Міністерство освіти і науки України
Прикарпатський національний університет імені Василя СтефаникаФізико-технічний факультет
Кафедра фізики і методики викладання

Лабораторні роботи

Електрика та магнетизм

ауд.116 ц.к.

м. Івано-Франківськ

Міністерство освіти і науки України
Прикарпатський національний університет імені Василя СтефаникаФізико-технічний факультет
Кафедра фізики і методики викладання

Лабораторна робота № 1

Вивчення принципу дії і основних характеристик електровимірювальних приладів

ауд.116 ц.к.

м. Івано-Франківськ

Електровимірювальний прилад — це сукупність засобів, за допомогою яких здійснюється вимірювання певної електричної величини.

В приладах безпосередньої оцінки вимірювана величина визначається стрілочним або цифровим способом відліку, або з допомогою світлового «зайчика» на градуйованій шкалі. Це— амперметри, вольтметри, ватметри, омметри, гальванометри.

До приладів порівняння належать численні компенсатори, електровимірювальні містки, електронні вольтметри. В них вимірювана величина визначається порівнянням з відомою однорідною величиною. Для вимірювання електричних величин в приладах безпосередньої оцінки використовують фізичні явища, на основі яких створюються обертальний момент і наступне переміщення рухливої системи приладу. Обертальний момент утворюється внаслідок взаємодії постійно¬го магніту і струму в котушці, магнітного поля котушки з струмом і феромагнетиком, взаємодії магнітних полів котушок з струмами, взаємодії заряджених тіл. Залежно від використовуваного в приладі принципу взаємодії розрізняють такі системи електровимірювальних приладів: магнітоелектричну, електромагнітну, електродинамічну, індукційну, електростатичну, термоелектричну, детекторну, вібраційну. Прилади різних систем реагують на різні значення вимірюваної величини (середні, діючі, амплітудні і т. д.).

Якість електровимірювальних приладів визначається чутливістю, похибками вимірювання, реагуванням на зовнішні електричні і магнітні поля та зміну температури, межами вимірювань, тривалістю щодо перевантажень тощо.

Чутливістю електровимірювальних приладів називають фізичну величину, яка вимірюється відношенням лінійного або кутового зміщення покажчика приладу $\Delta\alpha$ до зміни вимірюваної величини Δx, яка зумовила це зміщення:

$$S = \Delta\alpha/\Delta x,$$

Величина $C = 1/S$, обернена до чутливості, дістала назву ціни поділки приладу.

Для характеристики точності електровимірювальних приладів використовують так звані зведені *похибки*

$$\gamma_{зв} = (\pm \Delta x/x_н)\ 100\ \%,$$

де Δx — абсолютна похибка вимірюваної величини; x_n — верхня межа вимірювань (шкали) приладу (його номінальне значення).

Електровимірювальні прилади відповідно до величини їх зведеної похибки поділяються на вісім класів точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1 5' 2,5; 4. За покажчиком класу точності, нанесеним на шкалу вимірювального приладу, визначають абсолютну похибку вимірювання

$$\Delta x = \gamma_{зв} x_н/100.$$

Прилади класів точності 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 використовуються, головним чином, для точних лабораторних вимірювань і називаються *прецизійними*; прилади класів 1,0; 1,5; 2,5; 4 мають назву *технічних*.

Прилади магнітоелектричної систем и складаються з двох основних частин: постійного магніту і котушки, що має вигляд рамки. Принцип дії цих приладів заснований на взаємодії, сильного магнітного поля постійного магніту з слабким магнітним полем рамки, по якій проходить вимірюваний струм. Схему струмовимірювача магнітоелектричної системи зображено на рис. 144.

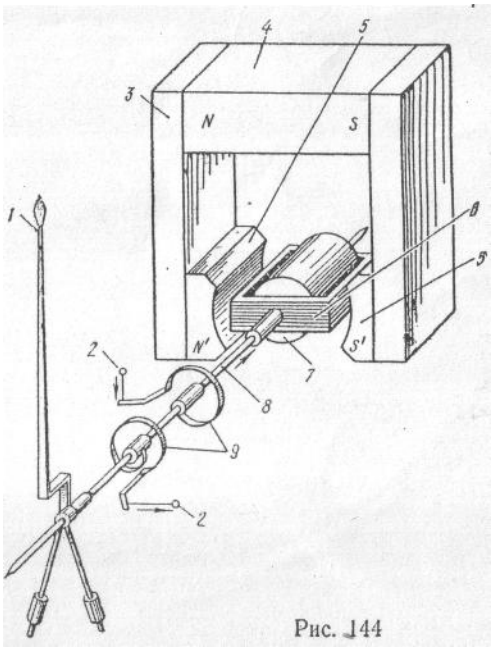


Рис. 144

Магнітна система вимірювального механізму складається з сильного постійного магніту 4 з висококоерцитивної сталі, магнітопроводу 3, полюсних наконечників 5 і нерухомого осердя 7. Магнітопровід, полюсні наконечники і осердя виготовляються з м'яких магнітних матеріалів. Полюсні наконечники Гциліндр дають змогу в малому зазорі між ними дістати однорідне радіальне магнітне поле. Між полюсними наконечниками і осердям розміщується рухома

рамка (котушка) 6У що являє собою легенький алюмінієвий каркас прямокутної форми, на який на¬мотано тонкий мідний або алюмінієвий дріт діаметром від 0,03 до 0, 2 мм. За рамкою з обох боків скріплені півосі 8. Ця система забезпе¬чує вільне обертання рамки навколо осердя, а отже, і відхилення скріпленої з нею стрілки 1 відносно шкали. Струм до рамки підводи¬ться через затискачі 2 і дві спіральні пружини 9> які створюють про¬тидіючий момент. При проходженні струму I через рамку на неї діє обертальний момент

$$\vec{M}_1 = [\vec{p}_m \cdot \vec{B}];\ M_1 = nISB\sin\alpha = K_1 I,$$

де $p_m = nIS$ — магнітний момент струму; α — кут між p_m і B, в даному випадку дорівнює π/2 ; n — кількість витків рамки; B — магнітна індукція; S — площа рамки; K_1— коеффіцієнт пропорційності. Цей момент зрівноважується протидіючим моментом деформації спіральних пружин при повертанні рамки на кут φ, тобто

$$M_2 = K_2\varphi,$$

де K_2— стала деформації крутіння пружини. Якщо $M_1 = M_2$, стрілка струмовимірювача фіксується на якійсь поділці шкали. Тоді $K_1 I = K_2\varphi$, звідки

$$\varphi = \frac{K_1}{K_2} I = KI. \quad \text{(а)}$$

Отже, кут повороту рамки пропорційний силі струму. Коефіцієнт пропорційності К залежить від конструкції приладу.

З рівняння (а) безпосередньо випливає, що амперметр магнітоелектричної системи придатний для вимірювань тільки постійного струму і його шкала є рівномірною. Чутливість приладів цієї системи підвищується при збільшенні I зменшенні K_2.

Перевагами магнітоелектричних приладів є: висока чутливість (відомі мікроамперметри з струмом повного відхилення 0,01 мкА); можливість виготовлення високоточних приладів (класів точності’0,05; 0,1; 0,2); мале споживання електричної енергії (10^{-5}—10^{-6} Вт у рамках і до кількох десятих вата разом з вимірювальною схемою).

Недоліки цих приладів: порівняно складна будова, чутливість до перевантажень, можливість вимірювання тільки постійних струмів. Завдяки високій чутливості магнітоелектрична система використо¬вується для побудови гальванометрів.

Гальванометрами називають високочутливі прилади, які мають неградуйовану шкалу. Ціна поділки шкали визначається експериментально або за паспортом приладу. Діапазон вимірюваних струмів досить широкий: від 10^{-5}до 10^{-11} А. Найбільш поширеними є гальванометри магнітоелектричної системи з рухливою рамкою, наприклад, типу М21 (рис. 145). Безкаркасна рамка 4 підвішена на пружній нитці

Сгрум I подається через металеву стрічку 1 і підвіс 3. Кут повороту рамки вимірюється оптичним методом за допомогою дзеркальця 2

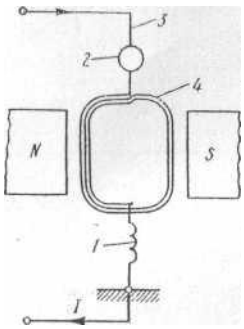


Рис. 145

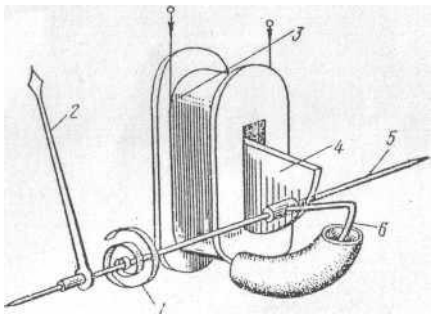


Рис. 146

і шкали. На дзеркальце від лампи спрямовують вузький світловий пучок, який після відбивання падає на шкалу з міліметровими поділками у вигляді світлового «зайчика». Шкала встановлюється на відстані 1—2 м від дзеркальця паралельно йому. При повертанні рамки і дзеркальця «зайчик» переміщується вздовж шкали.

Прилади електромагнітної системи складаються з плоскої або круглої нерухомої котушки, на яку намотаний мідний провід, і рухливого осердя, виготовленого з м'яких магнітних матеріалів (електротехнічна сталь, пермалой). Принцип дії приладів цієї системи заснований на взаємодії магнітного поля котушки,по якій проходить струм, з рухливим феромагнітним осердям (рис. 146). Вимірюваний струм ,що проходить по котушці 3, створює магнітне поле. В це поле втягується осердя у вигляді стальної пластинки 4, закріпленої на осі 5. Намагніченість осердя і саме магнітне поле котушки пропорційні струму, отже, обертальний момент пропорційний квадрату струму:

$$M_1 = k_1 I^2,$$

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

Протидіючий момент M_2 створюється пружиною I. Він пропорційний куту повороту рухливої частини приладу:

$$M_2 = k_2 \varphi,$$

де k_2— коефіцієнт пропорційності, який залежить від пружних властивостей пружини.

Для швидкого заспокоєння рухливої частини приладу і стрілки 2 застосовують повітряні демпфери (заспокоювачі 6). Демпфер — це камера, в якій рухається алюмінієвий поршень. При повороті осердя поршень зазнає опору повітря.

Рівновага рухливої частини приладу визначається рівністю протилежно напрямлених моментів: $M_1=M_2$. Звідси $\varphi = kI1^2$,де $k=k_1/k_2$. Отже, шкала електромагнітного приладу нерівномірна, квадратична. Із зміною напряму струму змінюється як напрям магнітного поля, так і намагніченість осердя. Отже, прилади цієї системи застосовуються для вимірювань постійного і змінного струмів. В останньому випадку вони реагують па діюче значення змінного струму. їх використовують також для вимірювання напруги в електричному колі. Завдяки простоті конструкції, механічній міцності і стійкості до перевантажень прилади широко застосовують у техніці. Недоліки приладів електромагнітної системи: нерівномірність шкали (частково її можна поліпшити добором певної форми осердя), менша точність порівняно з магнітоелектричними приладами, залежність показів від зовнішніх магнітних полів (через малі власні магнітні поля котушки). Для зменшення впливу зовнішніх магнітних полів прилади покривають металевими кожухами або виготовляють астатичними (з двома котушками, ввімкненими послідовно; напрям обмоток і струмів задається таким, що їхні магнітні потоки стають однаковими за величиною і протилежними за напрямом).

Прилади електродинамічної системи відзначаються тим, що їхня дія грунтується на взаємодії магнітних полів двох котушок (рухомої і нерухомої) із вимірюваним струмом. Одна із вза¬ємодіючих котушок (рис. 147) 5 нерухома і складається з двох послі¬довно з єднаних котушок, між якими є зазор. В ньому розміщується вісь обертання рухомої безкаркасної котушки 4\ з віссю скріплена стрілка-покажчик 3 з алюмінієвою пластинкою повітряного демпфера 1На осі також закріплені ізольовано кінці двох спіральних пружин 2, які призначені для підведення вимірюваної сили струму і створення протидіючого моменту. Власне магнітне поле котушок мале, тому для захисту їх від впливу зовнішніх полів застосовують екранування або прилади виготовляють астатичними.

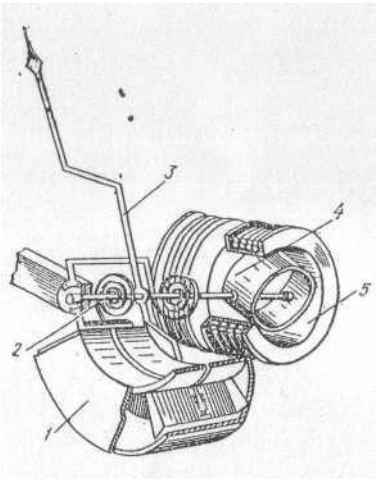


Рис. 147

Котушки в приладах електродинамічної системи залежно від призначення їх з'єднуються послідовно або паралельно. Якщо котушки приладу з'єднати паралельно, то його можна використовувати як амперметр (нерухома котушка при цьому виконує роль шунта). Якщо обидві котушки з'єднати послідовно і приєднати до них послідовно додатковий опір, то прилад може використовуватись як вольтметр. У ватметрах нерухома котушка вмикається в коло струму послідовно, а рухома котушка з додатковим опором—паралельно споживачам енергії.

У першому наближенні обертальний момент /Их при взаємодії котушок пропорційний струмам в них I_1 і I_2:

$$M1=k_1I_1I_2$$

де $к_1$— коефіцієнт пропорційності, який залежить від конструкції і розміщення котушок. Протидіючий момент M_2 створюється пружи¬нами. Він пропорційний куту повороту котушки:

$$M_2 = k_2\varphi,$$

де k_2— коефіцієнт пропорційності, який залежить від пружних властивостей пружин.

Якщо $M_1 = M_2$ то стрілка-покажчик приладу стане в положення рівноваги. Позначивши k_2/k_1 через k, матимемо

$$\varphi = kI_1I_2.$$

Якщо котушки з'єднати послідовно, то $\varphi = kI^2$. Отже, шкала приладу нерівномірна. Добором конструкції котушок можна зменшити нерівномірність шкали.

Прилади електродинамічної системи мають свої переваги: їх можна застосовувати для вимірювань в колах постійного і змінного струмів, відзначаються вони високою точністю, зумовленою відсутністю в котушках металевих частим. Недоліки приладів цієї системи: низька чутливість, вплив зовнішніх магнітних полів на точність показів приладу, чутливість до перевантажень, нерівномірність шкали (крім ватметра).

Прилади індукційної системи характеризуються тим, що принцип їхньої дії грунтується на взаємодії вихрових індукційних струмів в рухомій частині приладу(алюмінієвий диск, насаджений на вертикальну вісь) із змінними магнітними потоками нерухомих електромагнітів (один з електромагнітів має обмотку з товстого ізольованого дроту, яка є обмоткою струму і вмикається в коло послідовно з навантаженням; другий електромагніт має обмотку з тонкого ізольованого дроту, яка є обмоткою напруги і вмикається в коло паралельно навантаженню). Серед приладів індукційної системи широке застосування мають лічильники електричної енергії змінного струму.

Прилади електростатичної системи побудовані на принципі взаємодії рухомих і нерухомих електрично заряджених пластин. У всіх електростатичних механізмах при переміщенні рухомої частини змінюється електроємність між пластинами внаслідок зміни їх активної площі або відстані між ними. Електростатичні прилади використовуються головним чином для вимірювання напруги в колах постійного і змінного струмів в широкому діапазоні частот. Наприклад, вітчизняні лабораторні електростатичні вольтметри С95 класу 1,5мають межі вимірювання від ЗО В до 3 кВ. Покази їх при частоті 10 МГц відрізняються від показів при постійному струмі не більш як на 1,5 %.

Прилади електронної системи (електронні вольтметри) являють собою поєднання вимірювальної схеми, яка містить електронні лампи або напівпровідникові прилади, і вимірювального механізму магнітоелектричної або електростатичної системи.Прилади електронної системи використовуються для вимірювання в радіоелектронних схемах напруг і частот значних діапазонів. Для них характерні великі вхідні опори (1 — 10 МОм і більше), тому їх широко застосовують для вимірювання напруги високоомних малопотужних джерел.

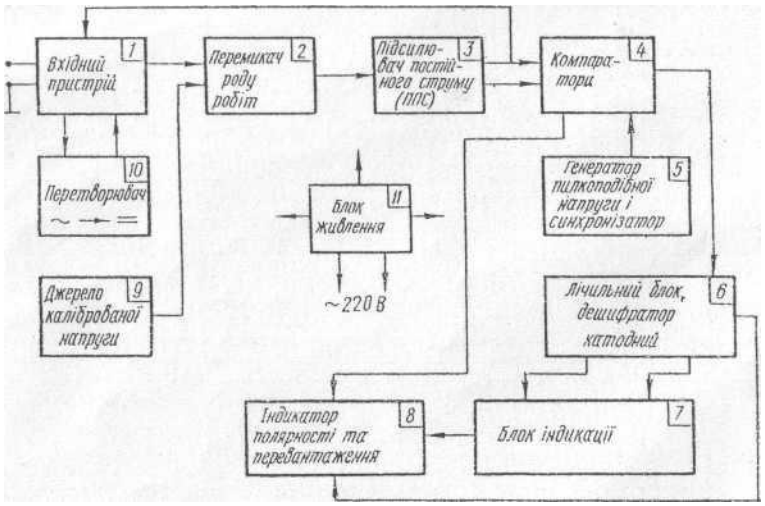
Цифрові прилади невідому величину, що вимірюється, визначають в дискретно-цифровій формі за допомогою цифрових індикаторів.

Цифрові прилади мають ряд переваг над звичайними, основні з яких: висока точність; швидкість вимірювання, об'єктивність і повна автоматизація процесу вимірювання, можливість передачі результатів на відстані тощо. Поряд з цим є і певні недоліки: складність схеми, по¬рівняно великі габарити, менша надійність, ніж звичайних. Найбільш поширеними цифровими приладами є цифрові вольтметри.

Універсальні цифрові вольтметри призначені для автоматичного вимірювання сталої і змінної напруг, струму та активних опорів. Ши¬роко застосовуються в електроніці, для наукових, ремонтних і регламентних робіт та для перевірки приладів нижчого класу точності.

Спрощену структурну схему універсального цифрового вольтметра зображено на рис. 148. Вимірювана напруга постійного або змінного струму подається на вхідні гнізда пристрою 1. У вхідному пристрої постійна напруга за допомогою дільника приводиться до номінального значення (наприклад, для вольтметра В7-16 до 1 В; ВК7—10А (1 до 10 В), а далі надходить на вхід підсилювача постійного струму З (ППС).Змінна напруга приводиться до номінального

значення, перетворюється на постійну (блок 10) і надходить до ППС. Перемикач роду робіт 2 ставиться в положення,що відповідає вимірюваній величині. Сигнал із гнізда для вимірювання активного опору R безпосередньо передається на вхід блока ППС. Вимірювання опору здійснюється шляхом перетворення R в пропорційну напругу постійного струму. Сигнали із ППС подаються до блока 4, що складається з двох компараторів (сигнального та нульового), кожний з яких має два входи. На перші входи компараторів подається пилкоподібна напруга з блока «5, на другий вхід сигнального компаратора подається вихідна напруга з блоків ППС (другий вхід нульового компаратора заземлений). В компараторі також формується імпульс, який подається до лічильного блока 6. Імпульси з блока 6 надходять через спеціальний пристрій до блока індикації 7, на якому зосереджується кінцева інформація.



Таблиця 5. **Умовні позначення на шкалах електровимірювальних приладів**

Позначення принципу дії приладу	Умовне позначення
Магнітоелектричний з рухомою рамкою	
Магнітоелектричний з рухомим магнітом	
Логометр магнітоелектричний	
Електромагнітний	
Електродинамічний	
Індукційний	
Вібраційний	
Електростатичний	
Додаткові позначення	
Термоперетворювач неізольований	
Термоперетворювач ізольований	
Перетворювач електронний у вимірювальному колі	
Випрямляч напівпровідниковий	
Напруга випробувальна 500 В	
Напруга випробувальна, більша за 500 В, наприклад, 2 кВ	2
Посилання на відповідний документ	
Резистор	
Екран електростатичний	

Міністерство освіти і науки України
Прикарпатський національний університет імені Василя СтефаникаФізико-технічний факультет
Кафедра фізики і методики викладання

Лабораторна робота № 2 (ФПЕ-03м)

ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА ДО ЙОГО МАСИ МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

м. Івано-Франківськ

<u>Мета роботи</u>: вимірювання питомого заряду електрона ($\frac{e}{m}$) методом магнетрона

<u>Загальні відомості</u>

На заряджену частинку, яка рухається у електричному і магнітному полях з боку цих полів діє сила Лоренца яка визначається

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + [\vec{v}\vec{B}]\right),$$

де q – заряд частинки, $\vec{v}$ – її швидкість, $\vec{E}$ - напруженість електричного поля, $\vec{B}$ – індукція магнітного поля.

