

Міністерство освіти та науки України  
Харківський національний університет ім. В.Н.Каразіна

В.М.Андронов, Є.Д.Іванов, В.П.Пойда,  
В.М.Дубовик, В.М.Сухов

## **ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ ЧАСТЬ 1**

Затверджено Інститутом системних досліджень  
освіти України як навчальний посібник для студентів  
вищих навчальних закладів, які вивчають дисципліну  
«Загальна фізика»

Київ  
1995

Андронов В.М., Івангов Є.Д., Пойда В.П. та ін. Фізичний практикум. Електрика і магнетизм: Навч. Посібник. – К.: ІСДО, 1995. – 240с.

*Навчальний посібник містить описи 31 лабораторної роботи з електрики та магнетизму. В кожному з них коротко викладена фізична суть явища, яке вивчається, описана вимірювальна установка, наведені завдання та методики експерименту, контрольні завдання та запитання для самоконтролю, список додаткових літературних джерел.*

*Призначений для студентів фізичних, радіофізичних і фізико-технічних спеціальностей університетів, а також для студентів інших вищих навчальних закладів, які вивчають дисципліну “Загальна фізика”.*

Іл. 156. Табл. 7. Бібліогр.: 39 назв.

Рецензент А.М.Петченко, проф. /ХДПУ/

<b>Передмова</b>	<b>5</b>
<b>1. Техніка і методики електричних вимірювань</b>	<b>5</b>
<b>Лабораторна робота 1.1. Основні електровимірювальні прилади</b>	<b>5</b>
1.1.1. Основні теоретичні відомості	5
1.1.2. Прилади і обладнання	13
1.1.3. Завдання і методика експерименту	13
<b>Лабораторна робота 1.2. Резистори. Методи вимірювання електричного опору постійного струму</b>	<b>13</b>
1.2.1. Основні теоретичні відомості	13
1.2.2. Прилади і обладнання	17
1.2.3. Завдання і методика експерименту	17
<b>Лабораторна робота 1.3. Розширення межі вимірювань мікроамперметра</b>	<b>19</b>
1.3.1. основні теоретичні відомості	20
1.3.2. Прилади і обладнання	21
1.3.3. Завдання і методика вимірювань	21
<b>Лабораторна робота 1.4. Розширення межі вимірювань мілівольтметра</b>	<b>23</b>
1.4.1. Основні теоретичні відомості	23
1.4.2. Прилади та обладнання	25
<b>2. ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ ЕЛЕКТРОСТАТИКИ</b>	<b>25</b>
<b>Лабораторна робота 2.1. Дослідження електростатичних полів методом електролітичної ванни</b>	<b>25</b>
2.1.1. Основні теоретичні відомості	25
2.1.2. Прилади та обладнання	27
2.1.3. Завдання і методика експерименту	27
Варіанти завдань.	28
Побудова траєкторій заряджених часток	30
<b>Лабораторна робота 2.2. Математичне моделювання електростатичних полів полем постійного струму з використанням електропровідного паперу</b>	<b>32</b>
2.2.1. Основні теоретичні відомості	32
2.2.2. Прилади і обладнання	35
2.2.3. Завдання та методика експерименту	35
<b>Лабораторна робота 2.3. Визначення діелектричної проникності рідких діелектриків</b>	<b>36</b>
2.3.1. Основні теоретичні відомості	36
2.3.2. Прилади і обладнання	38
2.3.3. Завдання і методика експерименту	38
<b>Лабораторна робота 2.4. Вивчення властивостей сегнетоелектриків</b>	<b>39</b>
2.4.1. Основні теоретичні положення	40
2.4.2. Прилади і обладнання	41
2.4.3. Завдання і методика експерименту	41
<b>3. Електричне поле у вакуумі</b>	<b>43</b>
<b>Лабораторна робота 3.1. Вивчення роботи трьохелектродної електронної лампи</b>	<b>43</b>
3.1.1. Основні теоретичні відомості	43
3.1.2. Прилади і обладнання	48
3.1.3. Завдання і методика експерименту	48
<b>Лабораторна робота 3.2. Вивчення роботи електронно-променевої трубки</b>	<b>49</b>
3.2.1. Основні теоретичні відомості	49
3.2.2. Прилади і обладнання	52
3.2.3. Завдання і методика експерименту	52
<b>Лабораторна робота 3.3. Вивчення роботи електронного осцилографа</b>	<b>54</b>
3.3.1. Основні теоретичні відомості	54

3.3.3. Прилади і обладнання	56
<b>4. Електропровідність рідин і газів</b>	<b>58</b>
<b>Лабораторна робота 4.1. Дослідження електропровідності електролітів</b>	<b>58</b>
4.1.1. Основні теоретичні відомості	59
4.1.2. Прилади і обладнання	60
4.1.3. Завдання і методика експерименту	60
<b>Лабораторна робота 4.2. Дослідження властивостей тліючого розряду</b>	<b>62</b>
4.2.1. Основні теоретичні відомості	62
4.2.2. Прилади і обладнання	64
4.2.3. Завдання і методика експерименту	64
<b>Лабораторна робота 4.3. Вивчення роботи газорозрядного стабілітрона</b>	<b>65</b>
4.3.1. Основні теоретичні положення	65
4.3.2. Прилади і обладнання	68
4.3.3. Завдання і методика експерименту	68

# Передмова

При виконанні завдань загального фізичного практикуму студенти знайомляться із сучасними приладами і методиками фізичних досліджень, правилами безпечної роботи в лабораторії, самостійно отримують експериментальне підтвердження загальних фізичних закономірностей, на практиці використовують свої теоритичні знання, індивідуально виробляють вміння й навички, які потрібні досліднику, а також вчаться спрацьовувати здобуті результати та оцінювати їх достовірність.

Лабораторні роботи, описи яких наведені в цьому посібнику, в тому чи іншому обсязі студенти фізичного і радіофізичного факультетів виконують протягом семестру ХДПУ поряд із заслухуванням лекцій і роботою на семінарських заняттях з курсу “Загальна фізика”.

Усі роботи відповідають вимогам існуючих програм із загальної фізики і загального фізичного практикуму для фізичних спеціальностей університетів.

Опис кожної з робіт, які наведені в посібнику, містить назву роботи, її мету, основні теоретичні відомості про досліджене явище чи прилад, який вивчають, перелік приладів, які бажано використовувати під час проведення досліджень, методичні особливості експерименту та завдання, які треба виконати. У кінці опису робіт подаються контрольні завдання та запитання і посилання на рекомендовані літературні джерела, які студенти повинні самостійно опрацювати у процесі підготовки до виконання і здавання робіт.

Посібник має додатки, з якими студенти мусять ознайомитись перед початком виконання робіт на практикумі, а також використовувати матеріали, наведені в них, при опрацюванні та оформленні здобутих ними експериментальних результатів.

Кінцевий варіант описів лабораторних робіт упорядковано В.М.Андроновим, Є.Д.Івановим, В.П.Пойдою, В.М.Дубовиком, В.М.Суховим. У створення основ практикуму та його модернізацію значний внесок зробили нині покійні В.Н.Бейлінсон та В.П.Воїнов.

Автори вважають, що незважаючи на те, що роботи, які наведені в посібнику, найточніше відповідають особливостям експериментальної бази і навчальному процесу на практикумі з електрики та магнетизму кафедри експериментальної фізики Харківського університету, тією чи іншою мірою він може бути корисним для студентів інших вузів України.

## 1. Техніка і методики електричних вимірювань

### Лабораторна робота 1.1. Основні електровимірювальні прилади

Мета – вивчити роботи основних електровимірювальних приладів і порівняти їх властивості.

#### 1.1.1. Основні теоретичні відомості

Під час проведення фізичних експериментів важливе значення має правильне виконання вимірювань. Отримання надійних даних залежить від характеристик приладів, з допомогою яких вони одержані, а також від способів вимірювання і оцінок похибок.

Електричне вимірювання – це порівняння електричної величини з деякими її значенням, прийнятим за одиницю. Вимірювання можна виконувати різними способами залежно від характеру вимірюваної величини, потрібної в експерименті точності вимірювання тощо. Вони бувають прямими, коли вимірювальний прилад показує безпосередньо числове значення вимірюваної величини, і непрямими, коли результат дістають після підстановки в формулу величин, отриманих при вимірюванні.

#### Класифікація приладів.

Електровимірювальні прилади безпосередньої оцінки можуть бути класифіковані за такими ознаками: за принципом дії (за системою); родом вимірюваної величини (струму, напруги, потужності, опору); за видом струму (постійний, змінний); за ступенем точності.

Вимірювальний прилад повинен перетворювати вимірювану величину (струм, напругу) у кутове або лінійне переміщення рухомої частини приладу або в цифрову форму відліку. За принципом перетворення вимірювальні прилади можна поділити на два види: прямого перетворення і компенсаційні. Робота приладів прямого перетворення ґрунтується на використанні різноманітних фізичних явищ, пов'язаних з електричним струмом і електромагнітним полем.

За принципом дії електровимірювальні прилади безпосередньої оцінки (прямого відліку) поділяють на магнітоелектричні, електромагнітні, електродинамічні, індукційні, яких енергія електромагнітного поля перетворюється механічну, електронно-кінетичні, в яких енергія електромагнітного поля використовується для керування електронним пучком. Компенсаційні прилади – це мости і потенціометри з ручним і автоматичним керуванням.

### Прилади магнітоелектричної системи.

У приладах цієї системи переміщення рухомої частини зумовлене силами взаємодії постійного магніту з котушкою, по якій протікає струм. Вимірювальний механізм цих приладів (рис. 1.1.1) складається з постійного магніту 1, полюсних наконечників 3, циліндра із магнітом'якої електротехнічної сталі 2.

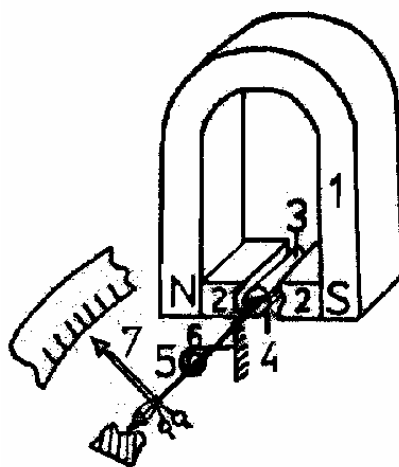


Рис. 1.1.1.

У зазорі розміщується рамка 4, яка складається з алюмінієвого каркаса і обмотки (для її виготовлення використовується мідна або алюмінієва дротина діаметром 0,02-0,2 мм). На рамці закріплюються дві пластини з напівосями 6, які кернами упираються в опори. На напівосях закріплюються внутрішні кінці пружинок 5 і стрілка 7. Зовнішні кінці пружинок закріплені так: один на нерухомій частині приладу, а другий – на важелі коректора. Пружинки служать для створення протидіючого моменту і підвищення струму до обмотки.

При проходженні по рамці, яка знаходиться в радіальному магнітному полі, постійного струму  $I$  на неї діє обертальний момент  $\vec{M}$ , абсолютна величина якого

$$M_{об} = BnSI, \quad (1.1.1)$$

де  $B$  – індукція в зазорі;  $n$  – число витків рамки;  $S$  – її площа.

Протидіючий момент, який створюють сталі пружинки, пропорційний кутові закручування  $\alpha$ :

$$M_{пр} = D\alpha, \quad (1.1.2)$$

де  $D$  – жорсткість пружини.

Стрілка приладу зупиниться на певній поділці при рівності моментів:  $M_{пр} = M_{об}$ .

Кут повороту стрілки

$$\alpha = \frac{BnS}{D} I, \quad (1.1.3)$$

пропорційній силі струму.

Таким чином, у приладів магнітоелектричної системи шкала рівномірна. Це – їх перевага.

Напрямок обертового моменту (він визначається за правилом лівої руки) змінюється при зміні напрямку струму. Якщо увімкнути прилад магнітоелектричної системи в коло змінного струму, то на котушку будуть діяти механічні сили, які швидко змінюються за значенням і напрямком. Їх середнє значення дорівнює нулю. В результаті цього стрілка приладу не буде відхилятися від нульового положення. Через це прилади магнітоелектричної системи не можна використовувати для безпосередніх вимірювань у колах змінного струму. Для використання магнітоелектричних приладів у колах змінного струму в коло рухомої котушки вмикають перетворювачі змінного струму в постійний або пульсуючий струм. Найбільшого поширення набули перетворювачі випрямляючої і термоелектричної системи. На рис. 1.1.2 показано принципову схему для вимірювання змінного струму приладом випрямляючої системи.

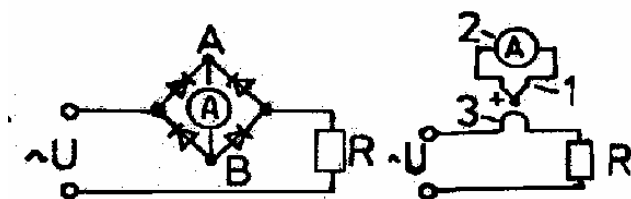


Рис. 1.1.2.

Вимірювальний прилад увімкнено в діагональ АВ моста, зібраного з чотирьох випрямляючих напівпровідникових елементів. При змінному струмі в діагоналі АВ виникає пульсуючий струм, який не змінює свого напрямку. Цей струм, взаємодіючи з магнітним полем постійного магніту, створює обертовий момент, пропорційний струму  $I$ , який змінюється за значенням, але діє в одному напрямку.

Відхилення стрілки приладу пропорційне середньому значенню обертового моменту за період коливань струму  $i$ , таким чином, середньому значенню струму. Якщо в колі діє синусоїдальний струм, то шкалу приладу можна відградувати в діючих значеннях струму, оскільки між середнім і діючим значеннями струму існує певне співвідношення. Якщо форма кривої струму відхилена від синусоїдальної, то правильне вимірювання діючих значень при такому градуванні шкали стає неможливим.

У приладах термоелектричної системи (рис. 1.1.2) як перетворювач використовується термопара 1. Вимірювальний прилад 2 з'єднано з вільними кінцями термопари, а робочі кінці, що утворюють її гарячий спай, нагріваються вимірюваним струмом, що проходить через провід нагрівального елемента 3.

Кількість теплоти, що виділяється в нагрівальному елементі, пропорційна квадратові діючого значення струму. Температура гарячого спаю термопари та її ЕРС прямо залежить від кількості теплоти. Через це відхилення стрілки вимірювального приладу, пропорційне ЕРС термопари, також прямо залежить від квадрата діючого значення струму.

Переваги приладів магнітоелектричної системи: точність показів, мала чутливість до сторонніх магнітних полів, незначне споживання потужності, рівномірність шкали. До недоліків слід віднести необхідність використання спеціальних перетворювачів при вимірюваннях у колах змінного струму і чутливість до перевантажень (тонкі струмопровідні пружинки із фосфористої бронзи при перевантаженнях нагріваються і змінюють свої пружні властивості).

### Прилади електромагнітної системи.

У приладах цієї системи поворот рухомої частини з вказівною стрілкою зумовлюється взаємодією магнітного поля нерухомої котушки із струмом, який вимірюється, з сталевим осердям, до якого на тій самій осі жорстко приєднана стрілка. Нерухомою частиною приладу (рис. 1.1.3) є котушка 1. Рухома частина складається із осердя 3, виготовленого із магнітної електротехнічної сталі, яке закріплено на осі 5, вказівної стрілки 2 і поршня повітряного заспокоювача 6 (демпфера). Демпфер – це циліндрична або прямокутна камера 7, закрита з обох сторін, у середині якої переміщується поршень, з'єднаний віссю із стрілкою. Він забезпечує плавне переміщення стрілки на шкалі приладу і швидке

заспокоєння її коливань біля поділки на шкалі приладу, яка відповідає вимірюваній величині. До осі рухомої системи приєднано також один кінець спіральної пружини 4, яка забезпечує створення зворотного механічного моменту. Ззовні котушка закрита сталевим екраном, який захищає її від впливу зовнішнього магнітного поля.

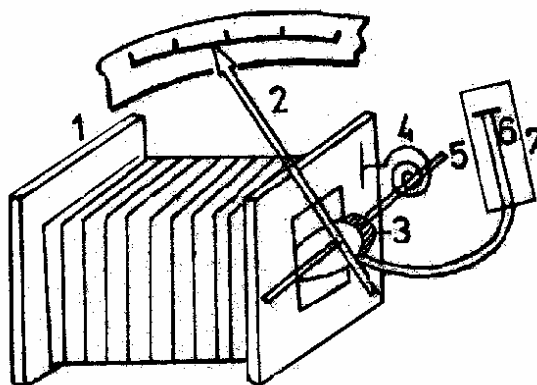


Рис.1.1.3.

В електроприладах використовують також магнітний демпфер – магнітний заспокоювач. Він складається із алюмінієвої пластинки 1 (рис.1.1.4), яка закріплена на рухомій частині приладу, і постійного магніту 2. При русі рухомої частини в пластинці будуть індукуватись вихрові струми. Взаємодія цих струмів з магнітним полем створює гальмівне зусилля, яке заспокоює коливання рухомої частини приладу. Магнітні заспокоювачі дещо простіші від повітряних, зручні в регулювання і застосовуються в тому випадку, коли поле постійного магніту не впливає на покази приладу.

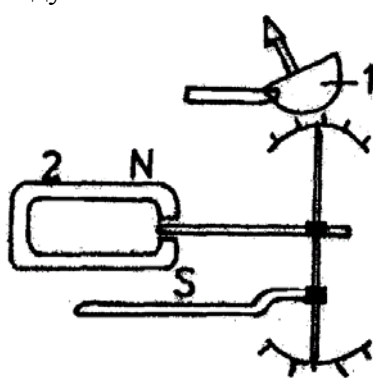


Рис.1.1.4.

Якщо струм проходить через котушку 1 (див. Рис. 1.1.3), на сталевий сердечник 3 діє обертовий момент:

$$M_1 = K_1 I^2, \quad (1.1.4)$$

де  $K_1$  – стала, яка залежить від матеріалу, форми і розміщення сердечника.

При повороті осі спіральна пружина закручується і створює протидіючий куту повороту рухомої частини приладу  $\varphi$ :

$$M_2 = K_2 \varphi \quad (1.1.5)$$

де  $K_2$  – коефіцієнт жорсткості пружини.

При рівновазі рухомої частини приладу  $M_1 = M_2$ , звідки

$$\varphi = K I^2, \quad (1.1.6)$$

де  $K = K_1 / K_2$ .

Із цього виразу видно, що шкала електромагнітного приладу нерівномірна. Оскільки із зміною напрямку струму змінюється і напрямок намагнічування сердечника, прилади електромагнітної системи можуть бути використані для вимірювання як постійного, так і змінного струму.

Позитивні якості приладів електромагнітної системи: простота конструкції, придатність для вимірювань у колах постійного та змінного струмів, надійність в експлуатації. Недоліки – нерівномірність шкали, вплив сторонніх магнітних полів на точність показів. Для зменшення впливу сторонніх магнітних полів деякі прилади екранують, розміщуючи їх у сталених корпусах.

### Прилади електродинамічної системи.

Прилади цієї системи служать для вимірювання сили струму, напруги й потужності в колах постійного і змінного струму. Вимірювальна частина приладу (рис. 1.1.5) складається з двох котушок: нерухомої – 3, і рухомої – 1, яка знаходиться всередині нерухомої.

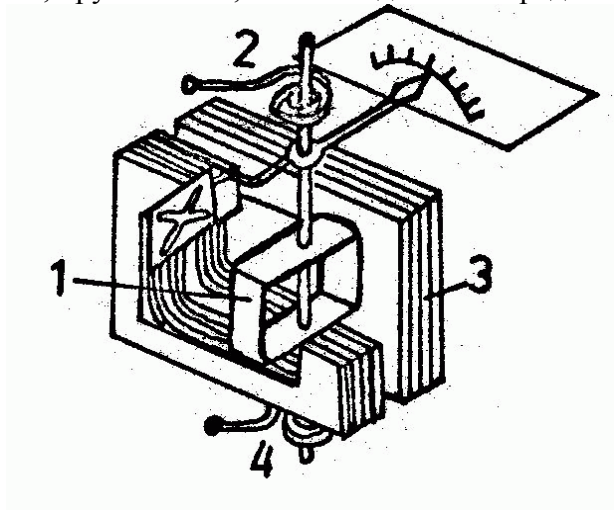


Рис.1.1.5.

Котушка 3 має невелику кількість витків із товстої дротини, котушка 1 – більшу кількість витків з тонкої дротини і невелику масу. При проходженні по котушках струмів  $I_1$  і  $I_2$  рухома котушка під дією сили  $F \propto I_1 I_2$  прагне стати в одній площині з нерухомою котушкою. Момент, який при цьому створюється, і є обертальним моментом рухомої системи. Протидіючий момент створюється за допомогою двох спіральних пружин 2 і 4, які водночас використовуються і для підведення струму до рухомої котушки. Прилади цієї системи найчастіше мають повітряний заспокоювач. В амперметрах і вольтметрах електродинамічної системи шкала нерівномірна, оскільки обертальний момент  $M \propto I_1 I_2$ . Якщо ж електродинамічний прилад використовується як ватметр, то його шкала є практично рівномірною. Це пояснюється тим, що у ватметра нерухома котушка (струмова) з'єднана з навантаженням послідовно, а рухома котушка (котушка напруги) – паралельно. В цьому випадку кут повороту рухомої частини приладу визначають так:

$$\varphi = K_1 I_u I = K_1 (U/R_u) I = K_2 \omega, \quad (1.1.7)$$

де  $I$  – струм у “послідовній” котушці;  $I_u$ ,  $R_u$  – струм у “паралельній” котушці та її опір.

Для приладів електродинамічної системи характерна висока точність, яка зумовлена відсутністю феромагнітних сердечників. Вони можуть бути використані для вимірювання потужності струму і напруги в колах змінного струму. Недоліки цих приладів – чутливість до перевантажень, вплив сторонніх магнітних полів на точність вимірювань і велике поглинання енергії.

### Прилади електростатичної системи.

Електростатичний механізм (рис. 1.1.6) складається з двох (і більше) металічних ізольованих пластин, які виконують роль електродів.

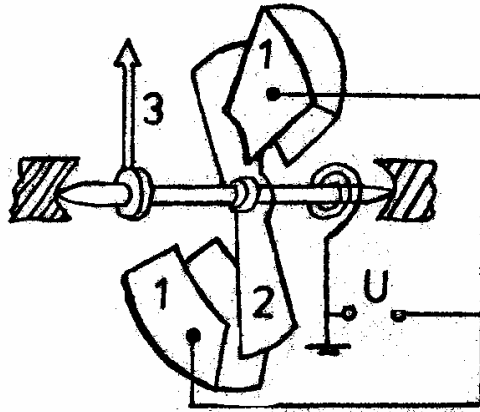


Рис.1.1.6.

На нерухомі пластини 1 подається потенціал одного знака, а на рухомі пластини 2 – іншого. Рухома пластина разом із вказівником 3 закріплена на осі і під дією сил електричного поля між пластинами повертається. При постійній напрузі  $U$  між пластинами обертальний момент  $\vec{M}$  пропорційний зарядам  $Q$  на пластинах:

$$M = KQ^2 = KC^2U^2, \quad (1.1.8)$$

де  $C$  – ємність пластини.

При синусоїдальній напрузі  $U = U_0 \sin \omega t$  рухома частина механізму реагує на середній рухомий момент  $M_c$ :

$$M_c = (1/T) \int_0^T KC^2U^2 dt = K_2U^2, \quad (1.1.9)$$

де  $U$  – діюча напруга.

Електростатичні прилади, в яких використовують електростатичний механізм, використовують виключно як вольтметри постійної та змінної напруги. Вони відрізняються малим частотним діапазоном (20...10 МГц), нечутливістю до зовнішніх магнітних полів і коливань температури, їх покази не залежать від форми кривої напруги. До недоліків цих приладів треба віднести їх порівняно низьку чутливість: без вимірювальних підсилювачів їх нижня межа вимірювань становить 10 В. Крім того, вони потребують електростатичного екранування, оскільки на їх покази впливають зовнішні електричні поля.

Для розширення меж вимірювання електростатичних вольтметрів використовують ємнісні і резистивні подільники, що дозволяє вимірювати напруги до 300 кВ.

#### Прилади індукційної системи.

Прилади індукційної системи (рис. 1.1.7) складається з двох нерухомих магнітопроводів 1 і 2 з обмотками (катушками) і рухомого алюмінієвого диска 3, який закріплено на осі 5. При проходженні змінного струму магнітні потоки, які зміщені в просторі, пронизують диск і при цьому в ньому виникає стояча хвиля магнітного поля, одна із складових якої створює біжуче магнітне поле, під впливом якого диск починає обертатись. За допомогою постійного магніту 4 при взаємодії його поля зі струмом, який індукується цим полем в диску, створюється гальмівний момент.

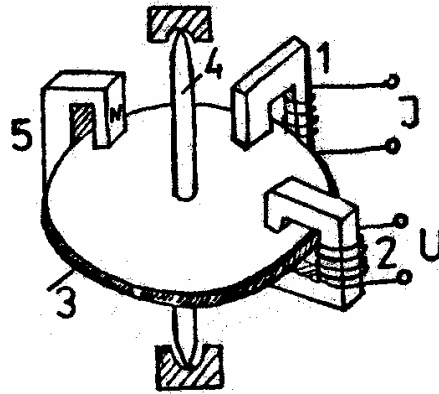


Рис.1.1.7.

Прилади індукційної системи стійкі до перевантажень, мають великий обертальний момент, малу чутливість до зовнішніх магнітних полів. Однак їх покази залежать від частоти вимірюваного струму і температури середовища, в якому її вимірюють. Найбільше поширення прилади індукційної системи отримали як інтегруючі лічильники.

Для вимірювання електричних величин застосовуються також аналогові і цифрові прилади.

Аналоговий електричний вольтметри поєднує в собі електронний перетворювач і магнітоелектронний вимірювальний прилад. На відміну від електромеханічних приладів електронні вольтметри володіють більшим вхідним опором і високою чутливістю. Виділяють вольтметри постійної і змінної напруги. Електронний вольтметр постійної напруги складається з вхідного пристрою у вигляді високоомного резистивного подільника, підсилювача постійної напруги і магнітоелектричного приладу. Електронні вольтметри змінної напруги мають також ще й перетворювач змінної напруги в постійну.

Цифрові вольтметри працюють за принципом перетворення вимірюваної напруги в електричний код, який відтворюється в цифровій формі. В загальному випадку цифровий вольтметр складається з вхідного пристрою, аналогово-цифрового перетворювача і цифрового відлікового пристрою. Видача результатів у цифровому вигляді і велика швидкість цифрових приладів дозволяють здійснити документальну реєстрацію з їх допомогою різних величин: струму, напруги, опору. Результати вимірювань можна вводити в ЕОМ та інформаційно-вимірювальні системи, цифродрукуючі пристрої. До недолатків відносяться складність схем і конструкцій, велика вартість, недостатня надійність. Ці недоліки можна віднести до розряду тимчасових, оскільки вони усуваються мірою розвитку мікроелектроніки.

Основні характеристики електровимірювальних приладів: похибка, варіація показів, чутливість, споживна потужність, час встановлення показів і надійність.

**Варіація** показів приладу – це найбільша різниця показів приладу при одному й тому самому значенні вимірюваної величини. Вона визначається, якщо підхід стрілки до вибраної відмітки шкали плавний, при русі стрілки один раз від початкової, а другий – від кінцевої відмітки. Причина варіації – в основному тертя в опорах рухомої частини приладу.

**Чутливість**  $S$  показу – це відношення приросту переміщення вказівника  $\Delta a$  до приросту вимірюваної величини  $\Delta X$ :

$$S = \frac{\Delta a}{\Delta x} . \quad (1.1.10)$$

Якщо чутливість стала (шкала рівномірна), то її можна визначити як  $S = a/x$ .

