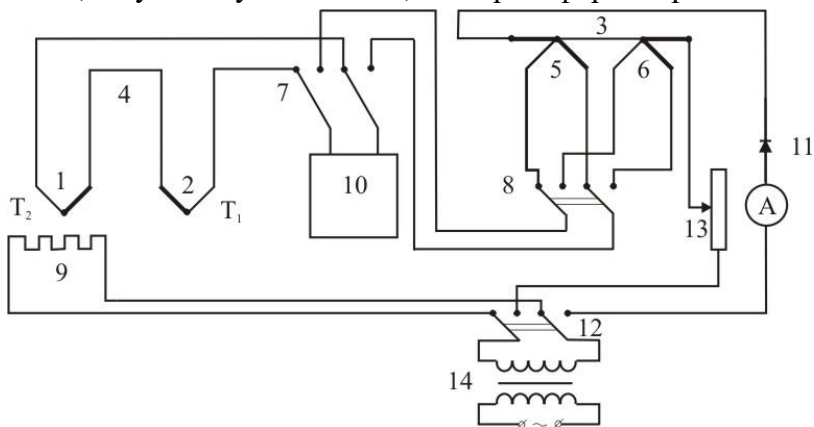
ГРАДУЮВАННЯ ТЕРМОПАРИ І СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЯВИЩА ПЕЛЬТЬЄ

Мета роботи: проградувати термопару і за отриманою кривою градування дослідити явище Пельтьє.

Перед виконанням лабораторної роботи необхідно вивчити матеріал з § 3.2, § 3.4.

Порядок виконання роботи.

1. Перевірити положення вимикачів і автотрансформатора (рис.1): вимикачі 7, 12 у лівому положенні, автотрансформатор на "0".



Термоелектронна емісія

Рис. 1

2. Ознайомитись з порядком роботи цифрового вольтметра (інструкція на робочому місці).
3. Підготувати таблицю градуювання термопари.

Таблиця 1

$t_2, ^\circ C$								
$t_1, ^\circ C$								
$T_2 - T_1, K$								
$\mathcal{E}_T, мВ$								
$\mathcal{E}_{T_0}, мВ$								

4. Увімкнути автотрансформатор (ЛАТР) у розетку змінного струму і, регулюючи ним напругу на нагрівачі, поступово підвищувати температуру.
5. Виміряти і записати $T_{1i}, T_{2i}, \mathcal{E}_{T_i}$ (i - порядковий номер виміру) через кожні 10 градусів від кімнатної температури до $160^\circ C$.
6. Для усіх значень різниці температур $T_2 - T_1$ визначити дійсні значення термо - *ЕРС*. \mathcal{E}_{T_0} взяти з таблиці, що є на робочому місці.
7. Побудувати в одній координатній площині графіки залежностей $\mathcal{E}_T = f(T_2 - T_1)$ суцільною лінією і $\mathcal{E}_{T_0} = f(T_2 - T_1)$ пунктирною лінією.
8. На основі двох одержаних графіків визначити середнє значення абсолютної похибки градуювання термопари.
9. Визначити питому термо - *ЕРС* $\alpha = \frac{\Delta \mathcal{E}_T}{\Delta T}$ для двох крайніх і середньої точки графіка.
10. Встановити ручку ЛАТРа на позначку "О" і вимкнути його з розетки.
11. Увімкнути елемент Пельтьє в коло постійного струму і вста-

Термоелектронна емісія

12. Визначити різницю термо - E_{PC} , і за таблицею, що знаходиться на робочому місці, визначити значення різниці температур контактів.

Таблиця 2

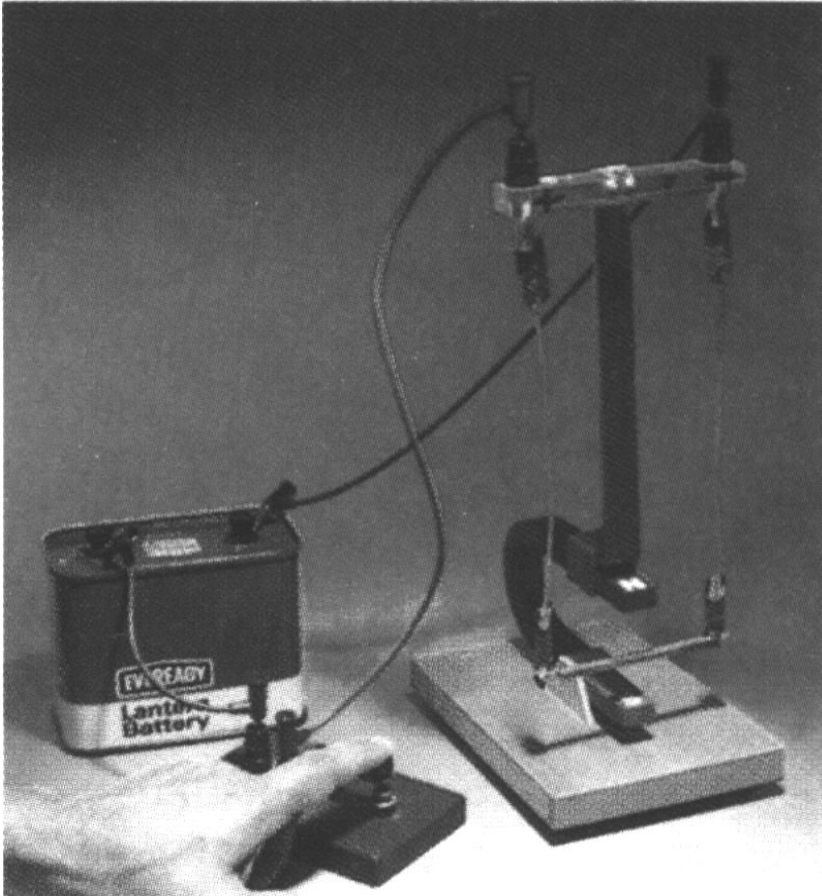
№ з/п	$I,$ A	$\mathcal{E}_{T_1},$ B	$\mathcal{E}_{T_2},$ B	$\Delta \mathcal{E}_T,$ B	$\Delta T,$ K
1					
2					

Контрольні питання

1. Пояснити причину виникнення контактної різниці потенціалів.
2. Сформулювати перший закон Вольта.
3. В чому полягає суть явища Зеебека?
4. Які переваги вимірювання температури за допомогою термопари.
5. В чому суть і причина явища Пельтьє ?
6. В чому суть і причина явища Томпсона ?

Розділ 4

МАГНІТНІ ЯВИЩА



§ 4.1. Магнітне поле

Якщо біля провідника зі струмом помістити магнітну стрілку, то вона намагатиметься розміститись так, щоб її вісь була перпендикулярною до провідника (рис.4.1). Зі зміною

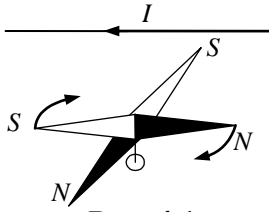


Рис. 4.1

напряму струму змінюється і напрям відхилення магнітної стрілки. Ці досліди підтверджують той факт, що в просторі, який оточує провідник з струмом, існує силове поле, назване магнітним завдяки його дії на магнітну стрілку. Оскільки при вимиканні струму магнітне поле зникає, то це

дає підставу зробити висновок, що причиною магнітного поля є електричний струм. Магнітне поле існує навколо будь-якого провідника зі струмом незалежно від матеріалу провідника, а значить навколо будь-якого, рухомого заряду.

Магнітне поле, на відміну від електричного, не діє на нерухомі електричні заряди. Сила виникає лише тоді коли заряд рухається. Цю дію можна побачити за відхиленням електронного пучка, що протікає між полюсами постійного магніту. Магнітне поле також діє на провідник зі струмом, оскільки струм - це впорядкований рух заряджених частинок. Електричний струм в одному з провідників створює навколо себе магнітне поле, яке діє на струм у другому провіднику. А поле, створене другим струмом діє на перший. Таким чином можна дійти до висновку, що *магнітне поле – це форма матерії, через яку здійснюється взаємодія між рухомими електрично зарядженими частинками.*

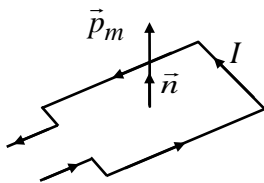


Рис. 4.2

Для дослідження магнітного поля використовується пробний струм, що циркулює в плоскому замкненому контурі дуже малих розмірів (рис. 4.2). На такий контур, вміщений в ту, чи іншу точку, магнітне поле діє з деяким обертальним моментом, намагаючись привести його до рівноважної просто-

Магнітні явища

рової орієнтації. Просторова орієнтація контуру задається позитивним напрямом нормалі до його площини. Цей напрям пов'язаний з напрямом протікання струму в контурі за правилом правого гвинта.

Силовою характеристикою магнітного поля є вектор магнітної індукції \vec{B} . *Магнітна індукція – це векторна величина, модуль якої визначається відношенням максимального оберտального моменту, що діє на контур, до сили струму, що протікає в контурі і до площі контуру.*

$$B = \frac{M_{\max}}{IS}.$$

Добуток сили струму I , що протікає в контурі на його площу S , називається магнітним моментом цього контуру

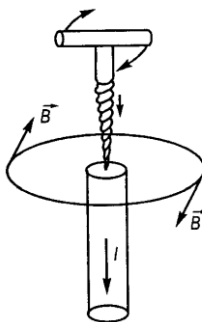
$$\vec{p}_m = IS \vec{n}, \quad p_m = IS.$$

Напрямок вектора магнітної індукції в даній точці співпадає з рівноважним напрямом позитивної нормалі до контуру в цій точці.

Одиницею вимірювання магнітної індукції є тесла (Тл). Тесла – магнітна індукція такого однорідного магнітного поля, у якому на плоский контур зі струмом, що має магнітний момент $1A \cdot m^2$, діє максимальний обертальний момент, що дорівнює $1H \cdot m$.

Для наочного зображення магнітного поля зручно користуватись лініями магнітної індукції.

Лініями магнітної індукції називають криві, дотичні до яких у

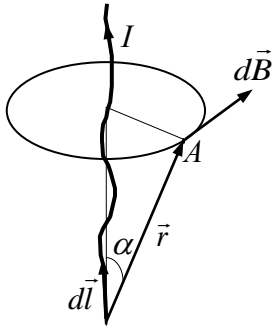


кожній точці збігаються з напрямом вектора \vec{B} у цих точках поля. Лінії магнітної індукції завжди замкнуті й охоплюють провідник зі струмом. Для визначення напрямку ліній магнітної індукції можна скористатись правилом свердлика: якщо свердлик повертати так, щоб його поступальний рух збігався з напрямом струму I , то обертальний рух ручки покаже напрям ліній магнітної індукції (рис. 4.3).

Рис.4.3

§ 4.2. Магнітне поле постійного електричного струму. Закон Біо-Савара-Лапласа

Нехай постійний електричний струм I протікає в провіднику довільної форми. Треба визначити величину і напрям вектора індукції \vec{B} у деякій точці A магнітного поля, створеного цим струмом (рис. 4.4).



Французькі вчені Біо і Савар на основі експериментальних даних прийшли до висновку, що немає можливості визначити вектор індукції від усього провідника із струмом, а можна говорити лише про елемент провідника dl із струмом. Вони також встановили, що величина вектора індукції \vec{B} є пропорційною до сили струму. Лаплас узагальнив результати експериментів Біо і Савара у вигляді диференціального закону, який

Рис.4.4 називається законом *Біо - Савара - Лапласа*:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} I \frac{[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3},$$

де $d\vec{l}$ – вектор, що числово дорівнює довжині dl елемента провідника і збігається за напрямком з напрямком електричного струму, \vec{r} – радіус-вектор, проведений від елемента провідника dl до точки поля A , що розглядається (рис. 4.4), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$ – магнітна стала ; μ - магнітна проникність середовища. Для немагнітних речовин μ – величина стала, близька до одиниці. Для парамагнетиків $\mu > 0$, для діамагнетиків $\mu < 0$. У випадку феромагнетиків μ є функцією напруженості магнітного поля.

Модуль індукції $d\vec{B}$ магнітного поля малого елемента dl

Магнітні явища

провідника зі струмом I :

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}.$$

Напрямок вектора $d\vec{B}$ перпендикулярний до $d\vec{l}$ і \vec{r} , тобто перпендикулярний до площини, в якій вони лежать, і збігається з дотичною до лінії магнітної індукції.

Дослід показує, що для магнітного поля справедливий *принцип суперпозиції*:

магнітна індукція поля, яке створене декількома струмами або рухомими зарядами, дорівнює векторній сумі індукцій магнітних полів, що створені кожним струмом або рухомих зарядом окремо:

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i.$$

Отже, магнітна індукція поля, яке створене у вакуумі струмом I , що тече в провіднику скінченної довжини і довільної форми, дорівнює

$$\vec{B} = \frac{\mu_0\mu I}{4\pi} \int_l \frac{[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}.$$

Крім магнітної індукції \vec{B} для характеристики магнітного поля вводиться також інша величина яка називається *напруженістю магнітного поля*.

Напруженістю магнітного поля \vec{H} називається фізична векторна величина, яка не залежить від магнітних властивостей середовища, у якому це поле існує. Вона характеризує магнітне поле, що його створює макрострум, зумовлений потоком вільних носіїв електричного заряду. Взаємозв'язок між напруженістю магнітного поля і магнітною індукцією

записується так: $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0\mu}$. Для немагнітних речовин вектори \vec{B} і \vec{H} ма-

Магнітні явища

ють однаковий напрям. Закон Біо – Савара - Лапласа для напруженості магнітного поля елемента довжини провідника зі струмом у системі СІ має вигляд:

$$dH = \frac{Idl \sin \alpha}{4\pi r^2},$$

де α – кут між векторами \vec{r} і $d\vec{l}$.

На основі цього закону можна одержати вираз для напруженості магнітного поля безмежно довгого прямолінійного провідника ($l \gg r$) зі струмом I :

$$H = \frac{I}{2\pi r}.$$

А напруженість магнітного поля в центрі колового провідника зі струмом та радіусом R :

$$H = \frac{I}{2R}.$$

§ 4.3. Потік вектора магнітної індукції

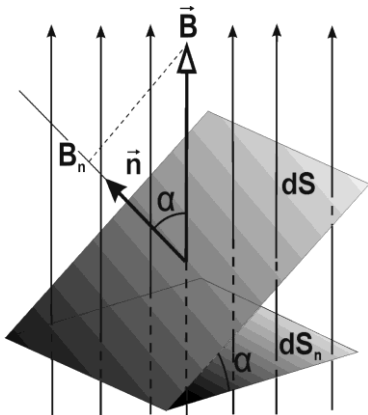


Рис.4.5

Нехай лінії магнітної індукції пронизують якусь невелику площину dS (рис.4.5). Будемо вважати, що в межах площини dS магнітне поле однорідне. Елементарним потоком вектора магнітної індукції або магнітним потоком називається скалярна фізична величина

$$d\Phi_B = BdS \cos \alpha = B_n dS = (\vec{B}, d\vec{S}), \quad [\Phi] = 1 \text{ Вб},$$

де α – кут між зовнішньою нормаллю \vec{n} до вектора \vec{B} на напрям нормалі, $d\vec{S} = dS\vec{n}$ –

вектор, модуль якого дорівнює dS , а напрямок збігається з нормаллю

\vec{n} до площини dS .