На заряджену частинку, яка рухається в тільки у магнітному полі, діє магнітна складова сили Лоренца:

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

Напрям сили перпендикулярний до площини, в якій лежать вектори $\vec{v}$ і $\vec{B}$. Модуль сили:

$$F = qvB\sin\alpha,$$

де α – кут між векторами $\vec{v}$ і $\vec{B}$.

Траєкторія руху зарядженої частинки в магнітному полі визначається конфігурацією магнітного поля, орієнтацією вектора швидкості і відношенням заряду частинки до її маси.

<u>Метод вимірювання</u>

Існують різні методи визначення відношення $\frac{e}{m}$, в основі яких лежать результати дослідження руху електрона в електричному і магнітному полях. Один з них - метод магнетрона. Називається він так тому, що конфігурація полів в ньому нагадує конфігурацію полів в магнетронах - генераторах електромагнітних коливань надвисоких частот. Суть методу полягає в наступному: спеціальна двоелектродна вакуумна лампа, електроди якої є коаксіальними циліндрами, поміщена у соленоїд так, що вісь лампи співпадає з віссю соленоїда. Електрони, що

вилітають з катода лампи, за відсутності струму в соленоїді рухаються радіально до анода. При підключенні струму до соленоїда в лампі створюється магнітне поле, паралельне осі лампи, і на електрони починає діяти магнітна складова сили Лоренца (магнітна сила):

$$\vec{F} = e[\vec{v}\vec{B}], \qquad (1)$$

де e - заряд електрона, $\vec{v}$ - швидкість електрона, $\vec{B}$ - індукція магнітного поля.

Під дією цієї сили, яка завжди перпендикулярна до вектора швидкості, траєкторія електронів викривляється. При певному співвідношенні між швидкістю електрона і індукцією магнітного поля електрони перестають поступати на анод, і струм в лампі зникає.

Розглянемо докладніше рух електронів в лампі за наявності магнітного поля. Для опису цього руху скористаємося циліндричною системою координат (рис.1), в якій положення електрона визначається відстанню його від осі лампи *r*, полярним кутом φ і зсувом уздовж осі *z*. Електричне поле, що має тільки радіальну компоненту, діє на електрон з силою, направленою по радіусу від катода до анода. Магнітна сила, що діє на електрон, не має складової, паралельної осі *z*. Тому електрон, що вилетів з катода, рухається в площині, перпендикулярній осі *z*. Початкову швидкість електрона, що визначається температурою катода, і є набагато меншою від швидкості, якої надає електрону електричне поле лампи можна вважати рівною нулю.

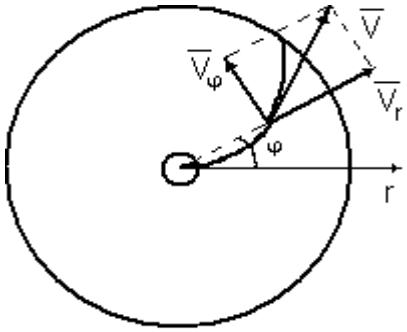


рис. 1

Момент імпульсу *L* електрона відносно осі *z* рівний:

$$L_z = mv_\varphi r, \qquad (2)$$

де $v_\varphi = r\dfrac{d\varphi}{dt}$ - складова швидкості, перпендикулярна радіусу r.

Момент сили *M*, що діє на електрон, відносно осі *z* визначається складовою магнітної сили, що перпендикулярна до r. Моменти електричної сили і складової

магнітної сили, напрямленої уздовж радіуса r відносно осі z рівні нулю. Таким чином:

$$M_z = rF_\varphi = erv_r B, \tag{3}$$

де $v_r = \dfrac{dr}{dt}$ - радіальна складова швидкості електрона.

Згідно рівнянню моментів:

$$\frac{dL}{dt} = M. \tag{4}$$

Проектуючи (4) на вісь z, одержуємо

$$\frac{d(mv_\varphi r)}{dt} = erv_r B = er\frac{dr}{dt}B,$$

$$\frac{d(mv_\varphi r)}{dt} = \frac{1}{2}eb\frac{d(r^2)}{dt}. \tag{5}$$

Проінтегрувавши (5), одержуємо:

$$mv_\varphi r = \frac{1}{2}eBr^2 + const.$$

Константу знайдемо з початкових умов: при $r = r_k$ (де r_k - радіус катода) $v_\varphi = 0$. Тоді

$$const = -\frac{1}{2}eBr_k^2$$

і

$$v_\varphi = \frac{1}{2}\frac{e}{m}\frac{b}{r}\left(r^2 - r_k^2\right). \tag{6}$$

Кінетична енергія електрона дорівнює роботі сил електричного поля:

$$\frac{m\left(v_\varphi^2 + v_r^2\right)}{2} = eU \tag{7}$$

де U - потенціал точки поля, в якій знаходиться електрон відносно катода. Підставляючи в (7) значення v_φ з (6), одержуємо:

$$eU = \frac{m}{2}\left[v_r^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{e}{m}\right)^2\frac{B^2}{r^2}\left(r^2 - r_k^2\right)^2\right] \tag{8}$$

При деякому значенні індукції магнітного поля B_{kp}, яке називають критичним, швидкість електрона поблизу анода буде перпендикулярна радіусу r, тобто $v_r = 0$. Тоді з рівняння (8) отримаємо:

$$eU_a = \frac{m}{8}\left(\frac{e}{m}\right)^2 \frac{B_{kp}^2}{r_a^2}\left(r_a^2 - r_k^2\right)^2$$

де U_a - потенціал анода щодо катода (анодна напруга), r_a - радіус анода.

Звідси знаходимо вираз для питомого заряду електрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{kp}^2 r_a^2\left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2}\right)^2} \tag{9}$$

Індукція магнітного поля соленоїда, довжина L якого співмірна з діаметром D, знаходиться за формулою:

$$B_{kp} = \mu_0 n I_{kp} \frac{L}{\sqrt{L^2 + D^2}} = \frac{\mu_0 N I_{kp}}{\sqrt{L^2 + D^2}} \tag{10}$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\,\frac{Гн}{м}$ - магнітна постійна, n - кількість витків на одиницю довжини соленоїда, N - кількість витків соленоїда.

Таким чином, експериментально визначивши B_{kp}, можна обчислити величину $\frac{e}{m}$. Для знаходження B_{kp} в лампі слід встановити різницю потенціалів між анодом і катодом і, включивши струм в соленоїді, поступово збільшувати магнітне поле в лампі. Якби всі електрони покидали катод із швидкістю рівною нулю, то залежність величини анодного струму від величини індукції магнітного поля мало б вигляд, показаний на рис.2. (пунктирна лінія).

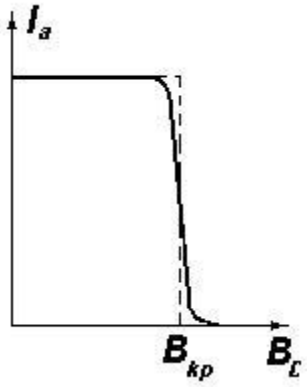


Рис.2.

В цьому випадку при $B < B_{kp}$ всі електрони, що випускаються катодом, досягали б анода, а при $B > B_{kp}$ жоден електрон не потрапляв би на анод. Проте деяка некоаксіальність катода і анода, наявність залишкового газу в лампі, спад напруги уздовж катода, неоднорідність поля соленоїда по висоті анода і т.д. призводить до того, що критичні умови досягаються для різних електронів при різних значеннях B. Все ж перелом кривої залишиться достатньо різким і може бути використаний для визначення B_{kp}.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з установкою для вимірювання питомого заряду електрона. Спрощена електрична схема установки для визначення питомого заряду електрона представлена на рис.1.

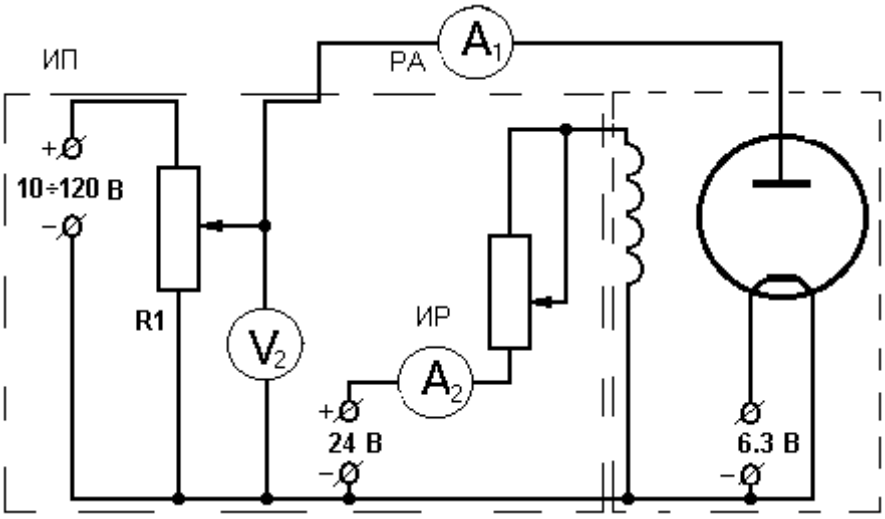


рис.1.

2. З`єднайте касету ФПЕ-03м з джерелом живлення штатним кабелем, при цьому тумблер живлення повинен знаходитися в положенні "Вимкнено". Всі ручки регулювання напруги на блоці живлення перевести в крайнє проти годинникової стрілки положення.

3. Запустити програму ФПЕ-03м.exe. Включити живлення касети ФПЕ-03м.

4. Встановити анодну напругу U_a приблизно *50В*, контролюючи його значення за показами вольтметра у вікні відображення вимірюваних величин. **У процесі вимірювання анодна напруга не повинна змінюватися.**

5. Змінюючи струм в соленоїді від мінімального (початкового) значення до максимального через *0.1 А* при постійній анодній напрузі, зняти спадну характеристику, тобто залежність анодного струму I_a від струму в соленоїді I_c. Значення анодного струму I_a, і значення струму в соленоїді I_c, будуть автоматично занесені в таблицю вимірювань при натисненні кнопки «Внести в список».

4. Повторити пп. 2 і 3 при інших значеннях анодної напруги (*60, 75, 90, 105*). Результати вимірювань занести в таблиці.

5. Для кожного значення анодної напруги будується спадна характеристика (рис.2) (по осі ординат відкладається значення анодного струму, а по осі абсцис - значення струму в соленоїді).

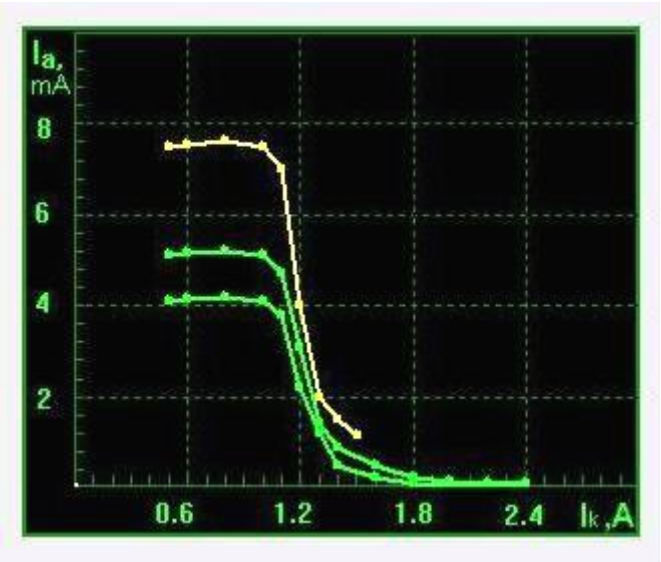


Рис.2

Для знаходження критичного значення струму в соленоїді I_{kp} необхідно провести до взаємного перетину дотичну до точки перегину спадів характеристики (на ділянці її спаду) і пряму, відповідну зміні мінімальних значень анодного струму (як показано на рис.3).

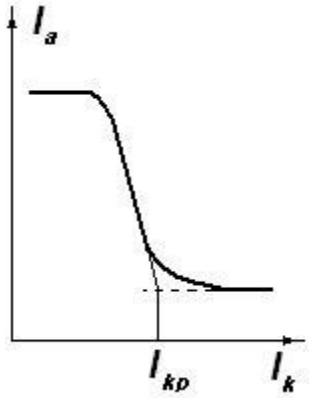


Рис. 3

Занести значення I_{kp} в таблицю.

№	Ua, B	Ікр, A	Вкр	e/m
1				
2				
3				
4				
5				

6. Для кожного критичного значення струму в соленоїді розрахувати за формулою (10) індукцію магнітного поля. Величини, що потрібні для розрахунку:

$L = 167мм$ - довжина котушки,

$D = 62мм$ - діаметр котушки,

$N = 2010$ - число витків,

$r_a = 6мм$ - радіус анода,

$r_k = 0,3мм$ - радіус катода

7. Обчислити $\frac{e}{m}$ за формулою (9) для кожного значення критичного поля в соленоїді і визначити її середнє значення.

8. Обчислити похибку одержаної величини $\frac{e}{m}$.

Контрольні питання

1. У чому суть методу магнетрона для визначення відношення $\frac{e}{m}$?

2. Чи впливає на величину B_{kp} зміна напряму струму в соленоїді на протилежний?

3. Чи залежить величина $\frac{e}{m}$ від величини анодної напруги ?

4. Магнітне поле соленоїда.

5. Розглянути рух електрона в однорідному магнітному полі в двох випадках:

   а) швидкість електрона перпендикулярна до індукції магнітного поля;

   б) швидкість електрона напрямлена під кутом α до напрямку поля.

6. Інші методи визначення питомого заряду електрона.

Міністерство освіти і науки України
Прикарпатський національний університет імені Василя СтефаникаФізико-технічний факультет
Кафедра фізики і методики викладання

Лабораторна робота № 3

ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ ОМА ДЛЯ НЕОДНОРІДНОЇ ДІЛЯНКИ КОЛА

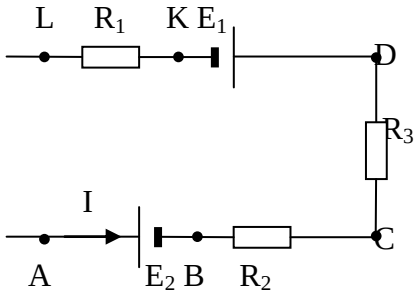
м. Івано-Франківськ

Прилади й матеріали:
1. Джерела постійного струму.
2. Міліамперметр.
3. Вольтметр.
4. Магазини опорів.
5. Ключ.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Закон Ома для однорідної ділянки кола, тобто такої, яка не має стрибків потенціалу за рахунок контактних явищ або дії електрорушійних сил: $I = \frac{U}{R}$, де U – напруга на кінцях ділянки, R – опір ділянки.

Розглянемо неоднорідну ділянку кола:



Різниця потенціалів φ_{AL} між точками A і L на кінцях неоднорідної ділянки рівна сумі різниць потенціалів на кожній із частин ділянки:

$$\varphi_{AL}=\varphi_{AB}+\varphi_{BC}+\varphi_{CD}+\varphi_{DK}+\varphi_{KL}$$

Якщо джерела ЕРС увімкнуті так, як показано на схемі, то відповідні різниці потенціалів:

$$\varphi_{AB}=E_2$$
$$\varphi_{DK}=E_1$$

(Якщо вони будуть ввімкнуті в протилежний бік, то різниці потенціалів будуть рівні від'ємним значенням відповідних ЕРС).

При проходженні по ділянці кола електричного струму на резисторах також виникає різниця потенціалів, яка визначається законом Ома для однорідної ділянки. Якщо напрям струму такий, як показано на схемі, то відповідні різниці потенціалів:

$$\varphi_{BC}=IR_2$$
$$\varphi_{CD}=IR_3$$
$$\varphi_{KL}=IR_1$$

Отже:

$$\varphi_{AL}=I(R_1+R_2+R_3)+E_1+E_2$$

або:

$$I(R_1+R_2+R_3)=\varphi_{AL}-E_1-E_2$$

Отже, для випадку ввімкнення, показаного на електричній схемі, маємо такий вираз для сили струму:

$$I = \frac{U - E_1 - E_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

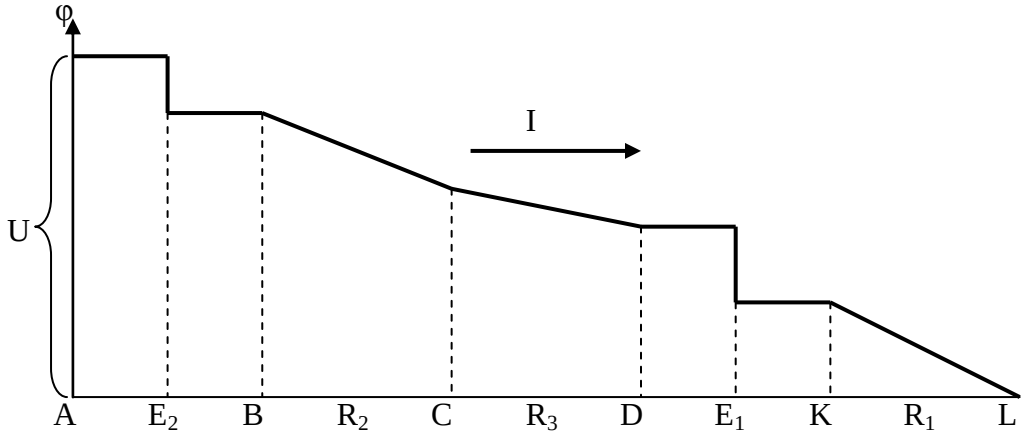
де $U=\varphi_{AL}$ – напруга на кінцях неоднорідної ділянки кола.

В загальному ж випадку сила струму на неоднорідній ділянці кола визначається законом Ома для неоднорідної ділянки кола:

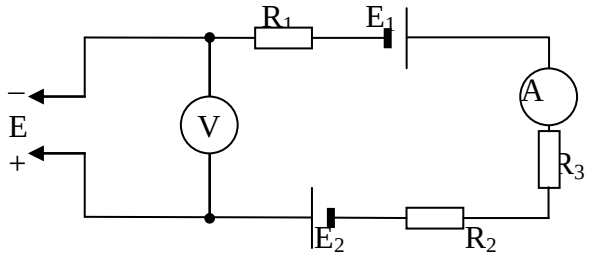
$$I = \frac{U + \sum_{i=1}^{k} E_i}{\sum_{i=1}^{n} R_i}$$

Для того, щоб правильно розставити знаки в даній формулі, потрібно вибрати напрям струму. Нехай вибрано такий напрям, як показано на схемі. Якщо потенціал точки A більший, ніж потенціал точки L, то перед U ставимо знак “+”, якщо навпаки – знак “–“. Якщо в напрямку проходження струм спочатку зустрічає негативний полюс джерела ЕРС, а потім позитивний, то перед ЕРС ставимо знак “+”, якщо навпаки – то знак “–“.

Зміну потенціалу в неоднорідному колі даної електричної схеми можна наочно проілюструвати наступним чином (тут не дотриманий правильний масштаб):



Повна електрична схема має такий вигляд:



ХІД РОБОТИ

1. **Перед ввімкненням схеми необхідно вивести опір на магазинах опорів на максимум!!!**
2. Перевірити правильність з’єднання схеми.
3. Ввімкнути схему.
4. Підібрати опори на магазинах таким чином, щоб стрілка амперметра відхилилась у другу половину шкали.
5. Записати величини опорів, електрорушійних сил джерел, напругу, яку показує вольтметр,та силу струму, яку показує амперметр.
6. Обчислити силу струму за законом Ома для неоднорідної ділянки кола і порівняти її з виміряною.
7. Побудувати графік зміни потенціалу на ділянці кола з дотриманням масштабу.

R_1, Ом	R_2, Ом	R_3, Ом	E_1, В	E_2, В	U, В	I, мА (вимір)	I, мА (обчисл)	ΔI, мА

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Однорідна ділянка кола.
2. Неоднорідна ділянка кола.
3. Закон Ома для однорідної ділянки кола.
4. Закон Ома для неоднорідної ділянки кола.
5. Закон Ома для повного кола.
6. Закон Ома для досліджуваної ділянки кола.
7. Як правильно вибрати знаки перед ЕРС у законі Ома для неоднорідної ділянки кола?
8. Від чого залежить напрям струму в досліджуваному колі?

9. Судячи з приведеного на рисунку графіка зміни потенціалу, розставити за величиною опори й ЕРС.
10. Записати закон Ома для заданої викладачем неоднорідної ділянки кола.
11. Пояснити приведений на рисунку графік зміни потенціалу для неоднорідної ділянки кола.
12. Зобразити графік зміни потенціалу для заданої викладачем неоднорідної ділянки кола.

