

531(075.8)
17 691

Національний університет
"КИЄВО-МОГИЛЯНСЬКА АКАДЕМІЯ"



Факультет природничих наук
Кафедра фізико-математичних наук

Практикум з електрики та магнетизму

Навчальний посібник

МЕТОДИЧНА СЕРІЯ



2006

AVAC

537.001.5
691



Національний
«КИЄВО-МОГИЛЯНСЬКА АКАДЕМІЯ» університет

Факультет природничих наук
Кафедра фізико-математичних наук

Практикум з електрики та магнетизму

Навчальний посібник

Київ



Видавничий дім
«Києво-Могилянська академія»
2006

Наукова бібліотека
Університету
«Києво-Могилянська
академія»

У посібнику описані лабораторні роботи до курсу «Електрика та магнетизм», які виконуються студентами 2-го року навчання кафедри фізико-математичних наук Національного університету «Києво-Могилянська Академія» (НаУКМА) паралельно із слуханням лекцій та роботою в семінарах.

Практикум може бути рекомендований для студентів фізичних спеціальностей та студентів природничих факультетів вузів, які вивчають загальний курс фізики.

Упорядник

Шиманська О. Т., кандидат фіз.-мат. наук, доцент кафедри фізико-математичних наук природничого факультету Національного університету «Києво-Могилянська академія»

Рецензент

Анісімов І. О., доктор фіз.-мат. наук, завідувач кафедри фізичної електроніки радіофізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

*Затверджено до друку Вченою радою НаУКМА
Протокол № 1 від «3» лютого 2005 року*

© О. Т. Шиманська
упорядкування, 2006
© НаУКМА, 2006

Передмова

У даному навчальному посібнику подано описи лабораторних робіт, які входять до програми курсу «Електрика та магнетизм», що читається студентам другого року навчання на кафедрі фізико-математичних наук Національного університету «Кієво-Могилянська Академія». Теми лабораторних робіт електричного практикуму охоплюють майже всі розділи цього курсу.

В електричному практикумі студенти вивчають роботу основних електричних приладів, знайомляться з особливостями електричних методів вимірювання і набувають практичних навичок з експериментальних досліджень.

В описах лабораторних робіт цього навчального посібника до кожної роботи наведені короткі теоретичні відомості по темі роботи, електрична схема та порядок виконання роботи. В кінці опису кожної роботи наведено список літератури для детального ознайомлення з матеріалом.

Посібник призначений в першу чергу для студентів кафедри фізико-математичних наук НаУКМА, але він може бути використаний студентами кафедр біології, екології та хімії природничого факультету НаУКМА при виконанні лабораторних робіт із курсу загальної фізики та студентами природничих факультетів інших вузів.

У постановці лабораторних робіт цього електричного практикуму, підготовці до друку даного посібника брали участь (окрім укладача цього посібника) співробітники: Голод П. І., Мельник Р. М., Рудько Г. Ю., Соколов М. І.

Поради і настанови студентам при виконанні робіт електричного практикуму

1. Опис лабораторних робіт, наведений в цьому посібнику, є лише стислим викладенням змісту експериментальних робіт, які повинен виконати і засвоїти студент при вивченні дисципліни «Електрика та магнетизм». Об'єм відомостей і навичок, які будуть надбані студентом в процесі виконання кожної лабораторної роботи, визначається, головним чином, не стільки описом роботи, скільки ставленням студента до виконання роботи.

2. Немає ніякого сенсу студенту приступати до виконання роботи без чіткого уявлення про основні положення теорії явищ, що будуть вивчатися, бо він не зможе відділити ці явища від можливих випадкових ефектів, що можуть бути пов'язані з неробочим станом установки.

3. Перед виконанням роботи необхідно детально ознайомитись з будовою приладів та деталей, призначених для виконання роботи. Не слід шкодувати часу на цю попередню стадію експериментальної підготовки, вважаючи, що на вимірювання не вистачить часу. Слід ознайомитись з інструкціями невідомих вам електричних приладів, вивчити шкали приладів, звернувши увагу на їх класи точності. Якщо будуть виявлені якісь неполадки приладів, їх слід усунути. Саме це сприяє надбанню експериментальних навичок.

4. При роботі з електричними приладами слід ставитись до них з особливою увагою і обережністю. Поломка електричних приладів може статися не лише в наслідок механічних причин, але і з причин суто електричного характеру, а саме у випадку неправильного з'єднання провідників. Тому при виконанні робіт всі з'єднання в електричному колі слід виконувати провідниками з непошкодженою ізоляцією через клеми приладів. Недопустимим є з'єднання провідників шляхом скручування.

При складанні електричної схеми слід спочатку з'єднати провідниками всі деталі електричної схеми, окрім джерела напруги. Джерело живлення включається після детальної перевірки зібраної схеми викладачем або лаборантом. Це робиться для того, щоб уникнути випадків псування приладів при коротких замиканнях. Перед включенням джерела напруги слід попередньо встановити максимальними значення опорів в колі, а потім, після включення джерела струму, підібрати необхідний режим роботи кола.

У випадку виявлення надмірного нагрівання окремих частин схеми або появи запаху гарі необхідно терміново вимкнути струм в колі і повідомити про це викладача або лаборанта.

5. Право на самостійне включення схем студенти одержують лише після того, як вони надбають певний досвід роботи в лабораторії. Це право надається викладачем індивідуально кожному студенту.

6. Виконання вимірів слід робити вдумливо, не поспішаючи. Виміри повинні виконуватись з максимально можливою для даної установки точністю. Саме такі дані будуть цікавими при обробці і обговоренні результатів. При намаганні одержати більш точні результати слід розумно узгоджувати між собою точності виміру різних величин в даній задачі.

7. Намагайтесь акуратно вести **робочий зошит**. Готуючись до лабораторної роботи в ньому слід записати дату виконання роботи, назву роботи, вказати метод вимірювання, навести електричну схему, необхідні формули для розрахунків і обробки результатів вимірів, а також написати про точність і чутливість приладів, що застосовуються в даній задачі. Бажано заздалегідь скласти відповідну табличку в робочому зошиті, в яку будете заносити результати вимірювань. Записи експериментальних вимірів слід проводити акуратно. Результати первинних вимірів не підправляйте, не

підтирайте, краще закресліть і зробіть нові вимірювання та записи. Неохайні записи можуть привести до грубих помилок і невірних висновків при обробці результатів експериментів. Перші наближені обчислення результатів повинні обов'язково робитися на самому початку роботи, тут же в лабораторії в робочому зошиті. Такі оцінки дозволяють вчасно помітити неполадки в установці, розібратися в специфіці роботи і правильно спланувати послідовність та хід основних вимірів. Записи в робочому зошиті слід вести в послідовності проведення вимірів. Намагайтеся якомога повніше вести чорнові (первинні) записи результатів, які ви одержуєте в лабораторії.

Домашня обробка результатів дослідів може проводитись в тому ж робочому зошиті або в зошиті для звітів.

8. Вказівки в описі лабораторної роботи щодо кількості вимірів є лише орієнтовними. Число вимірів повинен встановити сам експериментатор, виходячи із результатів своїх дослідів. Якщо в спостереженнях має місце великий розкид експериментальних даних, слід повернутись до налагодження установки, а не бездумно збільшувати кількість вимірювань. Якщо в роботі досліджується залежність однієї величини від іншої, то кількість вимірів слід збільшити в місцях знаходження максимуму чи мінімуму, щоб одержати там більшу щільність експериментальних точок. В кінці роботи слід обов'язково повернутись до початку кривої і повторити перші виміри. Це дозволить перевірити стабільність роботи установки. При виконанні вимірів в зворотньому до попереднього напрямку можна виявити явище гістерезису.

9. Результати остаточної обробки даних студент наводить в зошиті для звітів. Захист повністю оформленої лабораторної роботи повинен бути здійснений студентом до початку виконання наступної лабораторної роботи. При

захисті студент пред'являє викладачеві як зошит для звітів, так і робочий зошит.

10. Істотну допомогу при аналізі одержаних результатів надає їх графічне представлення. Графіки слід виконувати на міліметровому папері з максимальною акуратністю (папір зошита в клітинку для цієї мети мало придатний). Слід уважно продумати, які величини краще всього відкласти на осях координат і вибрати зручний, розумний масштаб. Криві на графіку проводять таким чином, щоб було видно окремі точки, одержані в експерименті. Бажано криві проводити олівцем, щоб залишалась можливість для введення поправок в процесі обговорення результатів з викладачем. Точки, одержані в різних серіях вимірів, позначаються різними значками: точка, кружечок, трикутник, хрестик і таке інше.

11. При обробці результатів слід ретельно обдумати можливе джерело похибок. Проміжні обчислення повинні виконуватись з точністю, яка дещо перевищує точність вимірів, щоб уникнути внесення не виправданих помилок, пов'язаних з обчисленнями. При обчисленнях звичайно зберігають на один знак більше, ніж буде залишено в остаточній відповіді.

12. При порівнянні своїх результатів з даними таблиць, або з результатами товаришів і при виявленні неспівпадіння цих результатів не слід вважати свої дані помилковими. Треба зрозуміти причини цього (звернутись до книжок або до викладача). При захисті робіт з «поганими» результатами студент, при їх обговоренні з викладачем, часто одержує значно більше інформації, ніж при наявності «хороших» результатів, які здебільшого не викликають додаткових запитань.

Найкорисніше, що може дати цей практикум студентові, це те, що в процесі вдумливої сумлінної праці він сам в собі може розвинути:

- а) вміння застосовувати теоретичні знання в експериментальній роботі,
- б) вміння правильно поставити експеримент і уникнути помилок,
- в) вміння аналізувати результати дослідів,
- г) вміння бачити важливі і цікаві особливості та дрібниці, з яких, як нерідко буває, випливають задачі для серйозних наукових досліджень.

1. Модель електростатичного поля. Розподіл потенціалу та напруженості.

Мета роботи: експериментально дослідити характер електростатичного поля на прикладі моделі, створеної у слабопровідному середовищі за допомогою змінного струму; знайти геометричне місце точок однакового потенціалу та лінії напруженості.

Прилади та матеріали: стабілізоване джерело змінної напруги (~10В), подільник напруги, осцилограф, мілка плоска пластикова посудина, електроди різної форми, металевий зонд, папір (формату А4), склянка з водою (для зволоження паперу), 2 вольтметри.

Теоретичні відомості

Кожен заряд створює в оточуючому просторі електричне поле, яке діє на інші заряди.

Електричні поля, які створюються нерухомими зарядженими частинками і не змінюються з часом, називають *електростатичними*.

Електростатичне поле, створене зарядом q або системою зарядів, є потенціальним. Воно характеризується *напруженістю поля* \vec{E} і *потенціалом* φ , які визначаються так

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}, \quad \varphi = \frac{A}{q_0}, \quad (1.1)$$

де q_0 – додатній точковий заряд, внесений в дану точку поля (пробний заряд), \vec{F} – сила, що діє на заряд q_0 з боку заряду q .

Із формули (1.1) видно, що напруженість E є *силовою характеристикою поля*.

Напруженість E чисельно рівна силі, що діє на одиничний додатній точковий заряд, внесений в дану точку поля, і спрямована в бік дії цієї сили.

Електричне поле вважається заданим, якщо в кожній точці простору відомі величина і напрям вектора \vec{E} . Всі інші характеристики електростатичного поля можуть бути обчислені через напруженість.

Формула $\vec{E} = \vec{F}/q_0$ – є математичним означенням напруженості електричного поля і використовується для введення одиниці виміру цієї величини.

В системі СІ величина E вимірюється в вольтах на метр (В/м). Вольт на метр є напруженість електричного поля, що діє на заряд в 1 Кл з силою в 1 Н.

Потенціал ϕ є енергетичною характеристикою поля і визначається роботою A , що здійснюється силами поля при переміщенні одиничного точкового позитивного заряду q_0 із даної точки поля на нескінченність.

Формула $\phi = A/q_0$ є математичним визначенням потенціалу електричного поля і може бути використана для введення одиниці виміру потенціалу (1В).

Для частинного випадку поля, створеного точковим зарядом, вирази для напруженості \vec{E} і потенціалу ϕ будуть мати вигляд:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon r^2} \vec{r} \quad \text{та} \quad \phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon r}. \quad (1.2)$$

Ці формули є наслідком закону Кулона.

Графічно електростатичне поле зображається за допомогою силових ліній та еквіпотенціальних поверхонь.

Силову лінію називається лінія, дотична до якої в будь-якій точці збігається з вектором напруженості поля \vec{E} . Густоту проведення силових ліній в околі довільної точки вибирають пропорційною величині вектора \vec{E} .

Еквіпотенціальною поверхнею називається геометричне місце точок однакового потенціалу. Як правило, електричне поле графічно зображають так, щоб при переході від однієї еквіпотенціальної поверхні до іншої приріст потенціалу був

однаковим. При цьому в місцях, де еквіпотенціальні поверхні найближче підходять одна до одної, напруженість поля буде максимальною.

В термінах ліній поля закон Гауса твердить, що силові лінії можуть починатися на додатних зарядах і закінчуватися на від'ємних зарядах, а кількість ліній, що виходять із заряду q , пропорційна q/ϵ_0 .

Вектор напруженості електричного поля \vec{E} перпендикулярний до еквіпотенціальної поверхні. Якби він не був перпендикулярним до еквіпотенціальної поверхні, у нього існувала б складова вздовж еквіпотенціальної поверхні, і потенціал змінювався б уздовж поверхні, і тоді не можна було б вважати її еквіпотенціальною. Тому еквіпотенціальні поверхні неодмінно повинні скрізь проходити перпендикулярно до силових ліній електростатичного поля.

Силові лінії та еквіпотенціальні поверхні для позитивного точкового заряду, показані на рис. 1.1.

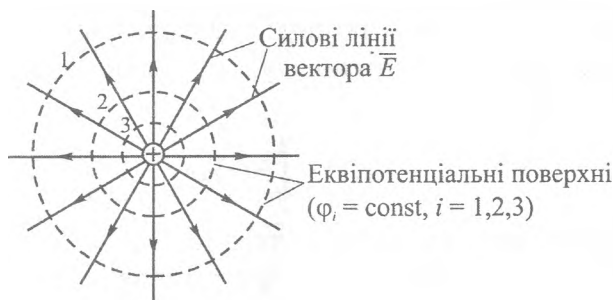


Рис. 1.1. Силові лінії поля та еквіпотенціальні поверхні (на рисунку в перерізі це лінії у вигляді кіл) поблизу позитивного точкового заряду.

Лінії сталого потенціалу ϕ , які є результатом перерізу еквіпотенціальних поверхонь площиною рисунка (рис. 1.1), поблизу точкового заряду мають вигляд кіл, бо точковий заряд створює навколо себе поле саме сферичної симетрії.

Між напруженістю \vec{E} і потенціалом електричного поля ϕ існує зв'язок:

$$\vec{E} = -\overline{\text{grad}}\phi, \quad (1.3)$$

де $\overline{\text{grad}}\phi$ означає вектор з координатами $\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}, \frac{\partial\phi}{\partial y}, \frac{\partial\phi}{\partial z}\right)$.

Знак мінус в (1.3) вказує на те, що вектор напруженості \vec{E} спрямований у напрямку, протилежному до $\overline{\text{grad}}\phi$, тобто в бік, протилежний зростанню потенціалу ϕ .

Для полів сферичної симетрії співвідношення (1.3) набуває вигляду:

$$\vec{E} = -\frac{d\phi}{dr} \vec{r}. \quad (1.4)$$

Ця формула використовується при розрахунках електричних полів для знаходження напруженості \vec{E} , якщо відомий розподіл потенціалу ϕ .

Якщо ж відомим є розподіл напруженості $E(r)$, можна розрахувати розподіл потенціалу $\phi(r)$, записавши формулу (1.4) у вигляді:

$$\phi(r) = \int_r^{r_0} E(r) dr. \quad (1.5)$$

де r – біжучий радіус, а r_0 – початковий.

На рис. 1.2 зображено електростатичне поле диполя, що складається з двох однакових за величиною і різних за знаком зарядів. Таке поле є суперпозицією (накладанням) полів обох зарядів.

Одержання картин, подібних до рис. 1.1 та рис. 1.2, шляхом аналітичного розв'язування рівнянь, за якими. визначаються \vec{E} та ϕ , часто потребує значних зусиль, тому дослідники вдаються до заміни обчислень моделюваннями та експериментальними вимірюваннями.

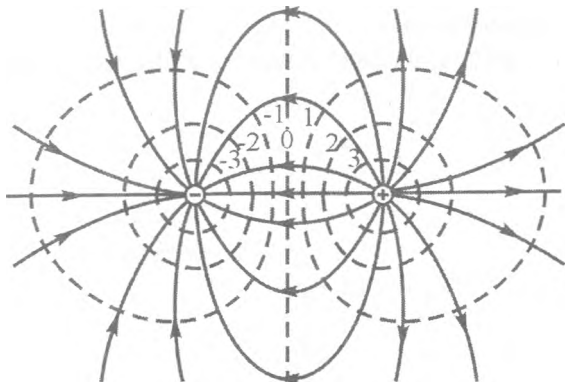


Рис. 1.2. Силлові лінії поля і еквіпотенціальні лінії поблизу двох однакових за величиною і різних за знаком точкових зарядів.

(Звичайно, при цьому жодна модель не передає всіх властивостей реального об'єкта.) Порівняно просто можна *модельювати* електростатичні поля, що мають плоску, циліндричну або сферичну симетрію. Саме з моделями подібних полів ми будемо мати справу в даній роботі.

Відомо, що електричне поле стаціонарного струму в слабкопровідному середовищі є потенціальним. Саме цей факт використовується в даній роботі для моделювання електростатичних полів нерухомих зарядів у вакуумі. В якості такого слабкопровідного середовища в цій роботі використаємо зволожений папір.

Для правильного моделювання електростатичного поля важливо, щоб папір був зволожений рівномірно і щоб електроди контактували з ним усією площиною поверхні. Також важливо, щоб струм через вимірювальний прилад був значно меншим за струм на поверхні паперу і тим самим не спотворював еквіпотенціальних кривих.

Опис установки

Схема експериментальної установки наведена на рис. 1.3.

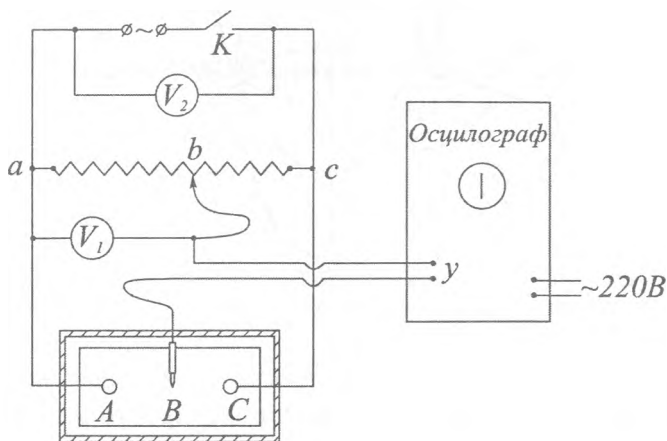


Рис. 1.3. Схема установки для одержання моделі електростатичного поля.

Для одержання картин електростатичного поля на змоченому водою папері розміщують два металеві електроди *A* та *C*, на які подається напруга від джерела змінної ЕРС ($\mathcal{E} \approx 6-10\text{ В}$). Вибір змінного, а не постійного, струму пояснюється тим, що постійний струм викликає електроліз і поляризацію електродів, а це спотворює картину поля. Вода має незначну провідність порівняно з металом електродів, а тому поверхні електродів можна вважати екіпотенціальними. Отже, при такій постановці досліду зберігаються необхідні умови електростатичності: середовище однорідне, провідність його мала в порівнянні з провідністю електродів.

Для вивчення розподілу потенціалу між електродами використовують металевий зонд *B*, з'єднаний через осцилограф (індикатор) з повзунком (точка *b*) на подільнику напруги *abc*. Точка *B* має відносно електрода *A* потенціал, який вимірюється вольтметром V_1 .

Якщо між зондом B і точкою b на подільнику напруги є якась різниця потенціалів, індикатор покаже відхилення. Відхилення на індикаторі дорівнюватиме нулеві лише тоді, коли точки b і B еквіпотенціальні. Знаходячи ряд таких точок, можна визначити еквіпотенціальну лінію на папері. Потенціал цієї еквіпотенціальної лінії буде відповідати значенню напруги на вольтметрі V_1 .

Змінюючи потенціал на зонді B за допомогою подільника напруги abc (тобто, змінюючи положення точки b повзунком), можна знайти серію еквіпотенціальних ліній, що є перетином еквіпотенціальних поверхонь з папером, а потім побудувати систему ортогональних ліній – ліній напруженості.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомтесь з осцилографом.
2. Складіть схему згідно з рис. 1.3.
3. Добре змочений аркуш паперу формату А4 покладіть на дно мілкої пластикової посудини, переконайтесь, що він добре прилягає до поверхні дна посудини.
4. Розмістіть на аркуші два електроди на певній відстані один від одного.
5. Під'єднайте електроди до джерела струму.
6. Переконайтесь, що осцилограф заземлений, і ввімкніть його в мережу.
7. Ввімкніть на осцилографі ручну настройку. Відцентруйте положення світної точки на екрані. Встановіть зонд B в якусь довільну точку між електродами A та C . При цьому точка на екрані осцилографа відхилиться від центрального положення. Якісно дослідіть зв'язок між зміщенням зонда і зміщенням положення світної точки на екрані осцилографа.
8. Вздовж напрямку AC знайдіть і позначте на папері опорні точки, в яких потенціал відносно заземленого електрода

при русі повзунка подільника напруги змінюється з кроком в $1В$ на вольтметрі V_1 . Для кожної опорної точки, зображеної на папері, зондом знайдіть всі інші точки (точки з однаковим потенціалом), для яких світна точка осцилографа не відхиляється від центрального положення. За допомогою олівця з'єднайте всі знайдені точки, що відповідають одному значенню потенціалу, тобто зобразіть еквіпотенціальну лінію.

9. Повторіть дослід для опорних точок з іншими потенціалами і отримайте ще декілька еквіпотенціальних ліній, попередньо визначивши різницю потенціалів між точками цих ліній і електродом. Визначте також різницю потенціалів між електродами.
10. Крім точок з однаковим потенціалом на папері зобразіть розташування електродів (положення електродів повинно залишатись незмінним при визначенні положення всіх еквіпотенціальних ліній).
11. Висушіть аркуш паперу. Маючи еквіпотенціальні лінії намалюйте приблизний вигляд силових ліній електричного поля.
12. Виконайте подібні дослідження для пар електродів іншої форми.
13. Для будь-яких двох точок силових ліній застосуйте принцип суперпозиції електричних полів, виконайте якісну побудову векторів напруженості в цих точках.

Контрольні запитання

1. Сформулюйте, запишіть і поясніть закон Кулона.
2. Дайте визначення діелектричної проникності середовища ϵ .
3. Що таке напруженість і потенціал електричного поля?
4. В яких одиницях вимірюється заряд q , напруженість електричного поля E і потенціал ϕ в системі СІ?
5. Який зв'язок між потенціалом і напруженістю електричного поля?

6. У чому полягає і як виражається принцип суперпозиції електричних полів?
7. Опишіть особливість поля електричного диполя.
8. Сформулюйте теорему Гаусса-Остроградського для електростатичного поля. Як застосовується ця теорема для розрахунку полів різної форми? Що називається однорідним електростатичним полем?
9. Чим визначається енергія електростатичного поля?
10. Як виглядають екіпотенціальні поверхні та лінії напруженості поля точкового заряду?
11. Під яким кутом перетинаються екіпотенціальні поверхні та силові лінії? Чому?
12. Чи залежить електричне поле від форми електродів та їх взаємного розташування?
13. Зобразіть графічно розподіл потенціалу між обкладками конденсатора.

Література

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики, т. 3, Электричество. М.: Наука, 1977. – С. 18–82.
2. Борбат О. М. та ін. Електричний практикум. – К.: Вид-во Київ. ун-ту, 1964. – С. 132–134.
3. Загальна фізика: Лабораторний практикум // За заг. ред. І. Т. Горбачука. – К.: Вища шк., 1992. – 509 с.

2. Визначення ємності плоского конденсатора та діелектричної проникності деяких речовин

Мета роботи: виміряти ємність плоского конденсатора в залежності від товщини зазору між пластинами та від матеріалу діелектрика, визначити відносну діелектричну проникність деяких діелектриків.

Прилади та матеріали: Плоский конденсатор із змінною товщиною зазору між пластинами, плоскі вставки з різних матеріалів (оргскло, скло, склотекстоліт, текстоліт та інші), прилад Е7-12 (вимірювач L , C , R), з'єднувальні дроти зі щупами.

Теоретичні відомості

Діелектриками називаються тіла, в яких всі мікроскопічні заряди зв'язані і які не проводять електричного струму. Існує багато діелектриків як природніх (кварц, дерево, слюда, янтар, сегнетова сіль і т. ін.) так і штучно створених (папір, каучук, кераміка, скло, поліетилен, текстоліт і т. ін.). Звичайне повітря з низькою вологістю також є діелектриком.