Потік вектора магнітної індукції Φ_B через довільну поверхню S дорівнює

$$\Phi_B = \int_S B_n dS = \int_S (\vec{B}, d\vec{S}).$$

Для однорідного поля ($B_n = B = \text{const}$) і плоскої поверхні, розміщеної перпендикулярно до вектора \vec{B} , потік вектора магнітної індукції дорівнює:

$$\Phi_B = BS.$$

§ 4.4. Дія магнітного поля на провідник з електричним струмом. Закон Ампера

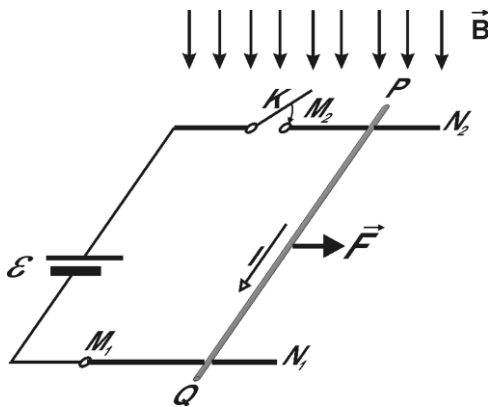


Рис.4.6

Коли в магнітне поле внести провідник зі струмом, то на нього діє сила (сила Ампера). Візьмемо дві рейки M_1N_1 і M_2N_2 і помістимо на них тонкий металевий стержень QP . До рейок приєднаємо джерело з електрорушійною силою \mathcal{E} (рис.4.6).

Нехай лінії індукції магнітного поля \vec{B} напрямлені зверху вниз. Якщо замкнути електричне ко-

ло, то виникає сила Ампера \vec{F}_A , напрямлена вправо, яка зміщує стержень вздовж рейок. Зі зміною напрямку струму змінюється на протилежний і напрям сили Ампера.

Узагальнюючи результати дослідження дії магнітного поля на

Магнітні явища

різні провідники зі струмом, Ампер встановив, що модуль сили \vec{F}_A , яка діє на прямолінійний провідник із струмом в однорідному магнітному полі, є прямо пропорційною до добутку сили струму I на довжину провідника l та на магнітну індукцію B і синус кута між напрямком струму I і вектором \vec{B} :

$$F_A = IBl \sin \alpha,$$

де $\alpha = (d\vec{l} \wedge \vec{B})$.

У випадку неоднорідного поля модуль сила Ампера $d\vec{F}_A$, що діє на елемент провідника довжиною dl , по якому протікає струм I , визначається за формулою

$$dF_A = IBdl \sin \alpha.$$

Напрямок сили \vec{F}_A можна знайти за правилом лівої руки: якщо долоню лівої руки поставити так, щоб у неї входили лінії магнітної індукції, а чотири витягнуті пальці спрямувати в напрямку електричного струму в провіднику, то відставлений на 90° великий палець покаже напрямок сили, що діє на провідник з боку поля.

§ 4.5. Дія магнітного поля на рухомий електричний заряд

На елемент струму $I dl$ у магнітному полі з індукцією \vec{B} діє сила Ампера величиною $dF_A = IBdl \sin \alpha$, де α - кут між векторами $d\vec{l}$ і \vec{B} . Якщо q – заряд частинки, n – кількість частинок в одиниці об'єму, то сила струму $I = jS = qnuS$, де \vec{u} - середня швидкість упорядкованого руху частинок; j – густина струму; S – площа поперечного перерізу провідника. Тоді

$$dF_A = quBnSdl \sin \alpha.$$

Магнітні явища

В об'ємі Sdl міститься кількість частинок $dn = nSdl$. Якщо $q > 0$, тоді кут α між векторами $d\vec{l}$ і \vec{B} буде також кутом між векторами \vec{u} і \vec{B} . Тому силу Ампера можна переписати у вигляді

$$dF_A = quBdn \sin \alpha.$$

Сила, що діє на одну заряджену частинку (сила Лоренца)

$$F_L = \frac{dF_A}{dn} = quB \sin \alpha.$$

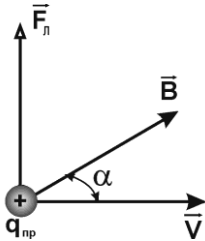


Рис.4.7

У векторній формі для зарядів $q > 0$ дістанемо $\vec{F}_L = q_+[\vec{u}, \vec{B}]$ і $q < 0$ $\vec{F}_L = q_-[\vec{B}, \vec{u}]$. Сила Лоренца перпендикулярна до площини, в якій лежать вектори \vec{u} і \vec{B} . Напрямок сили Лоренца треба визначати за правилом векторного добутку (рис.4.7).

Оскільки $\vec{F}_L \perp \vec{u}$, то сила Лоренца не виконує роботу, а тільки змінює напрям руху частинок, і за характером їхнього відхилення можна визначити знак і величину питомого заряду частинки $\frac{q}{m}$.

§ 4.6. Явище електромагнітної індукції

Англійський вчений Фарадей відкрив електричну дію магнітного поля. Він експериментально довів, що в електропровідному контурі через зміну магнітного потоку виникає електрорушійна сила, яка зумовлює в ньому виникнення електричного струму. Це явище Фарадей назвав електромагнітною індукцією, а струм, що при цьому виникає – індукційним. Величина електрорушійної сили індукції є пропорційною швидкості зміни магнітного потоку, тобто

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

Магнітні явища

Величина \mathcal{E}_{PC} індукції залежить не просто від зміни магнітного потоку через поверхню, обмежену контуром, а від швидкості зміни магнітного потоку через цю поверхню. Знак мінус є математичним виразом закону Ленца, згідно з яким *індукційний струм, що виникає в замкнутому провідному контурі, має такий напрям, при якому він своїм власним магнітним полем намагається протидіяти зміні магнітного потоку, який є причиною цього струму.*

Якщо \mathcal{E}_{PC} індукції виникає при зміні магнітного потоку, який пронизує котушку з N витків, то її величина буде відповідно в N разів більшою, ніж для одного витка, тобто

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d\psi}{dt},$$

де ψ - потокозчеплення.

Індукційний струм виникає не лише у лінійних провідниках, але і у суцільних масивних провідниках, які знаходяться у змінному магнітному полі. Ці струми виявляються замкненими всередині провідника і тому називаються *вихровими* або струмами Фуко.

Величина вихрового струму

$$I_{вихр} = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi_B}{dt},$$

де R – опір кола вихрового струму. У масивних провідниках значення R мале, і вихрові струми можуть досягати великої сили навіть у магнітних полях, які не дуже швидко змінюються.

§ 4.7. Явище самоіндукції. Індуктивність контуру

При будь якій зміні сили струму в контурі змінюється і магнітний

Магнітні явища

потік, який пронизує контур. Зміна магнітного потоку викликає появу індукційного електричного поля, в якому перебуває контур. Це індукційне електричне поле буде діяти на електрони в контурі, перешкоджаючи, відповідно до закону Ленца, зміні струму в ньому. Якщо сила струму збільшується, індукційне електричне поле буде гальмувати його зростання; при зменшенні сили струму воно буде підтримувати струм. Можна сказати, що при зміні сили струму в контурі в ньому виникає електрорушійна сила індукції, яка перешкоджає цій зміні. Це явище дістало назву самоіндукції. Магнітний потік через контур є пропорційним величині магнітної індукції: $\Phi_B \sim B$. За законом Біо-Савара-Лапласа $B \sim I$. Отже, магнітний потік через поверхню, обмежену контуром, є пропорційним величині струму в контурі, тобто

$$\Phi_B = LI,$$

де L – коефіцієнт пропорційності, який називається індуктивністю даного контуру.

Індуктивність контуру – це фізична величина, яка вимірюється магнітним потоком через поверхню, обмежену контуром, якщо в цьому контурі проходить одиничний струм.

За одиницю індуктивності, що називається генрі ($Gн$), приймають індуктивність контуру, в якому сила струму $1A$ створює магнітний потік $1 Bб$.

Якщо форма контуру незмінна і відносна магнітна проникність μ середовища не змінюється ($L = \text{const}$), тоді відповідно до закону Фарадея величина $\mathcal{E}PC$ самоіндукції дорівнює:

$$\mathcal{E}_c = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (4.1)$$

З цього співвідношення можна визначити індуктивність як коефіцієнт пропорційності між швидкістю зміни струму в контурі і $\mathcal{E}PC$ самоіндукції, яка виникає внаслідок зміни струму. Відповідно до (4.1) зміна струму із швидкістю $1 A/c$ в контурі з індукцією $1 Gн$ приводить до

Магнітні явища

виникнення EPC самоіндукції $\mathcal{E}_c = 1$ В. Знак “-“ у формулі (4.1) вказує на те, що EPC самоіндукції завжди викликає сповільнення будь-якої зміни струму в колі. Отже, контур з індуктивністю набуває своєї інертності, яка проявляється в тому, що будь-яка зміна струму в контурі гальмується тим більше, чим більшою є його індуктивність.

Індуктивність контуру залежить від його форми, розмірів і магнітної проникності середовища. Велику індуктивність мають котушки з великою кількістю витків і осердям із феромагнітного матеріалу – соленоїди. Індуктивність довгого соленоїда визначається за формулою:

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l} = \mu\mu_0 n^2 V, \quad (4.2)$$

де μ_0 – магнітна стала; μ - відносна магнітна проникність речовини осердя, в якій зосереджене магнітне поле; n – кількість витків на одиницю довжини соленоїда; $n = \frac{N}{l}$; S - площа, обмежена одним витком; V - об'єм соленоїда.

Лабораторна робота № 10

ВИВЧЕННЯ ЯВИЩА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

Мета роботи: перевірити закон електромагнітної індукції на підставі результатів незалежного вимірювання зміни потокозчеплення котушки та елементарного заряду, який протікає в ній.

Прилади та обладнання: 1) джерело напруги U , 2) вольтметр, 3) амперметр, 4) гальванометр, 5) котушки, 6) конденсатор, 7) шунт, 8) додаткові опори, 9) перемикачі, 10) з'єднувальні провідники.

Перед виконанням лабораторної роботи необхідно вивчити теоретичний матеріал з § 4.7.

Теоретичні відомості

Відповідно до закону електромагнітної індукції Фарадея (4.1) електрорушійна сила, яка виникає в провідному контурі, є пропорційною до швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує цей контур.

Індукційний струм у котушці, зумовлений ЕРС індукції:

$$I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = -\frac{N}{R} \frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{1}{R} \frac{d\psi}{dt},$$

де ψ - потокозчеплення котушки.

Підставивши в ліву частину цієї формули вираз для струм $I = \frac{dq}{dt}$,

отримаємо:

$$dq = -\frac{d\psi}{R}.$$

Проінтегруємо ліву і праву частини цього виразу:

Магнітні явища

$$\int_0^q dq = -\frac{1}{R} \int_{\psi_1}^{\psi_2} d\psi,$$

де ψ_1 і ψ_2 - початкове і кінцеве значення потокозчеплення котушки. Після інтегрування отримаємо:

$$q = \frac{1}{R} (\psi_1 - \psi_2). \quad (1)$$

У цій роботі явище електромагнітної індукції вивчають, перевіряючи співвідношення (1) на підставі незалежного дослідного визначення зміни потокозчеплення $\psi_1 - \psi_2$, а також вимірювання електричного заряду, що протікає у такому разі в контурі за заданого опору контура R . Схема електричного кола цієї лабораторної роботи зображена на рис. 1.

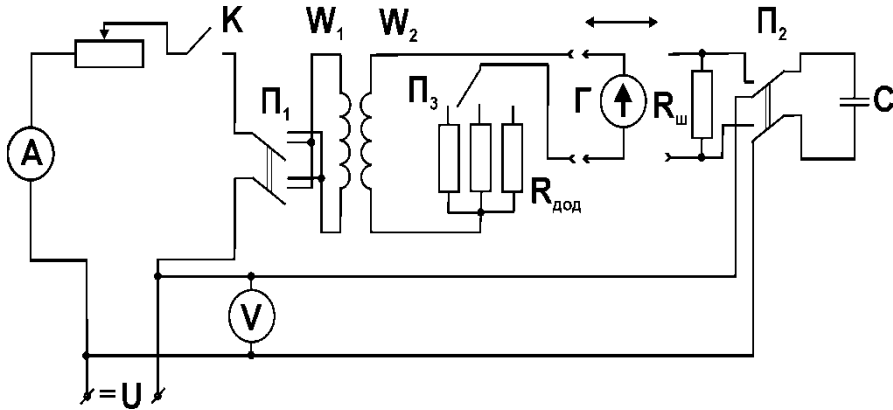


Рис.1

Величина електричного заряду q , що протікає в котушці при зміні потокозчеплення на величину $\psi_1 - \psi_2$, визначається за допомогою балістичного гальванометра Γ , який необхідно попередньо проградувати, тобто визначити ціну поділки його шкали.

Для балістичного гальванометра максимальне відхилення

Магнітні явища

світлового зайчика на шкалі n_{max} пропорційне до заряду q , що протікає через гальванометр:

$$q = k n_{max}, \quad (2)$$

де k – ціна поділки шкали гальванометра.

Ціна поділки шкали балістичного гальванометра Γ визначається так:

а) зарядивши конденсатор заданої електроємності C до напруги U (напруга вимірюється вольтметром V), визначаємо заряд q_C , наданий конденсатору за формулою

$$q_C = CU, \quad (3)$$

б) розряджаючи конденсатор C через балістичний гальванометр Γ , визначаємо максимальну величину відхилення світлового зайчика на шкалі гальванометра n'_{max} .

Оскільки гальванометр Γ при цьому шунтується опором $R_{ш}$, фактична величина заряду, який протікає через балістичний гальванометр

$$q_\Gamma = \frac{q_C}{1 + \frac{R_\Gamma}{R_{ш}}},$$

або з врахуванням (3)

$$q_\Gamma = \frac{CU}{1 + \frac{R_\Gamma}{R_{ш}}}.$$

Оскільки

$$q_\Gamma = kn'_{max},$$

то ціна поділки шкали балістичного гальванометра

$$k = \frac{CU}{(1 + \frac{R_\Gamma}{R_{ш}})n'_{max}}. \quad (4)$$

Магнітні явища

Зміна магнітного потоку у вимірювальній котушці W_2 досягається за рахунок зміни напрямку струму I через первинну котушку W_1 (рис.1). Обидві котушки намотані на спільний циліндричний каркас. Зміна повного магнітного потоку у вимірювальній котушці

$$\psi_1 - \psi_2 = 2 N_2 B S, \quad (5)$$

де N_2 – число витків вторинної котушки; B – індукція магнітного поля всередині котушок; S – площа перерізу котушок ($S = \frac{\pi d^2}{4}$; d – діаметр котушок). Індукція магнітного поля в первинній котушці визначається за формулою $B = \mu_0 \frac{N_1}{l} I$, де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; N_1 – число витків у первинній котушці l – довжина первинної котушки. Підставивши цей вираз у (4) отримаємо:

$$\psi_1 - \psi_2 = 2\mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} I S. \quad (6)$$

Опір R контуру вимірювальної котушки складається з послідовно з'єднаних опорів: вимірювальної котушки R_2 , додаткового опору $R_{\text{доп}}$ і балістичного гальванометра R_r :

$$R = R_2 + R_{\text{доп}} + R_r. \quad (7)$$

Послідовність виконання роботи

1. Переключити гальванометр до розетки “Вимір”. Використовуючи перемикач $П_1$ і, замкнувши вимикач K , пропустити струм через первинну котушку W_1 . Величину струму I визначити за допомогою амперметра A .
2. Перемикачем $П_1$ змінити напрям струму в первинній котушці на зворотний. На шкалі балістичного гальванометра визначити максимальне відхилення світлового зайчика n_{max} . Результати вимірювань записати в табл. 1.