Міністерство освіти і науки України
Прикарпатський національний університет імені Василя СтефаникаФізико-технічний факультет
Кафедра фізики і методики викладання

Лабораторна робота № 4

ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ КІРХГОФА

м. Івано-Франківськ

Прилади й матеріали:
1. Джерело струму на 2-3 В, на 6-8 В.
2. Амперметри (0,25-1 А).
3. Вимикачі.
4. Магазини опорів.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

У складних електричних колах струми й інші величини розраховують за законами Кірхгофа. Закони Кірхгофа базуються на тому експериментальному факті, що в електричних колах з усталеними постійними струмами скупчення зарядів у провідниках не спостерігається. Тому розподіл струмів і потенціалів у всіх точках складного кола залишається незмінним. Закони Кірхгофа є дальшим узагальненням закону Ома для неоднорідних замкнених кіл і застосовуються для розрахунків розгалужених кіл.

I. Взаємозв'язок між струмами, що сходяться у вузлі. **У кожному вузлі, де сходяться 3 і більше струмів, їхня алгебраїчна сума =0**:

$$\Sigma I_i=0$$

Знак I_i визначається напрямком струму відносно вузла: якщо струми, які входять у вузол, вважати додатними, то струми, які виходять із вузла – від'ємні. Кількість рівнянь, які складають за I законом Кірхгофа, на 1 менша кількості вузлів на схемі.

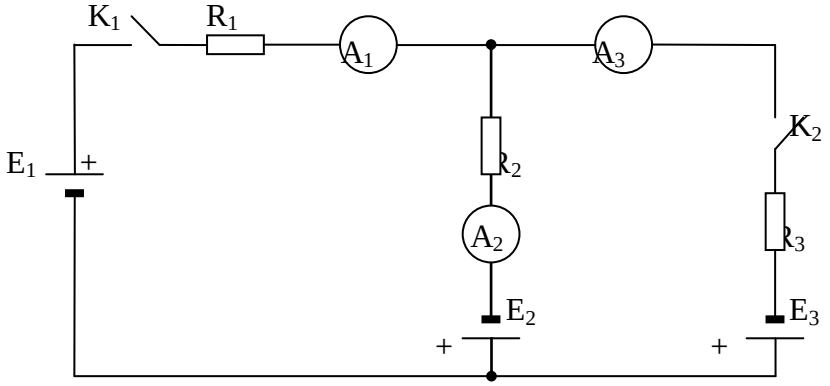
II. **У будь-якому простому замкнутому контурі алгебраїчна сума добутків сил струмів на опори відповідних ділянок цього контуру дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС, що діють у цьому контурі:**

$$\Sigma I_i R_i=\Sigma E_k$$

При цьому дотримуємось правила знаків:
- для всіх замкнутих контурів вибираємо однаковий напрям обходу (нехай – за годинниковою стрілкою);
- струми, які співпадають із напрямом обходу, беремо з "+", а протилежні – із "–";
- ЕРС вважається позитивною, якщо у вибраному напрямку спочатку проходиться негативний полюс, а потім – позитивний, і навпаки.

Кількість рівнянь, які складають за II законом Кірхгофа, на 1 менша кількості замкнутих контурів на схемі.

Щоб перевірити закони Кірхгофа, доцільно скласти електричне коло, до якого входять відомі опори та електрорушійні сили. За складеними рівняннями Кірхгофа визначають струми для кожної вітки. Обчислені значення струмів перевіряють на досліді за допомогою амперметрів, увімкнених у відповідні вітки за схемою, зображеною на рисунку.



ХІД РОБОТИ

1. Перевірити, чи складене електричне коло за схемою, зображеною на рисунку.
2. Підібрати опори магазинів так, щоб на амперметрах були покази, і виміряти струми у вітках.
3. Виміряти вольтметром ЕРС джерел струму.

4. Записати всі експериментальні дані в таблицю.
5. Відмітити на схемі вибрані напрямки струмів та напрямки обходу контурів.
6. Скласти рівняння Кірхгофа, обчислити по них струми у кожній з віток і порівняти їх з експериментально виміряними.

Експериментальні дані (виміряні)			*Обчислено*	*Відхилення*
E_1= В	R_1= Ом	I_1= мА	I_1= мА	ΔI_1= мА
E_2= В	R_2= Ом	I_2= мА	I_2= мА	ΔI_2= мА
E_3= В	R_3= Ом	I_3= мА	I_3= мА	ΔI_3= мА

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Сформулювати I правило Кірхгофа.
2. Показати вузли електричної схеми.
3. Записати рівняння по I правилу Кірхгофа для досліджуваної схеми.
4. Сформулювати II правило Кірхгофа.
5. Показати замкнуті контури електричної схеми.
6. Сформулювати правила знаків для II правила Кірхгофа.
7. Записати 2 рівняння по II правилу Кірхгофа для досліджуваної схеми.
8. Як слід тлумачити одержані іноді при розрахунках від'ємні значення сили струму?
9. Пояснити I правило Кірхгофа.
10. Сформулювати закон Ома для однорідної й неоднорідної ділянок кола.
11. Записати закон Ома для кожної з віток електричного кола, тобто різницю потенціалів між різними точками схеми.
12. Записати суму різниць потенціалів для замкнутого контуру.
13. Вивести II правило Кірхгофа.

Міністерство освіти і науки України
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника
Фізико-технічний факультет
Кафедра фізики і методики викладання

Лабораторна робота № 5 (ФПЕ-05м)

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА ВЗАЄМОІНДУКЦІЇ.

м. Івано-Франківськ

<u>Мета роботи</u>: дослідження явища взаємоіндукції двох коаксіально розташованих котушок.

<u>Загальні відомості</u>

Розглянемо два індуктивно зв'язаних контури із струмами I_1 і I_2 (рис.1), які мають N_1 і N_2 витків відповідно і коефіцієнти самоіндукції L_{11} і L_{22}. Повний потік вектора магнітної індукції B, охоплений витками першого контуру

$$\Phi_1 = \Phi_{11} + \Phi_{12} \qquad (1)$$

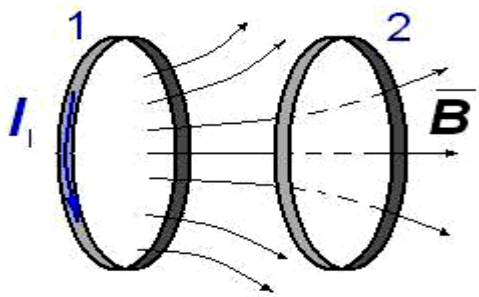


рис.1

де Φ_1 – магнітний потік крізь перший контур, створений струмом I_1; Φ_{11} – частина магнітного потоку в першому контурі, створена струмом I_1, Φ_{12} – частина магнітного потоку в першому контурі, створена струмом I_2.

Аналогічно повний потік, який пронизує витки другого контуру

$$\Phi_2 = \Phi_{22} + \Phi_{21} \qquad (2)$$

Магнітні потоки в кожному контурі пропорційні струму в них

$$\Phi_{11} = L_{11} I_1 \qquad (3)$$

$$\Phi_{22} = L_{22} I_2 \qquad (4)$$

Потік Φ_{12}, створюється магнітному полем струму I_2 в другому контурі. Тому:

$$\Phi_{12} = L_{12} I ,$$

де L_{12} – коефіцієнт взаємоіндукції першого контуру. Аналогічно для другого контуру

$$\Phi_{21} = L_{21} I$$

Тоді рівняння (1) і (2) перепишемо

$$\Phi_1 = L_{11} I_1 + L_{12} I_2 \qquad (5)$$

Відповідно ЕРС індукції, які виникають в контурах, будуть

$$E_{i1} = -\frac{d\Phi_1}{dt} = -(L_{11}\frac{dI_1}{dt} + L_{12}\frac{dI_2}{dt}) \qquad (6)$$

$$E_{i2} = -\frac{d\Phi_2}{dt} = -(L_{22}\frac{dI_2}{dt} + L_{21}\frac{dI_1}{dt}) \qquad (7)$$

На основі теореми взаємності, яка встановлює зв'язок між двома джерелами струму і створеними ними ж полями в місцях розташування джерел у неферомагнітних середовищах, можна стверджувати, що коефіцієнти взаємоіндукції довільних двох контурів рівні:

$$L_{12} = L_{21}$$

Доведемо це для двох індуктивно зв'язаних контурів, по яких проходять струми I_1 і I_2. Припустимо, що контур, в якому протікає струм I_1, нерухомий, а контур, в якому протікає струм I_2, переміщається з нескінченності в задане положення. При цьому магнітний потік крізь другий контур, створений струмом в першому контурі, змінюватиметься від 0 до Φ_{12}, а робота по його переміщенні

$$A_1 = I_1 \Phi_{12} = L_{12} I_1 I$$

Якщо другий контур нерухомий, а перший переміщається з нескінченності в задане положення, то виконується робота

$$A_2 = I_2 \Phi_{21} = L_{21} I_2 I$$

У кожному з наведених випадків робота визначається мірою взаємної енергії в контурах із струмами I її значення не залежить від того, який з контурів переміщався. Отже $A_1=A_2$, і $L_{12}=L_{21}$.

Коефіцієнт взаємоіндукції є мірою магнітного зв'язку між контурами і залежить від геометричної форми, розмірів і взаємного розміщення контурів зі струмами, а також магнітних властивостей середовища, де розташовані контури. В системі СІ коефіцієнти взаємної індукції вимірюються в Генрі. Розрахунки коефіцієнта взаємної індукції в загальному випадку є достатньо складними.

Метод вимірювань

У даній роботі вивчається явище взаємної індукції між двома близькими за розмірами котушками 1 і 2. Котушка 1 вставляється в котушку 2 і може переміщатися уздовж її осі. Живлення котушок (наприклад, котушки 1) здійснюється від генератора, що працює на частоті (f) 50 Гц, напруга з якого

$$U = U_0 \cos(\omega t) \qquad (8)$$

подається через опір R.

Знаючи величину спаду напруги на опорі R можна визначити струм, що протікає в колі

$$I_1 = \frac{U}{R} = \frac{U_0 \cos(\omega t)}{R} = I_{01} \cos(\omega t) \qquad (9)$$

Змінний струм в котушці 1 (за умови, що котушка 2 відключена від генератора) створює змінну ЕРС взаємоіндукції в котушці 2:

$$E_2 = -L_{12} \frac{dI_1}{dt} = L_{12} I_{01} \omega \sin(\omega t) = E_{02} \sin(\omega t) \qquad (10)$$

де амплітуда ЕРС взаємоіндукції рівна:

$$E_{02} = L_{12} I_{01} \omega = L_{12} I_{01} 2\pi f$$

Тоді

$$L_{12} = \frac{U_{L2}}{I_1 2\pi f} \qquad (11)$$

Якщо поміняти місцями котушки 1 і 2, то можна визначити L_{12}:

$$L_{21} = \frac{U_{L1}}{I_2 2\pi f}$$

Коефіцієнт L_{12} (L_{21}) можна також визначити, знаючи повний магнітний потік,

$$L_{12} = \frac{\Phi_1 - L_{11} I_1}{I_2}$$

який пронизує котушку 1 (котушку 2). Згідно (5)

Величину магнітного потоку, що пронизує котушки, можна визначити, використовуючи датчик Холла, який розташований в центрі нерухомої котушки.

Порядок виконання роботи

Завдання 1. Вимірювання коефіцієнтів індукції L_{11} і L_{22}.

1. Подати напругу на котушку 1 (за допомогою перемикача П1). При цьому струм через котушку 2 повинен бути рівний нулю (перемикач П2 розімкнений).

2. Рухому котушку 2 (використовуючи шток 1 на касеті ФПЕ) повністю всунути в котушку 1. При цьому датчик переміщення рухомої котушки повинен показувати 0.

3. Збільшуючи струм в котушці 1 (за допомогою потенціометра R1 на касеті ФПЕ) від мінімального до максимального значення, записати в таблицю 1 значення струму I_1 і магнітного потоку Φ_1. Величина магнітного потоку Φ може бути визначена з вимірювань вектора магнітної індукції B і геометричних розмірів котушки:

$$\Phi = B \cdot S$$

де S - переріз соленоїда який визначається: $S = \pi \frac{d^2}{4}$ (діаметри 1-ї та 2-ї котушок відповідно дорівнюють *55мм* і *30мм*). Для визначення величини B в даній роботі використовується датчик Холла. В цьому датчику напруга Холла U_x пов'язана з вектором магнітної індукції співвідношенням: $1мВ = 1Гс = 10^{-4} Тл$.

4. Подати напругу на котушку 2 (за допомогою перемикача П2), відключивши напругу на котушці 1 (використовуючи перемикач П1).

5. Збільшуючи струм в котушці 2 від мінімального до максимального значення записати в таблицю 1 значення струму I_2 і магнітного потоку Φ.

6. За формулами (3) і (4) розрахувати значення коефіцієнтів індукції L_{11} і L_{22}.

7. Отримані результати занести у таблицю 1.

Таблиця 1.

I_1, А	U_{x1},мВ	$Ф_1$, Вб	L_{11},Гн	I_2, А	U_{x2},мВ	$Ф_2$, Вб	L_{22},Гн

Завдання 2. Вимірювання коефіцієнтів взаємоіндукції L_{12} і L_{21}.

1. Рухому котушку 2 (використовуючи шток 1 на касеті ФПЕ-05м) повністю всунути в котушку 1. При цьому датчик переміщення рухомої котушки повинен показувати 0.

2. Подати напругу на котушку 1 (за допомогою перемикача П1). ЕРС індукції, яка виникає в котушці 2, відображатиметься в лівому вікні віртуального осцилографа. Амплітудне значення струму котушки 1 I_{01} і амплітудне значення ЕРС в другій котушці E_{02} відображаються при цьому у відповідних вікнах.

3. За формулою (11), для декількох значень струму, розрахувати коефіцієнт взаємної індукції L_{12}. Результати занести в таблицю. Частота *f* рівна *50Гц*.

4. Подати напругу на котушку 2 (за допомогою перемикача П2, відключивши котушку 1). ЕРС індукції, яка виникає в котушці 1, відображатиметься в лівому вікні віртуального осцилографа. Амплітудне значення струму котушки 2 I_{02} і амплітудне значення ЕРС в першій котушці E_{01} відображаються при цьому у відповідних вікнах.

5. За формулою (11), для декількох значень струму, розрахувати коефіцієнт взаємної індукції L_{21}. Результати занести в таблицю. Частота *f* рівна *50Гц*.

6. Отримані результати занести в таблицю 2.

Таблиця 2.

I_1, А	U_{L2}, В	L_{12}, Гн	I_2, А	U_{L1}, В	L_{21}, Гн

Завдання 3. Дослідження залежності коефіцієнтів взаємоіндукції L_{12} і L_{21} від взаємного розташування котушок.

1. Подати напругу на котушку 1 (за допомогою перемикача П1). Встановити струм I_1 в межах $0,3 \div 0,6\ A$.

2. Рухому котушку 2 (використовуючи шток 1 на касеті ФПЕ-05м) повністю всунути в котушку 1. Переміщуючи її в протилежне крайнє положення через 1см, записувати значення ЕРС взаємоіндукції в колі котушки 2 і відстань між котушками в таблицю виміряних значень.

3. За формулою (11), розрахувати коефіцієнт взаємоіндукції L_{12}. Одержані дані занести в таблицю.

4. Подавши напругу на котушку 2 (за допомогою перемикача П2, відключивши котушку 1), повторити вимірювання по пп. 2, 3 і розрахувати L_{21}.

5. Отримані результати занести в таблицю 3.

Таблиця 3.

I_1, А	U_{L2}, В	d_1, см	L_{12}, Гн	I_2, А	U_{L1}, В	d_2, см	L_{21}, Гн

6. Побудувати графіки залежності L_{12} і L_{21} як функції координати z (z – відстань між котушками).

Контрольні питання.

1. Сформулюйте закон електромагнітної індукції Фарадея і правило Ленца.
2. У чому полягає явище взаємоіндукції?
3. Чому рівна ЕРС взаємоіндукції двох контурів?
4. Від чого залежить коефіцієнт взаємоіндукції?
5. Поясніть графік залежності $L_{12}=f(z)$, отриманий в даній роботі.

Міністерство освіти і науки України
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника
Фізико-технічний факультет
Кафедра фізики і методики викладання

Лабораторна робота № 6 (ФПЕ-06м)

ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ ВИХОДУ ЕЛЕКТРОНІВ З МЕТАЛУ

м. Івано-Франківськ

<u>Мета роботи</u>: побудова і вивчення вольт - амперної характеристики діода; дослідження залежності густини струму насичення термоемісії від температури катода і визначення роботи виходу електрона з вольфраму методом прямих Річардсона.

<u>Загальні відомості</u>

Властивості металів в значній мірі визначаються станом електронів провідності, тобто електронів, здатних переміщатися в металі.

Розподіл енергії електрона для обмеженого металу зображений на енергетичній діаграмі (рис.1). За нульову енергію тут вибрана енергія вільного електрона, який знаходиться за межами металу з кінетичною енергією рівною нулю.

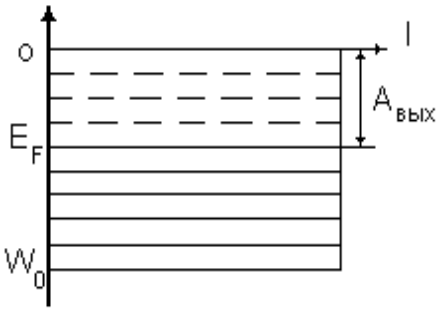


рис.1

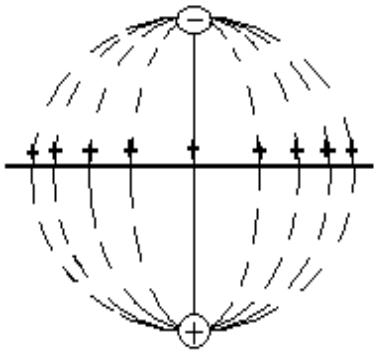


рис.2

Пунктиром зображені не зайняті енергетичні рівні при *T=0K*. Енергетичні рівні електронів позначені тонкими горизонтальними лініями, що заповнюють інтервал енергій від дна потенційної ями до енергії E_F. E_F – енергія Фермі, максимальна кінетична енергія яку може мати електрон при *T=0K*.

Електронам, що знаходяться в потенційній ямі на різних енергетичних рівнях, для виходу за межі металу необхідно мати різну енергію. Мінімальна енергія, необхідна для виходу електрона з металу:

$$A_{вих} = W_0 - E_F \qquad (1)$$

називається роботою виходу електрона з металу у вакумі при *T=0K*.

При температурі *T>0K* електрони знаходяться в тепловій рівновазі, тому до енергії Фермі додається ще теплова енергія. Величина роботи виходу залежить від стану поверхні металу. Стан рівня Фермі при нагріві металу аж до розплавлення

практично не змінюється, але при цьому виникає деяке число (невеликий відсоток) швидких електронів, які здатні подолати роботу виходу і вийти з металу.

Розглянемо природу сил, перешкоджаючих виходу електронів з металу і визначають роботу виходу $A_{вих}$. Окремі електрони провідності, рухаючись всередині металу з великими швидкостями, можуть перетинати поверхню металу. Електрон, що вилетів з металу, віддаляється від поверхні до тих пір, поки кулонівська взаємодія з надлишковим позитивним зарядом, що виник на місці, яке покинув електрон, не примусить його повернутися в метал. Процес «випаровування» і «конденсації» електронів відбувається постійно і вчерез деякий момент часу зрівноважується. Тому метал, стає, оповитий хмарою електронів, створюючих із зовнішнім шаром позитивних іонів подвійний електричний шар, подібно плоскому конденсатору. Поле подвійного шару перешкоджає виходу електронів з металу.

Іншою силою, перешкоджаючою виходу електрона з металу, є кулонівська сила індукованого ним позитивного заряду (рис.2). Ця сила носить назву "Сили електричного зображення", оскільки дія розподіленого по поверхні провідника заряду еквівалентна дії рівного по величині позитивного заряду, що є дзеркальним зображенням електрона в площині РР. Обидва ці фізичні процеси і визначають величину $A_{вих}$. При кімнатній температурі практично всі вільні електрони замкнуті в межах провідника, є лише невелика кількість електронів, енергія яких достатня для того, щоб подолати потенціальний бар'єр і вийти з металу.

Додаткової енергії електронам можна надати різними способами. При цьому частина електронів дістає можливість покинути метал і спостерігається електронна емісія. Залежно від того, яким способом електрону надали енергії, розрізняють типи електронної емісії. Якщо електрони одержують енергію за рахунок підвищення його температури, то такий вид емісії називається термоелектронною емісією. Якщо енергія надається за допомогою світла – маємо явище фотоемісії. Якщо енергія надається електронам при бомбардуванні їх ззовні іншими частинками, спостерігається вторинна емісія.

Для спостереження термоелектронної емісії можна використовувати двохелектродну вакуумну лампу — діод (рис.3). Струм в цьому колі з'являється тільки в тому випадку, якщо позитивний полюс батареї сполучений з анодом, а негативний – з катодом. Це доводить, що катод випускає негативні частинки, електрони. Сила термоелектронного струму в діоді залежить від величини потенціалу анода відносно катода.