Плоский конденсатор – це система, яка складається з двох паралельних пластин, розміщених на деякій відстані одна від одної, малій в порівнянні з їх власними розмірами. Конденсатори дуже широко використовуються в різних галузях науки, техніки та виробництва. Основна властивість конденсатора – накопичувати значну кількість різнойменних електричних зарядів.

Електрична ємність конденсатора – це фізична величина, яка визначається відношенням заряду q однієї з пластин конденсатора до напруги U між обкладками конденсатора:

$$C = \frac{q}{U}. \quad (2.1)$$

При незмінному розташуванні пластин електроємність конденсатора є сталою величиною при будь-якому заряді на пластинах.

Одиниця електроємності – *фарада* (система СІ). Електроємність 1 фарада (Φ) має такий конденсатор, напруга на якому дорівнює 1 вольт (B) при наданні обкладкам різнойменних зарядів по 1 кулону ($Kл$): $1\Phi = 1Kл/1B$.

Це дуже велике значення ємності. На практиці широко використовуються одиниці електроємності – мікрофарада ($мк\Phi$), нанофарада ($н\Phi$) та пікофарада ($п\Phi$): $1мк\Phi=10^{-6}\Phi$, $1н\Phi=10^{-9}\Phi$, $1п\Phi=10^{-12}\Phi$.

Розглянемо, від чого залежить електроємність плоского конденсатора. Напруженість E поля між двома пластинами плоского конденсатора дорівнює сумі напруженостей полів, створюваних кожною з пластин:

$$\vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \vec{E}. \quad (2.2)$$

Нехай на двох пластинах, кожна з яких має площу S , знаходяться електричні заряди $+q$ і $-q$. Теорія доводить, що для модуля напруженості електричного поля між пластинами має місце співвідношення:

$$E = \frac{q}{S \cdot \epsilon_0}, \quad (2.3)$$

де константа ϵ_0 – це абсолютна діелектрична проникність вакууму. Вона дорівнює $\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12} \Phi/м$.

Електричне поле в конденсаторі є однорідним, тобто величина E є однаковою в усіх точках всередині конденсатора. Зв'язок між напруженістю E поля в конденсаторі та напругою U має вигляд:

$$E = \frac{U}{d}, \quad (2.4)$$

де d (в даному випадку) – відстань між пластинами конденсатора, U – напруга на конденсаторі. Тоді з формул (2.1), (2.2) та (2.3) отримуємо:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{E \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{U} = \frac{S \cdot U \cdot \varepsilon_0}{d \cdot U} = \frac{\varepsilon_0 S}{d}, \quad (2.5)$$

тобто електроємність конденсатора прямо пропорційна до площі обкладок S (обчислюється в m^2), та обернено пропорційна відстані між обкладками конденсатора d (обчислюється в m).

При введенні діелектрика між обкладками конденсатора його електроємність збільшується в ε разів

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}. \quad (2.6)$$

Величина ε – це безрозмірна величина, так звана відносна діелектрична проникність діелектрика. Вона є властивістю матеріалу діелектрика і тому залежить від зовнішніх умов (температури, тиску, частоти змінного струму, при якому працює конденсатор і т. і.). Існують таблиці значень відносної діелектричної проникності діелектриків, які складені для так званих нормальних умов (тобто умов, за яких температура $T = 20^\circ C$, атмосферний тиск 760 мм. рт. ст. , частота змінного струму не більше сотень кілогерц і т. ін.). Значення ε для більшості поширених діелектриків становить 2–8, але існують діелектрики, у яких значення ε досягає 500–2000 і навіть більше.

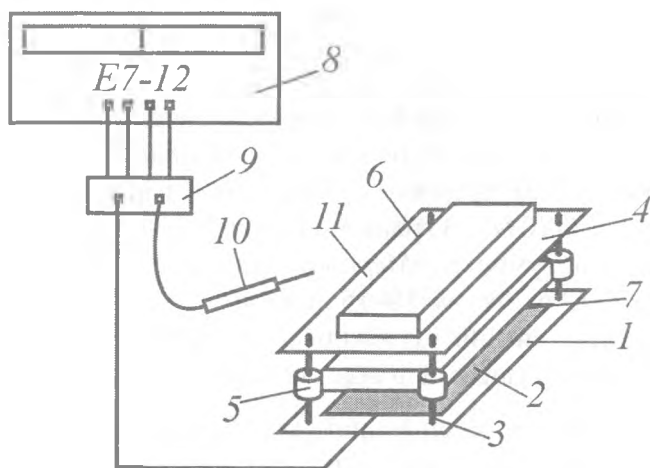


Рис. 2.1. Схема установки для визначення ємності плоского конденсатора.

На рис. 2.1 схематично зображена установка для визначення ємності плоского конденсатора та діелектричної проникності діелектриків. Плоский конденсатор складається з основи (1), зробленої з текстоліту. Посередині основи нанесено шар міді (2), який служить однією з обкладок конденсатора. По краях основи розташовано чотири штирі (3), на які насаджується друга (зйомна) пластина конденсатора (4). На штирі надягаються шайби різної товщини (5), які регулюють відстань між пластинами конденсатора. На зйомній пластині прикріплено тягар (6), який притискає верхню пластину конденсатора до шайб. До плоского конденсатора додаються прокладки (7), зроблені з різних матеріалів, які мають різну діелектричну проникність і товщину. Ємність плоского конденсатора вимірюється приладом E7-12 (8) зі спеціальним з'єднуючим пристроєм (9). Одна з клем цього пристрою з'єднана з нижньою обкладкою конденсатора (2), друга — з дротом, на кінці якого є щуп (10). При вимірах цим щупом треба торкатися до

контакту (11), який зв'язаний з верхньою обкладкою конденсатора.

Порядок виконання роботи

1. Підключіть до електричної мережі прилад *E7-12*;
2. Поставте ручки та перемикачі приладу *E7-12* у такі положення: а) запуск – \square , б) рівень сигналу – $x1$, в) екв. схема – CG (CD), г) границі виміру 2 (3, 4).
3. Увімкніть тумблер «Мережа» та дайте прогрітися приладу *E7-12* протягом 10–15 хвилин.
4. Проведіть виміри залежності ємності конденсатора з повітряним зазором від відстані між пластинами:
 - а) візьміть зі спеціальної коробки чотири однакових шайби та надіньте їх на штирі основи,
 - б) надіньте на штирі верхню пластину конденсатора з металевим тягарем,
 - в) щупом, який з'єднаний з пристроєм (9) приладу *E7-12*, торкніться металевого кружечка (11) на верхній пластині конденсатора,
 - г) зніміть покази приладу *E7-12* (ліве табло індикаторів). При малих значеннях ємності (до 200 $n\Phi$) перемикач «Межі вимірювання» поставте у положення 2, при значеннях ємності до 2000 $n\Phi$ – у положення 3, вище за 2000 $n\Phi$ – у положення 4,
 - д) верхню пластину конденсатора зніміть зі штирів і поверніть на 90 градусів за годинниковою стрілкою відносно початкового положення. Повторіть пункти 4.а) – 4.д) три рази,
 - е) повторіть пункти 4.а) – 4.д) для шайб іншої товщини,
 - є) за формулою (2.5) обрахуйте значення ємності конденсатора для різних відстаней між його пластинами. Значення діелектричної проникності для повітря прийміть рівним одиниці. Співставте експериментальні дані з теоретично обрахованими. В даному приладі мідні пластини

конденсатора є квадратами і мають довжини сторін рівні $L = (0,110 \pm 0,001) \text{ м}$.

5. Проведіть виміри ємності конденсатора з діелектриком між пластинами. Для цього зніміть зі штирів шайби. Покладіть на нижню пластину конденсатора прокладку з діелектрика так, щоб вона накривала мідний квадрат, надіньте зверху другу пластину конденсатора з металевим тягарем. Послідовність проведення вимірів співпадає з пунктами 4.б) – 4.д).
6. Проведіть виміри ємності конденсатора для всіх інших доданих до роботи діелектричних пластин.
7. Визначте діелектричну проникність матеріалів цих пластин, співставивши значення ємності конденсатора з діелектриком із ємністю конденсатора з таким же проміжком, але без діелектрика (формули (2.6) та (2.5)).

Увага! Шайби, що регулюють відстань між пластинами конденсатора підібрані таким чином, що серед них обов'язково є такі, товщини яких співпадають з товщинами діелектричних пластин.

8. Результати вимірів занесіть до табл. 1 та 2.

Таблиця 1

№	Товщина шайб $d \times 10^{-3} \text{ м}$	$C, \text{ нФ}$, без діелектрика				$\langle C \rangle$, нФ	$C, \text{ нФ}$ (за формулою 2.5)
		1	2	3	4		
1							

Таблиця 2

№	$C, \text{ нФ}$ з діелектриком				$\langle C \rangle, \text{ нФ}$	ϵ
	1	2	3	4		
1						

9. Оцініть похибки вимірювань.

Контрольні запитання

1. Як розподіляються заряди і електростатичне поле в провіднику? Що таке електростатична індукція?
2. Опишіть вплив провідника на електростатичне поле. Що таке електростатичне екранування?
3. Що таке електроємність окремо взятого провідника?
4. Як обчислюється ємність конденсатора та ємність батареї конденсаторів?
5. Дайте визначення одиниці вимірів електроємності в системі СІ.
6. Що таке діелектрична поляризація? Назвіть основні макрохарактеристики діелектричної поляризації.
7. Опишіть зв'язок вектора поляризації з густиною поляризаційних (поверхневих і об'ємних) зарядів.

Література

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики, т. 3, Электричество. – М.: Наука, 1977. – С. 101–112.
2. Загальна фізика: Лабораторний практикум // За заг. ред. І. Т. Горбачука. – К.: Вища шк., 1992. – С. 268–270.
3. Зайдель А. Н. Погрешности измерений физических величин. – Л.: Наука, 1985.
4. Сквайрс Дж. Практическая физика. – М.: Мир, 1971.

3. Вивчення роботи реостата як опору та подільника напруги

Мета роботи: вивчити принцип роботи реостата як опору та як подільника напруги, навчитись свідомо підбирати потрібні за величиною змінні опори для регулювання сили струму і напруги в електричних колах.

Прилади: джерело постійного струму, два змінні опори, два вольтметри, міліамперметр, омметр, магазин опорів, ключ лабораторний.

Теоретичні відомості

Реостат – це прилад, який застосовується для регулювання величин сили струму та напруги в електричних схемах. Він має три клеми і загальний опір R . Реостат може використовуватись як опір або як подільник напруги. Розглянемо ці два випадки окремо.

Реостат як опір вмикається в електричне коло послідовно з навантаженням R_H , як зображено на рис. 3.1 (а).

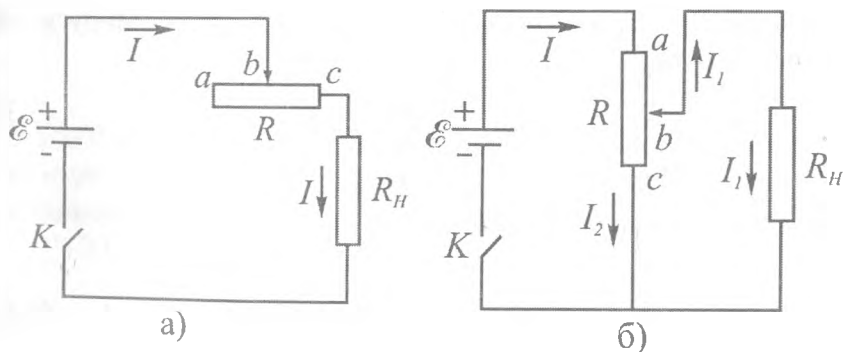


Рис. 3.1. а) Схема включення реостату R як опору;
б) Схема включення реостату R як подільника напруги.

Струм I , що протікає через систему послідовно ввімкнених опорів R_{bc} та R_H , згідно із законом Ома для повного кола дорівнює:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{r + R_{bc} + R_H}, \quad (3.1)$$

але оскільки внутрішнім опором джерела струму r можна знехтувати при $R_H \gg r$, то формулу для струму в колі можна записати простіше

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{bc} + R_H}. \quad (3.2)$$

Якщо опір реостата R змінювати від $R = 0$ до $R = R_{\max}$, то струм I в колі відповідно змінюватиметься від $I_{\max} = \frac{\mathcal{E}}{R_H}$ до

$I_{\min} = \frac{\mathcal{E}}{R_H + R_{\max}}$. ЕРС джерела \mathcal{E} розподіляється між навантаженням R_H (споживачем) та опором R_{bc} . Спад напруги на реостаті буде

$$U_{R_{bc}} = IR_{bc} = \mathcal{E} \frac{R_{bc}}{R_{bc} + R_H}, \quad (3.3)$$

а на опорі навантаження R_H

$$U_{R_H} = IR_H = \mathcal{E} \frac{R_H}{R_{bc} + R_H}. \quad (3.4)$$

Згідно з (3.4) при зміні опору R від $R_{bc} = 0$ до $R = R_{\max}$ напруга на опорі-навантаженні R_H буде змінюватися від

$U_{R_H \max} = \mathcal{E}$ до $U_{R_H \min} = \mathcal{E} \frac{R_H}{R_{\max} + R_H}$. Таким чином, за допомо-

гою реостата можна значно змінити струм I та напругу U_{R_H}

на навантаженні і дістати $\frac{I_{\max}}{I_{\min}} \gg 1$, $\frac{U_{R_H \max}}{U_{R_H \min}} \gg 1$, лише в тому

випадку, коли опір навантаження R_H буде значно меншим за повний опір реостата R ($R_H \ll R_{\max}$).

Реостат як подільник напруги вмикається в електричне коло паралельно навантаженню. Три клеми реостата підключаються до електричного кола так, як зображено на рис. 3.1(б).

Для виводу залежності величини напруги U_{R_H} , що подається на навантаження, від параметрів кола скористаємося правилами Кірхгофа. Оскільки до точок b і c приєднано опір R_H скінченної величини, то струм у точці b розгалужується. Частина його потрапляє на ділянку bc реостата, а частина I_{R_H} йде через навантаження. Згідно з правилами Кірхгофа:

$$I = I_1 + I_2 \quad (3.5)$$

$$I(R - R_{bc}) + U_{bc} = U_{ac} \quad (3.6)$$

$$I r + I(R - R_{bc}) + U_{bc} = \mathcal{E} \quad (3.7)$$

У цій формулі R_{bc} – опір ділянки bc подільника напруги, R – величина загального опору реостата, що використовується як подільник напруги.

З (3.5) і (3.6) маємо

$$(I_1 + I_2)(R - R_{bc}) + U_{bc} = U_{ac}. \quad (3.8)$$

Оскільки $I_1 = \frac{U_{R_H}}{R_H}$, $I_2 = \frac{U_{R_H}}{R_{bc}}$, а $U_{bc} = U_{R_H}$ (див. рис. 3.1(б)), то

$$U_{R_H} \left(\frac{1}{R_H} + \frac{1}{R_{bc}} \right) (R - R_{bc}) + U_{R_H} = U_{ac}, \quad (3.9)$$

$$U_{R_H} = \frac{U_{ac}}{\left(\frac{1}{R_H} + \frac{1}{R_{bc}}\right)(R - R_{bc}) + 1}, \quad (3.10)$$

або

$$U_{R_H} = \frac{U_{ac}}{\frac{R}{R_H} + \frac{R}{R_{bc}} - \frac{R_{bc}}{R_H}}, \quad (3.11)$$

З останнього виразу бачимо, що залежність величини U_{R_H} від R_{bc} , R_H і R є складною.

У випадку, коли $R_H \gg R$, що практично дуже часто зустрічається, величинами $\frac{R}{R_H}$ і $\frac{R_{bc}}{R_H}$ можна знехтувати в

порівнянні з величиною $\frac{R}{R_{bc}}$. Тоді матимемо $U_{R_H} = \frac{U_{ac}}{R} R_{bc}$.

Якщо опір ділянки bc лінійно залежить від довжини, то відношення $\frac{R_{bc}}{R}$ можна замінити на відношення $\frac{l_{bc}}{l_{ac}}$. Тоді

$U_{R_H} = \frac{U_{ac}}{l_{ac}} l_{bc}$. Якщо до того ж внутрішній опір джерела струму

$r \ll R$, то $U_{ac} \approx \mathcal{E}$. Отже,

$$U_{R_H} = \frac{\mathcal{E}}{l_{ac}} l_{bc}. \quad (3.13)$$

З цієї формули видно, що змінюючи R_{bc} від 0 до R , можна відповідно змінити U_{R_H} від 0 до \mathcal{E} . Слід зауважити, що у загальному випадку залежність U_{R_H} від R_{bc} не є лінійною. Така залежність тим більше наближається до лінійної, чим більшою є величина опору навантаження R_H в

порівнянні з загальним опором подільника напруги R , тобто при $R \ll R_H$.

Отже, в разі необхідності одержання лінійної залежності напруги на навантаженні U_{R_H} від опору R_{bc} реостат слід включати в коло (рис. 3.1(б)) як подільник напруги з $R \ll R_H$.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомтесь з будовою повзункового реостата.
2. Зберіть схему (рис. 3.2), де реостат використовується як змінний опір. За навантаження візьміть магазин опорів.

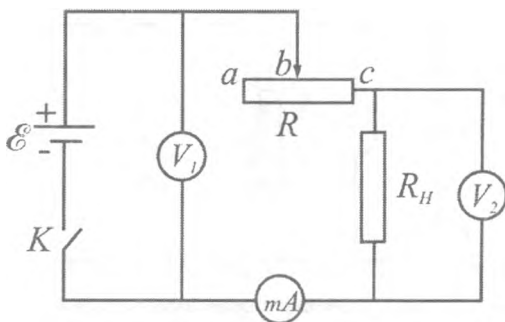


Рис. 3.2. Схема включення вимірювальних приладів в коло з реостатом R .

3. Визначте залежність струму I_{R_H} і напруги U_{R_H} від положення повзунка реостату, змінюючи R_{bc} від 0 до max для двох значень опору навантаження: $R_H \ll R$, $R_H \gg R$. Результати занесіть до табл. 1.

Таблиця 1

№	l_{bc} , см	R_{bc} , Ом	Виміри		Розрахунки	
			I_{R_H} , мА	U_{R_H} , В	U_{R_H} , В	I_{R_H} , мА

4. Розрахуйте опір R_{bc} за формулою $R_{bc} = R_{\max} \frac{l_{bc}}{l_{ac}}$, де l_{bc} , l_{ac} – довжини відповідних ділянок обмотки змінного опору R_{bc} . Розрахунки I_{R_H} , U_{R_H} проводити за формулами (3.2) і (3.4) відповідно.
5. Зберіть схему (рис.3.3), де реостат використовується як подільник напруги.
6. Визначте залежність напруги U_{R_H} та струму I_{R_H} від положення повзунка для двох значень опору навантаження: $R_H \ll R$, $R_H \gg R$. Одержані результати занесіть до табл. 2.

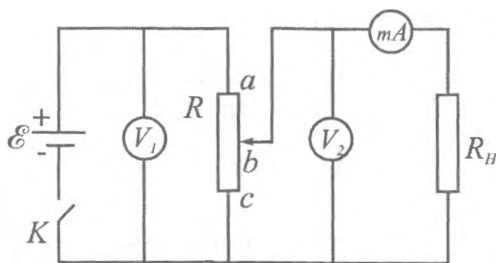


Рис. 3.3. Схема включення вимірювальних приладів в коло з подільником напруги.

Таблиця 2

№	l_{bc} , см	R_{bc} , Ом	Виміри		Розрахунки	
			I_{R_H} , мА	U_{R_H} , В	U_{R_H} , В	I_{R_H} , мА

7. Розрахуйте значення напруги U_{R_H} за формулою (3.11)
Струм I_{R_H} обчисліть за законом Ома.

Примітка. Таблиць має бути чотири: дві – для схеми з реостатом, включеним як опір, та дві – для схеми з реостатом, включеним як подільник напруги.

8. За даними таблиць побудуйте 8 графіків: 4 для залежності напруги від опору $U_{R_H} = f(R_{bc})$ та 4 для залежності струму від опору $I_{R_H} = f(R_{bc})$. На кожному з 8 графіків зіставте практично одержані та обчислені за теоретичними формулами результати.
9. Проаналізуйте дані пункту 8, дайте рекомендації як зменшити розбіжність експериментальних та розрахованих кривих на графіках.

Контрольні запитання

1. Чим відрізняються регулювання сили струм I_{R_H} і напруги U_{R_H} в електричних колах за допомогою реостата і подільника напруги?
2. Коли раціональніше застосовувати реостат, як опір, а коли – як подільник напруги?
3. За якої умови схема подільника напруги дозволяє лінійно регулювати напругу U_{R_H} на навантаженні?
4. Чим пояснюється різниця між теоретичними розрахунками та практично отриманими результатами?
5. Сформулюйте закон Ома та застосуйте його для схем рис. 3.2 та рис. 3.3.
6. Сформулюйте закони Кірхгофа та поясніть їх застосування.

Література

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики, т. 3, Электричество. – М.: Наука, 1977. – С. 174–198.
2. Калашников С. Г. Электричество. – М., 1970. – С. 152–154.
3. Борбат О. М. та ін. Електричний практикум. – К.: Вид-во Київ. ун-ту, 1964. – С. 99–102.

4. Розширення шкал мікроамперметра та вольтметра

Мета роботи: ознайомитись з основними характеристиками мікроамперметра та методами розширення шкал мікроамперметра та вольтметра.

Прилади: досліджуваний мікроамперметр, джерело ЕРС, два магазини опорів, подільник напруги, контрольний міліамперметр та вольтметр, два вимикачі.

Частина 1. Розширення шкали мікроамперметра

Теоретичні відомості

Мікроамперметр — електровимірювальний прилад високої чутливості. Він використовується для вимірювання струмів малої сили ($10^{-4} \div 10^{-6} \text{ A}$). При проходженні струму I_a через мікроамперметр стрілка відхиляється. Сила струму обчислюється за формулою:

$$I_a = C_a n, \quad (4.1)$$

де C_a — ціна поділки мікроамперметра в амперах на поділку (A/под), а n — число поділок шкали, на яке відхиляється стрілка.

При використанні мікроамперметра необхідно звертати увагу на такі характеристики, як верхня та нижня межі

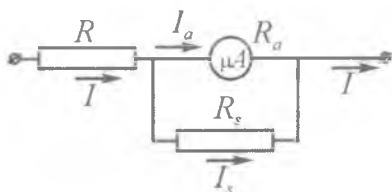


Рис. 4.1. Паралельне під'єднання шунта R_s до мікроамперметра μA , де I_a струм, що протікає через мікроамперметр, I_s — струм, що протікає через шунт, I — струм через опір R в колі.

значень вимірювання величини струму. На практиці часто буває необхідним вимірювати в колі величину струму I , більшу за максимальну для даного приладу в m разів. Тоді вдаються до розширення шкали мікроамперметра: паралельно до

приладу приєднують шунт (рис. 4.1), опір якого R_s в $(m-1)$ разів менший за внутрішній опір приладу R_a :

$$R_s = \frac{R_a}{m-1}, \quad (4.2)$$

Ціна поділки C'_a зашунтованого приладу в m разів більша за ціну поділки C_a :

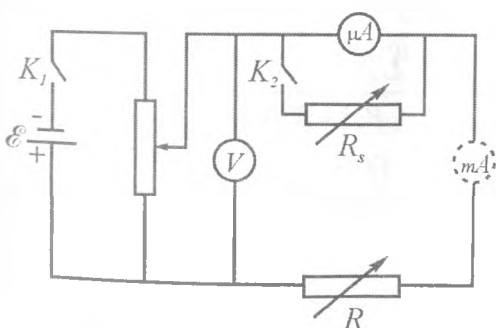
$$C'_a = mC_a = C_a \left(1 + \frac{R_a}{R_s} \right) \quad (4.3)$$

і сила струму в колі буде визначатися за формулою

$$I = C'_a n = mC_a n. \quad (4.3a)$$

Отже, для того, щоб розширити шкалу мікроамперметра в m разів треба розрахувати опір шунта R_s і нову ціну поділки C'_a , а для цього необхідно знати C_a і R_a мікроамперметра. В даній роботі використовується мікроамперметр, для якого значення C_a і R_a невідомі.

Розглянемо метод визначення ціни поділки C_a та внутрішнього опору R_a мікроамперметра. Припустимо, що



в схемі, поданій на рис. 4.2, ключ K_1 замкнений, а ключ K_2 розімкнений. При $R=R_1$ через мікроамперметр проходить

$$\text{струм } I_{a1} = \frac{U}{R_1 + R_a}$$

Згідно з (4.1) $I_{a1} = C_a n_1$.

Рис. 4.2. Схема для визначення внутрішнього опору R_a і ціни поділки C_a мікроамперметра.

Тепер припустимо, що обидва ключі K_1 та K_2 замкнені (до мікроамперметра приєднано шунт із опором R_s). При $R=R_2$ через R_2 проходить струм I_2 , а через мікроамперметр проходить струм $I_{a2} = I_2 - I_s$, а $I_{a2}R_a = I_sR_s$. Тоді $I_s = I_{a2} \frac{R_a}{R_s}$.