Магнітні явища

3. Використовуючи перемикач Π_2 , зарядити конденсатор C .
4. Вольтметром V виміряти напругу U - на обкладках конденсатора.
5. Використовуючи перемикач Π_2 , розрядити конденсатор C через балістичний гальванометр Γ , попередньо під'єднавши гальванометр до розетки "Град". За шкалою балістичного гальванометра визначити максимальне відхилення світлового зайчика n'_{\max} . Вимірювання, вказані в п.п. 3, 4, виконати тричі.
6. Обчислити ціну поділки k , шкали гальванометра за формулою (4).
Результати вимірювань і обчислень записати в табл. 1.

Таблиця 1

№ з/п	$n_{\max,}$ <i>под.</i>	$C,$ Φ	$U,$ B	$R_2,$ $Ом$	$R_{ш},$ $Ом$	$n'_{\max},$ <i>под.</i>	$k,$ $Кл/под$
1							
2							
3							
Сер.							

7. За формулою (2) обчислити значення q і результати обчислень записати в табл. 3.
8. Записати в табл.2 значення опорів R_2 , $R_{\text{дод}}$, R , числа витків у первинній і вторинній котушках N_1 і N_2 , довжину l і діаметр d первинної котушки.

Таблиця 2

$I,$ A	$R_2,$ $Ом$	$R_{\text{дод}},$ $Ом$	$R,$ $Ом$	N_1	N_2	$l,$ $м$	$d,$ $м$	$S,$ $м^2$

Магнітні явища

9. За формулами (6) і (7), відповідно, обчислити значення величин $\psi_1 - \psi_2$ і R , визначити величину $\frac{\psi_1 - \psi_2}{R}$. Результати обчислень записати в табл. 3. На основі отриманих результатів перевірити для кожного з трьох вимірювань правильність співвідношення (1).

Таблиця 3

№ з/п	q , Кл	$\psi_1 - \psi_2$, Вб	$\frac{\psi_1 - \psi_2}{R}$, Вб/Ом
1			
2			
3			

Контрольні питання

1. У чому полягає суть явища електромагнітної індукції.
2. Записати закон Фарадея.
3. Сформулювати правило Ленца.
4. Від чого залежить індукція магнітного поля В всередині довгої котушки ?
5. Вивести формулу для обчислення заряду, що протікає в контурі виміральної котушки при зміні напрямку струму в первинній котушці.

Лабораторна робота № 11

ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ

Мета роботи: ознайомлення з елементами земного магнетизму; визначення горизонтальної і вертикальної складових та магнітного нахилу індукції магнітного поля Землі.

Прилади і матеріали: 1) земний індуктор, 2) мілівеберметр або балістичний гальванометр 3) з'днувальні провідники.

Перед виконанням лабораторної роботи необхідно вивчити теоретичний матеріал з § 4.1, § 4.2, § 4.3, § 4.6.

Теоретичні відомості

Спрощено можна вважати, що Земля є однорідно намагніченою кулею, що створює симетричне магнітне поле, лінії індукції якого

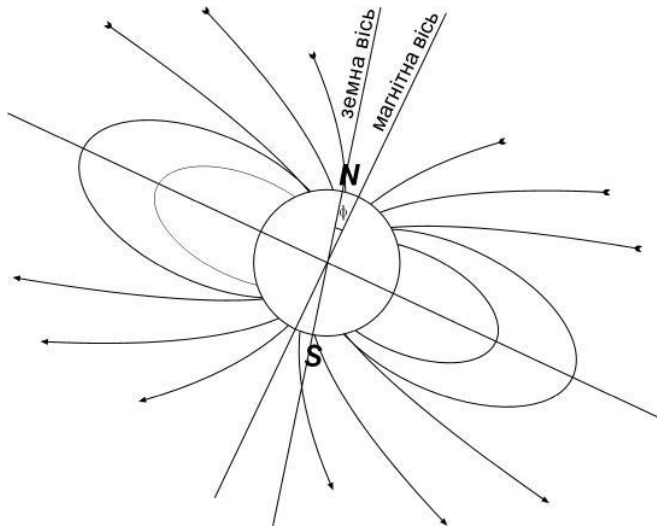


Рис. 1

виходять з Південної півкулі, огинають Земну кулю і входять у Північну півкулю (рис.1). Точка сходження ліній індукції у північній півкулі називається *південним магнітним полюсом* Землі. У південній півкулі точка сходження ліній індукції називається *північним магнітним полюсом* Землі. Точки сход-

Магнітні явища

ження ліній індукції земного магнітного поля лежать не на самій поверхні Землі, а під нею. Лінія, що з'єднує магнітні полюси Землі називається *магнітною віссю*. Магнітна вісь Землі нахилена відносно осі обертання Землі на кут біля $11^{\circ}30'$. Оскільки магнітні і географічні полюси Землі не співпадають, то магнітна стрілка вказує напрямок північ – південь лише приблизно. Вертикальну площину, у якій встановлюється магнітна стрілка, називають *площиною магнітного меридіана* в даному місці, а пряму, по якій ця площина перетинається з горизонтальною площиною, називають *магнітним меридіаном*.

Кут між напрямками магнітного і географічного меридіанів називають *магнітним схиленням* (φ) (рис.2).

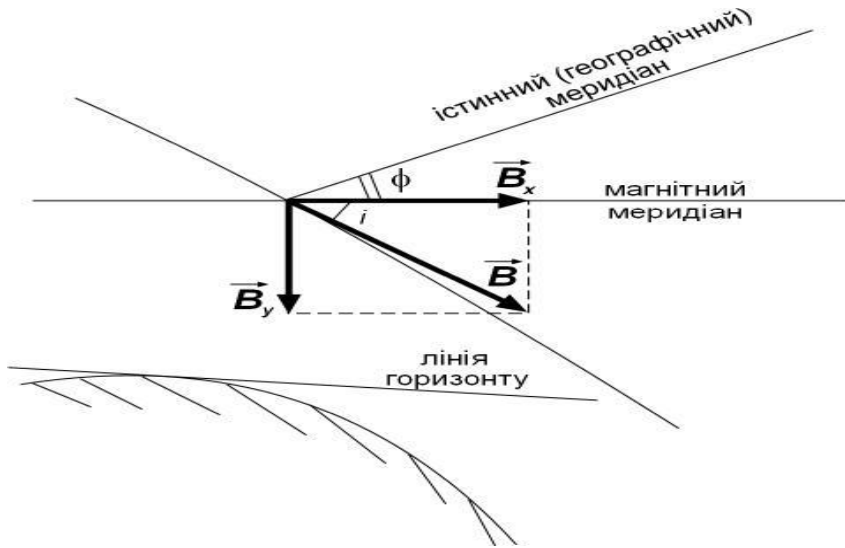


Рис. 2.

Магнітне схилення вимірюється у градусах, вважається східним або додатнім, якщо північний кінець магнітної стрілки відхиляється від географічного меридіана на схід, а якщо на захід - то західним або від'ємним. Компас вказує напрямок магнітного меридіану, схилення дає поправку до показів компаса, яку необхідно внести, щоб знайти істинний напрямок північ - південь. Магнітне схилення визначають за топографічними або спеціальними картами.

Магнітні явища

З рис.1 видно, що лінії індукції земного магнітного поля не паралельні до поверхні Землі. Кут між площиною горизонту в даній точці і напрямом вектора магнітної індукції \vec{B} називається *магнітним нахилом* (i) (рис.2). У Північній півкулі північний кінець магнітної стрілки нахилений донизу. Такий нахил вважається додатнім. У Південній півкулі північний кінець магнітної стрілки піднятий догори, а опущений південний. Такий нахил вважається від'ємним. Біля магнітних полюсів Землі вільно підвішена за центр ваги магнітна стрілка займе вертикальне положення, тобто магнітний нахил $i = 90^\circ$. На магнітному екваторі стрілка займе горизонтальне положення $i = 0^\circ$. Величини магнітного схилення і магнітного нахилу в різних місцях Землі різні.

Магнітне схилення і магнітний нахил (кути φ та i) повністю визначають напрямок вектора магнітної індукції у даному місці. Для знаходження числового значення \vec{B} достатньо знати одну з його складових \vec{B}_x або \vec{B}_y . На практиці зручніше безпосередньо вимірювати горизонтальну складову земного магнітного поля. Три величини: схилення, нахил і числове значення горизонтальної складової магнітної індукції, які повністю характеризують за величиною і напрямком магнітне поле Землі у даному місці, називають *елементами земного магнітного поля*.

Максимальна напруженість магнітного поля Землі на магнітних полюсах невелика - біля 55 А/м. На магнітному екваторі напруженість приблизно рівна 30 А/м.

Магнітне поле Землі умовно поділяють на постійне (головне) поле і змінне поле.

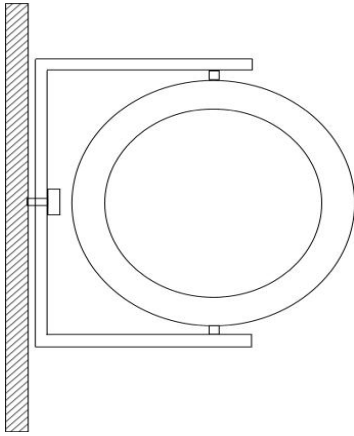
Постійне магнітне поле створюється магнетизмом самого тіла Землі, є достатньо стійким і зазнає повільних (вікових) змін. Первинним джерелом магнетизму є замкнуті системи електричних струмів у ядрі Землі, які породжують первинне (головне) магнітне поле .

Змінне магнітне поле створюється електричними струмами, що протікають над поверхнею Землі і в земній корі. Первинною причиною

змінного магнітного поля є електричні струми, що протікають у верхніх шарах атмосфери і у навколосезному космічному просторі під дією корпускулярної сонячної радіації.

Експериментальна частина

У даній роботі вертикальну \vec{B}_y і горизонтальну \vec{B}_x складові індукції магнітного поля Землі визначають за допомогою земного індуктора



(рис.3). Земний індуктор - це плоска дротяна котушка великого радіуса з великою кількістю витків дроту, що може вільно обертатись навколо осі, яка проходить через один з її діаметрів. При повороті індуктора у магнітному полі Землі внаслідок явища електромагнітної індукції на його затискачах виникає ЕРС індукції і у витках протікає індукційний електричний струм. До затискачів земного індуктора під'єднують мілівеберметр або балістичний гальванометр.

Рис. 3

Нехай вісь індуктора орієнтована горизонтально в площині магнітного меридіана, площина витків теж горизонтальна. При повороті індуктора на 180° його витки будуть перетинати лише вертикальну складову \vec{B}_y індукції магнітного поля Землі.

Зміна магнітного потоку, що пронизує витки:

$$\Delta\Phi_y = \Phi_y - (-\Phi_y) = 2\Phi_y = 2B_y S,$$

де S – площа, що охоплюється витками індуктора: $S = \frac{1}{4}\pi d^2$, d – діаметр витка.

У випадку коли зміна магнітного потоку $\Delta\Phi_y$ безпосередньо реєструється *мілівеберметром*, під'єднаним до затискачів індуктора, вертикальна складова індукції визначається за виразом:

Магнітні явища

$$B_y = \frac{\Delta\Phi_y}{2S} = \frac{2\Delta\Phi_y}{\pi d^2}. \quad (1)$$

Аналогічно можна визначити горизонтальну складову індукції магнітного поля \vec{B}_x , якщо встановити вісь індуктора вертикально, а початкове положення площини витків перпендикулярне до площини магнітного меридіана:

$$B_x = \frac{\Delta\Phi_x}{2S} = \frac{2\Delta\Phi_x}{\pi d^2}. \quad (2)$$

При використанні *балістичного гальванометра* замість мілівеберметра при зміні магнітного потоку через площину витків індуктора через гальванометр пройде деяка кількість електрики q і рамка гальванометра повернеться на деякий кут, причому:

$$q = \frac{\Delta\Phi}{R}, \quad (3)$$

де R – опір витків.

З формули (3) $\Delta\Phi = qR$, але $q = \alpha\beta$, де α - чутливість гальванометра; β - балістичне відхилення (максимальне відхилення світлового зайчика у міліметрах) при швидкому повороті індуктора на 180° . Тоді:

$$\Delta\Phi = \alpha R \beta = C\beta, \quad (4)$$

де C - постійна приладу (її значення вказане на робочому місці) у $Vб/мм$.

Підставивши значення зміни потоку (4) у (1) і (2), одержимо вирази для складових магнітної індукції у випадку, коли до затискачів індуктора приєднаний мілівеберметр:

$$B_y = \frac{2C\beta_y}{\pi d^2}, \quad (5)$$

$$B_x = \frac{2C\beta_x}{\pi d^2}. \quad (6)$$

Магнітні явища

Визначивши складові вектора індукції магнітного поля Землі \vec{B}_y і \vec{B}_x , визначаємо модуль вектора магнітної індукції:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}, \quad (7)$$

а також магнітний нахил вектора магнітної індукції:

$$i = \arctg\left(\frac{B_y}{B_x}\right). \quad (8).$$

Послідовність виконання роботи

1. Під'єднати вимірювальний прилад до затискачів індуктора.
2. Встановити вісь обертання індуктора горизонтально в площині магнітного меридіана, а площину витків – перпендикулярно до площини магнітного меридіана.
3. Швидко повернувши витки індуктора на 180° , потрібно визначити за допомогою мілівеберметра максимальне значення зміни магнітного потоку $\Delta\Phi_y$ або гальванометром - максимальне значення балістичного відхилення β_y .
4. Повторити виміри 3 - 5 разів, повертаючи кожного разу прилад у нульове положення. Результати вимірів занести у табл.1а (мілівеберметр) або у табл. 1б (балістичний гальванометр).
5. Встановити вісь обертання індуктора вертикально, а площину витків – перпендикулярно до площини магнітного меридіана. Повторити виконання п.п. 3, 4 для визначення $\Delta\Phi_x$ або β_x . Результати вимірів занести у табл. 1а або табл.1б.
6. Виміряти діаметр витків d котушки індуктора між серединами кола обмоток 3 - 5 разів. Результати вимірів занести у табл.1б.

Магнітні явища

7. Обчислити середні значення $\Delta\Phi_x$, $\Delta\Phi_y$ і d або β_x , β_y і d . У випадку використання гальванометра занести у табл. 1б постійну приладу C (її значення вказане на робочому місці).
8. Розрахувати значення \vec{B}_y і \vec{B}_x за формулами (1) і (2) при використанні мілівеберметра або за формулами (5) і (6) при використанні гальванометра.
9. Використовуючи формули (7) і (8) обчислити модуль вектора індукції магнітного поля Землі B і магнітний нахил i .
10. Розрахувати абсолютні та відносні похибки вимірювань.