Крива, що зображує залежність сили струму в діоді від анодної напруги, називається вольт - амперною характеристикою.

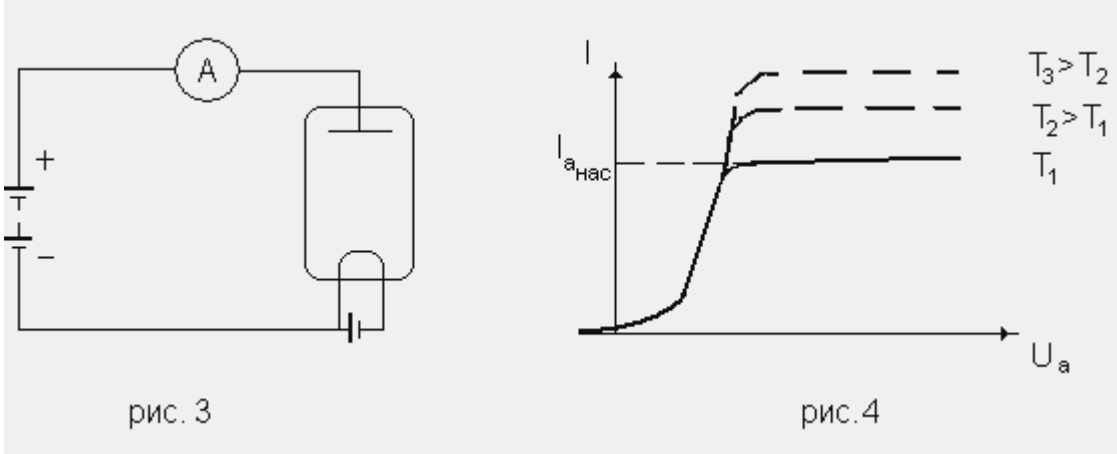


рис. 3 рис.4

На рис.4 вказані вольт-амперні характеристики діода при різних температурах катода. Коли потенціал анода рівний нулю, сила струму мала, вона визначається лише найшвидшими термоелектронами, здатними досягти анода. При збільшенні позитивного потенціалу анода сила струму зростає і потім досягає насичення, тобто майже перестає залежати від анодної напруги.

При збільшенні температури катода збільшується і значення струму, при якому досягається насичення. Одночасно збільшується і анодна напруга, при якій встановлюється струм насичення.

Таким чином, вольт-амперна характеристика діода виявляється є нелінійною, тобто закон Ома не виконується. Це пояснюється тим, що при термоелектронній емісії біля поверхні катода створюється досить велика кількість електронів. Вони створюють просторовий негативний заряд, і електрони, що вилітають з малою швидкістю, не можуть його проскочити. Із збільшенням анодної напруги концентрація електронів в хмарі просторового заряду зменшується. Тому і

гальмуюча дія просторового заряду стає меншою, а анодний струм росте швидше, ніж в прямій залежності від анодної напруги.

Теоретична залежність анодного струму від анодної напруги на ділянці 1-2 була одержана Ленгмюром і Богуславським. Вона називається ще "законом трьох других".

У міру зростання анодної напруги все більше електронів, що вилітають з катода, долітають до анода. При певному значенні U_a всі електрони які вилетіли з катода за одиницю часу досягають анода. Подальше зростання анодної напруги не може збільшити силу анодного струму, оскільки досягається насичення.

Максимальний термоелектронний струм, можливий при даній температурі катода, називається струмом насичення.

При підвищенні температури збільшується швидкість хаотичного руху електронів в металі. При цьому число електронів, здатних покинути метал, різко зростає. Густина струму насичення, тобто сила струму насичення на кожну одиницю поверхні катода S, обчислюється за формулою Річардсона-Дешмана:

$$j_{нас} = BT^2 \exp(-\frac{A_{вих}}{kT}) \qquad (1)$$

де B – постійна емісії; k – стала Больцмана. Густина струму насичення характеризує емісійну здатність катода, яка залежить від природи катода і його температури.

Метод вимірювання

Вимірюючи на досліді залежність струму насичення від температури, можна визначити роботу виходу для даного металу.

У нашому випадку для визначення роботи виходу використовується метод прямих Річардсона. Пояснимо ідею методу. Для цього прологарифмуємо рівняння

$$j_{нас} = BT^2 \exp(-\frac{A_{вих}}{kT}) \qquad (2)$$

і одержимо:

$$\ln(\frac{j_{нас}}{T^2}) = \ln B - \frac{A_{вих}}{k}\frac{1}{T} \qquad (3)$$

Такий вигляд рівняння зручний для його експериментальної перевірки. Графік залежності $\ln(\frac{j_{нас}}{T^2})$ від $\frac{1}{T}$ є прямою лінією з кутовим коефіцієнтом $\frac{\cdot A_{вих}}{k}$.

Визначивши тангенс кута нахилу прямої до осі абсцис, розраховуємо роботу виходу:

$$A_{вих} = k \cdot tg\alpha \qquad (4)$$

Для побудови графіка необхідно знати густину анодного струму насичення і температуру катода. Температуру катода можна визначити таким чином. Потужність, що підводиться до катода, витрачається у вакуумній лампі в основному на теплове випромінювання. Для вольфраму була експериментально визначена залежність температури катода від потужності, що витрачається на його нагрівання яка припадає на одиницю площі поверхні катода. На графіку, рис. 6, приведені результати цих вимірювань. По цьому графіку, знаючи потужність, що підводиться до катода, можна визначити його температуру.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з методом визначення роботи виходу електрона з металу. Спрощена електрична схема установки представлена на рис.5.

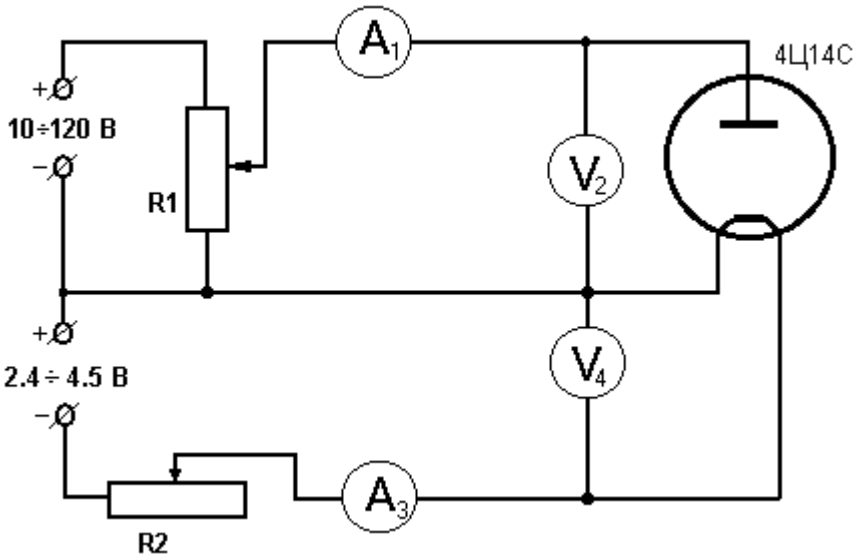


рис.5

2. Підключити касету ФПЕ до джерела живлення, при цьому тумблер живлення повинен знаходитися в положенні "Вимкнено". Всі ручки регулювання напруги на блоці живлення перевести в крайнє проти годинникової стрілки положення. Амперметр на панелі джерела живлення служить для контролюваня струму розжарювання катода I_H, максимальне значення якого не повинне перевищувати *2.2А*; струм розжарювання також відображається на екрані монітора. Плавне регулювання напруги розжарювання здійснюється ручкою, розташованою під амперметром. Напруга U_H вимірюється вольтметром, при цьому перемикач вибору діапазону напруг повинен бути встановлений в положення *2.5 - 4,5В* .При перемиканні перемикача в положення *10 - 120В* вольтметр на панелі джерела живлення вимірюватиме анодну напругу. Струм анода, також як і інші вимірювані величини відображаються на екрані монітора.

У разі виконання роботи без використовування ЕОМ вимірювання анодного струму проводиться міліамперметром (*0 - 20мА*), що підключається до клем *РА* на касеті ФПЕ.

3. Запустити програму ФПЕ. Включити живлення касети ФПЕ.

<u>Увага, в процесі проведення експерименту струм і напруга розжарювання змінюватися не повинні!</u>

3. Провести вимірювання (пункт 2) для будь-яких п'яти значень напруги розжарювання в інтервалі від *3,5 до 4,5В*.

Після проведення експерименту автоматично буде визначений струм насичення. Якщо даних недостатньо, то на екран виводиться відповідне попередження. В цьому випадку необхідно повернутися в режим вимірювань і продовжити виконання роботи.

4. Для всіх значень напруги розжарювання розрахувати потужність, що виділяється на катоді, за формулою $P=U_H I_H$, а також потужність, що припадає на одиницю площі поверхні катода. Для даної лампи площу поверхні катода прийняти $S_K=0.0352\ см^2$.

5. По графіку залежності температури катода від *P/S* визначити температуру катода для кожного значення потужності нагріву.

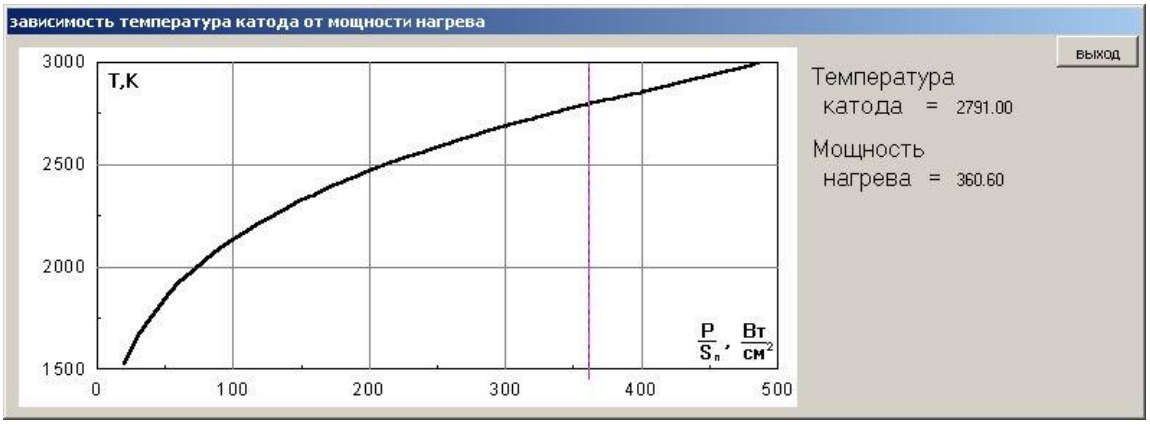


Рис. 6.

6. Розрахувати густину анодного струму насичення за формулою $j_{нас} = \frac{I_{нас}}{S_a}$, $S_a = 11 \cdot 10^{-6}$ $м^2$.

7. Всі одержані дані занести в таблицю 1.

Таблиця 1

№	U_H, В	I_H, А	P/S_K, Вт/см^2	T, К	1/T, К$^{-1}$	$I_{нас}$, мА	$j_{нас}$, мА/м^2	$j_{нас}/T^2$, мА/(м^{2}К^2)	$\ln(j_{нас}/T^2)$
1									
2									
3									
4									
5									

8. Побудувати графік залежності $\ln \frac{j_{нас}}{T^2}$ від $\frac{1}{T}$ відкладаючи по осі абсцис $\frac{1}{T}$ а по осі ординат $\ln \frac{j_{нас}}{T^2}$

9. Визначити тангенс кута нахилу одержаної прямої до осі абсцис і розрахувати роботу виходу за формулою

$$A_{вих} = k \cdot tg\alpha$$

10. Розрахувати похибку вимірювань за правилом графічної обробки результатів вимірювань.

<u>Контрольні питання</u>

1. Що називається роботою виходу електрона? Яка природа сил, що утримують електрони в металі?
2. Струм у вакуумі. Вольт-амперна характеристика діода.
3. Закон Богуславського-Ленгмюра. Фізична природа закону.
4. Що таке струм насичення і як він залежить від температури?
5. Формула Річардсона. Метод прямих Річардсона.

Міністерство освіти і науки України
Прикарпатський національний університет імені Василя СтефаникаФізико-технічний факультет
Кафедра фізики і методики викладання

Лабораторна робота № 7

ВИВЧЕННЯ ПРИНЦИПУ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОМПЕНСАЦІЙНИХ ВИМІРЮВАНЬ

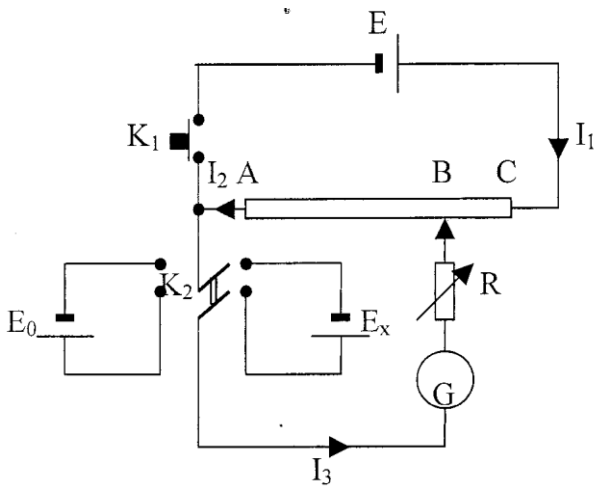
м. Івано-Франківськ

Прилади й матеріали:

1. Еталон ЕРС (ртутно-кадмієвий нормальний елемент Вестона, E_0=1,01836 В при 20ºС).
2. Досліджуваний гальванічний елемент із невідомою ЕРС E_x.
3. Стрілочний “нульовий” гальванометр.
4. Реостат.
5. Реохорд.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Еталоном ЕРС у даній роботі служить ртутно-кадмієвий нормальний елемент Вестона, який дає при 20ºС E_0=1,01836 В. Він складається зі скляної П-подібної посудини, в нижній частині якої впаяні платинові електроди. Анодом служить ртуть, а катодом – ртутна амальгама. Електроліт – насичений розчин сірчанокислого кадмію, а деполяризатором служить сірчанокислий закис ртуті. Нормальний елемент вимагає обережного поводження: його не можна перевертати, трусити. Особливо треба оберігати від короткого замикання. Сила струму не повинна перевищувати 10^{-4}А.



Нехай спочатку ключ K_2 замкнутий на нормальний елемент. Запишемо рівняння по II правилу Кірхгофа для контуру $ABRGK_2E_0A$:

$$-R_{AB}^{0}I_2 - RI_3 = -E_0$$

де R_{AB}^{0} – опір ділянки АВ реохорда (від лівого кінця до повзунка). Пересуваємо повзунок реохорда таким чином, щоб через гальванометр не проходив струм, тоді маємо:

$$R_{AB}^{0}I_2 = E_0$$

Замкнемо ключ K_2 на досліджуваний елемент. Запишемо рівняння по II правилу Кірхгофа для контуру $ABRGK_2E_xA$:

$$-R_{AB}^{x}I_2 - RI_3 = -E_x$$

де R_{AB}^{x} – опір ділянки АВ реохорда (від лівого кінця до повзунка). Пересуваємо повзунок реохорда таким чином, щоб через гальванометр не проходив струм, тоді маємо:

$$R_{AB}^{x} I_2 = E_x$$

Струм I_2 в обох випадках однаковий і рівний струму I_1, оскільки струм у точці В не розгалужується (I_3=0) і визначається тільки ЕРС зовнішнього джерела Е та величиною опору всієї дротини реохорда. Отже, опір ділянки АВ реохорда в обох випадках пропорційний величині підключеної у даний момент ЕРС. Оскільки опір дротини пропорційний її довжині, то:

$$\frac{E_x}{E_0} = \frac{R_{AB}^{x}}{R_{AB}^{0}} = \frac{l_x}{l_0}$$

де l_0 – довжина ділянки АВ реохорда за умови, що підключений нормальний елемент і стрілка гальванометра при натисканні кнопки K_1 залишається на “0”, l_x – довжина ділянки АВ реохорда за умови, що підключений досліджуваний елемент і стрілка гальванометра при натисканні кнопки K_1 залишається на “0”.

Одержуємо таку остаточну робочу формулу:

$$E_x = \frac{l_x}{l_0} E_0$$

ХІД РОБОТИ

1. Ввімкнути нормальний елемент перемикачем K_2.
2. Зменшуючи опір R до “0” і одночасно рухаючи повзунок реохорда, досягти відсутності струму в колі гальванометра (“0” гальванометра).
3. Виміряти довжину плеча реохорда між точками А і В l_0.
4. Переключити перемикач K_2 на елемент із невідомою ЕРС і провести такі ж вимірювання для нього. Виміряти довжину плеча реохорда між точками А і В l_x.
5. Повторити вимірювання для кожного елемента по 3 рази.
6. Записати в таблицю результати вимірювань.
7. Обчислити середні значення $\langle l_0 \rangle = \frac{\sum l_{0i}}{3}$, $\langle l_x \rangle = \frac{\sum l_{xi}}{3}$ та похибки $\Delta l_{0i} = \left| l_{0i} - \langle l_0 \rangle \right|$, $\Delta l_{xi} = \left| l_{xi} - \langle l_x \rangle \right|$ і записати їх у таблицю. При цьому слід мати на увазі, що значення похибок не можуть бути меншими за похибку вимірювання приладу. Якщо значення похибки вийшло менше ніж 0,5 мм, то в таблицю записати 0,5 мм.
8. Обчислити й записати також середні значення похибок $<\Delta l_0>$, $<\Delta l_x>$.
9. Обчислити ЕРС досліджуваного елемента за формулою $E_x = \frac{\langle l_x \rangle}{\langle l_0 \rangle} E_0$, причому при розрахунках використовувати середні значення довжин плеча реохорда.

10. Обчислити відносну похибку за формулою $\varepsilon = \frac{\langle \Delta l_0 \rangle}{\langle l_0 \rangle} + \frac{\langle \Delta l_x \rangle}{\langle l_x \rangle}$.

11. Обчислити абсолютну похибку за формулою $\Delta E_x = E_x \cdot \varepsilon$. Записати результати обчислення в таблицю.

№	l_0, мм	Δl_0, мм	l_x, мм	Δl_x, мм	E_x, В	ΔE_x, В	ε
1							
2							
3							
сер.							

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Нормальний елемент Вестона.
2. Сформулювати I правило Кірхгофа.
3. Показати вузли електричної схеми.
4. Записати рівняння по I правилу Кірхгофа для досліджуваної схеми.
5. Сформулювати II правило Кірхгофа.
6. Показати замкнуті контури електричної схеми.
7. Сформулювати правила знаків для II правила Кірхгофа.
8. Записати 2 рівняння по II правилу Кірхгофа для досліджуваної схеми.
9. Як залежить опір дротини від її довжини? Записати формулу.
10. Чому струм I_2 в обох випадках (при ввімкненні нормального й досліджуваного елементів) можна вважати однаковим?
11. Для чого у схемі використовується кнопочний вимикач K_1?
12. Принцип роботи схеми для компенсаційних вимірювань.
13. Вивести робочу формулу.
14. Чи накладаються якісь обмеження на величину ЕРС досліджуваного елемента?

Міністерство освіти і науки України
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника
Фізико-технічний факультет
Кафедра фізики і методики викладання

Лабораторна робота № 8 (ФПЕ-04М)

ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОЇДА

м. Івано-Франківськ

<u>Мета роботи</u>: ознайомитися з холлівським методом вимірювання індукції магнітного поля

<u>Загальні відомості</u>

У просторі навколо провідника із струмом виникає магнітне поле, яке можна виявити по дії його на інший провідник зі струмом або магнітну стрілку. Магнітне поле в кожній точці простору кількісно може бути описано за допомогою вектора напруженості магнітного поля $\vec{H}$ або за допомогою вектора індукції магнітного поля $\vec{B}$. У вакуумі $\vec{H}$ і $\vec{B}$ зв'язані співвідношенням:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}, \tag{4.1}$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Гн}{м}$ - магнітна стала.

Для обчислення напруженості і індукції магнітного поля використовують закон Біо-Савара-Лапласа, згідно якого елементарна напруженість магнітного поля $d\vec{H}$, що створюється елементом провідника із струмом $J\vec{dl}$ в деякій точці простору на відстані $\vec{r}$, визначається виразом:

$$d\vec{H} = \frac{\left[Id\vec{l}, \vec{r}\right]}{4\pi r^3}. \tag{4.2}$$

Для знаходження результуючої напруженості, що створюється провідником скінченного розміру, треба скористатися принципом суперпозиції магнітних полів і знайти векторну суму елементарних напруженостей:

$$\vec{H} = \sum_k d\vec{H}_k = \sum_k \frac{\left[Id\vec{l}, \vec{r}\right]}{4\pi r^3}. \tag{4.3}$$

У граничному випадку сума записується у вигляді інтеграла по контуру провідника із струмом. Застосуємо формулу *(4.3)* для обчислення напруженості магнітного поля на осі соленоїда. Кожен виток соленоїда - це коловий струм, тому спочатку обчислимо напруженість магнітного поля на осі колового витка із струмом (рис.1).