тобто

$$I_{a2} = I_2 - I_{a2} \frac{R_a}{R_s}; \quad I_{a2} \left(1 + \frac{R_a}{R_s} \right) = I_2; \quad I_{a2} = \frac{I_2 R_s}{R_a + R_s};$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2 + R_x}; \quad \frac{1}{R_x} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_s};$$

$$I_2 = \frac{U(R_a + R_s)}{R_2(R_a + R_s) + R_a R_s}.$$

Отже,

$$I_{a2} = \frac{U(R_a + R_s)}{[R_2(R_a + R_s) + R_a R_s]} \frac{R_s}{(R_a + R_s)} = \frac{UR_s}{R_2(R_a + R_s) + R_a R_s}$$

З другого боку

$$I_{a2} = C_a n_2.$$

Таким чином, маємо наступні два рівняння з двома невідомими R_a та C_a :

$$C_a n_2 = \frac{UR_s}{R_2(R_a + R_s) + R_a R_s},$$

$$C_a n_1 = \frac{U}{R_a + R_1}. \quad (4.4)$$

Розв'язком цих рівнянь є:

$$C_a = \frac{U[n_2(R_2 + R_s) - n_1 R_s]}{n_1 n_2 [R_1(R_2 + R_s) - R_2 R_s]}, \quad (4.5a)$$

$$R_a = \frac{R_s (n_1 R_1 - n_2 R_2)}{n_2 (R_2 + R_s) - n_1 R_s}. \quad (4.56)$$

Змінюючи опір R при ввімкненні шунта, можна досягти (при сталому U) $n_1 = n_2 = n$. Тоді (4.5а) та (4.56) матимуть більш простий вигляд:

$$C_a = \frac{UR_2}{n [R_1 R_2 + R_s (R_1 - R_2)]}, \quad (4.6а)$$

$$R_a = R_s \left(\frac{R_1}{R_2} - 1 \right). \quad (4.66)$$

Одержавши значення R_a і C_a , легко здійснити розширення шкали мікроамперметра так, як це вказувалось вище (формули (4.3), (4.3а)).

Порядок виконання роботи

1. Складіть електричну схему (рис. 4.2) для експериментального визначення R_a та C_a мікроамперметра, шкала якого підлягає розширенню. До включення схеми виставте на магазині опорів R максимальне значення опору ($R = R_{\max}$), а на магазині опорів R_s , який буде служити за шунт, мінімальне значення $R_s = 0$.
2. При розімкненому ключі K_2 замкніть K_1 . Поступово зменшуючи величину R , встановіть відхилення стрілки досліджуваного мікроамперметра в середній частині його шкали. Запишіть значення $R = R_1$ та n_1 в табл. 1.
3. При замкненому ключі K_1 замкніть K_2 . Поступово зменшуйте значення опору R та збільшуйте значення опору R_s доти, поки відхилення стрілки мікроамперметра n_2 не розташується в середній частині шкали так, щоб n_2 було рівним n_1 ($n_2 = n_1$). Запишіть відповідні значення $R = R_2$, R_s та n_2 . Підчас цього досліду стежте, щоб напруга U залишалась сталою.

4. Дослід повторіть 5 разів, при різних значеннях $n=n_1=n_2$, результати запишіть у табл. 1.

Таблиця 1

№	$R=R_1$ Ом	$R=R_2$ Ом	n ($n_1 = n_2$)	R_s Ом	R_a Ом	ΔR_a Ом	C_a мкА/под	ΔC_a мкА/под
1								

5. Обчисліть C_a та R_a мікроамперметра за формулами (4.6а, 4.6б). Знайдіть середні значення $\langle C_a \rangle$, $\langle R_a \rangle$. Розрахуйте $\Delta C_a = \langle C_a \rangle - C_{a,i}$, $\Delta R_a = \langle R_a \rangle - R_{a,i}$. Оцініть довірчі інтервали та відносні похибки.
6. Розширте шкалу мікроамперметра в $m = 10$ і $m = 50$ разів. Для цього:
- Розрахуйте опір шунта R_s за формулою (4.2).
 - У схему (рис. 4.2) послідовно з зашунтованим мікроамперметром (μA) увімкніть контрольний міліамперметр (mA), який на рис. 4.2 виділений пунктиром. Змінюючи струм у колі від 0 до I_{\max} , запишіть покази обох приладів (зашунтованого I_a і контрольного I_k) у різних ділянках шкали в табл. 2.

Таблиця 2

№	$m_1 = 10$			$m_2 = 50$		
	n , под	$I_{\text{розр}}$, мА	I_k , мА	n , под	$I_{\text{розр}}$, мА	I_k , мА

- Розрахуйте величину струму $I_{\text{розр}}$, вимірюваного зашунтованим мікроамперметром для вибраних відхилень n ($I_{\text{розр}} = nmC_a$) і занесіть до табл. 2.
- Побудуйте графік залежності I від n , на який нанесіть покази контрольного мікроамперметра I_k і теоретично розраховані величини струму $I_{\text{розр}}$; проаналізуйте розходження цих даних.

Частина 2. Розширення шкали вольтметра

Теоретичні відомості

Мікроамперметр можна використовувати для вимірювання напруги. Ціну поділки шкали мікроамперметра у одиницях напруги C_u можна обчислити за відомим внутрішнім опором мікроамперметра R_a та ціною поділки в одиницях сили струму C_a за формулою:

$$C_u = C_a R_a. \quad (4.7)$$

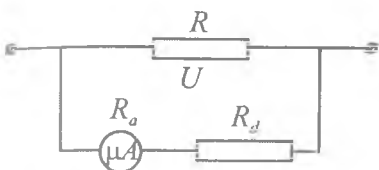


Рис. 4.3. Послідовне підключення опору R_d до мікроамперметра (як вольтметра), де U_v – напруга на вольтметрі, U_d – напруга на додатковому опорі.

При використанні мікроамперметра як вольтметра для розширення його шкали в m разів, послідовно до приладу приєднують додатковий опір (рис. 4.3). Додатковий опір R_d більший за R_a в $(m-1)$ разів:

$$R_d = R_a(m-1) \quad (4.8)$$

Ціна поділки C'_u у цьому випадку:

$$C'_u = m C_u = m C_a R_a = C_a(R_a + R_d). \quad (4.9)$$

Порядок виконання роботи

Використайте досліджуваний мікроамперметр як вольтметр. Розширте його шкалу у 10 разів. Для цього:

а) Визначте ціну поділки мікроамперметра C_u по напрузі за формулою (4.7).

б) Розрахуйте додатковий опір R_d для вольтметра за формулою (4.8).

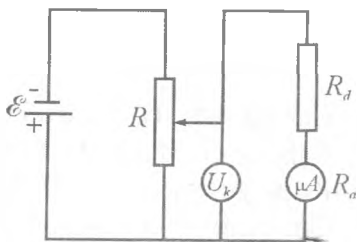


Рис. 4.4. Схема, в якій мікроамперметр з додатковим опором використовується як вольтметр.

в) Зберіть схему, представлену на рис. 4.4.

г) Проградуйте вольтметр за контрольним приладом U_k .

д) Розрахуйте значення напруги $U_{\text{розр}}$ на вольтметрі для 5 вибраних відхилень n за формулою: $U_{\text{розр}} = nC'_u$. Значення занесіть до табл. 3.

ж) Побудуйте графік $U(n)$, на який нанесіть результати експериментальних вимірів U_k і обчислень $U_{\text{розр}}$, проаналізуйте розходження.

Таблиця 3

№	$m = 10$		
	$n, \text{ под}$	$U_{\text{розр}}, \text{ В}$	$U_k, \text{ В}$

Контрольні запитання

1. Що таке клас точності електровимірювального приладу?
2. Як впливає на точність виміру величина відхилення стрілки на шкалі приладу?
3. Як експериментально визначити внутрішній опір R_a та ціну поділки C_a мікроамперметра?
4. Як змінити ціну поділки на шкалі амперметра?
5. Чи можна змінити ціну поділки на шкалі вольтметра?
6. Які позначення наносяться на шкалу електровимірювального приладу?

Література

1. Савельев И. В. Курс общей физики. – М., 1987. – С. 93–107.
2. Борбат О. М. та ін. Електричний практикум. – К. Вид-во Київ. ун-ту, 1964. – С. 50–72.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики, т. 3, Электричество. – М.: Наука, 1977. – С. 174–198.

5. Вимірювання опорів за допомогою містка постійного струму

Мета роботи: навчитися вимірювати опори за допомогою місткової схеми постійного струму і, зокрема, вимірювати опір гальванометра.

Прилади: два опори для вимірювання, гальванометр, магазин опорів; реохорд, реостат, ключі лабораторні, джерело ЕРС

Теоретичні відомості

Місткова схема є необхідною деталлю багатьох вимірювальних приладів. Особливо велике значення вона має при вимірюванні опорів.

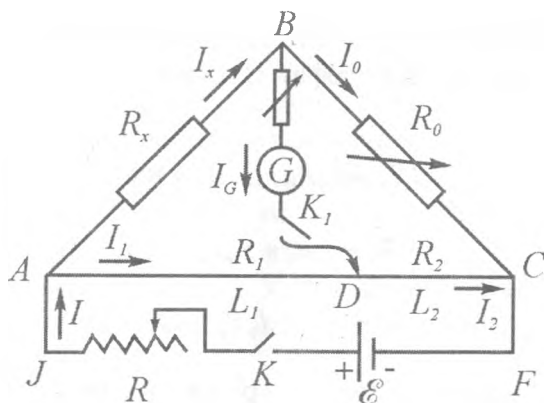


Рис. 5.1. Схема містка Уїтстона.

Місткова схема складається з чотирьох опорів R_x , R_0 , R_1 , R_2 , нуль-гальванометра G , реостата R , зібраних за схемою, показаною на рис. 5.1. R_x – невідомий опір, R_0 – відомий опір, G – гальванометр, K – ключ, \mathcal{E} – джерело ЕРС, AC – реохорд, I_x , I_0 , I_1 , I_2 – їх відповідні сили струмів. Опори R_1 , R_2 , R_0 підбираються таким чином, щоб при замиканні ключа K_1 через гальванометр не проходив струм. Тоді

$$\frac{R_x}{R_0} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (5.1)$$

За цим співвідношенням можна визначити значення невідомого опору R_x , увімкненого у плече моста, якщо відомі значення трьох інших опорів R_0, R_1, R_2 . Співвідношення (5.1) легко одержати, скориставшись правилами Кірхгофа.

У схемі містка Уітстона є чотири точки розгалуження: A, B, C, D . Застосувавши перше правило Кірхгофа одержимо для цих вузлів чотири рівняння:

$$\begin{aligned} I - I_1 - I_x &= 0, & I_x - I_0 - I_G &= 0, \\ I_1 - I_2 + I_G &= 0, & I_2 + I_0 - I &= 0. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Лише три з цих рівнянь є незалежними. Для визначення шести змінних $I_0, I_1, I_2, I_x, I_G, I$ потрібно ще три рівняння. Їх дає друге правило Кірхгофа. Для контурів $ABDA, BDCB, ADCFJA$:

$$\begin{aligned} I_1 R_1 - I_G R_G - I_x R_x &= 0, \\ I_2 R_2 - I_0 R_0 + I_G R_G &= 0, \\ IR + I_1 R_1 + I_2 R_2 &= E. \end{aligned} \quad (5.3)$$

У цих рівняннях опір R разом з внутрішнім опором джерела струму складає опір ділянки $CFEA$. Якщо струм в містку I_G рівний нулеві, то з рівнянь (5.2), (5.3) видно, що

$$I_1 R_1 = I_x R_x,$$

$$I_1 R_2 = I_x R_0.$$

Звідси отримуємо співвідношення між значеннями опорів R_x, R_0, R_1, R_2 (5.1).

Часто за опори R_1 і R_2 беруть плечі L_1 і L_2 реохорда. Оскільки опори цих плечей рівні

$$R_1 = \rho \frac{L_1}{S}, \quad R_2 = \rho \frac{L_2}{S},$$

то

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{L_1}{L_2}. \quad (5.4)$$

Точність порівняння опорів R_0 і R_x за допомогою містка Уїтстона буде найкращою, якщо відношення $\frac{R_1}{R_2}$ (або відповідно для реохорда $\frac{L_1}{L_2}$) мало відрізняється від одиниці.

Тому при вимірюванні невідомого опору R_x бажано, щоб стандартний опір R_0 мало відрізнявся від значення R_x . Для цього рухомий контакт реохорда ставлять посередині і, змінюючи опір R_0 , добиваються такого стану, щоб стрілка гальванометра майже не відхилялася. Невеликими зміщеннями рухомого контакту реохорда добиваються повної відсутності струму через гальванометр.

За допомогою містка Уїтстона можна виміряти опір будь-якого електровимірювального приладу, зокрема гальванометра.

Експериментальна частина

Для проведення вимірювань невідомих опорів необхідно скласти схему (рис. 5.1) і зрівноважити її. В схемі R_0 — це магазин опорів. Місткова схема вважається зрівноваженою, якщо буде знайдено таке положення рухомого контакту на реохорді, коли сила струму, що проходить через гальванометр, дорівнює нулеві. За допомогою реостата R ми можемо змінювати силу струму в схемі.

Для визначення опору гальванометра користуються дещо зміненою схемою моста Уїтстона, наведеною на рис. 5.2.

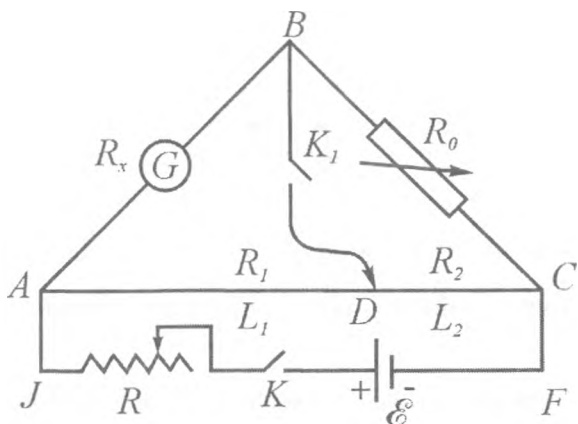


Рис. 5.2. Схема для виміру опору гальванометра.

Гальванометр, опір якого потрібно виміряти, вмикають в одне з плечей моста. У діагональ моста, що з'єднує вузол B з повзуном реохорда D , вмикають ключ K_1 . Напруга від джерела ЕРС \mathcal{E} до кінців реохорда підводиться через змінний опір R .

Пристаюючи до вимірювань ставлять максимальне значення опору R , замикають ключ K і зменшують опір реостата R до тих пір, поки стрілка гальванометра G не відхилиться приблизно на половину шкали. Потім замикаючи ключ K_1 , спостерігають, в якому напрямку відхиляється стрілка гальванометра, і в залежності від цього збільшують або зменшують набраний раніше на магазині опорів відомий опір R_0 . Поступово добирають такий опір R_0 , таке положення рухомого контакту на реохорді, при якому вмикання і розмикання ключа K_1 не впливає на положення стрілки гальванометра. Це означає, що потенціали в точках B і D дорівнюють один одному і що місток зрівноважений.

Якщо при зміні R_0 стрілка гальванометра відхиляється за шкалу або підходить близько до нуля, зміною опору реостата R її повертають на середину шкали.

Такий спосіб придатний саме для вимірювання опору гальванометра, тому що він не потребує вмикання другого гальванометра в діагональ схеми.

Порядок виконання роботи та обробка результатів вимірювань

1. Зберіть схему за рис. 5.1. Визначте величини двох невідомих опорів, що додаються до роботи. Знайдіть не менше 5 значень для кожного з вимірюваних опорів. Вимірювання виконайте при різних значеннях R_0 .
2. Результати вимірювань занесіть в табл. 1.

Таблиця 1

N_i	$R_0, \text{ Ом}$	$L_1, \text{ см}$	$L_2, \text{ см}$	$R_{x,i}, \text{ Ом}$	$\langle R_x \rangle, \text{ Ом}$	$\Delta R_{x,i}, \text{ Ом}$

3. Зберіть схему за рис. 5.2, виміряйте опір гальванометра $R_x = R_G$. Знайдіть 5 значень R_G при різних співвідношеннях плечей реохорда і різних значеннях R_0 . Результати вимірювань занесіть до табл. 2.

Таблиця 2

N_i	$R_0, \text{ Ом}$	$L_1, \text{ см}$	$L_2, \text{ см}$	$R_{G,i}, \text{ Ом}$	$\langle R_G \rangle, \text{ Ом}$	$\Delta R_{G,i}, \text{ Ом}$

4. Обчисліть та занесіть до табл. 2 середнє значення кожного з вимірюваних опорів $\langle R_x \rangle, \langle R_G \rangle$ та значення $\Delta R_{x,i} = \langle R_x \rangle - R_{x,i}$, $\Delta R_{G,i} = \langle R_G \rangle - R_{G,i}$ де i – номер досліду.
5. Оцініть похибки вимірювань.

Контрольні запитання

1. Сформулюйте та запишіть правила Кірхгофа.
2. Поясніть принцип роботи містка Уїтстона. Виведіть робочу формулу.
При якому положенні рухомого контакту точність вимірювань буде максимальною?
При яких співвідношеннях опорів R_0 , R_1 , R_2 , R_x чутливість містка буде найбільшою?
Як за допомогою містка Уїтстона виміряти опір гальванометра?

Література

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики, т. 3, Электричество. – М.: Наука, 1977. – С. 174–198.
2. Борбат О. М. та ін. Електричний практикум. – К.: Вид-во Київ. ун-ту, 1964. – С. 102–105.

6. Вимірювання електрорушійних сил методом компенсації

Мета роботи: Вивчити особливості вимірювань ЕРС гальванічних елементів методом компенсації; виміряти ЕРС досліджуваного гальванічного елемента.

Прилади та матеріали: досліджуваний гальванічний елемент, нормальний елемент Вестона (еталон), джерело живлення, два послідовно з'єднаних декадних магазини опорів, гальванометр з нулем відліку в середній частині шкали, подвійний перемикач, ключ телеграфний.

Теоретичні відомості

Електрорушійна сила (ЕРС) джерела струму дорівнює різниці потенціалів на полюсах розімкненого джерела. Величину ЕРС можна виміряти електростатичним вольтметром. Проте точність таких вимірів досить низька. Для вимірювань з достатньою точністю ЕРС джерел, при яких в момент виміру струм через джерело не йде, використовують компенсаційні методи.

На провідник AB (рис. 6.1) подають напругу від джерела \mathcal{E} . Джерело з невідомою електрорушійною силою \mathcal{E}_x підключають до частини AC провідника AB назустріч відомому джерелу \mathcal{E} . При довільному положенні ковзного контакту C на ділянках кола будуть проходити струми, I , I_1 та I_x , величину яких легко відшукати, скориставшись законом Кірхгофа для розгалуженого кола. При $\mathcal{E} > \mathcal{E}_x$ переміщуючи контакт C , доб'ємося компенсації ЕРС джерела спадом напру-

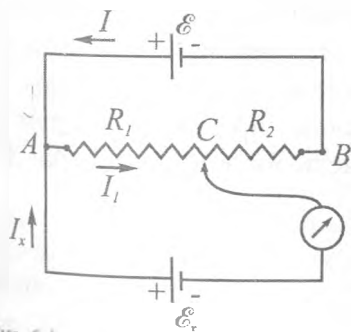


Рис. 6.1. Принципова схема для визначення невідомої ЕРС.

ги на опорі R_1 . При цьому гальванометр покаже $I_x = 0$. Для струму I можна записати

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2 + r},$$

де r — сумарна величина опору джерела \mathcal{E} та з'єднувальних провідників.

Падіння напруги на опорі R_1 буде дорівнювати ЕРС \mathcal{E}_x :

$$\mathcal{E}_x = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + R_2 + r} R_1. \quad (6.1)$$

Таким чином, для визначення невідомої ЕРС потрібні знати \mathcal{E} , R_1 , R_2 та r .

Опори можна визначити з достатньою точністю, щодо величини ЕРС \mathcal{E} , то вона змінюється з часом, а це вносить додаткову похибку.

Визначити \mathcal{E}_x можна не маючи відомостей про значення r та \mathcal{E} . Для цього, підібравши значення R_1 при довільному загальному опорі $R = R_1 + R_2$ ділянки AB схеми ввімкненим \mathcal{E}_x , вмикаємо замість \mathcal{E}_x джерело з відомою електрорушійною силою \mathcal{E}_0 , величина якої з часом не змінюється. За таке джерело звичайно править нормальний елемент Вестона (опис елемента Вестона наведено в описі робочої схеми). Переміщуючи в цьому випадку повзунок C треба знайти таке його положення, при якому струм гальванометрі знову дорівнює нулеві. Якщо опір ділянки AB буде R_1^0 , то

$$\mathcal{E}_0 = \frac{\mathcal{E}}{R + r} R_1^0, \quad (6.2)$$

де $R = R_1^0 + R_2^0$.

Поділимо почленно (6.1) на (6.2), тоді

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_0 \frac{R_1}{R_1^0} \quad (6.3)$$

Опис робочої схеми

При виконанні даної роботи використовується схема, наведена на рис. 6.2, де \mathcal{E}_0 – елемент Вестона, \mathcal{E} – джерело на 1,5–6 В, R_d – змінний опір від 0 до 10^5 Ом (його вводять для того, щоб не брати значних струмів від еталонного джерела і змінювати чутливість схеми); K_1 – ключ, K_2 – телеграфний ключ, K_3 – перемикач, R_1 та R_2 – два послідовно з'єднаних однакових магазини опорів.

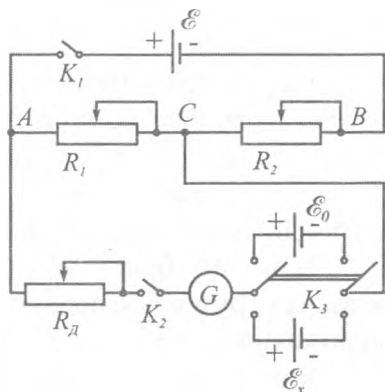


Рис. 6.2. Електрична схема для визначення електрорушійної сили \mathcal{E}_x невідомого елемента.

Нормальний елемент Вестона (рис. 6.3) складається із скляної Н-подібної посудини, в нижній частині якої впаяні провідники, що служать електродами. В одному коліні цієї посудини налита ртуть. В другому – амальгама кадмію.

Над ртуттю знаходиться шар пасти. Електролітом служить насичений розчин CdSO_4 . Щоб розчин завжди був насичений, в елемент кладуть декілька кристалів CdSO_4 . Додат-

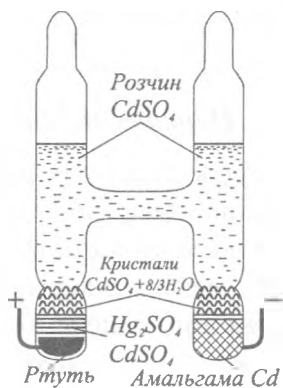


Рис. 6.3. Елемент Вестона..

нім полюсом служить ртуть. Електрорушійна сила елемента Вестона мало залежить від температури, тому він і вважається нормальним. При температурі t електрорушійна сила елемента Вестона рівна \mathcal{E}_0 :

$$\mathcal{E}_0 = 1,0183 - 0,0000406(t - 20^\circ) - 0,00000095(t - 20^\circ)^2. \quad (6.4)$$

Від елемента Вестона не можна брати сильних струмів, оскільки елемент легко поляризується, і потрібен тривалий час для відтворення його нормальної електрорушійної сили. Після 5-хвилинного короткого замикання треба 1,5 години на його відпочинок, після 5-годинного – 3 тижні.

Щоб не брати від нормального елемента занадто великих струмів послідовно з елементом включають великий додатковий опір R_d (10000 – 20000 Ом).

Ключ K_2 в колі схеми рис. 6.2 дається для того, щоб не брати від елемента струм протягом тривалого часу. Ключ K_1 слід замикати лише на мить, щоб побачити чи дає гальванометр відхилення, чи ні.

Компенсаційний метод покладено в основу будови електровимірювальних приладів, які називаються *потенціометрами постійного струму*. Ці прилади використовують, зокрема, для вимірювання термоелектрорушійних сил.

Порядок виконання роботи

1. Зберіть схему для вимірювань згідно з (рис. 6.2), в якій за еталонне джерело взято нормальний елемент Вестона з відомою залежністю \mathcal{E}_0 від температури t (формула 6.4).
2. При максимальному значенні опору R_d замкніть ключ K_1 . За допомогою перемикача K_3 ввімкніть еталонне джерело ЕРС \mathcal{E}_0 . Виберіть суму опорів $R = R_1^0 + R_2^0 = 10000$ Ом і змінюючи співвідношення R_1^0 та R_2^0 (при сталій їх сумі R)

зведіть струм гальванометра до нуля. Зменшуючи опір R_D до нуля, збільшіть чутливість схеми і знову досягніть відсутності струму в колі гальванометра. Одержані значення R, R_1^0 запишіть в табл. 1.