Таблиця 1а

№ з/п	$\Delta\Phi_y$, мВб	$\Delta\Phi_x$, мВб	D , м	B_y , Тл	ΔB_y , Тл	B_x , Тл	ΔB_x , Тл	B , Тл	ΔB , Тл	δB , %	i
1											
2											
3											
4											
5											
Сер.											

Таблиця 1б

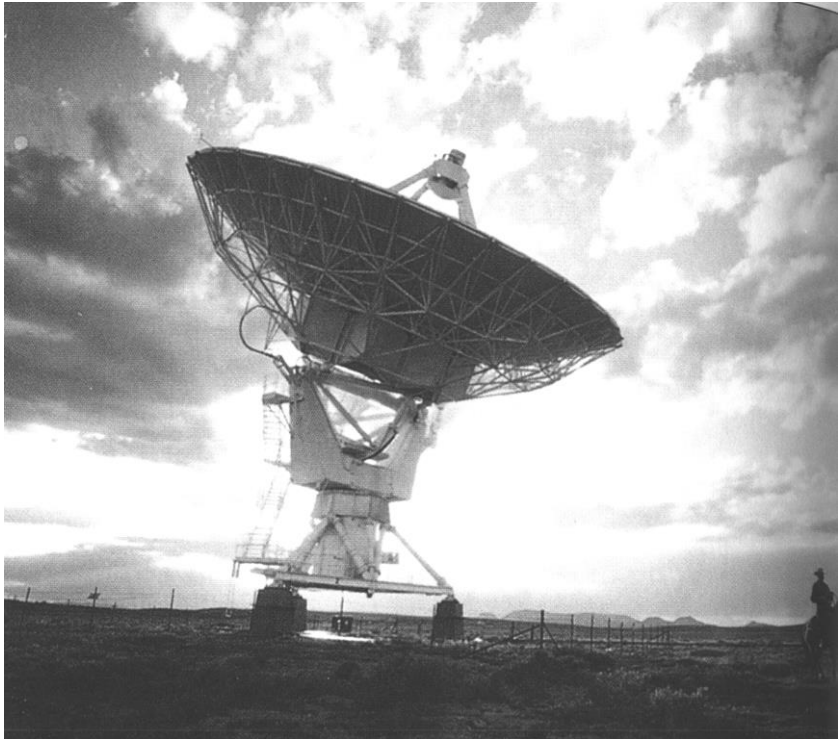
№ з/п	β_y	β_x	C , $\frac{Вб}{под}$	d , м	B_y , Тл	ΔB_y , Тл	B_x , Тл	ΔB_x , Тл	B , Тл	ΔB , Тл	δB , %	i
1												
2												
3												
4												
5												
Сер.												

Контрольні питання

1. Дати означення вектора індукції магнітного поля і магнітного потоку. Які одиниці вимірювання індукції магнітного поля і магнітного потоку в системі СІ?
2. Сформулювати і записати основний закон електромагнітної індукції.
3. Що таке площина магнітного меридіану і магнітний меридіан?
4. Що таке магнітне схилення і магнітний нахил?
5. Вивести робочу формулу для знаходження складових вектора магнітної індукції.

Розділ 5

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ



§ 5.1. Вільні електромагнітні коливання в коливальному контурі

Розглянемо електричне коло, що складається з послідовно з'єднаних конденсатора ємністю C , котушки індуктивності L , активного опору R . Таке коло називають коливальним контуром (рис.5.1).

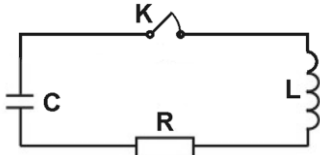


Рис. 5.1

Якщо попередньо заряджений конденсатор замкнути на котушку індуктивності, то в контурі виникне струм, зумовлений розрядженням конденсатора.

Зростаюче магнітне поле цього струму спричинить появу E_{PC} самоіндукції, яка протягом першої половини періоду коливань сповільнює швидкість розряду. Коли конденсатор розрядиться, сила струму, зумовленого розрядом, має зменшитись до нуля. Проте E_{PC} самоіндукції в котушці, змінивши свій напрям відповідно до правила Ленца, буде підтримувати попередній напрям струму, внаслідок чого конденсатор перезаряджається. Перезарядження конденсатора здійснюється за рахунок енергії магнітного поля котушки індуктивності. Таким чином відбувається перша половина періоду електромагнітних коливань, після чого процес продовжується у зворотному напрямі і коливальна система приходить у свій початковий стан. Періодичне повторення описаного процесу є коливальним розрядом конденсатора.

Під час коливань періодично змінюється заряд q на обкладках конденсатора, напруга U на конденсаторі й сила струму I , що протікає через індуктивність. Ці коливання супроводжуються взаємним перетворенням енергії електричного й магнітного полів. Протікання струму через активний опір спричинюється до його нагрівання, що призводить до втрати початкового запасу енергії. Внаслідок цього амплітуда коливань, напруги й сили струму в контурі поступово зменшується. При

Електромагнітні коливання

збільшенні активного опору контуру R швидкість згасання коливань збільшується і при достатньо великому (критичному) опорі $R_{кр}$ коливання в контурі взагалі не виникають. У цьому випадку відбувається аперіодичний розряд конденсатора.

Виведемо рівняння, що описує вільні коливання в даному контурі. Нехай у початковий момент часу при $t_0 = 0$ заряд на обкладках конденсатора дорівнює q . Заряд q і напруга U на конденсаторі пов'язані співвідношенням $q = CU$, струм у контурі

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

Замикання контуру вимикачем призводить до виникнення струму, який спричинює появу в котушці EPC самоіндукції

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{dI}{dt}.$$

Відповідно до другого правила Кірхгофа сума напруг у будь-якому замкнутому контурі дорівнює сумі EPC , що діють у цьому контурі. Застосувавши це правило для коливального контуру, зображеного на рис. 5.1, отримаємо вираз

$$-L \frac{dI}{dt} = IR + \frac{q}{C} \quad \text{або} \quad L \frac{dI}{dt} + IR + \frac{q}{C} = 0. \quad (5.1)$$

Оскільки

$$\frac{dI}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2},$$

та розділивши (5.1) на L , отримаємо

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0. \quad (5.2)$$

Введемо позначення

$$2\delta = \frac{R}{L}; \quad \omega_0^2 = \frac{1}{CL}. \quad (5.3)$$

Рівняння (5.2) набуде вигляду

Електромагнітні коливання

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\delta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0.$$

Це диференціальне рівняння згасаючих електромагнітних коливань. З теорії коливань відомо, що розв'язок рівняння такого вигляду при умові $\delta^2 < \omega_0^2$, тобто

$$\frac{R^2}{4L^2} < \frac{1}{CL},$$

має вигляд

$$q = q_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \alpha),$$

де $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$, ω_0 - власна частота коливань при $R \rightarrow 0$, δ - коефіцієнт згасання.

Сила струму в коливальному контурі змінюється за законом

$$I = \frac{dq}{dt} = q_0 e^{-\delta t} \omega \sin(\omega t + \alpha) = I_0 \cos(\omega t + \varphi),$$

де $\varphi = \alpha + \pi/2$.

Враховуючи позначення (5.3), знаходимо вираз для ω :

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{CL} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Таким чином, частота згасаючих коливань є меншою за власну частоту ω_0 . Період коливань

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{CL} - \frac{R^2}{4L^2}}}. \quad (5.4)$$

При збільшенні коефіцієнта згасання δ період коливань T зростає, прямує до безмежності при $\delta \rightarrow \omega_0$. Це означає, що коливальний процес переходить в аперіодичний. Для контуру з певними значеннями L і C аперіодичний процес, як видно з останньої формули, здійснюється

Електромагнітні коливання

при $R \geq R_{кр}$.

Значення критичного опору $R_{кр}$ визначається з умови

$$\frac{R_{кр}^2}{4L^2} = \frac{1}{CL},$$

Звідки (5.5)

$$R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Згасання коливань прийнято характеризувати логарифмічним декрементом згасання

$$\lambda = \ln \frac{A_1}{A_2} = \delta T, \quad (5.6)$$

де A_1, A_2 - амплітуди коливань певної величини (q, U або I) які відповідають моментам часу, що відрізняються на період.

У багатьох випадках коливний процес доцільніше досліджувати, вивчивши безпосередньо залежність U від I . Криву, що зображає цю залежність, називають фазовою кривою. Ця крива є результатом додавання двох взаємно перпендикулярних коливань напруги U і струму I зміщених за фазою на $\frac{\pi}{2}$. При відсутності згасання в контурі фазова крива $U = f(I)$ має форму еліпса.

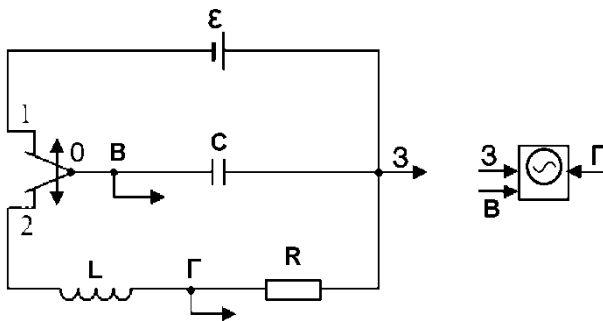


Рис. 5.2

При згасанні коливань в контурі їх амплітуда зменшується з часом, що призводить до складнішої форми фазової кривої - спіралі, яка скручується. Цю спіраль можна спостерігати безпосередньо на екрані осцилографа якщо під'єднати його до контуру

Електромагнітні коливання

(рис.5.2). Вільні згасаючі коливання досліджують за допомогою пристрою, схема якого показана на рис. 5.2. Конденсатор за допомогою реле автоматично під'єднується або до джерела постійної напруги \mathcal{E} (конденсатор заряджається), або до індуктивності L та опору R (розряд конденсатора через контур). Таке перемикання відбувається з частотою 50 Гц і досягається тим, що при зміні напрямку струму через електромагнітне реле його яркір-перемикач притягається по черзі до одного або до другого полюсу, з'єднуючи по чергово клему 0 з клемми 1 і 2.

Спостереження проводять на екрані осцилографа клемми якого, позначені буквами „В”, „Г”, „З”, з'єднані провідниками з відповідними точками контуру, позначеними таким ж буквами.

Якщо ввімкнути генератор часової розгортки осцилографа й синхронізувати його частоту з частотою перемикання реле, то на екрані спостерігатиметься картина, зображена на рис. 5.3.

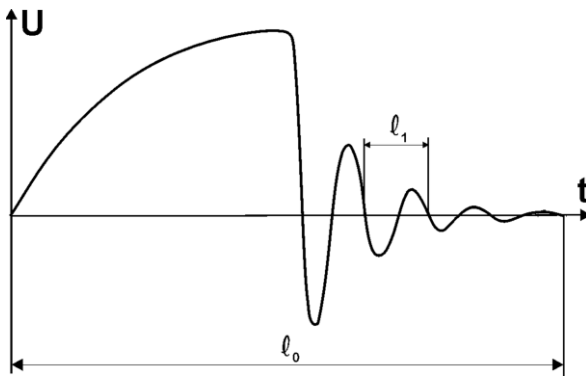


Рис. 5.3

Тут ℓ_0 відповідає 0,02 с, тобто періоду T коливань струму в мережі, до якої під'єднане реле. Період згасаючих коливань

$$T_{зг} = \frac{0,02\ell_1}{\ell_0}, \quad (5.7)$$

де ℓ_0 , ℓ_1 - інтервали на осцилограмі, показаній на рис. 5.3. Для більшої точності слід вимірювати інтервал ℓ , що містить n інтервалів ℓ_1 , тоді

$$\ell_1 = \frac{\ell}{n}.$$

Електромагнітні коливання

Щоб отримати фазову криву $U(I)$, тобто залежність напруги на конденсаторі від струму в контурі, досить вимкнути генератор розгортки осцилографа. При цьому на вертикально відхиляючі пластини осцилографа подаватиметься, як і раніше, напруга з конденсатора, а на горизонтально відхиляючі - напруга з активного опору R . Оскільки на активному опорі напруга у фазі з струмом, то цим самим дістаємо залежність напруги на конденсаторі від струму в контурі (рис.5.4).

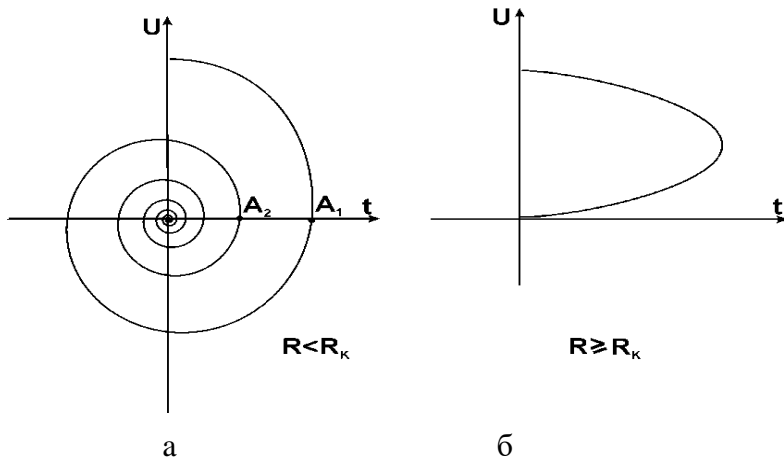


Рис. 5.4

§ 5.2. Вимушені електромагнітні коливання

Вільні коливання, що виникають у коливальному контурі завжди є згасаючими. Це зумовлено тим, що енергія, яка надається коливальному контуру в початковий момент часу, необоротно витрачається на нагрівання і розсіюється в просторі внаслідок випромінювання електромагнітних хвиль. Для того, щоб коливання були незгасаючими, необхідно компенсувати втрати енергії в контурі. З цією метою коливальний контур необхідно під'єднати до зовнішнього джерела струму, EPC якого періодично змінюється:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t.$$

Електромагнітні коливання

Коливання, які відбуваються у такому коливальному контурі, називаються вимушеними. Коливальний контур, що складається з послідовно з'єднаних котушки індуктивності L , конденсатора відповідної ємності C й активного опору R , під'єднаних до джерела змінної EPC , називають послідовним коливальним контуром (рис. 5.5).

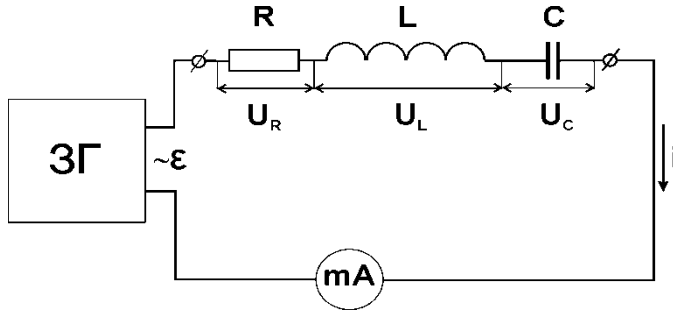


Рис. 5.5

При протіканні змінного струму на ділянці контуру, що містить котушку індуктивності L , виникає EPC самоіндукції

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt},$$

де I - сила струму в колі.