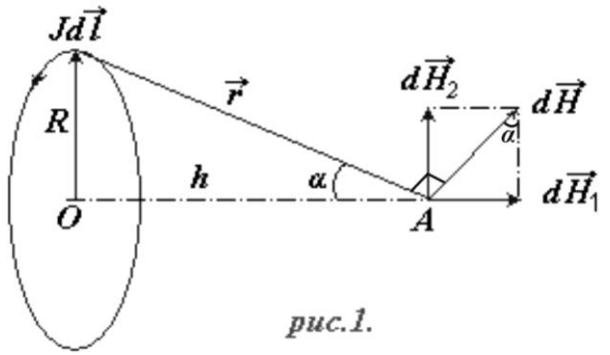


рис.1.

При додаванні складових магнітного поля $d\vec{H}_2$, перпендикулярних осі *OA*, вони компенсують одна одну внаслідок симетрії контура. Тому результуюча $d\vec{H}$ в точці *A* напрямлена уздовж осі кругового струму і рівна за модулем:

$$H = \int_l dH_1 ; \tag{4.4}$$

$$dH_1 = dH \sin\alpha = \frac{IdlR}{4\pi r^3} ; \tag{4.5}$$

У *(4.5)* враховано, що вектори $d\vec{l}$ і $\vec{r}$ взаємно перпендикулярні. Підставляючи *(4.5)* в *(4.4)* і враховуючи, що величини *R* і *r* сталі, маємо:

$$H = \int_0^{2\pi R} \frac{IdlR}{4\pi r^3} = \frac{IR^2}{2r^3} . \tag{4.6}$$

Перейдемо тепер до обчислення поля соленоїда, зображеного на *рис.2:*

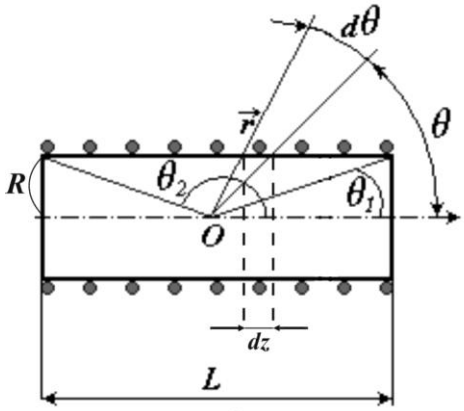


рис.2.

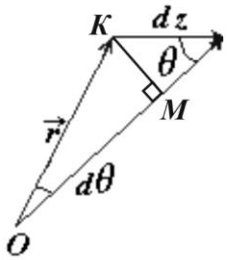


рис.3.

Нехай на одиницю довжини соленоїда припадає *n* витків. Тоді на ділянці dz буде ndz витків, які в точці *O* соленоїда, згідно *(4.6)*, створять напруженість:

$$dH_z = \frac{IR^2}{2\pi r^3} ndz. \qquad (4.7)$$

На *рис.3* окремо зображені елемент dz, радіус-вектор $\vec{r}$ і кути θ і $d\theta$. З геометричних побудов рис.2 і рис.3 виходить:

$$r = \frac{R}{\sin\theta},\ dz = \frac{KM}{\sin\theta},\ KM = rd\theta, \qquad (4.8)$$

звідси $dz = \frac{rd\theta}{\sin\theta}$.

Підставляємо *(4.8)* в *(4.7)* і інтегруємо в межах від θ_1 до θ_2:

$$H_z = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{1}{2} In \sin\theta d\theta = \frac{1}{2} In(\cos\theta_1 - \cos\theta_2). \qquad (4.9)$$

У разі нескінченного соленоїда:

$$\theta_1 = 0,\ \theta_2 = \pi,\ H_z = In, n = \frac{W}{L}. \qquad \textbf{(4.10)}$$

Метод вимірювання

Для експериментального дослідження напруженості магнітного поля на осі соленоїда в роботі використовується метод, що грунтується на ефекті Холла.

У роботі використовується датчик Холла марки *X501* із керуючим струмом *90 мА*, оскільки стала Холла для напівпровідників значно більша, ніж для провідників.

Силові лінії магнітного поля на осі соленоїда направлені уздовж осі, тому датчик Холла розташований на торці спеціального штока, вставленого в соленоїд. Товщина датчика у напрямі магнітного поля рівна *0.2 мм.* Для вимірювання положення датчика усередині соленоїда на бічній грані штока нанесена міліметрова шкала.

За відсутності магнітного поля ЕРС Холла повинна бути рівна нулю. Проте унаслідок різних побічних явищ, наприклад, неточної установки вихідних електродів датчика, можливе отримання ненульових значень навіть за відсутності струму в соленоїді. Для виключення похибки вимірювання проводять двічі при

протилежних напрямах струму в соленоїді. *В даній роботі зміну напряму стуму в соленоїді не передбачено. Похибка визначення ЕРС Холла вказана на касеті ФПЕ-04м і становить ± 0,5 мВ.*

Ефект Холла

Якщо через провідну пластинку з поперечним перерізом $a \times h$ пропустити струм густиною $\vec{j}$ і помістити її в поперечне магнітне поле з індукцією $\vec{B}$, то перпендикулярно векторам $\vec{j}$ і $\vec{B}$ створюється електричне поле напруженістю $\vec{E}$ (*рис.4.4*). Виникаюча при цьому різниця потенціалів $\Delta\varphi_x$ (*ЕРС Холла*) пропорційна величині струму і індукції магнітного поля:

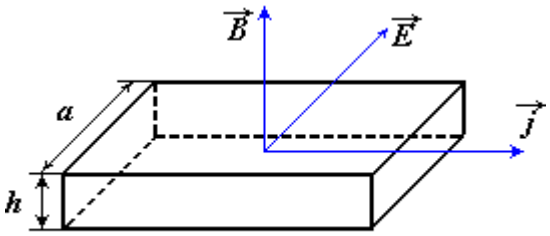


рис. 4.4

$$\Delta\varphi = R_x jBa = R_x \frac{IB}{h}, \qquad (4.11)$$

де $I = jah$.

Коефіцієнт пропорційності R_x називається *сталою Холла*.

Порядок виконання роботи

Завдання 1. Визначення залежності магнітної індукції в середній точці на осі соленоїда і тарировка датчика Холла.

1. Ознайомитись із установкою та принципом її дії.
2. Поставити шток з датчиком Холла в середнє положення на осі соленоїда («0» на шкалі).
3. Виміряти ЕРС Холла в центрі соленоїда для струмів 0,1;0,2;0,3;0,4;0,5 А, при цьому із виміряних значень необхідно вирахувати поправку $\delta\varphi_x = \pm$ 0,5 мВ, вказану в паспорті. Дані занести в таблицю 1.

№ п/п	I_C, A	$\Delta\varphi_x$, B	B, Тл	R_x, В·м/Тл·А
1				
2				
3				
4				
5				

4. Визначити індукцію магнітного поля для заданих значень сили струму I_C за формулами (4.10) і (4.1); дані занести в таблицю.

5. Обчислити значення сталої Холла R_x для кожного вимірювання за формулою (4.11); дані занести в таблицю. Знайти середнє значення R_x.

6. Побудувати графіки залежності $B=f(I_C)$ та $\Delta\varphi_x=f(I_C)$ за даними таблиці 4.1.

<u>Завдання 2</u>. Дослідження залежності індукції магнітного поля від координати *z*, відрахованої від середньої точки.

1. Встановити величину струму в котушці соленоїда за вказівкою викладача чи лаборанта (0,4 А).

2. Переміщуючи шток з датчиком Холла вздовж осі соленоїда з інтервалом $\Delta z=1см$, виміряти ЕРС Холла. Отримані дані занести в таблицю 4.2.

Положення датчика *z, мм*														
ЕРС датчика Холла, *B*														
Індукція, *Тл*														

3. Визначити індукцію поля для кожного положення датчика Холла за формулою (4.11). При розрахунках використати значення R_x, отримані в завданні 1. Дані занести в таблицю 4.2.

4. Побудувати графік залежності $B=f(z)$ за даними таблиці 4.2.

5. Повторити вимірювання і розрахунки виконані в п.2 – 4 для нового заданого викладачем чи лаборантом значення I_C (0,6 А).

6. Для одного із отриманих значень B вирахувати абсолютну і відносну похибки вимірювань.

Контрольні питання

1. Сформулюйте закон Біо-Савара-Лапласа. Користуючись цим законом, виведіть формулу для індукції магнітного поля на осі кругового витка зі струмом.

2. Сформулюйте теорему про циркуляцію вектора B по контуру L. Використавши цю теорему виведіть формулу для індукції магнітного поля нескінченного соленоїда.

3. Використавши принцип суперпозиції виведіть формулу для індукції магнітного поля для нескінченного соленоїда.

4. Виведіть формулу для ЕРС Холла.

5. Нарисуйте схему вимірювань для дослідження залежності $B=f(z)$.

Міністерство освіти і науки України
Прикарпатський національний університет імені Василя СтефаникаФізико-технічний факультет
Кафедра фізики і методики викладання

Лабораторна робота № 9

ДОСЛІДЖЕННЯ КОРИСНОЇ ПОТУЖНОСТІ Й КОЕФІЦІЄНТА КОРИСНОЇ ДІЇ ДЖЕРЕЛА СТРУМУ

м. Івано-Франківськ

Прилади й матеріали:

1. Досліджувана батарея акумуляторів.

2. Штепсельний реостат.
3. Реостат на 30-50 Ом.
4. Амперметр.
5. Вольтметр.
6. Ключі.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Основними експлуатаційними характеристиками джерела струму є електрорушійна сила E, внутрішній опір r_i, максимально допустимий струм I_m та максимальна потужність P_m, яку може розвивати дане джерело. У процесі експлуатації, як правило, нас цікавить потужність P=IE і коефіцієнт корисної дії $\eta = \frac{P_к}{P}$ джерела, де $P_к$ – корисна потужність, яку споживають приймачі електричної енергії. Потужність і К.К.Д. істотно залежать від навантаження джерела, тобто від струму, що протікає в колі. Тому постає питання про вигідні умови експлуатації джерела, зокрема про максимальну віддачу потужності для приймачів, про забезпечення вищого К.К.Д. Корисна потужність:

$$P_к = UI = (E - Ir_i)I$$

З формули бачимо, що корисна потужність є складною функцією сили струму. Графік цієї функції – відрізок параболи (для $P_к>0$). Дослідивши функцію $P_к(I)$ на екстремум, знаходимо:

$$I_m = \frac{E}{2r_i}, \quad P_{кm} = \frac{EI_m}{2}$$

Отже, джерело віддаватиме максимальну потужність тоді, коли опір приймачів дорівнюватиме внутрішньому опору джерела. Цей важливий висновок завжди враховують при розрахунку електричних мереж.

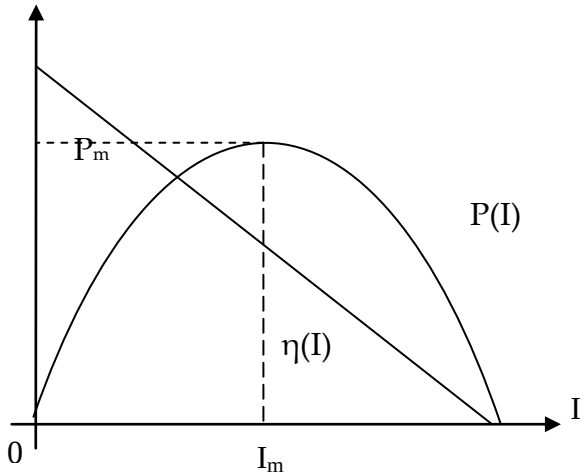
К.К.Д. джерела:

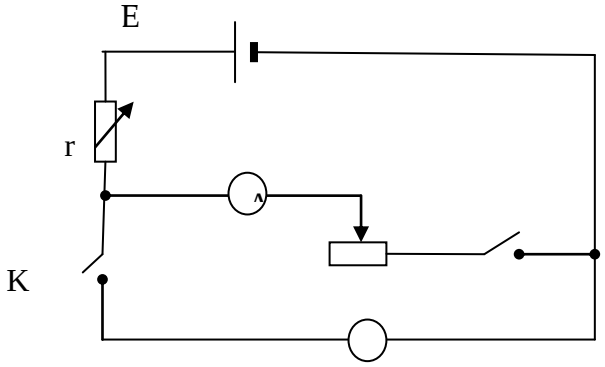
$$\eta = \frac{P_к}{P} = \frac{(E - Ir_i)I}{IE} = \frac{U}{E} = 1 - \frac{I}{2I_m}$$

є спадною лінійною функцією струму і при $I=I_m$ (при максимальній потужності) $\eta=0,5$.

На практиці часто виникає потреба постачати енергію для споживачів при напрузі, яка повинна мати цілком певне значення U_0. Тому, враховуючи втрати напруги на лінії і в самому джерелі, слід відповідним чином розраховувати опір лінії.

В лабораторній роботі послідовно з джерелом струму підключено додатковий реостат з опором r, який моделює опір передаючої лінії, захищає джерело струму від перевантаження та сприяє максимальній віддачі потужності навантаженню при помірному струмі.





ХІД РОБОТИ

1. Змінюючи опір R реостата навантаження від 0 до максимуму, виміряти 20-25 значень струму від максимального до мінімального та відповідні значення напруги на ньому. Результати записати в таблицю.
2. Перевести всі ключі у вимкнутий стан.
3. Обчислити корисну потужність для кожного виміру й результати записати в таблицю.
4. Побудувати графік залежності корисної потужності від сили струму.
5. За одержаним графіком визначити максимальне значення корисної потужності P_{km} та відповідний струм I_m.
6. Обчислити ЕРС джерела струму за формулою:

$$E = \frac{2P_{km}}{I_m}$$

7. Вимірявши тестером ЕРС джерела, порівняти її з обчисленою за попередньою формулою.

8. Обчислити К.К.Д. джерела для всіх попередніх вимірів за формулою:

$$\eta = \frac{U}{E}$$

і занести результати в таблицю.

9. Побудувати графік функції η(I).

I, A																								
U, B																								
$P_к$,Вт																								
η																								

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Показати на схемі реостат, який моделює опір лінії, і реостат навантаження.
2. Робота й потужність електричного струму, одиниці вимірювання.
3. Закон Ома для однорідної й неоднорідної ділянки кола, для повного кола.
4. Правила Кірхгофа.
5. Для чого в схему ввімкнено додатковий опір r?
6. Що таке повна й корисна потужність?
7. Що таке К.К.Д. джерела?
8. Що вимірюють у даній схемі амперметр і вольтметр?
9. Яким повинен бути опір навантаження, щоб корисна потужність була максимальною?
10. Яким повинен бути опір навантаження, щоб сила струму була максимальною?
11. Який вигляд повинна мати залежність $P_к$(I)? Пояснити.
12. Який вигляд повинна мати залежність η(I)? Пояснити.
13. Чи можливо експериментально одержати повністю залежність $P_к$(I)? Чому?
14. Як, користуючись результатами вимірювання, визначити напругу, яка падає на джерелі струму? Яка формула для цієї напруги?
15. Який вигляд має залежність повної потужності P від сили струму?

16. Чому рівний К.К.Д. при максимальному струмі через навантаження? при $I \to 0$? при $I = I_m$?

17. Які можуть бути причини неспівпадіння обчисленої ЕРС джерела і виміряної?

18. Вивести формули для максимального значення корисної потужності P_{km} та відповідного струму I_m.

19. Як зміняться графіки залежностей $P_к(I)$ та $\eta(I)$ при зміні величини додаткового опору r?

Міністерство освіти і науки України
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»
Фізико-технічний факультет
Кафедра фізики і методики викладання

Лабораторна робота № 10 (ФПЕ-07м)

ВИВЧЕННЯ ГІСТЕРЕЗИСУ ФЕРОМАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ

м. Івано-Франківськ

<u>Мета роботи</u>: вивчення гістерезису феромагнітних матеріалів, розрахунок і графічна побудова основної кривої намагнічення, розрахунок роботи перемагнічування і коерцитивної сили.

<u>Загальні відомості</u>

Всі речовини володіють магнітними властивостями, тобто є магнетиками. Магнітні властивості речовин визначаються величиною і орієнтацією магнітних моментів молекул, іонів чи атомів. Магнітний момент плоского контура площею *S*, по якому тече струм *I*, визначається за формулою

$$\vec{p} = IS\vec{n}$$

Де $\bar{n}$ - одинична нормаль, напрям якої визначається за правилом правого гвинта. В магнітному полі з індукцією *B* на замкнутий контур із струмом діє момент сил

$$\vec{M}_M = \left\| \left[\vec{p}\vec{B} \right] \right\| = pB\sin(\vec{p}, \vec{B})$$

який прагне повернути контур так, щоб напрям $\vec{p}$ і $\vec{B}$ співпадали. Контур із струмом створює також власне магнітне поле з індукцією B_1, що співпадає за напрямом з магнітним моментом $\vec{p}$ контура. Коли $M_M = 0$, вектор індукції результуючого поля $\vec{B} = \vec{B} + \vec{B}_1$ у будь-якій точці площини всередині контура завжди більше вектора індукції *B* зовнішнього магнітного поля. Збільшення індукції *B* усередині контура із струмом в магнітному полі якісно пояснює збільшення індукції у феромагнетику, поміщеному в зовнішнє магнітне поле.

Намагнічення речовини пояснюється наявністю у складових його атомів, молекул, іонів мікроскопічних магнітних моментів: електронного орбітального $\vec{p}_\ell$, власного

електронного (спінового) $\vec{p}_s$ ядерного $\vec{p}_c$. Орбітальний магнітний момент має електрон, рухаючись навколо ядра атома (рис.1).

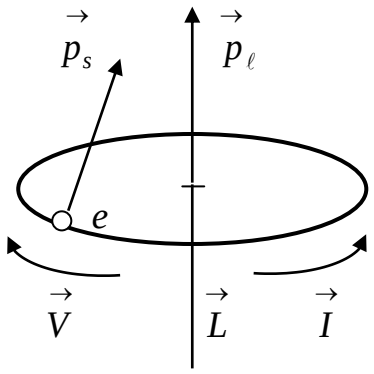


Рис.1

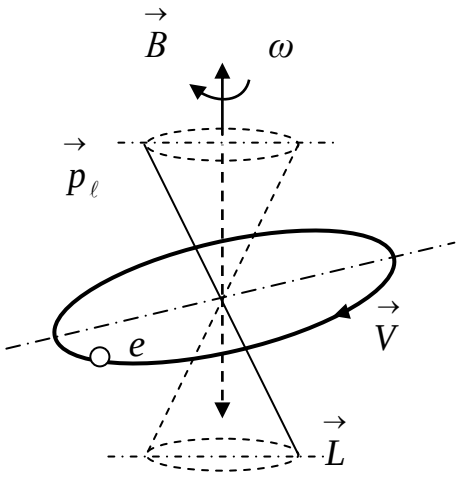


Рис.2

Такий рух електрона можна змоделювати коловим струмом $I = e\nu$, що має магнітний момент:

$$\vec{p}_\ell = IS\,\vec{n} = e\nu\pi r^2\,\vec{n},$$

де e – заряд електрона ν - частота обертання, r – радіус круговий орбіти. Напрям магнітного моменту $\vec{p}_\ell$ протилежний напряму механічного моменту імпульсу $\vec{L} = \left[\vec{r}\, m_e \vec{V}\right]$ (рис.2) $\vec{p}_\ell$ і $\vec{L}$ пов'язані співвідношенням

$$\vec{p}_\ell = \tfrac{e}{2m_e}\vec{L}$$

Магнітний спіновий момент $\vec{p}_s$ (рис.1) є невід'ємною властивістю електрона. Одиницею магнітного моменту є магнетон Бора:

$$\mu_Б = \tfrac{eh}{2m_e} = 9.27 \cdot 10^{-24},\ \text{А} \cdot \text{м}^2$$

де h - стала Планка.

Ядерний магнітний момент $\vec{p}_c$ або рівний нулю, або на три – чотири порядки менший $\mu_Б$ і його впливом можна нехтувати. За відсутності зовнішнього поля можна вважати, що магнітний момент атома

$$\vec{p}_{aT} = \sum_{i=1}^{Z} \vec{p}_{\ell_i} + \sum_{Z} \vec{p}_{s_i}$$

де Z - число електронів в атомі.