Таблиця 1

№	$R = R_1^0 + R_2^0 =$ $= R_1 + R_2, \text{ Ом}$	$R_1^0,$ Ом	$R_1, \text{ Ом}$	$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_0 \frac{R_1}{R_1^0}, \text{ В}$	$\Delta \mathcal{E}_x, \text{ В}$
1					

3. Перемикачем K_3 введіть в схему джерело з невідомою ЕРС \mathcal{E}_x . Скомпенсуйте \mathcal{E}_x при $R = R_1 + R_2 = 10000 \text{ Ом}$. Значення опору R_1 занесіть в таблицю 1.

4. Повторіть досліди (п. 2,3) при $R = 6000, 7000, 8000, 9000 \text{ Ом}$. Розрахуйте \mathcal{E}_x за формулою (6.3), попередньо визначивши \mathcal{E}_0 при кімнатній температурі за формулою (6.4).

5. Оцініть похибки експериментів та запишіть остаточний результат з довірчим інтервалом при довірчій імовірності $\alpha = 0,95$.

6. Проаналізуйте похибки, пов'язані із зміною чутливості гальванометра.

Контрольні питання.

1. Зобразіть використану в роботі електричну схему.
2. Розкажіть, в чому полягає метод компенсації.
3. Сформулюйте закони Кірхгофа.
4. Виведіть формулу для визначення ЕРС досліджуваного елемента.

Література

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики, т. 3, Электричество. – М.: Наука, 1977. – С. 176–198.
2. Борбат О. М. та ін. Електричний практикум. – К.: Вид-во Київ. ун-ту, 1964. – С. 110–115.

7. Визначення питомого заряду електрона (e/m) методом магнетрона

Мета роботи: Вивчити рух електрона в схрещених електричному і магнітному полях. Виміряти питомий заряд електрона методом магнетрона.

Прилади: блок живлення, амперметри, мікроамперметр, вольтметр, реостати, подільник напруги, соленоїд, радіолампа 6Ц10П.

Теорія методу

Питомим зарядом називається відношення заряду q частинки до її маси m . Величина q/m індивідуальна для кожної елементарної частинки і існують різні методи вимірювання q/m .

Для електрона величину e/m можна виміряти методом магнетрона. Магнетрон – це електронний прилад з коаксіальними циліндричними катодом і анодом, в якому електрони рухаються в магнітному полі і випромінюють електромагнітні хвилі високої частоти. Їх кінетична енергія дорівнює роботі сил електростатичного поля по переміщенню електрона між катодом і анодом, тобто

$$\frac{mv^2}{2} = eU, \quad (7.1)$$

де U – різниця потенціалів між катодом і анодом. Звідси швидкість електрона

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \quad (7.2)$$

Як магнетрон може бути використана двохелектродна лампа з циліндричними катодом та анодом, що розташована в магнітному полі (рис. 7.1).

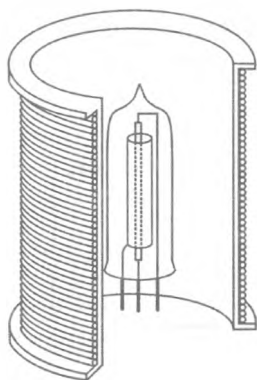


Рис. 7.1. Вид магнетрона при розрізі котушки.

Якщо через соленоїд проходить струм I_s , то всередині соленоїда з'являється магнітне поле з індукцією $B \sim I_s$. На електрони, що рухаються до аноду в магнітному полі, лінії індукції якого перпендикулярні вектору швидкості, діє сила Лоренца $\vec{F} = e[\vec{v}, \vec{B}]$, внаслідок чого траєкторія цих електронів стає криволінійною (рис. 7.2).

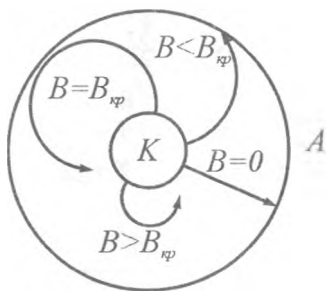


Рис. 7.2. Рух електронів між катодом К і анодом А при різних значеннях B (поперечний переріз лампи).

При деякому значенні магнітної індукції $B_{кр}$ електрони перестають досягати анода, їх траєкторії можна вважати колами радіусів $r=(r_A - r_K)/2$, анодний струм в лампі стає рівним нулеві ($I_a = 0$). На кривій залежності анодного струму від індукції магнітного поля $I_a = f(B)$ при $B_{кр}$ повинен спостерігатися стрімкий спад (рис. 7.3(а)).

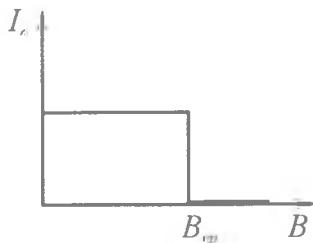


Рис. 7.3(а).

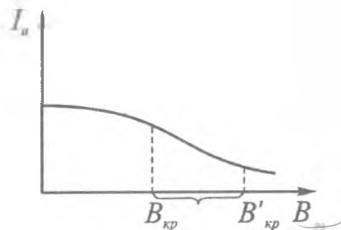


Рис. 7.3(б).

Очевидно, що силу Лоренца в даному випадку можна розглядати як доцентрову

$$evB = \frac{mv^2}{r} \quad (7.3)$$

Підставивши (7.2) в (7.3) маємо

$$\frac{e}{m} = \frac{2U_a}{B_{кр}^2 r^2}, \quad (7.4)$$

а врахувавши значення $r=(r_A-r_K)/2$, одержимо

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 r_A^2 \left(1 - \frac{r_K}{r_A}\right)^2}. \quad (7.5)$$

Визначивши експериментальне значення $B_{кр}$, можна розрахувати за формулою (7.5) величину питомого заряду електрона e/m . Оскільки соленоїд обмеженої довжини не дає строго однорідного магнітного поля формулу (7.5) записують у вигляді:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 r_A^2 \left(1 - \frac{r_K^2}{r_A^2}\right)}, \quad (7.6)$$

де U_a – анодна напруга, r_K, r_A – радіуси катода та анода.

При проведенні експериментальних досліджень може реалізуватись випадок, коли на кривій $I_a=f(B)$ буде мати місце не стрибок I_a при $B_{кр}$, а протяжна ділянка $B_{кр} B'_{кр}$, тому виникають труднощі при експериментальному визначенні величини $B_{кр}$. Похибки вимірювання в цьому випадку настільки великі, що втрачається сенс самих вимірювань. Традиційно така протяжність спаду на кривій $I_a=f(B)$ пов'язується головним чином з тим, що електрони, які вилітають з катода, мають різні швидкості. Але розрахунки показують, що $B_{кр}$ від початкової швидкості електрона практично не залежить, а протяжність спаду обумовлена наявністю просторового заряду поблизу катода при сильному його розжаренні. Катод, з якого вилітають електрони, заряджається позитивно і притягує до себе електрони, які утворюють хмаринку навколо нього (рис. 7.4).

Цей негативний просторовий заряд створює електричне поле між катодом та анодом, що й зумовлює таке значне розходження теоретичних (рис. 7.3(а)) і експериментальних (рис. 7.3(б)) результатів.

Для того, щоб усунути цю невідповідність, треба зменшити розжарення катода, тобто зменшити кількість електронів, що вилітають з катода і працювати в режимі насичення, коли електрони, що вилітають з катода, не

збираються навколо нього, а відлітають до аноду (рис. 7.5). В такому випадку залежність $I_a = f(B)$ приймає вигляд, близький до теоретичного (рис. 7.3(a)).

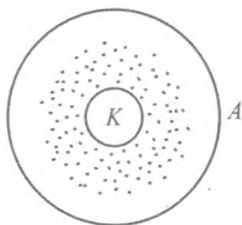


Рис. 7.4. Просторовий заряд електрона навколо катода.

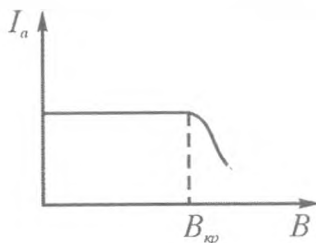


Рис. 7.5. Залежність $I_a = f(B)$ при роботі лампи в режимі насичення.

Опис лабораторної установки

На рис. 7.6 зображено електричну схему для дослідження руху електрона в схрещених електричному і магнітному полях.

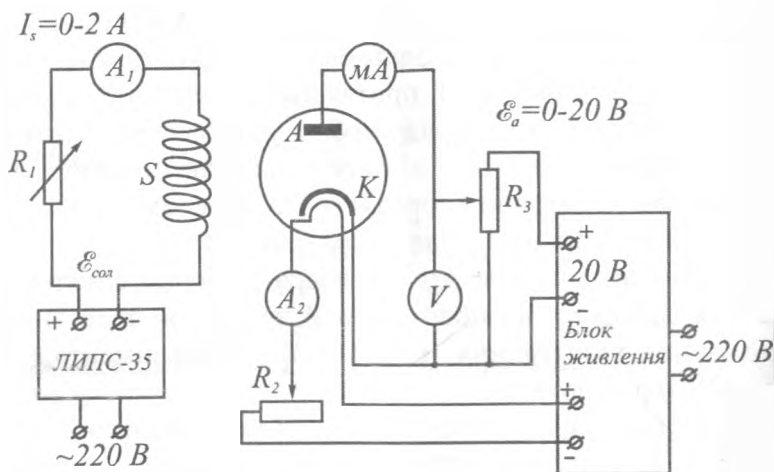


Рис. 7.6.

Як магнетрон в роботі застосована радіолампа 6Ц10П з циліндричними анодом та катодом, для якої $r_K = 1,6$ мм, $r_A = 2,3$ мм, причому сама лампа знаходиться всередині соленоїда S .

Схема складається з трьох електричних кіл: кола соленоїда S , що створює магнітне поле, кола розжарення катода K та анодного кола.

Примітка. Позначені на схемі опори R_1 , R_2 і R_3 являють собою реостати, з допомогою яких можна змінювати струм соленоїда I_s , струм розжарення катода та напругу на аноді радіолампи U_a . Реостат R_3 працює як подільник напруги. Зміна величини струму I_s в обмотці соленоїда приводить до зміни величини магнітної індукції B всередині соленоїда.

Порядок виконання роботи

1. Зберіть схему згідно з рис. 7.6.
2. З дозволу викладача увімкніть джерела живлення. Встановіть за допомогою реостата R_2 такий струм розжарення катода радіолампи, при якому емісія електронів була б мінімальною ($I_{\text{розж}} = 0,05$ А).

Примітка. Оскільки катод масивний, то потрібен деякий час на його розігрів (приблизно 7–10 хв.).

3. Подайте напругу в анодне коло радіолампи ($U_a = 1\text{--}2,5$ В).
4. Подайте напругу $\mathcal{E}_{\text{сол}}$ в коло соленоїда. Збільшуючи струм в соленоїді, переконайтеся, що анодний струм радіолампи I_a спадає при деякому значенні I_s .
5. Встановивши значення $U_{a1} = \text{const}$ зніміть залежність $I_{a1} = f(I_s)$, змінюючи I_s від 0 до 2 А з кроком дискретності зростання 0,1 А (приблизно 6–10 експериментальних точок). Значення $I_s = I_{s\text{кр},1}$ і значення I_{a1} занесіть в табл. 1. Серед одержаних даних відмітьте значення I_s , коли анодний струм I_{a1} почав зменшуватись.
6. Проведіть виміри подібні вимірам п. 5 при $U_{a2} = \text{const}$ і $U_{a3} = \text{const}$. Дані занесіть в ту ж саму табл. 1.

7. Побудуйте графіки залежності $I_a = f(I_s)$ для трьох значень напруги U_{a1} , U_{a2} , U_{a3} та визначте на них значення $I_{s\text{кр},1}$, $I_{s\text{кр},2}$, $I_{s\text{кр},3}$.

Таблиця 1

I_s, mA							
I_{a1}, mA (при $U_{a1} = \dots, \text{B}$)							
I_{a2}, mA (при $U_{a2} = \dots, \text{B}$)							
I_{a3}, mA (при $U_{a3} = \dots, \text{B}$)							

8. Користуючись кривою градування соленоїда $B = f(I_s)$ (рис. 7.7), визначте критичне значення індукції магнітного поля $B_{\text{кр},1}$ (для $I_{s\text{кр},1}$ при U_{a1}), $B_{\text{кр},2}$ (для $I_{s\text{кр},2}$ при U_{a2}), $B_{\text{кр},3}$ (для $I_{s\text{кр},3}$ при U_{a3}).

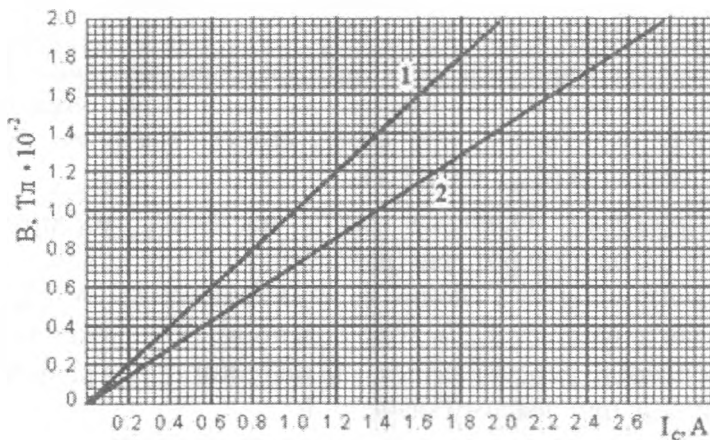


Рис. 7.7. Графік залежності індукції магнітного поля всередині соленоїда від сили струму через соленоїд ($N=3400$ витків, $R=14, 17 \text{ Ом}$):
1) без урахування екранування; 2) з урахуванням екранування.

Примітка. При визначенні індукції магнітного поля соленоїда B слід мати на увазі, що анод радіолампи частково екранує магнітне поле, тому дійсне значення B буде менше від розрахованого. Внаслідок цього останнє треба зменшити в 1,4 рази.

9. Користуючись експериментальними даними, одержаними в трьох експериментах, розрахуйте значення e/m за формулою (7.6) і занесіть їх в табл. 2.

Таблиця 2

$U_{\text{кр}}, \text{В}$	$B_{\text{кр}}, 10^4 \text{ Тл}$	$\frac{e}{m} \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$	$\left\langle \frac{e}{m} \right\rangle \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$	$\Delta \left(\frac{e}{m} \right) \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$

10. Запишіть остаточний результат вимірів e/m з довірчим інтервалом при довірчій імовірності $\alpha = 0,95$ та порівняйте його з табличним значенням.

Контрольні запитання

1. Що називається питомим зарядом електрона?
2. Виведіть формулу за якою визначають питомий заряд електрона в даній задачі.
3. Що таке магнетрон?
4. На якій підставі можна стверджувати, що електрон, який влітає в магнітне поле, перпендикулярно до силових ліній, рухається по колу?
5. Як направлена сила, що змушує електрони відхилятися від прямолінійного руху між катодом і анодом?
6. Яке значення магнітної індукції називається критичним в даній роботі?
7. Поясніть причину розходження теоретичних та експериментальних результатів при визначенні залежності $I_a = I_a(B)$.
8. Які види електронної емісії, крім термічної, вам відомі?
9. Що вносить максимальну похибку при визначенні значення e/m в даній роботі?

Література

1. Калашников С. Г. Электричество. – М., 1970.
2. Загальна фізика. Лабораторний практикум. Під ред. І. Т. Горбачука. – Київ, 1992. – С. 331–335.
3. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям по физике. Под ред. В. И. Ивероновой. – Москва, 1955.
4. Сивухин Д. В. Общий курс физики, т. 3, Электричество. – М.: Наука, 1977. – С. 181–408.
5. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики, т. 2, Електрика. – Київ, 1999.

8. Дослідження властивостей феромагнетиків за допомогою осердя із зазором.

Мета роботи: експериментально дослідити явище гістерезису для феромагнетика: 1) побудувати залежність намагнічування феромагнетика B від напруженості магнітного поля H ; 2) побудувати залежність магнітної проникності μ від напруженості поля H , використовуючи криву намагнічування; 3) визначити параметри досліджуваного феромагнетика $\mu_{\text{пшх}}$, $B_{\text{зал}}$, $H_{\text{нас}}$.

Прилади: установка для дослідження характеристик феромагнетика.

Теоретичні відомості

Всі речовини є магнетиками і у магнітному полі намагнічуються, тобто набувають магнітного моменту.

Намагнічування речовини пояснюється тим, що в речовині існують елементарні магнітні моменти атомів (молекул), які при звичайних умовах мають довільну орієнтацію, а в зовнішньому магнітному полі \vec{B}_0 набувають переважної орієнтації в напрямку поля.

Намагнічена речовина утворює магнітне поле \vec{B}' , яке накладається на зовнішнє поле \vec{B}_0 , тому результуюче поле в речовині буде мати значення магнітної індукції рівне:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'. \quad (8.1)$$

Намагнічування магнетика характеризують магнітним моментом одиниці об'єму. Цю величину називають **вектором намагнічування** \vec{J} , який визначається як сума всіх магнітних моментів окремих молекул $\sum_i \vec{P}_i$ в одиниці об'єму:

$$\vec{J} = \frac{\sum \vec{P}_i}{V} \quad (8.2)$$

Вектор намагнічування \vec{J} залежить від величини напруженості зовнішнього магнітного поля \vec{H} (рис. 8.1):

$$\vec{J} = \chi \vec{H}, \quad (8.3)$$

де χ – магнітна сприйнятливість.

Між векторами \vec{J} , \vec{H} та \vec{B} існує такий зв'язок:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}), \quad (8.4)$$

де μ_0 – так звана *магнітна стала* ($\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

Якщо в (8.4) замість \vec{J} підставити (8.3), то одержимо відоме співвідношення між \vec{H} та \vec{B} :

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \chi \vec{H}) = \mu_0 \vec{H} (1 + \chi) = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (8.5)$$

де величина

$$\mu = 1 + \chi. \quad (8.6)$$

називається *відносною магнітною проникністю* речовини.

Величини χ та μ є дуже важливими параметрами, які характеризують властивості магнітних речовин. Магнітна сприйнятливість χ може бути як від'ємною, так і додатною величиною. Якщо $\chi < 0$, то $\mu < 1$, такі речовини називаються *діамагнетиками*. Якщо $\chi > 0$, то $\mu > 1$, такі речовини мають назву *парамагнетиків*. Однак існує клас речовин, для яких

магнітна проникність μ набагато перевищує одиницю. Такі речовини мають назву *феромагнетиків*. Феромагнетики широко застосовуються у радіотехніці, оскільки дозволяють значно підвищити індуктивність котушок та зменшити їх розміри.

До феромагнетиків належать метали: залізо, нікель, кобальт, гадолій, а також їхні сплави. Для цих речовин відносна магнітна проникність досягає значень $\mu \approx 10^2 - 10^5$. Магнітна проникність μ має велике значення також для деяких напівпровідників і діелектриків, які у радіотехніці дістали назву феритів.

Відповідальними за магнітні властивості феромагнетиків є спінові магнітні моменти електронів. За відповідних умов в кристалічній ґратці речовини можуть виникати так звані обмінні сили, які змушують магнітні моменти електронів сусідніх атомів розташовуватися паралельно один одному. Внаслідок цього виникають мікрообласті спонтанного (довільного) намагнічування, які мають назву *доменів*.

Домени мають розміри близько 10 мкм. Магнітні моменти окремих доменів орієнтовані безладно і результуюче значення вектора намагніченості \vec{J} може дорівнювати нулеві. Однак, якщо феромагнетик помістити у магнітне поле \vec{H} , домени починають орієнтуватися за полем, причому спочатку відбувається переорієнтація тих доменів, магнітні моменти яких направлені проти поля. Цей процес відбувається стрибком, і йде різке зростання намагніченості феромагнетика. Далі йде більш плавна орієнтація доменів по полю, яка носить пружний характер. При деякому значенні поля $\vec{H}_{\text{нас}}$ всі домени орієнтуються паралельно за полем, і намагніченість феромагнетика \vec{J} досягає максимума, тобто, має місце насичення.

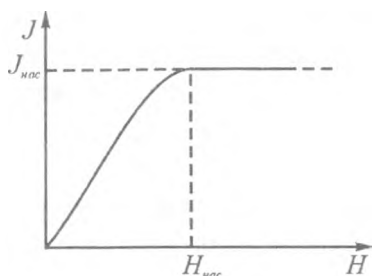


Рис. 8.1. Графік залежності намагнічення J від величини магнітного поля.

На рис. 8.1 зображено графік залежності намагнічення J від величини магнітного поля. Це – так звана основна крива намагнічення, одержана для феромагнетика, який в початковому стані (без магнітного поля) був ненамагнічений ($J = 0$), тобто всі домени в ньому були орієнтовані хаотично. На практиці

феромагнетик частіше характеризується залежністю $B=B(H)$. Встановимо якісний характер цієї залежності. Згідно з (8.4):

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J}. \quad (8.7)$$

При $J=J_{\text{нас}}$ значення $B=\mu_0 H + \mu_0 J_{\text{нас}} = \mu_0 H + \text{const}$, тобто при малих H індукція B зростає внаслідок зростання намагнічуваності J по нелінійному закону, а при $H > H_{\text{нас}}$ залежність $B=B(H)$ стає лінійною. На рис. 8.2 зображена ця залежність $B=B(H)$ (крива 0–1).

При розмагнічуванні феромагнетика (тобто, при зменшенні H) має місце відставання величини B відносно H : крива розмагнічування 1–2 не співпадає з основною кривою намагнічування 0–1. Це явище отримало назву *гістерезиса* (запізнення). При $H = 0$ після намагнічення зберігається деяка залишкова намагніченість $J_{\text{зал}}$, або залишкова індукція $B_{\text{зал}}$. Вона обумовлена зберіганням залишкової паралельної орієнтації доменів, і для того, щоб скомпенсувати цю залишкову намагніченість, треба прикласти зворотнє магнітне поле $-H$, щоб переорієнтувати відповідну частину доменів на зворотний напрямок. Величина $H_{\text{коерц}}$, при якій $B = 0$, має назву *коерцитивної сили*.

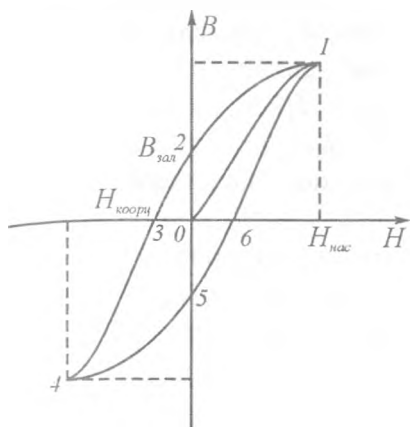


Рис. 8.2. Графік залежності $B=B(H)$ для феромагнетиків.

магнітожорстких, а відповідно з малим значенням $H_{\text{коерц}}$ — магнітом'яких.

При подальшому збільшенні напруженості магнітного поля у зворотному напрямку відбувається переорієнтація усіх доменів теж на зворотний напрямок, а при циклічній зміні магнітного поля крива $B(H)$ набуває вигляду замкненої кривої, тобто *петлі гістерезису*, яка не співпадає з початковою, основною кривою намагнічування 0–1.

Оскільки властивості феромагнетика залежать від його попереднього стану, то тільки основна крива намагнічування 0–1 може служити для визначення його характеристик. У зв'язку з цим і поняття магнітної проникності μ застосовується лише до основної кривої намагнічування 0–1.

Магнітна проникність μ згідно з (8.6) та (8.3) залежить від величини магнітного поля H :

$$\mu = 1 + \chi = 1 + J/H \quad (8.8)$$

Коерцитивна сила є важливим параметром, який характеризує феромагнетик. Наприклад, в постійних магнітах, де повинна зберігатися намагніченість, $H_{\text{коерц}}$ має великі значення ($H_{\text{коерц}} > 4000 \text{ А/м}$). Проте, для сердечників котушок індуктивності, трансформаторів і дроселів переорієнтація повинна відбуватися при малих $H_{\text{коерц}}$ ($H_{\text{коерц}} < 200 \text{ А/м}$). Феромагнетики з великим значенням $H_{\text{коерц}}$ мають назву

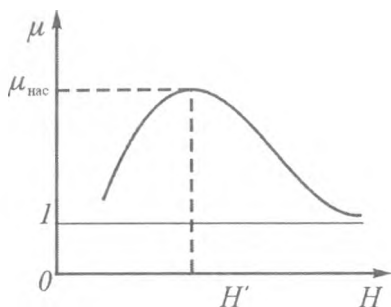


Рис. 8.3. Графік залежності $\mu(H)$ для феромагнетиків.

H' магнітна проникність μ має максимум ($\mu = \mu_{\max}$).

Методика вимірів B та H

Основні характеристики феромагнетика можна одержати із залежності $B=B(H)$. В даній роботі застосовується метод безпосереднього виміру B з використанням ефекту Холла та метод розрахунку значення H на основі теореми про циркуляцію вектора напруженості.

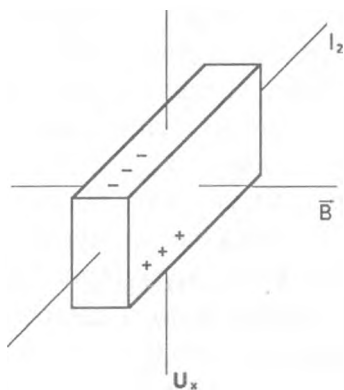


Рис. 8.4. Пластинка зі струмом у магнітному полі.