Величина, обернена до чутливості,  $C = 1/S$  називається **ціною поділки (сталлої) приладу**. Вона дорівнює числу одиниць вимірюваної величини, які приходяться на одну поділку шкали. Наприклад, при  $S=10$  под/В стала  $C=0,1$  В/под.

**Споживна потужність** – потужність, яку поглинає прилад при увімкненні його в коло. У результаті цього змінюється режим роботи кола, що в кінцевому випадку призводить до

збільшення похибки вимірювання. Через це мале споживання потужності – це перевага приладу.

**Час встановлення показів** – проміжок часу з моменту ввімкнення вимірюваної величини до моменту, коли вказівник займе положення, яке відрізняється від значення, яке встановилось, не більше ніж на 1,5 %.

Час встановлення показів для більшості аналогових приладів не перевищує 4 с.

**Надійність** – властивість електровимірювальних приладів зберігати задані характеристики при певних умовах роботи за певний заданий проміжок часу. Кількісною мірою надійності є середній час безвідмовної роботи приладу.

Оскільки абсолютно точних приладів немає, кожний засіб вимірювань характеризується похибкою.

Прийнято похибки засобів вимірювання ділити на абсолютні, відносні та зведені.

**Абсолютна похибка  $\Delta$**  - це різниця між показами приладу  $A$  і дійсним значенням вимірюваної величини  $A_A$ :

$$\Delta = A - A_A. \quad (1.1.11)$$

**Відносна похибка  $\delta$**  - відношення абсолютної похибки  $\Delta$  до дійсного значення вимірюваної величини. Звичайно відносну похибку виражають у відсотках:

$$\delta = \pm(\Delta/A)100\%. \quad (1.1.12)$$

**Зведена похибка  $\gamma$**  - відношення абсолютної похибки до нормувального значення  $A_N$  вимірюваної величини.

Нормувальне значення звичайно беруть таким, що дорівнює верхній межі вимірювання (верхній межі шкали) приладу.

За характером прояву похибки поділяють на систематичні і випадкові.

**Систематична похибка** – це похибка, яка залишається сталою або змінюється за певним законом. Її значення завжди можна врахувати введенням відповідних поправок.

**Випадкова похибка** – це похибка, яка змінюється за випадковим законом. Випадкові похибки неможливо виключити дослідно, їх значення можна зменшити проведенням численних вимірювань.

Залежно від умов експлуатації виділяють основну і додаткову похибки засобів вимірювання.

**Основна похибка** – похибка засобів вимірювання, які знаходяться в нормальних умовах експлуатації (температура зовнішнього середовища, вологість, атмосферний тиск, напруга і частота живлення, зовнішні електричні і магнітні поля та ін.).

**Додаткова похибка** – це похибка засобів вимірювання, яка виникає при відхиленні наведених умов від нормального значення.

Рівень точності засобів вимірювання характеризується **класом точності**. Для електровимірювальних приладів встановлені такі класи точності: 0.05; 0.1; 0.2; 0.5; 1.0; 1.5; 2.5; 4.0.

Цифри вказують основну зведену похибку у відсотках. Основна абсолютна  $\Delta$  і відносна  $\delta$  похибки можуть бути обчислені в цьому випадку за формулами:

$$\Delta = \pm\gamma(A_N/100), \quad (1.1.13)$$

$$\delta = \pm\gamma(A_N/A). \quad (1.1.14)$$

Кожний електровимірювальний прилад розрахований на певні умови, відповідно до яких ним можна ефективно користуватись. Він характеризується також класом точності, призначенням, особливостями будови. Ці характеристики становлять основу паспортних даних і частково вказуються на шкалах або корпусах приладів у вигляді певних умовних знаків. З найчастіше використовуваними умовними позначками можна детально ознайомитись у [14; 17; 18; 24], а також на спеціальних стендах, які є в лабораторії.

### 1.1.2. Прилади і обладнання

Лабораторний макет для вимірювання струменів і напруг з клемми для підмикання амперметрів, вольтметрів; вольтметр М-45 0...15 В (3 мА), амперметр М-45 0...30 мА (75 мВ); вольтметр 0...15 В; амперметр Э 514 0...50 мА, лампові та цифрові вольтметри.

### 1.1.3. Завдання і методика експерименту

Установити з допомогою регуляторів на лабораторному стенді струми й напруги в колі (за вказівкою викладача) і виміряти їх з допомогою різних приладів. Порівняти здобуті результати. За формулами (1.13) та (1.14) визначити абсолютну і відносну похибки виконаних вимірювань.

#### Контрольні запитання і завдання.

1. Принцип дії магнітоелектричних приладів. Їх перевага й недоліки.
2. Яку будову мають прилади електромагнітної системи? Яке рівняння має їх шкала?
3. Який принцип дії електровимірювальних приладів електростатичної та індуктивної системи?
4. Яку будову мають аналогові і цифрові вольтметри?
5. Які існують похибки засобів вимірювання?
6. Що таке зведена похибка і клас точності приладу? Як, знаючи клас точності, визначити абсолютну і відносну похибки?
7. Які умовні позначки наводять на шкалах приладів?  
[1; 5-7; 14; 17; 18; 24]

## Лабораторна робота 1.2. Резистори. Методи вимірювання електричного опору постійного струму

**Мета роботи** – ознайомитись з видами електричних резисторів і методами вимірювання електричного опору постійному струму.

### 1.2.1. Основні теоретичні відомості

Для проведення фізичних досліджень виникає необхідність встановлювати і регулювати напругу і струм у колах постійного і змінного струму з допомогою різних змінних резисторів.

Як досить точна міра електричного опору в резистивних вимірюваннях існує так звана зразкова котушка опору. На латунному каркасі, який служить тепловідводом, намотано манганінову ізольовану дротину. Манганін – це високоомний сплав, в якого щодо міді досить малі температурний коефіцієнт опору і термоЕРС. Дротину намотують біфілярно (рис. 1.2.1) для того, щоб її індуктивність була близько до нуля. Кінці дротини виведено до масивних клем. Латунний каркас з дротиною у металевий кожух, який відбиває світло і захищає пристрій від дії зовнішніх магнітних полів.

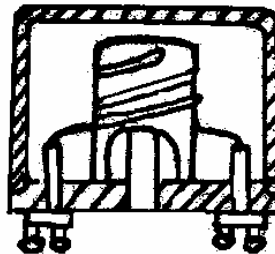


Рис.1.2.1.

При вимірюванні спаду напруги на котушці треба усунути похибки, які можуть виникнути за рахунок перехідного опору між клемми та дротинами, до яких підведено струм. Для цього котушки, опір яких менший за 1000 Ом, виготовляють так, що вони мають чотири затискачі (рис. 1.2.1): дві потенціальні та дві струмові клемми. Значення опору, яке вказано на корпусі котушки, відповідає опору між потенціальними клемми.

Працюючи із зразковим резистором, треба слідкувати, щоб струм, який проходить через котушку, не перевищував вказаного номінального значення.

Зразкові котушки опору випускають з класом точності до 0,002.

Для вимірювань, які не вимагають дуже високої точності, як міру опору використовують магазини опорів – набір котушок опору в загальному футлярі. Щоб зменшити індуктивність, манганінову дротину намотують біфілярно. В котушках з великим опором (від 100 Ом і більше) часто виникає необхідність зменшити міжвиткову ємність. Цього досягають, поділяючи котушки на кулька секцій. Залежно від способу увімкнення окремих котушок магазини опорів поділяють на штепсельні і важільні (рис.1.2.2).

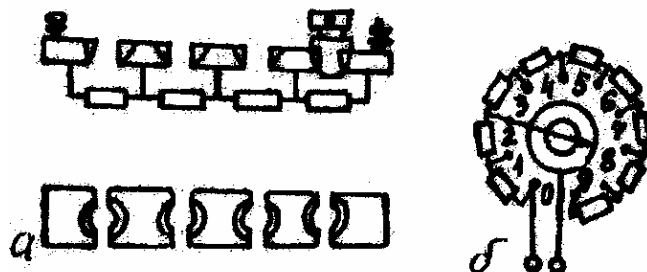


Рис.1.2.2.

У штепсельному магазині (рис. 1.2.2,а) кінці кожної резисторної котушки під'єднуються до двох суміжних масивних латунних пластинок, які закріплені на верхній кришці футляра. Якщо штепсель встановлено в гніздо, то відповідний резистор вимкнено. Щоб його підключити, штепсель треба вийняти.

Важільні магазини опорів (рис. 1.2.2,б) часто називають декадними, оскільки їх перемикачі мають 10 положень (від 0 до 9 включно), тобто 10 декад.

Опір магазину визначають як суму опорів декад, причому опір кожної наступної декади відрізняється від попередньої в 10 разів, що показано множитком біля перемикача. Важільні магазини зручні в роботі і досить точні (до 0,01%).

Кожний магазин опору характеризується номінальною потужністю, яка може поглинатись у кожній окремій ступені декади. Номінальна потужність указується на корпусі магазину. Перевищувати її при роботі з магазином забороняється.

Під час проведення експериментів для плавної зміни опору кола використовують реостати.

**Реостат** – це регульований дротяний резистор, в якому дротину намотано на керамічну циліндричну основу. Опір змінюється введенням в електричне коло різної кількості витків обмотки при переміщенні рукоятки з контактними щітками (повзунка) вздовж направляючої, яка служить одночасно і для підведення струму до верхнього виводу. Кінці обмотки виведено до нижніх клем.

На реостаті звичайно вказують: його опір (Ом) і допустимий струм (А).

Для зміни струму в колі реостат вмикають послідовно (рис. 1.2.3, а). Для плавної зміни напруги використовують так звану потенціометричну схему (рис. 1.2.3, б), де  $R_p$  – реостат, а  $R_H$  – резистор навантаження; звичайно  $R_p < R_H$ .

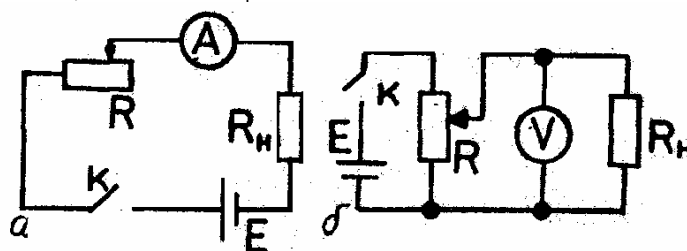


Рис.1.2.3.

Потенціометричні схеми дозволяють плавно регулювати напругу в колі від нуля до напруги джерела. Головний недолік потенціометричних схем – значне поглинання потужності від джерела.

Електричний опір електротехнічних пристроїв (катушок, резисторів та ін.) постійному струму можна умовно поділити на малі (до 1 Ом), середні (1...10<sup>5</sup> Ом) і великі (понад 10<sup>5</sup> Ом). Для вимірювання малих опорів використовують метод амперметра-вольтметра і подвійні мости постійного струму.

На практиці найбільш часто зустрічаються пристрої, які характеризуються середніми опором, для вимірювання яких використовують метод амперметра-вольтметра, омметри, одинарні мости (неавтоматичні з ручним урівноваженням і автоматичні), а також різні компенсаційні методи.

Для вимірювання великих опорів використовують метод безпосередньої оцінки мегаомметром.

Метод амперметра-вольтметра – найбільш простий непрямий метод вимірювання малих і середніх опорів  $R$ .

Вимірний опір  $R_{вим}$  визначають за показами вольтметра  $U_B$  і амперметра  $I_A$  із співвідношення

$$R_{вим} = U_B / I_A . \quad (1.2.1)$$

Однак, завдяки впливу внутрішніх опорів приладів вимірювання методом амперметра-вольтметра матиме методичну похибку: опір  $R_{вим}$  обчислений із (1.2.1), буде відмінним від його фактичного значення  $R_x$ .

Схему, яка наведена на рис. 1.2.4,а, рекомендується використовувати для вимірювання малих опорів. Адже в цьому випадку струм  $I_A \approx I_{R_x}$ , тому що вольтметр, як правило, має великий опір і струм  $I_b \approx I_{R_x}$ . Точна формула для знаходження  $R_x$  за схемою на рис. 1.2.4,а має такий вигляд:

$$R_x = \frac{U_b}{I_A - (U_b / R_b)} . \quad (1.2.2)$$

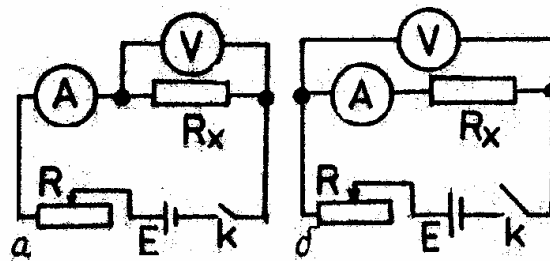


Рис.1.2.4.

Схему, яка наведена на рис. 1.2.4,б, краще використовувати при вимірюванні середніх опорів. Справді, в цьому випадку  $U_b \approx U_{R_x}$ , оскільки амперметр має малий опір і напруга  $U_A \ll U_{R_x}$ . Точна формула для знаходження  $R_x$  з допомогою схеми на рис. 1.2.4,б має ткий вигляд:

$$R_x = \frac{U_b - I_A R_A}{I_A} . \quad (1.2.3)$$

При точних вимірюваннях треба знати внутрішній опір приладів і вносити відповідні поправки в результат вимірювань.

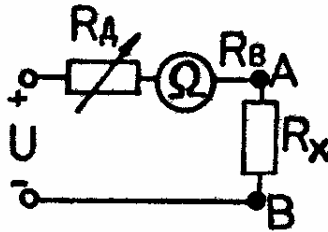


Рис.1.2.5.

Для безпосереднього вимірювання опору використовують омметри. Омметр (рис.1.2.5) складається із магнітоелектричного вимірювального механізму  $\Omega$ , шкала якого проградуєвана в омах, джерела живлення з напругою  $U$ , додаткового резистора  $R_d$ , вихідних затискачів  $AB$ , до яких приєднують резистор, і має опір  $R_x$ , який вимірюють. Струм у колі вимірювача  $I = U / (R_d + R_B + R_x)$ , де  $R_d, R_B, R_x$  - опори відповідно додаткового резистора, вимірювача і вимірювального резистора. Кут відхилення

$$\alpha = S_i I = S_i U \left[ 1 / (R_d + R_B + R_x) \right], \quad (1.2.4)$$

де  $S_i$  – чутливість вимірювача за струмом.

При розімкнених затискачах  $AB / R_x = 0 /$  кут відхилення  $\alpha = 0$ , якщо ж затискачі  $AB$  замкнені накоротко  $/R_x = 0 /$ , кут відхилення максимальний, через це шкала омметра є зворотною, нульова відмітка розміщена не зліва, як звичайно, а справа.

Омметри зручні на практиці, але мають велику похибку (клас точності 2,5) із-за нерівномірності шкали і нестабільності джерела живлення (батареї гальванічних елементів).

В електричних вимірюваннях широко застосовуються мостові схеми. Це пояснюється їх великою чутливістю, високою точністю і можливістю вимірювання різних величин (опору, індуктивності, ємності і т.д.).

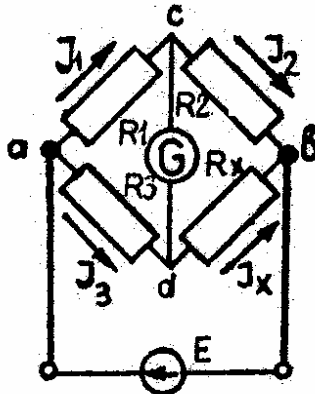


Рис.1.2.6.

На рис. 1.2.6 наведено електричну схему одинарного моста постійного струму, який складається з чотирьох пліч і двох діагоналей. В одне плече моста вмикають резистор, опір якого  $R_x$  треба виміряти, а в три інші – резистори з опором  $R_1, R_2$  і  $R_3$ . В одну діагональ моста (між вузлами  $a$  і  $b$ ) вмикають джерело живлення з ЕРС  $E$ , а в другу (вузли  $c$  і  $d$ ) – нуль-гальванометр  $G$ , який у колі відіграє роль вказівника рівноваги моста. Коли потенціали точок  $c$  і  $d$  моста рівні між собою, то струм у гальванометрі  $I_G = 0$ . При цьому  $I_1 R_1 = I_3 R_3$  і  $I_2 R_2 = I_x R_x$ . Враховуючи, що  $I_1 = I_2$ , а  $I_3 = I_x$ , дістанемо

$$R_2 / R_1 = R_x / R_3, \text{ або } R_2 R_3 = R_x R_1. \quad (1.2.5)$$

Цей вираз називають рівнянням рівноваги моста, за яким добуток опорів резисторів, увімкнених у протилежні плечі врівноваженого моста, дорівнюють одне одному.

Вимірювання виконують так. Досягнувши рівноваги моста регулюванням опорів резисторів у плечах, записують їх значення і обчислюють шукане значення опору:

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1}. \quad (1.2.6)$$

Одинарний міст служить для вимірювання тільки середніх опорів, малі й великі опори вимірювати ним не рекомендується. Нижня межа вимірювання (одиниці Ом) обмежена впливом опорів з'єднувальних дротин і перехідних контактів, які неминуче вмикаються в плече або послідовно з вимірюваним об'єктом  $R_x$ . Верхня межа ( $10^5$  Ом) вимірювання моста обмежена шунтуючою дією струмів витоку.

Для вимірювання малих опорів служать подвійні мости. В них резистор, опір якого вимірюють, підмикають до вимірювального кола не двома точками, як звичайно, а чотирма, так званими “струмовими” і “потенціальними”.

Мости, які випускає промисловість, можуть працювати за схемою одинарного і подвійного мостів.

### 1.2.2. Прилади і обладнання

Лабораторне регульоване джерело живлення; магазин опорів Р-33 (2 шт.); реостати РСП (100 і 500 Ом); зразкові котушки опорів з різними номінальними значеннями опорів; амперметр і вольтметр на вимірювальному стенді; міст; комбінований Ф401; набір резисторів для вимірювання; прилад ГРМ-01.

### 1.2.3. Завдання і методика експерименту

1. Виміряти опір резисторів з набору (за вказівкою викладача) методом амперметра і вольтметра, використовуючи схеми, наведені на рис. 1.2.4.

2. Виміряти малі і середні опори (за вказівкою викладача) з допомогою моста постійного струму Р4060.

Для вимірювань опорів мостом Р4060 перед вимірюваннями треба здійснити установку робочого струму приладу. Перемикачі шкали відліку треба перевести в нульове положення. Виводи 1, 2, 3, 4 з'єднати дротинами накоротко. Поставити перемикач у положення “Грубо” і ручкою “Уст.нуля” встановити “0” на шкалі нуль-гальванометра. Перевести перемикач у положення “Точно” і повторити операцію. Прилад готовий до вимірювань. Для вимірювань опорів за схемою подвійного моста вимірюваний резистор, якщо він має чотири клеми, слід підмикати до клем 1, 2, 3, 4. Клеми 1, 4 – струмові, а 2, 3 – потенціальні. При вимірюванні зразкового опору номіналом 0,1 Ом перемикач-множник поставити в положення 1, а при вимірюванні опорів вищих, ніж  $10^2$  Ом, коли прилад працює за схемою одинарного моста, – у положення  $10^2$ .

Самі вимірювання виконують у режимі “Грубо”. Добираючи перемикачами значення  $R_x$ , треба досягти установки “зайчика” гальванометра в нульове положення. Більш точне нульове положення встановлюється далі в режимі “Точно”. Шуканий опір треба вимірювати кілька разів і взяти середнє значення.

Для визначення питомого опору резистивної дротини використовують прилад ГРМ-01. Його загальний вигляд, а також види лицьової і задньої панелі показані на рис. 1.2.7 і 1.2.8.

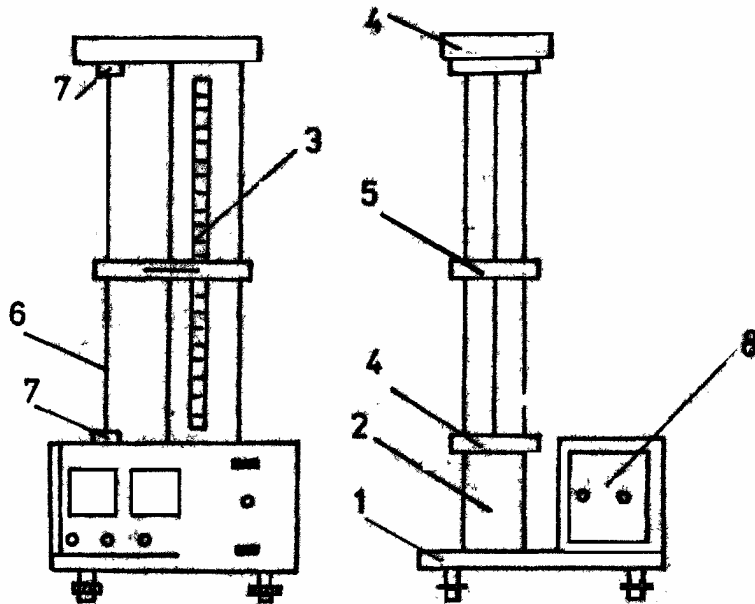


Рис.1.2.7.

Основа приладу 1 оснащена ніжками, положення яких можна змінювати. До основи прикріплена колона 2 із нанесеною на неї метричною шкалою 3. На колоні змонтовані два нерухомих кронштейни 4 і один рухомий 5, який може пересуватись уздовж колони та фіксуватись у будь-якому положенні. Між верхнім та нижнім кронштейнами натягнуто резистивний провід 6, який закріплено до кубиків 7. Через контактний затискач на рухомому кронштейні забезпечується хороше гальванічне з'єднання з резистивною дротиною. На рухомому кронштейні нанесено відмітку, яка дозволяє визначити за шкалою довжину досліджуваної дротини.

Нижній, верхній і центральний рухомі контакти з'єднані з вимірювальною частиною приладу 8.

Прилад працює так. Змінна напруга від трансформатора, який знижує напругу мережі живлення, подається на випрямляючий місток. Постійна напруга з містка через резистор  $R$  та потенціометр  $P1$  живить вимірювальну схему. Перемикач  $W3$  служить для вибору виду роботи (відпущений – робота з мостом, натиснений – робота з вимірювання опору методом амперметра і вольтметра), а перемикач  $W2$  – для вибору вимірювання струму та напруги (відпущений – точне вимірювання струму, натиснений - напруги). До затискачів  $R_x$  підмикають зовнішній місток постійного струму.

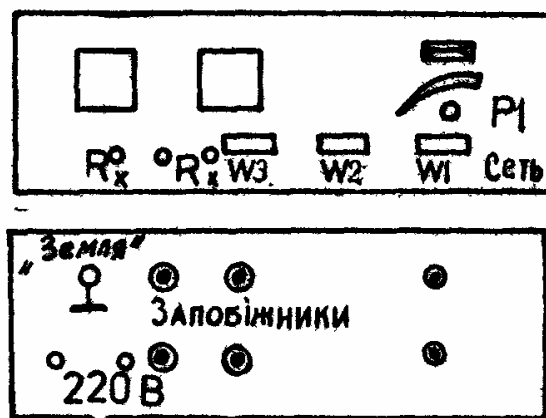


Рис.1.2.8.

Для вимірювання питомого опору за методом амперметра і вольтметра треба перемикачами  $W3$  і  $W2$  поставити в натиснене положення. Пересунути рухомий контакт

приблизно на 0,7 довжини резистивної дротини відносно основи. За допомогою потенціометра P1 (регулювання струму) встановити таке значення струму, щоб вольтметр показував 2/3 вимірюваного діапазону. За шкалою на колоні визначити довжину вимірюваної дротини. Записавши покази вольтметра та амперметра (при цьому перемикаючи W2), за формулою (1.2.2) обчислити опір дротини  $R_D$ , а за формулою  $R = \rho(l/S)$  – її питомий опір.

Для вимірювання питомого опору дротини з допомогою містка постійного струму треба перемикач W3 поставити у відпущене положення. Місток постійного струму під'єднати до затискачів  $R_X$ . Пересунувши рухомий контакт на відстань, яка дорівнює приблизно 0,7 довжини відносно основи, записати покази містка  $R_M$ .

Слід установити рухомий контакт для гальванічного з'єднання з нижнім кронштейном, записати покази містка  $R_D$ , за формулою  $R_X = R_M - R_D$  визначити опір резистивної дротини.

Обчислити відносну похибку вимірювань:

$$\Delta = \frac{|\rho_{ET} - \rho|}{\rho_{ET}} \cdot 100\%, \quad (1.2.7)$$

де  $\rho_{ET}$  - питомий опір еталона;  $\rho$  - виміряний питомий опір.

Порівняти результати вимірювань.

**Примітка.** Експлуатація приладу ГРМ-01 допускається тільки при використанні заземлення.

Поперечний переріз резистивної дротини  $S = \pi d^2 / 4$ , де  $d = 0,36$  мм,  $\rho_{ET} = 1,05 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ .

#### Контрольні завдання і запитання.

1. Електричні схеми, які використовують для вимірювання опору методом амперметра і вольтметра.
2. Точні формули для обчислення опору, який вимірюють методом вольтметра і амперметра.
3. Як підмикають до моста постійного струму P4060 середні (до  $10^2$  Ом) опори?
4. Як підмикають до моста P4060 опори, більші за  $10^2$  Ом.
5. Як виконати установку робочого струму в мосту P4060?
6. Природа носіїв зарядів у металах.
7. Основні положення класичної теорії електропровідності металів і в чому її утруднення?
8. Що називають питомим опором матеріалу? Від чого він залежить?
9. Причина зменшення провідності металів із зростанням температури.
10. Визначення одиниць електричного опору і провідності, питомого опору і питомої провідності у СІ.
11. Переваги й недоліки методу амперметра і вольтметра для вимірювання опорів.
12. Перевага мостових вимірювань.
13. Особливості вимірювань опору з допомогою омметра.
14. Наведіть приклади методик вимірювання електричного опору, які використовують для вивчення фізичних властивостей металів.
15. Конструкція зразкових котушок опору, штепсельних та важільних магазинів опору.
16. Конструкція і класифікація навісних резисторів.

[1-11; 14; 19; 25-27; 32; 38]

### Лабораторна робота 1.3. Розширення межі вимірювань мікроамперметра

Мета роботи – ознайомитись з методиками розширення межі вимірювань струмових приладів та їх градування.

### 1.3.1. основні теоретичні відомості

Під час виконання електричних вимірювань у лабораторних умовах доводиться вимірювати струм, номінальні значення якого більші за те максимальне значення струму, на вимірювання якого розраховано даний прилад. У цьому випадку для розширення межі вимірювань паралельно до використовуваного приладу приєднується резистор, на який відгалужується частина струму. Такий резистор називається шунтом.

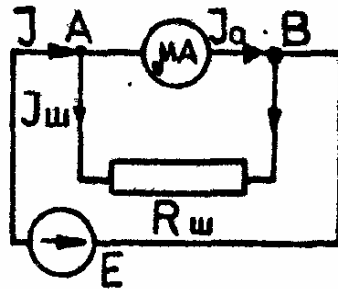


Рис.1.3.1.