Магнітний момент молекули

$$\vec{p}_{мол} = \sum_{k=1}^{N} \vec{p}_{aT_k}$$

де N - число атомів в молекулі. В зовнішньому магнітному полі на електрон атома, як на замкнутий контур із струмом, діє момент сил M (див. рис. 2). Під дією цього моменту сил електрон, подібно гіроскопу має прецесію, при цьому вектори $\vec{p}$ і $\vec{L}$ описують конус навколо напряму поля з постійною кутовою швидкістю. Цей додатковий рух електрона приводить до появи у нього магнітного момента прецесії $\vec{p}_n$ проти магнітного поля. Це явище носить назву діамагнітного ефекту. За наявності зовнішнього магнітного поля магнітний момент атома

$$\vec{p}_{aT} = \sum_{i=1}^{Z} \vec{p}_{\ell i} + \sum_{Z}^{Z} \vec{p}_{s_i} + \sum_{i=1}^{Z} \vec{p}_m$$

Намагніченість $\vec{M}$ рівна магнітному моменту одиниці об'єму магнетика:

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{p}_{мол}}{\Delta V}$$

де ΔV - малий об'єм магнетика; $\sum \vec{p}_{мол}$ – сума магнітних моментів всіх молекул в об'ємі ΔV. Намагніченість $\vec{M}$ пов'язана з напруженістю магнітного поля:

$$\vec{M} = \chi \vec{H}$$

де χ - коефіцієнт пропорційності, звязаний магнітною сприйнятливістю речовини. Магнітні властивості речовини характеризуються також магнітною проникністю μ . χ і μ пов'язані співвідношенням

$$\mu = 1 + \chi$$

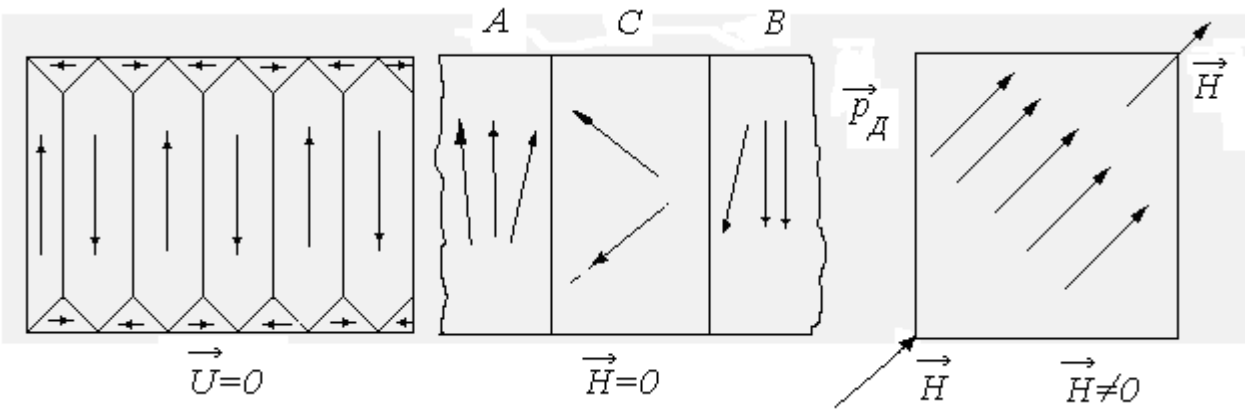
Залежно від знаку і величини магнітної сприйнятливості всі речовини діляться на три групи:

Діамагнетики - речовини (наприклад, інертні гази), в яких за відсутності зовнішнього магнітного поля орбітальні $\vec{p}_\ell$ і спінові $\vec{p}_s$ моменти атомів чи молекул компенсуються. В зовнішньому магнітному полі в результаті прецесії з'являються індуковані магнітні моменти $\vec{p}_{aT} = \sum p_n$ направлені проти поля, а магнітна сприйнятливість від'ємна $\chi = -(10^{-6}...10^{-8})$

Парамагнетики - речовини, в яких за відсутності зовнішнього поля B $p_{aT} \neq 0$ або $p_{мол} \neq 0$, а $M = 0$ внаслідок хаотичної орієнтації магнітних моментів. В зовнішньому магнітному полі під дією обертаючого моменту сил M_M магнітні моменти (p_{aT} або $p_{мол}$) речовини прагнуть обернутися у напрямі поля, внаслідок чого $M > 0$ і $\chi > 0$, $\chi = 10^{-4}...10^{-6}$.

Феромагнетики - це речовини, в яких магнітні моменти окремих іонів $p_u \neq 0$. У феритів елементарні комірки кристала утворюють іони різного типу, у феромагнетиків - одного типу. Як показали досліди Ейнштейна і де Гааза, а також досліди Н.Ф. Йоффе і П.Л. Капіци, магнітний момент іона феромагнетика обумовлений впорядкованою орієнтацією магнітних моментів спінів. Частина феромагнетика, в якій всі магнітні моменти за відсутності зовнішнього поля встановлюються в одному напрямі за рахунок обмінної взаємодії, називається

доменом (рис.3,а), домен володіє магнітним моментом p_d. Розміри доменів складають $10^{-6}...10^{-8}$*м*.



а)

б) в)

рис. 3

За відсутності зовнішнього магнітного поля магнітний момент феромагнетика

$$p = \sum p_d = 0$$

Між доменами А і В є перехідні шари шириною $10^{-8}...10^{-9}$м. Усередині перехідного шару магнітні моменти спінів іонів повертаються до тих пір, поки не приймуть потрібного напряму. В зовнішньому магнітному полі перехідні шари руйнуються. Магнітні моменти окремих доменів повертаються за напрямом магнітного поля (рис.3, в).

Залежність намагніченості *M* магнетиків від напруженості *H* зовнішнього магнітного поля зображена на рис.4.

рис. 4

Нелінійна область I відображає процес орієнтації доменів у феромагнетиках у напрямі зовнішнього поля при зростання напруженості *H*. В сильних полях (область II) наступає магнітне насичення, і намагніченість практично не залежить від напруженості поля *H*. Крива $M = f(H)$ носить назву основної кривої намагнічення. Для пара- і діамагнетиків залежність $M = f(H)$ лінійна. У феромагнетиків і феритів має місце магнітний гістерезис, в якому виявляється залежність намагніченості від попереднього стану. При циклічних змінах величини і напряму напруженості зовнішнього поля *H* ця залежність характеризується кривою, званою петлею гістерезису (рис.5, криві 1, 2, 3).

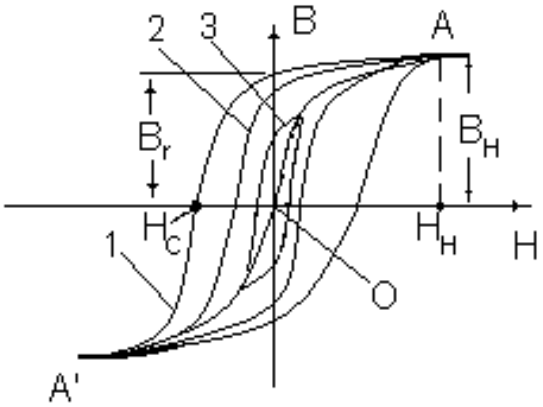


рис. 5

Якщо феромагнетик був спочатку розмагнічений (*B=0, H=0*), то його намагнічення відбувається по основній кривій намагнічення ОА. В точці А напруженість *H* і індукція $B_н$ відповідають станам магнітного насичення. Його розмагнічування відбувається по кривій I. При *H* = 0 намагніченість феромагнетика не зникає $B=B_r$. Цей стан називається залишковим намагніченням. Напруженість ($-H_c$), при якій зникає залишкова намагніченість ($B=0,\ H=H_c$), прийнято називати коерцитивною силою. Якщо при циклічному намагніченні $H_{max} \geq H_н$, то ми одержуємо максимальну петлю гістерезису I. Криві 2 і 3 це окремі цикли, коли $H_{max} < H_н$. Максимуми *B* і *H* приватних циклів лежать на основній кривій намагнічення ОА. Умовно прийнято вважати феромагнетики жорсткими, якщо H_c *100А/м*. Якщо H_c*<100А/м*

феромагнетики вважаються м'якими. Магнітна сприйнятливість μ феромагнетика залежить від напруженості магнітного поля H (рис.6).

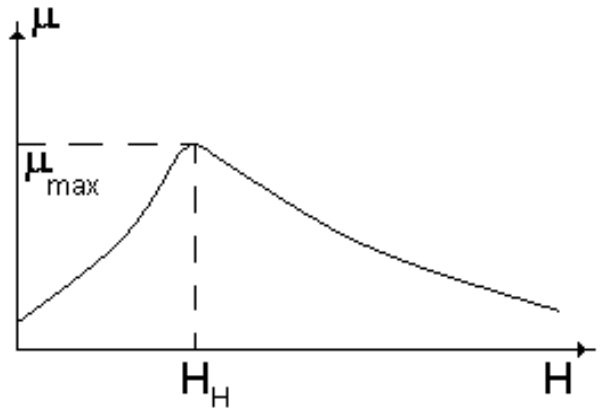


Рис. 6

Магнітна проникність $\mu = B / \mu_0 H$ досягає максимуму, коли напруженість H зовнішнього поля стає рівною напруженості H, при якій домени максимально орієнтуються за напрямом поля (див. рис.3, в), при цьому досягається магнітне насичення зразка. В табл. 1 приведені характеристики деяких феромагнетиків і феритів.

Таблиця 1.

Речовина	$\mu_{макс}$	H, А/м	B_r, Тл	$B_н$, *Тл*
Залізо технічне	5000	80	0.05	2.1
Супермаллой	1000000	0.16	-	0.79
Ферит нікель-цинковий	7500	4	-	0.2

Метод вимірювання

Принципова схема установки приведена на рис.1. досліджуваний зразок виконаний у вигляді тороїдального трансформатора T, первинна обмотка якого містить N_1 витків, а вторинна - N_2 витків.

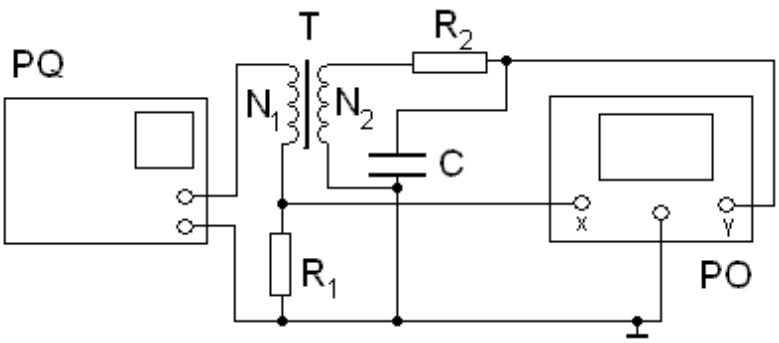


рис. 1

Напруга на первинну обмотку трансформатора подається від генератора PQ через опір R_1. Вторинна обмотка трансформатора послідовно сполучена з опором R_2 і конденсатором C. За допомогою опору R_1 на вхід підсилювача горизонтальної розгортки осцилографа PO подається напруга U_x, пропорційна напруженості магнітного поля H. На вхід "Y" осцилографа з конденсатора C подається напруга U_y, пропорційна індукції магнітного поля B. При радіусі витка обмотки $r_B << r_r$ радіусу тороїда напруженість H в тороїді

$$H = \frac{N_1}{2\pi r_1} I_1, \qquad (8)$$

де

$$r_r = \frac{r_1 + r_2}{2}, \quad r_1 = \frac{d_1}{2}, \quad r_2 = \frac{d_2}{2}$$

Оскільки спад напруги на опорі R_1 $U_x = I_1 R_1$, то з врахуванням (8) одержуємо

$$U_x = \frac{2\pi r_r R_1}{N_1} H \qquad (9)$$

U_x визначається за коефіцієнтом відхилення електронного променя по горизонтальній осі k_x :

$$U_x = k_x x \qquad (10)$$

Враховуючи (10) вираз для H може бути записане у вигляді

$$H = \frac{N_1 k_x x}{2\pi R_1 r_r} = \alpha k_x x \qquad (11)$$

За законом Фарадея ЕРС індукції у вторинній обмотці

$$\varepsilon_i = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \frac{dB}{dt} S_2 \qquad (12)$$

де Φ - потік вектора магнітної індукції через один виток; S_2- площа поперечного перерізу тороїда.

За законом Ома для вторинної обмотки одержуємо

$$\varepsilon_i = U_c + I_2 R_2 + L\frac{dI_2}{dt} \qquad (13)$$

де - U_c - напруга на конденсаторі; I_2 - струм у вторинній обмотці; L_2 -индуктивность вторинної обмотки.

Оскільки L_2 дуже мале, а $I_2 R_2 >> U_c$, а рівняння (13) може бути записано з врахування (12) в наступному вигляді:

$$-N_2 \frac{dB}{dt} S_2 = I_2 R_2$$

звідки

$$I_2 = -\frac{N_2 S_2}{R_2}\frac{dB}{dt} \qquad (14)$$

Враховуючи (14) знайдемо напругу U_y, рівну напрузі на конденсаторі

$$U_y = U_c = \frac{Q}{C} = \frac{\int_0^t I_2 dt}{C} = -\frac{N_2 S_2}{R_2 C}\int_0^t dB = -\frac{N_2 S_2}{R_2 C} B \qquad (15)$$

де Q - заряд на конденсаторі.

Якщо відомий коефіцієнт відхилення променя K_y по вертикалі, то

$$U_y = k_y y \qquad (16)$$

З виразів (15) і (16) одержуємо

$$B = \frac{R_2 C U_y}{N_2 S_2} = \frac{R_2 C k_y y}{N_2 S_2} = \beta k_y y \qquad (17)$$

Подавши одночасно напруги U_y і U_x на вертикально і горизонтально відхилюючі пластини, одержимо на екрані осцилографа петлю гістерезису.

За площею петлі можна знайти роботу перемагнічування, одиниці об'єму магнетика. Мала зміна об'ємної густини енергії магнітного поля $W_M = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$ у циклі перемагнічування визначається формулою

$$d\omega_M = Hd(\mu\mu_0 H) = HdB \qquad (18)$$

Робота dA витрачається на зміну внутрішньої енергії одиниці об'єму феромагнетика. За повний цикл перемагнічування

$$A = \oint HdB \qquad (19)$$

враховуючи (11) і (17), одержуємо

$$A = \frac{N_1 R_2 C k_x k_y}{2\pi r_1 R_1 N_2 S_2} S_n \qquad (20)$$

де S_n - площа петлі гістерезису;

$$S_2 = \frac{r_1 - r_2}{b}$$

Порядок виконання роботи

Завдання 1. Визначення основної кривої намагнічення.

1. Ознайомитися з описом установки і методом вимірювання.

2. Встановити регулятор амплітуди синусоїдальної напруги на касеті ФПЕ на мінімальне значення (обертання ручки проти годинникової стрілки до упору). Запустити програму ФПЕ. Включити живлення касети ФПЕ. На екрані віртуального осцилографа повинна спостерігатися фігура Ліссажу.

Встановити максимальну петлю гістерезису в межах екрану, відповідну магнітному насиченню зразка. Зменшуючи величину вихідної напруги, одержати сімейство петель гістерезиса (див. рис.4) - не менше 5 петель. Для кожної петлі зняти координати "x" і "y" її вершин, визначити значення U_x і U_y і записати їх в таблицю.

№ п/п	x	y	U_x	U_y	H, А/м	B, Тл	μ
1							
2							
3							

4							
5							

3. За формулами (11) и (17) обчислити значення напруженості H і індукції B вершин кожної петлі гістерезису і записати їх в таблицю. Значення необхідних параметрів вказані в паспорті касети ФПЕ.

4. Розрахувати значення магнітної проникності по формулі

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad \text{де } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Гн}{м}$$

5. Побудувати графіки залежності $B = f(H)$ и $\mu = f(H)$.

6. Оцінити похибку визначення значень H і B.

<u>Завдання 2.</u> Оцінка роботи перемагнічування A за один повний цикл.

1. Одержати на екрані віртуального осцилографа максимальну петлю гістерезису.

2. Роздрукувавши на принтері або замалювати на міліметровому папері дану криву, визначити її площу.

3. Розрахувати роботу перемагнічування за один цикл використовуючи формулу (20).

$N_1=N_2=100$; $S_2=12,5$ мм^2; $r_1=5$ мм; $r_2=8$ мм; $R_1=20$ Ом; $R_2=680$ Ом; $C=4,7$мкФ

<u>Завдання 3.</u> Визначення коерцитивної сили.

1. По максимальній петлі гістерезису знайти координату x_c, відповідну коерцитивній силі H_c.

2. За формулою (9) розрахувати H_c.

3. Визначити групу феромагнетика (магнітом'який або магнітожорсткий). Оцінити похибку вимірювання коерцитивної сили.

<u>КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ</u>

1. Як поводиться контур із струмом в магнітному полі?

2. Які властивості парамагнетиків, діамагнетиків, феромагнетиків?

3. Які причини спонтанної намагніченості доменів у феромагнетиках?

4. Як поводяться домени при збільшенні напруженості зовнішнього магнітного поля? Що означає насичення феромагнетиків?

5. У чому полягає явище магнітного гістерезису?

Міністерство освіти і науки України
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника
Фізико-технічний факультет
Кафедра фізики і методики викладання

Лабораторна робота № 11 (ФПЕ-13М)
ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛИВАНЬ В ЗВ'ЯЗАНИХ КОНТУРАХ

Івано-Франківськ

МЕТА РОБОТИ: вивчення обміну енергією в системі електричних, слабо зв'язаних між собою, контурів.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Коливальні процеси (осциляції) в електричних контурах мають аналогії в механіці. Поведінка найпростішого осцилятора – математичного маятника, що являє собою матеріальну точку масою m, підвішену на довгому нерозтяжному стержні, добре вивчена: це гармонічні коливання з частотою ω_0 .

Істотно складнішими є коливання системи двох однакових маятників, зв'язаних між собою слабкою пружиною, як це показано на рис.1. Маятники братимуть участь в колективних коливаннях, амплітудно-частотна характеристика яких залежить від зміщення маятників один відносно одного (відносна фаза).

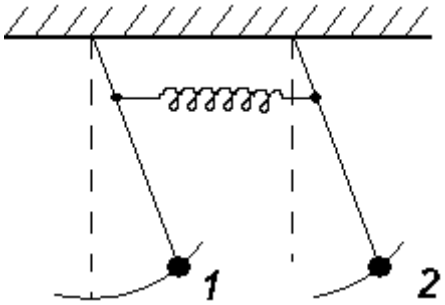


Рис. 1.

Якщо обидва маятники мають у початковий момент часу однакові зміщення, то вони коливатимуться як єдине ціле з амплітудою і частотою, яка рівна частоті і амплітуді коливань одиночного маятника ω_0 . Якщо при $t = 0$ зміщення є рівні і протилежні, то маятники коливатимуться з сталою амплітудою, але частотою ω_1 більшою від ω_0. Ці два види руху називаються нормальними модами коливань системи зв'язаних осциляторів, причому вид коливань з частотою ω_0 називають парною модою нормальних коливань і позначають знаком "+" ($\omega^+ = \omega_0$), а вид коливань з підвищеною частотою ω_1 називають непарною модою нормальних коливань і позначають знаком "-" ($\omega^- = \omega_0$). Нормальна мода коливань - це колективне коливання, при якому амплітуда коливань кожної рухомої частинки системи залишається незмінною. У складніших випадках, коли при $t = 0$, є довільний відносний зсув фаз, результуючий рух можна розглядати як комбінацію (суперпозицію) двох нормальних мод коливань, тобто як амплітудно-модульоване коливання. З суперпозицією гармонічних коливань різних частот доводиться зустрічатися в найрізноманітніших явищах. Прикладом можуть служити зокрема два камертони з різними власними частотами, які мало відрізняються одна від одної. В цьому випадку людське вухо найбільш виразно сприймає результуюче коливання як гармонічне коливання із змінною амплітудою, тобто вухо чує музичний тон, інтенсивність якого періодично змінюється з частотою $\omega_б=|\omega_1-\omega_0|$ і

періодом $T_б = \frac{2\pi}{\omega_б}$. Такий вид суперпозиції гармонічних коливань, при $\omega_1 \approx \omega_0$ але і $\omega_1 > \omega_0$, відображений на рис.2. Це явище називається *биттям*, а величини $\omega_б$ і $T_б$ - відповідно періодом і частотою биття.