При $H < H_{\text{нас}}$ магнітна проникність зростає внаслідок сильного зростання J . При $H > H_{\text{нас}}$ намагніченість $J = J_{\text{нас}}$ і μ зменшується за рахунок збільшення H , наближаючись до одиниці ($\mu = 1$). На рис. 8.3 наведена залежність $\mu(H)$, із якої видно, що при деякому значенні

Ефектом Холла називається явище виникнення ЕРС на бокових гранях пластинки із струмом, яка розміщена в магнітному полі (рис. 8.4).

Якщо в полі B розміщений метал, або напівпровідник із струмом, то під дією сили Лоренца

$$\vec{F}_L = e[\vec{v}, \vec{B}] \quad (8.9)$$

рухомі електрони відхиляються в напрямку, перпендикулярному до поля B і швидкості v . Розділення зарядів, що відбувається при цьому, приводить до

виникнення поперечного електричного поля, що протидіє подальшому відхиленню електронів магнітним полем.

Холлівська різниця потенціалів U_X буде тим більшою, чим більшим буде струм I (зростає кількість зарядів, які рухаються) і чим більшою буде магнітна індукція B (зростає сила Лоренца):

$$U_X = k I_2 B. \quad (8.10)$$

Тут $k = \frac{U_X}{I_2 B}$ є чутливістю датчика Холла, яка чисельно

дорівнює напрузі Холла U_X при $I_2 = 1A$ та $B = 1Tл$.

Таким чином, знаючи чутливість датчика Холла k , можна за величиною U_X визначити величину B магнітного поля:

$$B = \frac{1}{k I_2} U_X \quad (8.11)$$

Як датчик Холла частіше всього використовують напівпровідникові матеріали, які мають досить велике значення ЕРС Холла і пропорційність $U_X = f(B)$. До таких матеріалів відносяться германій і сурм'яний індій.

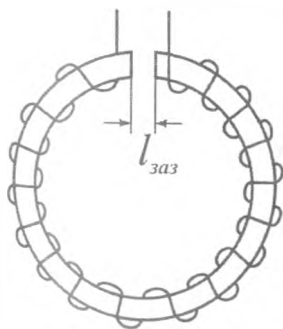


Рис. 8.5. Тороїдальне кільце.

Для визначення холлівської різниці потенціалів U_X датчик Холла вставляють в тонкий зазор товщиною $l_{\text{заз}}$ тороїдального кільця довжиною l з обмоткою із N витків (рис. 8.5).

При проходженні струму через обмотку тороїда виникає всередині обмотки поле з напруженістю H , і осердя намагні-

чується. Відомо, що нормальна складова індукції магнітного поля B_n при переході з одного середовища до іншого не змінюється. В даному випадку вузький зазор перпендикулярний потоку вектора B , і тому можна вважати, що $B_n = B = B_{\text{заз}}$, тобто значення індукції у зазорі, яке виміряне датчиком Холла, і є шуканим значенням індукції B магнітного поля всередині осердя.

Для визначення відповідних значень напруженості H магнітного поля скористаємося теоремою про циркуляцію вектора H (закон повного струму):

$$\oint H_l dl = NI, \quad (8.12)$$

де H_l – проекція H на вибраний контур всередині осердя, який охоплює витки N (за такий контур зручно вибрати середню лінію тороїда). В нашому випадку контур складається з двох ділянок – осердя та зазору, і тому інтеграл можна замінити сумою:

$$H_{0,l} l + H_{\text{заз},l} l_{\text{заз}} = NI, \quad (8.13)$$

де $H_{0,l}$ – напруженість магнітного поля всередині осердя (причому $H_{0,l} = H$), $H_{\text{заз},l}$ – напруженість магнітного поля в зазорі ($H_{\text{заз},l} = H_{\text{заз}}$), l – довжина середньої лінії тороїда, $l_{\text{заз}}$ – товщина зазору в осерді.

Тоді (8.13) можна записати так:

$$H l + H_{\text{заз}} l_{\text{заз}} = NI, \quad (8.14)$$

Звідки

$$H = \frac{NI}{l} - \frac{l_{\text{заз}}}{l} H_{\text{заз}}. \quad (8.15)$$

Величину $H_{\text{ззз}}$ можна виразити через індукцію магнітного поля B :

$$H_{\text{ззз}} = \frac{B_{\text{ззз}}}{\mu_0 \mu} = \frac{B}{\mu_0}, \quad (8.16)$$

бо для зазору $\mu = 1$.

Отже, вираз (8.15) для напруженості магнітного поля (з урахуванням (8.16)) буде мати вигляд:

$$H = \frac{N}{l} I - \frac{l_{\text{ззз}}}{l \mu_0} B \quad (8.17)$$

Таким чином, якщо виміряти за допомогою датчика Холла індукцію магнітного поля B в зазорі, значення струму в обмотці соленоїда, а також l та $l_{\text{ззз}}$, то можна згідно формули (8.17) визначити H та побудувати залежність $B=B(H)$.

Опис приладу

Схему установки для дослідження характеристик феромагнетика зображено на рис. 8.6.

На схемі (рис. 8.6) нанесені такі позначення:

\mathcal{E}_1 – джерело живлення (ЛИПС-35) для створення постійного струму I_1 в обмотці осердя тороїдального соленоїда S ;

A – амперметр (до 3 А) для виміру струму I_1 через обмотку осердя;

K_1 – тумблер для вимикання та зміни напрямку постійного струму («+», «-») через обмотку тороїдального соленоїда S ;

K_2 – тумблер для підключення до обмотки тороїдального соленоїда S джерела живлення ЛІПС-35 або ЛАТРа;

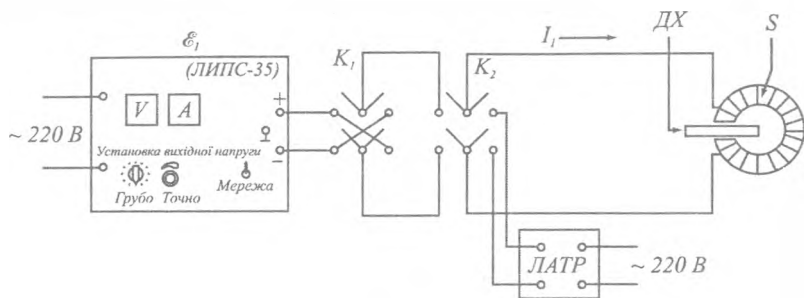


Рис.8.6. Загальна схема лабораторної установки.

ЛАТР – лабораторний автотрансформатор для розмагнічування осердя соленоїда S ;

ДХ – датчик Холла;

S – тороїдальний соленоїд з кількістю витків N , осердя якого є досліджуваний феромагнетик. Параметри тороїдального соленоїда: $N=1500$ витків, $l=0,565$ м, $l_{\text{звз}}=1,3 \cdot 10^{-3}$ м.

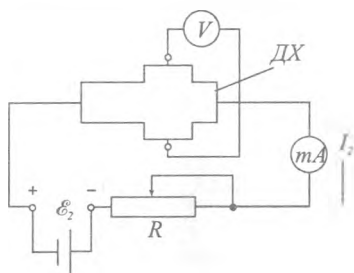


Рис.8.7. Схема підключення датчика Холла.

Підключення датчика Холла зображено окремо на рис. 8.7, де нанесені такі позначення:

\mathcal{E}_2 – джерело живлення датчика Холла;

mA – міліамперметр для вимірювання постійного струму I_2 , який споживає датчик Холла ($I_2 = 1 - 3$ мА);

R – реостат для регулювання струму I_2 через датчик Холла;

V – цифровий вольтметр для вимірювання холлівської напруги U_H .

Порядок виконання роботи

1. Зберіть схему згідно з рис. 8.6 та рис. 8.7. (В даній лабораторній установці всі деталі електричної схеми уже змонтовані у вигляді стенду, а на поверхню панелі виведені лише клеми від них і тумблери. До цих клем слід приєднати джерела живлення у відповідності з рис. 8.6 та рис. 8.7).
2. Тумблери K_1 та K_2 поставте у нейтральне положення (ручки – вертикально вгору).
3. Під'єднайте до електричної мережі (~ 220 В) джерело живлення ЛІПС-35, автотрансформатор ЛАТР, джерело живлення E_2 для датчика Холла, цифровий вольтметр V для виміру холлівської різниці потенціалів U_X та увімкніть їх.

На джерелі живлення ЛІПС-35 потенціометром та перемикачем встановіть мінімальну вихідну напругу (0 Вольт).

Реостатом R , що знаходиться на панелі перед міліамперметром, встановіть струм через датчик Холла $I_2 = 1 \text{ mA}$ (контроль здійснюється по міліамперметру mA).

Примітка: Якщо осердя тороїдального соленоїда S має залишкову намагніченість, то навіть за відсутності струму I_1 через обмотку осердя датчик Холла видаватиме певне значення напруги U_X (воно може бути як додатнім, так і від'ємним). Якщо це так, то осердя треба розмагнітити.

4. Виконайте розмагнічування осердя тороїдального соленоїда S . Для цього:

а) Вимкніть джерело живлення датчика Холла (тумблер на корпусі джерела живлення поставити у положення «Вимк»).

б) На ЛАТРі ручкою встановіть напругу 55 Вольт.

в) Тумблер K_2 поставте в положення «ЛАТР».

г) Повільно зменшіть напругу, яка знімається з ЛАТРу, до нуля.

- д) Поставте тумблер K_2 у нейтральне положення.
- е) Увімкніть джерело живлення датчика Холла. За показами цифрового вольтметра V переконайтесь, що сигнал, який видає датчик Холла, близький до нуля. Якщо це не так, то повторіть розмагнічування (п.п. 4(б-г)).

Примітка: При розмагнічуванні змінним магнітним полем, напруженість якого повільно спадає до нуля, домени, що коливаються разом із полем, «застигають» у довільних положеннях і сумарний магнітний момент всередині осердя дорівнює нулеві.

5. Тумблер K_2 поставте в положення «ЛИПС-35», тумблер K_1 – у положення «+». Збільшуючи струм I_1 в обмотці осердя (тільки збільшуючи!) за допомогою перемикача та потенціометра на джерелі живлення ЛИПС-35, здійсніть вимірювання холлівської напруги U_X для декількох значень струму в обмотці осердя (6–10 точок, при цьому врахуйте знак I_2 та U_X). Визначте індукцію магнітного

поля B в осерді за формулою (8.11) $\left(B = \frac{1}{kI_2} U_X \right)$,

враховуючи, що $k=33 \frac{B}{A \cdot Tл}$, та розрахуйте H за формулою (8.17), в якій $I=I_1$. Дані занесіть до табл. 1.

Таблиця 1 $I_2 = 1 \cdot 10^{-3} A$

№	I_1, A	U_X, B	$B, Tл$	$H, A/м$	μ

6. Зменшуючи значення струму в обмотці осердя (тільки зменшуючи!) від максимального значення до нуля (струм $I_1 = 0$ при нейтральному положенні тумблера K_1), зніміть значення U_X для кривої розмагнічування (6–10 точок).
7. Тумблер K_1 поставте у положення «–». При цьому зміниться напрям струму I_1 через обмотку осердя.

- Збільшуючи значення зворотного струму, продовжіть виміри (6–10 точок).
8. При досягненні максимального значення зворотного струму ($I_1 < 2A$) почніть зменшувати його до нуля, водночас знімаючи покази датчика Холла (6–10 точок). При $I_1 = 0$ знову змініть полярність підключення джерела живлення ЛІПС-35 тумблером K_1 на «+» та закінчіть вимірювання при максимальному значенні струму ($I_1 < 2A$).
 9. За одержаними даними розрахуйте B та H , (враховуючи знаки I_1 та B).
 10. Використовуючи основну криву намагнічування, за формулою (8.5) розрахуйте та побудуйте графік залежності $\mu = \mu(H)$.
 11. Оцініть похибки вимірювань.

Контрольні запитання

1. Якими величинами характеризується магнітне поле в магнетиках?
2. Наведіть класифікацію магнетиків.
3. Які властивості мають феромагнетики і чим ці властивості обумовлені?
4. Як відбувається намагнічення феромагнетиків у магнітному полі?
5. Зобразіть та поясніть графік залежності намагнічення феромагнетика від напруженості магнітного поля (основна крива).
6. Зобразіть та поясніть графік залежності $B = f(H)$ для феромагнетика при намагніченні (основна крива) та при перемагніченні.
7. Що таке гістерезис, чим він зумовлений?
8. Що таке залишкова індукція, коерцитивна сила?
9. Зобразіть та поясніть графік залежності $\mu = \mu(H)$ для феромагнетика.

10. Сформулюйте та поясніть закон про циркуляцію вектора напруженості магнітного поля.
11. Яке значення мають феромагнетики у радіотехніці, чому?
12. Що таке магнітодіелектрик, ферит?
13. В чому суть ефекту Холла?
14. Зобразіть схему установки та поясніть її роботу при знятті залежності $B = f(H)$.

Література

1. Савельев И. В. Курс общей физики т. 2. §59, 1979.
2. Физический практикум. Под редакцией Ивероновой, т. 2. – М.: Наука, 1968. – С. 321–324.
3. Лабораторные занятия по физике. Под ред. Л. Л. Гольдина. – М.: Наука, 1983. – С. 273–285.
4. Сивухин Д. В. Общий курс физики, т. 3, Электричество. – М.: Наука, 1977. – С. 304–315, 438–443.
5. Борбат О. М. та ін. Електричний практикум. – К.: Вид-во Київ. ун-ту, 1964. – С. 158–163.

9. Вивчення роботи електронного осцилографа. Фігури Ліссажу

Мета роботи: ознайомитися з роботою і будовою катодного осцилографа; вивчити з його допомогою фігури Ліссажу.

Прилади: осцилограф типу C1-73, генератор низькочастотний ГЗ-120, знижувальний трансформатор (220 В/12 В), вимикачі.

Теоретичні відомості та опис приладів

Електронний осцилограф – це прилад для візуального спостереження, вимірювання і запису різноманітних електромагнітних процесів, зокрема для вивчення швидкозмінних струмів і напруг.

Основною частиною електронного осцилографа є електронно-променева трубка (рис. 9.1).

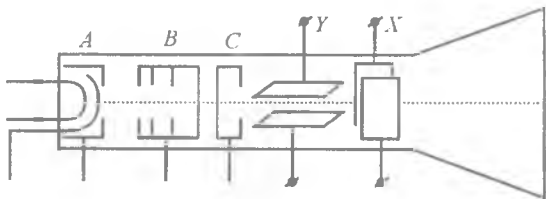


Рис. 9.1. Електронно-променева трубка, де [A, B, C] – електронна гармата (електронний прожектор); X та Y – система вертикально та горизонтально керуючих пластин.

Електронно-променева трубка являє собою електровакуумний прилад, що складається з:

- а) електронної гармати (системи, що включає в себе катод розжарення та керуючу сітку (A));
- б) двох прискорюючих анодів (B та C)), які служать для фокусування електронного пучка;

в) двох взаємно-перпендикулярних відхиляючих пластин X та Y ;

г) флуоресцентного екрана для спостереження за електронним пучком.

Якщо до кожної пари пластин X та Y прикласти певну різницю потенціалів, то електричні поля між пластинами відхилятимуть електронний промінь перпендикулярно до осі трубки відповідно в горизонтальному та вертикальному напрямках. Зміною напруги на відхиляючих пластинах можна перемістити електронний промінь в будь-яку точку екрану.

Якщо до пари пластин, наприклад Y , прикласти змінну синусоїдальну напругу, то електронний промінь буде коливатися біля середнього положення і «накреслить» на екрані вертикальну пряму лінію, довжина якої буде пропорційною подвоєній амплітуді прикладеної до пластин напруги.

Якщо змінну напругу прикласти до пластин X , то промінь накреслить горизонтальну лінію.

За допомогою електронного осцилографа можна вивчати зміну струмів та напруг з часом. Для цього досліджуваний сигнал подається на вертикально відхиляючі пластини, а на горизонтально відхиляючі – напруга горизонтальної розгортки. Остання змінюється таким чином, що періодично переміщує промінь в горизонтальному напрямку пропорційно часу.

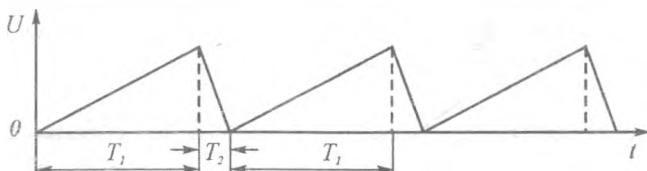


Рис. 9.2. Залежність напруги розгортки від часу.

Залежність напруги розгортки від часу зображена на рис. 9.2 і має вигляд зубців пили, тому і зветься пилко-

подібною. Під дією цієї напруги, коли вона зростає від нуля до максимального значення, електронний промінь рівномірно переміщується по екрану зліва направо, а коли напруга падає до нуля, електронний промінь швидко рухається справа наліво у вихідне положення.

Якщо одночасно подати досліджуваний сигнал на пластини Y і включити розгортку, то електронний промінь буде періодично креслити на екрані графік залежності величини досліджуваного сигналу від часу, наприклад синусоїду.

Однією з основних характеристик електронно-променевої трубки є її чутливість j .

Чутливістю трубки до напруги називають відхилення (в міліметрах) світної точки на екрані, викликане різницею потенціалів в *1 Вольт* на відхиляючих пластинах.

Чутливість до напруги залежить від параметрів трубки і визначається формулою:

$$j = \frac{L}{2\sqrt{2}U}, \quad (9.1)$$

де L – довжина світного штриха, U – напруга на пластинах (вимірюється вольтметром).

Чутливість самої електронно-променевої трубки незначна, тому для дослідження слабких сигналів осцилографи мають підсилювачі на входах X та Y . Підсилювачі мають рівномірну частотну характеристику, (тобто незалежний коефіцієнт підсилення від частоти), широку смугу пропускання частот (від десятків герц до сотень кілогерц або кількох мегагерц). Коефіцієнт підсилення плавно регулюється за допомогою резистора. Оскільки будь-який підсилювач має обмежений діапазон частот, то в осцилографах, як правило, передбачається подача сигналу безпосередньо на відхиляючі пластини електронно-променевої трубки (див. додаток 1).

Живлення осцилографа здійснюється від спеціального блока, до складу якого входить цілий ряд пристроїв, що забезпечують нормальну роботу всіх систем.

При одночасному прикладанні змінних напруг до обох пар відхиляючих пластин електронний промінь «накреслить» лінію, що буде результатом додавання двох взаємно-перпендикулярних коливань. Вона називається *фігурою Ліссажу*.

З теорії додавання двох взаємно-перпендикулярних гармонічних коливань відомо, що при рівності частот в залежності від зсуву фаз між коливаннями-доданками електронний промінь може «накреслити» на екрані пряму лінію, еліпс або коло. Якщо частоти напруг, прикладених до X та Y , не збігаються, то на екрані можна буде отримати змінну (біжучу) картину, яка зупиниться при кратних частотах. Отже, якщо на одну пару пластин прикласти досліджувану напругу, а на іншу пару – відому, то за формою фігур Ліссажу можна визначити параметри досліджуваної змінної напруги.













$f_x/f_y \quad \varphi$	0°	45°	90°
$1/1$			
$1/2$			
$1/3$			
$2/3$			

Рис. 9.3. Фігури Ліссажу.

На рис. 9.3, як приклад, наведені фігури Ліссажу для співвідношення частот $1/1$, $1/2$, $1/3$, $2/3$ при рівних амплітудах складових коливань. Для співвідношення частот $f_x/f_y=1/1$ фігури Ліссажу у загальному випадку будуть еліпсами. Вигляд еліпсів буде залежати від початкової різниці фаз складових коливань і співвідношення їх амплітуд.

При $\varphi=0^\circ$ еліпс вироджується в пряму лінію, при $\varphi=90^\circ$ – переходить в коло.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомтесь з заводською інструкцією до осцилографа і, користуючись нею, підготуйте осцилограф до роботи.

2. Навчіться виконувати такі операції:

- а) одержувати на екрані нерухому світну точку та лінію (нерухому яскраву світну точку не рекомендується довго тримати на одному місці екрана, оскільки екран може вигорати);
- б) переміщувати точку вертикально, горизонтально, регулювати яскравість точки, фокусувати її;
- в) регулювати ступінь підсилення вертикального та горизонтального входів осцилографа.

3. Складіть коло як показано на рис. 9.4. Подайте напругу на вхід «Y» та отримайте на екрані осцилографа криву промислового струму. Одержіть одну, дві, три повні синусоїди.

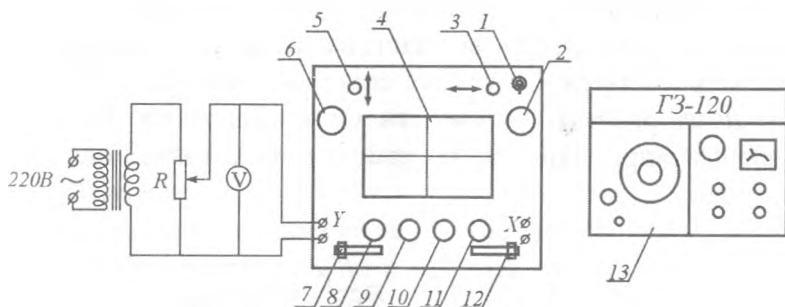


Рис. 9.4. Схема для визначення чутливості осцилографа: 1 – тумблер для вмикання живлення; 2 – плавна зміна частоти; 3 – горизонтальне зміщення променя; 4 – екран; 5 – вертикальне зміщення променя; 6 – підсилення сигналу; 7 – зміна виду струму; 8 – фокус; 9 – яскравість променя; 10 – стабільність; 11 – рівень розміщення променя; 12 – синхронізація; 13 – генератор сигналів низькочастотний ГЗ-120.

4. Визначте залежність довжини світного штриха на екрані осцилографа від напруги (тут і в пп. 5, 6 використовується схема рис. 9.4.). Для цього подайте на вхід Y осцилографа ряд значень напруги (не менше, ніж по 5 значень на X та на Y). При вимкненому генераторові розгортки на екрані з'явиться вертикальна лінія (світний штрих). Виміряйте довжину штриха. Вимірювання проведіть, не змінюючи довільного положення регулятора чутливості. Побудуйте графік залежності довжини штриха від напруги та визначте чутливість трубки по X та по Y за формулою (9.1).

5. Проведіть дослідження фігур Ліссажу. Для цього підключіть до пластини Y напругу з величиною в 12 В, $\nu=50\text{Гц}$, а до пластини X – напругу з виходу звукового генератора ГЗ-120 (ознайомтесь з технічною інструкцією цього генератора сигналів). Спочатку встановіть на звуковому генераторі нуль шкали. Поступово підвищуючи частоту, одержіть на екрані осцилографа стійкі фігури. Замалюйте ці фігури і запишіть співвідношення частот, при яких вони одержані. Порівняйте отримані співвідношення з наведеними на рис.9.3.

6. Зберіть фазообертальну схему (рис. 9.5) і з'єднайте відповідні провідники з пластинами X і Y осцилографа. Одержіть 4 еліпса для різних співвідношень фаз, змінюючи опір R на реостаті та ємність C конденсатора. Обчисліть зсуви фаз, при яких ви одержали досліджувані еліпси, за формулою:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{U_C}{U_R} = \frac{IR_C}{IR} = \frac{R_C}{R} = \frac{1}{\omega RC}. \quad (9.2)$$

Порівняйте обраховані дані з експериментально одержаними і зробіть висновки про їх узгодження.

7. Дослідіть як змінюється вид фігур на екрані осцилографа при різних співвідношеннях амплітуд, фаз та частот.

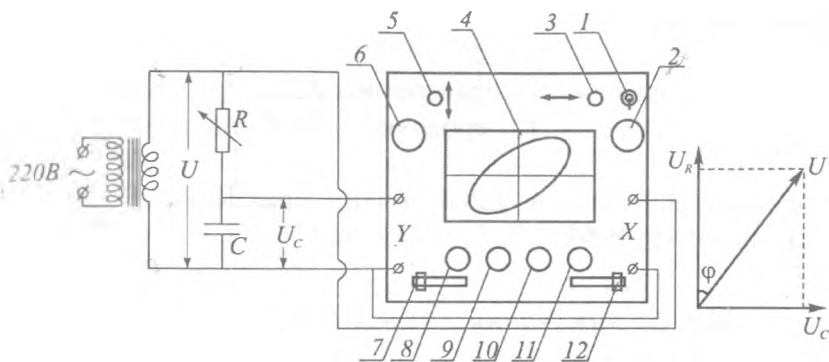


Рис. 9.5. Фазообертальна схема (позначення 1–12 ті ж самі, що і на рис. 9.4).

8. Користуючись зразками додатку 2 (рис. 9.7 і рис. 9.8), на яких, для прикладу, показана побудова фігур при рівності амплітуд та частот синусоїдальних напруг, що подаються на пластинки, при зсувах фаз цих напруг ($\varphi=0^\circ$ і $\varphi=45^\circ$), побудуйте на міліметровому папері фігуру, яка має одержатись при додаванні синусоїдальних напруг одної частоти і амплітуди при зсуві фаз $\varphi=90^\circ$.