Повна EPC , що діє в контурі, дорівнює

$$\mathcal{E} - L \frac{dI}{dt}.$$

Щомиті вона повинна дорівнювати сумі напруг вздовж кола, тобто різниці потенціалів на обкладках конденсатора $U = \varphi_1 - \varphi_2$ та спаду потенціалу IR на омичному опорі R . Отже,

$$IR + U = \mathcal{E} - L \frac{dI}{dt}.$$

Підставивши замість \mathcal{E} його значення $\mathcal{E}_0 \sin \omega t$, дістанемо

$$L \frac{dI}{dt} + IR + U = \mathcal{E}_0 \sin \omega t. \quad (5.8)$$

Електромагнітні коливання

Напруга на конденсаторі U пов'язана з зарядом q обкладок кон-

денсатора співвідношенням $q = UC$. Сила струму

$$I = \frac{dq}{dt} = C \frac{dU}{dt}, \text{ або } \frac{dU}{dt} = \frac{I}{C}.$$

Диференціюючи (5.8) за часом, отримуємо диференціальне рівняння вимушених електромагнітних коливань:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{dU}{dt} = \mathcal{E}_0 \omega \cos \omega t, \text{ або } \frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dI}{dt} + \frac{I}{LC} = \frac{\mathcal{E}_0 \omega}{L} \cos \omega t.$$

Розв'язок цього рівняння має вигляд:

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi),$$

де I_0 - амплітудне значення струму, ω - циклічна частота, а φ - початкова фаза. Ці величини можна визначити за формулами:

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}},$$
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}. \quad (5.9)$$

Величина $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_c)^2}$ (де $X_L = L\omega$ і $X_c = \frac{1}{C\omega}$) називається повним опором і залежить від R , L , C , ω . При частоті ω_0 , що задовольняє співвідношення $L\omega_0 - \frac{1}{C\omega_0} = 0$, отримуємо вираз для резонансної частоти

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

При резонансній частоті ω_0 повний опір досягає мінімуму; при цьому амплітуда сили струму досягає максимального значення:

Електромагнітні коливання

$$I_{0\text{MAX}} = \frac{\sqrt{2}U}{R}. \quad (5.10)$$

Зсув фаз між напругою й струмом з (5.9) $\varphi = 0$.

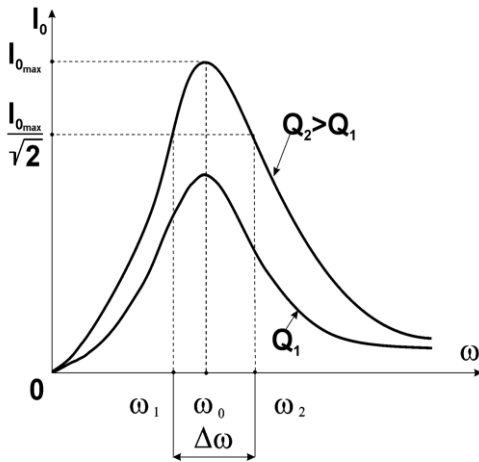
Явище різкого зростання амплітудного значення струму при наближенні частоти вимушувальної ЕРС до власної частоти послідовного контуру називається явищем резонансу напруг.

Відношення напруги на будь-якій з реактивних ділянок до напруги на затискачах ЕРС при резонансі

$$\frac{U_L}{\mathcal{E}} = \frac{U_C}{\mathcal{E}} = \frac{I_p X_L}{I_p R} = \frac{I_p X_C}{I_p R} = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} = Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Величину Q називають добротністю контуру.

Якщо параметри кола вибрані так, що $Q > 1$, то при резонансі напруг U_L і U_C більші за вхідну напругу в Q разів.



На рис. 5.6 показано резонансні криві струму для послідовного контуру при однакових \mathcal{E} , L і C для двох значень добротності Q_1 і $Q_2 > Q_1$. З рисунку видно, що інтенсивні коливання струму в контурі виникають лише тоді, коли частота ЕРС живлення близька до частоти власних коливань

контуру. Контур пропускає коливання певного діапазону частот. Цю властивість характеризують смугою пропускання контуру $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ - різниця частот, для яких $I_0^2 = \frac{1}{2} I_{0\text{MAX}}^2$.

Рис. 5.6

контуру. Контур пропускає коливання певного діапазону частот. Цю властивість характеризують смугою пропускання контуру $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ -

різниця частот, для яких $I_0^2 = \frac{1}{2} I_{0\text{MAX}}^2$.

Електромагнітні коливання

Можна довести, що

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{Q}. \quad (5.11)$$

Отже, чим більше значення добротності контуру Q (чим менший активний опір контуру), тим вузкою буде резонансна крива і тим меншим значенням смуги пропускання контура (див.рис.5.6).

Знаючи добротність Q , активний опір R і користуючись (5.10), визначаємо індуктивність

$$L = \frac{QR}{\omega_0} \quad (5.12)$$

і ємність контура

$$C = \frac{1}{\omega_0 QR}. \quad (5.13)$$

Лабораторна робота № 16

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ У КОЛИВАЛЬНОМУ КОНТУРІ

Мета роботи: дослідити залежність періоду коливань у коливальному контурі від ємності конденсатора й індуктивності котушки, а також залежність логарифмічного декременту згасання від величини активного опору.

Прилади й матеріали: 1) магазин опорів, 2) магазин індуктивностей, 3) реле, 4) електронний осцилограф, 5) джерело постійної напруги, 6) з'єднувальні провідники.

Для виконання лабораторної роботи необхідно вивчити теоретичний матеріал, поданий § 5.1.

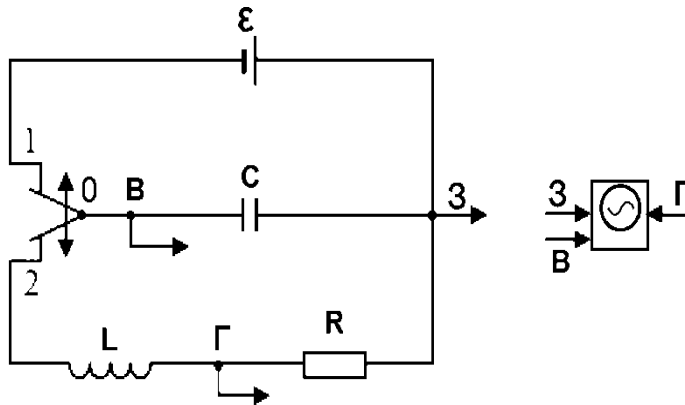


Рис. 1

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему згідно з рис. 1, під'єднавши клеми „В”, „Г”, „З”

Електромагнітні коливання

осцилографа до відповідних точок контуру, які позначені цими ж буквами

2. Увімкнути реле й генератор розгортки осцилографа. Змінюючи частоту генератора розгортки обертанням ручок „діапазони частот", „частота плавно" й "амплітуда синхронізації", домогтися на екрані осцилографа стійкої осцилограми (зображення одного цугу згасаючих коливань) (див. рис.5.3).

3. Змінюючи L , C і R , виміряти ℓ_0 , ℓ_1 , n з осцилограми.

4. Визначити не менше п'яти значень періоду коливань $T_{зг}$ за формулою (5.7) при виведеному магазині опорів і значеннях L і C , вказаних на вертикальному щиті, де розміщені прилади.

5. Для цих же значень L і C вичислити період коливань за формулою (5.4), в якій $R = R_1 + R_0$, де R_1 опір, що встановлюється за допомогою магазину опорів, а R_0 - активний опір індуктивності.

6. Результати вимірювань і розрахунків записати в табл. 1.

Таблиця 1

№ з/п	L , мГн	C , мкФ	CL , мкФ мГн	ℓ_0 , мм	ℓ_1 , мм	n	ℓ_1 , мм	R_0 , Ом	$T_{зг}$, с	$T_{теор}$, с
1										
2										
3										
4										
5										

7. Дослідити фазові криві. Для цього вимкнути генератор розгортки осцилографа й простежити за характером осцилограми, змінюючи L , C , і R (рис.5.4а).

Електромагнітні коливання

8. Визначити за допомогою фазової кривої величину критичного опору $R_{кр}$, при якому настає аперіодичний процес (рис.5.4б). Для цього встановити $L = 100 \text{ мГн}$ і $C = 0.1 \text{ мкФ}$. Для більшої точності спостереження проводити при максимальному вертикальному й горизонтальному підсиленні осцилографа. Отриманий результат порівняти з теоретичним, обчисленим за формулою (5.5). Результати вимірювань і розрахунків записати в табл.2.

9. При цих самих значеннях L , і C за фазовими кривими визначити залежність логарифмічного декременту згасання λ від R у діапазоні $R \in [100 \dots 600] \text{ Ом}$ (3-5 точок). Обчислення виконати за формулою (5.6). Результати вимірювань і розрахунків записати в табл. 2.

10. Побудувати графік $\lambda = f(R)$.

Таблиця 2

№	$R, \text{ Ом}$	$R_{кр}, \text{ Ом}$	$A_1, \text{ мм}$	$A_2, \text{ мм}$	λ
1					
2					
3					
4					
5					

Контрольні питання

1. Описати процеси, які відбуваються під час вільних електромагнітних коливань у контурі.
2. Як визначити період коливань ?
3. Вивести рівняння згасаючих коливань у коливальному контурі .
4. Який опір контуру називають критичним ?
5. Що таке логарифмічний декремент згасання ?

Лабораторна робота № 17

ВИВЧЕННЯ ВИМУШЕНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛИВАНЬ У КОЛИВАЛЬНОМУ КОНТУРІ

Мета роботи: дослідити вимушені коливання в коливальному контурі; за резонансною кривою обчислити величину активного опору R , добротність коливального контуру Q , його індуктивність L і ємність C .

Прилади й матеріали: 1) звуковий генератор, 2) активний опір, 3) котушка індуктивності, 4) конденсатор, 5) з'єднувальні провідники.

Для виконання лабораторної роботи необхідно вивчити теоретичний матеріал, поданий у § 5.2.

Порядок виконання роботи

1. Скласти схему згідно з рис. 1.

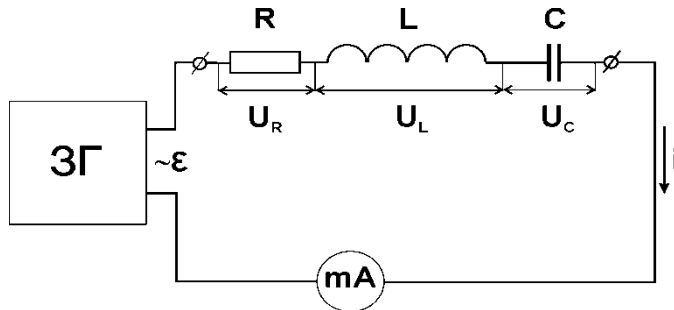


Рис.1

2. Встановити напругу U вихідних коливань генератора, вказану на робочому місці.
3. Зняти резонансну криву. Для цього при заданому значенні U , плавно змінюючи частоту ЕРС генератора, для кожного значення частоти f записати значення струму I . Дослід провести для двох

Електромагнітні коливання

значень U . Результати занести в табл.1,2.

4. Побудувати криві залежності $I = I(\omega)$.
5. З графіків визначити резонансну частоту $\omega_p = \omega_0$ і $\Delta\omega$ (рис. 5.6).
6. Знайти R за формулою (5.10).
7. Визначити добротність, індуктивність і ємність за формулами (5.11) - (5.13).
8. Результати записати в табл.3.

Таблиця 1

$f, \text{Гц}$															
$\omega = 2\pi f$															
$I, \text{мА}$															

Таблиця 2

$f, \text{Гц}$															
$\omega = 2\pi f$															
$I, \text{мА}$															

Таблиця 3

Вхідна напруга	$I_{max},$ <i>мА</i>	$\omega_0,$ <i>рад/с</i>	$\omega_1,$ <i>рад/с</i>	$\omega_2,$ <i>рад/с</i>	$\Delta\omega,$ <i>рад/с</i>	$R,$ <i>Ом</i>	Q	$L,$ <i>Гн</i>	$C,$ Φ
$U_1 =$									
$U_2 =$									

Контрольні питання

1. Як відбуваються коливання в електричному контурі?
2. При яких умовах настає резонанс напруг?
3. Виведіть формулу для резонансної частоти.
4. Що таке добротність контуру? Від чого вона залежить?
5. Чому в реальному контурі коливання згасають?

Розділ 6

ЗМІННИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ



§ 6.1. Змінний струм

Змінним електричним струмом називається струм, величина і напрям якого періодично змінюється за гармонічним законом.

Такий струм можна отримати, якщо виток дроту рівномірно обертати в однорідному магнітному полі відносно осі, перпендикулярної до напрямку ліній магнітної індукції (рис. 6.1).

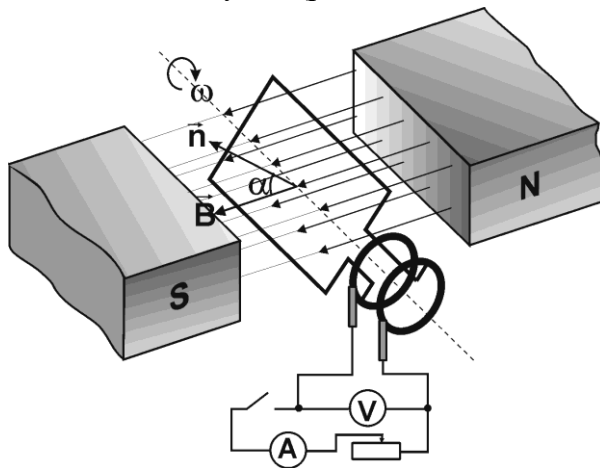


Рис.6.1

Магнітний потік, який пронизує контур рамки, визначається так:

$$\Phi = BS \cos \alpha = \Phi_0 \cos \omega t, \quad (6.1)$$

де $\alpha = (\vec{n}, \vec{B}) = \omega t$ – кут між напрямом нормалі \vec{n} до площини рамки і напрямом вектора \vec{B} ; $\omega = 2\pi f$ – кутова швидкість обертання рамки; f – частота обертання; S – площа рамки; Φ_0 – максимальне значення магнітного потоку (при $\alpha = 0$).

В основі виникнення змінної електрорушійної сили (ЕРС) покладене явище електромагнітної індукції. Величина ЕРС, що виникає у рамці дорівнює:

Змінний електричний струм

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} = \Phi_0 \omega \sin \omega t = \mathcal{E}_0 \sin \omega t, \quad (6.2)$$

де \mathcal{E}_0 – амплітудне значення *ЕРС*. З даної формули випливає, що *ЕРС*, яка виникає у рамці, що обертається з постійною кутовою швидкістю ω в магнітному полі змінюється за синусоїдальним законом з циклічною частотою $\omega = 2\pi f$. Таким чином, кутова швидкість обертання рамки є одночасно циклічною частотою коливання *ЕРС* і сили змінного струму. З формул (6.1) і (6.2) видно, що коли магнітний потік є максимальним, то *ЕРС* – мінімальна і навпаки. Якщо кінці рамки приєднати до мідних кілець, до яких притиснуті вугільні контакти (щітки), а до них – споживач R , то в колі буде протікати змінний струм

$$i(t) = \frac{\mathcal{E}_0}{R+r} \cdot \sin \omega t = I_0 \sin \omega t,$$

де $R+r$ – повний опір кола, $i(t)$ – миттєве, I_0 – амплітудне значення сили струму.

