

Лекція 4

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГИ І СИЛИ СТРУМУ

Вимірювання напруги і сили струму – це найбільш розповсюджені операції при дослідженні та експлуатації різних електротехнічних пристроїв. Значення вимірюваних напруг і сил струмів характеризують інтенсивність протікання електричних процесів.

Вимірювання напруг і сил струмів виконується методами безпосередньої оцінки або методами порівняння. Методи безпосередньої оцінки реалізуються вольтметрами та амперметрами, а методи порівняння – потенціометрами та компараторами. Силу струму вимірюють в діапазоні значень від 10^{-16} А до десятків кілоампер, а напругу – в діапазоні значень від нановольт до сотень кіловольт.

В електричних колах зручніше вимірювати напругу, а не силу струму, оскільки вольтметр підключається паралельно досліджуваному колу і не доводиться порушувати схему з'єднань, тобто розривати коло (що в ряді випадків призводить до небажаних спотворень процесу). Внаслідок цих причин вимірювання сили струму виконується на постійному і змінному струмі на частотах до 10 МГц. Напругу вимірюють на частотах до 1 ГГц. На більш високих частотах віддають перевагу вимірюванню потужності, а не струмів і напруг.

4.1 Вимірювання напруги і сили постійного струму

4.1.1 Метод безпосередньої оцінки

Для вимірювання напруги і сили постійного струму можна використовувати електромагнітні, електродинамічні, феродинамічні прилади. Проте перевагу надають магнітоелектричним вольтметрам та амперметрам. Вони забезпечують високу точність, чутливість, споживають дуже малу потужність (на рівні мікро- та міліват). Основна та додаткові похибки визначаються класом точності приладу. Крім цих похибок, в деяких випадках треба враховувати похибку, обумовлену поглинанням потужності вимірювальними приладами (похибку взаємодії). Так, вмикання амперметра послідовно з навантаженням (рис. 4.1, а) збільшує опір електричного кола і, отже, зменшує силу струму в цьому колі, а вмикання вольтметра (рис. 4.1,б) зменшує опір ділянки кола, на якому вимірюється напруга, і напругу на дій ділянці.

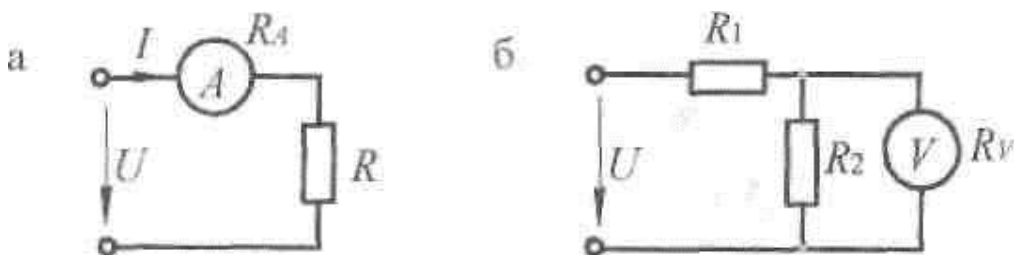


Рисунок 4.1 – Вплив опорів амперметра та вольтметра на опір ділянки кола

Відносна похибка вимірювання сили струму амперметром

$$\delta_i = -\frac{1}{1 + R/R_A}$$

є тим меншою, чим менше опір амперметра R_A порівняно з опором R навантаження, а відносна похибка вимірювання напруги вольтметром

$$\delta_u = -\frac{1}{1 + R_V(1/R_1 + 1/R_2)}$$

зменшується зі збільшенням опору вольтметра R_V .

Іншими словами, чим менше споживання потужності вимірювальними приладами порівняно зі споживанням потужності навантаженням, тим менша похибка взаємодії.

4.1.2 Компенсаційний метод

Застосовується для вимірювання напруг, електрорушійних сил та величин, функціонально з ними пов'язаних. Метод дозволяє порівнювати вимірювану напругу U_X зі зразковою напругою U_k . Прилади, які вимірюють напругу компенсаційним методом, називають потенціометрами або компенсаторами.