Для одержання формули, з допомогою якої можна обчислити опір шунту до приладу, розглянемо ділянку кола, схема якої показана на рис. 1.3.1. Позначимо ряд величин, які будуть входити в формулу:  $I$  – струм, який треба виміряти;  $I_a$  – максимальний струм, на який розраховано прилад;  $R_0$  – його внутрішній опір;  $I_{ш}$  – струм, який відгалужується в шунт;  $R_{ш}$  – опір шунта. Тоді формула для розрахунку різниці потенціалів між точками А і В матиме такий вигляд:

$$U_{AB} = I_a R_a = I_{ш} R_{ш} = I \frac{R_a R_{ш}}{R_a + R_{ш}},$$

$$\text{звідки } I = I_a \frac{R_a + R_{ш}}{R_{ш}} = I_a \left( \frac{R_a}{R_{ш}} + 1 \right) = I_a P.$$

Величина  $P = I/I_a$ , яка показує, в скільки разів збільшується межа вимірювання струмового приладу, називається шунтуючим множником. Очевидно,

$$P = (R_a/R_{ш}) + 1, \quad R_{ш} = R_a/(P-1). \quad (1.3.1)$$

Таким чином, при розміщенні межі вимірювань приладу в  $P$  раз паралельно до нього необхідно приєднати провідник, опір якого в  $(P-1)$  раз менший, ніж опір приладу.

У лабораторних умовах шунти виготовляють із манганінових або константанових дротин, які мають низький температурний коефіцієнт опору. При експлуатації амперметрів в одних і тих самих температурних умовах для виготовлення шунтів можна використовувати й інші матеріали.

Довжину дротини визначають із співвідношення

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1.3.2)$$

де  $R$  – опір шунта;  $\rho$  - питомий опір матеріалу, з якого виготовляють шунт;  $l$  - довжина;  $S$  – площа поперечного перерізу дротини. Питомий опір матеріалу дротини  $\rho$  знаходять за довідником, а її діаметр вимірюють мікрометром.

Після виготовлення шунта його опір необхідно виміряти з допомогою одинарного або подвійного мосту і підігнати до того значення, яке теоретично розраховане. Після підгонки шунта його приєднують паралельно до струмового приладу, межу вимірювань якого необхідно розширити, а останній градуують в одиницях струму, тобто знаходять однозначну відповідність між поділками його шкали та дійсним значенням струму в колі.

Перед градуванням приладу необхідно попередньо збільшити або зменшити опір шунта, для того щоб максимальне значення струму, який проходить через прилад, точно відповідало обчисленому. Це необхідно тому, що внутрішній опір приладів завжди

визначають з деякою похибкою і, крім того, при малих опорах шунтів дуже важко врахувати опір у контактах (так звані перехідні опори).

Якщо в лабораторії немає еталонного приладу, то струмовий прилад з розширеною межею вимірювання можна проградувати з допомогою непрямого способу, змінюючи напруги на еталонній котушці опору (рис. 1.3.2).

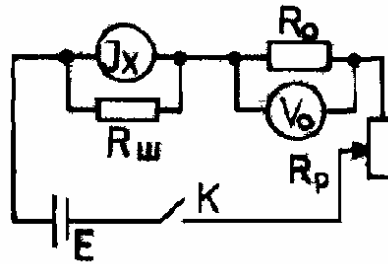


Рис.1.3.2.

Такий спосіб найчастіше застосовують при використанні для вимірювання спаду напруги на зразковому резисторі компенсаційних приладів – потенціометрів, для яких характерні висока точність вимірювань і незначне споживання енергії від вимірюваної ділянки кола.

Еталонна котушка опору  $R_0$  має чотири затискачі: дві потенціальні і дві струмові клемі. Контрольним вольтметром  $V_0$ , з допомогою якого вимірюють спад напруги на еталонній котушці опорів, служить потенціометр (компенсатор) типу ПП-63 з верхньою межею вимірювання  $U_{\text{верх}}$ . Через це  $I_{\text{max}} R_0 \leq U_{\text{верх}}$ . Силу струму в колі обчислюють за законом Ома.

### 1.3.2. Прилади і обладнання

Мікроамперметр (1...100 мкА); магазини опорів (2 шт.); реостат РСП (100 Ом); міліамперметр (0...200 мА); потенціометр ПП-63; дріт для виготовлення шунтів; міст комбінований Ф4016; еталонна котушка опору; джерело постійного струму (4 або 6 В); вимикач.

### 1.3.3. Завдання і методика вимірювань

1. Визначити внутрішній опір мікроамперметра  $R_{\mu A}$ . Для цього треба скласти схему, яка подана на рис. 1.3.3, виміряти спад напруги на клемі мікроамперметра не менш ніж при трьох значеннях сили струму в колі. За законом Ома визначити  $R_{\mu A}$  і для розрахунку шунтів взяти його середнє значення.

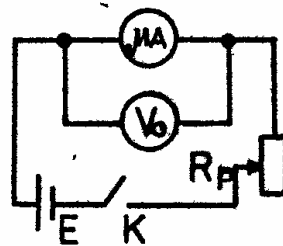


Рис.1.3.3.

2. Розрахувати шунти для струмів силою 1 мА; 0,2 А.
3. Скласти схему згідно з рис. 1.3.4. Приєднати паралельно до клем міліамперметра магазин опорів R-33 і установити необхідне значення опору шунта, за допомогою якого межа вимірювань мікроамперметра збільшується до 0,2 А. Підгонку шунта і градування приладу провести, порівняти його покази з показами еталонного міліамперметра  $I_0$  в межах 0...200 мА.

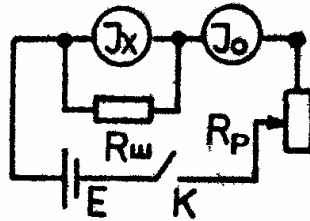


Рис.1.3.4.

4. Скласти схему відповідно до рис. 1.3.3, попередньо обчисливши номінальне значення еталонного опору  $R_0$  для того, щоб на його потенціальних клеммах можна було б вимірювати потенціометром ПП-63 спад напруги при максимальній силі струму в колі  $I = 1$  мА. Після установки опору шунта на магазині R-33 та його підгонки виміряти за допомогою потенціометра ПП-63 зміну спаду напруги на  $R_0$  при зміні сили струму в колі від 0 до 1 мА. Визначити за законом Ома силу струму в колі.

Для вимірювання напруги потенціометром ПП-63 необхідно:

1. Коректором гальванометра встановити його стрілку на нуль.
2. Дотримуючись полярності, підмикнути до клем "X" потенціальні клема зразкового резистора  $R_0$ .
3. Перемикач "Род работы" поставити в положення "Потенц."
4. Перемикач "Питание" встановити у положення "Вкл."
5. Штепсель перемикача меж вимірювання "mV" зафіксувати в потрібне положення: "X0,5", "X1" або "X2" залежно від величини вимірюваної ЕРС (до 25, 50 або 10 мВ відповідно).
6. Перевірити робочий струм потенціометра. Для цього необхідно перемикач "К-И" (Контроль-вимірювання) поставити в положення "К", а ручками "Грубо" і "Точно" реостата "Рабочий ток" встановити стрілку гальванометра на нуль при послідовному натисканні кнопок "Грубо" та "Точно".
7. Виконати вимірювання. Для цього слід:
  - 1) перемикач «К-И» поставити в положення "И";
  - 2) повернути рукоятки секційного перемикача та расхода відлікового потенціометра "mV" (при натиснених відповідно кнопках "Грубо" та "Точно"), встановити стрілку гальванометра на нуль;
  - 3) значення вимірюваного спаду напруги на  $R_0$  (у мілівольтах) дістати перемноженням суми показів секційного перемикача та реохорда на множник, встановлений на перемикачі меж потенціометра "mV".

Під час роботи потенціометра від внутрішніх джерел живлення та використанні змонтованого на приладі гальванометра перемикачі біля клем "НЭ" (рос. нормальный элемент – нормальний елемент), "БИ" (рос. Батарея источника – батарея джерела регульованої напруги) та "Г" (гальванометр) повинні знаходитись у положенні "В" (внутрішній) та в положенні "Н" (рос. Наружный - зовнішній) при підмиканні до цих клем зовнішніх джерел живлення та гальванометра. Перемикач "±" служить для зміни полярності компенсаційної напруги потенціометра. Положення решти ручок може бути довільним.

8. Дані вимірювань звести в таблицю і побудувати градувальні графіки.
9. Розрахувати за формулою (1.3.2) довжину мідної дротини для виготовлення шунта для сили струму 0,2 А ( $\rho_{\text{м}} = 1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м).

Виготовити шунт і виміряти його опір за допомогою мосту Ф4016. Порівняти розраховане і виміряне значення опору шунта.

#### Контрольні завдання і запитання.

1. Як визначити внутрішній опір мікроамперметра?

2. Які дані необхідні для розрахунку шунтів для струмів 1 А і 0,2 А?
3. Як (паралельно чи послідовно) необхідно під'єднувати шунт до мікроамперметра?
4. Як виконати градування мікроамперметра з розширеною межею вимірювань методом безпосередньої оцінки?
5. Як проградувати мікроамперметр з розширеною межею вимірювань непрямим способом вимірювань напруги на еталонному резисторі?
6. Як розширити межу вимірювань сили струму електровимірювального приладу магнітоелектричної системи?
7. У чому полягає принцип дії, яке рівняння шкали, в чому перевага і недоліки вимірювальних приладів магнітоелектричної системи?
8. Які методи використовують для градування приладів з розширеною межею вимірювань?
9. Яким вимогам повинен відповідати матеріал дротини, яка має бути використаною для виготовлення шунта?
10. Що називають коефіцієнтом шунтування (шунтуючим множником)?
11. У чому полягає принцип дії потенціометра постійного струму? Як за допомогою потенціометра виміряти опір і силу струму?
12. Як виміряти внутрішній опір електровимірювального приладу з допомогою моста постійного струму?

[6; 7; 14; 18; 19; 25]

## Лабораторна робота 1.4. Розширення межі вимірювань мілівольтметра

**Мета роботи** – визначити параметри вольтметрів, розширити межі їх вимірювань та градування приладів з різною чутливістю.

### 1.4.1. Основні теоретичні відомості

Кожний вимірювальний прилад виготовляють, розраховуючи його на певний максимальний для нього струм. Тому для кожного вимірювального приладу існує граничне значення вимірюваного ним струму або напруги. Але завжди є можливість розширити межі вимірювання даного приладу, або збільшити ціну поділки його шкали в тому випадку, коли виникає необхідність у цьому. Щоб підвищити ціну поділки вольтметра і, таким чином, пристосувати його для вимірювання напруг більших, ніж та, на яку він розрахований, треба послідовно з ним увімкнути провідник, що має деякий опір.

Додатковий опір цього провідника легко обчислити, якщо відомо внутрішній опір вольтметра. Оскільки при послідовному сполученні провідників напруги на окремих ділянках кола пропорційні опорам цих ділянок, опір  $R_g$  додаткового провідника

(рис. 1.4.1) знайдемо з пропорції  $\frac{U_g}{U_B} = \frac{R_B + R_g}{R_B}$ , звідки

$$R_g = R_B (P - 1), \quad (1.4.1)$$

де  $P = U_P / U_B$ .

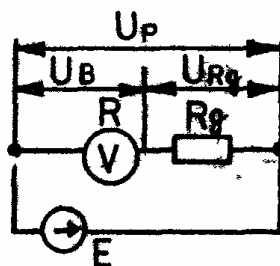


Рис.1.4.1.

Таким чином, для розширення межі вимірювання вольтметра в  $P$  раз опір додаткового резистора має бути в  $(P-1)$  раз більший, ніж внутрішній опір приладу.

Додатковий резистор звичайно виготовляють з матеріалів, які мають малий температурний коефіцієнт опору і великий питомий опір (манганін, константан та ін.).

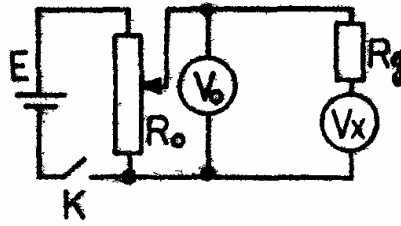


Рис.1.4.2.

Після виготовлення додаткового резистора з потрібним опором і приєднання його послідовно до вольтметра останній треба проградувати за схемою, яка показана на рис. 1.4.2. Змінюючи напругу, яка подається на вольтметри, з допомогою потенціометра  $R_0$  порівнюють покази досліджуваного приладу з показами еталонного (зразкового) вольтметра. При цьому конче потрібно, щоб обидва прилади мали межі вимірювань одного порядку. В протилежному випадку точність градування буде низькою. Через це часто виникають деякі труднощі при градуванні приладів, які розраховані на малі межі вимірювань. Звичайні високочутливі прилади не можуть служити при цьому еталонами, оскільки їх градування під дією різних зовнішніх факторів з часом порушується. Найбільш придатними приладами для цього є компенсаційні потенціометри, які дають змогу вимірювати малі напруги з дуже високою точністю.

Для градування вольтметра в разі відсутності потенціометра з потрібними межами вимірювань ефективно може бути використано такий прийом. На високоомний резистор  $R_0$  (рис. 1.4.3) подається напруга  $U_0$ , значення якої контролюється еталонним (зразковим) вольтметром  $V_0$ .

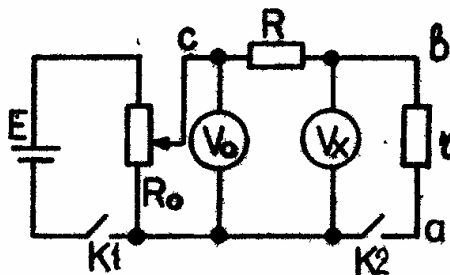


Рис.1.4.3.

До вольтметра  $V_x$ , який градуують, приєднано змінний резистор  $r$ .

Спад напруги на вольтметрі  $U_x$  можна обчислити, якщо відомі величини  $U_0$ ,  $r$ ,  $R$  і його внутрішній опір  $R_{вн}$ . Як видно зі схеми (рис. 1.4.3), спад напруги на ділянці

$$U_{ac} = U_x = I \frac{R_{вн} r}{R_{вн} + r}. \quad (1.4.2)$$

Спад напруги на ділянці  $abc$   $U_0 = U_x + U_R$ , де  $U_R$  – спад напруги на опорі  $R$ ;

$$U_0 = I \left( R + \frac{R_{вн} r}{R_{вн} + r} \right). \quad (1.4.3)$$

Як відомо, в разі послідовного сполучення провідників, сила струму  $I$  на всіх ділянках кола однакова. Це дозволяє з (1.4.2) і (1.4.3) дістати формулу для розрахунку  $U_x$ , що необхідно для градування приладу:

$$U_x = U_0 \frac{R_{вн} r}{R(R_{вн} + r) + R_{вн} r}. \quad (1.4.4)$$

### 1.4.2. Прилади та обладнання

Досліджуваний мілівольтметр М-24, еталонний вольтметр М390 – 3 В, магазин опорів Р-32 – 2 мм; реостат РСР-200-600 Ом; лабораторне джерело живлення ЛІП-90 до 4 В, ключ лабораторний. Завдання і методика експерименту:

1. Скласти схему для досліджень згідно з рис. 1.4.3.
2. Визначити внутрішній опір  $R_{вн}$ . Установити  $R = 30 \dots 50$  кОм, для того, щоб показати приладу  $V_X$  не перевищували межі його вимірювань. Увімкнути джерело живлення і встановити з допомогою реостату  $R$   $U_0 = 2 \dots 2,5$  В так, щоб стрілка досліджуваного приладу була на якійсь поділці в другій половині шкали. Якщо при цьому значення напруги  $U_0$  змінюється, то її треба відновити, переміщуючи повзунок реостата  $R_0$ . Зафіксувавши поділку, проти якої зупинилась стрілка мілівольтметра  $V_X$ , слід замкнути ключ К2. Опір  $r$  при цьому має дорівнювати нулю. Зменшити величину  $r$  удвоє і, підтримуючи напругу  $U_0$  весь час незмінною, відновити початкове положення стрілки вольтметра  $V_X$ , поступово збільшуючи величину  $r$ . При рівності показів мілівольтметра до і після увімкнення опору  $r$  останній буде дорівнювати  $R_{вн}$ . Таким чином, значення  $R_{вн}$  можна визначити безпосередньо з декад магазину  $r$ .
3. З допомогою схеми (рис. 1.4.3) проградувати мілівольтметр, використовуючи для цього (1.4.4).
4. Обчислити за формулою (1.4.1) опір додаткового резистора, який розширює межу вимірювань у досліджуваного мілівольтметра до  $2,0 \dots 2,5$  В.
5. Проградувати прилад з розширеною межею вимірювань, використовуючи для цього схему, подану на рис. 1.4.2. Порівняти теоретично обчислений опір додаткового резистора із опором, знайденим дослідним шляхом.
6. Дані вимірювань звести в таблицю і побудувати градувальні графіки. Оцінити похибку вимірювань.

#### Контрольні завдання і запитання.

1. Як визначити внутрішній опір використовуваного в роботі мілівольтметра?
2. Як проградувати мілівольтметр з допомогою схеми, яка використовується в роботі для визначення його внутрішнього опору?
3. Як обчислити опір додаткового резистора, який розширює межу вимірювань випробовуваного мілівольтметра до  $2 \dots 2,5$  В? Які дані необхідні для цього?
4. Як проградувати мілівольтметр з розширеною межею вимірювань до  $2,0 \dots 2,5$  В методом безпосереднього порівняння?
5. У чому полягає принцип дії; яке рівняння в шкали; в чому переваги й недоліки вимірювальних приладів електромагнітної системи?
6. Як розширити межу вимірювань вольтметра магнітоелектричної системи?

[6; 7; 14; 19; 25]

## 2. ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ ЕЛЕКТРОСТАТИКИ

### Лабораторна робота 2.1. Дослідження електростатичних полів методом електролітичної ванни

**Мета роботи** – побудувати розподіл екіпотенціальних ліній заданої системи електродів та траєкторій частинок за знайденим розподілом електростатичного поля.

#### 2.1.1. Основні теоретичні відомості

Вивчення електростатичних полів методом електролітичної ванни – найпрактичніший метод експериментального дослідження складних електростатичних полів. Таке завдання виникає, наприклад, при конструюванні багатоелектродних ламп або пристроїв, фокусуючих

електрони в таких приладах, як осцилограф, електронний мікроскоп, електронно-оптичний перетворювач зображень. Для побудування траєкторій і заряджених частинок у таких складних полях треба знати розподіл потенціалу на всьому шляху руху частинки. Цей розподіл можна одержати і рівнянням основного рівняння електростатики - рівняння Лапласа або ж експериментально.

### Метод електролітичної ванни.

Розглянемо систему заряджених електродів, яка створює електростатичне поле. Простір між ними заповнений матеріалом, який будемо вважати однорідним середовищем, а потенціали підтримуються сталими. Для того, щоб поверхні електродів прийняли за екіпотенціальні, необхідно виконати току умову: провідність середовища повинна бути набагато меншою, ніж провідність матеріалу електродів. У кожній точці простору виконується закон Ома:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \quad (2.1.1)$$

де  $\sigma$  - провідність середовища.

Для стаціонарного електричного струму в електроліті

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0. \quad (2.1.2)$$

Із співвідношень (2.1.1) та (2.1.2) дістанемо

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{j} &= \operatorname{div}(\sigma \vec{E}) = \sigma \operatorname{div} \vec{E} = \\ &= \sigma \left[ (\partial E_x / \partial x) + (\partial E_y / \partial y) + (\partial E_z / \partial z) \right] = 0; \\ (\partial E_x / \partial x) + (\partial E_y / \partial y) + (\partial E_z / \partial z) &= 0. \end{aligned} \quad (2.1.3)$$

Для потенціалу рівняння (2.1.3) має вигляд

$$\left( \partial^2 \phi / \partial x^2 \right) + \left( \partial^2 \phi / \partial y^2 \right) + \left( \partial^2 \phi / \partial z^2 \right) = 0, \quad (2.1.4)$$

тобто збігається з рівнянням Лапласа. Згідно з теоремою про єдність рішення в рівнянні Лапласа можуть бути однозначно визначені потенціали усіх електродів. Оскільки потенціал електростатичного поля теж задовольняє рівняння Лапласа, то при однакових потенціалах на електродах розподіл потенціалу в міжелектродному просторі не залежить від середовища. Тому розподіл потенціалу, знайдений в електролітичній ванні, може бути перенесений на поля провідників у вакуумі. Щоб запобігти зміні  $\sigma$  внаслідок поляризації, треба на електроди подавати змінний електричний струм. Змінне електричне поле при цьому повинне задовольняти умову квазістаціонарності.

Ця умова виконується, коли довжина електромагнітної хвилі  $\lambda = c / \sqrt{\epsilon}$  у електроліті в набагато більшою, ніж розміри ванни  $l$ :  $\lambda \gg l$ .

Лінійні розміри ванни повинні бути також значно меншими за глибину проникнення  $h$  електромагнітного поля в електроліт (скін-ефект):  $l \ll h$ , де  $h = c / 2\pi \sqrt{\nu \sigma}$ .

### Метод перерізів.

Розглянемо систему заряджених електродів, яка має осі симетрії (еквіпотенціальні поверхні є поверхнями обертання) і знаходиться в електроліті, а також горизонтальну площину, яка містить вісь симетрії. Внаслідок симетрії електричне поле не може мати нормальної до цієї площини компоненти. Розріжемо систему електродів на дві симетричні частини вздовж площини. Вилучимо верхню частину електроліту разом з електродами і наповнимо (в уяві) верхній на-півпростір якимось діелектриком, наприклад, повітрям. Якщо потенціали електродів у нижньому напівпросторі залишити без змін, то й поле там не зміниться. Для показу цього зауважимо, що нормальна компонента густини струму  $\vec{j}$  в електроліті на межі розділу має перетворюватися в нуль. У протилежному випадку на межі розподілу відбувалося б накопичення зарядів. Згідно з законом Ома  $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ , а тому має перетворитися в нуль і компонента електричного поля  $\vec{E}$ .

Як відомо з електростатики, завданням потенціалу провідників та нормальної компоненти вектора  $\vec{E}$  на межі розподілу можна визначити електричне поле. Згідно з теоремою про єдність рішення рівняння Лапласа поле в нижньому напівпросторі залишається без змін. На цьому принципі побудовано метод перерізів. Використовуючи цей метод, розглядають тільки половину моделі електродів, яку дістають розрізанням системи вздовж площини, що містить вісь симетрії. Цю половину моделі зануряють у ванну так, щоб площина перерізу збігалася з поверхнею електроліту. За допомогою зонда вивчають розподіл потенціалу на поверхні електроліту. Такий розподіл буде збігатися з розподілом потенціалу у будь-якій площині, яка містить вісь симетрії електродів. Цей метод має такі переваги:

1. Поля, які утворюються підвідними дротинами, не вносять великих збурень.
2. Коротким зондом можна виміряти розподіл потенціалу на поверхні електроліту.

### 2.1.2. Прилади та обладнання

Електролітична ванна; зонди; магазин резисторів; електронний осцилограф; джерело змінного струму; змінний резистор; плоский конденсатор; вимикач; дві пластини з круглим отвором; два циліндри з однаковими діаметрами; два циліндри з різними діаметрами.

### 2.1.3. Завдання і методика експерименту

Для вивчення розподілу поля використовують електролітичну ванну з водою. Ванна, зроблена з органічного скла, має дно, яке піднімається, та чотири клеми для під'єднання електродів. Зонд виготовлено з тонкого дроту, один кінець якого знаходиться на 1 мм нижче від рівня води у ванні, а може рухатись по поверхні. Його положення фіксується двома взаємно перпендикулярними лініями.

Треба скласти схему, яку наведено на рис. 2.1.1, де плечі AB і BC – магазини резисторів R1 і R2, а плечі AF та FC – ділянки електроліту між зондами D, E та F.

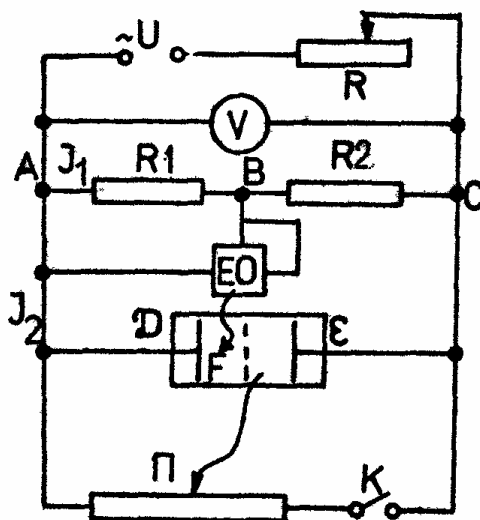


Рис.2.1.1.

Існування перехідного шару між електродами та електролітом приводить до того, що в плечі DF та FE містка включені деякі ємності C1 і C2. Внаслідок цього між напругами  $U_{AB}$  та  $U_{DF}$  існує зсув фаз.

Пересуваючи зонд по поверхні електроліту, можна знайти таку точку, де  $U_{AB}$  дорівнюватиме за амплітудою  $U_{DF}$ .



$\varphi_3 < \varphi_{сер}$ , де  $\varphi_{сер}$  - потенціал, який виникає в місці розміщення площини при її відсутності.

3. Роз'єднати кулю D. Зняти екіпотенціальні лінії поля зарядженої кулі, яка знаходиться біля зарядженої площини. Значення потенціалів слід брати такими самими, як в п.2.

**Завдання №2.**

1. Зняти екіпотенціальні лінії двох одноіменно заряджених куль. Розмістити вздовж стінок провідний екран та подати на нього потенціал точки C. Обидві кулі з'єднати провідником та подати на них потенціал точки A.
2. Роз'єднати одну з куль. Біля залишеної кулі розмістити ізолюючу площину та зняти екіпотенціальні лінії поля зарядженої кулі.
3. Порівняти одержану картинку з полем одноіменно заряджених куль.

**Завдання №3.**

1. Зняти екіпотенціальні лінії поля плоского конденсатора Звернути увагу на викривлення поля на краях.
2. Розмістити між площинами конденсатора металеве циліндричне кільце та зняти екіпотенціальні лінії в цих умовах (рис. 2.1.3).

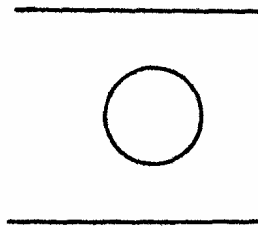


Рис.2.1.3.

**Завдання №4.**

Розмістити між плоскими електродами дві пластинки (рис. 2.1.4).

Для того щоб позбавитись від крайового ефекту, короткі пластини конденсатора замінити на довгі (на рис. 2.1.4 їх показано штриховою лінією). Необхідно слідкувати за тим, щоб пластинки доходили до дна ванни.

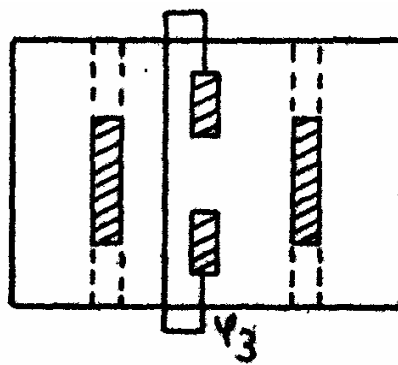


Рис.2.1.4.

Здобута система електродів являє собою найпростішу модель електростатичної лінзи, яка використовується для фокусування електронів.

Слід дослідити розподіл поля для випадків, коли потенціал середніх пластинок такий:

$$\varphi_3 = \varphi_{сер}, \varphi_3 > \varphi_{сер}, \varphi_3 < \varphi_{сер},$$

де  $\varphi_{сер}$  - потенціал, який виникає в місці, де мають знаходитися додаткові електроди за їх відсутності.

**Завдання №5.**

Зняти екіпотенціальні лінії 2-х пластинок з круглими отворами (рис. 2.1.5).

На рис. 2.1.5 показано тільки половину електродів, яка знаходиться в електроліті. Штриховою лінією показано електрод цілком.