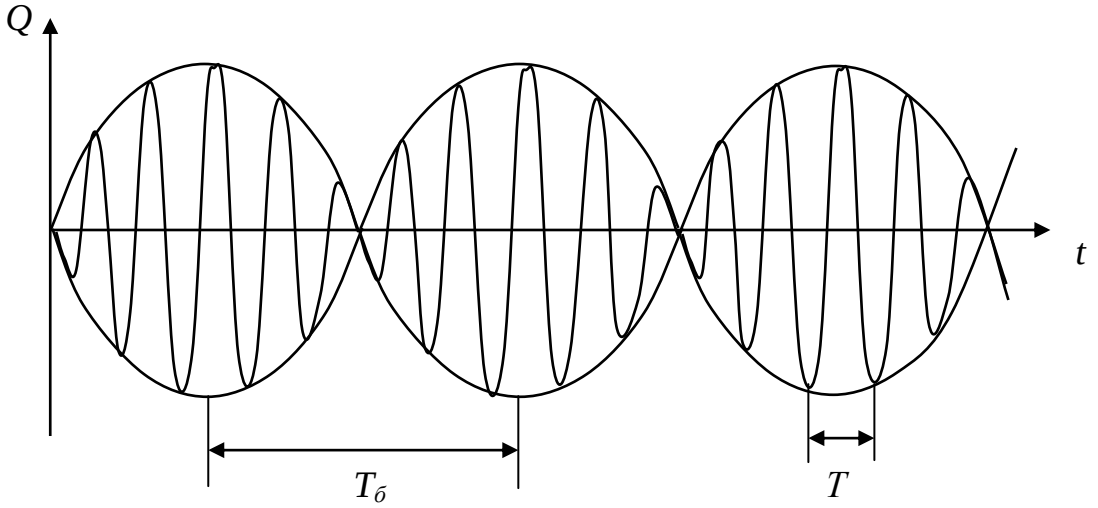


рис.2

У системі двох зв'язаних слабкою пружиною маятників биття можуть встановитися, якщо змістити один з них (наприклад, маятник 1, зліва рис.1), утримуючи інший на місці, а потім відпустити їх одночасно. В цьому випадку маятник 1 починає коливатися один, але з часом коливання маятника 2 постійно наростатимуть, а коливання маятника 1 - затухати. Через деякий час маятник 2 коливається з значною амплітудою, а маятник 1 зупиняється. У разі парної моди нормальних коливань, маятники рухаються разом, пружина не розтягнута і частота маятника така ж, як у одиночного маятника. У разі непарної моди коливань пружина розтягнута, що збільшує частоту цієї моди коливань. Якщо в якийсь момент часу зміщений тільки один з маятників, то виникають дві нормальні моди коливань, що знаходяться в певній відносній фазі. Але оскільки частота непарного коливання трохи вища за частоту парного коливання, відносна фаза змінюється в процесі колективного коливання. Амплітуда коливань першого маятника рівна нулю, а амплітуда другого досягає максимуму, коли два нормальні види коливань опиняться в протифазі, потім починається збільшення амплітуди першого маятника і процес повторюється.

Поведінку зв'язаних осциляторів легко пояснити з енергетичної точки зору: при $t = 0$ вся енергія зосереджена в маятнику 1. Оскільки маятники зв’язані пружиною, то через пружину енергія поступово передається від маятника 1 до маятника 2 до тих пір, поки вся енергія не зосередиться в маятнику 2, потім, якщо система осциляторів підживляється ззовні енергією для компенсації згасання через тертя, процес обміну енергією повторюється від маятника 2 до маятника 1 і т.д. Таким чином, "биття" - процес обміну енергією між двома гармонічними осциляторами, власні частоти яких відрізняються мало, а при $t = 0$ спостерігається відносний зсув фаз. Биття можна спостерігати і в електричній системі - в двох однакових LC - контурах, зв'язаних між собою слабким ємнісним зв'язком C_{12} , що є аналогом механічного зв'язку у вигляді пружини. Коливання в контурах (рис.3) збуджуються за допомогою перетворювача імпульсів (ПІ).

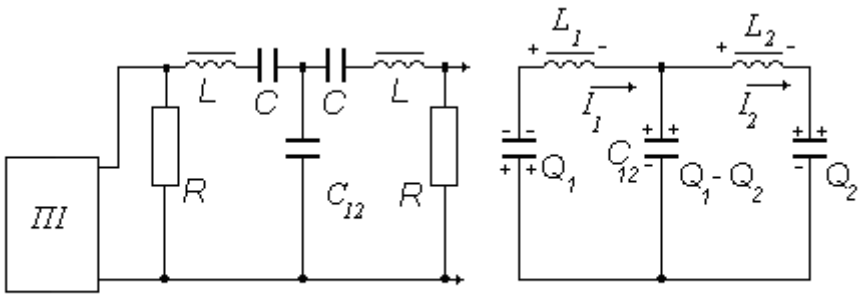


рис.3 рис.4

Для теоретичних розрахунків розглянемо спрощений варіант цієї схеми (рис.4), де позначені знаки зарядів в контурах і позитивний напрям струму. Для спостереження биття важливо, щоб струми I_1 і I_2 були напрямлені одинаково. Для двох контурів, сполучених по схемі рис.4, можна записати два рівняння, що описують коливання зарядів Q:

$$\begin{cases} L\frac{dI_1}{dt} + \frac{Q_1}{C} + \frac{Q_1 - Q_2}{C_{12}} = 0 \\ L\frac{dI_2}{dt} + \frac{Q_2}{C} + \frac{Q_1 - Q_2}{C_{12}} = 0 \end{cases} \qquad (1)$$

Підставляючи $I_1 = \frac{dQ_1}{t}$ $I_2 = \frac{dQ_2}{t}$ отримуєм

Додавши ці рівняння (2), одержуємо:

$$L\frac{d^2(Q_1+Q_2)}{dt^2}=\frac{Q_1+Q_2}{C}, \qquad (3)$$

а різниця рівнянь:

$$L\frac{d^2(Q_1-Q_2)}{dt^2}=-\frac{Q_1-Q_2}{C}-\frac{2(Q_1-Q_2)}{C_{12}} \qquad (4)$$

За допомогою проведених математичних операцій вдалося рівняння (2) записати через змінні (Q_1+Q_2) і (Q_1-Q_2). Якщо при t = 0 змінна (Q_1+Q_2) має значення $(Q_1+Q_2)_0$, то розв'язок рівняння (3) має вигляд

$$(Q_1+Q_2)=(Q_1+Q_2)_0\cdot cos\omega^+t \qquad (5)$$

частота $\omega^+=\frac{1}{\sqrt{LC}}$ рівна частоті власних коливань окремого контура. аналогічно, розв'язок рівняння (4):

$$(Q_1-Q_2)=(Q_1-Q_2)_0\cdot cos\omega^-t \qquad (6)$$

де $\omega^-=\sqrt{\frac{1}{L}(\frac{1}{C}+\frac{2}{C_{12}})}$, $(Q_1+Q_2)_0$ – значення змінної (Q_1-Q_2) при $t = 0$

Два види руху, що описуються рівнянням типу (5) і (6), називаються нормальними модами коливань системи зв'язаних осциляторів. В даному випадку вони описують коливання величини заряду в системі двох зв'язаних електричних контурів. Нормальна мода коливань – це колективні коливання, при яких амплітуда коливань кожного заряду залишається незмінною.

Якщо змістити з положення рівноваги один з контурів, то результатом будуть коливання двох нормальних мод коливань. При $Q_{20} = 0$ з (5) і (6) одержуємо:

$$Q_1=\tfrac{1}{2}Q_{10}(cos(\omega^+t)+cos(\omega^-t)) \qquad (7)$$

$$Q_2=\tfrac{1}{2}Q_{10}(cos(\omega^+t)-cos(\omega^-t)) \qquad (8)$$

Використовуючи відомі тригонометричні тотожності:

$$cosA+cosB=2cos\tfrac{1}{2}(A+B)\cdot cos\tfrac{1}{2}(A-B)$$

$$cosA-cosB=2\sin\tfrac{1}{2}(A+B)\cdot\sin\tfrac{1}{2}(A-B)$$

Можна записати рівняння (7) і (8) у вигляді:

$$Q_1 = Q_{10}\left[\cos\tfrac{1}{2}(\omega^+ - \omega^-)t\right]\cdot\cos\tfrac{1}{2}(\omega^+ + \omega^-)t \qquad (9)$$

$$Q_1 = Q_{10}\left[\sin\tfrac{1}{2}(\omega^+ - \omega^-)t\right]\cdot\sin\tfrac{1}{2}(\omega^+ + \omega^-)t \qquad (10)$$

Графіки Q_1 і Q_2 (рівняння (9) і (10)) показані на рис.2, де у початковий момент часу амплітуда Q_2 рівна нулю. Амплітуда Q_2 збільшується, а амплітуда Q_1 спадає до тих пір, поки у момент часу, що визначається із співвідношення

$$\tfrac{1}{2}(\omega^+ - \omega^-)t = \tfrac{\pi}{2}$$

амплітуда Q_1, не стане рівною нулю, а амплітуда Q_2 досягне максимуму.

Ситуацію, показану на рис.2, можна розглянути з енергетичної точки зору.

При $t = 0$ вся енергія зосереджена в контурі 1. В результаті зв'язку через конденсатор C_{12} енергія постійно передається від контура 1 до контура 2 до тих пір, поки вся енергія не збереться в контурі 2. Час, необхідний для переходу енергії з контура 1 в контур 2 і назад, можна одержати з рівняння

$$\tfrac{1}{2}(\omega^+ - \omega^-)t_{обм} = \pi,$$

а частота, з якою контури обмінюються енергією

$$\omega_{обм} = \tfrac{2\pi}{t_{обм}} = \omega^+ - \omega^- \qquad (11)$$

Для парної моди коливань, позначеної знаком "+", струми течуть в однаковому напрямі, тоді на конденсаторі C_{12} немає заряду. При цьому частота залишається такою ж, як для незв'язаних контурів, тобто $\omega^+ = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. У разі непарної моди нормальних коливань (знак "-"), конденсатор C_{12} заряджений, що збільшує частоту коливань, тобто

$$\omega^- = \sqrt{\tfrac{1}{L}\left(\tfrac{1}{C} + \tfrac{2}{C_{12}}\right)}$$

Слід зазначити, що для застосування до зв'язаних контурів розглянутої вище теорії, вони повинні мати однакову резонансну частоту $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ і, крім того, передбачається, що ємність C_{12} велика ("слабкий зв'язок"). Тоді вираз (11) можна перетворити таким чином:

$$\omega_{обм} = \sqrt{\tfrac{1}{LC}} - \sqrt{\tfrac{1}{LC} + \tfrac{2}{LC_{12}}} = \sqrt{\tfrac{1}{LC}}(1 - \sqrt{1 + \tfrac{2LC}{C_{12}}}) \approx \sqrt{\tfrac{1}{LC}}(1 - \sqrt{1 - \tfrac{2C}{C_{12}}}) \approx$$

$$\approx \sqrt{\tfrac{1}{LC}}(1 - \sqrt{1 + \tfrac{2C}{C_{12}} + (\tfrac{C}{C_{12}})^2} \approx \sqrt{\tfrac{1}{LC}}(1 - \sqrt{(1 + \tfrac{C}{C_{12}})^2} \approx \sqrt{\tfrac{1}{LC}} \cdot \tfrac{C}{C_{12}} \approx \tfrac{C}{C_{12}}\omega \qquad (12)$$

Отримане значення частоти обміну $\omega_{обм}$ (мається на увазі обмін енергії), або частоти "биття" $\omega_{обм} = \omega_б$ можна змінювати, настроюючи систему контурів шляхом зміни номіналів радіоелементів *C*, C_{12}, *L*, *R* добиваючись того, щоб частота $\omega_{обм} = \omega^+ - \omega^-$ була мінімальною.

Дослідження биття, тобто обміну енергій в зв'язаних контурах, і є одним з практичних завдань даної роботи.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Ознайомитися з описом установки і методом вимірювання.

2. Включити живлення касети ФПЕ-13м. Запустити програму ФПЕ-13м.exe. На екрані віртуального осцилографа повинна спостерігатися стабільна картина процесу "биття" в контурах.

3. Встановити частоту розгортки віртуального осцилографа, зручну для проведення досліджень.

4. Обчислити $T_{рез}$ для одного з контурів (резонансні частоти контурів близькі) за формулою Томсона $T_{рез} = 2\pi\sqrt{LC}$. Де L = , C =

6. Змінюючи ємність конденсатора зв'язку C_{12} на касеті ФПЕ-13 виміряти періоди "биття" та записати дані в таблицю 1.

Таблиця 1.

C_{12}, μF					
N					
$T_б$, с експ.					
$T_б$, с теор.					

Період "биття" визначається таким чином: підраховується кількість періодів (кількість максимумів), що укладаються в одне "биття" (число N), рис1.

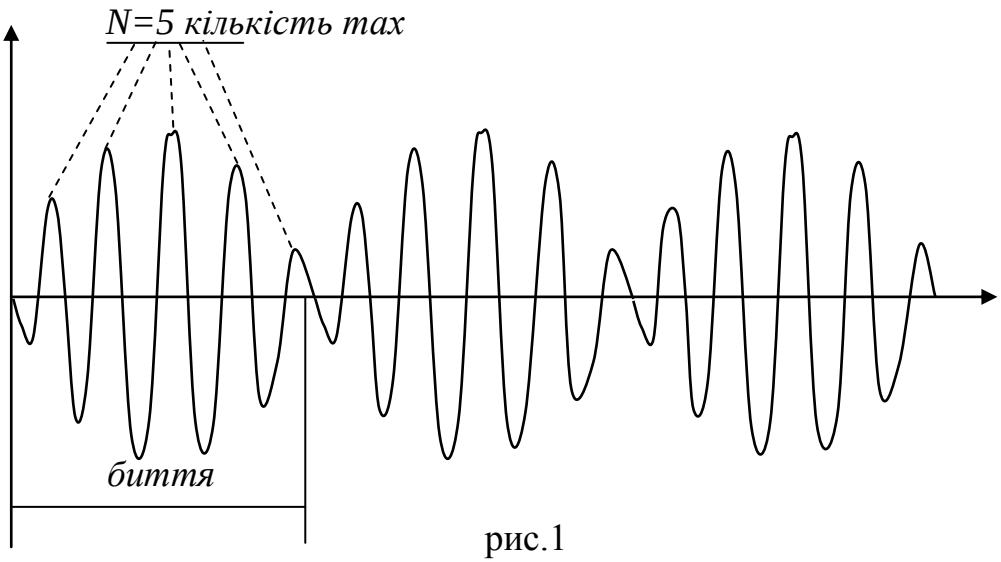


рис.1

Ця величина множиться на значення періоду обчислене за формулою Томсона, тобто $T_б = T_{рез} N$. Отримані результати записуються в таблицю. За отриманими таким чином значеннями $T_б$ побудувати графік залежності $T_б = f(C_{12})$.

7. Провести розрахунок $T_б$ за формулою $T_б = \frac{C_{12}}{C} T_{рез}$ побудувати графік залежності і порівняти його з експериментальними значеннями.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Поясніть, чому струми I_1 і I_2 (див. рис.4) повинні мати однаковий напрям.

2. Чому повинна виконуватись умова $C_{12} << C$?

3. Покажіть, що існує два максимуми струму, що припадають на частоти нормальних мод коливань.

4. Поясніть картину биття (дивися рис.2) з енергетичної точки зору.

5. Чому рівна частота обміну енергією між двома зв'язаними осциляторами.

Міністерство освіти і науки України
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника
Фізико-технічний факультет
Кафедра фізики і методики викладання

Лабораторна робота № 12

ВИВЧЕННЯ РЕЛАКСАЦІЙНИХ КОЛИВАНЬ

Івано-Франківськ

<u>Мета роботи</u>: знайти вольт-амперну характеристику газонаповненої лампи і вивчення релакційних коливань.

<u>Теоретичні відомості</u>

Гази в основному стані складаються з електрично нейтральних атомів і молекул, не мають вільних зарядів і тому не проводять електричний струм. Проводити вони можуть тільки в тому випадку, коли частина молекул іонізується – розщеплюється на позитивні і негативні іони. Звичайно проходить розщеплення на одновалентно позитивно заряджений іон і електрон. Іонізація може відбуватися внаслідок: сильного нагрівання, рентгенівських променів, радіоактивного випромінювання, космічних променів, бомбардування молекул газу які рухаються іонами і електронами (так називається ударна іонізація).

Так як в звичайних умовах газ завжди піддається впливу космічних променів і радіоактивного випромінювання, то в ньому завжди знайдуться вільні заряди. Однак інтенсивність іонізації Δn_1, вивчається числом пар іонів різного знака, виникаючи в одиниці об'єму газу за одиницю часу, в звичайних умовах дуже мала і не може забезпечити значної електропровідності. Тому гази поводять себе як ізолятор. Поряд з процесом іонізації в газі проходить і зворотній процес – рекомбінація, з'єднання позитивних і негативних іонів в нейтральні атоми. Вірогідність такого процесу пропорційна як числу позитивних, так і числу негативних іонів. Тому кількість рекомбінованих за 1*с* в одиниці об'єму пар іонів Δn_2 пропорційна квадрату іонів що міститься в одиниці об'єму:

$$\Delta n_r = k \cdot n^2, \qquad (12.1)$$

де k – коефіцієнт рекомбінації.

Під впливом іонізації і рекомбінації в газі встановлюється рівність положень (так називається динамічна рівновага), коли число пар іонів, виникаючи в одиничному об'єму за одиницю часу, рівна числу рекомбінованих пар: $\Delta n_1 = \Delta n_2$. В положенні рівноваги в одиниці об'єму газу буде знаходитись n пар іонів:

$$n = \sqrt{\frac{\Delta n_1}{k}} \qquad (12.2)$$

Якщо газ, знайдений під впливом зовнішнього іонізатора, закріплений в колбу з впаяними в неї електродами, то при подачі на електроди напруги по трубці пройде струм. Процес проходження струму через газ називається газовим розрядом. Коли електропровідність газу виникає за рахунок зовнішнього іонізатора, то електричний струм, виникаючи в ньому, називається несамостійним розрядом. Із припиненням дій зовнішнього іонізатора такий розряд припиняється. Електричний розряд в газі, зберігається після припинення дій зовнішнього іонізатора, називається самостійним газовим розрядом. Щоб це здійснити необхідно, щоб в результаті самого розряду в газі безперервно утворились вільні заряди.

Величина електричного струму в газі *j* (електричний струм, проходить через одиницю площі поперечного перерізу) зумовлена рухом як позитивних, так і негативних зарядів:

$$j = q^{+}\, nV^{+} + q^{-} nV^{-}\,, \qquad (12.3)$$

де $q+$ і q^{-} – величини позитивних і негативних зарядів; ϑ^{+} і ϑ^{-} – середня квадратична швидкість впорядкованого руху заряду; *n* – концентрація заряду

Середня швидкість впорядкованого руху пропорційна напруженості електричного поля *E*:

$$\vartheta^{+} = \vartheta^{+} \cdot E\,; \qquad \vartheta^{-} = \vartheta^{-} \cdot E\,, \qquad (12.4)$$

де ϑ^{+} і ϑ^{-} – рухи позитивних і негативних зарядів (швидкість їх впорядкованого руху при напруженості електричного поля *E=I* В/м). Тоді

$$j = (q^{+} \cdot \vartheta^{+} + q^{-} \cdot \vartheta^{-})nE\,. \qquad (12.5)$$

Порівняємо цю формулу із законом Ома в диференціальній формі:

$$j = \sigma \cdot E\,, \qquad (12.6)$$

де *G* – електропровідність.

Електропровідність буде рівна:

$$\sigma = (q^{+} \cdot \vartheta^{+} + q^{-} \cdot \vartheta^{-})n\,. \qquad (12.7)$$

Враховуючи, що гази іонізуються, як правило, на електрон і одновалентний позитивно заряджений іон, можна записати:

$$\sigma = e \cdot n(\vartheta^{+} \cdot \vartheta^{-}). \qquad (12.8)$$

Залежність стуму від прикладеної до електродів напруги називається вольт-амперною характеристикою. Вона зображується на рис. 12.1.

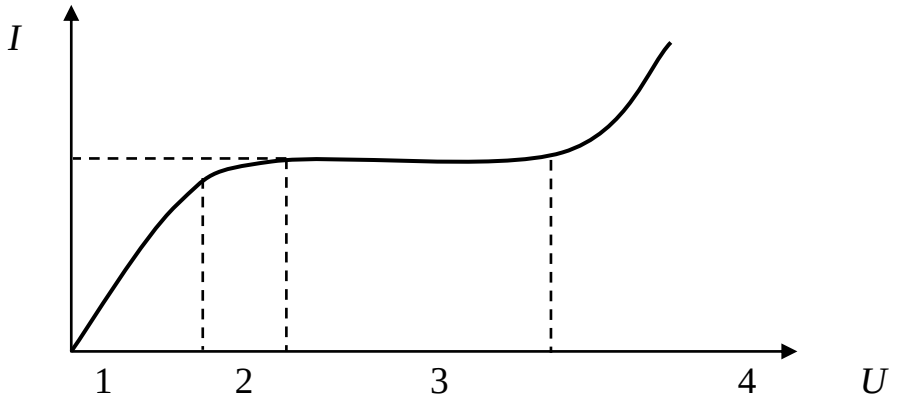


Рис.12.1

Коли до електродів прикласти напругу, то іони і електрони під дією сил зі сторони електричного поля будуть рухатись до протилежних електродів. При малих напругах (ділянка 1) концентрація зарядів залишається постійною, так як інтенсивність іонізації Δn_1 буде постійною, а електроди будуть досягати лише незначного числа заряджених частинок. Тому електропровідність також залишається постійною, і сила струму пропорційна напруженості електричного поля в відповідності до закону Ома (12.6).