Амперметр і вольтметр у колі змінного струму показують не миттєві і не максимальні значення струму і напруги, а ефективні.

Діюче, або ефективне, значення величини змінного струму I дорівнює величині такого постійного струму, який, протікаючи у тому самому провіднику що і змінний струм, виділяє в ньому за один і той же проміжок часу таку саму кількість теплоти.

Для встановлення співвідношення між ефективним і амплітудним значеннями сили змінного струму знайдемо кількість теплоти, яку виділяють окремо ефективний змінний струм за час T та постійний струм за такий же час:

$$Q = \int_0^T i^2 R dt = \int_0^T I_0^2 R \sin^2 \omega t dt = \int_0^T I_0^2 R \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt = \frac{1}{2} I_0^2 RT,$$

$$Q = \int_0^T I_{e\phi}^2 R dt = I_{e\phi}^2 RT.$$

Змінний електричний струм

Отже, діючі значення струму і напруги визначаються за формулами:

$$I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = 0,707I_0 \text{ і } U_{ef} = \frac{U_0}{\sqrt{2}} = 0,707U_0.$$

§ 6.2. Коло змінного струму з активним опором

Розглянемо ділянку електричного кола, в якому протікає змінний струм (рис. 6.2а)

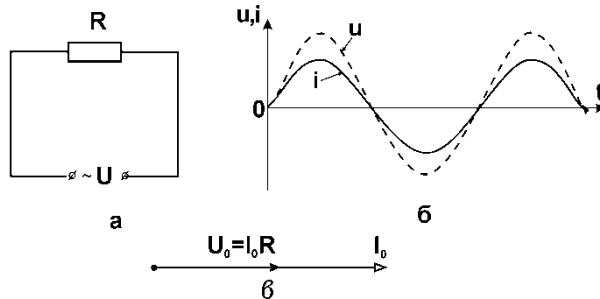


Рис. 6.2

Нехай коло складається тільки з резистора опором R , до кінців якого прикладена змінна напруга

$$u = U_0 \sin \omega t. \quad (6.3)$$

В результаті цього в колі циркулюватиме струм, що визначається відповідно до закону Ома:

$$i(t) = \frac{U}{R} = \frac{U_0}{R} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t, \quad (6.4)$$

де $I_0 = \frac{U_0}{R}$ – амплітудне значення сили струму.

З аналізу формул (6.3) і (6.4) видно, що напруга і сила струму змінюється в однакових фазах, тобто зсув фаз між ними дорівнює нулю. Напруга і сила струму досягають одночасно максимальних і мінімальних значень (рис. 6.2б). На векторній діаграмі, де опорною віссю є вісь сили струму, вектор, що зображає амплітуду коливань напруги, напрямлений однакою із вектором амплітуди сили струму (рис.6.2в).

§ 6.3. Коло змінного струму з активним опором та індуктивністю

Увімкнемо в коло змінного струму послідовно лампу розжарення (резистор) і котушку індуктивності. Тепер активний опір складається з опору лампи і опору дроту котушки. Якщо вставити всередину котушки залізне осердя, збільшивши її індуктивність, то яскравість нитки розжарення лампи зменшиться. Отже, котушка індуктивності чинить опір змінному струму (позначимо індуктивний опір X_L).

1). Якщо $R \ll X_L$, тоді активним опором провідників і котушки можна знехтувати і вважати, що опір такого кола визначається лише реактивним опором котушки індуктивності (рис. 6.3).

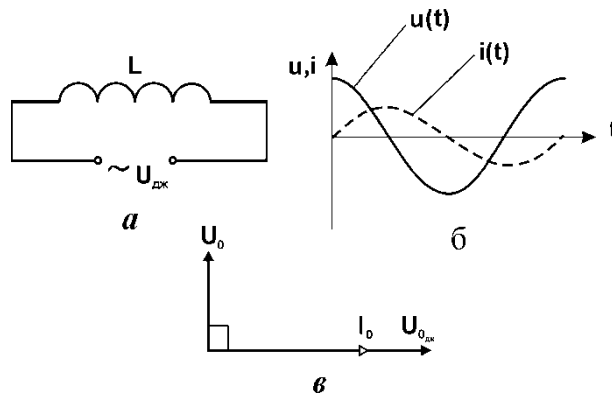


Рис. 6.3

Під впливом змінного магнітного поля в котушці виникає змінна ЕРС самоіндукції $\mathcal{E}_s = -L \frac{di}{dt}$. Знак мінус у попередній формулі, відповідно до правила Ленца, означає, що електрорушійна сила \mathcal{E}_s завжди має такий напрям, при якому вона протидіє всякій зміні струму, що її породжує. Таким чином наявність електрорушійної сили самоіндукції

Змінний електричний струм

створює додатковий опір для протікання змінного струму в колі, яке містить котушку індуктивності. Якщо i змінюється за законом синуса (рис.6.3б), то залежність \mathcal{E}_s від часу t має вигляд косинусоїди з від'ємним значенням в початковий момент часу $t = 0$. Для того, щоб струм міг протікати через котушку індуктивності необхідно, щоб прикладена напруга u зрівноважувала \mathcal{E}_s , тобто $u = -\mathcal{E}_s$.

Нехай внаслідок приєднання котушки до зовнішнього джерела на неї подається напруга $u = U_0 \sin \omega t$, яка породжує в колі струм $i(t) = I_0 \sin \omega t$. Тоді в котушці виникає ЕРС самоіндукції

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{di}{dt} = -I_0 \omega L \cos \omega t = -I_0 \omega L \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Оскільки $u = -\mathcal{E}_s$, отримаємо

$$u(t) = -\mathcal{E}_s = I_0 \omega L \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (6.5)$$

З отриманого виразу випливає, що струм в колі з індуктивністю відстає за фазою від напруги на $\frac{\pi}{2}$. Це також можна подати у вигляді векторної діаграми (рис. 6.3в) з якої теж бачимо, що діюче значення напруги U на кінцях котушки випереджає струм на $\frac{\pi}{2}$.

З формули (6.5) амплітудне значення напруги на котушці індуктивності рівне $U_0 = I_0 \omega L$. Якщо амплітудні значення напруги і сили струму

замінити на діючі, то отримаємо вираз $I_{ef} = \frac{U_{ef}}{\omega L}$, величина $\omega L = X_L$ є

реактивним, індуктивним опором в колі змінного струму.

2). Активний опір кола R за величиною близький до індуктивного опору X_L (рис.6.4 а). Векторна діаграма спадів напруг на ділянці кола, що містить індуктивність і активний опір приведена на рис. 6.4в.

Змінний електричний струм

Відповідно до цієї діаграми амплітудне значення напруги U_0 на ділянці кола можна визначити за теоремою Піфагора

$$U_0 = \sqrt{U_{0R}^2 + U_{0L}^2}.$$

Оскільки $U_{0R} = I_0 R$, а $U_{0L} = \omega L I_0$,

то
$$U_0 = I_0 \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}.$$

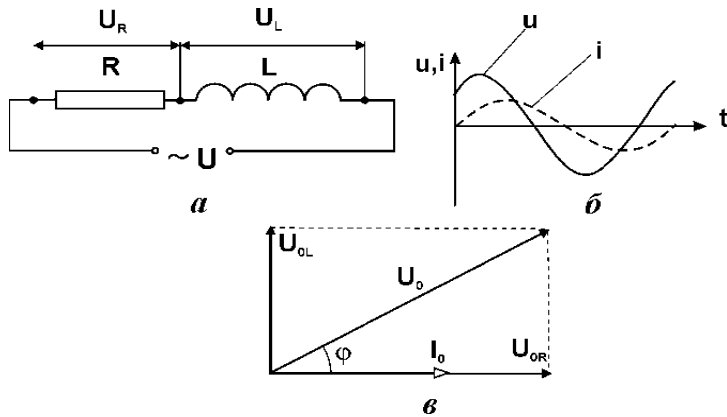


Рис.6.4

З останньої формули випливає, що вираз

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

є повним опором ділянки кола, показаної на рис. 6.4 а..

§ 6.4. Коло змінного струму з конденсатором

Якщо на деякій ділянці електричного кола є конденсатор, то постійний струм по такій ділянці протікати не може, оскільки обкладки конденсатора розділені шаром діелектрика. Тому фактично електричне коло, до якого входить конденсатор, для постійного струму є розімкнуте.

Змінний струм здатний протікати по колу, до якого входить

Змінний електричний струм

конденсатор. У цьому можна легко переконатися на простому досліді. Під'єднаємо послідовно з'єднані конденсатор і лампу до джерела змінної напруги і побачимо, що лампа засвітиться. Це означає, що змінний струм протікаючи в колі, до якого входить конденсатор, нагріває нитку розжарення лампи, викликаючи її свічення.

Протікання змінного струму через конденсатор пов'язане з його перезарядженням. Якщо в початковий момент часу конденсатор максимально заряджений і заряд на одній з його обкладок має максимальне значення, то протягом першої чверті періоду коливання його величина зменшується до нуля. Протягом наступної чверті періоду відбувається накопичення заряду протилежного знаку, після чого процес повторюється у зворотному напрямку. У результаті перезарядження конденсатора струм в колі протягом першої половини періоду протікає в одному напрямку, а протягом другої – в протилежному. Встановимо як змінюється з плином часу сила струму в колі, до якого входить конденсатор, коли опором провідників і обкладок конденсатора можна знехтувати.

Напруга, що виникає на обкладках конденсатора

$$u = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{C}$$

дорівнює вхідній напрузі на кінцях кола $u = U_0 \sin \omega t$ (рис. 6.5а).

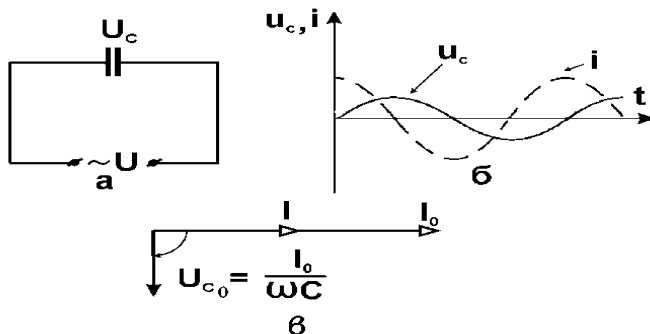


Рис. 6.5

Змінний електричний струм

Отже

$$q = Cu = CU_0 \sin(\omega t).$$

Сила струму визначається через похідну від заряду за часом

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = U_0 C \omega \cos(\omega t) = U_0 C \omega \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (6.6)$$

Отже, коливання сили струму у колі випереджують коливання напруги на конденсаторі на $\frac{\pi}{2}$ (рис. 6.5б).

Це також можна подати у вигляді векторної діаграми коливань напруги і сили струму в колі з конденсатором, що показано на рис. 6.5в.

З формули (6.6) амплітудне значення сили струму

$$I_0 = U_0 \omega C.$$

Якщо позначити $\frac{1}{\omega C} = X_c$ і замість амплітуди струму і напруги

ввести їх діючі значення, то

$$I = \frac{U}{X_c} = U \omega C.$$

З цього рівняння випливає, що величина X_c обернена до добутку циклічної частоти і ємності конденсатора має розмірність опору і називається ємнісним опором.

§ 6.5. Коло змінного струму з активним опором і ємністю

Розглянемо коло, яке складається з резистора опором R і конденсатора ємністю C , з'єднаних послідовно, і джерела змінної напруги $u = U_0 \cos \omega t$ (рис.6.6 а).

Змінний електричний струм

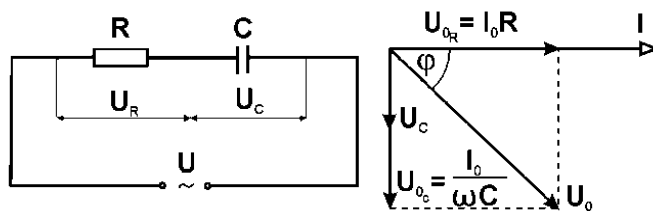


Рис. 6.6

У колі виникає змінний струм тієї ж частоти ω , амплітудне значення якого, а також зсув фаз між ним та напругою визначаються параметрами кола R і C . Для визначення I_0 і U_0 скористаємося методом векторних діаграм. За опорну вісь оберемо вісь сили струму, оскільки з'єднання елементів кола послідовне і сила струму в усіх ділянках кола однакова.

Змінний струм викликає напругу на резисторі R , амплітуда якої дорівнює $U_{0R} = I_0 R$, а миттєві величини $u_R(t)$ і $i(t)$ коливаються в однаковій фазі. Тому вздовж осі сили струму відкладаємо вектор U_{0R} , що відповідає в певному масштабі величині $I_0 R$. Коливання напруги на ємності відстають від сили струму на $\pi/2$, тому вектор U_{0C} повернутий відносно осі сили струму на кут $\pi/2$ за рухом стрілки годинника. Амплітуда напруги в колі U_0 дорівнює векторній сумі амплітуд напруг U_{0R} і U_{0C} .

З рис. 6.6 видно, що

$$U_0 = \sqrt{U_{0R}^2 + U_{0C}^2} = \sqrt{(I_0 R)^2 + \left(\frac{I_0}{\omega C}\right)^2} = I_0 Z,$$

звідки

Змінний електричний струм

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U_0}{Z}, \quad (6.7)$$

де величина $Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$ називається *повним опором ділянки кола*

змінного струму, що містить активний опір і ємність. Отриманий вираз називають законом Ома для кола змінного струму, що містить R і C , який можна сформулювати таким чином: *сила змінного струму прямо пропорційна напрузі на кінцях ділянки кола і обернено пропорційна її повному опору*.

§ 6.6. Потужність у колі змінного струму

Протікаючи в провіднику, змінний струм, так само як і постійний, зумовлює нагрівання цього провідника. *Кількість енергії, що витрачається за одиницю часу на нагрівання провідника називається **активною потужністю***. Активна потужність, що виділяється на ділянці кола, яке містить лише активний опір R (рис. 6.2а) визначається за формулою

$$P = I_{ef} U_{ef} = I_{ef}^2 R = \frac{U_{ef}^2}{R}.$$

Враховуючи, що $U_{ef} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$ і $I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$, активну потужність P можна виразити через амплітудні значення струму і напруги

$$P = \frac{I_0 U_0}{2} = \frac{I_0^2}{2} R = \frac{U_0^2}{2R}.$$

Якщо ділянка кола крім активного опору R містить ще й реактивний опір X_C , то між коливаннями напруги і сили струму в таких ділянках існує зсув фаз φ , що визначається параметрами кола R і C . З

Змінний електричний струм

векторних діаграм впливає, що $U_R = U \cos \varphi$. Тоді активна потужність, що виділяється на ділянці кола, яка містить реактивний опір визначається за формулою

$$P = U_R I_{ef} = U_{ef} I_{ef} \cos \varphi. \quad (6.8)$$

Формула (6.8) показує, що потужність, що виділяється в колі змінного струму, у загальному випадку залежить не тільки від сили струму та напруги, а й від зсуву фаз між ними.