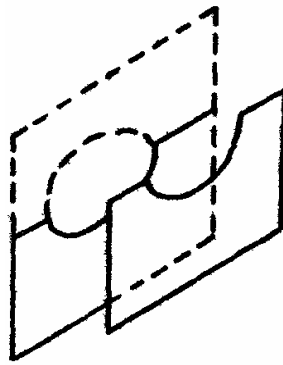


Рис.2.1.5.

Така система електродів являє собою модель електростатичної лінзи, яка використовується у фокусуєчому пристрої осцилографа.

**Завдання №6.**

Зняти екіпотенціальні лінії електростатичної лінзи, яка утворена з двох круглих циліндрів 1 та 2 (розміщених уздовж осі  $a-a'$ ). Така лінза теж використовується у фокусуєчому пристрої осцилографа.

Дослідити два випадки, коли діаметри циліндрів однакові (рис. 2.1.6) та різні (рис. 2.1.7).

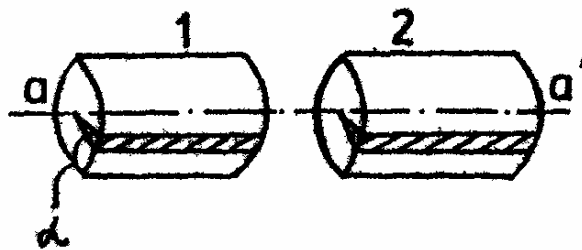


Рис.2.1.6.

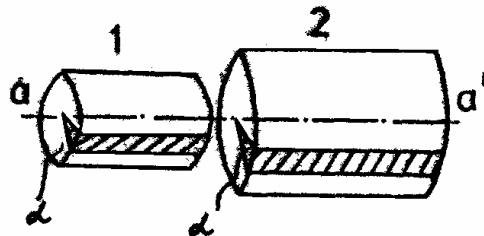


Рис.2.1.7.

Оскільки поле симетричне відносно осі  $a-a'$ , то у ванні треба дослідити лише сектор такого поля, який показано на рис. 2.1.1 і 2.1.2 штриховою лінією. Для цього треба за допомогою підйомного дна ванни створити клин з кутом  $\alpha$ .

Електродами вибрати плоскі пластинки.

**Побудова траєкторій заряджених часток**

У завданнях № 4-6 за отриманою системою екіпотенціальних поверхонь треба вміти побудувати траєкторію зарядженої частки. Траєкторія зарядженої частки, яка рухається в вакуумі, як правило, не збігається з напрямком нормалі до екіпотенціальної поверхні. Існує аналогія між світловою та електронною геометричною оптикою, тому можна вважати, що заломлення траєкторій електронів є аналогічним до заломлення променів світла.

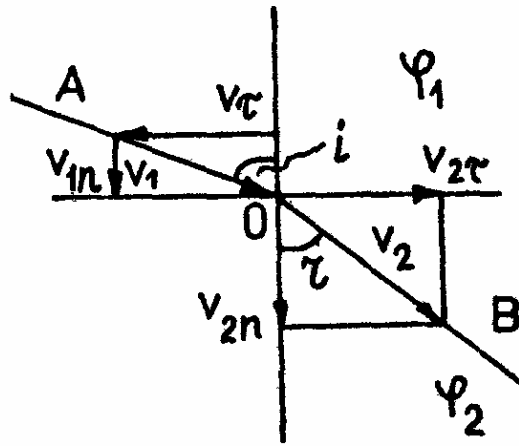


Рис.2.1.8.

Розглянемо плоску поверхню, яка розділяє дві області (рис. 2.1.8). Нехай потенціал над поверхнею буде  $\varphi_1$ , під поверхнею –  $\varphi_2$  та  $\varphi_1 < \varphi_2$ . Вище та нижче від області стрибка потенціалу електрон рухається за інерцією прямолінійно та рівномірно. На поверхні завдяки стрибку потенціалу на електрон починає діяти сила, яка спрямована нормально до межі розділу. Ця сила може змінювати лише нормальну компоненту швидкості  $V_n$ . Якщо електрон влітає в область стрибка потенціалу в напрямку АО з швидкістю  $V$ , то після того як він пройде через поверхню, напрям його руху (OB) зміниться. Тангенційна компонента швидкості  $V_\tau$  залишиться незмінною. Тому можна записати:  $V_1 \sin i = V_2 \sin r$ , де  $i, r$  – кут відповідно падіння і заломлення.

$$\sin i / \sin r = V_2 / V_1. \quad (2.1.5)$$

Ця залежність між  $i$  та  $r$  за формою збігається з відомим законом заломлення світла і тому має назву закон заломлення в електронній оптиці.

Формулу (2.1.5) можна записати інакше. Роботу, яку здійснює поле при проходженні електрона із середовища 1 у середовище 2, позначають  $e(\varphi_2 - \varphi_1)$ .

За законом збереження енергії

$$1/2 m V_2^2 = 1/2 m V_1^2 + e(\varphi_2 - \varphi_1),$$

звідки

$$V_2 / V_1 = \sqrt{1 + \frac{e(\varphi_2 - \varphi_1)}{1/2 m V_1^2}}.$$

Якщо знехтувати початковою швидкістю частинки та припустити, що її швидкість визначається потенціалом середовища 1,

$$1/2 m V_1^2 = e\varphi_1,$$

то

$$V_2 / V_1 = \sqrt{\varphi_2 / \varphi_1}.$$

Тоді закон заломлення (2.1.5) матиме вигляд

$$\sin i / \sin r = \sqrt{\varphi_2 / \varphi_1}. \quad (2.1.6)$$

Як бачимо з (2.1.6), роль коефіцієнта заломлення в електронній оптиці відіграє  $\sqrt{\varphi}$ . На відміну від геометричної оптики, де коефіцієнт заломлення змінюється стрибком при переході з одного середовища в інше, в електронній оптиці коефіцієнт заломлення змінюється неперервно.

Для приблизної побудови траєкторії зарядженої частинки в електричному полі, його треба розбити на екіпотенціальні шари, які поділені екіпотенціальними поверхнями. Чим тонший шар, тим більша точність побудови. Від однієї лінії рівного потенціалу до другої

(всередині шару) рух частинки вважатимемо прямолінійним та рівномірним. На лініях рівного потенціалу відбуватиметься заломлення руху частинки за законом

$$\sin i / \sin r = \sqrt{(\varphi_i + 1) / \varphi_i} . \quad (2.1.7)$$

Вимірюючи кут падіння  $i$  (рис.2.1.9), можна обчислити кут заломлення  $r$  та провести коротку пряму лінію до перетину її з наступною лінією рівного потенціалу. Точність цього методу залежить від кількості ліній рівного потенціалу.

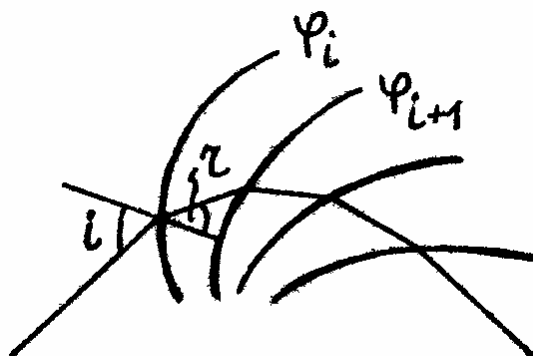


Рис.2.1.9.

### Контрольні завдання і питання.

1. В якому випадку  $\text{div} \vec{j} = 0$  ( $\vec{j}$  – густина електричного струму в електроліті)?
2. Принцип методу електролітичної ванни.
3. Принцип методу перерізів.
4. Чому розподіл потенціалу, який одержано в електролітичній ванні, може бути перенесений на випадок провідників у вакуумі?
5. Яке поле можна назвати квазістаціонарним?
6. Граничні умови вектора  $\vec{E}$  на межі розподілу двох середовищ.
7. Робота схеми, яка наведена на рис. 2.1.3.
8. Принцип побудови зображень в електронному осцилографі.

[Заводський опис приладу; 1; 2; 4-9; 11; 17]

## Лабораторна робота 2.2. Математичне моделювання електростатичних полів полем постійного струму з використанням електропровідного паперу

**Мета роботи** – вивчити метод моделювання для розв’язання задач електростатики; загальні принципи вимірювання напруженості поля, ємності та провідності тіл за картою поля.

### 2.2.1. Основні теоретичні відомості

У деяких випадках при наявності у тіл складної форми обчислення ємності виявляється складним або практично неможливим. У цьому випадку використовують метод математичного моделювання електростатичного поля полем постійного струму в провідному середовищі. Він ґрунтується на формальній математичній аналогії між рівняннями, які описують електричні процеси. Для однорідного та ізотропного середовища виконуються рівняння, наведені в табл. 2.2.1.

Найбільш просто моделювати плоскопаралельне поле. В цьому випадку рівняння Лапласа для електростатичного поля (оригіналу) має вигляд

$$\text{div} \epsilon_a \text{grad} \varphi = (\partial/\partial x) \left( \epsilon_a \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + (\partial/\partial y) \left( \epsilon_a \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) = 0 . \quad (2.2.1)$$

Таблиця 2.2.1.

№ п/п	Електростатичне поле	Електричне поле при $I=const$
1	$\vec{E} = -grad\varphi$	$\vec{E} = -grad\varphi$
2	$\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E}$	$\vec{j} = \vec{\sigma}\vec{E}$
3	$div(\varepsilon_a grad\varphi) = 0$ при $\rho_b = 0$	$div(\vec{\sigma} grad\varphi) = 0$ при $\vec{E}_{сноп} = 0$
4	$E_{\tau_1} = E_{\tau_2}$	$E_{\tau_1} = E_{\tau_2}$
5	$D_{n_1} = D_{n_2}$	$j_{n_1} = j_{n_2}$

Рівняння Лапласа для поля постійного струму (моделі) записується аналогічно:

$$div(\sigma grad\varphi) = (\partial/\partial x)\left(\sigma \frac{\partial\varphi}{\partial x}\right) + (\partial/\partial y)\left(\sigma \frac{\partial\varphi}{\partial y}\right) = 0. \quad (2.2.2)$$

Величини, які належать до моделі, будемо позначати індексом М:  $\varphi_M, x_M, y_M$ . Рівняння (2.1.2) тоді запишемо так:

$$(\partial/\partial x_M)\left(\sigma \frac{\partial\varphi_M}{\partial x_M}\right) + (\partial/\partial y_M)\left(\sigma \frac{\partial\varphi_M}{\partial y_M}\right) = 0.$$

Введемо коефіцієнти моделювання:

$$m_\varphi = \varphi_M/\varphi; \quad m_l = l_M/l = x_M/x = y_M/y; \quad m_\varepsilon = \sigma/\varepsilon_a.$$

Якщо виразити параметри моделі  $\varphi_M, l_M, \sigma$  за допомогою масштабних коефіцієнтів і параметрів оригіналу, то (2.2.2) матиме такий вигляд:

$$(1/m_l)(\partial/\partial x)\left[m_l\varepsilon_0 \frac{\partial(m_\varphi\varphi)}{m_l\partial x}\right] + (1/m_l)(\partial/\partial y)\left[m_\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial(m_\varphi\varphi)}{m_l\partial y}\right] = 0,$$

або

$$(m_\varepsilon m_\varphi / m_l^2) \left[ (\partial/\partial x)\left(\varepsilon_a \frac{\partial\varphi}{\partial x}\right) + (\partial/\partial y)\left(\varepsilon_a \frac{\partial\varphi}{\partial y}\right) \right] = 0. \quad (2.2.3)$$

Рівняння (2.2.3) є аналогічним рівнянню (2.2.1), якщо співмножник  $m_\varepsilon m_\varphi / m_l^2 = 1$ . Співвідношення  $m_\varepsilon m_\varphi / m_l^2 = 1$  називається критерієм моделювання. При створенні моделі коефіцієнт  $m_l$  вибирають для зручності масштабів. Коефіцієнт  $m_\varepsilon$  пов'язано з використаним в експерименті електропровідним папером з провідністю  $\sigma$ , тоді  $m_\varphi = m_l^2 / m_\varepsilon$ .

Граничні умови задаються в моделі так:

1. Якщо в оригіналі на границі  $\partial\varphi/\partial\tau = 0$ , то в моделі також повинна задовольнятися умова  $\partial\varphi_M/\partial\tau = 0$ . Отже границя є лінією рівного потенціалу і необхідно в моделі по цій лінії накласти металеву шину, роль якої виконує мідний провідник, або наклеїти електропровідним клеєм металеву фольгу.
2. Якщо в оригіналі границя проходить по силовій лінії, то в кожній точці границі оригіналу  $\partial\varphi_M/\partial r = 0$ . В моделі по цій межі образують електропровідний папір.

Таким чином, на межі моделі існує тільки дотична складова густини струму:  $j_\tau = E_\tau$ .

Отже, якщо досліджені процеси описуються аналогічними диференціальними рівняннями і витримані граничні умови, то картини двох полів (моделі і оригіналу) будуть однаковими.

Для побудови картини у вигляді ряду екіпотенціальних і силових ліній в роботі пропонується використати дуальні моделі. На вихідній і дуальній моделях будуть екіпотенціальні лінії. Екіпотенціальні лінії дуальної моделі використовують як силові для

вихідної моделі. Тим самим намагаються досягти більш точної побудови силових ліній, ніж у випадку використання методу “від руки”. В дуальній моделі папір на місці розташування металевих електродів вирізають, а електроди розміщують по силовій лінії (рис. 2.2.1 та 2.2.3).

**Приклад 1.** Модель плоского конденсатора.

А) Вихідна модель.

Б) Дуальна модель.

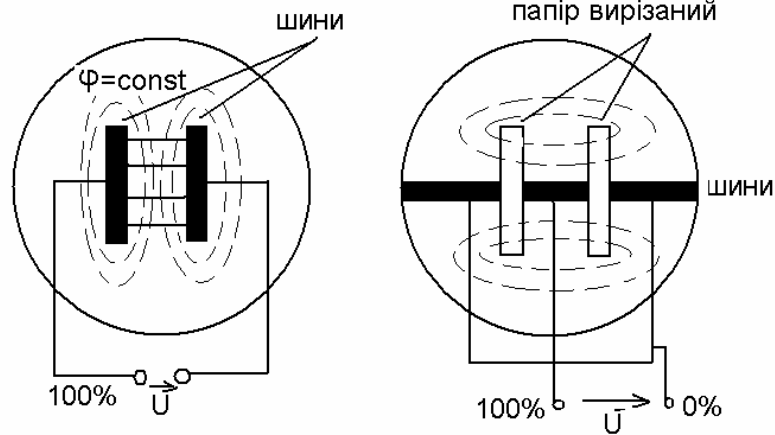


Рис.2.2.1.

**Приклад 2.** Модель однорідного поля.

а) Вихідна модель

б) Дуальна модель

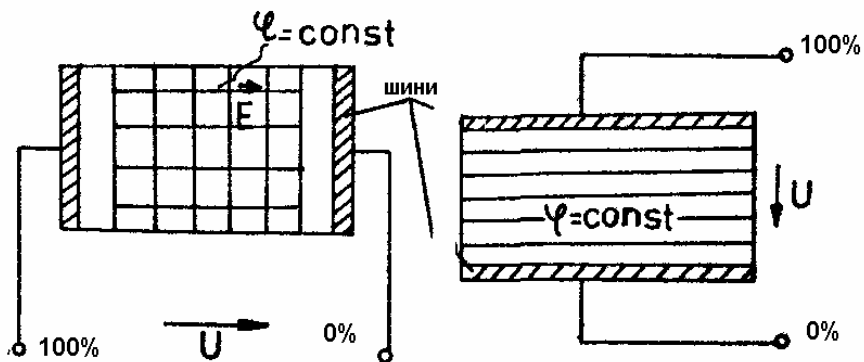


Рис.2.2.2.

**Приклад 3.** Модель двопровідної лінії.

а) Вихідна модель

б) Дуальна модель

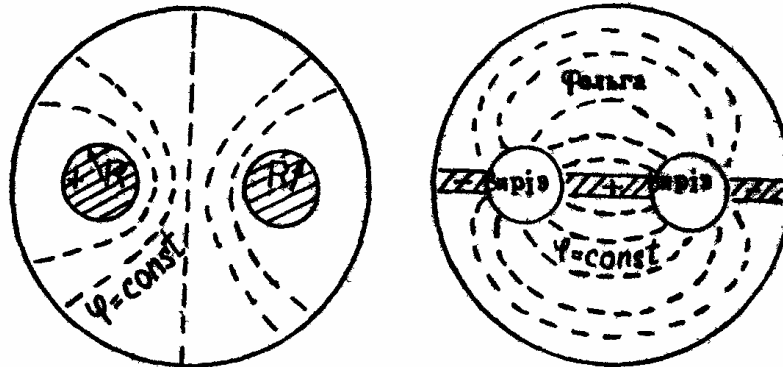


Рис.2.2.3.

За здобутою картиною поля в моделі визначається повна провідність через повний опір моделі:  $\bar{\sigma} = 1/R$ , де  $R = R_0(m/n)$ ,  $R_0 = 1/\bar{\sigma}'$ ;  $R_0$  - опір квадрата з провідного паперу;  $m$  - число криволінійних квадратів в силоній трубці поля;  $n$  - число силових трубок;  $\bar{\sigma}'$  - питома провідність паперу товщиною  $h$ .

Із співвідношення  $\sigma/c = \bar{\sigma}'/\varepsilon_a$  визначають ємність  $C$  на одиницю довжини, змінюючи в формулі для  $G$   $\bar{G}$  на  $\varepsilon_a$ , і остаточно маємо:

$$C_0 = \varepsilon_a (n/m), \quad (2.2.4)$$

де  $\varepsilon_a = \varepsilon\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_0 = 1/9\pi \cdot 10^9$  [Ф/м].

### 2.2.2. Прилади і обладнання

Установка складається з моделі, зробленої з електропровідного паперу, джерела постійного струму ( $U = 8 \dots 10$  В), двох магазинів опорів, гальванометра і вимірювального щупа. Для вимірювання використана мостова схема (рис. 2.2.4).

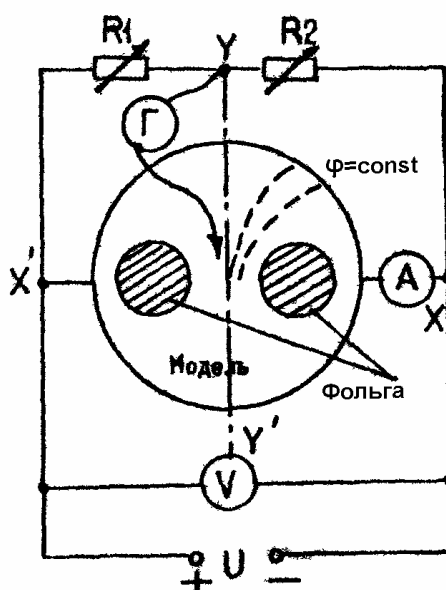


Рис.2.2.4.

### 2.2.3. Завдання та методика експерименту

1. Скласти схему згідно з рис. 2.2.4. Варіант моделі для досліджень пропонує викладач. Спочатку треба увімкнути вихідну модель.
2. Зняти за допомогою зонда-щупа лінії однакового потенціалу (еквіпотенціальні поверхні) з  $\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_{i+1} = 10\%$ ,  $U = const$ . Для цього треба по черзі виставляти значення опорів на магазинах відповідно до даних, наведених у табл. 2.2.2.

Таблиця 2.2.2.

$\varphi_i$	10% U	20% U	30% U	40% U	50% U
$R_1$	$\frac{1}{10}R$	$\frac{2}{10}R$	$\frac{3}{10}R$	$\frac{4}{10}R$	$\frac{5}{10}R$
$R_2$	$\frac{9}{10}R$	$\frac{8}{10}R$	$\frac{7}{10}R$	$\frac{6}{10}R$	$\frac{5}{10}R$

Тут  $R$  - сумарний опір, виставлений на двох магазинах опорів, який протягом виконання експерименту залишається незмінним (значення  $R$  і  $U$  задаються на стенді).

Побудувати картину еквіпотенціальних ліній поля на одній чверті моделі, оскільки поле є симетричним відносно горизонтальної ( $xx'$ ) та вертикальної ( $yy'$ ) осей (рис. 2.2.4).

Перенести картинку поля на аркуш кальки або міліметрового паперу, попередньо нанісши на нього границі моделі.

3. Виміряти методом амперметра та вольтметра опір моделі  $R_{вим}$  та опір стрічки  $R_C$ . За опором стрічки визначити опір одного квадрата паперу  $R_{\square} = R_n / K$ , де  $K$  – число квадратів стрічки. Результати занести в табл. 2.2.3.

Таблиця 2.2.3.

$U_M$	$I_M$	$U_n$	$I_n$	$K$	$R_{вим} = U_M / I_M$	$R_n = U_n / I_n$	$R_{\square} = R_n / K$

4. Підімкнути дуальну модель і побудувати картину еквіпотенціальних ліній на відповідній частині моделі. Побудовані еквіпотенціальні лінії дуальної моделі є силовими для вихідної моделі.

Перенести здобуті лінії на той самий аркуш міліметрового паперу. В результаті експерименту побудувати сітку із взаємно перпендикулярних ліній.

Методичні вказівки до оформлення результатів роботи:

1. Здобути картину поля на  $1/4$  частині моделі дзеркально відобразити відносно осей  $yy'$  та  $xx'$ . По сітці поля для всієї моделі обчислити число  $n$  силових трубок рівного потоку та число  $m$  квадратів у кожній силовій трубці (табл. 2.2.4).
2. Обчислити опір моделі  $R$  за одержаною сіткою поля, порівняти його з  $R_{вим}$  та визначити похибку:

$$\varepsilon = [(R_{вим} - R) / R_{вим}] \cdot 100\%.$$

Опір кожного із криволінійних квадратів слід вважати однаковим і таким що дорівнює  $R_{\square}$ .

Таблиця 2.2.4.

$m$	$n$	$R_{\square}$	$R_{вим}$	$R$	$\varepsilon, \%$	$C$

3. Методом аналогії обчислити ємність модельованого пристрою (оригіналу).

#### Контрольні завдання і запитання.

1. Граничні умови для векторів  $\vec{E}, \vec{D}, \vec{j}$  на межі розподілу двох середовищ (для електростатичного поля і поля постійного струму).
2. Як визначити напруженість електричного поля за відомим розподілом потенціалів?
3. Зміст методу амперметра та вольтметра для визначення опору.
4. Робота мостової схеми.
5. Які одиниці використовують для вимірювання в СІ таких величин:  $\vec{E}, \vec{D}, \vec{j}, R, I, U$ ?
6. У чому суть методів фізичного і математичного моделювання?
7. При якій умові стаціонарне електричне поле можна використати для дослідження електричного поля?

[1; 2; 4-9; 11; 17]

### Лабораторна робота 2.3. Визначення діелектричної проникності рідких діелектриків

**Мета роботи** – визначити діелектричну проникність і відносні втрати в рідких діелектриках.

#### 2.3.1. Основні теоретичні відомості

При прикладанні напруги в діелектриках створюється електричне поле з напруженістю  $E$ , сили якого діють на атоми діелектрика. Під дією цих сил електрони в кожному із атомів

зміщуються відносно свого ядра в бік позитивного електрода. Це пружне зміщення електронів відбувається у всіх атомів даного діелектрика.

Зміщені електрони утворюють з позитивними зарядами ядер атомів пари зв'язаних один з одним електричних зарядів, які називаються пружними диполями. Пружні диполі в діелектриках утворюються миттєво (за час  $10^{-14} \dots 10^{-16}$  с). Так само миттєво пружні диполі зникають, якщо з діелектрика (конденсатора) зняти напругу.

Процес утворення пружних диполів відбувається у всіх діелектриках і зветься електронною поляризацією.

Тверді (жорсткі) диполі виникають в діелектриках щодо дії прикладеної напруги, тобто щодо дії зовнішнього поля. Утворення твердих диполів і, отже полярних молекул зумовлене асиметрією будови молекул багатьох діелектриків. Симетрично побудовані молекули неполярних діелектриків, до яких відносять гази  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $CCl_4$  у газовому і рідкому станах, не утворюють жорстких диполів. Якщо до полярних діелектриків, до яких належать гази  $SO_4$ ,  $H_2S$ ,  $NH_3$ , рідини – воду  $H_2O$ , соляну кислоту  $HCl$ , метиловий спирт  $CH_3OH$ , бензол  $C_6H_6$ , ефіри тощо, прикласти електричну напругу, в них виникнуть два види поляризації: електронна і дипольна. Спочатку відбувається процес миттєвого зміщення електронів відносно ядер в атомах діелектрика – електронна поляризація. Далі в полярних молекулах протікає більш сповільнений процес дипольної поляризації. Він приводить до повороту полярних молекул під дією сил електронного поля.

Процес іонної поляризації (поляризації іонного зміщення) здійснюється в іонних кристалічних діелектриках, до яких відносять солі, природну й штучну слюду і матеріали на її основі. При прикладенні напруги до іонного кристалу в останньому починають діяти електричні сили, під дією яких іони пружно зміщуються щодо свого первинного положення. При цьому позитивно заряджений іон зміщується в одному напрямку, а негативно заряджений – у протилежному, тобто кожна пара іонів утворює пружний диполь. Це явище пружного зміщення іонів називають процесом іонної поляризації діелектриків, який відбувається за  $10^{-13} \dots 10^{-12}$  с. Поряд з процесом поляризації іонного зміщення в іонних кристалах протікає також і електронна поляризація.

Таким чином, якщо на діелектрики діє електричне поле, то в ньому може відбуватися зміщення зв'язаних зарядів або орієнтація дипольних молекул, тобто поляризація. Це явище зумовлює поверхневі заряди, які можуть частково компенсувати заряд конденсатора з таким діелектриком. При цьому ємність конденсатора з діелектриком стає більшою, ніж ємність тих самих пластин у вакуумі (повітрі). Відношення напруженості поля в вакуумі до напруженості в середовищі називається діелектричною проникністю. Поляризація діелектриків може характеризуватися відношенням ємності конденсатора з діелектриком  $C$  до ємності того самого конденсатора з вакуумом (повітрям)  $C_0$ :

$$\varepsilon = C / C_0 .$$

Діелектрична проникність речовин з чисто електронною поляризацією невелика (у газів вона близька до одиниці). В іонних кристалах на електронну поляризацію накладається поляризація іонного зміщення, а діелектрична проникність може бути порядку 10. У речовинах, які містять полярні молекули, в тому числі в рідинах, добавляється орієнтаційна теплова поляризація. Діелектрична проникність полярних рідин досягає 100, а дипольних кристалів – 300.

Частина енергії електричного поля, яка переходить у теплоту, називається діелектричними втратами. Для характеристики цієї величини вводять тангенс кута діелектричних втрат:

$$\operatorname{tg} \delta = W_T / W_{\max} ,$$

де  $W_T$  - енергія електронного поля, яка перетворилася в теплоту в одиниці об'єму за одиницю часу;  $W_{\max}$  - максимальна густина енергії електричного поля, яка запасється в діелектриці. Для конденсатора з втратами кут зсуву фаз між струмом і напругою в колі  $\varphi$ ,

менший  $\pi/2$ , а доповнювальний до нього кут  $\delta$  - це так званий кут діелектричних втрат (рис. 2.3.1).

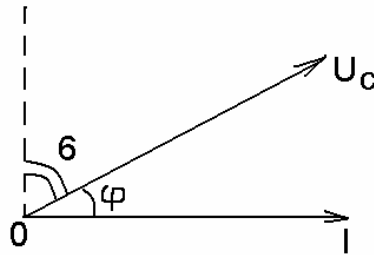


Рис.2.3.1

### 2.3.2. Прилади і обладнання

Генератор ГЗ-18; магазин індуктивностей Р-356; магазин опорів Р-33; електронний осцилограф СІ-15; електронний вольтметр ВС-38; частотомір; комплект конденсаторів з повітряним і рідким діелектриками.