Із збільшенням різниці потенціалів (ділянка II) лінійна залежність порушується. Це пов’язано з тим, що під дією поля значна частина іонів і електронів досягає електродів. Це призводить до зменшення концентрації заряду і порушення пропорційності між струмом і напругою. Починаючи з деякого значення напруга (ділянка III), струм залишається незмінним з зростанням напруги. Це пояснюється тим, що всі заряди, виникаючі в газі під дією зовнішнього іонізатора, досягають електродів, не встигаючи рекомбінувати. Тому при незмінній інтенсивності іонізації не проходить дальшого росту струму при збільшенні напруги. Коли в

об'ємі трубки V в одиницю часу утворюється $\Delta n_1 V$ пар вільних зарядів і всі вони попадають на електроди, то струм в трубці буде:

$$I_н = \Delta n_1 \cdot V \cdot e, \qquad (12.9)$$

Де $I_н$ – струм насичення – максимально можливий струм при даній інтенсивності іонізації. Газовий розряд, проходить при напругах, які відповідають областям I, II, III, знаходиться несамостійний газовий розряд.

При подальшому зростанні напруги (ділянка 4) проходить різне збільшення струму. Це пояснюється ударною іонізацією: електрони, які виникли в газі за рахунок зовнішнього іонізатора під час часу свого руху до аноду під дією електричного поля, набувають енергії, достатньої для іонізації нейтральних молекул газу при зіткненні з ними. При зіткненні утворюються вторинні електрони і іони. В свою чергу вторинні електрони, які прискорювались полем, можуть також іонізувати нейтральні молекули газу.

Число носіїв струму лавиноподібно зростає, зростає і величина струму. Але розряд в газі залишається ще несамостійним, так як ударна іонізація, викликана одними електронами, недостатня для підтримання розряду при знищенні зовнішнього іонізатора. Це визначено тим, що електрони рухаються в електричному полі від катода до анода. Тому вони можуть іонізувати тільки ті молекули газу, які стоять ближче до анода порівняно з місцем виникнення даного електрона. Поблизу катода електрони ще не мають енергії, достатньої для іонізації, і в цій області електрони можуть виникати тільки завдяки наявності зовнішнього іонізатора.

Коли дія останнього припиняється, то область ударної іонізації буде постійно скорочуватись, притягаючись до аноду по мірі руху до нього електронів, і в кінці кінців ударна іонізація і електричний струм в газі припиняється. Перехід від несамостійного розряду до самостійного залишається можливим лише при такій напрузі між електродами, коли позитивні іони теж набувають енергії, достатньої для іонізації молекул газу, виникають два зустрічних потоки, кожен з яких здатний викликати іонізацію газу. В цьому випадку зовнішній іонізатор не відіграє важливої ролі в газовому розряді, так як число початкових іонів мале порівняно з

числом вторинних іонів і припинення дії іонізатора не впливає на проходження розряду.

Досвіт показує, що в більшості випадках спостерігається не ударна іонізація молекул газу іонами, а вибивання ними електронів з поверхні катода, так як в цьому випадку робота, виконана іонами, менша, чим при ударній іонізації. Поряд з процесами вибивання іонами електронів із катодів – вторинна емісія, не менш важливим виявляється фотоефект – вибивання електронів із катода під дією світла – достатньо швидкий електрон може не тільки іонізувати молекулу, але і перевести утворений іон в збуджений стан. Переходячи за цим в постійне положення, іон залишає квант енергії, який здатний викликати фотоіонізацію. Випускання світла проходить при рекомбінації позитивних іонів з електронами – «рекомбінаційне свічення».

Підвищення напруги на електродах, може викликати всі ці процеси і здійснити перехід від несамостійного розряду до самостійного. Цей перехід називається електричним пробігом газу, а відповідна напруга – напруга запалювання $U_З$. Вона залежить від хімічної природи газу, матеріалу катода, форми електродів і відстані між ними, тиску газу і наявності в ньому примісій.

Ідеалізовану вольт - амперну характеристику газонаповненої лампи яку ми вивчаємо в даній роботі наведено на рис. 12.2.

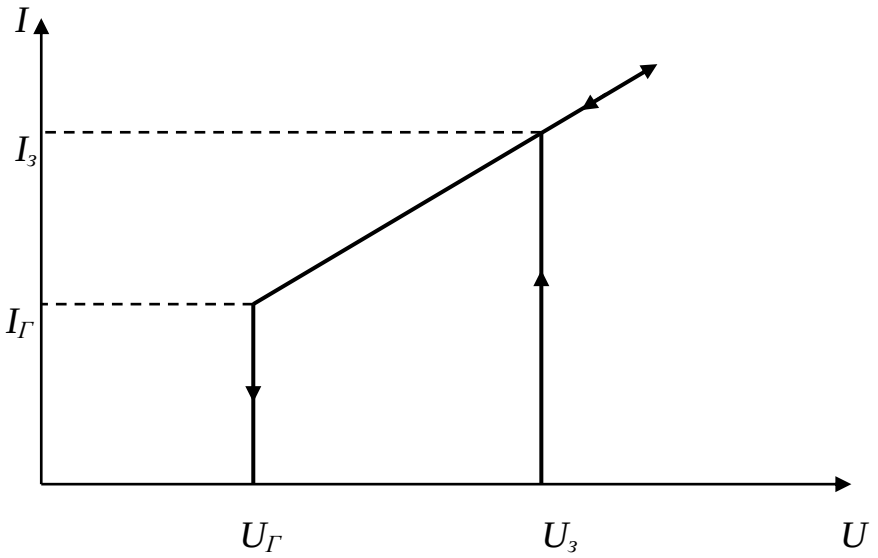


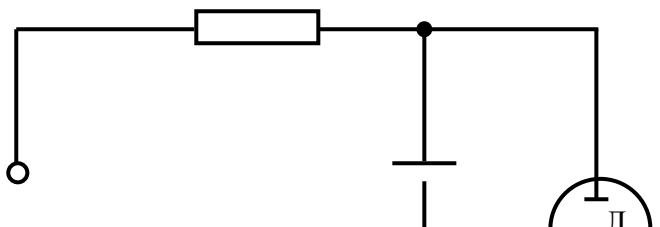
Рис.12.2

При напрузі $U<U_З$ струм в лампі при звичайних зовнішніх іонізаторах малий, і ми його розглядати не будемо.

Якщо збільшувати різницю потенціалів на електродах лампи, то при значенні $U<U_З$ стрибком встановлюється значення струму, рівне $I_З$, і лампа «загоряється». При подальшому зростанні напруги струм збільшується за законом, близьким до лінійного. Якщо зменшувати напругу на «лампі», то при напрузі, рівній $U_З$, лампа ще не гасне. Продовжуючи зменшення напруги, можна побачити, що лише при деякій напрузі (напруга згасання $U_Г$), яка менша, чим $U_З$, лампа «гасне» і струм стрибкоподібно падає. При цьому самостійний розряд в лампі припиняється. У звичайної лампи залежність $I = f(U)$ виявляється не повністю лінійною, причому при $U>U_З$ криві, зняті при зростанні і спаданні напруги, не повністю співпадають. Але ці відмінності не значні, і ми можемо в даній роботі цим знехтувати.

Наповнені газом лампи часто використовують для отримання релаксаційних коливань. Релаксаційні коливання – періодичне коливання, яке за формою різко відрізняється від синусоїдальних і являє собою процес виникнення електричної напруги. яка періодично повторюється.

Розглянемо роботу генератора релаксаційних коливань. Принципова схема представлена на рис.12.3. Він складається із джерела постійної напруги U_0, конденсатора ємністю C, опора R і лампи *Л*. Якщо підключити джерело, то в колі появиться струм. Опір лампи, яка не світиться нескінченно великий, і струм буде заряджати конденсатор. Різниця потенціалів на його обкладках буде зростати. Відповідно зростає і різниця потенціалів на електродах лампи, підключених паралельно конденсатору. Коли вона досягає значення напруги запалювання $U_З$, лампа «загоряється» його опір стрибкоподібно зменшується, і вона починає проводити струм. Так як опір R великий, то підтримувати струм будуть в основному заряди, розміщені на обкладках конденсатора. Це викликає швидке спадання напруги на конденсаторі, і коли він досягає значення напруги гашення $U_Г$, лампа «гасне» і процес починається знову. Виникають релаксаційні коливання. Крива зміни напруги на конденсаторі представлена на мал. 12.4.



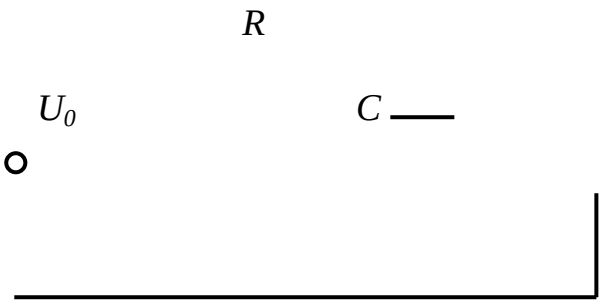


Рис. 12.3

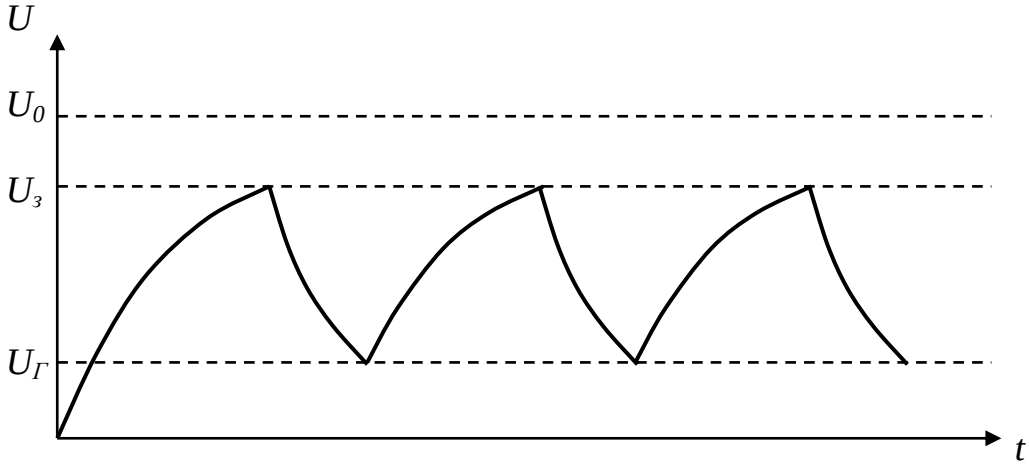


Рис.12.4

Знайдемо закон, за яким буде змінюватися напруга на конденсаторі.

В будь-який момент часу величина напруги U_0 рівна сумі напруг в елементах кола:

$$U_0 = IR + U, \qquad (12.10)$$

де U – різниця потенціалів на обкладках конденсатора.

Заряд конденсатора змінюється впродовж протікання по колі електричного струму:

$$dq = I \cdot dt. \qquad (12.11)$$

Зміна заряду викликає зміну різниці потенціалів:

$$dU = \frac{dq}{C} \qquad (12.12)$$

Із рівняння (12.11) і (12.12) знаходимо:

$$I = C\frac{dU}{dt}, \qquad (12.13)$$

Підставляючи (12.13) в (12.10), отримаємо:

$$RC\frac{dU}{dt} = Uo - U, \qquad (12.14)$$

Перетворимо рівняння (12.10):

$$\frac{dU}{Uo^3U} = \frac{dt}{RC}, \qquad (12.15)$$

Проведемо інтегрування:

$$\ln(Uo - U) = -\frac{t}{RC} + const, \qquad (12.16)$$

Сталу інтегрування знаходимо із умови: при *t=0 U=0*. Тоді *const=lnUo*.

Потенціюючи вираз (12.16), отримаємо закон зростання напруги на конденсаторі генератора релаксаційних коливань:

$$U = U_o\ (1 - e^{-t/RC}) \qquad (12.17)$$

Обладнання:

1. БЖ – блок живлення;
2. РО – електронний осцилограф;
3. PQ – звуковий генератор;
4. PA – амперметр;
5. МО – магазин опорів;
6. МС – магазин ємностей;
7. ФПЕ-12 – модуль.

Опис установки.

Електрична схема установки зібрана в модулі ФПЕ-12 рис.12.5. При вимкненій кнопці «режим» реалізується схема отримана вольт-амперною характеристикою газонаповненої лампи. При натисненій кнопці «режим» отримується схема генератора релаксаційних коливань рис.12.3. Магазин ємностей МС і опорів МО виконують роль ємності *C* і опора *R* генератора.

В роботі визначається період релаксаційних коливань двома способами. Перший спосіб полягає в тому, що сигнал від отриманих в колі релаксаційних

коливань поступає на вхід осцилографа і на екрані останнього можна спостерігати зображення цих коливань.

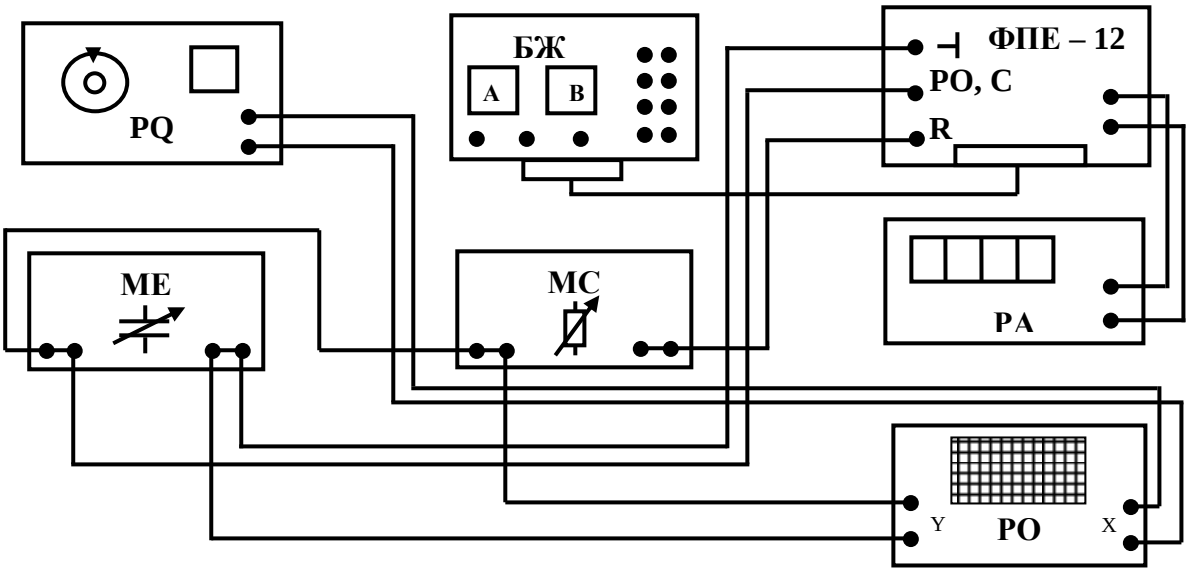


Рис.12.5

Період можна виміряти безпосередньо з екрану при роботі осцилографа в режимі вимірювання довжини сигналу.

Другий спосіб, більш точний, полягає в тому, що додатково на другий вхід осцилографа поступає сигнал певної частоти. В електронно-променевій трубці проходить накладання двох взаємно перпендикулярних коливань: релаксаційних коливань лампи і синусоїдальних коливань, що подаються на другий вхід осцилографа. В результаті на екрані появляються фігури Ліссажу. Якщо частоти коливань, які накладаються відносяться як цілі числа, то картина на екрані нерухома. Знаючи частоту сигналу, який подається, по вигляді фігури Ліссажу можна визначити відношення частот і частоту релаксаційних коливань.

Порядок виконання роботи.

Скласти електричну схему див. мал.. (12.5)

Завдання І. Зняття вольт-амперної характеристики газонаповненої лампи.

1. Підготувати прилади до роботи:

Кнопку «режим» модуля ФПЕ-12 вимкнути. Ручку регулювання напруги *120В* джерело живлення встановити в крайнє ліве положення. Вимірювальний прилад PA підготувати до роботи в режимі, обчислювальними вимірюваннями сили струму до *12мА*.

2. Включити електронний стенд, джерело живлення БЖ і вимірювальний прилад PA.
3. Ручкою регулювання напруги джерела живлення змінювати напругу від *40* до *120В* через *10В* і вимірювати силу струму в $I_{пр}$. Записати в другий рядок таблиці 1 значення сили струму.

Таблиця 1.

U, В	*40*	*50*	*60*	*70*	*80*	*90*	*100*	*110*	...
$I_{пр}$, *мА*									
$I_{обр}$, *мА*									

4.Зменшуючи напругу від *120В* до *40В*, виміряти силу струму $I_{обр}$. Результати внести в третій рядок таблиці 1.

5. Визначити напругу запалювання і гасіння лампи, Для цього вибрати із таблиці 1 інтервал напруги, в якім лампа запалилась (погасла). У вибраному інтервалі, поступово збільшуючи (зменшуючи) напругу на *1-2В*, зафіксувати таку напругу, при якій струм в лампі стрибком збільшується від *0* до скінченої величини (або зменшується до *0*). Це і буде напруга запалювання(гасіння).
6. Виключити вимірювальний прилад.
7. Побудувати графік залежності струму *I* від напруги *U* .

Завдання 2. <u>Вивчення роботи генератора релаксаційних коливань.</u>

1. Приготуватиприлади до роботи:

Натиснути кнопку «режим» модуля ФПЕ-12. Встановити на магазині опорів $R = 1 \cdot 10^6$ *Ом*. На магазині ємностей встановити ємність $C = 3 \cdot 10^{-3}$ *мкФ*. На джерелі живлення ручку регулювання вихідної напруги *120В* встановити в

крайнє ліве положення. Осцилограф підготувати до роботи в режимі довжини сигналу.

2. Включити лабораторний стенд, джерело живлення і осцилограф. Встановити ручкою регулювання джерела живлення *110В*, яке надалі підтримує стан. Підсилення по осі *Y* осцилографа установити таким, щоб можна було вимірювати змінну напругу *1В*. Включити генератор розгортки осцилографа і встановити таку частоту розгортки, щоб на екрані було видно *1-2* релаксаційних коливання.
3. Виміряти на екрані осцилографа період релаксаційних коливань.
4. Виміряти період релаксаційних коливань з допомогою генератора сигналів PQ. Підготувати осцилограф до роботи в режимі спостереження фігур Ліссажу. Включити генератор PQ і встановити вихідну напругу *~1В* і частоту *~200Гц*. Включити генератор розгортки осцилографа. Плавно змінюючи на генераторі PQ частоту вихідного сигналу, отримати на екрані осцилографа нерухому фігуру Ліссажу, відповідно відношенню частот *1:1* рис.12.5. Записати значення частот генератора PQ . Поступово збільшуючи частоту сигналу, отримати фігури Ліссажу, відповідно відношення частот *1:2* і *1:3*. Записати значення цих частот. Розрахувати частоту релаксаційних коливань по формулі $f = \frac{f_{12}}{n}$, де f_{12} - частота сигналу генератора PQ, виміряна в першому, другому і третьому випадках; $n=1,2,3$ – відношення частоти сигналу генератора PQ до частоти релаксаційних коливань. Знайти середнє значення f і розрахувати період релаксаційних коливань: $T = \frac{1}{f}$.
5. Виключити осцилограф, генератор сигналів, джерело живлення і лабораторний стенд.
6. Розрахувати похибки визначення періоду релаксаційних коливань, отриманих в п.4, задається похибкою генератора сигналів із його паспортних даних.

<u>Контрольні питання.</u>

1. Від чого залежить електропровідність газів?

2. Пояснити вольт-амперну характеристику газонаповненої лампи.
3. Який механізм виникнення самостійного розряду?
4. Як працює генератор релаксаційних коливань?
5. Що таке фігури Ліссажу і як вони одержуються вданій роботі?

Література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики: Навчальний посібник. -Т. 2.: Електрика і магнетизм. - К.: Техніка, 2001. - 452 с.
2. Шут М.І., Сташкевич О.М., Касперський А.В., Січкар Т.Г. Електрика і магнетизм. - К.: НПУ імені М.П.Драгоманова, 2002. - 236 с.
3. Бушок Г.Ф. та ін. Курс фізики. У двох книгах. Кн. 1.: Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм: Навч. пос. для студ. фіз.-мат. спец. пед. навч. закладів. /Авт.: Г.Ф. Бушок, В.В. Левандовський, Г.Ф. Півень. - 2-ге вид. - К.: Либідь, 2001. - 448 с.
4. Загальна фізика. Лабораторний практикум: Навч. посібник за заг.ред. І.Т. Горбачука. - К.: Вища школа, 1992. - 509 с.
5. Л. Д. Дідух. Електрика та магнетизм : підручник — Тернопіль : Підручники і посібники, 2020. — 464 с.