Величина $\cos \varphi$ називається коефіцієнтом потужності в колі змінного струму. Коефіцієнт потужності в колі змінного струму можна визначити з (6.8) за відомими значеннями потужності і діючими значеннями сили струму і напруги

$$\cos \varphi = \frac{P}{I_{ef} U_{ef}}.$$

Також зсув фаз між коливаннями сили струму і напруги на ділянці змінного струму можна визначити співвідношенням

$$\cos \varphi = \frac{I_0 R}{U_0} = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}},$$

де Z – повний опір ділянки кола змінного струму, що містить активний опір і ємність.

Таким чином коефіцієнт потужності – це відношення реальної потужності, яка використовується для роботи, і потужності, яка подається в коло змінного струму.

Коефіцієнт потужності може набувати значення в діапазоні від 0 до 1. Як бачимо з формули (6.8) коли вся потужність це реактивна потужність (коло з індуктивністю та/або ємністю) без реальної потужності (без активного опору) – коефіцієнт потужності дорівнює 0. Коли вся потужність є реальною потужністю (з активним опором) без реактивної потужності (без індуктивності та/або ємності) – коефіцієнт потужності дорівнює 1.

Лабораторна робота №13

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета роботи: дослідити зсув фаз між коливаннями напруги і струму від частоти, визначити значення коефіцієнту потужності для електричного кола змінного струму, що складається з послідовно з'єднаних активного опору та ємності.

Прилади та обладнання: 1) амперметр, 2) вольтметр, 3) ватметр, 4) герцметр, 5) конденсатор, 6) реостат, 7) з'єднувальні провідники.

Перед виконанням роботи необхідно вивчити теоретичний матеріал поданий у § 6.1, § 6.5, § 6.6.

Опис установки

Коефіцієнт потужності для кола змінного струму визначаємо за допомогою електричного кола (рис. 1), де W - ватметр, A - амперметр, V - вольтметр, R - реостат, Hz - частотомір.

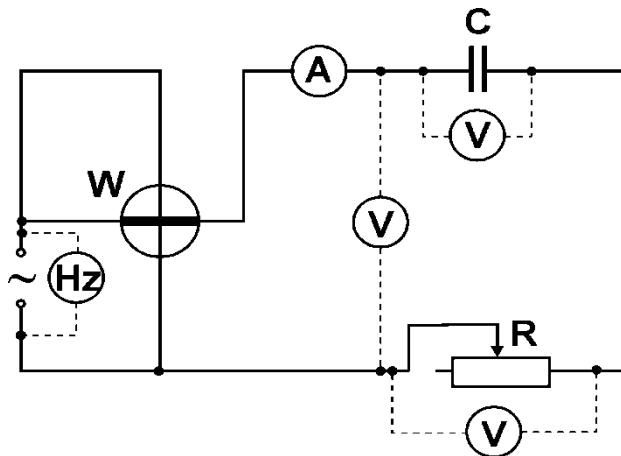


Рис.1

Змінний електричний струм

Коефіцієнт потужності в колі змінного струму можна визначити за відомими значеннями потужності і діючими значеннями струму і напруги

$$\cos \varphi = \frac{P}{IU}. \quad (1)$$

Також зсув фаз між коливаннями сили струму і напруги можна визначити співвідношенням

$$\cos \varphi = \frac{I_0 R}{U_0} = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (2)$$

Послідовність виконання роботи

1. Зібрати електричне коло, показане на рис.1. Визначити ціну поділки кожного приладу.
2. Замкнути коло, встановити за допомогою реостата величину струму у колі, вказане на місці роботи.
3. Виміряти потужність ватметром, силу струму і напругу на конденсаторі і реостаті – відповідно, амперметром та вольтметром. Прилади вимірюють діючі значення струму і напруги. Під'єднання вольтметра для визначення напруги показано на схемі пунктирними лініями. Результати вимірювань занести в табл 1.
4. Виміряти напругу на активному опорі U_R , напругу на конденсаторі U_C і частотоміром частоту змінного струму f . Результати вимірювань занести в табл 1.
5. Вимірювання в п.п. 3,4 повторити для інших значень сил струму вказаних на місці роботи.
6. Розрахувати значення опору R за формулою $R = \frac{U_R}{I}$, циклічну

Змінний електричний струм

частоту $\omega = 2\pi f$ і ємність конденсатора $C = \frac{I}{\omega U_C}$.

7. Розрахувати $(\cos \varphi)_1$ за формулою (1) і за формулою (2) розрахувати $(\cos \varphi)_2$ і порівняти ці значення.

Таблиця 1

№ з/п	$P, \text{ Вт}$	$I, \text{ А}$	$U, \text{ В}$	$(\cos \varphi)_1$	$U_R, \text{ В}$	$R, \text{ Ом}$	$U_C, \text{ В}$	$C, \text{ Ф}$	$f, \text{ Гц}$	$\omega, \text{ Гц}$	$(\cos \varphi)_2$
1											
2											
3											

8. Характеристики вимірювальних приладів занести в табл. 2 .

9. Визначити похибку вимірювання $\cos \varphi$, вивівши її з формули (1).

Таблиця 2

Границя вимірювання приладів			Клас точності приладів			$\Delta P, \text{ Вт}$	$\Delta I, \text{ А}$	$\Delta U, \text{ В}$	$\delta \cos \varphi, \%$	$\Delta \cos \varphi$
$P, \text{ Вт}$	$I, \text{ А}$	$U, \text{ В}$	W	A	V					

Контрольні питання

1. Що таке $\cos \varphi$? Як залежить потужність в колі змінного струму від $\cos \varphi$?
2. При яких умовах $\cos \varphi$ дорівнює одиниці, при яких нулю?
3. Яке значення струму називається діючим або ефективним? Вивести закон Ома для кола змінного струму, яке складається з послідовно з'єднаних активного опору та ємності.
4. Пояснити, чому коливання напруги на конденсаторі відстають за фазою на $\pi/2$ від коливань струму, що протікає через цей конденсатор.

Лабораторна робота № 15

ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ ОМА ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ З R І C

Мета роботи: перевірити закон Ома для кола змінного струму.

Прилади і обладнання : 1) реостат, 2) батарея конденсаторів, 3) амперметр, 4) вольтметр, 5) частотомір, 6) джерело змінної напруги, 7) з'єднувальні провідники.

Перед виконанням роботи необхідно вивчити теоретичний матеріал з § 6.1, § 6.2, § 6.4, § 6.5.

Опис установки

Перевірити закон Ома для кола змінного струму можна за допомогою електричного кола (рис. 1), де A - амперметр, V - вольтметр, R_1 - реостат, Hz - частотомір.

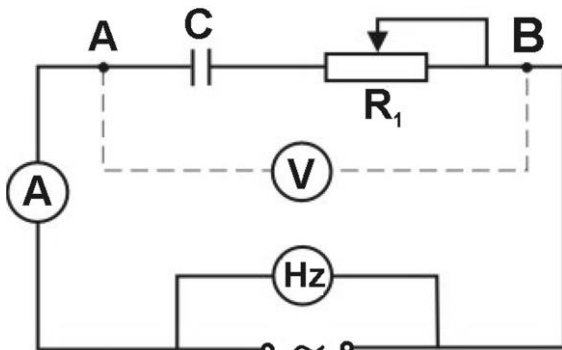


Рис.1

Згідно з формулою (7.5), закон Ома для ділянки кола AB , що складається з резистора та конденсатора (рис. 1) запишемо так:

Змінний електричний струм

$$I = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + X_c^2}}, \quad (1)$$

де U – напруга на ділянці АВ кола змінного струму; R_1 – активний опір; $\omega = 2\pi f$ – циклічна частота; C – електрична ємність конденсатора.

Сила струму, який протікає через послідовне з'єднання активного опору та конденсатора

$$I = \frac{U_{R_1}}{R_1} \quad \text{або} \quad I = \frac{U_C}{X_C}.$$

Звідки знайдемо, що

$$R_1 = \frac{U_{R_1}}{I}, \quad X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{U_C}{I}, \quad (2)$$

де U_{R_1} і U_C – відповідно, напруги на активному опорі і на конденсаторі.

Підставивши у формулу (1) співвідношення (2), отримаємо

$$I = \frac{U}{\sqrt{\left(\frac{U_{R_1}}{I}\right)^2 + \left(\frac{U_C}{I}\right)^2}} = \frac{IU}{\sqrt{U_{R_1}^2 + U_C^2}}.$$

Звідси

$$U = \sqrt{U_{R_1}^2 + U_C^2}. \quad (3)$$

З формули (2) знаходимо ємність конденсатора

$$C = \frac{I}{2\pi f U_C}. \quad (4)$$

Послідовність виконання роботи

1. Скласти електричне коло відповідно до схеми на рис. 1.

Змінний електричний струм

2. Замкнути коло і встановити з допомогою реостата силу струму в колі, яка вказана на робочому місці.
3. За допомогою вольтметра виміряти:
 - а) напругу U_R на опорі R_1 ;
 - б) напругу U_C на клеммах конденсатора C ;
 - в) напругу $U_{вим}$ на ділянці AB , яка складається із послідовно з'єднаних активного опору R_1 і конденсатора C .
 Результати вимірювань записати в табл.1.
4. Виміряти частоту змінного струму f , використовуючи частотомір.
5. Змінюючи реостатом опір ділянки кола AB , виконати 3 аналогічних вимірювання при різних значеннях сили струму (вказані на місці роботи).
6. Використовуючи формулу (3), обчислити U за отриманими результатами вимірювань U_R і U_C . Порівняти обчислене значення U з виміряним. Результати записати в таблицю 1.
7. Використовуючи формулу (4), обчислити ємність конденсатора C за отриманими результатами вимірювань f і U_C . Порівняти обчислене значення ємності з даним в роботі. Результати записати в табл.2.
8. Характеристики вимірювальних приладів занести в табл 3 і визначити похибки величин I , U і C .

Таблиця 1

№ з/П	I , A	$U_{вим}$, B	U_{R_1} , B	U_C , B	U , B	ΔU , B
1						
2						
3						

Змінний електричний струм

Таблиця 2

№ з/п	f, Гц	C _{вирох.} , Ф	C _{дан.} , Ф	δC, %
1				
2				
3				

Таблиця 3

Границя вимірювання приладів			Клас точності приладів			ΔI, A	ΔU, B	Δf, Гц
I, A	U, B	f, Гц	A	V	Hz			

Контрольні питання

1. За яких умов в електричному колі виникає змінна ЕРС та змінний струм?
2. Що таке амплітудне, миттєве і діюче значення сили струму і напруги?
3. Пояснити причину відставання по фазі на $\frac{\pi}{2}$ напруги на ємності від сили струму, який протікає через ємність.
4. Вивести закон Ома для кола змінного струму, яке складається із послідовно з'єданого активного опору і ємності.
5. Чому дорівнює реактивний та повний опір електричного кола при послідовному з'єднанні R і C елементів?

Лабораторна робота №2

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЄМНОСТІ КОНДЕНСАТОРА

Мета роботи: провести розрахунок електроємності плоского конденсатора за його лінійними розмірами і заданим значенням діелектричної проникливості середовища між його пластинами.

Прилади і обладнання : 1) джерело змінної напруги, 2) макет плоского конденсатора з набором пластин діелектрика, 3) еталонний конденсатор, 4) міліамперметр, 5) двополюсний перемикач, 6) мілі-міліметрова лінійка, 7) мікрометр, 8) з'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості, що стосуються даної лабораторної роботи приведені в §1.4, § 6.1, § 6.4.

Теоретичні відомості

Електричну ємність конденсатора можна визначити, використавши закон Ома для змінного струму. Для ділянки кола, що містить конденсатор з ємністю C , закон Ома, записаний через ефективні значення струму I і напруги U , має вигляд:

$$I = \frac{U}{X_c} = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}}, \quad (1)$$

де $\omega = 2\pi f$ - циклічна частота коливань струму у колі.

Почергово під'єднуючи конденсатори з досліджуваною C_x і еталонною C_0 ємностями до джерела змінного струму з однією і тією ж напругою U і незмінною частотою $f = \text{const}$ можна виразити значення ємності досліджуваного конденсатора через відношення сил

Змінний електричний струм

струму I_x і I_0 , що через них протікають. З (1) одержуємо:

$$U = \frac{I_x}{\omega C_x}; \quad U = \frac{I_0}{\omega C_0},$$

звідки отримуємо:

$$C_x = C_0 \frac{I_x}{I_0}. \quad (2)$$

Порівнюючи розраховану ємність конденсатора

$$C_x = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 ab}{d},$$

де ε — відносна діелектрична проникність діелектрика, з відомим значеннями діелектричної проникливості ε матеріалу діелектрика між обкладками конденсатора з ємністю

$$C'_x = \frac{\varepsilon' \varepsilon_0 ab}{d'}$$

з невідомим значенням ε' , можна визначити невідому відносну діелектричну проникливість матеріалу ε' :

$$\varepsilon' = \varepsilon \frac{d' C'_x}{d C_x}, \quad (3)$$

де d і C_x — відповідно, значення товщини шару діелектрика і ємність конденсатора з відомим значенням діелектричної проникності ε ; d' товщина шару діелектрика з невідомим значенням діелектричної проникності ε' , C'_x - вимірне значення ємності конденсатора, що містить пластину з діелектрика з невідомою відносною діелектричною проникністю ε' .

Послідовність виконання роботи

1. Розрахувати значення ємності плоского конденсатора з відомим

Змінний електричний струм

значенням діелектричної проникливості шару діелектрика між обкладками:

- виміряти лінійкою довжини a і b сторін прямокутних обкладок конденсатора;
- за допомогою мікрометра виміряти товщину d діелектричного шару між обкладками конденсатора;
- розрахувати значення ємності конденсатора за формулою

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 ab}{d}.$$

- Результати вимірювань і розрахунків фізичних величин занести в табл. 1.
- Скласти електричне коло (рис. 1), де μA - мікроамперметр, C_0 - еталонна ємність, C_x - невідома ємність, виконана у вигляді плоского конденсатора, в конструкції якого передбачено використання різних діелектриків (оргскло, пластик, гетинакс), Π - двополюсний перемикач, з допомогою якого до джерела змінної ЕРС по черзі приєднуються конденсатори з ємностями C_0 , C_x і C'_x .

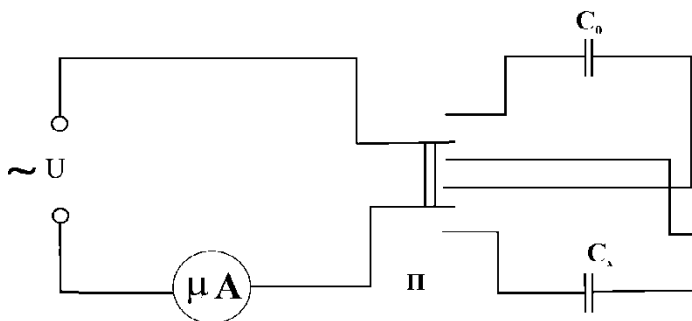


Рис.1

- Виміряти значення ефективних сил струмів I_0 , і I_x , які проходять через еталонну ємність C_0 і невідому ємність C_x .