### 2.3.3. Завдання і методика експерименту

Для визначення діелектричної проникності може бути використано резонансний метод. Від генератора гармонічних коливань (рис. 2.3.2) високих або низьких частот (залежно від вимог до установки) напруга підводиться до послідовного коливального контура. Цей контур складається з магазину індуктивностей  $L$ , конденсатора з досліджувальним діелектриком  $C$  (або такого самого конденсатора без діелектрика) і магазину опорів  $R$ , на якому набрано невеликий активний опір  $R$ . Напруга на ньому пропорційна силі струму в контурі. Вмикаючи в контур конденсатор з вакуумним (повітряним) діелектриком, знаходять резонансну частоту за максимумом струму в контурі (за максимумом спаду напруги на резисторі  $R$ ). Таким же чином визначають резонанс і при наявності конденсатора з досліджуваним рідким діелектриком.

З одержаних даних легко дістати  $\varepsilon$ . В роботі визначають  $\varepsilon$  для касторового і вазелінового масел.

Оскільки в присутності вакуумного (повітряного) діелектрика резонансна частота контура  $f_0 = 1/2\pi\sqrt{ZC_0}$ , а при одному з двох досліджуваних в роботі рідких діелектриків  $f_i = 1/2\pi\sqrt{ZC_i}$ , де  $C_i$  - ємність конденсатора з касторовим або вазеліновим маслом, шукану діелектричну проникність кожного із масел  $\varepsilon_i$  можна визначити з такого співвідношення:

$$\varepsilon_i = c_i / c_0 = f_0^2 / f_i^2,$$

де  $f_i$  - резонансна частота контура у випадку, коли досліджується конденсатор з рідким діелектриком.

Для визначення  $tg\delta$  знімають залежність спаду напруги на резисторі з активним опором, який пропорційний струму в контурі, від частоти генератора при незмінному значенні амплітуди його вихідної напруги. Далі будують резонансну характеристику контура  $U/U_{рез} = f(f)$ , на якій визначають його смугу пропускання, тобто інтервал частот  $f_2 - f_1$ , в якому напруга на активному опорі  $R$  зменшується порівняно з  $U_{рез}$  не більш, ніж у  $\sqrt{2}$  раз.

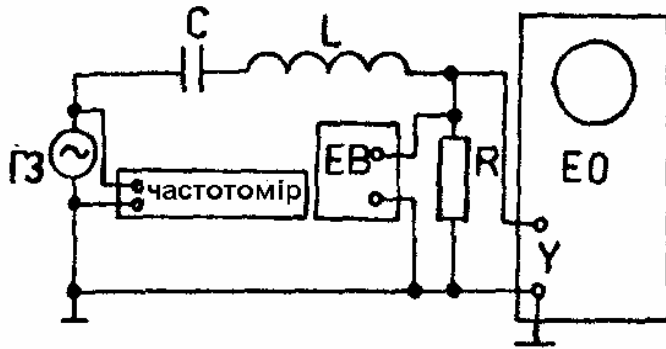


Рис.2.3.2.

Як відомо, відношення резонансної частоти контура до ширини його смуги пропускання  $Q = f_0 / (f_2 - f_1)$  називається добротністю контура. Крім того, добротність – це відносна величина, яка показує у скільки разів енергія, яку накопичено конденсатором С (або котушкою індуктивності Z) є більшою від тієї її частини, яка витрачається контуром на Ленца-Джоулеву теплоту при проходженні струму через резистор з активним опором R:

$$Q = I / \omega_{рез} CR = \omega_{рез} Z / R,$$

де I – струм у контурі;  $\omega_{рез}$  - циклічна резонансна частота.

Можна також показати, що  $tg\delta = (1/Q_i) - (1/Q_0)$ , де  $Q_0$  - добротність контура з вакуумним (повітряним) конденсатором;  $Q_i$  - добротність контура при наявності конденсатора з діелектриком.

1. Скласти схему для дослідження конденсаторів з повітряним і рідкими діелектриками згідно з рис. 2.3.2.
2. Здобути резонансні криві для трьох коливальних контурів, які містять конденсатори з різними досліджуваними діелектриками, особливо точно визначаючи частоти на рівні  $U / U_{рез} = 1/\sqrt{2}$  і резонансні частоти.
3. Побудувати резонансні криві і обчислити за знайденими даними діелектричні проникності і втрати для досліджуваних діелектриків.

#### Контрольні запитання.

1. Як побудувати резонансні криві для трьох коливальних контурів, які містять конденсатори з досліджуваними діелектриками?
2. Як визначити смугу пропускання коливального контура?
3. Як обчислити діелектричні проникності і втрати для досліджуваних діелектриків?
4. Що називається електроємністю? В яких одиницях СІ вона вимірюється?
5. Чому при введенні між обкладками конденсатора діелектрика його ємність зростає?
6. Чим зумовлені втрати енергії в діелектриках? Чим їх характеризують?
7. У чому суть механізмів електронної, дипольної та іонної поляризації діелектриків?
8. Причина наявності залежності діелектричної проникності в полярних діелектриків від частоти і прикладеної напруги.
9. Які механізми теплового і електричного пробоїв в діелектриці?
10. Принцип дії і конструкція конденсаторів з газоподібним, твердим і рідким діелектриком. Основні параметри конденсаторів. Приклади їх використання в електронних схемах.

[1; 3-9; 11; 20; 26; 27]

### Лабораторна робота 2.4. Вивчення властивостей сегнетоелектриків

**Мета роботи** – вивчити електричні та електротеплові властивості сегнетоелектриків.

### 2.4.1. Основні теоретичні положення

Діелектрична проникність  $\epsilon$  більшості кристалічних діелектриків має порівняно малі значення – одиниці або десятки одиниць. Значення  $\epsilon$  у звичайних діелектриків практично не залежать від температури, оскільки для них є характерною переважно індукована поляризація, яка реалізується завдяки зміщенню електронних оболонок в атомах.

Поряд з цим існує ряд кристалічних діелектриків (сегнетова сіль  $NaCl_4H_6O_6 \cdot 4H_2O$ , титанат барію  $BaTiO_3$  тощо), відносна діелектрична проникність яких досить сильно залежить від температури, є функцією напруженості зовнішнього магнітного поля і може досягати кількох тисяч ( $\epsilon \approx 10^3 - 10^4$ ). Такі діелектрики в певній області температур, яка називається полярною фазою, спонтанно поляризовані (мають дипольний момент одиниці об'єму  $\vec{P} \neq 0$ ) у відсутності електричного поля. Однак при певній температурі відбувається фазовий перехід другого роду, який супроводжується зміною симетрії кристалічної структури таких діелектриків. Вони переходять у неполярну фазу, де спонтанної поляризації немає.

Температура переходу  $T_K$  називається діелектричною точкою Кюрі. Діелектрики, які мають описані властивості, називаються сегнетоелектриками.

Як правило, сегнетоелектрик має тільки одну точку Кюрі, нижче від якої він знаходиться в полярній, а вище – в неполярній фазі. Лише сегнетова сіль та ізоморфні з нею з'єднання мають дві точки Кюрі: нижню  $T_{KH}$  і верхню  $T_{KV}$ . Спонтанна поляризація спостерігається в температурній області, яка обмежена цими точками, і не спостерігається при інших температурах.

Сегнетоелектрики характеризуються областями з різним напрямком вектора поляризації  $\vec{P}$ . Оскільки стан сегнетоелектрика у відсутності зовнішнього поля має відповідати мінімуму його електричної енергії, то макроскопічний зразок сегнетоелектрика при  $\vec{E} = 0$  самодовільно ділиться на області з різними напрямками вектора поляризації, які називаються доменами. У відсутності зовнішнього електричного поля дипольний момент макроскопічного зразка дорівнює нулю, оскільки поляризація одних доменів компенсується протилежно напрямленою поляризацією інших. Тонку структуру доменів було досліджено електронно-мікроскопічними методами. Так було знайдено мінімальну ширину доменів  $BaTiO_3$ , що становить 30...50 нм. Звичайно домени в  $BaTiO_3$  мають пластинчасту форму 0,004...0,01 мм завширшки.

Якщо сегнетоелектричний зразок помістити у зовнішнє магнітне поле, то він буде поляризуватися завдяки частковій переорієнтації дипольних моментів доменів і зростанню енергетично вигідних доменів за рахунок інших. Процес переорієнтації доменів у змінному полі є інерційним. Це призводить до явища діелектричного гістерезису в сегнетоелектриках, яке полягає у відставанні змін вектора поляризації  $\vec{P}$  від змін вектора напруженості  $\vec{E}$  електричного поля (рис. 2.4.1).

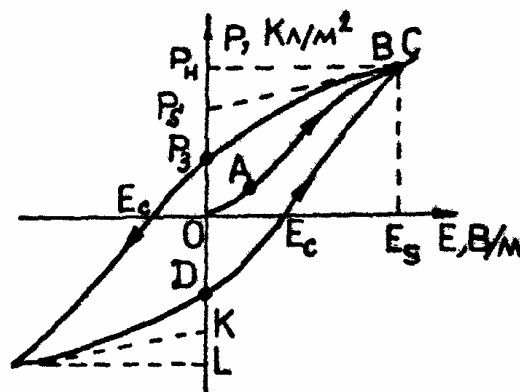


Рис.2.4.1.

Петля діелектричного гістерезису – одна з найважливіших характеристик сегнетоелектриків. Зокрема, її площа визначає діелектричні втрати в змінному полі. За рахунок цих втрат сегнетоелектрики у змінних полях нагріваються. Петля діелектричного гістерезису наочно демонструє роль доменів в явищі поляризації сегнетоелектриків.

Ділянка ОА показує, що в слабких полях, які існують у звичайних діелектриках, спостерігається лінійний зв'язок між вектором поляризації  $\vec{P}$  і напруженістю поля  $\vec{E}$ . Це означає, що наявність доменів ще не впливає на процес поляризації.

У сильних полях (ділянка АВ) спостерігається різке зростання вектора поляризації, що пов'язане з доменами, досягає насичення, і кристал стає однодоменим (дипольні моменти всіх елементарних комірок в об'ємі кристалу мають однаковий напрям уздовж поля).

При подальшому збільшенні напруженості поля (ділянка ВС) знову встановлюється лінійний зв'язок між  $\vec{P}$  та  $\vec{E}$ , що характеризує тільки індуктивну поляризацію, яка не пов'язана з доменними процесами. Крива ОАВ називається основною кривою поляризації сегнетоелектрика. Пряма ВС визначає область насичення поляризації, точка В – початок насичення,  $E_S$  – напруженість поля, при якій досягається насичення. Полю  $E_S$  відповідає повна поляризація сегнетоелектрика  $P_H$ , яка складається із спонтанної поляризації  $P_S$  та індуктивної  $P_I$  (відрізок KL).

Відрізок OD характеризує залишкову макроскопічну поляризацію  $P_3$ , що відзначається в сегнетоелектрику при проходженні напруженості електричного поля через нульові значення. Величина  $E_C$  називається коерцитивною напруженістю. Коерцитивне поле  $E_C$  чисельно дорівнює тій напруженості електричного поля, протилежно до вектора залишкової поляризації  $P_3$  напрямку, яку потрібно створити в сегнетоелектрику, щоб повністю його деполіризувати, тобто “зруйнувати” його монодоменну макроскопічну поляризацію.

Промислові сегнетоелектричні матеріали найчастіше виготовляють у вигляді кераміки на основі титанату барію, ніобату барію, титанату свинцю тощо, які легують різними домішками. Така кераміка має високі механічні і електричні показники, які характеризують її сегнетоелектричні властивості (значні діелектрична проникність, нелінійність, велика прямокутність гістерезисної петлі та ін.). Сегнетоелектричні нелінійні конденсатори дістали назву варікондів. Їх використовують для керування резонансною частотою коливального контура. Сегнетоелектричні малогабаритні кристали великої ємності застосовують також для мікромініатюризації радіотехнічної апаратури.

### 2.4.2. Прилади і обладнання

Електронний осцилограф СІ-13 з каліброваною шкалою; вольтметр АВ05-М; вимірник ємності НІЕ-1; потенціометр ПП-63; автотрансформатор ЛАТР-ІМ; панелі з досліджувальними сегнетоелектриками; проградуїрована термопара.

### 2.4.3. Завдання і методика експерименту

Електричну схему поля для утворення і дослідження петлі діелектричного гістерезису за допомогою електронного осцилографа наведено на рис. 2.4.2.

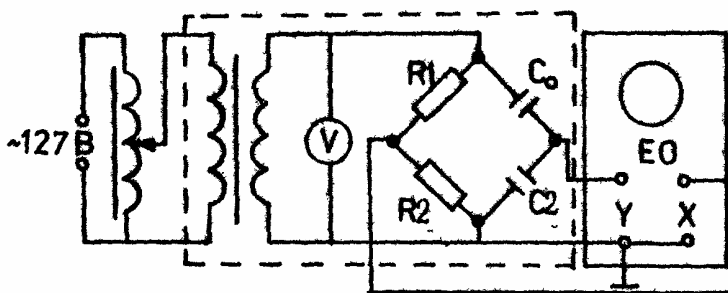


Рис.2.4.2.

Напруга від мережі змінного струму з допомогою двоступеневого регулятора напруги, який складається із лабораторного автотрансформатора з регулюванням і підвищувального

трансформатора подається на конденсатор з досліджуваним сегнетоелектриком  $C_0$  через конденсатор  $C_2$  із звичайним (лінійним) діелектриком. Ємність додаткового конденсатора  $C_2 \gg C_0$ , через це практично весь спад напруги припадає на  $C_0$ . З конденсатора  $C_2$  напруга  $U_2$  подається на Y-вхід осцилографа, а оскільки  $U_2 = Q_2 / C_2$  і  $Q_2 = Q_0$ , то  $U_2$  визначає  $Q_0$  і  $P$  в сегнетоелектрику. До вторинного кола підвищувального трансформатора послідовно увімкнено два резистори ( $R_2 \ll R_1$ ). На вхід X подається напруга з  $R_2$ , вона пропорційна напруженості поля в діелектрику. Одночасна дія на X і Y пластини вказаних напруг дає можливість спостерігати на екрані петлю гістерезису, тобто  $P = P(E)$ .

За петлею гістерезису можна визначати спонтанну поляризацію, поляризацію насичення і залишкову поляризацію, а також коерцитивну силу. Для цього треба мати калібровану шкалу осцилографа, а також знати площу поверхні пластин конденсатора і відстань між ними.

Електричне зміщення  $\vec{D}$  і вектор  $\vec{P}$  пов'язаний між собою таким співвідношенням:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P},$$

де  $\epsilon_0$  - електрична сила, а  $\vec{E}$  - напруженість поля в діелектрику.

У даному випадку

$$D = Q_0 / S = Q_2 / S = U_2 C_2 / S, \quad E = U R_2 / d.$$

Визначити зміщення  $x$  і  $y$  променя по осях  $a_x$  і  $a_y$  (у вольтгах на поділку), яка визначається положенням ручок "Підсилювач X" і "Підсилювач Y", можна записати:  $U_2 = a_y y$ ;  $U_{R_2} = a_x x$ . Враховуючи ці співвідношення, формули для розрахунку  $D$  і  $E$  можна переписати у вигляді

$$D = C_2 a_y y / S, \quad E = a_x x / d.$$

За петлею гістерезису можна визначити і відносні втрати в сегнетоелектрику:  $tg \delta = W_T / 2\pi\omega$ , де  $W_T$  - енергія електричного поля, яка перетворюється в теплоту;  $\omega$  - енергія, яка необхідна для поляризації одиниці об'єму сегнетоелектрика:

$$tg \delta = S_{xy} / \pi x_0 y_0,$$

де  $S_{xy}$  - площа петлі гістерезису;  $x_0$  і  $y_0$  - максимальні відхилення променя по осі X та Y.

Площу петлі можна визначити зважуванням кальки з її зображенням на аналітичних терезах або методом графічного інтегрування, лічачи клітинки на міліметровому папері, які містяться на площині, обмеженій петлею гістерезису.

Для вивчення теплових властивостей сегнетоелектрика використовується схема, яка наведена на рис. 2.4.3. Сегнетоелектрик поміщено в електронагрівник. Змінюючи ступінь нагрівання, контролюють температуру з допомогою термопари і потенціометра постійного струму, а також вимірюють електроємність конденсатора вимірювачем ємності.

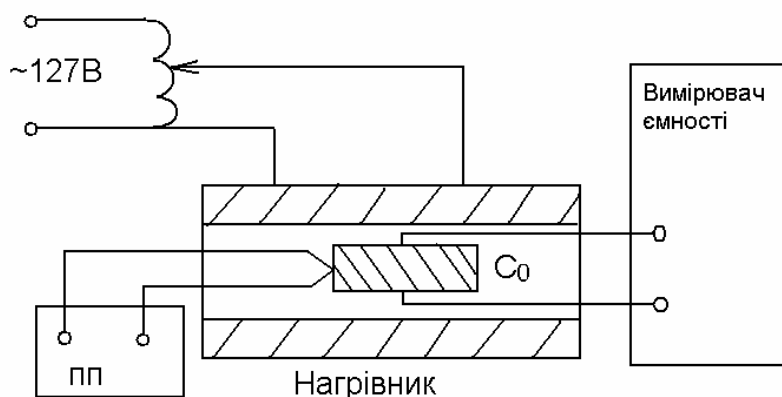


Рис.2.4.3.

1. Згідно з рис. 2.4.2 скласти схему для спостереження петель гістерезису.

2. Перезняти на кальку сімейство петель гістерезису при напругах 700, 650, 550, 500 і 450 В і незмінному положенні ручок осцилографа “Підсилювач Х” і “Підсилювач У”.
3. Визначити із сімейства петель гістерезису  $D, E, P_H, P_S, P_3, E_C$  і тангенс кута діелектричних втрат.
4. Скласти схему згідно з рис. 2.4.3 і отримати залежність зміни ємності конденсатора з сегнетоелектриком від температури в інтервалі 293...453 К. Побудувати графіки  $C = f(T)$  і  $\varepsilon = f(T)$  і визначити температуру Кюрі.

**Примітка.** Градууювальні графіки осцилографа і термопари, а також розміри зразків і дані про ємність конденсатора С2 вказані на робочому місці.

#### Контрольні завдання і запитання

1. Яка схема використовується для отримання петлі діелектричного гістерезису?
  2. Як визначити з петлі діелектричного гістерезису різні види поляризації і тангенс кута діелектричних втрат?
  3. Як визначити температуру Кюрі для досліджуваного сегнетоелектрика?
  4. Які речовини відносять до сегнетоелектриків? Яку кристалну структуру і фізичні властивості мають сегнетоелектрики?
  5. Що таке домени? Чим зумовлено утворення доменів у сегнетоелектричних кристалах?
  6. Якими параметрами характеризують поведінку діелектриків в електричному полі?
  7. Види поляризації діелектриків.
  8. Суть явища діелектричного гістерезису для сегнетоелектричних кристалів. Процеси, які відбуваються при поляризації сегнетоелектриків.
  9. Як змінюється діелектрична проникність сегнетоелектриків при їх нагріванні? З чим це пов'язано?
  10. Де використовують сегнетоелектрики в науці і техніці? Принцип дії варіконда.
  11. Як визначається поляризація діелектриків в електричному полі?
  12. Як визначається напруженість поля в діелектрику?
  13. Що таке самочинна поляризація сегнетоелектрика?
  14. Основні властивості сегнетоелектриків.
  15. Механізм самочинної поляризації сегнетоелектриків.
- [1-9; 11; 20; 27; 32; 37]

### 3. Електричне поле у вакуумі

#### Лабораторна робота 3.1. Вивчення роботи трьохелектродної електронної лампи

**Мета роботи** – ознайомитись з будовою і принципом дії вакуумного тріода, визначити його характеристики.

##### 3.1.1. Основні теоретичні відомості

Найпростіший тріод складається з трьох електродів, які розміщені в герметичному скляному або металевому балоні з цоколем. Цоколь має штирки, що служать зовнішніми виводами електродів. Вони електрично з'єднані з внутрішніми виводами нитки розжарення катода, катода керуючої сітки та анода. З балона відкачують повітря до тиску  $10^{-6} \dots 10^{-7}$  ГПа, тобто утворюють вакуум.

Катод (джерело термоелектронів) може бути як прямого розжарення, тік і підігрівним. Останній складається з тонкої металевої трубки, яка покрита шаром оксидів лужноземельних металів. Оксидні катода дозволяють дістати порівняно великі струми емісії при невисокій температурі завдяки низькій роботі виходу електронів. Анод тріода може мати циліндричну або плоску форму. Він виготовляється з нікелю і має ребра для кращої тепловіддачі. З тією самою метою аноди дуже часто чернять, покриваючи їх поверхню шаром графіту.

Керуюча сітка – це дротяна спіраль, яка розміщена між анодом і катодом.

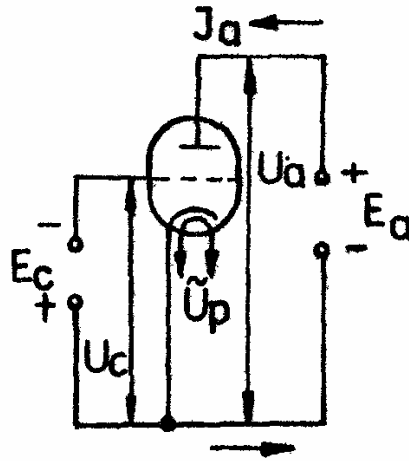


Рис.3.1.1.

Схема увімкнення тріода (рис. 3.1.1) складається з трьох кіл: кола розжарення, кола анода і кола сітки. В колі розжарення протікає струм розжарення  $I_p$ , а між виводами підігрівника діє напруга розжарення  $U_p$ . Підігрівник розжарюється змінним струмом, напруга розжарення при роботі лампи залишається незмінною.

Коло анода містить джерело анодного живлення  $E_a$ , проміжок анод-катод лампи і з'єднувальні дротини. Щоб електрони, які вилітають з катода, попадали на анод, електричне поле в лампі повинно бути для них прискорюючим. Через це на анод подається від джерела живлення додатна напруга відносно катода. Між анодом і катодом діє напруга анода  $U_a$ , а в колі анода діє струм анода  $I_a$  - від "плюса" джерела струму  $E_a$  через лампу до "мінуса" джерела струму.

Коло сітки складається з джерела постійної напруги  $E_c$ , проміжна сітка – катод лампи і з'єднувальних дротин. Різницю потенціалів між сіткою і катодом називають напругою сітки  $U_c$ , а струм у колі сітки – струмом сітки  $I_c$ . Загальна точка кола анода і сітки біля виводу катода умовно має нульовий потенціал, відносно якого відраховують потенціали інших електродів.

У тріоді використовуються термоелектронна емісія з катода і рух електронів у результуючому електронному полі, яке створюється анодом і сіткою. Принцип дії тріода зумовлюється впливом електричного поля сітки на потік електронів, які напрямлені від катода до анода.

Розглянемо вплив сітки при різних напругах на ній відносно катода і постійній додатній напрузі на аноді.

Якщо сітка не під'єднана до джерела  $E_c$ , тобто її коло розімкнене, то вона не створює свого електричного поля і не впливає на струм анода. При розжареному катоді і відсутності анодної напруги термоелектрони заповнюють міжелектродний простір біля катода. Заряд, створений цими електронами, називають від'ємним об'ємним зарядом. Цей заряд створює гальмівне електричне поле для вилітаючих з катода електронів. Він тим більший, чим більша кількість емітованих електронів, або ж чим більша напруга розжарення. При поданні додатньої анодної напруги на анод потрапляють тільки ті електрони, які володіють достатньою енергією для того, щоб подолати гальмівне поле біля катода.

Якщо напруга на сітці додатна, то між нею і катодом створюється для електронів прискорююче поле, яке додається до прискорюючого електричного поля анода, а результуюче прискорююче поле для електронів у проміжку сітка-анод збільшується, і більше число електронів виходить з об'ємного заряду через сітку на анод. У результаті цього струм збільшується тим більше, чим вищою є додатна напруга на сітці. Однак такий режим роботи тріода практично не використовується, оскільки частина електронів притягується до додатно

зарядженої сітки, створюючи в її колі струм сітки  $I_c$ , який шкідливо впливає на роботу лампи.

При від'ємній напрузі сітки створюється гальмівне електричне поле для емітованих катодом електронів, струм анода зменшується тим сильніше, чим більша від'ємна напруга на сітці. Від'ємна напруга сітки, при якій струм анода дорівнює нулю при додатній напрузі анода, називається запираючою напругою  $U_{зам}$ . При цьому лампа виявляється запертою, оскільки струм через неї не проходить. Це пояснюється тим, що гальмівне поле сітки повністю компенсує прискорююче поле анода. При подальшому збільшенні від'ємної напруги на сітці лампа залишається запертою. Отже, змінюючи напругу на сітці, можна змінювати значення струму анода, тобто керувати анодним струмом. Через це сітка в тріоді є керуючою.

Звичайно для керування струмом анода використовують зміну від'ємної напруги на сітці, для того щоб усунути появу струму сітки. Із зменшенням від'ємної напруги на сітці анодний струм збільшується, а із збільшенням від'ємної напруги – зменшується.

Спрощену картину електричних полів у тріоді при від'ємній напрузі на сітці зображено на рис. 3.1.2. Силкові лінії виходять із електрода з більш високим потенціалом і входять в електрод з більш низьким потенціалом. Їх густина умовно характеризує напруженість електричного поля. Потенціали анода і сітки відносно катода показано знаками “+” і “-”, силкові лінії анодного поля – тонкими лініями, а поля сітки – товстими.

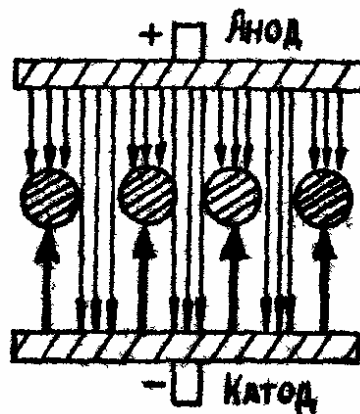


Рис.3.1.2.

Параметрами тріода є крутість характеристики, внутрішній опір і коефіцієнт підсилення лампи.

Крутість характеристики  $S$  показує, на скільки міліметрів змінюється анодний струм при зміні напруги на сітці на 1 В при сталій анодній напрузі:

$$I = \Delta I_a / \Delta U_c \text{ [мА/В]} \text{ при } U_a = const. \quad ()$$

Чим більша ефективна поверхня анода (на яку падають електрони) і менша відстань між сіткою і катодом, тим більша крутість.

Внутрішній опір лампи  $R_i$  дорівнює відношенню зміни анодної напруги до спричиненого ним зростання анодної напруги до спричиненого ним зростання анодного струму при сталій напрузі на сітці:

$$R_i = \Delta U_a / \Delta I_a \text{ [Ом]} \text{ при } U_c = const; \quad (3.1.2)$$

$R_i$  - це опір, який лампа створює змінній складовій анодного струму. Внутрішній опір лампи залежить від конструкції електродів. Так, чим менша емісія електронів з катода, чим густіша сітка і чим далі знаходиться анод від катода, тим більше  $R_i$ . Для різних ламп  $R_i$  має різне значення (приблизно 500...100000 Ом).

Опір, який лампа створює постійній складовій анодного струму, визначають за законом Ома діленням анодної напруги  $U_a$  на анодний струм  $I_a$ :

$$R_0 = U_a / I_a . \quad (3.1.3)$$

Коефіцієнт підсилення лампи  $\mu$  - це відношення зміни анодної напруги до відповідної зміни напруги на сітці, якщо анодний струм залишається сталим, при  $I_a = const$

$$\mu = \Delta U_a / \Delta U_c . \quad (3.1.4)$$

Коефіцієнт підсилення  $\mu$  показує, у скільки разів сильніше зміна напруги на сітці впливає на зміну анодного струму, ніж така сама зміна анодної напруги. Коефіцієнт підсилення тріода залежить, в першу чергу, від будови сітки. Чим густішою є сітка, тим більшим є її екрануючий вплив і відповідно більшим є і коефіцієнт підсилення.