Контрольні запитання

1. Яка будова і принцип дії електронно-променевої трубки?
2. Назвіть основні блоки осцилографа та сформулюйте їх призначення.
3. Поясніть принцип роботи генератора розгортки.
4. Що треба подати на X та на Y, щоб одержати синусоїду, горизонтальну, вертикальну та нахилену пряму?
5. Як одержати на екрані осцилографа фігури Ліссажу?
6. Як за фігурами Ліссажу визначити відношення частот?
7. Що буде спостерігатись на екрані осцилографа, якщо на X подавати напругу від постійного джерела струму?

Література

1. Загальна фізика: Лабораторний практикум.: Навч. посібник / за заг. ред. І. Т. Горбачука. – К.: Вища школа, 1992. – 509 с.
2. Борбат О. М. та ін. Електричний практикум, К.: Вид-во Київ. ун-ту, 1964. – С. 211–213, 69–78.

Додаток 1. Влаштування електронного осцилографа

Умовно осцилографи можна поділити на такі групи:

- 1) лабораторні універсальні з чутливістю до сотень міліметрів на вольт (мм/В);
- 2) прості осцилографи з чутливістю від 10 до 100 мм/В ;
- 3) осцилографи для спостереження повільних процесів, в яких використовуються електронно-променеві трубки з великою тривалістю післясвітіння екрана;
- 4) імпульсні осцилографи для спостереження короткочасних процесів, схему одного з яких зображено на рис. 9.6.

Осцилографи застосовуються в багатьох галузях науки і техніки, зокрема в електро- та радіотехніці, механіці, акустиці, медицині, біології і т.п. Осцилограф дає змогу спостерігати процеси тривалістю $10^{-7} - 10^{-8}$ с.

Вимірювальним елементом електронного осцилографа є електронно-променева трубка, всередині якої утворюється електронний пучок, що падає на екран трубки. Розрізняють два типи трубок: з електростатичним фокусуванням електронного пучка і з магнітним фокусуванням.

Електронно-променева трубка складається з електронної пушки, відхиляючих пластин та флуоресцентного екрана. Спрощену схему електронно-променевої трубки було зображено на рис. 9.1. На ньому наведено і найпростішу схему керування електронним пучком.

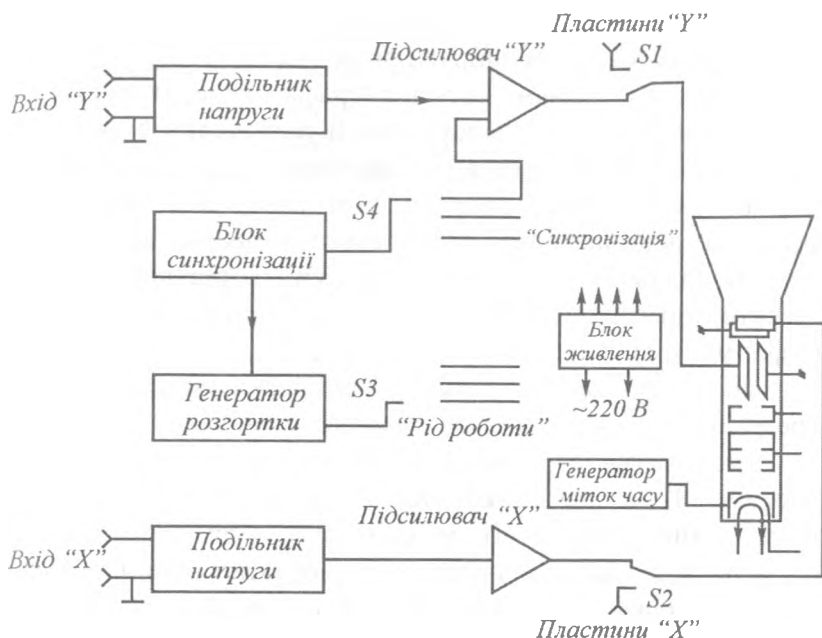


Рис. 9.6. Блок-схема осцилографа (до електронно-променевої трубки під'єднані генератор розгортки, блок синхронізації, два підсилювачі, блок живлення, генератор міток часу для калібрування масштабу часу).

Для регулювання напрямку руху пучка електронів в електронно-променевої трубці служить система пар відхиляючих пластин X та Y . Зміщення пучка здійснюється подачею напруги на вертикально та горизонтально відхиляючі пластини. Величина зміщення залежить як від значення напруги, прикладеної до пластини, так і від швидкості руху електронів.

Наприклад, якщо одна з напруг змінюється з часом і представляє величину x , а друга напруга – y , то на екрані осцилографа світна точка описуватиме деяку функціональну залежність $f(x, y)$ в прямокутній системі координат. Так, для одержання світної нерухомої точки на екрані треба просто ввімкнути осцилограф, не подаючи відхиляючих напруг на

пластини, а для фігур Ліссажу треба до обох пар пластин підвести синусоїдальні напруги різної частоти.

Важливим елементом осцилографа є генератор розгортки. Його призначення – забезпечити рівномірну часову розгортку електронного пучка на екрані електронно-променевої трубки. Як правило, напруга розгортки, яка використовується в осцилографах, змінюється з часом за лінійним законом (в окремих випадках за синусоїдальним). Тому генератор розгортки забезпечує змінну напругу пилкоподібної форми (рис. 9.2).

Період розгортки можна плавно регулювати ручкою на передній панелі осцилографа «Частота плавно».

Досліджуваний сигнал подається на вертикальні пластини Y , а на горизонтальні пластини X подається пилкоподібна напруга. Якщо частота досліджуваної напруги дорівнює f , а частота напруги розгортки f_0 , то на екрані дістанемо певну криву досліджуваного сигналу. Зображення досліджуваного сигналу на екрані буде нерухомим тоді, коли частоти досліджуваного сигналу і пилкоподібної напруги кратні одна одній. Якщо ця умова не виконується, зображення на екрані буде рухатись.

Для узгодження частоти досліджуваного сигналу з частотою генератора розгортки застосовується синхронізація частоти генератора розгортки, яка здійснюється зміною частоти стабільного джерела напруги. Синхронізація може здійснюватися також безпосередньо від електричної мережі частотою зовнішнього джерела та частотою внутрішнього джерела напруги (для цього кожен осцилограф має перемикач «Синхронізація»).

Живлення осцилографа здійснюється від спеціального блоку (рис. 9.6), до складу якого входить ряд пристроїв, що забезпечують нормальну роботу всіх систем.

Додаток 2. Методика побудови фігур Ліссажу на міліметровому папері

На прикладі прямої (рис. 9.7) та еліпса (рис. 9.8) покажемо загальну методику зображення фігур Ліссажу.

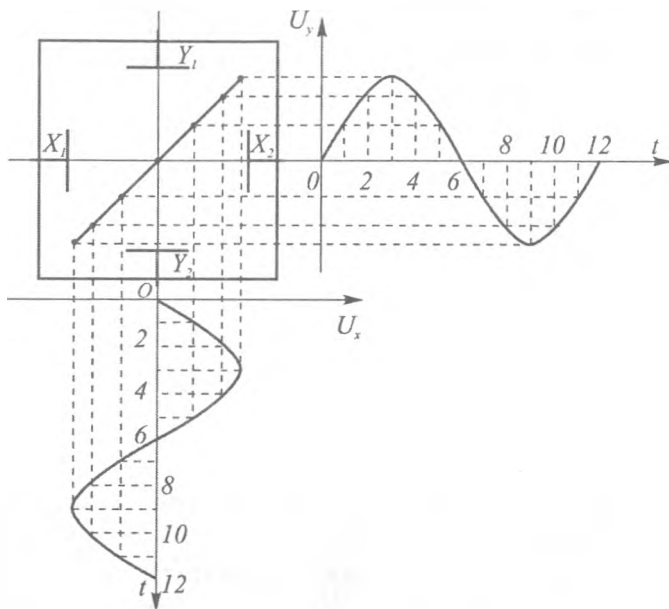


Рис. 9.7.

У випадку, коли на відхиляючі пластини Y подано напругу з зсувом фаз $\varphi=0^\circ$ відносно напруги, поданої на відхиляючі пластини X , маємо на екрані осцилографа пряму (рис. 9.7). Щоб побудувати цю пряму на міліметровому папері для одних і тих же значень t , проведіть пунктирні лінії через значення $U_x(t)$ і $U_y(t)$ паралельно осям Ot . Перетин цих пунктирів дасть точки на прямій лінії.

Аналогічним чином можна отримати еліпс при зсуві фаз синусоїдальних напруг $\varphi=45^\circ$ (див. рис. 9.8).

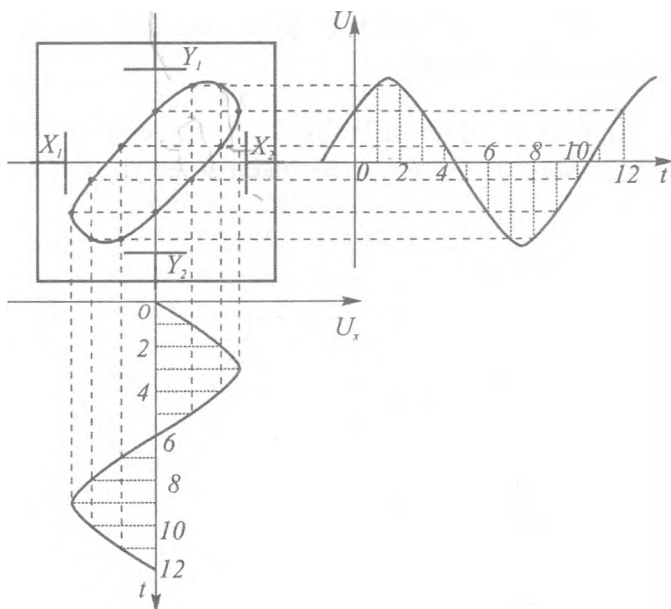


Рис. 9.8.

Такий же принцип побудови можна застосувати для випадків складних за формою фігур Ліссажу, коли на керуючі пластини Y та X подаються напруги не лише зсунуті по фазі одна відносно одної, але ще й з різними амплітудами та періодами коливань.

10. Експериментальне визначення коефіцієнта самоіндукції та ємності. Перевірка закону Ома для змінного струму

Мета роботи: ознайомитись з основними властивостями та характеристиками змінних струмів; експериментально визначити коефіцієнт самоіндукції та омичний опір котушки індуктивності, ємність конденсатора та перевірити застосування закону Ома до кола змінного струму, яке складається з послідовно з'єднаних омичного опору, ємності, індуктивності.

Прилади і матеріали: міліамперметр для змінного струму, мультиметр (вольтметр змінного та постійного струму), реостат, ключ, конденсатори (1–4 мФ), котушка самоіндукції з залізним зйомним осердям.

Теоретичні відомості

Змінним струмом називається струм, величина якого в даному перерізі провідника змінюється з часом.

Вивчення властивостей змінних струмів показує, що вони описуються більш складними законами у порівнянні із законами постійних струмів. На відміну від постійного струму, сила змінного струму може бути не однаковою не тільки в перерізах різних провідників, які складають розгалужене коло, але й в різних перерізах одного провідника, що пояснюється скінченням значенням швидкості поширення електромагнітного поля.

Серед змінних струмів можна виділити квазістаціонарний струм.

Квазістаціонарний струм — це такий змінний струм, при проходженні якого по провіднику (чи системі провідників) сила струму і розподіл електричних зарядів в провіднику мало змінюються за час Δt , протягом якого електромагнітні збудження проходять відстані між най-

більш віддаленими частинами провідника (чи системи провідників).

Таким чином, якщо період коливань сили змінного струму в даному перерізі провідника позначити через T , то умова квазістаціонарності струму матиме вигляд нерівності: $T \geq \Delta t$.

Умові квазістаціонарності струму можна надати іншого вигляду, а саме: $\ell \leq \lambda$, де ℓ – максимальні лінійні розміри системи провідників, а λ – довжина електромагнітної хвилі. Ця умова показує, що для заданого електричного кола одні змінні струми можуть бути квазістаціонарними, інші – неквазістаціонарними. Для заданого електричного кола умову квазістаціонарності точніше задовольнятимуть ті змінні струми, частоти яких менші.

З квазістаціонарних струмів на практиці найбільш важливими є струми, сила I яких з часом t змінюється за гармонічним законом:

$$I = I_0 \sin(\omega t + \delta) \quad \text{або} \quad I = I_0 \cos(\omega t + \delta), \quad (10.1)$$

де I_0 – амплітуда, або максимальне значення сили змінного струму; $(\omega t + \delta)$ – фаза коливань; $\omega = 2\pi\nu$ – циклічна частота; $\nu = 1/T$, T – період коливань; δ – початкова фаза.

У кожний момент часу для квазістаціонарних струмів виконуються закони Кірхгофа, виходячи з яких можна одержати і загальний аналітичний вираз закону Ома для замкненого електричного кола, в якому діє змінна ЕРС: $E = E_0 \sin \omega t$.

На відміну від постійного струму, сила якого в замкненому колі визначається величинами ЕРС та омичного опору, в колі змінного струму величина сили струму залежить ще від індуктивності L та ємності C , які ввімкнені в коло.

Якщо в деякому замкнутому контурі проходить не постійний струм, то магнітне поле, створюване цим струмом, також не є постійним. Відповідно, змінюється потік магнітної індукції крізь площу, обмежену контуром самого цього струму. Зміна потоку магнітної індукції призведе до виникнення в контурі ЕРС. Це явище називається *явищем самоіндукції*.

Ємність конденсатора – це величина, що характеризується відношенням заряду на одній з пластин (додатній) до різниці потенціалів між пластинами.

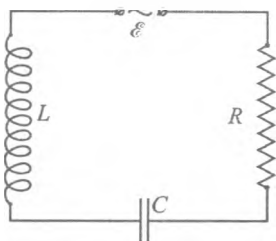


Рис.10.1. Коло змінного струму.

Наявність в колі змінного струму ємності C та індуктивності L призводить до того, що між ЕРС і силою струму існує зсув по фазі, а опір кола визначається не тільки омичним опором, а й величинами ємності C , індуктивності L та циклічної частоти ω .

Омичний опір R у колі змінного струму називається *активним* (на ньому виділяється ленц-джоулеве тепло), а опір, величина якого залежить від індуктивності та ємності, – *реактивним*.

При заданій змінній ЕРС характер зв'язку між силою струму і характеристиками окремих елементів електричного кола залежить від його складності. Порівняно легко відшукати залежність між силою струму і характеристиками кола з послідовно з'єднаними омичним опором R , індуктивністю L і ємністю C (рис. 10.1).

Припустимо, що в колі діє ЕРС $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t$, і сила струму змінюється з часом $I = I(t)$. Тоді за умови послідовного з'єднання складових елементів кола, згідно з другим законом Кірхгофа має місце рівність:

$$IR + (V_1 - V_2) = E + E_i = E_0 \sin \omega t - L \frac{dI}{dt}. \quad (10.2)$$

Якщо врахувати зв'язок між зарядом Q на обкладинках конденсатора, ємністю C і різницею потенціалів $(V_1 - V_2)$ і взяти до уваги, що $I = dQ/dt$, то диференціюючи (10.2), легко дістати рівняння:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} I = E_0 \omega \cos \omega t \quad (10.3)$$

Згідно із загальною теорією розв'язок рівняння відшукують у вигляді періодичної функції часу

$$I(t) = I_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (10.4)$$

Підставивши значення $I(t)$ з (10.4) в (10.3) та виконавши необхідні перетворення для визначення двох сталих інтегрування (I_0 і δ), дістанемо систему алгебраїчних рівнянь

$$\begin{aligned} R \sin \delta - \left(L\omega - \frac{1}{\omega C} \right) \cos \delta &= 0, \\ R \cos \delta + \left(L\omega - \frac{1}{\omega C} \right) \sin \delta &= \frac{E_0}{I_0}, \end{aligned} \quad (10.5)$$

з яких знаходимо

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{R}, \quad (10.6)$$

$$I_0 = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} \quad (10.7)$$

Повним опором при цьому є:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}. \quad (10.8)$$

Вираз (10.7) має назву *закону Ома для змінного струму*.

За умови $E = E_0 \sin \omega t$ із загального аналізу співвідношень (10.7) та (10.4) можна зробити такі висновки.

1. У колі змінного струму для фіксованих значень моменту часу t та переріза провідника S між ЕРС і силою струму існує, у загальному випадку, зсув фаз. Величина зсуву фаз δ залежить від наявності відповідних елементів в колі та співвідношення між їх числовими значеннями. За відсутності в колі змінного струму омичного опору ($R=0$) зсув фаз δ між ЕРС і силою струму дорівнює $-\pi$. Якщо в колі змінного струму є омичний опір ($R \neq 0$), а реактивний опір відсутній, то зсув фаз буде рівним $\delta=0$, тобто зміна величини і знаку ЕРС відбувається одночасно зі зміною сили струму. За наявності в колі змінного струму тільки індуктивності ($L \neq 0$), струм відстає по фазі від ЕРС на $\pi/2$ ($\delta=\pi/2$); якщо ж в колі є лише ємність ($C \neq \infty$), то струм випереджає ЕРС по фазі на $\pi/2$ ($\delta=-\pi/2$).

2. Амплітуда сили струму I_0 визначається на основі формули закону Ома для змінного струму (10.7). У формули (10.1), (10.4), (10.7), (10.8) входять I_0 та \mathcal{E}_0 – максимальні значення сили струму та напруги. Проте більшість електровимірювальних приладів проградуїрована в ефективних значеннях струму $I_{\text{еф}}$ та напруги $\mathcal{E}_{\text{еф}}$. Значення $I_{\text{еф}}$ та $\mathcal{E}_{\text{еф}}$ пов'язані з максимальними значеннями I_0 , \mathcal{E}_0 через формули:

$$I_0 = I_{\text{еф}} \sqrt{2} \quad \text{та} \quad \mathcal{E}_0 = \mathcal{E}_{\text{еф}} \sqrt{2}.$$

Ефективним значенням сили змінного струму називається сила такого постійного струму, який в даному колі створює такий же тепловий ефект, що і діючий змінний струм.

Підставляючи I_0 та \mathcal{E}_0 до формул, що визначають струм у колах з різним опором, одержимо

$$I_{\text{еф}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{еф}}}{R}, \quad (10.9)$$

$$I_{\text{еф}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{еф}}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{еф}}}{Z_1}, \quad (10.10)$$

$$I_{\text{еф}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{еф}}}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{еф}}}{Z_2}, \quad (10.11)$$

$$I_{\text{еф}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{еф}}}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{еф}}}{Z}. \quad (10.12)$$

У всіх цих формулах під R слід розуміти суму усіх активних опорів ланцюга, на кінцях якого вимірюється ЕРС.

Досить зручним і наочним способом зображення величин, які змінюються за гармонічним законом, є *метод векторних діаграм*. В методі векторних діаграм всі напруги розглядаються не як числа, а як вектори. На рис. 10.2 зображено векторну діаграму для ділянки кола змінного струму, що складається із омичного, індуктивного та ємнісного опорів. Вздовж горизонтальної осі відкладено в умовних одиницях амплітуду сили струму I_m і амплітуду значення напруги на резисторі $U_m = IR$ (бо зсуву фаз між ними немає).

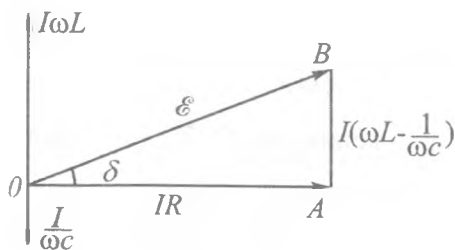


Рис. 10.2. Векторна діаграма для змінного струму.

Амплітудні значення напруг на котушці індуктивності $U_L = I\omega L$ і на конденсаторі $U_C = I/(\omega C)$ відкладено на вертикальній осі. Їх протилежна направленість вказує на те, що напруги на індуктивності і ємності перебивають у проти́фазах.

Амплітуду коливань струму можна знайти із прямокутного трикутника OAB по теоремі Піфагора:

$$(RI_0)^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 = E_0^2.$$

Із цього ж трикутника легко знайти тангенс кута зсуву фаз. У результаті одержуються попередні формули (10.6), (10.7).

Порядок виконання роботи

1. Визначення коефіцієнта самоіндукції L та омичного опору R котушки індуктивності

З формули (10.10) випливає, що коефіцієнт самоіндукції

$$L = \frac{\sqrt{Z_1^2 - R^2}}{\omega}, \quad (10.13)$$

де R – активний (омичний) опір

$$R = \frac{\mathcal{E}_{\text{пост}}}{I_{\text{пост}}}, \quad (10.14)$$

Z_1 – опір кола з індуктивністю і омичним опором

$$Z_1 = \frac{\mathcal{E}_{\text{еф}}}{I_{\text{еф}}} \quad (10.15)$$

та ω – колова частота.

Очевидно, що визначивши величини R , Z_1 , ω , знайдемо L .

- Зберіть схему, зображену на рис. 10.3, де A і V – амперметр і вольтметр, призначені для вимірювання як постійного, так і змінного струму.

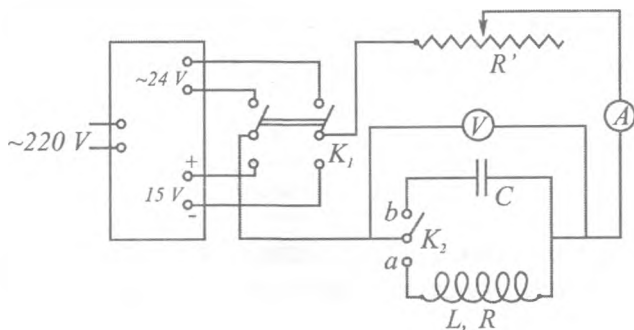


Рис. 10.3. Схема установки для визначення коефіцієнта самоіндукції L та омичного опору R котушки індуктивності і вимірювання ємності конденсатора.

- Після перевірки схеми викладачем або лаборантом ключ K_2 поставте у положення a та увімкніть джерело живлення (~ 220 В).
- Для вимірювання активного опору R котушки індуктивності L встановіть повзунок реостата R' на максимальний опір і замкніть ключ K_1 на джерело постійного струму (15 В).
- Повільно пересуваючи повзунок реостата R' , встановіть його в таке положення, щоб стрілка амперметра A дала достатнє для відліку відхилення.
- Запишіть покази вольтметра V та амперметра A . (При вимірюваннях джерело електрорушійної сили слід вмикати).

ти в коло на малі проміжки часу, щоб уникнути помітного нагрівання котушки індуктивності).

6. Такі ж виміри проведіть при інших показах амперметра, зменшуючи R' .
7. Обчисліть омичний опір R котушки індуктивності за формулою (10.14), використовуючи виміри пунктів 5, 6.
8. Встановіть максимальне значення опору на реостаті R' і за допомогою перемикача K_1 увімкніть в коло джерело змінної ЕРС ($\sim 24\text{ В}$, з частотою $\omega = 2\pi\nu = 314\text{ сек}^{-1}$ при $\nu = 50\text{ Гц}$). Зменшуючи величину опору на реостаті R' одержіть відхилення стрілок вольтметра V та амперметра A в різних ділянки шкали. Запишіть значення \mathcal{E}_{ef} та I_{ef} .
9. Використовуючи співвідношення (10.13–10.14), обчисліть коефіцієнт самоіндукції L котушки індуктивності.
10. Такі ж виміри і розрахунки коефіцієнта самоіндукції проведіть для котушки з сердечником $L_{\text{серд}}$. Розрахуйте магнітну проникність котушки з сердечником за формулою: $\mu_{\text{серд}} = \frac{L_{\text{серд}}}{L}$.
11. Перевірте значення індуктивності котушки за допомогою приладу «Е7-13».
12. Проведіть аналіз похибок у визначенні R , L , та $L_{\text{серд}}$.

2. Вимірювання ємності конденсатора

З формули (10.11) випливає, що

$$C = \frac{1}{\omega \sqrt{Z_2^2 - R^2}},$$

де Z_2 та R – сумарний та чисто активний опір ланцюга. У випадку, коли напруга \mathcal{E}_{ef} вимірюється безпосередньо на обкладинках конденсатора, ця формула спрощується, бо активний опір у ланцюгу відсутній ($R = 0$). Тоді маємо:

$$C = \frac{1}{\omega Z_2} = \frac{I_{\text{еф}}}{2\pi\nu \mathcal{E}_{\text{еф}}} \quad (10.16)$$

1. У схемі (рис. 10.3) встановіть перемикач K_2 у положення b .

2. При максимальному значенні опору на реостаті R' за допомогою перемикача K_1 увімкніть в коло джерело змінної ЕРС ($\sim 24\text{В}$, з частотою $\omega = 2\pi\nu = 314\text{сек}^{-1}$ при $\nu = 50\text{Гц}$). Зменшуючи значення опору R' , одержіть декілька відхилень стрілок амперметра та вольтметра.

3. Запишіть значення показів вольтметра $\mathcal{E}_{\text{еф}}$ та амперметра $I_{\text{еф}}$. Користуючись співвідношенням (10.16), обчисліть ємність конденсатора C .