Змінний електричний струм

5. Виміряти значення ефективного струму I'_x , який проходить через конденсатор з невідомою ємністю C'_x , коли діелектриком є пластик або гетинакс.
6. За формулою (2) визначити значення невідомих ємностей C_x, C'_n і C'_r .
7. Результати вимірювань і розрахунків фізичних величин занести в табл. 2.
8. Виміряти за допомогою мікрометра товщину d' діелектричного шару між обкладками конденсаторів C'_n і C'_r .
9. За формулою (3) визначити значення невідомих діелектричних проникностей ε'_n і ε'_r .
10. Результати вимірювань і розрахунків фізичних величин занести в табл. 3.
11. Визначити похибки вимірювань ємностей C, C_x і C'_x та діелектричних проникностей ε' .

Таблиця 1

ε	$\Delta\varepsilon$	$a,$ м	$\Delta a,$ м	$b,$ м	$\Delta b,$ м	$d,$ 10^{-3} м	$\Delta d,$ 10^{-3} м	$C,$ нФ	$\Delta C,$ нФ	$\delta C,$ %

Таблиця 2

Діелек трик	$C_0,$ нФ	$\Delta C_0,$ нФ	$I_0,$ мкА	$\Delta I_0,$ мкА	$I_x,$ мкА	$\Delta I_x,$ мкА	$C_x,$ нФ	$\Delta C_x,$ нФ	$\delta C_x,$ %
орг. скло									
плас- тик									
гети- накс									

Змінний електричний струм

Таблиця 3

№ з/п	ε	$\Delta\varepsilon$	$d, 10^{-3} м$	$\Delta d, 10^{-3} м$	$d', 10^{-3} м$	$\Delta d', 10^{-3} м$	ε'	$\Delta\varepsilon'$	$\delta\varepsilon'$
1									
2									
3									

Контрольні питання

1. Що таке електрична ємність, в яких одиницях вона вимірюється ?
2. Чому діелектрик збільшує ємність конденсатора ?
3. Який фізичний зміст має відносна діелектрична проникливість ?
4. Що таке ефективні значення змінного струму і напруги ?
5. Від чого залежить ємнісний реактивний опір у колі змінного струму ?

Лабораторна робота № 18

ВИЗНАЧЕННЯ ІНДУКТИВНОСТІ СОЛЕНОЇДА

Мета роботи – визначити індуктивність соленоїда та дослідити вплив залізного осердя на індуктивність соленоїда.

Прилади та матеріали: 1) соленоїд індуктивності з висувним осердям; 2) реостат; 3) вольтметр, 4) амперметр; 5) перемикач (ключ); б) з'єднувальні провідники.

Перед виконанням роботи необхідно вивчити теоретичний матеріал з § 4.7, § 6.3.

Опис установки

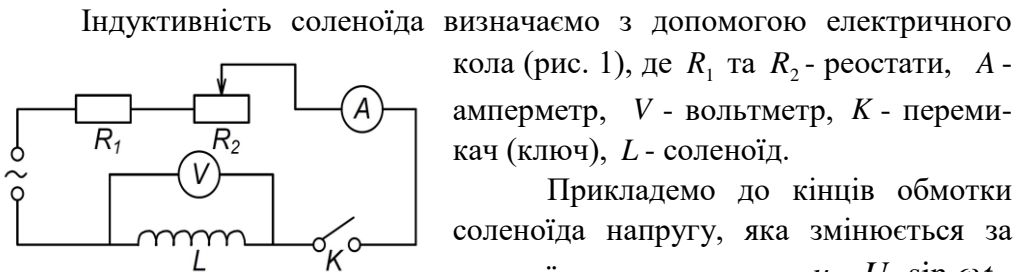


Рис.1

Прикладемо до кінців обмотки соленоїда напругу, яка змінюється за синусоїдальним законом $u = U_0 \sin \omega t$, де U_0 - амплітудне значення напруги. В колі змінного струму соленоїд буде мати крім активного опору R_0 ще й індуктивний опір

$$X_L = \omega L = 2\pi f L, \quad (1)$$

де $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ - циклічна частота, T - період коливань, f - частота змінного струму.

Амплітудне значення сили струму можна записати у вигляді

Змінний електричний струм

$$I_0 = \frac{U_0}{Z}.$$

Величина

$$Z = \sqrt{R_0^2 + (\omega L)^2} \quad (2)$$

називається повним опором кола. Після перетворень з (2) отримаємо вираз для індуктивності соленоїда:

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R_0^2}}{2\pi f}. \quad (3)$$

Запишемо повний опір кола через ефективні значення сили струму та напруги:

$$Z = \frac{U_0}{I_0} = \frac{U_{ef}}{I_{ef}}. \quad (4)$$

Послідовність виконання роботи

1. Частотоміром визначити частоту змінного струму f в електричному колі.
2. Скласти електричне коло за схемою, що зображена на рис.1. Після перевірки кола викладачем увімкнути в мережу змінного струму 220 В.
3. Замкнути коло ключем K . Переміщаючи повзунок реостата, встановити струми в колі силою I_1, I_2, I_3 та зняти покази вольметра U_1, U_2, U_3 .
4. За формулою (4) визначити повний опір соленоїда Z . Значення R_0 вказане на соленоїді.
5. Визначити індуктивність L соленоїда за формулою (3) і обчислити значення індуктивного опору $X_L = 2\pi f L$ соленоїда.
6. Розрахувати абсолютну похибку при визначенні індуктивності

Змінний електричний струм

соленоїда і відносну похибку при розрахунку індуктивного опору.

7. Результати вимірювань та обчислень записати в табл.1
8. В отвір соленоїда вставити залізне осердя і при силах струмів I_1, I_2, I_3 , способом описаним вище, розрахувати повний опір Z_S , індуктивність L_S та індуктивний опір X_{LS} соленоїда за формулою (1), а також відповідні похибки.
9. Результати вимірювань та обчислень записати в табл.2.
10. Визначити, у скільки разів індуктивний опір із залізним осердям є більшим, ніж індуктивний опір без залізного осердя.
11. Для дослідження впливу магнітної проникності середовища на індуктивність в соленоїд вставити залізне осердя на 1/4 довжини, 1/2 довжини, 3/4 довжини, записати відповідні значення струмів і напруг і кожного разу обчислити повний опір Z_S , індуктивність L_S та індуктивний опір X_L соленоїда.
12. Результати вимірювань та обчислень записати в табл.3.

Таблиця 1

№ з/п	f , Гн	R_0 , Ом	I , А	U , В	Z , Ом	L , Гн	ΔL , Гн	X_L , Ом	δX_L , %
1									
2									
3									
Сер.									

Таблиця 2

№ з/п	I , А	U , В	Z_S , Ом	L_S , Гн	ΔL_S , Гн	X_{LS} , Ом	δX_{LS} , %	$\frac{X_{LS}}{X_L}$
1								
2								
3								
Сер.								

Змінний електричний струм

Таблиця 3

l	$I,$ A	$U,$ B	$Z_S,$ $Ом$	$L_S,$ $Гн$	$X_{LS},$ $Ом$
1/4					
2/4					
3/4					

Контрольні питання

1. Що називають індуктивністю контуру?
2. Як можна змінювати значення індуктивності контуру?
3. За якою формулою визначається індуктивність соленоїда?
4. Яке явище називається самоіндукцією?
5. Як можна записати другий закон Кірхгофа для замкнутого кола з активним та індуктивним опорами?
6. Побудувати векторну діаграму для ділянки кола змінного струму, яка містить котушку і має активний опір. Знайти з її допомогою вираз для повного опору Z цієї ділянки.

Лабораторна робота № 12

ВИВЧЕННЯ ЛІЧИЛЬНИКА ЗМІННОГО СТРУМУ

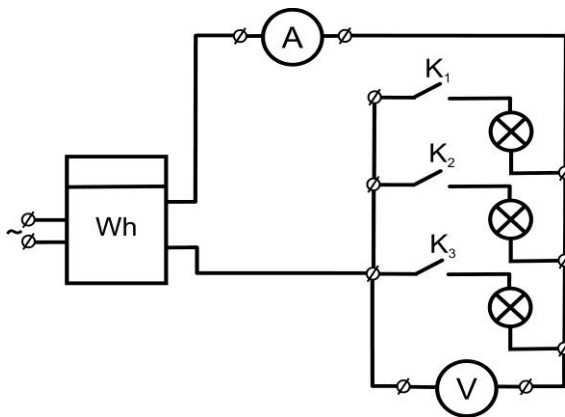
Мета роботи: вивчити принцип роботи лічильника змінного струму і визначити сталу лічильника.

Прилади і обладнання: 1) електричний лічильник, 2) амперметр, 3) вольтметр, 4) секундомір, 5) набір електричних ламп розжарення, б) з'єднувальні провідники .

Будова приладів індукційної системи і принцип їх роботи, описані у темі «Будова і принцип роботи основних електровимірювальних приладів», тема 1.5, § 4.6.

Опис установки

Сталу лічильника змінного струму можна за допомогою



електричного кола (рис. 1), де Wh – лічильник електричної енергії, A - амперметр, V - вольтметр L_1, L_2, L_3 - електричні лампочки, K_1, K_2, K_3 – ключі.

На кожному лічильнику L_3 вказана його постійна C , її величина визначається кількістю енергії, при споживанні якої в колі диск лічильника здійснює один оберт.

Рис. 1

Змінний електричний струм

Тоді

$$E_e = CN,$$

де N – число обертів диска.

За допомогою амперметра, вольтметра та секундоміра можна визначити силу струму I , напругу U та час t , а значить, визначити споживану енергію при активному навантаженні в електричному колі:

$$E'_e = IUt.$$

Нехай протягом часу t диск виконав N_1 обертів. Знайдемо постійну лічильника C_1 як коефіцієнт пропорційності між кількістю енергії E'_e і числом обертів диску N_1 :

$$C_1 = \frac{E'_e}{N_1} = \frac{IUt}{N_1}, \quad (1)$$

(C_1 відповідає кількості електричної енергії, при споживанні якої в колі диск лічильника здійснює один оберт).

Послідовність виконання роботи

1. Скласти схему за рис.1.
2. Увімкнути в електричне коло одну лампу.
3. Виміряти час t , протягом якого лічильник виконає $N_1 = 10$ повних обертів; записати покази амперметра і вольтметра; обчислити значення C_1 за формулою (1).
4. Повторити вимірювання і обчислення при різних навантаженнях, вмикаючи в коло одну, дві, три лампи; результати записати в табл.1.

Таблиця 1

№ з/п	$I,$ A	$U,$ B	N_1	$t,$ c	$C_1,$ $Дж/об$	$C,$ $Дж/об$	$\delta C_1,$ $\%$
1							
2							
3							

Змінний електричний струм

5. Визначити сталу лічильника: $C = \frac{3.6 \cdot 10^6}{N}$, Дж/об, де N – число обертів диску лічильника, що відповідає значенню енергії в 1кВт.год (N вказано на шкалі лічильника).
6. Обчислити відносну похибку за класом точності приладів.

Контрольні питання

1. Сформулювати суть явища електромагнітної індукції та записати закон електромагнітної індукції.
2. Як виникає обертовий момент, що діє на диск?
3. Як виникає гальмівний момент?
4. Який фізичний зміст постійної лічильника?
5. Написати формулу для обчислення енергії електричного струму.

Додаток

ДОДАТОК

Основні величини СІ і одиниці їх вимірювання

Величина	Одиниця	Позначення
<i>довжина</i>	метр	м
<i>час</i>	секунда	с
<i>маса</i>	кілограм	кг
<i>сила струму</i>	ампер	А
<i>температура</i>	кельвін	К
<i>к-сть речовини</i>	моль	моль
<i>сила світла</i>	кандела	кд

Префікси СІ для утворення кратних і часткових одиниць

Кратні			Часткові		
Префікс	Познач.	Множник	Префікс	Познач.	Множник
<i>Екса</i>	Е	10^{18}	<i>Деци</i>	д	10^{-1}
<i>Пета</i>	П	10^{15}	<i>Сантн</i>	с	10^{-2}
<i>Тера</i>	Т	10^{12}	<i>Мілі</i>	м	10^{-3}
<i>Гіга</i>	Г	10^9	<i>Мікро</i>	мк	10^{-6}
<i>Мега</i>	М	10^6	<i>Нано</i>	н	10^{-9}
<i>Кіло</i>	к	10^3	<i>Піко</i>	п	10^{-12}
<i>Гекто</i>	г	10^2	<i>Фемто</i>	ф	10^{-15}
<i>Дека</i>	да	10	<i>Апто</i>	а	10^{-18}

Грецький алфавіт

Α α	<i>альфа</i>	Ν ν	<i>ню</i>
Β β	<i>бета</i>	Ξ ξ	<i>ксі</i>
Γ γ	<i>гамма</i>	Ο ο	<i>омікрон</i>
Δ δ	<i>дельта</i>	Π π	<i>пі</i>
Ε ε	<i>епсилон</i>	Ρ ρ	<i>ро</i>
Ζ ζ	<i>дзета</i>	Σ σ	<i>сигма</i>
Η η	<i>ета</i>	Τ τ	<i>тау</i>
Θ θ	<i>тета</i>	Υ υ	<i>іпсилон</i>
Ι ι	<i>йота</i>	Φ φ	<i>фі</i>
Κ κ	<i>каппа</i>	Χ χ	<i>хі</i>
Λ λ	<i>лямбда</i>	Ψ ψ	<i>псі</i>
Μ μ	<i>мю</i>	Ω ω	<i>омега</i>

Латинський алфавіт

A a	<i>a</i>	N n	<i>ен</i>
B b	<i>бе</i>	O o	<i>о</i>
C c	<i>це</i>	P p	<i>пе</i>
D d	<i>де</i>	Q q	<i>ку</i>
E e	<i>е</i>	R r	<i>ер</i>
F f	<i>еф</i>	S s	<i>ес</i>
G g	<i>ге (же)</i>	T t	<i>те</i>
H h	<i>га (аш)</i>	U u	<i>у</i>
I i	<i>і</i>	V v	<i>ве</i>
J j	<i>йот</i>	W w	<i>дубль-ве</i>
K k	<i>ка</i>	X x	<i>ікс</i>
L l	<i>ель</i>	Y y	<i>ігрек</i>
M m	<i>ем</i>	Z z	<i>зет</i>

ЛІТЕРАТУРА

1. І.Є. Лопатинський, І.Р. Зачек, Г.А. Ільчук, Б.М. Романишин. Фізика. Підручник. – Львів: “Афіша”, 2005.-394с

2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики.: Навчальний посібник – Т. 2. Електрика і магнетизм. – К.: Техніка, 2003. – 452с.

3. Шаповаленко О.Г., Бондар В.М. Основи електричних вимірювань -К.: Либідь, 2002. -319 с.

4. Загальна фізика: Лабораторний практикум: Навч. Посібник. - В.М. Барановський, П.В. Бережний, І.Т. Горбачук та ін. За заг. ред І.Е. Горбачука. – К.: Вища школа, 1992. -509с.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

**ЛАБОРАТОРНИЙ
ПРАКТИКУМ
З ФІЗИКИ**

Частина 2

**ЕЛЕКТРИКА
ТА МАГНЕТИЗМ**

Віддруковано з готових діапозитивів

Підписано до друку. Формат 70x100/16
Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 10,93
Замовлення № 47

Друк ПП «Ощипок М.М. »
Адреса: м.Львів, вул.С.Бандери , 45
Свідоцтво серія Б №701155 від 30.05. 12 р.
ел. пошта: ommzmirk@ukr.ntn