Проникність лампи  $D$  обернена до її коефіцієнта підсилення:

$$D = 1 / \mu . \quad (3.1.5)$$

Величина  $D$  показує, яка частина силових ліній електричного поля, створеного анодним струмом, проникає крізь сітку на катод. Чим густіша сітка (менший крок спіралі), тим проникність лампи менша.

Параметри тріода зв'язані між собою співвідношенням

$$SR_t = \mu , \quad (3.1.6)$$

яке називають внутрішнім рівнянням тріода.

Параметри тріода можна визначити із сімейства його характеристик, які називають сітковими і анодними. Сіткові характеристики являють собою криві залежності анодного струму від сіткової напруги при сталій анодній напрузі, тобто  $I_a = f(U_c)$  при  $U_a = const$ . Анодні характеристики – це сукупність кривих залежності анодного струму від анодної напруги при сталій напрузі на сітці, тобто  $I_a = f(U_a)$  при  $U_c = const$ .

На рис. 3.1.3 і 3.1.4 зображено відповідні сіткові і анодні характеристики. З них видно, що анодний струм змінюється нелінійно, як із зміною сіткової напруги  $U_c$ , так і анодній  $U_a$ . Тільки на середніх ділянках характеристик  $I_a = f(U_c)$  і  $I_a = f(U_a)$  наближено можна вважати, що така залежність має лінійний характер. На цих ділянках можна вважати сталими відношення приросту анодної напруги  $\Delta U_a$  до приросту анодного струму  $\Delta I_a$  при сталій напрузі на сітці  $R_t$ , а також відношення приросту анодного струму  $\Delta I_a$  до приросту напруги на сітці  $\Delta U_c$  при сталому значенні анодної напруги  $S$  і визначити їх.

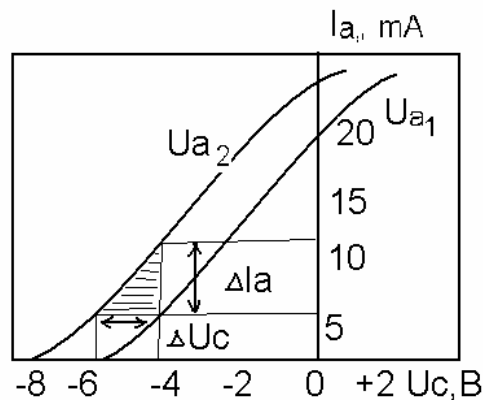


Рис.3.1.3.

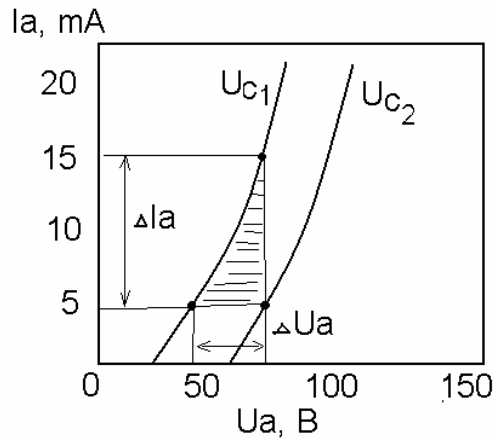


Рис.3.1.4.

Коефіцієнт підсилення  $\mu$  можна обчислити з двох анодних або двох анодно-сіткових характеристик як відношення приросту анодної напруги  $\Delta U_a$  до приросту напруги на сітці  $\Delta U_c$  при одному й тому самому значенні анодного струму.

В анодній системі координат приріст напруги сітки визначається як різниця сталих значень  $U_{c1}$  і  $U_{c2}$ , при яких знімалися характеристики. В системі анодно-сіткових координат аналогічно визначається  $\Delta U_a$ .

Конструкція тріодів є такою, що між кожною парою металевих електродів, які розділені ізолюючим вакуумним проміжком, створюються паразитні ємності. Їх називають статичними міжелектродними ємностями. В тріоді є три міжелектродні ємності (рис. 3.1.5): ємність сітка-катод  $C_{c-k}$ , яка називається вхідною, ємність анод-катод  $C_{a-k}$ , яка називається вихідною, ємність анод-сітка  $C_{a-c}$ , яка називається прохідною. Під час роботи лампи в схемах підсилення ці ємності здійснюють паразитний вплив, оскільки опір, зв'язаний з ємністю, зменшується з підвищенням частоти.

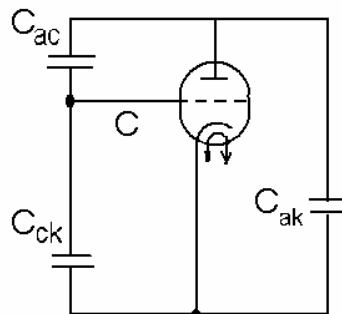


Рис.3.1.5.

Основне призначення тріода – підсилення змінних напруг. Підсилювачі з електронними лампами широко застосовують у радіотехніці, телеграфії, автоматиці і телемеханіці, а також для багатьох технічних і наукових цілей. Трьохелектродні лампи також набули широкого застосування в генераторах електромагнітних хвиль високих частот. Тріоди використовуються у різних спеціальних імпульсних пристроях, у колах формування імпульсів напруги і струму, а також у вимірювальній техніці.

Тріод може працювати у двох режимах – статичному і у робочому. Для статичного режиму характерним є те, що в анодному колі відсутній резистор навантаження, а анодна напруга дорівнює напрузі анодного джерела. Під час роботи лампи в цьому режимі зміна напруги на сітці призводить до зміни анодного струму, але анодна напруга залишається незмінною і дорівнює напрузі анодного джерела. Для робочого режиму (режиму

навантаження або підсилення) за старою термінологією, динамічного режиму, характерним є те, що опір резистора анодного навантаження сумірний з внутрішнім опором лампи.

Анодна напруга в робочому режимі не залишається сталою. Якщо, наприклад, сіткова напруга збільшується і від цього зростає анодний струм, то збільшується і спад напруги на резисторі анодного навантаження і на стільки ж вольт зменшується напруга на аноді, тому що сума цих напруг дорівнює напрузі анодного джерела.

### 3.1.2. Прилади і обладнання

Панель з електронною лампою, комутатором і регульовальними потенціометрами; лабораторне джерело живлення ЛІП-2; електронний осцилограф ОМП-1 або СІ-15; вольтметр М-45 (0-15-150 В) (2 шт.); міліамперметр М-45 (0...30 мА); реостат РСР 600 Ом; магазин опорів Р-33.

### 3.1.3. Завдання і методика експерименту

Для того, щоб дістати характеристики триода, використовують схему (рис. 3.1.6). Комбіноване джерело живлення має клєми, на які подається анодна напруга 0...150 В постійного струму для живлення анода, 10 В постійного або змінного струму для живлення сітки і 6,3 В змінного струму для живлення нитки розжарення катода. Резистором анодного навантаження  $R_{an}$  служить магазин опорів Р-33. Перемикач П забезпечує зміну полярності напруги на сітці.

Для здобуття осцилограм характеристик триода на Х-вхід (рис. 3.1.7) подається напруга, яка дорівнює або пропорційна струму в анодному колі. Якщо напруга на сітці періодично змінюється (наприклад, з частотою 50 Гц), то буде змінюватись і анодний струм лампи. На екрані осцилографа дістанемо анодно-сіткову характеристику триода.

Згідно зі схемою, наведено на рис. 3.1.7, від комбінованого джерела струму на сітку подають змінну напругу, яка може регулюватися подільником від 0 до 10 В. Сіткова напруга подається на Х-вхід осцилографа.

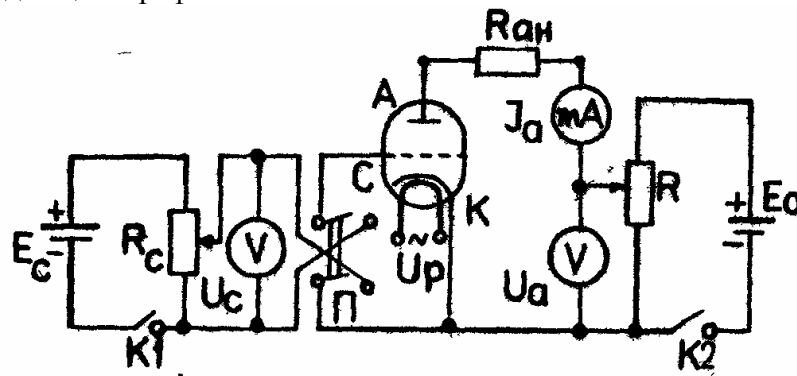


Рис.3.1.6.

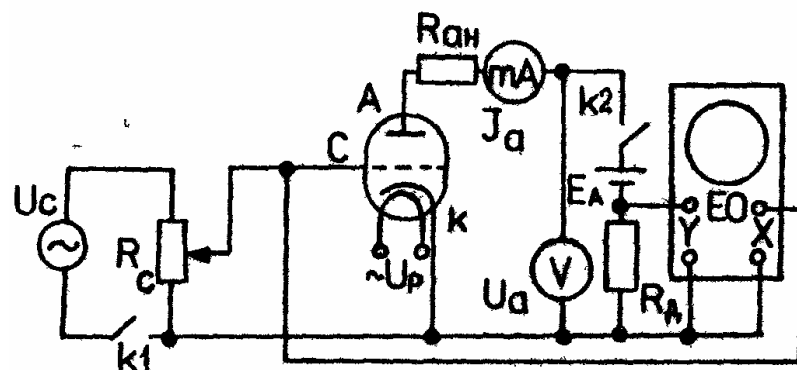


Рис.3.1.7.

В анодне коло ввімкнено резистор, опір якого ( $R_g = 100 \text{ Ом}$ ) є невеликим порівняно з опором лампи і резистора анодного навантаження. Спад напруги на цьому резисторі, який пропорційний анодному струму, подається на X-вхід осцилографа.

1. Скласти схему згідно з рис. 3.1.1.
2. Зняти статичні анодно-сіткові характеристики при двох значеннях анодної напруги ( $U_a = 120$  і  $130 \text{ В}$ ).
3. Зняти статичні анодні характеристики при трьох значеннях напруги на сітці ( $U_c = 0$ ;  $-2$ ;  $-4 \text{ В}$ ).
4. Зняти робочі анодно-сіткові характеристики для трьох значень опору анодного навантаження ( $R_{ан} = 5$ ;  $10$ ;  $25 \text{ кОм}$ ) і анодній напрузі  $U_a = 120 \text{ В}$ .
5. Скласти схему згідно з рис. 3.1.7. Отримати на екрані осцилографа статичну і робочу характеристики триода. Зняти на кальку осцилограми.
6. Побудувати графіки статичних характеристик триода і визначити на їх лінійних ділянках згідно з (3.1.1), (3.1.2) і (3.1.4) параметри триода  $S$ ,  $R$  і  $\mu$ .
7. Побудувати робочі характеристики триода.

#### Контрольні завдання і запитання

1. Як зняти статичні анодно-сіткові характеристики триода?
2. Як зняти статичні анодні характеристики триода?
3. Як зняти робочі (динамічні) анодно-сіткові характеристики триода?
4. Яка схема використовується для осцилографування статичних і робочих (динамічних) характеристик триода?
5. Яку будову має вакуумний триод?
6. Як впливає керуюча сітка на рух електронів від катода до аноді?
7. Намалюйте і поясніть анодні характеристики вакуумного триода.
8. Намалюйте і поясніть анодно-сіткові характеристики вакуумного триода.
9. Головні параметри триода та їх визначення.
10. Як залежить параметри триода (крутість характеристики, коефіцієнт підсилення і внутрішній опір) від геометричних розмірів електродів?
11. Які міжелектродні ємності діють у вакуумному триоді?
12. Які недоліки вакуумних триодів обмежують сферу їх використання?
13. Приклади використання вакуумних триодів в електронних схемах.

[13; 18; 19; 22; 24; 27; 32]

## Лабораторна робота 3.2. Вивчення роботи електронно-променевої трубки

**Мета роботи** - вивчити будову, основні характеристики і параметри електронно-променевої трубки з електростатичним фокусуванням і керуванням.

### 3.2.1. Основні теоретичні відомості

Явище термоелектронної емісії лежить в основі роботи електронно-променевої трубки. Вона широко застосовується в радіовимірвальній техніці, радіолокації, телебаченні та в інших галузях сучасної радіоелектроніки. На рис. 3.2.1 схематично зображено електронно-променеву трубку з електростатичним керуванням і фокусуванням.

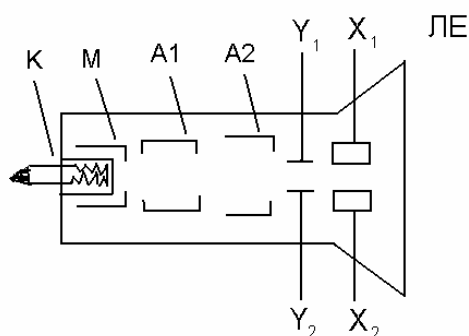


Рис.3.2.1.

Балон трубки має циліндричну форму з розширенням у вигляді конуса або циліндра більшого діаметра. На внутрішню поверхню основи розширеної частини нанесено люмінесцентний екран (ЛЕ) – шар речовини (окису, кремнійокислого або сульфїду цинку), здатної випромінювати світло під ударами електронів. Всередині трубки розміщені електроди, які мають виводи, як правило, на штирки цоколя. Електрони випромінюються підігрівним оксидним катодом К, що має форму циліндрика, всередині якого знаходиться нитка розжарення. Біля катода розміщений керуючий електрод циліндричної форми з отвором у дні М, який називається сіткою, модулятором або циліндром Венельта. На нього подається негативний потенціал відносно катода (звичайно десятки вольт).

Електричне поле між катодом і керуючим електродом стискає потік електронів, що вилетіли з катода, і направляє його в отвір керуючого електрода. При деякому значенні негативного потенціалу на керуючому електроді електрони повністю будуть повертатися на катод. У цьому випадку вважають, що трубка запирається. Два інших електроди (також циліндричної форми) називаються першим А1 і другим А2 анодами. На них подається високий позитивний потенціал відносно катода. Напруга між катодом і анодом А2 становить від 600 В до кількох тисяч вольт, а між катодом і анодом А1 – від 250 до 500 В. Перший анод має перегородки з отворами (діафрагми). У деяких трубках конструкція анодів значно складніша. Під дією прискорюючого поля анодів електрони набувають великої швидкості. Завдяки наявності діафрагм і впливу електричного поля між анодами електрони фокусуються в тонкий електронний пучок, що має діаметр, який дорівнює десятим часткам міліметра. Вся система, що складається з катода, керуючого електрода і анодів, називається електричним прожектором, або електронною гарматою. Вона призначена для створення тонкого пучка електронів, які летять з великою швидкістю від другого анода до люмінесцентного екрана.

Електронний пучок (електронний промінь), напрямлений уздовж осі трубки, потрапляє на ЛЕ. У трубці створено високий вакуум. На екрані, куди потрапляє електронний пучок, виникає світна пляма. Різні люмінофори дають світіння того чи іншого кольору. В трубках для візуального спостереження світіння екрана зелене або жовте, а в трубках, які слугують для фотографування осцилограм, - синє.

На шляху електронного пучка під прямим кутом одна до одної розміщені дві пари металевих пластин. Якщо між кожною з пар пластин немає різниці потенціалів, то вони ніяк не впливають на електронний пучок. Якщо ж на який-небудь парі пластин створити різницю потенціалів, то на електрони, що пролітають в електричному полі між пластинами, діятиме сила, яка буде притягувати їх до пластини з позитивним потенціалом. Внаслідок дії цієї сили електронний пучок відхиляється від початкового напрямку, і світна пляма на екрані, відповідно зміниться відносно центру екрана. Це зміщення пропорційне різниці потенціалів на відхиляючих пластинах. На практиці до однієї з пар пластин, що відхиляють електронний пучок у горизонтальному напрямі, подають змінну у часі пилоподібну напругу, яка називається розгортуючою. На пластини, що здійснюють відхилення електронного пучка у вертикальному напрямі, подається досліджувана напруга. Під дією електричних полів обох

пар пластин електричний промінь на екрані креслить криву, яка зображує функціональну залежність досліджуваної напруги від часу.

Відхилення електронного пучка і плями, що світиться на екрані, пропорційне напрузі на відхиляючих пластинах. Коефіцієнт пропорційності в цій залежності називається чутливістю трубки. Якщо позначити відхилення плями по вертикалі  $Y$ , а напругу на пластинах “ігрек” -  $U_y$ , то

$$y = S_y U_y, \quad (3.2.1)$$

де  $S_y$  - чутливість трубки для пластин “ігрек”.

Подібно до цього відхилення плями по горизонталі

$$x = S_x U_x. \quad (3.2.2)$$

Таким чином, чутливість є відношенням відхилення світної плями на екрані до відповідної відхиляючої напруги:

$$S_x = X/U_x, \quad (3.2.3)$$

$$S_y = y/U_y. \quad (3.2.4)$$

Іншими словами, чутливість – це відхилення світної плями на екрані, яке доводиться на 1 В відхиляючої напруги. Виражають чутливість у міліметрах на вольт. Величина, яка є оберненою до чутливості, називається коефіцієнтом відхилення:

$$K_x = U_x / x; \quad (3.2.5)$$

$$K_y = U_y / y. \quad (3.2.6)$$

Формули (3.2.3) і (3.2.4) не означають, що чутливість є обернено пропорційною до відхиляючої напруги. Якщо в кілька разів збільшити  $U_y$ , то в стільки ж разів зросте і  $Y$ , а значення  $S_y$  залишиться без зміни. Звідси виходить, що  $S_y$  не залежить від  $U_y$ . Чутливість звичайно буває в межах 0,1...1,0 мм/В. Вона залежить від режиму роботи і деяких геометричних розмірів трубки, отже

$$S = l_{nl} l / 2d U_{A2}, \quad (3.2.7)$$

де  $l_{nl}$  - довжина відхиляючих пластин;  $l$  - відстань від середини пластин до екрана;  $d$  - відстань між пластинами;  $U_{A2}$  - напруга на другому аноді.

Цю формулу легко пояснити. Із збільшенням  $l_{nl}$  електрон довше летить у відхиляючому полі і дістає більше відхилення. При одному й тому самому кутовому відхиленні зміщення світної плями на екрані зростає із збільшенням відстані  $l$ . Якщо збільшити  $d$ , то напруженість між пластинами, а значить відхилення, зменшуються. Збільшення напруги  $U_{A2}$  призводить до зменшення відхилення, оскільки зростає швидкість, з якою електрони пролітають поле між пластинами.

Розглянемо можливість збільшення чутливості, виходячи з (3.2.7). Збільшення відстані  $l$  є небажаним, оскільки дуже довга трубка є незручною в експлуатації. Якщо ж збільшити  $l_{nl}$  або зменшити  $d$ , то в цьому випадку неможливо дістати значне відхилення променя, тому що він буде попадати на відхиляючі пластини. Щоб цього не сталося, пластини виготовляють з відігнутими краями. Можна збільшити чутливість, знижуючи напругу  $U_{A2}$ . Але це пов'язано із зменшенням яскравості свічення, що в багатьох випадках недопустимо, особливо при великій швидкості руху променя по екрану. Зниження анодної напруги погіршує також і фокусування променя.

Електрони, що потрапляють на екран, можуть зарядити його негативно і створити гальмує поле. Це призведе до зменшення їх швидкості.

Від цього зменшується яскравість свічення екрана і може взагалі припинитися попадання електронів на екран. Через це необхідно знімати від'ємний заряд з екрана. Для цього на внутрішню поверхню балона наносять провідний шар. Він буває графітним і називається

аквадагом. Аквадаг з'єднується з другим анодом. Вторинні електрони, які вибиваються з екрана ударами первинних електронів, летять до провідного шару. Після відтоку вторинних електронів потенціал екрана стає близьким до потенціалу провідного шару. Провідний шар виключає також створення на стінках балона негативних зарядів від електронів, що туди попадають. Ці заряди можуть створювати додаткові поля, що порушує нормальну роботу трубки. Якщо ж у трубці провідного шару немає, то вторинні електрони виходять з екрана на відхиляючі пластини і другий анод.

Зменшення яскравості свічення при зниженні анодної напруги  $U_{A2}$  компенсується в трубках з післяприскоренням. У цих трубках електронний прожектор надає електронам енергію не більшу, ніж 1,5 кеВ. З такою енергією вони пролітають між відхиляючими пластинами, а потім потрапляють у прискорююче поле, яке створюється третім анодом, при цьому  $U_{A3} > U_{A2}$ . Поле між указаними двома анодами створює лінзу, яка прискорює електрони. Але разом з цим відбувається і деяке викривлення траєкторій електронів, у результаті чого чутливість знижується і виникають спотворення в зображенні. Такі недоліки значною мірою усуваються при багаторазовому післяприскоренні електронів, коли в трубці є кілька додаткових анодів для післяприскорення.

Якщо до відхиляючих пластин "ігрек" підведено змінну напругу, то електронний пучок здійснює коливання, і на екрані видно вертикальну світну лінію. Її довжина пропорційна подвійній амплітуді підведеної напруги  $2U_m$ . Знаючи чутливість трубки і вимірювши  $U$ , можна визначити

$$U_m = y / 2S_y. \quad (3.2.8)$$

Якщо ж чутливість трубки невідома, її можна визначити. Для цього треба подати на пластини відому змінну напругу і виміряти довжину світлової лінії на екрані. Напругу, яка подається і вимірюється вольтметром, треба з діючого значення перевести в амплітудне, помноживши його на 1,4.

### 3.2.2. Прилади і обладнання

Електронно-променева трубка типу 8 029; панель керування та регулювання; лабораторне джерело живлення (інструкція про правила роботи з ним знаходиться в лабораторії); вольтметр комбінований ВК7.

### 3.2.3. Завдання і методика експерименту

1. Скласти схему згідно з рис. 3.2.2.
2. Зняти залежність напруги запирання від прискорюючої напруги на другому аноді  $A2 : U_3 = f(U_{A2})$ . Для цього при вибраній напрузі на другому аноді треба поступово збільшувати від'ємну напругу на керуючому електроді М доти, поки світна пляма на екрані трубки повністю не згасне. Під час експерименту світну пляму треба підтримувати увесь час різко сфокусованою, змінюючи напругу на першому аноді потенціометром  $R = 1$  МОм.

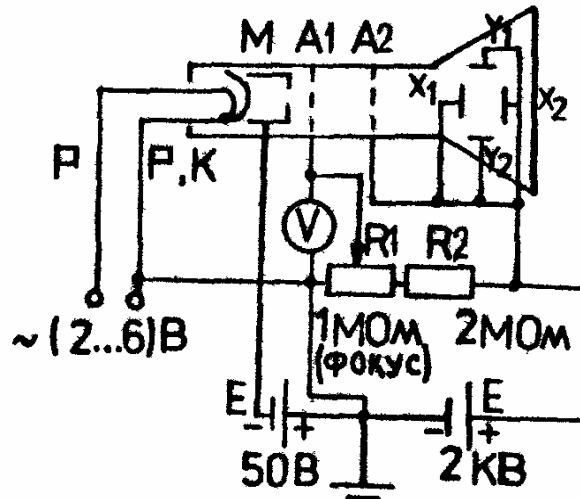


Рис.3.2.2.

- Зняти залежність напруги найкращого фокусування  $U_{A1}$  від напруги на керуючому електроді М при різних значеннях напруги на другому аноді  $U_{A2} = 1500, 1200, 1000, 800 \text{ В}$ .
- Скласти схему згідно з рис. 3.2.3.
- Зняти залежність коефіцієнтів відхилення  $K_x$  і  $K_y$  (див. 3.2.5 і 3.2.6) від прискорюючої напруги для X і Y пластин на постійному і змінному струмах. Для цього при вибраному значенні  $U_{A2}$  виміряти відхилення світної плями X або Y в горизонтальному або вертикальному напрямі від її початкового положення при зміні постійної напруги на пластинах у межах  $0 \dots 50 \text{ В}$ . У випадку, коли на X або Y пластини подається змінна напруга, треба як зазначалося раніше, вимірювати зміну довжини світної лінії на екрані трубки зі зміною напруги на пластинах.
- Побудувати графіки залежностей  $U_3 = f(U_{A2})$ ,  $U_{A2} = f(U_M)$ ,  $K_x = f(U_{A2})$ ,  $K_y = f(U_{A2})$  для постійного і змінного струмів.

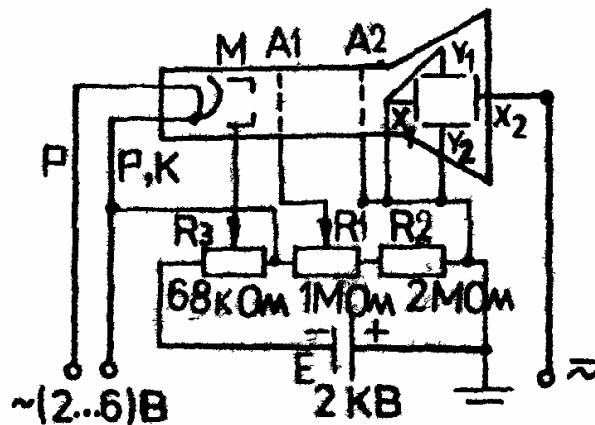


Рис. 3.2.3.

#### Контрольні завдання і запитання.

- Як дістати залежність напруги запирання від прискорюючої напруги?
- Як знайти залежність напруги найкращого фокусування від напруги на прискорюючому електроді A2?
- Яка схема використовується для отримання залежності коефіцієнтів відхилення від прискорюючої напруги для X і Y пластин при постійному і змінному струмах?

4. Яку конструкцію мають електронно-променеві трубки з електростатичним керуванням?
5. Принцип дії електронного прожектора.
6. Що називається електронною лінзою?
7. Принцип дії відхиляючих пластин на електричний пучок в електронно-променевій трубці.
8. Яке явище лежить в основі утворення зображення при дії електронного пучка на речовину, нанесену на поверхню екрана електронно-променевої трубки? Приклади відомих люмінофорів.
9. Особливості руху електрона в полі відхиляючих пластин.
10. Конструкція і принцип дії осцилографа.

[13; 18; 19; 22; 23; 25; 28; 32]

### **Лабораторна робота 3.3. Вивчення роботи електронного осцилографа**

**Мета роботи** – вивчити принцип дії електронно-пучкового осцилографа; оволодіти основними навичками роботи з осцилографом.

#### **3.3.1. Основні теоретичні відомості**

Електронно-пучковий осцилограф – універсальний електровимірювальний прилад з широкою сферою використання. З його допомогою можна вивчати розвиток різних електричних процесів у часі, а також функціональну залежність між такими процесами. Сучасні методи дозволяють перетворити змінні фізичні величини в пропорційні їм електричні напруги, через це осцилограф може використовуватись для вивчення функціональних залежностей між будь-якими фізичними величинами: механічними, світловими, тепловими тощо. Дуже мала інерційність електронного осцилографа дозволяє досліджувати електричні процеси в широкому діапазоні частот, а висока чутливість – вивчати дуже малі напруги (сигнали). Осцилограф вносить у вимірюване коло малі спотворення, оскільки має високий вхідний опір, малі ємність та індуктивність. Для повноцінного використання всіх можливостей треба добре знати основні принципи дії і взаємозв'язок його головних вузлів, уміти керувати і користуватись цим складним приладом.