4. Такі ж виміри проведіть ще для 2–3 різних конденсаторів.

5. Виконайте експериментальне визначення ємності для паралельного ($C_{\text{заг}} = C_1 + C_2 + \dots + C_N$) та послідовного підключення конденсаторів ($1/C_{\text{заг}} = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots + 1/C_N$).

6. Перевірте значення ємностей конденсаторів та їх паралельного і послідовного з'єднання за допомогою приладу «Е7-13».

7. Проаналізуйте похибки вимірювання ємності.

3. Перевірка закону Ома для змінного струму

З формули (10.12) для повного опору послідовно підключених активного, індуктивного та ємнісного опорів слідує:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \frac{E_{\text{еф}}}{I_{\text{еф}}} \quad (10.17)$$

1. Для перевірки цієї формули зберіть схему (рис. 10.4), в якій котушку індуктивності з відомим активним опором R та коефіцієнтом самоіндукції L послідовно з'єднайте з

конденсатором відомої ємності C . Паралельно до цієї частини ланцюга підключіть вольтметр V . Опір R' та амперметр A розмістіть згідно з рис. 10.4.

2. При максимальному значенні опору на реостаті R' за допомогою перемикача K_1 увімкніть в коло джерело змінної ЕРС ($\sim 24B$). Поступово зменшуючи опір реостата R' , одержіть помітні відхилення стрілок амперметра та вольтметра. Запишіть покази вольтметра $\mathcal{E}_{\text{еф}}$ та амперметра $I_{\text{еф}}$.

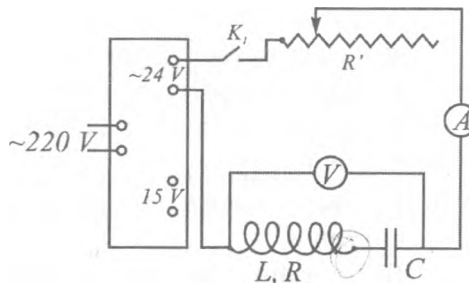


Рис. 10.4. Електрична схема для перевірки закону Ома для змінного струму.

3. Застосовуючи закон Ома для змінного струму обчисліть повний опір послідовного з'єднання R , L та C за показами вольтметра та амперметра:

$$Z = \frac{\mathcal{E}_{\text{еф}}}{I_{\text{еф}}}$$

4. Обчисліть повний опір Z цього ж з'єднання з відомими значеннями R , L та C з попередніх вимірювань за формулою:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

(ω покласти рівним 314 сек^{-1}).

5. Порівняйте значення Z , одержані в пунктах 3, 4, та зробіть висновки щодо застосовності формули закону Ома до кола змінного струму з послідовно з'єднаних омичного опору, індуктивності та ємності.

6. Проведіть аналіз похибок вимірювання Z та запишіть остаточний результат для Z .

Контрольні запитання

1. Чи відповідає умові квазістаціонарності струм у контурі лабораторної задачі? (Розрахуйте довжину електромагнітної хвилі.)
2. Запишіть закон Ома для ділянки кола змінного струму, яка складається з послідовно з'єднаних активного опору R , індуктивності L та ємності C .
- 2 Чому рівний зсув фаз між напругою і струмом в колі змінного струму?
3. Від чого залежить ємність конденсатора та індуктивність котушки?
4. Як зв'язані ефективні значення сили струму I_{ef} і напруги U_{ef} з їх амплітудними значеннями I_0 і U_0 ?
5. Зобразіть електричну схему для визначення коефіцієнта самоіндукції L , омичного опору R котушки індуктивності.
6. Зобразіть електричну схему з допомогою якої ви перевіряли закон Ома для змінного струму.
7. Як зміниться результат вимірювання Z , якщо на рис. 10.4 амперметр розмістити між L та C ?

Література

1. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики, Т. 2. – К.: Техніка, 2001. – С. 361–374.
2. Савельєв Курс общей физики, Т. 2. – С. 338–346.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики, т.3, Электричество. – М.: Наука, 1977, С. 573–583.
4. Борбат О. М. та ін. Електричний практикум. – К.: Вид-во Київ. ун-ту, 1964. – С. 184–193.

11. Дослідження електричних загасаючих та вимушених коливань

Мета роботи: дослідити загасаючі та вимушені коливання в коливному контурі. Для цього виконати два завдання:

1) при вивченні загасаючих коливань визначити логарифмічний декремент загасання та добротність досліджуваного контуру;

2) при вивченні вимушених коливань визначити залежність амплітуди струму в коливному контурі від частоти та залежність резонансної частоти від активного опору R , індуктивності L та ємності C .

Прилади та матеріали: коливний контур з різними опорами, резонансний контур із різними індуктивностями та опорами, осцилограф СІ-93 та інструкція до нього, низькочастотний генератор сигналів ГЗ-120 та інструкція до нього, з'єднуючі дроти.

Теоретична частина

Електромагнітні коливання в електричному контурі відіграють дуже важливу роль в техніці, зокрема, в техніці зв'язку.

Коливним контуром називається коло, яке складене із конденсатора C , котушки індуктивності L , та омичного опору R (рис. 11.1). При $R=0$ контур називається *ідеальним*.

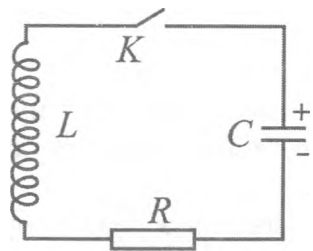


Рис. 11.1. Коливний контур.

Якщо зарядити конденсатор і включити ключ K , то в коливному контурі почнеться процес розрядки конденсатора через котушку індуктивності L та омичний опір R . При цьому струм I розряду буде зміню-

ватись з часом, що приведе до виникнення електрорушійної сили самоіндукції в котушці L $\left(\mathcal{E}_i = -L \frac{dI}{dt} \right)$ і, як наслідок, до

перезарядки конденсатора. Потім знову відбудеться розряд конденсатора і т. д. Таким чином, в контурі виникнуть гармонічні коливання заряду q , струму I і напруги U .

В цьому процесі енергія електричного поля конденсатора буде переходити у енергію магнітного поля котушки L .

Наростання струму I до деякого максимального значення I_{\max} відбувається за $1/4$ періоду. Протягом наступної чверті періоду відбувається поступове спадання струму (внаслідок виникнення струму самоіндукції), яке завершується перезарядкою конденсатора. Протягом наступного півперіоду процес відбувається у зворотному напрямку. Таким чином, в електричному контурі відбувається періодичне перетворення енергії електричного поля конденсатора

$W_{\text{ел}} = \frac{q^2}{2C}$ в енергію магнітного поля струму в котушці

$W_{\text{маг}} = \frac{LI^2}{2}$. Сумарна енергія

$$W = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} \quad (11.1)$$

в реальному контурі зменшується в зв'язку з тим, що існує активний опір R , на якому виділяється тепло, і амплітуда коливань буде зменшуватися.

Таким чином, електромагнітні коливання в реальному коливному контурі завжди є *загасаючими*.

Визначимо закон та основні характеристики загасаючого коливного процесу.

Згідно з другим законом Кірхгофа, в замкнутому контурі алгебраїчна сума падінь напруги дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС (електрорушійних сил), які діють у контурі:

$$IR + \frac{q}{C} = -L \frac{dI}{dt}, \quad (11.2)$$

де IR – падіння напруги на активному опорі;

$\frac{q}{C} = U$ – падіння напруги на конденсаторі;

$-L \frac{dI}{dt} = \mathcal{E}_i$ – ЕРС самоіндукції.

Враховуючи, що $I = \frac{dq}{dt}$ рівняння (11.2) запишемо у вигляді:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0. \quad (11.3)$$

Розв'язком цього рівняння є гармонічна функція:

$$q = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi), \quad (11.4)$$

де q_0 – це максимальний заряд на обкладинках конденсатора в початковий момент часу,

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \text{ – циклічна частота коливань,} \quad (11.4a)$$

$$\beta = \frac{R}{2L} \text{ – коефіцієнт затухання,} \quad (11.4б)$$

φ – константа, що залежить від початкових умов.

Формула (11.4) описує коливання величини заряду на пластинах конденсатора.

Аналогічно відбуваються коливання напруги на конденсаторі:

$$U = \frac{q}{C} = \frac{q_0}{C} e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi) = \quad (11.5)$$

$$= U_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi) = U_t \cos(\omega t + \varphi).$$

Величина

$$U_t = U_0 e^{-\beta t} \quad (11.6)$$

є амплітудою напруги даного гармонічного загасаючого коливання, яка експоненційно зменшується з часом. Такі коливання напруги на конденсаторі відбуваються з частотою, яку можна представити у вигляді:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}, \quad (11.7)$$

де ω_0 згідно з (11.4а) при $R=0$ рівне

$$\omega_0 = \sqrt{1/(LC)} \quad (11.8)$$

і є частотою власних коливань.

Як видно із (11.4а) та (11.7), при загасаючих коливаннях частота коливань ω менша за частоту ω_0 власних коливань.

Графіки незагасаючих та загасаючих коливань подані на рис. 11.2. Пунктирною лінією зображено зменшення амплітуди з часом. Згідно з (11.4а,б) та (11.6), чим більше β (тобто чим більше R), тим швидше відбувається загасання. Період цих загасаючих коливань виражається формулою

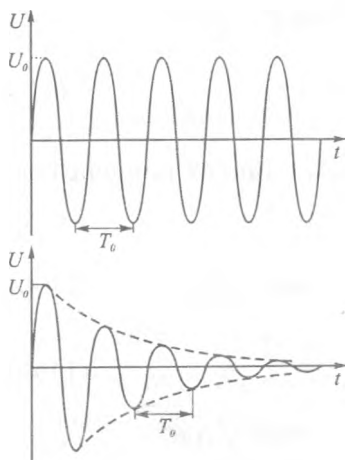


Рис. 11.2. Графіки незагасаючих та загасаючих коливань напруги в коливальному контурі.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} \quad (11.9)$$

Якщо омичний опір R досить малий, то в формулі (11.9) членом $\frac{R^2}{4L^2}$ можна знехтувати і одержати формулу

$$T_0 = 2\pi\sqrt{LC}, \quad (11.10)$$

що визначає період коливань в контурі без загасань.

Мірою загасання вважають величину відношення двох амплітуд коливань, виміряних через час, що дорівнює періоду коливань, і називають її *декрементом коливань*. Частіше ступінь загасання коливань оцінюють *логарифмічним декрементом загасань* Δ .

$$\Delta = \ln \frac{U_t}{U_{t+T}}, \quad (11.11)$$

де

$$U_t = U_0 e^{-\beta t}, \quad U_{t+T} = U_0 e^{-\beta(t+T)} \quad (11.12)$$

Підставивши (11.12) в (11.11), одержимо вираз для Δ :

$$\Delta = \ln \left(\frac{U_t}{U_{t+T}} \right) = \beta T = \frac{R}{2L} T. \quad (11.13)$$

З формули (11.13) видно, що, чим більшим є омичний опір R , тим більшим буде логарифмічний декремент загасання.

У радіотехніці коливні контури прийнято характеризувати не логарифмічним декрементом затухання, а добротністю. *Добротність* Q коливного контура можна підраху-

вати помноживши на 2π відношення енергії коливань до втрати енергії за період T .

$$Q = 2\pi \frac{\frac{LI_0^2}{2}}{RI_{\text{эф}}^2 T} = 2\pi \frac{\frac{LI_0^2}{2}}{R \frac{I_0^2}{2} T} = 2\pi \frac{L}{RT} = \frac{\pi}{\beta T} = \frac{\pi}{\Delta}. \quad (11.14)$$

Таким чином, добротність контура (поділена на π) являє собою величину, обернену логарифмічному декременту загасання

$$\frac{Q}{\pi} = \frac{1}{\Delta}. \quad (11.15)$$

Отже, знаючи коефіцієнт загасання $\beta = \frac{R}{2L}$ або логарифмічний декремент загасання Δ , можна визначити добротність Q коливного контура. Добротність коливних контурів може досягати значень $\sim 10^2$ та вище.

Якщо в електричний коливний контур (рис. 11.1) введено електрорушійну силу, що періодично змінюється з часом

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cos(\omega t), \quad (11.16)$$

то в системі будуть відбуватись вимушені електричні коливання, рівняння яких

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = \mathcal{E}_0 \cos(\omega t). \quad (11.17)$$

З часом загасаючі коливання зникнуть, і в системі залишаться лише незагасаючі вимушені коливання. Ампліту-

да коливань струму при цьому залежатиме від частоти зовнішньої ЕРС, і ця залежність виражається формулою

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}_0 \omega}{L \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \frac{R^2 \omega^2}{L^2}}}, \quad (11.18)$$

де E_0 – амплітуда зовнішньої ЕРС.

Із формули (11.18) видно, що при $\omega=0$, $I_0=0$, тобто струм в контурі відсутній (крізь конденсатор постійний струм не тече). При наближенні частоти ω до власної частоти контура $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ амплітуда струму різко зростає і досягає

максимального значення при частоті $\omega = \omega_{\text{рез}}$.

Явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань при наближенні частоти ω до частоти $\omega_{\text{рез}}$ має назву резонансу.

Резонансну частоту $\omega_{\text{рез}}$ можна знайти з умови мінімуму підкореневого виразу в (11.18). Продиференціювавши його за змінною ω і прирівнявши вираз до 0, отримаємо рівняння для знаходження резонансної частоти:

$$-4\omega_{\text{рез}}(\omega_0^2 - \omega_{\text{рез}}^2) + \frac{2R^2\omega_{\text{рез}}}{L^2} = 0,$$

звідки

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{1}{2} \frac{R^2}{L^2}}. \quad (11.19)$$

При малому активному опорі R $\omega_{\text{рез}} \approx \omega_0$.

Під час резонансу, тобто за умови $\omega = \omega_{\text{рез}}$, амплітуда струму, як зазначалось, стає максимальною і рівною

$$I_0 \approx \frac{\mathcal{E}_0}{R} \quad (11.20)$$

Криві, які відображають залежність амплітуди вимушених коливань сили струму I_0 від циклічної частоти зміни зовнішньої ЕРС, називають *резонансними*.

На рис. 11.3а наведена залежність амплітуди сили струму I_0 від частоти ω при трьох значеннях активного опору ($R_1 < R_2 < R_3$) та деяких сталих значеннях L та C .

Збільшення ємності C та індуктивності L призводить до зменшення резонансної частоти $\omega_{\text{рез}}$, що якісно зображено на рис. 11.3б та 11.3в.

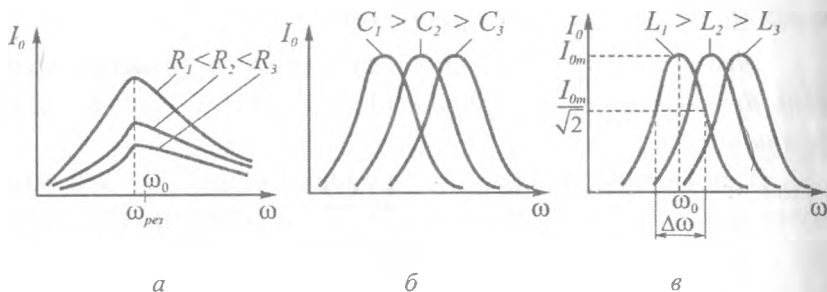


Рис. 11.3. Залежність амплітуди сили струму I_0 від частоти ω :
 а – при трьох значеннях активного опору ($C, L = \text{const}, R_1 < R_2 < R_3$);
 б – при трьох значеннях ємності ($R, L = \text{const}, C_1 < C_2 < C_3$);
 в – при трьох значеннях індуктивності ($R, C = \text{const}, L_1 < L_2 < L_3$).

Таке явище різкого зростання струму в контурі в електротехніці та радіотехніці отримало назву послідовного резонансу, або резонансу напруг, оскільки напруги U_C на конденсаторі та U_L на котушці індуктивності при цьому знаходяться у протифазі та компенсують одна одну, і повний опір ланцюга стає найменшим, а струм – найбільшим.

Крім значення амплітуди у максимумі I_{0m} другою важливою характеристикою резонансної кривої є її ширина, під якою розуміють різницю циклічних частот $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$, для яких енергія коливань у два рази менша від енергії для частоти, при якій амплітуда змінної величини досягає максимуму. Ширина резонансної кривої зв'язана з добротністю коливного контуру Q співвідношенням

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = \frac{\omega_0}{Q} \text{ або } Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} \quad (11.21)$$

Уся техніка радіоприймання ґрунтується на явищі резонансу. Щоб радіоприймач вибірково реагував на електромагнітні хвилі, які випромінюють радіостанції, треба досягти збігання частоти власних коливань коливного контуру радіоприймача з частотою електромагнітних хвиль, які випромінює дана радіостанція. Чутливість радіоприймача прямо пропорційна його добротності. На основі (11.21) можна зробити висновок, що чутливість радіоприймача і ширина резонансної кривої обернено пропорційні. Під шириною резонансної кривої $\Delta\omega$ треба розуміти смугу частот, які здатний приймати радіоприймач. При великій чутливості радіоприймач здатний приймати тільки досить вузьку смугу частот. Чим вищою є чутливість радіоприймача, тим менше перешкоджатимуть прийманню інші радіостанції, які працюють на близьких частотах.

Експериментальна частина

1. Виконання завдання 1

Опис приладу для вивчення загасаючих коливань

Для вивчення загасаючих коливань використовують схему, подану на рис. 11.4. На коливний контур, який скла-

дається з конденсатора C , індуктивності L та опору R , від генератора через роздільний конденсатор подаються періодичні П-подібні імпульси напруги. Кожен імпульс збуджує в коливному контурі загасаючі коливання. Ці коливання надходять одне за одним і на екрані осцилографа можна одержати стійку картину загасаючих коливань.

Додаючи в ланцюг коливного контуру різні активні опори, можна вивчити їх вплив на характер загасання коливань.

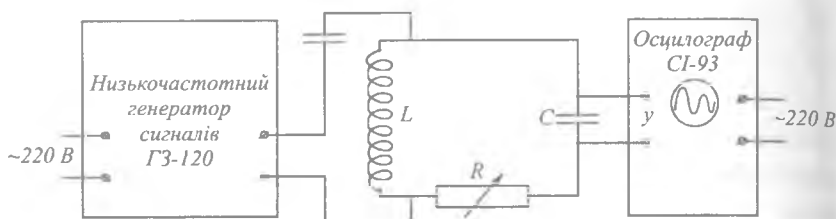


Рис. 11.4. Схема установки для вивчення загасаючих коливань.

Порядок виконання завдання 1

1. Зберіть схему відповідно до рис. 11.4.
2. Підключіть осцилограф (CI-93) та генератор (ГЗ-120) до мережі 220 В.
3. Добийтеся чіткого зображення світної лінії розгортки на екрані осцилографа.
4. Включіть низькочастотний генератор сигналів ГЗ-120 в режимі П-подібних імпульсів і подайте сигнал на вхід контура.
5. Подайте сигнал з коливного контура на вхід у осцилографа і добийтеся стійкого зображення коливань на екрані осцилографа.
6. Виміряйте (у відносних одиницях) два сусідні значення амплітуди для трьох значень омичного опору R ($R_1=15 \text{ кОм}$, $R_2=48 \text{ кОм}$, $R_3=104 \text{ кОм}$).

7. Використовуючи формули (11.13) та (11.14), розрахуйте логарифмічний декремент затухання Δ та добротність Q коливної системи для цих значень R_i ($i=1, 2, 3$).
8. Дані вимірювань та розрахунків занесіть до табл. 1.

Таблиця 1

№	$R, \text{ Ом}$	U_n	U_{n+1}	U_n/U_{n+1}	$\Delta = \ln(U_n/U_{n+1})$	Q

II. Виконання завдання 2

Опис установки для вивчення вимушених коливань

Дослідити залежність амплітуди струму від частоти, а також залежність резонансної частоти від індуктивності L та ємності C можна за допомогою установки наведеної на рис. 11.5. У коливному контурі, який складається з активного опору R , індуктивності L та ємності C , електрорушійна сила $E = E_0 \cos(\omega t)$ збуджується через індуктивний зв'язок за допомогою генератора синусоїдальних коливань. Змінюючи її частоту ω , можна дослідити залежність амплітуди струму I_0 в коливному контурі від частоти ω ($\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$). Значення сили струму можна оцінити за напругою U_0 на деякому невеликому активному опорі $R_0 \ll R$. Ця напруга, що пропорційна струму в коливному контурі, подається на осцилограф.

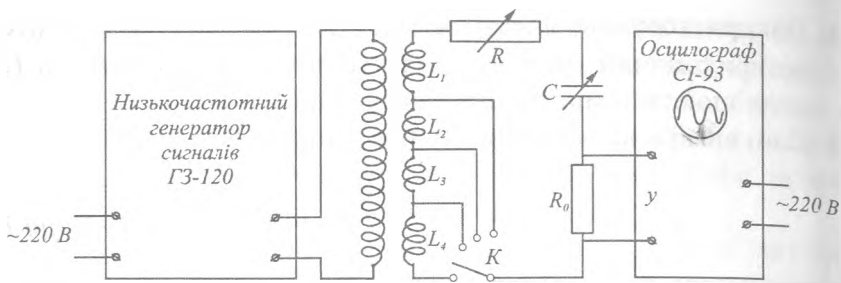


Рис. 11.5. Схема установки для вивчення вимушених коливань.

Порядок виконання завдання 2

1. Зберіть схему згідно з рис. 11.5.
2. Включіть в мережу осцилограф, генератор синусоїдальних коливань та частотомір. Добийтеся на екрані осцилографа зображення синусоїдального сигналу.
3. При деяких постійних значеннях L та C зніміть залежність амплітуди струму I_0 (напруги U_0 на R_0) від частоти ω напруги, яка подається від генератора ГЗ-120 (при двох значеннях активного опору R_1 та R_2):

$$I_0 = I_0(\omega)_{L,C}.$$

Примітка: при зміні частоти ω підтримуйте постійну амплітуду напруги, яка подається від генератора. Контроль частоти здійснюйте за лімбом частот низькочастотного генератора сигналів ГЗ-120, контроль амплітуди – за осцилографом CI-93.

4. При деяких постійних значеннях R та C зніміть залежність амплітуди струму I_0 від частоти ω напруги, яка подається від генератора (при 3-х значеннях індуктивності L_1, L_2, L_3).

$$I_0 = I_0(\omega)_{R,C}.$$

5. При деяких постійних значеннях L та R зніміть залежність амплітуди струму I_0 від частоти ω напруги, яка подається від генератора (при трьох значеннях ємності C_1, C_2, C_3).

$$I_0 = I_0(\omega)_{L,R}.$$

6. Дані, отримані відповідно до пунктів 3–5, занесіть до таблиць 2, 3 та 4.

Таблиця 2 ($R, L = \text{const}$)

$C_1, \text{ нкФ}$	$\omega, 1/\text{с}$	
	$I, \text{ відн. од.}$	
$C_2, \text{ нкФ}$	$\omega, 1/\text{с}$	
	$I, \text{ відн. од.}$	
$C_3, \text{ нкФ}$	$\omega, 1/\text{с}$	
	$I, \text{ відн. од.}$	

Таблиця 3 ($R, C = \text{const}$)

$L_1, \text{ мГн}$	$\omega, 1/\text{с}$	
	$I, \text{ відн. од.}$	
$L_2, \text{ мГн}$	$\omega, 1/\text{с}$	
	$I, \text{ відн. од.}$	
$L_3, \text{ мГн}$	$\omega, 1/\text{с}$	
	$I, \text{ відн. од.}$	

Таблиця 4 ($L, C = \text{const}$)

$R_1, \text{ Ом}$	$\omega, 1/\text{с}$	
	$I, \text{ відн. од.}$	
$R_2, \text{ Ом}$	$\omega, 1/\text{с}$	
	$I, \text{ відн. од.}$	
$R_3, \text{ Ом}$	$\omega, 1/\text{с}$	
	$I, \text{ відн. од.}$	

7. Побудуйте графіки залежностей:

$$I_0 = I_0(\omega)_{L,C}, \quad I_0 = I_0(\omega)_{R,C}, \quad I_0 = I_0(\omega)_{L,R}$$

8. По даним однієї з резонансних кривих оцініть добротність контуру Q за формулою (11.21), взявши $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ при значенні $I_0 = I_{0m}/\sqrt{2}$ (як на рис. 11.3).

Контрольні запитання

1. Запишіть вираз для періода незатухаючих коливань в контурі за умови $R = 0$ (формула Томсона).
2. Як змінюється різниця потенціалів з часом на обкладках конденсатора, якщо опір в контурі не дорівнює нулеві (час відраховувати від моменту, що відповідає найбільшій різниці потенціалів на обкладках конденсатора)?
3. Запишіть диференціальне рівняння для затухаючих коливань та його розв'язок.
4. Що таке логарифмічний декремент затухання та добротність коливного контура?
5. Запишіть диференціальне рівняння для вимушених коливань та його розв'язок.
6. В чому полягає явище резонансу?
7. Чи залежить резонансна частота $\omega_{\text{рез}}$ від значення активного опору R ?
8. Як залежить максимальне значення амплітуди струму I_0 від активного опору R ?
9. Які криві називаються резонансними?
10. Зобразіть електричну схему установки для вивчення загасаючих коливань.
11. Зобразіть електричну схему установки для вивчення вимушених коливань.