#### **Принцип дії осцилографа.**

Не дивлячись на велику кількість модифікацій осцилографів, їх блок-схема має такі загальні вузли: електронно-променеву трубку, блок живлення, генератор розгортки, систему ослаблювачів та підсилювачів горизонтального та вертикального відхилення, а також пристрій синхронізації частоти генератора розгортки для отримання стійкого нерухомого зображення.

#### **Електронно-променева трубка (ЕПТ).**

В осцилографах використовують ЕПТ з електростатичним відхиленням, яке здійснюється з допомогою електричного поля відхиляючих конденсаторів  $X$  та  $Y$ . Для створення і формівання електронного пучка використовується електронна гармата (див. рис. 3.3.1), яка складається з катода  $K$ , керуючого електрода (модулятора)  $M$ , першого та другого анодів  $A_1$  і  $A_2$  та двох відхиляючих конденсаторів  $X$  і  $Y$ .

Катод – торцевий, підігрівний, з високою емісійною властивістю. Циліндричний модулятор, перший та другий аноди створюють електронно-оптичну систему (двохлінзову), яка дозволяє фокусувати електронний пучок та змінювати його густину. На екрані ЕПТ нанесено люмінофор, часто із зеленим світінням (для візуального спостереження). На перший анод ЕПТ подається невелика додатна відносно катода напруга, змінюючи яку, можна регулювати фокусування. На другий анод – досить велика ( $\approx 10^3$  В) прискорююча (нерегульована) напруга. На модулятори подають невелику від'ємну напругу відносно катода. Змінюючи її, регулюють яскравість.  $X$  та  $Y$  пластини з'єднані з другим анодом через резистор з великим опором, тобто мають за постійним струмом потенціал другого анода.

Крім того, на них подають додаткові сталі напруги для зміщення променя ЕПТ по горизонталі та вертикалі, а також через підсилювачі досліджуваний сигнал та напруга розгортки.

### **Підсилювачі та послаблювачі вхідних сигналів.**

ЕПТ сама по собі має малу чутливість. Для збільшення чутливості осцилограф обладнують підсилювачами напруги. Кожна пара пластин має свій підсилювач. Підсилювач для Х-пластин звичайно має невеликий коефіцієнт підсилення, оскільки він використовується головним чином для підсилення достатньо великого сигналу, який подається від генератора розгортки. Підсилювач для У-пластин, навпаки, має достатньо високий коефіцієнт підсилення (кілька тисяч). Підсилювачі мають широку смугу пропускання і дуже рівномірну частотну характеристику, тобто коефіцієнт підсилення майже не залежить від частоти.

Якщо сигнал, що подається на вхід осцилографа, є достатньо великим, його можна подавати безпосередньо на відхиляючі пластини, або скориставшись послаблювачем сигналів, який є подільником напруги (потенціометром).

### **Генератор розгортки.**

Для спостереження часового перебігу процесів треба подавати на горизонтально відхиляючі пластини осцилографа напругу, яка лінійно зростає в часі і різко спадає (рис. 3.3.2). Таку напругу можна забезпечити за допомогою процесів зарядження та розрядження конденсатора через резистор, які певним чином лінеаризовані.

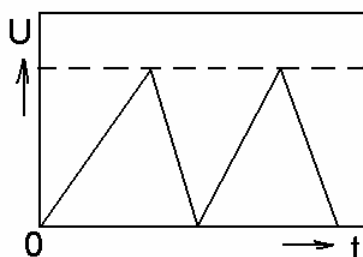


Рис.3.3.2.

Якщо при цьому водночас подати на вертикально відхиляючі пластини досліджувану напругу, то на екрані осцилографа промінь опише графік зміни досліджуваної напруги в часі. Оскільки з допомогою осцилографа вивчають швидкозмінні періодичні процеси, то і напруга розгортки також має бути періодичною. Період розгортки повинен бути кратним періоду досліджуваного сигналу, щоб промінь на екрані з кожним повтором циклу розгортки прокреслював одну й ту саму траєкторію.

Щоб спостерігати на екрані осцилографа графік досліджуваного процесу у вигляді неперервної лінії, частота розгортки повинна бути достатньо великою. Якщо досліджуваний процес однократний або повторюється неперіодично, то генератор розгортки дає одиночні імпульси пілоподібної форми тільки в момент виникнення досліджуваного процесу (чекаючий режим). У цьому випадку запуск генератора розгортки здійснюється сигналом з підсилювача вертикального відхилення (досліджуваним сигналом) або сигналом із зовні.

### **Генератор міток часу.**

При дослідженні швидкозмінних процесів з допомогою осцилографа часто виникає необхідність у вимірюванні їх тривалості. Для цього використовують генератор міток часу, який наносить через однакові проміжки часу мітки часу способом підсвічування чи гасіння променя. Для цього на модулюючий електрод трубки або на катод подають електричні сигнали від генератора міток, періодично змінюючи яскравість плями на екрані. Знаючи тривалість маркерної мітки і число міток, які вкладаються на досліджуваному сигналі (або заданому числі сигналів), можна визначити тривалість сигналу. Тривалість міток часу змінюють для зручності вимірювань.

### **Синхронізація.**

Для того щоб зображення на екрані осцилографа було нерухомим (не “пливло”), генератор розгортки повинен працювати з частотою, яка дорівнює або є кратною частоті досліджуваного сигналу. Це співвідношення періодів зберігають строго сталим під час всього часу спостереження. Однак унаслідок нестабільності частот як генератора розгортки, так і досліджуваного сигналу, ця умова порушується, що призводить до нестабільності зображення на екрані. Для того щоб забезпечити якісне зображення на екрані, коливання генератора розгортки синхронізують з коливаннями іншої, більш стабільної напруги, наприклад, напруги мережі, яка живить осцилограф, напруги зовнішнього генератора зі стабільною частотою або напруги, яка досліджується.

#### Блок живлення.

Блок живлення осцилографа забезпечує постійною напругою електричні кола напівпровідників або ламп схеми та електронно-променевої трубки. Він складається з силового трансформатора, випрямляючих елементів та фільтрів.

### 3.3.3. Прилади і обладнання

#### Порядок роботи з осцилографом.

1. Увімкнути прилад у мережу із заданою номінальною напругою і дати йому прогрітись кілька хвилин.
2. Знайти світну точку чи лінію, змінюючи яскравість і зміщення за X та Y.
3. Відфокусувати зображення і встановити його нормальну яскравість.
4. Подати досліджуваний сигнал на Y-вхід підсилювача, звертаючи особливу увагу на правильний вибір послаблення сигналу антенуатором (сигнал при цьому не спотворюється). Плавним підсиленням підібрати необхідну величину зображення.
5. Перемикач синхронізації в положення “Внутрення”.
6. Установити частоту розгортки (стрибками чи плавно) і, обертаючи ручку “Амплітуда синхронізації”, досягати нерухомого зображення.
7. Якщо досліджуються високочастотні достатньо великі коливання, то їх подають на відхиляючі пластини. (Для більшості осцилографів із міркувань безпеки треба на цей час вимкнути прилад). X та Y пластини виводять із тильного боку осцилографа. При вимірюваннях слід обов’язково вимкнути підсилювачі.

#### Вимірювання чутливості електронного осцилографа.

Чутливістю електронного осцилографа називається величина, що чисельно дорівнює відхиленню сліду електронного пучка на екрані трубки від осі трубки при діючій (ефективній) напрузі на вході підсилювача осцилографа, яка дорівнює 1 В:

$$S = X / U_{ef}. \quad (3.3.1)$$

Чутливість електронного осцилографа залежить від чутливості електронно-променевої трубки  $S_{TP}$  та коефіцієнта підсилення підсилювача  $k$ :

$$S = \sqrt{2kS_{TP}}. \quad (3.3.2)$$

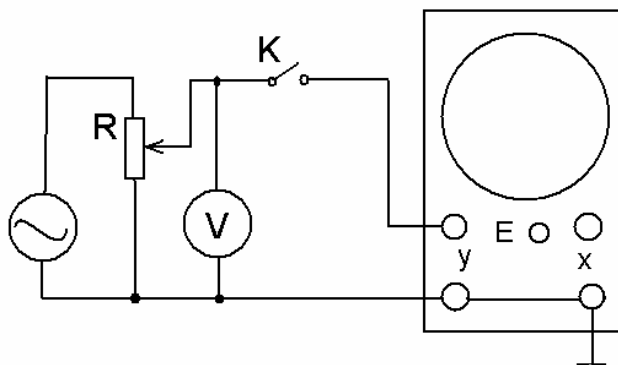


Рис.3.3.3.

Якщо коефіцієнт підсилення підсилювача невідомий, то чутливість осцилографа можна визначити експериментально. Для цього на вхід осцилографа (рис. 3.3.3) треба подати

змінну напругу, ефективне значення якого  $U_{ef}$  вимірюють з допомогою лампового або цифрового вольтметра змінного струму. При вимкнутій розгортці слід електронного променя на екрані трубки буде зображено прямою лінією. Довжина  $L$  цієї лінії пропорційна подвоєному значенню ефективної напруги. Чутливість осцилографа можна визначити так:

$$S = L / 2U_{ef}. \quad (3.3.3)$$

Для вимірювання максимальної чутливості осцилографа за каналом  $Y$  треба перемикач “Делитель” поставити в положення 1:1, а потенціометр плавного регулювання підсилення за цим каналом – “Усиление  $Y$ ” – в крайнє положення.

Якщо побудувати ряд градуювальних графіків залежності чутливості осцилографа від положення ручки потенціометра “Усиление  $X$ ” на осцилографі, то такими градуювальними графіками, які відповідають різним положенням ступеневого перемикача “Делитель  $Y$ ”, можна вимірювати ефективну напругу в широких межах.

Для вимірювання напруги при калібровці підсилювача осцилографа можна скористатися також таким прийомом. Як джерело еталонної напруги беруть звуковий генератор. Контрольовано (за допомогою його вольтметра і ручки “Рег.Вых.напр”) змінюючи напругу вихідного сигналу, який подається на вхід  $Y$ . (розгортка при цьому вимкнена), на екрані осцилографа дістають, не змінюючи положення ручки “Усиление  $Y$ ”, таке саме відхилення, як і у випадку вимірювання досліджуваної напруги, і обчислюють ефективне або амплітудне її значення. Довжина лінії на екрані осцилографа при цьому пропорційна подвоєному значенню ефективної напруги. Для обчислення амплітудного значення напруги результат треба помножити на 1,4.

#### Вимірювання струму.

У вимірювальну схему вмикають резистор з невеликим, але незмінним опором. Вимірюючи спад напруги на ньому, обчислюють за законом Ома силу струму.

#### Вимірювання частоти гармонічного сигналу.

Для визначення частоти електричних гармонічних коливань широко застосовується метод фігур Ліссажу. Він полягає в тому, що гармонічне коливання з відомою частотою  $f_{ET}$  складають із взаємно перпендикулярним до нього гармонічним коливанням з невідомою частотою  $f_X$ . Результуюче коливання має вигляд кривої зі складною формою, яку називають фігурою Ліссажу. За видом фігури Ліссажу можна визначити частоту досліджуваного гармонічного коливання. Вид фігур Ліссажу залежить від різниці початкових фаз  $\phi$  і відношення частот коливань, що складають  $n = f_y / f_x$ . Криві Ліссажу для деяких значень  $n$  та  $\phi$  зображено на рис. 3.3.4.

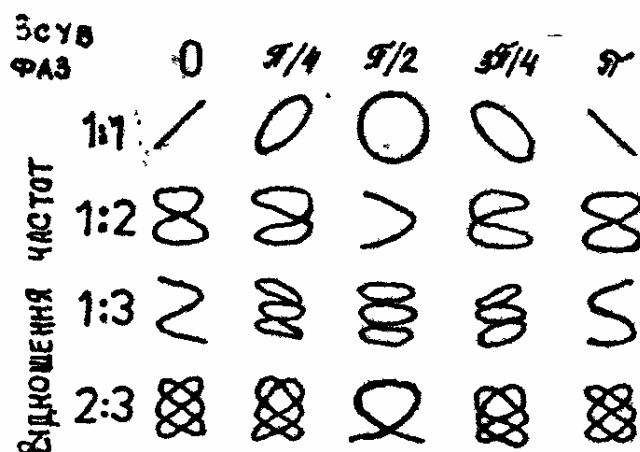


Рис.3.3.4.

Для визначення частоти коливань на входи  $X$  та  $Y$  подаються напруги еталонної та невідомої частот (внутрішній генератор розгортки треба вимкнути), рис. 3.3.5.

Невідому частоту  $f_2$  можна обчислити за формулою

$$f_x = (n_2/n_1) f_{em}, \quad (3.3.4)$$

де  $n_2$  – кількість перетинів фігури Ліссажу відповідно з горизонтальною і вертикальною віссю;  $f_{em}$  - еталонна частота.

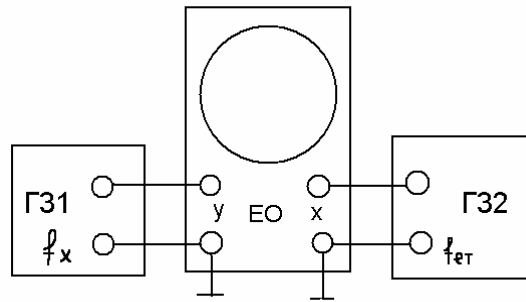


Рис.3.3.5.

1. Ознайомитись із макетом осцилографа ФП-33 та осцилографами, якими оснащено лабораторію.
2. Визначити чутливість осцилографа ФП-33 до напруги, подаючи напругу на У-та Х-пластин від генератора гармонічних коливань.
3. Знайти залежність відхилення променя від напруги U для пластин X та У.
4. Побудувати стійку неспотворену осцилограму коливань для різних частот коливань, які генерує генератор гармонічних коливань. Переконайтесь, що стійкою синхронізації досягають у положенні перемикача виду синхронізації “Внутренняя синхронизация”.
5. Виміряти частоту методом порівняння за фігурами Ліссажу. Одним із джерел змінної напруги може бути лінійний автотрансформатор, який плавно знижує напругу освітлювальної мережі, а другим – генератор гармонічних коливань. Побудувати різні фігури для співвідношення частот 1:1, 1:2, 2:1 і т.д. Проспостерігати зміну співвідношень фаз двох досліджуваних джерел при однакових або кратних частотах.
6. Простежити за формою напруги розгортки, для чого на вхід У осцилографа подати з виходу генератора розгортки осцилографа ФП-33 (гніздо 1).

#### Контрольні завдання і запитання.

1. Призначення електронного осцилографа.
2. Будова і принцип дії електронно-променевої трубки.
3. Що називається чутливістю електронно-променевої трубки за напругою?
4. Чи є однаковою чутливість для пластин X та У електронно-променевої трубки?
5. Для чого призначені підсилювачі і послаблювачі вхідних сигналів осцилографів?
6. Як наносяться мітки часу на осцилограму?
7. Для чого потрібна синхронізація роботи генератора розгортки та досліджуваного сигналу?
8. Що таке чутливість електронного осцилографа? В яких одиницях вона вимірюється?
9. Як виміряти змінну напругу з допомогою осцилографа?
10. У чому суть методу визначення частоти із допомогою фігур Ліссажу?

[13; 18; 19; 22; 23; 25; 28; 32]

## 4. Електропровідність рідин і газів

### Лабораторна робота 4.1. Дослідження електропровідності електролітів

**Мета роботи** – дослідити залежність електропровідності електролітів на основі мідного купоросу  $\text{CuSO}_4$  від концентрації і температури.

#### 4.4.1. Основні теоретичні відомості

Електролітами називають речовини, які мають іонну провідність. До них відносять розчини солей, лугів, кислот у воді та деяких рідинах.

Іони виникають за рахунок дисоціації (розпаду) молекул розчиненої речовини. Ступінь дисоціації характеризується коефіцієнтом дисоціації  $\alpha$ , який показує, яка частина молекул розчиненої речовини розпалась на іони. В сильно розбавлених розчинах  $\alpha=1$ , тобто практично всі молекули розчиненої речовини дисоційовані. При більших концентраціях  $\alpha$  зменшується із зростанням концентрації.

Іони в електронах весь час здійснюють зіткнення з сусідніми молекулами розчинника, тобто рухаються з тертям. Їх зіткнення полегшується тим, що розміри іонів більші від розмірів електронів-носіїв струму в металах. До того ж заряджений іон притягує до себе молекули розчинника, які покривають його оболонкою і рухаються з ним як одне ціле. Такі утворення носять назву сольватів. Явище сольватизації призводить до того, що розмір іона начебто зростає, а його рухливість падає.

Електричний струм в електролітах має багато схожих рис зі струмом у металах. При дисоціації на два іони густина струму, який створюється рухом позитивних і негативних зарядів,

$$j = n_+ e v_+ + n_- e v_-, \quad (4.1.1)$$

де  $n$  – концентрація іонів відповідного сорту;  $e$  – заряд;  $v$  – швидкість їх упорядкованого руху.

Концентрація позитивних і негативних іонів в електролітах однакова, тому

$$n_+ = n_- = \alpha n. \quad (4.1.2)$$

Швидкість іонів можна виразити через їх рухливість  $b$ :

$$\begin{aligned} v_+ &= b(+E), \\ v_- &= b(-E), \end{aligned} \quad (4.1.3)$$

де  $E$  – напруженість електричного поля.

Отже,

$$j = ne\alpha(b_+ + b_-)E. \quad (4.1.4)$$

Тобто для електролітів, як і для металів, справедливим є закон Ома.

Питома електропровідність електроліту

$$\sigma = ne\alpha(b_+ + b_-). \quad (4.1.5)$$

Проходження струму через електроліт супроводжується виділенням на електродах складових частин електроліту – електролізом.

Кількісно цей процес описується законами Фарадея, з яких випливає, що

$$ne = FC, \quad (4.1.6)$$

де  $F$  – число Фарадея, а  $C$  – еквівалентна концентрація розчину.

Тоді вираз для електропровідності має вигляд

$$\sigma = FC\alpha(b_+ + b_-), \quad (4.1.7)$$

тобто, якщо знати  $\alpha$  із незалежних вимірювань, то визначивши електропровідність електроліту, можна визначити суму рухливостей іонів.

Залежність  $\sigma$  від концентрації  $C$  розчиненої речовини носить досить складний характер, оскільки  $\sigma$  залежить від  $C$  і безпосередньо, і через  $\alpha$ . При малих концентраціях, коли  $\alpha$  порядку 1,  $\sigma$  зростає пропорційно  $C$ . Надалі із збільшенням концентрації починає зменшуватись  $\alpha$ , тому електропровідність знижується, а далі  $\sigma$  навіть зменшується.

Електропровідність електролітів при нагріванні сильно збільшується. Це пов'язано з двома причинами: по-перше, з підвищенням температури збільшується коефіцієнт дисоціації  $\alpha$ ; по-друге, при нагріванні в'язкість рідин зменшується, що призводить до збільшення рухливості іонів. При нагріванні слабшають зв'язки іона із сусідніми з ним

молекулами, які утворюють сольват, що зменшує роль частки, яка рухається, і, таким чином, зменшує силу тертя.

#### 4.1.2. Прилади і обладнання

Хімічні стакани; розчини мідного купоросу різної концентрації; термостат; реохордний міст Р 38.

#### 4.1.3. Завдання і методика експерименту

Установка для вимірювання електропровідності при кімнатній температурі (рис. 4.1.1) складається з кількох хімічних стаканів, які містяться на загальній підставці. Стакани заповнені розчинами мідного купоросу з різними концентраціями, зазначеними на робочому місці. Над кожним стаканом є отвір для розміщення в ньому мідних електродів, приєднаних до моста, що слугує для вимірювання опору шару електроліту, який знаходиться під електродами.

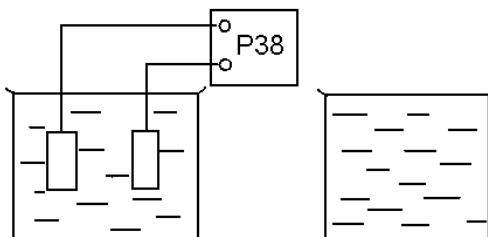


Рис.4.1.1.

Після занурення мідних електродів у розчин  $\text{CuSO}_4$  відбувається дисоціація за схемою



Позитивні іони міді рухаються до негативного електрода (катода), нейтралізується і осаджується на ньому. Іон  $\text{SO}_4^{--}$  віддає два електрони аноду. Нейтральна група  $\text{SO}_4$  активніше вступає в реакцію з міддю анода, ніж з водою, через це на аноді йде вторинна реакція



Отже, в ході електролізу концентрація розчинів мідного купоросу у випадку мідних електродів не змінюється.

Необхідно зауважити, що під дією постійного струму електроди поляризуються продуктами електролізу, і вимірний опір не відповідає дійсному значенню опору об'ємного шару електроліту. Через це опір електролітів у даній роботі вимірюють, пропускаючи через електроліт змінний струм, а потім використовують реохордний міст Р38.

Цей прилад є одинарним зрівноважувальним мостом із ступенево-регульованим плечем порівняння і плавно регульованим відношенням плечей. На кришці приладу наведено схему приладу і правила користування ним. На верхній панелі (рис. 4.1.2) у правому верхньому куті розміщено шкалу 1, за якою відліковується відношення плечей.

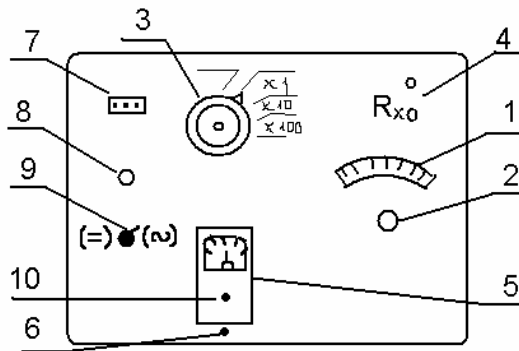


Рис.4.1.2.

У лівому верхньому куту розміщено перемикач 3 опорів порівнювального плеча. Затискач 4 для під'єднання  $R_x$  знаходиться в правому верхньому куту.

У лівому нижньому куту панелі розміщено гальванометр 5, який слугує для індикації нуля. Під ним знаходиться перемикач гальванометра 6.

Для під'єднання напруги живлення ( $\sim 127$  В) у лівому боці панелі є гніздо 7, а під ним – індикаторна лампочка 8 і перемикач живлення 9.

#### Правила роботи з мостом P38.

1. Підвести до гнізд “Питание прибора”  $\sim 127$  В.
2. Перемикач “Питание” зафіксувати в положення “ $\sim$ ”.
3. До затискачів “ $R_x$ ” під'єднати електроди.
4. Перемикач плеча порівняння поставити в положення “Установка нуля”, перемикач гальванометра – в положення “Точно”. Коректором 10 установити стрілку гальванометра в нульове положення.
5. Поставити перемикач гальванометра в положення “Грубо”. Урівноважити міст обертання ручок плеча порівняння і реохорда, а далі перевести перемикач гальванометра в положення “Точно” і обертанням ручки реохорда доврівноважити міст.
6. Здійснити відлік значень опору  $R$  і відношення плечей  $m$  (за шкалами). Визначити вимірюваний опір за формулою

$$R_x = mR. \quad (4.1.10)$$

Потім, якщо відомі розміри електродів і відстань  $l$  між ними визначити питомий опір:

$$\rho = R_x(S/l). \quad (4.1.11)$$

Треба, однак, зазначити, що внаслідок крайових ефектів, тобто нерівномірного розподілу силових ліній в електричному полі, струм проходить не через поверхню електродів, які повернені один до одного, а й через деяку частину їх зворотного боку. Це призводить до подовження силових ліній на краях електродів, тобто до зміни  $l$ . Розподіл силових ліній залежить від форми, розмірів і взаємного розміщення електродів. Відношення  $l/S$  можна легко визначити, виміривши в тій самій посудині опір електроліту  $R_0$ , питомий опір  $\rho_0$  якого точно відомий, і далі з розрахунку знайти

$$l/S = R_0 / \rho_0. \quad (4.1.12)$$

Так найчастіше і діють на практиці, для того щоб урахувати наявність крайового ефекту.

У цій роботі цей ефект не беремо до уваги, оскільки відстань між електродами в установці, що використовується, є достатньо малою порівняно з їх розмірами.

1. Почергово поміщуючи електроди в стакани з розчином мідного купоросу з різною концентрацією, виміряти опір розчинів при кімнатній температурі і побудувати залежність питомої електропровідності даного електроліту від концентрації. Для того, щоб зменшити забруднення розчинів, вимірювання здійснювати від розчинів з меншою концентрацією до розчинів з більшого.

- Визначити залежність опору розчину мідного купоросу однієї і тієї самої концентрації від температури в інтервалі  $0 \dots 95 \text{ }^\circ\text{C}$ . Вимірювання опору здійснювати через  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  при нагріванні й охолодженні розчину. Побудувати названу залежність у вигляді графіка.

#### Контрольні завдання і запитання.

- Перший і другий закони електролізу Фарадея.
- Що таке дисоціація? Від чого залежить коефіцієнт дисоціації?
- Основні положення теорії електропровідності електролітів.
- Приклади технічного використання електролізу.

[1; 4-8; 11]

### Лабораторна робота 4.2. Дослідження властивостей тліючого розряду

Мета роботи – вивчити властивості тліючого розряду в повітрі.

#### 4.2.1. Основні теоретичні відомості

Якщо до електродів, які впаяні в скляну трубку, прикласти постійну напругу в кілька сотень вольт, а далі поступово відкачувати повітря із трубки, то будуть спостерігатись такі явища. При атмосферному тиску прикладена напруга ще недостатня для пробою газу і трубка буде темною. При зменшенні тиску газу (приблизно до кількох десятих тор) у деякий момент у трубці виникає розряд, який має вигляд світлого шнура, що з'єднує анод та катод трубки. При подальшому зменшенні тиску цей шнур розширюється і заповнює весь переріз трубки і світіння біля катода слабке.

Тліючий розряд є проміжним між іскровим (таунсенівським) та дуговим розрядами. Характерні його ознаки – особливий вигляд розподілу потенціалу в розрядному проміжку і зовнішній вигляд розряду (рис. 4.2.1).

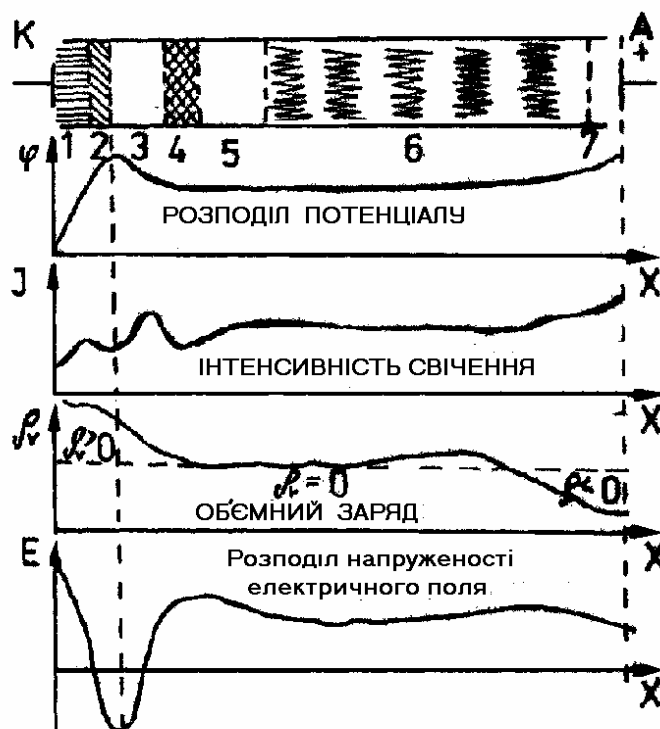


Рис.4.2.1.

Існують такі особливості тліючого розряду:

- Біля катода спостерігається дуже тонкий темний прошарок, який називається темним (астоновим) простором. Ця особливість пов'язана з тим, що електрони починають здійснювати зіткнення з атомами газу не відразу, а тільки на деякій відстані від катода.

2. Далі йде перше катодне світіння, або катодна світлова плівка.
3. За катодним світінням міститься так званий темний катодний простір, який називається круковим.
4. Темний катодний простір різко переходить у негативне тліюче світіння, яке є найбільш яскравою світною областю розряду.
5. Яскравість тліючого світіння поступово зменшується і переходить у темний простір Фарадея.
6. За темним простором Фарадея знаходиться частина розряду, яка називається позитивним стовпом розряду. Звичайно позитивний стовп простягається до самої поверхні анода і являє собою або стовп газу, який однорідно світиться, або темний темні і світлі шари, що чергуються, їх називають стратами.
7. При деяких умовах між позитивним стовпом і анодом видно анодний простір, а на самій поверхні анода – анодне світіння, або анодну плівку, що світиться.

Розряд у трубці підтримується електронами, які емітуються при бомбардуванні катода позитивними іонами. Електрони вилітають з катода з невеликими швидкостями. Прискорюючись в електричному полі, вони починають збуджувати атоми газу. Висвічування, яке здійснюється цими атомами, спостерігається в катодній плівці. При подальшому рухові електрони іонізують газ. Позитивні іони, які при цьому утворюються, призводять до розподілу потенціалу і напруженості поля, які показано на рис. 4.2.1.

У цих ділянках розряду характерними є велика швидкість напрямленого руху електронів та інтенсивний процес іонізації електронним ударом. Електрони, які втратили енергію при непружних зіткненнях, та вторинні електрони, які не встигли дістати велику енергію, накопичуються поблизу негативного світіння і знижують потенціал настільки, що з'являється ділянка з негативною напруженістю поля. В точці простору, де потенціал проходить через максимум і яка відповідає початку негативного світіння, відбувається інтенсивна рекомбінація. Далі до аноду швидкість електронів зростає, рекомбінація послаблюється, а для збудження електрони ще не мають достатньої енергії. Через це світіння послаблюється, а негативне світіння переходить у темний простір Фарадея.

У позитивному стовпі також відбувається процес іонізації, який поповнює втрати часток унаслідок рекомбінації та дифузії на стінки трубки. В ділянці негативного тліючого світіння в фарадєєвому темному просторі електричне поле мале, тому електрони внаслідок зіткнень підкоряються поділу, близькому до максвелівського. Однак вони не знаходяться в тепловій рівновазі з газом, тому що при пружних зіткненнях, які переважають у цих ділянках, електрони практично не втрачають енергію, їх температура є значно вищою, ніж температура газу. Найшвидші електрони здійснюють іонізацію, поповнюючи втрату електронів, менш швидкі – збуджують атоми газу, висвічування якого спостерігається в цій ділянці. Втрату електронів поповнює електричне поле, яке існує в позитивному стовпі. Воно тим більше, чим вужчою є трубка, тобто чим більшим є втрати.

У позитивному стовпі і в тій частині фарадєєвого темного простору концентрація позитивних іонів майже дорівнює концентрації електронів. Завдяки цьому результуючий об'ємний заряд і зміна потенціалу тут практично дорівнюють нулю. Ці ділянки розряду являють собою плазму, яку називають неізотермічною внаслідок відмінності температур іонів та електронів.

Тліючий розряд широко використовують як джерело світла в різних газосвітних трубках, лампах денного світла, індикаторних лампах. У лабораторній практиці використовують тліючий розряд для катодного розпилювання металів, оскільки речовина катода поступово переходить у пароподібний стан і осідає у вигляді металічного нальоту на стінках трубки. Розміщуючи в тліючому розряді проти катода різні предмети, їх покривають рівномірним і міцним шаром металу. Тліючий розряд лежить також в основі принципу роботи газових стабілітронів.

### 4.2.2. Прилади і обладнання

Джерело високої напруги ДВН; термопарний вакууметр ВІТ 1А; форвакуумний насос; резистор; вольтметр; амперметр.

### 4.2.3. Завдання і методика експерименту

Розрядна трубка – це скляний балон, чрез торці якого введені два дискових електроди. Анод закріплено нерухомо, а катод з допомогою магніту можна переміщувати вздовж трубки. Крім електродів у розрядну трубку впаяні ряд зондів – тонких металевих дротинок. Вони Дозволяють досліджувати розподіл потенціалу в провідному газіві.

Розрядна трубка є частиною вакуумної установки (рис. 4.2.2), яку відкачують форвакуумним насосом. Тиск вимірюють за допомогою термопарного вакуумметра. Електроди розрядної трубки через резистор R з опором 1 МОм приєднані до джерела високої напруги ДВН. Виводи від електродів трубки та зондів підведені до спеціального перемикача, який дозволяє приєднати електростатичний вольтметр послідовно до всіх зондів, а також до анода газорозрядної трубки.

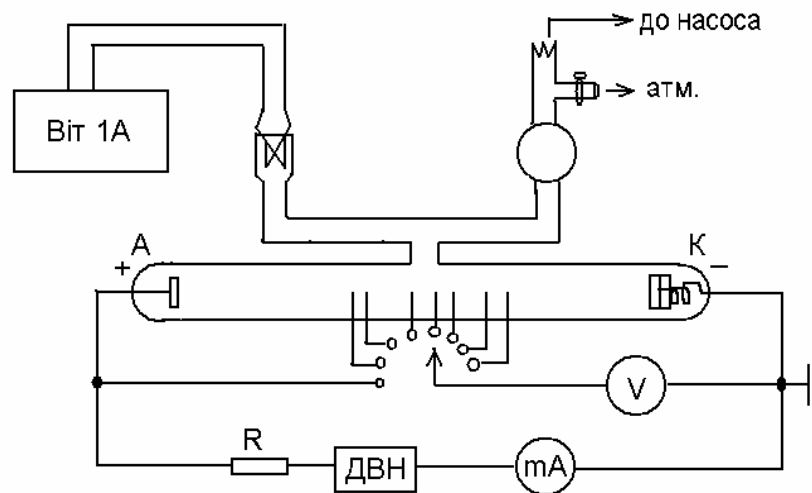


Рис.4.2.2.

1. Зняти залежність струму  $I$ , який протікає через трубку, від тиску  $P$ . Тиск виміряти термовакууметром. Особливо точно треба зафіксувати силу струму в момент загоряння розряду. Для здобуття надійних результатів треба в момент вимірювання відключити установку від форвакуумного насоса. Відкачувати треба до моменту зникнення свічення.
2. Зняти залежність різниці потенціалів  $U$  (між катодом та анодом) від тиску  $P$ .
3. Зобразити здобуті залежності у вигляді графіків  $U = f(P)$  та  $I = f(P)$ .
4. Дослідити розподіл потенціалу вздовж трубки. Для цього треба виміряти різницю потенціалів між катодом і послідовно розміщеними зондами, використовуючи для цього перемикач П та електростатичний вольтметр V. Результати вимірювань навести у вигляді графіка  $U = f(X)$ , де  $x$  – відстань від катода, виміряна за шкалою, розміщеною поруч з трубкою. Сума всіх різниць потенціалів має дорівнювати напрузі на трубці. Вимірювання треба виконувати при кількох значеннях тиску (на око) графік розподілу інтенсивності світіння вздовж трубки.
5. Оскільки ширина катодного темного простору приблизно дорівнює середній довжині вільного пробігу електронів, можна приблизно оцінити цю величину залежно від тиску всередині трубки. Побудувати графік  $\lambda = f(P)$ .

Під час аналізу результатів дослідження треба врахувати, що дослідження розподілу потенціалів уздовж розрядної трубки з допомогою зондів, з'єднаних з електростатичним вольтмером, є дуже грубим і дає тільки якісно правильні результати. Зонд, уведений в іонізований газ, сам трохи змінює розподіл потенціалів у газі. Внаслідок осадіння вільних

іонів та електронів на поверхні зонду, останній, крім того, дістає потенціал, відмінний від потенціалу газу, який його оточує. Похибка вимірювань досягає при цьому десятків або навіть кількох десятків вольт і не може бути врахована.

**Примітка.** Після закінчення роботи необхідно вакуумну установку і форвакуумний насос з'єднати з атмосферою.

#### **Контрольні завдання і запитання.**

1. Тліючий розряд у газі. Які особливості він має?
2. Види самостійних розрядів. Які процеси в газі сприяють підтриманню самостійного розряду?
3. Де використовують тліючий розряд?
4. Як дістати залежність струму через трубку і залежність розподілу потенціалу від тиску?

[1; 2; 4-9; 36]

### **Лабораторна робота 4.3. Вивчення роботи газорозрядного стабілітрона**

**Мета роботи** – ознайомитися з принципом роботи і будовою газорозрядного стабілітрона, дослідити його характеристики.

#### **4.3.1. Основні теоретичні положення**

Відомо, що газорозрядними приладами називають електровакуумні прилади, дія яких ґрунтується на електричному розряді в газі.

При виготовленні цих приладів у скляному або металокерамічному балоні створюють вакуум, а потім заповнюють його інертним газом (неоном, аргоном, гелієм, криптоном, ксеоном) або парами ртуті до тиску порядку  $10^{-3}$  ГПа. В балоні вміщують електроди (у найпростішому випадку два – катод і анод). Анод виготовляють у вигляді штирка діаметром 1...1,5 мм і оточують циліндричним катодом з нікелю або сталі. Внутрішня поверхня катода покрита активним шаром із матеріалу (наприклад, барію), який має малу роботу виходу. До катода з внутрішнього боку приєднано нікелеву дротинку, що спричиняє зменшення відстані між катодом і анодом і забезпечує полегшення загоряння розряду в приладі. Така конструкція пояснюється такими факторами: чим більшою є робоча поверхня катода, тим ширшим є діапазон зміни внутрішнього опору приладу залежно від величини струму, який протікає через прилад, що значно розширює межі стабілізації.

Під дією прикладеної ззовні напруги через іонний прилад протікає електричний струм. Сукупність явищ, які відбуваються в газі або парах ртуті при проходженні через них електричного струму, називають електричним розрядом у газі. При електричному розряді в газі відбуваються іонізація і рекомбінація.

Іонізація спостерігається тоді, коли електрони, які рухаються до анода, володіють швидкістю, яка є достатньою для того, щоб при зіткненні з нейтральним атомом газу розщепити його на вільний електрон і позитивний іон. Щоб електрон атома газу міг перейти з енергетичного рівня валентної зони в зону провідності, має бути затрачена зовнішня енергія.

Рекомбінація відбувається при з'єднанні позитивного іона газу і вільного електрона в нейтральний атом. При цьому електрон переходить з більш високого енергетичного рівня, який відповідає зоні провідності, на більш низький рівень, який відповідає валентній зоні. Надлишок енергії, який дорівнює різниці цих рівнів, випромінюється у вигляді квантів світла – фотонів.

При електричному розряді в газі безперервно відбувається як іонізація, так і рекомбінація, через це спостерігається світіння газу.

Таким чином, носіями заряду в іонних приладах з електронами є й іони газу. Електричний розряд в газі може бути самостійним і несамостійним.

Самостійний розряд продовжується після видалення зовнішнього іонізатора. При цьому носії заряду безперервно утворюються в процесі самого розряду за рахунок електронів, які вибиваються з катода під дією іонного бомбардування.

Несамостійний розряд припиняється при відсутності зовнішнього іонізатора.

Зовнішніми факторами, які необхідні для підтримання несамостійного розряду, можуть бути природні іонізатори: космічні та сонячні промені, електромагнітне випромінювання, радіація, а також розжарення або освітлення катода для одержання електронної емісії.

Звичайно газорозрядні прилади, побудовані на самостійному розряді, мають холодний катод, а прилади з несамостійним розрядом – розжарюваний термокатод.

Самостійний розряд не може самостійно виникнути при поданні анодної напруги, якщо в газі немає початкової іонізації атомів. У реальних умовах вона завжди існує під дією природних іонізаторів, і в газі є певна кількість вільних електронів і позитивних іонів, які необхідні для виникнення розряду. Отже, самостійний розряд може виникнути тільки в процесі переходу із самостійного.

Як самостійний, так і несамостійний розряди залежно від інтенсивності іонізації та інших умов можуть бути різних видів: темний, тліючий, дуговий, іскровий.

Для вивчення особливостей газового розряду до електродів газорозрядного приладу через обмежувальний резистор  $R_{обм}$  приєднують регульовальне джерело сталої напруги (рис. 4.3.2.).

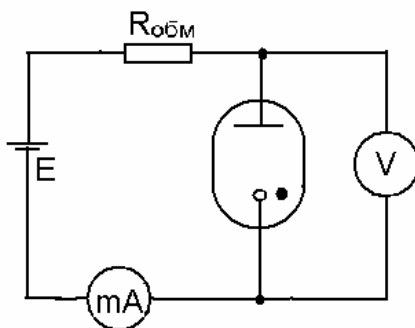


Рис.4.3.1.

При невеликих напругах носії заряду в газі, які є в ньому внаслідок дії природних іонізаторів, рухаються з малими швидкостями. Енергія електронів ще не є достатньою для створення іонної лавини, і струм є малим – порядку  $10^{-8} \dots 10^{-6}$  А. Ця ділянка (0-1) на вольт-амперній характеристиці (рис. 4.3.2.) називається темним несамостійним зарядом.

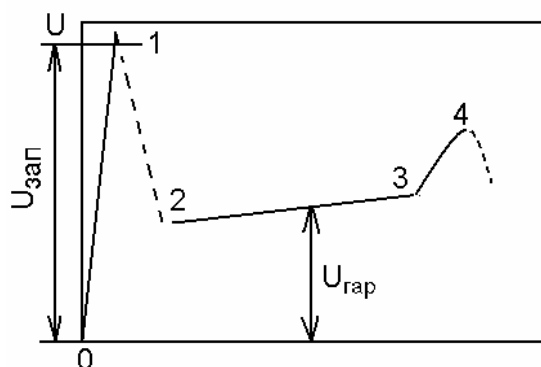


Рис.4.3.2.

При подальшому збільшенні напруги енергія електронів стає достатньою для іонізації атомів газу і підтримання самостійного розряду. Надалі відбувається запалювання газорозрядного приладу, струм різко зростає, а його опір знижується і темний розряд переходить у тліючий. При цьому спад напруги на обмежувальному резисторі  $R_0$  різниця потенціалів між електродами газорозрядного приладу зменшується від напруги запалювання  $U_з$  до напруги горіння  $U_Г$  (рис. 4.3.2.). Цей процес є некерованим.

Виникнення тліючого розряду супроводжується світінням газу, колір якого визначається видом газу. Наприклад, неон дає червоно-оранжеве світіння, аргон – синє, гелій – жовте, пари ртуті – синьо-зелене.

Напруга горіння  $U_{\Gamma}$  дорівнюватиме різниці між анодною напругою  $U_a$  і спадом напруги на обмежувальному резисторі  $R_0$ , тобто  $U_{\Gamma} = U_a - I_a R_0$ . Вона забезпечує підтримання потрібного рівня іонізації газу для продовження розряду. При цьому  $U_{\Gamma}$  приблизно дорівнює потенціалу іонізації газу.

Тліючий розряд може бути двох видів: нормальний і аномальний. При переході темного розряду в тліючий спочатку встановлюється нормальний тліючий розряд (ділянка 2-3 на рис. 4.3.2.). Він характеризується тим, що при подальшому зростанні струму  $I_a$  напруга на приладі  $U_a$  залишається постійною. Цю властивість використовують для стабілізації напруги. Струм зростає або збільшенням напруги живлення  $U_a$ , або зменшенням обмежувального опору. При виникненні нормального тліючого розряду світіння газу спочатку спостерігається біля не всієї поверхні катода. Мірою зростання струму світна пляма збільшується, а яскравість світіння залишається сталою. Це означає, що густина струму на катоді незмінна, лише збільшується площа поверхні катода, який емітує електрони під дією іонного бомбардування.

Зростання струму при незмінній напрузі  $U_a$  відбувається доти, доки світіння не пошириться на всю поверхню катода. Подальше збільшення струму можливе лише за рахунок більш інтенсивного бомбардування катода іонами, а для цього потрібно збільшити напругу на приладі. В цей момент розряд переходить в аномальний тліючий розряд (ділянка 3-4 на рис. 4.3.2.). На зазначеній ділянці із зростанням струму збільшуються напруга  $U_a$  і яскравість світіння газу.

Лавиноподібне зростання процесу іонізації, а також швидкості і енергії іонів, які бомбардують катод, зумовлює розігрівання катода під їх ударами і виникнення термоелектронної емісії з його поверхні. Це сприяє значному зростанню струму при різкому зменшенні його опору і напруги на ньому. Розряд переходить у дуговий, який використовують у дугових проекційних лампах, потужних джерелах світла і випрямлячах.

Усі газорозрядні прилади вмикають у коло джерела живлення обов'язково послідовно з обмежувальним резистором для обмежування струму, щоб один вид розряду спонтанно не переходив в інший. При увімкненні приладу без обмежувального резистора процеси лавиноподібно проходять стадії всіх видів розряду; миттєво розвивається дуговий розряд, який руйнує електроди і виводить прилад з ладу.

До приладів, які працюють на ділянці нормального тліючого розряду, належать газорозрядні стабілітрони. Вони слугують для безпосередньої стабілізації постійної напруги, а також як джерело опорної (еталонної) напруги в електронних стабілізаторах постійної напруги компенсаційного типу. Стабілітрон з'єднують паралельно з навантаженням  $R_H$ , а послідовно до нього вмикають резистор  $R_{обм}$ . Навантаженням часто слугують анодні кола і кола сіток якого-небудь підсилювача. Для стабілізації високих напруг стабілітрони з'єднують послідовно, звичайно не більше, ніж два-три. Вони можуть бути розраховані на різні напруги стабілізації. З'єднані послідовно, стабілітрони використовують як подільник, який дає різні стабільні напруги. Для змінного струму стабілітрон є еквівалентним до конденсатора з великою ємністю, тому у випрямлячах стабілітрони забезпечують додаткове згладжування пульсацій.

Ефективність стабілізації оцінюють коефіцієнтами стабілізації.

Коефіцієнт стабілізації за напругою  $K_U$  показує, у скільки разів відносна зміна напруги на виході стабілітрона  $\Delta U_{вих} / U_{вих}$  є меншою за відносну зміну напруги джерела  $\Delta U_{вх} / U_{вх}$ , тобто

$$K_U = \frac{\Delta U_{вих}}{U_{вих}} \bigg/ \frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх}} = \frac{\Delta U_{вх} U_{вих}}{U_{вх} \Delta U_{вих}}. \quad (4.3.1)$$

Коефіцієнт стабілізації за струмом визначається так:

$$K_i = \frac{\Delta i_H}{i_H} / \frac{\Delta U_{вих}}{U_{вих}} = \frac{\Delta i_H U_{вих}}{i_H \Delta U_{вих}} \quad (4.3.2)$$

Прирошення вхідних і вихідних напруг і струмів стабілітронів беруть звичайно на середині ділянок їх вольт-амперних характеристик.

### 4.3.2. Прилади і обладнання

Панель керування із стабілітроном, обмежувальним резистором і резистором навантаження, ключем; випрямляч стабілізований, регульований ВСА-5К; випрямляч стабілізований ВС(100 В); вольтметри М-45 (0...300 В і 0...30 В); міліамперметр М-45 (0...75 мА); електронний осцилограф С1-15.

### 4.3.3. Завдання і методика експерименту

Для вивчення роботи стабілітрона використовують схему, показану на рис. 4.3.3.

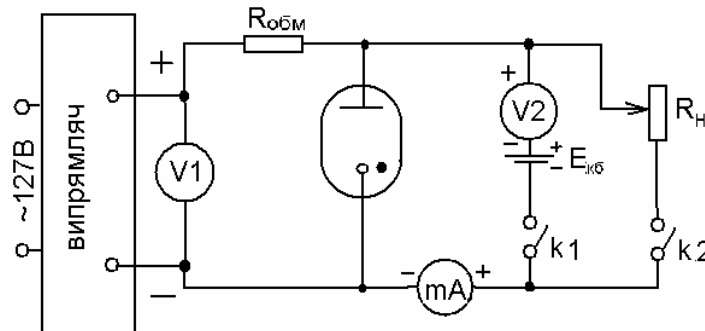


Рис.4.3.3.

На вхід стабілітрона подають регульовану постійну напругу від випрямляча, а на його виході ввімкнено резистор навантаження  $R_n$ , струм через який вимірюється міліамперметром, а напруга на ньому – компенсаційним вольтметром V2. Останній складається з вольтметра, який може вимірювати невелику напругу, і компенсаційного досить стабільного джерела живлення. Таким чином, вольтметр V2 вимірює дуже малі значення зміни напруги на резисторі  $R_n$ , яка є різницею між вихідною напругою стабілітрона і ЕРС компенсаційного джерела живлення.

Характерна особливість залежності напруги на навантаженні від вхідної напруги і струму в навантаженні – неоднаковий хід прямої і зворотної залежності (рис. 4.3.4).

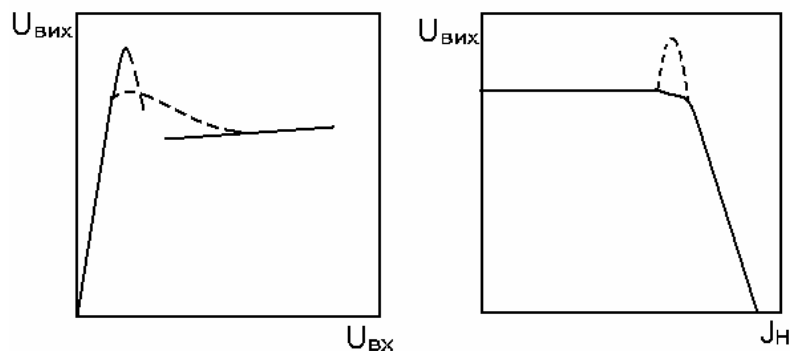


Рис.4.3.4.

1. Скласти схему для дослідження газорозрядного стабілітрона згідно з рис. 4.3.3. Як джерела вхідної і компенсаційної напруги використовують стабілізовані випрямлячі з плавним регулюванням і без нього. Компенсуюча напруга визначається в кінці вимірювань. Для навантаження бажано використовувати дротяні змінні резистори.

2. Зняти залежність вихідної напруги  $U_{вих}$  від вхідної  $U_{вх}$  при якому-небудь значенні опору навантаження, наприклад, при максимальному. Для цього треба, встановивши потрібний опір навантаження, замкнути ключ К2 (ключ К2 при цьому повинен бути

розімкненим). Далі треба ввімкнути випрямляч і виставити регулятором найбільше значення вхідної напруги, при якій стабілітрон ще не загоряється. Замкнути ключ К1. Якщо вдало підбрано значення початкової вхідної напруги, то при умові, що ключ К1 замкнуто, стрілка вольтметра V2 буде знаходитись на початку шкали. Поступово збільшуючи вхідну напругу, зняти залежність між  $U_{вих}$  і  $U_{вх}$  у прямому і зворотному напрямках.

3. Зняти залежність  $U_{вих} = f(i_H)$  при сталій напрузі на вході стабілітрона. Для цього при розімкнених ключах К1 і К2 вклучити випрямляч і встановити вхідну напругу, яка має бути 240 В. Замкнути ключ К1 і записати покази вольтметра V2 і міліамперметра. Встановити максимальне значення опору навантаження  $R_H$ , замкнути ключ К2. Плавно зменшуючи опір навантаження, зняти залежність вихідної напруги  $U_{вих}$  від струму в навантаженні. Напруга на вході при цьому має бути весь час незмінною. Зменшуючи опір навантаження настільки, щоб стабілітрон згас, повторити вимірювання у зворотному напрямку, тобто при поступовому збільшенні опору.

4. Зняти вольт-амперну характеристику стабілітрона. Для цього треба скласти схему, яка показана на рис. 4.3.5.

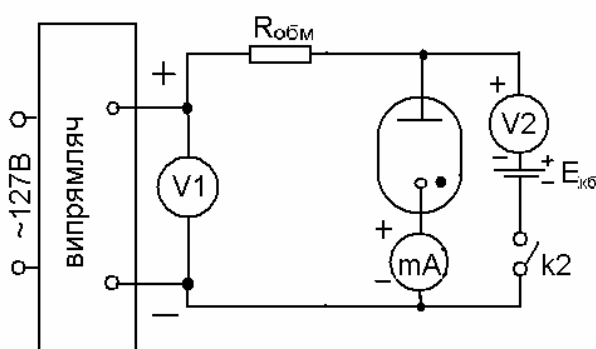


Рис.4.3.5.

Вимірювання необхідно виконати так. При розімкненому ключі К1 ввімкнути випрямляч і встановити максимальну напругу на вході стабілізатора, після чого замкнути ключ К1. Зменшуючи вхідну напругу  $U_{вх}$ , зняти залежність  $U_{вих} = f(U_{вх})$ . Після згасання стабілітрона повторити такі самі вимірювання при збільшенні  $U_{вх}$ .

5. Для спостереження осцилограм залежності  $U_{вих} = f(U_{вх})$  необхідно скласти схему, яка показана на рис. 4.5.6. Гнізда для підключення X і Y пластин знаходяться на платі заднього кронштейна осцилографа. Склавши схему, треба дістати осцилограму при такому максимальному опорі навантаження, при якому стабілітрон ще не горить, у випадку, коли  $R_H$  є більшим від того, при якому стабілітрон загоряється, тобто коли  $R_H \rightarrow R_{max}$ .

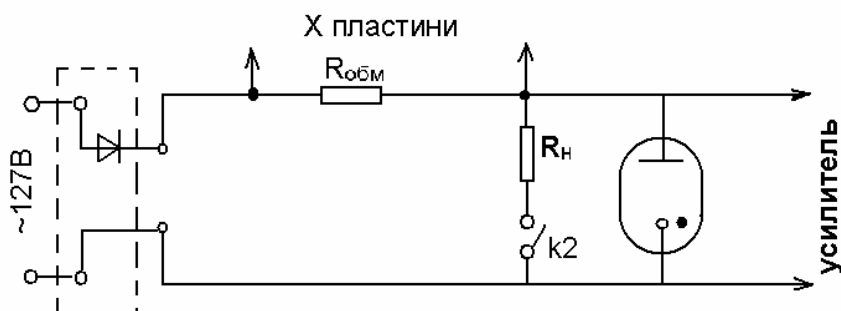


Рис.4.3.6.

6. За здобутими даними побудувати графіки і обчислити коефіцієнти стабілізації.

### Контрольні завдання і запитання

1. Як дістати залежність вихідної напруги газорозрядного стабілітрона від вхідної при максимальному значенні опору навантаження?
2. Як дістати залежність вихідної напруги газорозрядного стабілітрона від струму через навантаження при сталому значенні вхідної напруги на вході стабілітрона?
3. Як зняти вольт-амперну характеристику стабілітрона?
4. Яка схема використовується для осцилографування вольт-амперної характеристики стабілітрона?
5. Види самостійних розрядів у газах.
6. Особливості вольт-амперної характеристики приладу тліючого розряду.
7. З якою метою послідовно із стабілітроном вмикають обмежувальний резистор?
8. Яким параметром оцінюють ефективність стабілізації? Як можна збільшити коефіцієнт стабілізації за напругою електронних схем, використовуючи для цього газові стабілітрони?
9. Яку будову має газорозрядний стабілітрон? Які основні параметри характеризують стабілітрон?

Наведіть приклади використання газорозрядних стабілітронів.

[13; 20; 22; 23; 26; 28]