Література

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики, т. 3, Электричество. — М.: Наука, 1977. — С. 544–568.
2. Загальна фізика. Лабораторний практикум. Під ред. І. Т. Горбачука. Київ, 1992. — С. 331–335.
3. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям по физике. Под ред. В. И. Ивероновой. — М., 1955.
4. І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук, П. П. Луцик, Загальний курс фізики, т. 2, Електрика. — Київ, 1999. — С. 386–397.

12. Визначення електрохімічного еквіваленту міді та обчислення елементарного заряду

Мета роботи: визначити електрохімічний еквівалент міді та обчислити величину елементарного заряду.

Прилади й матеріали: скляна посудина об'ємом 0,5л, наважка мідного купоросу, мідні електроди, амперметр зі шкалою до 2А, реостат, розрахований на струм, не менший за 1А, джерело змінного струму, ЛАТР, випрямляч, ключ, аналітичні мікроваги, секундомір.

Теоретичні відомості

Електролітами називають рідини, які проводять електричний струм. Такими рідинами є розчини та розплави. У розчинах під дією молекул розчинника сили взаємодії між молекулами розчиненої речовини слабшають, і молекула розпадається на складові йони (*дисоціює*). Наприклад, для мідного купоросу має місце реакція:



Таким чином, у розчині завжди існують від'ємні позитивні й негативні йони, які можуть *рекомбінувати*, тобто сполучатись у нейтральну молекулу. Внаслідок цих одночасних процесів рекомбінації та дисоціації встановлюється рівновага, і кількість дисоційованих молекул не змінюється з часом.

Під час пропускання струму крізь електроліт дисоціація різко зростає, утворюється велика кількість позитивних і негативних йонів, які рухаються до негативно зарядженого (катода) та позитивно зарядженого (анода) електродів відповідно. Ці йони беруть участь у окиснювально-відновлювальних реакціях, внаслідок чого утворюються нейтральні молекули.

Підчас електролізу розглянутого нами мідного купоросу, якщо взяти мідний анод та катод із провідника, що не реагує із мідним купоросом (наприклад, мідний чи вугільний), йони міді Cu^{2+} накопичуються на катоді та відновлюються до чистої міді: $\text{Cu}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Cu}$. Йони SO_4 взаємодіють із мідним анодом з утворенням сульфату міді. Таким чином, мідь з анода переходить у розчин, а з розчину осаджується на катоді, тобто фактично переходить з анода на катод, а кількість сульфату міді в розчині лишається незмінним.

Масу речовини, що виділяється під час електролізу при проходженні заряду в I кулон, називають *електрохімічним еквівалентом* k . Електрохімічний еквівалент k ми будемо визначати з першого закону електролізу, згідно з яким маса речовини, що виділяється підчас електролізу, пропорційна до заряду, що пройшов через електродит:

$$\Delta m = k \Delta q = k I \Delta t,$$

$$k = \frac{\Delta m}{I \Delta t}, \quad (12.1)$$

де m – маса речовини, що виділилась при електролізі, I – струм, при якому відбувався електроліз.

За другим законом електролізу, електрохімічний еквівалент k пропорційний до хімічного еквіваленту A/n , тобто

$$k = c \frac{A}{n}, \quad (12.2)$$

де A – атомна маса, c – коефіцієнт пропорційності, n – валентність.

Підставивши значення k із (12.2) в (12.1), маємо для маси виділеної на катоді речовини:

$$\Delta m = c \frac{A}{n} \Delta q. \quad (12.3)$$

Введемо поняття кілограм-еквіваленту речовини M та знайдемо заряд, необхідний для виділення 1 кг-екв речовини. Кілограм-еквівалентом M називають масу речовини, що рівна значенню A/n кг, тобто хімічному еквіваленту ($M=A/n$).

Якщо підставити $M=A/n$ замість Δm у (12.3), одержимо $\Delta q=1/c=F$, а з урахуванням формули (12.2) маємо

$$F = \frac{A}{nk}. \quad (12.4)$$

З цієї формули видно, що для виділення 1 кг-екв речовини потрібно пропустити сталий заряд F , який називають *числом Фарадея*. За законом Авогадро, у 1 кг-екв будь-якої речовини міститься стала кількість атомів $N_A=6,02 \cdot 10^{26}$. Цими N_A атомами й переноситься заряд F , коли під час електролізу виділяється 1 кг-екв речовини. Звідси елементарний заряд e (заряд одновалентного йона) дорівнює

$$e = \pm \frac{F}{N_A}. \quad (12.5)$$

Опис приладу

Установку для визначення еквіваленту міді представлено на рис. 12.1.

Власне електроліз відбувається в електролітичній ванні, яка являє собою скляну посудину (1) об'ємом 500 мл, наповнену розчином електроліту (2) (10% розчин мідного купоросу). Зверху на посудині лежить пластмасова пластина (5), в якій затиснуто електроди (3) і (4) так, щоб вони входили в розчин більш, ніж наполовину.

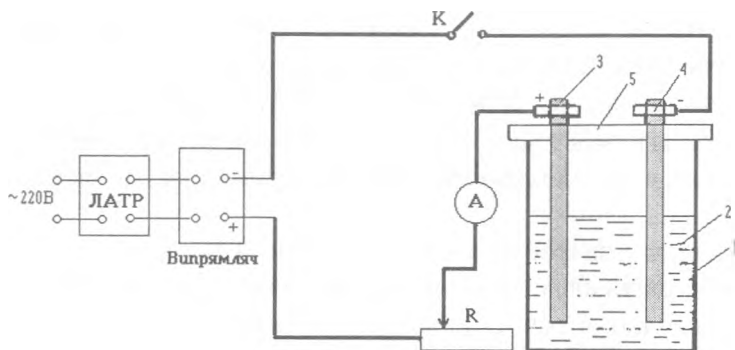


Рис. 12.1. Установка для проведения электролиза: 1 – стекляная посуда, 2 – розчин електроліту, 3 – мідний анод, 4 – мідний катод, 5 – пластина для утримання електродів, А – амперметр, R – реостат, К – ключ, ЛАТР – лабораторний автотрансформатор, з допомогою якого можна змінювати вихідну напругу від 0 до 240 В.

Порядок виконання роботи

1. Підготуйте розчин електроліту в електролітичній ванні: розчиніть 50 г мідного купоросу в 450 мл дистильованої води.
2. Закріпіть електроди в пластині та розташуйте їх паралельно один до одного.
3. Зберіть електричне коло за схемою (рис. 12.1). Встановіть на реостаті максимальний опір, а на ЛАТРі вихідну напругу $U = 0$.
4. Замкніть ключ К. Збільшуючи напругу на ЛАТРі та зменшуючи опір реостату, встановіть струм в колі $I = 0,5A$.
5. Зразу розімкніть ключ К.
6. Витягніть електроди та старанно їх зачистіть наждачним папером. З катодом треба бути особливо обережним: не можна торкатися тієї частини електрода, яка буде занурена у воду, так як на місці доторку лишаються жирові плями, на які буде погано осаджуватись метал.
7. Зважте катод. Запишіть початкову масу катода m_0 .
8. Повторіть пп. 2–4, але силу струму збільшіть до $I = 1A$.

9. Увімкніть секундомір. Через $t = 30 \div 60$ хвилин вимкніть струм і секундомір, витягніть електроди й висушіть їх.
10. Зважте катод. Маса катода після електролізу – m_1 . Визначте масу міді, яка виділилась на катоді $\Delta m = (m_1 - m_0)$.
11. Обчисліть електрохімічний еквівалент k за формулою (12.1).
12. Визначте за формулою (12.4) число Фарадея F .
13. Обчисліть елементарний заряд e за формулою (12.5).
14. Для більшої точності дослід повторіть декілька разів для катодів різної маси і обчисліть середні значення величин k , F , e .
15. Визначте товщину шару міді d , що відклалася на катоді, знаючи масу міді m і площу пластини катода S .
16. Визначте, яка кількість йонів N проходила щосекунди крізь розчин мідного купоросу, знаючи заряд йона $2e$ і струм у колі I .
17. Проаналізуйте похибки вимірювань. Представте результати в остаточному вигляді.

Контрольні запитання

1. Які процеси відбуваються в розчині і на електродах під час електролізу?
2. Сформулюйте закони електролізу.
3. Що називають електрохімічним еквівалентом?
4. Що є носієм струму в електролітах, яка різниця між ними та носіями струму в газах?
5. Який фізичний зміст числа Фарадея?

Література

1. І. Т. Горбачук. Загальна фізика. Лабораторний практикум. – К.: Вища школа, 1992. – С. 290–292.
2. Д. В. Сивухин. Общий курс физики. Т. 3. – Электричество. – М.: Наука, 1989. – С. 413–426.

Додаток

Позначення і назви деяких величин

<i>A</i> – ампер	<i>Гц</i> – герц	<i>См</i> – сіменс
<i>B</i> – вольт	<i>Дж</i> – джоуль	<i>Тл</i> – тесла
<i>Вб</i> – вебер	<i>кал</i> – калорія	<i>Ф</i> – фарада
<i>Гн</i> – генрі	<i>Кл</i> – кулон	<i>Е</i> – ерстед
<i>Гс</i> – гаус	<i>Мкс</i> – максвел	<i>еВ</i> – електрон-вольт

Приста́вки до назв одиниць фізичних величин

10^{18} – екса (Е)	10^3 – кіло (к)	10^{-6} – мікро (мк)
10^{15} – пета (П)	10^2 – гекто (г)	10^{-9} – нано (н)
10^{12} – тера (Т)	10^{-1} – деци (д)	10^{-12} – піко (п)
10^9 – гіга (Г)	10^{-2} – санти (с)	10^{-15} – фемто (ф)
10^6 – мега (М)	10^{-3} – мілі (м)	10^{-18} – атто (а)

Осно́вні фізичні константи

Назва величини	Символ	Числове значення
Швидкість світла у вакуумі	<i>c</i>	$2,998 \cdot 10^8$ м/с
Стандартне прискорення вільного падіння	<i>g</i>	$9,807$ м/с ²
Об'єм моля ідеального газу при нормальних умовах	<i>V</i> ₀	22,4 л/моль, $2,24 \cdot 10^{-2}$ м ³ /моль
Молярна газова стала	<i>R</i>	$8,314$ Дж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹
Нормальний атмосферний тиск	<i>p</i> ₀	$1,01 \cdot 10^5$ Па
Стала Авогадро	<i>N</i> _A	$6,022 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Маса спокою електрона	<i>m</i> _e	$0,911 \cdot 10^{-30}$ кг, 0,511 МеВ
Маса спокою протона	<i>m</i> _p	$1,672 \cdot 10^{-27}$ кг
Стала Больцмана	<i>k</i>	$1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж·К ⁻¹
Стала Планка	<i>h</i>	$6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с,
	$\hbar = \frac{h}{2\pi}$	$1,0546 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, $0,659 \cdot 10^{-15}$ еВ·с

Назва величини	Символ	Числові значення
Гравітаційна стала	G	$6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$
Стала закону зміщення Віна	b	$0,29 \text{ см} \cdot \text{К}$
Стала Рідберга	R	$2,07 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$
	$R' = \frac{R}{2\pi c}$	$1,097 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$
Стала Фарадея	F	$9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$
Питомий заряд електрона	e/m_e	$1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг},$ $5,27 \cdot 10^{17} \text{ CGSE/г}$
Питомий заряд протона	e/m_p	$0,959 \cdot 10^8 \text{ Кл/кг},$ $2,87 \cdot 10^{14} \text{ CGSE/г}$
Елементарний електричний заряд	e	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл},$ $4,803 \cdot 10^{-10} \text{ CGSE}$
Перший борівський радіус	r_1	$0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$
Енергія зв'язку електрона в атомі водню	E	$13,56 \text{ eV}$
Комптонівська довжина хвилі електрона	λ_c	$2,426 \cdot 10^{-12} \text{ м}$
	$\lambda_c = \frac{\lambda_c}{2\pi}$	$3,86 \cdot 10^{-13} \text{ м}$
Класичний радіус електрона	r_e	$2,82 \cdot 10^{-15} \text{ м}$
Магнетон Бора	μ_B	$9,274 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл},$ $9,274 \cdot 10^{-21} \text{ ерг/Гс}$
Ядерний магнетон	μ_N	$5,051 \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Тл},$ $5,051 \cdot 10^{-24} \text{ ерг/Гс}$
Магнітний момент протона	μ_p	$2,7928 \mu_N$
Магнітний момент нейтрона	μ_n	$-1,913 \mu_N$
Атомна одиниця маси	1 а.о.м.	$1,660 \cdot 10^{-27} \text{ кг},$ $913,5 \text{ MeV}$

Назва величини	Символ	Числові значення
Електрична стала вакууму	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м,}$ $1/4\pi\epsilon_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}$
Магнітна стала вакууму	μ_0	$1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м,}$ $\mu_0/4\pi = 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Стала Стефана-Больцмана	σ	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$

Одиниці величин в СІ та СГС

Величина	Одиниця виміру		$\frac{СІ}{СГС}$
	СІ	СГС	
Довжина	м	см	10^2
Час	с	с	1
Швидкість	м/с	см/с	10^2
Прискорення	м/с ²	см/с ²	10^2
Частота коливань	Гц	Гц	1
Кругова частота	с ⁻¹	с ⁻¹	1
Кутова швидкість	рад/с	рад/с	1
Кутове прискорення	рад/с ²	рад/с ²	1
Маса	кг	г	10^3
Густина	кг/м ³	г/см ³	10^{-3}
Сила	Н	дин	10^5
Тиск	Па	дин/см ²	10
Імпульс	кг·м/с	г·см/с	10^5
Момент сили	Н·м	дин·см	10^7
Енергія, робота	Дж	ерг	10^7
Потужність	Вт	ерг/с	10^7
Густина потоку енергії	Вт/м ²	ерг/(с·см ²)	10^3
Момент імпульсу	кг·м ² /с	г·см ² /с	10^7
Момент інерції	кг·м ²	г·см ²	10^7
В'язкість	Па·с	П	10

Величина	Одиниця виміру		$\frac{СИ}{СГС}$
	СИ	СГС	
Температура	К	К	1
Теплоємність, ентропія	Дж/К	ерг/К	10^7
Кількість електрики	Кл	СГСЕ-од.	$3 \cdot 10^9$
Потенціал	В	СГСЕ-од.	1/300
Напруженість електричного поля	В/м	СГСЕ-од.	$1/(3 \cdot 10^4)$
Електричне зміщення	Кл/м ²	СГСЕ-од	$12\pi \cdot 10^5$
Електричний момент диполя	Кл·м	СГСЕ-од	$3 \cdot 10^{11}$
Поляризованість	Кл/м ²	СГСЕ-од	$3 \cdot 10^5$
Ємність	Ф	см	$9 \cdot 10^{11}$
Сила струму	А	СГСЕ-од.	$3 \cdot 10^9$
Густина струму	А/м ²	СГСЕ-од.	$3 \cdot 10^5$
Опір	Ом	СГСЕ-од.	$1/(9 \cdot 10^{11})$
Питомий опір	Ом·м	СГСЕ-од.	$1/(9 \cdot 10^9)$
Провідність	См	СГСЕ-од.	$9 \cdot 10^{11}$
Магнітна індукція	Тл	Гс	10^4
Магнітний потік	Вб	Мкс	10^8
Напруженість магнітного поля	А/м	Е	$4\pi \cdot 10^{-3}$
Магнітний момент	А·м ²	СГСЕ-од.	10^3
Намагніченість	А/м	СГСЕ-од.	10^{-3}
Індуктивність	Гн	см	10^9
Сила світла	кд	кд	1
Світловий потік	лм	лм	1
Освітленість	лк		
Світимість	лм/м ²		
Яскравість	кд/м ²		

Примітка: електричні і магнітні одиниці в СГС тут наведені в системі Гаусса.

Діелектричні проникності

Діелектрик	ϵ	Діелектрик	ϵ
Вода	81	Поліетилен	2,3
Повітря	1,00058	Слюда	7,5
Віск	7,8	Спирт	26
Гас	2,0	Скло	6,0
Парафін	2,0	Фарфор	6,0
Плексиглас	3,5	Ебоніт	2,7

Магнітні сприйнятливості пара- і діамагнетиків

Парамагнетики	$(\mu-1), 10^{-6}$	Діамагнетики	$(\mu-1), 10^{-6}$
Азот	0,013	Водень	-0,063
Повітря	0,38	Бензол	-7,5
Кисень	1,9	Вода	-9,0
Ебоніт	14	Мідь	-10,3
Алюміній	23	Скло	-12,6
Вольфрам	176	Кам'яна сіль	-12,6
Платина	360	Кварц	-15,1
Рідкий кисень	3400	Вісмут	-176

Основні формули електродинаміки в системі СІ та в системі Гаусса

Назва	СІ	Система Гаусса
Напруженість поля точкового заряду	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}$	$E = \frac{q}{r^2}$
Напруженість поля плоского конденсатора	$E = \sigma / \epsilon\epsilon_0$	$4\pi\sigma / \epsilon$
Потенціал поля точкового заряду	$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r}$	$\varphi = \frac{q}{r}$
Зв'язок між E та φ	$E = -\nabla\varphi,$	$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E dr$
Електричний диполь p в полі E	$N = [pE],$	$W = -pE$
Зв'язок між P і E	$P = \chi\epsilon_0 E$	$P = \chi E$
Зв'язок між σ' , P і E	$\sigma' = P_n = \chi\epsilon_0 E_n$	$\sigma' = P_n = \chi\epsilon_n$
Визначення вектора D	$D = \epsilon_0 P + E$	$D = E + 4\pi P$
Зв'язок між ϵ і χ	$\epsilon = 1 + \chi$	$\epsilon = 1 + 4\pi\chi$
Зв'язок між D і E	$D = \epsilon\epsilon_0 E$	$D = \epsilon E$
Теорема Гаусса для вектора D	$\oint D dS = q$	$\oint D dS = 4\pi q$
Ємність конденсатора	$C = q/U$	
Ємність плоского конденсатора	$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$	$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d}$
Енергія системи зарядів	$W = \frac{1}{2} \sum q_i \varphi_i$	
Енергія конденсатора	$W = \frac{CU^2}{2}$	
Густина енергії електричного поля	$\omega = \frac{ED}{2}$	$\omega = \frac{ED}{8\pi}$

Назва	СИ	Система Гаусса
Закон Ома	$J = \sigma E$	
Закон Джозуї-Ленца	$\omega = \sigma E^2$	
Магнітний момент контуру зі струмом	$p_m = IS$	$p_m = IS/c$
Магнітний диполь p_m в полі B	$N = [p_m B], \quad W = -p_m B$	
Закон Біо-Савара	$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I[dl, r]}{r^3}$	$dB = \frac{1}{c} \cdot \frac{I[dl, r]}{r^3}$
Індукція поля: а) прямого струму б) в центрі витка в) соленоїда	$B = (\mu_0 / 4\pi) \cdot 2I / r$ $B = (\mu_0 / 4\pi) \cdot 2I\pi / r$ $B = \mu_0 nI$	$B = (1/c) \cdot 2I / r$ $B = (1/c) \cdot 2\pi I / r$ $B = (4\pi/c) \cdot nI$
Визначення вектора H	$H = B/\mu_0 - J$	$H = B - 4\pi J$
Циркуляція вектора H в постійному полі	$\oint H dr = I$	$\oint H dr = \frac{4\pi}{c} I$
Зв'язок між χ і H	$J = \chi H$	
Зв'язок між χ і μ	$\mu = 1 + \chi$	$\mu = 1 + 4\pi\chi$
Сила Лоренца	$F = q[v, B]$	$F = (q/c)[v, B]$
Закон Ампера	$dF = I[dl, B]$	$dF = (I/c)[dl, B]$
Сила взаємодії паралельних струмів	$F = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I_1 I_2}{d}$	$F = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{2I_1 I_2}{d}$
Е. р. с індукції	$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$	$\varepsilon_i = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}$
Індуктивність	$L = \Phi/I$	$L = c \cdot \Phi/I$
Індуктивність соленоїда	$L = \mu_0 \mu n^2 V$	$L = 4\pi \mu n^2 V$
Енергія магнітного поля струму	$W = LI^2/2$	$W = LI^2/2c^2$
Густина енергії магнітного поля	$\omega = BH/2$	$\omega = BH/8\pi$
Густина струму зміщення	$j = \frac{\partial D}{\partial t}$	$j = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial D}{\partial t}$

Назва	СИ	Система Гаусса
Рівняння Максвела в диференціальній формі	$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho$ $\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$ $\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ $\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	$\operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi\rho$ $\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$ $\operatorname{rot} \mathbf{E} = \frac{4\pi}{c} \left(\mathbf{j} + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right)$ $\operatorname{rot} \mathbf{H} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$
Рівняння Максвела в інтегральній формі	$\oint \mathbf{D} d\mathbf{S} = \int \rho dV$ $\oint \mathbf{E} d\mathbf{r} = -\int \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S}$ $\oint \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0$ $\oint \mathbf{H} d\mathbf{r} = \int \left(\mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) d\mathbf{S}$	$\oint \mathbf{D} d\mathbf{S} = 4\pi \int \rho dV$ $\oint \mathbf{E} d\mathbf{r} = -\frac{1}{c} \int \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S}$ $\oint \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0$ $\oint \mathbf{H} d\mathbf{r} =$ $= \frac{4\pi}{c} \int \left(\mathbf{j} + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) d\mathbf{S}$
Формули перетворення \mathbf{E} і \mathbf{B} при $v_0 \ll c$	$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + [\mathbf{v}_0, \mathbf{B}]$ $\mathbf{B}' = \mathbf{B} - [\mathbf{v}_0, \mathbf{E}] / c^2$	$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + [\mathbf{v}_0, \mathbf{B}] / c$ $\mathbf{B}' = \mathbf{B} - [\mathbf{v}_0, \mathbf{E}] / c$
Швидкість електромагнітної хвилі в середовищі	$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon \mu}}$	$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}$
Зв'язок між \mathbf{E} і \mathbf{H} в електромагнітній хвилі	$E \sqrt{\epsilon_0 \epsilon} = H \sqrt{\mu_0 \mu}$	$E \sqrt{\epsilon} = H \sqrt{\mu}$
Густина енергії електромагнітного поля	$\omega = \frac{ED}{2} + \frac{BH}{2}$	$\omega = \frac{ED}{8\pi} + \frac{BH}{8\pi}$
Вектор Пойнтінга	$\mathbf{S} = [\mathbf{E}, \mathbf{H}]$	$\mathbf{S} = \frac{c}{4\pi} [\mathbf{E}, \mathbf{H}]$

Коефіцієнти Стюдента $t_{\alpha,n}$ для різних значень довірчої імовірності α та різного числа вимірів n

$\alpha \backslash n$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
2	1,000	1,376	1,963	3,08	6,31	12,71	31,8	63,7
3	0,816	1,061	1,336	1,886	2,92	4,30	6,96	9,92
4	0,765	0,978	1,250	1,638	2,35	3,18	4,54	5,84
5	0,741	0,941	1,190	1,533	2,13	2,77	3,75	4,60
6	0,727	0,920	1,156	1,476	2,02	2,57	3,36	4,03
7	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,45	3,14	4,71
8	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,36	3,00	3,50
9	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,31	2,90	3,36
10	0,703	0,883	1,110	1,383	1,833	2,26	2,82	3,25
11	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,23	2,76	3,17
12	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,20	2,72	3,11
13	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,18	2,68	3,06
14	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,16	2,65	3,01
15	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,14	2,62	2,98
16	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,13	2,60	2,95
17	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,12	2,58	2,92
18	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,11	2,57	2,90
19	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,10	2,55	2,88
20	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,09	2,54	2,86
∞	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,960	2,33	2,58

Зміст

Передмова.....	3
Поради і настанови студентам при виконанні робіт електричного практикуму.....	4
1. Модель електростатичного поля. Розподіл потенціалу та напруженості	9
2. Визначення ємності плоского конденсатора та діелектричної проникності деяких речовин	18
3. Вивчення роботи реостата як опору та подільника напруги.....	25
4. Розширення шкал мікроамперметра та вольтметра	32
5. Вимірювання опорів за допомогою містка постійного струму	39
6. Вимірювання електрорушійних сил методом компенсації.....	45
7. Визначення питомого заряду електрона (e/m) методом магнетрона	50
8. Дослідження властивостей феромагнетиків за допомогою осердя із зазором.....	59
9. Вивчення роботи електронного осцилографа. Фігури Ліссажу	73
10. Експериментальне визначення коефіцієнта самоіндукції та ємності. Перевірка закону Ома для змінного струму.....	85
11. Дослідження електричних загасаючих та вимушених коливань	97
12. Визначення електрохімічного еквіваленту міді та обчислення елементарного заряду	111
Додаток	117

Віддруковано у друкарні
Видавничого дому «Кієво-Могилянська академія»
04070, Київ, Конtrakтова пл., 4.
Тел./факс (044) 425-60-92.
Наклад 100 прим. Зам. 6-63.