На рис. 4.2 наведена схема потенціометра з ручним зрівноваженням, який складається з вимірювального подільника R_B , установочних резисторів R_y , опір яких вибирають залежно від значення робочого струму I_p потенціометра, набору регульовальних потенціометрів R_p , нормального елемента E_N , гальванометра та джерела опорної напруги U_0 . Струм I_p у вимірювальному подільнику напруги R_B , який обумовлюється джерелом живлення U_0 , називають робочим.

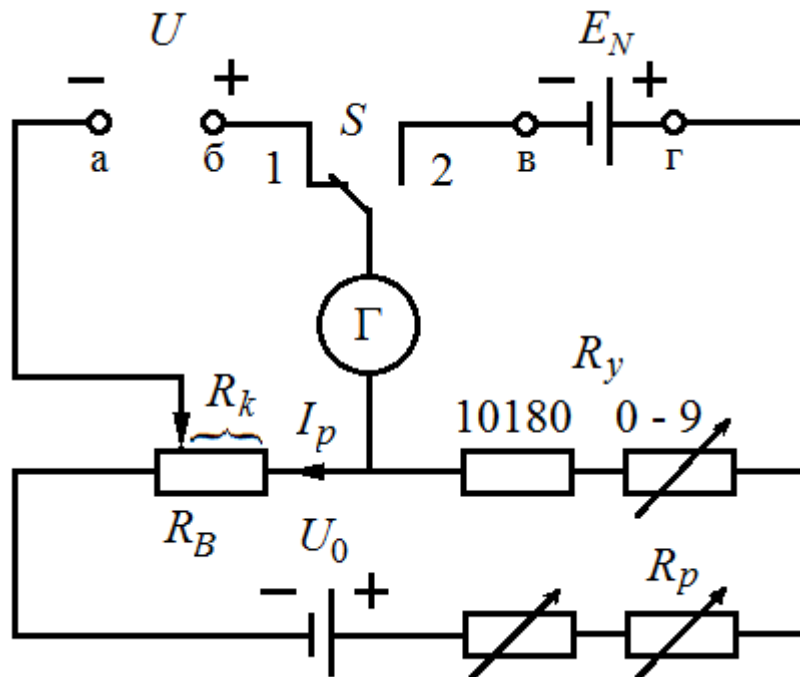


Рисунок 4.2 – Схема потенціометра з ручним зрівноваженням

Робочий струм потенціометра має установлюватися з високою точністю. Це досягається порівнянням спаду напруги, що створюється робочим струмом на резисторах R_y , з електрорушійною силою E_N нормального елемента. Нормальний елемент є мірою постійної напруги і може бути насиченим і ненасиченим. Основні характеристики нормальних елементів наведені в табл. 4.1, а їх будова – на рис. 4.3.

Таблиця 4.1 – Основні характеристики нормальних елементів

Тип нормального елемента	Клас точності	Значення ЕРС при температурі 20 °С, В	Допустима зміна ЕРС за 1 рік, мкВ	Робоча температура, °С
Насичений	0,0002	1,018540...1,018730	2,0	19...21
	0,0005		5,0	18...22
	0,001		10,0	18...22
	0,002		20,0	18...40
	0,005		50,0	
Ненасичений	0,002	1,01880...1,01960	20,0	10...40
	0,005		50,0	10...40
	0,01		100,0	5...40
	0,02		200,0	5...50

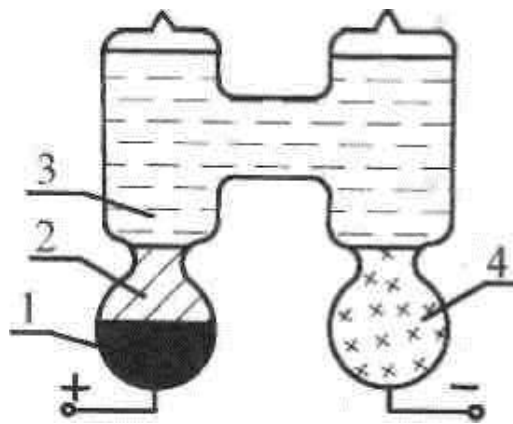


Рисунок 4.3 – Будова нормального елемента:

1 – ртуть; 2 – сульфат закису ртуті; 3 – розчин сульфату кадмію; 4 – амальгама кадмію

Позитивний електрод нормального елемента складається з ртуті 1 та сульфату закису ртуті 2, негативний електрод – із амальгами кадмію 4. Електролітом є насичений (у насичених елементах) або ненасичений (у ненасичених елементах) розчин сульфату кадмію 3.

Значення ЕРС нормальних елементів досить помітно, але закономірно залежить від температури навколишнього середовища. Для насичених нормальних елементів ця залежність виражається формулою

$$E_{Nt} = E_{20} - 40,6 \cdot 10^{-6}(t - 20^\circ) - 0,95 \cdot 10^{-6}(t - 20^\circ)^2 + 0,01 \cdot 10^{-6}(t - 20^\circ)^3. \quad (4.1)$$

Останній член практично враховується тільки при найбільш точних вимірюваннях (до десятих часток мікрівольта).

Залежність ЕРС ненасичених елементів від температури навколишнього середовища не враховується.

Методика вимірювання напруги U (або ЕРС E) така. Спочатку установлюють силу робочого струму I_p . Для нього:

- до затискачів «в» і «г» (див. рис. 4.2) підключається нормальний елемент;
- за формулою (4.1) обчислюється ЕРС E_{Nt} нормального елемента при даній температурі t навколишнього середовища;
- обчислюється значення опору установочного резистора

$$R_y = \frac{E_{Nt}}{I_p}.$$

Наприклад, якщо ЕРС нормального елемента $E_{Nt} = 1,0188\text{В}$, а сила робочого струму має дорівнювати $I_p = 0,1\text{ мА}$, то $R_y = 1,0188/0,1 \cdot 10^{-3} = 10188\text{ Ом}$.

Перемикач S (рис. 4.2) ставлять в положення «2». Виставивши обчислене значення опору R_y , регулюють опір R_p , досягаючи нульових показань гальванометра, і тим самим установлюють значення сили робочого струму, яке дорівнює $I_p = 0,1\text{ мА}$.

Оскільки ЕРС нормального елемента і значення опору R_y відомі з високою точністю, то і значення робочого струму встановлюється з такою ж точністю.

Для вимірювання напруги U перемикач S переводиться в положення «1». Змінюючи коефіцієнт передачі подільника R_B , досягають нульових показань гальванометра, тобто рівності вимірюваної напруги та спаду напруги на резисторах R_k

$$U = I_p R_k. \quad (4.2)$$

З рівняння (4.2) випливає, що точність вимірювання напруги U залежить не тільки від точності підгонки значень опору резисторів подільника R_B та точності встановлення робочого струму I_p , а й від чутливості гальванометра.

Достоїнством потенціометра є відсутність поглинання потужності від джерела вимірюваної напруги (ЕРС) в момент компенсації. Саме з цієї причини можливе пряме вимірювання електрорушійної сили за допомогою потенціометра. Опосередкованим методом можна вимірювати силу струму, потужність, опір.

Для вимірювання сили струму у вимірювальне коло вмикається резистор R_0 (рис. 4.4, а), опір якого відомий із заданою точністю. Вимірявши потенціометром напругу U_0 на резисторі R_0 , силу струму обчислюють за формулою

$$I_X = \frac{U_0}{R_0},$$

а вимірюючи ще й напругу на об'єкті дослідження, можна обчислити опір і потужність, що поглинається резистором R_X

$$R_X = \frac{R_0 U_X}{U_0}; \quad P_X = \frac{U_0 U_X}{R_0}.$$

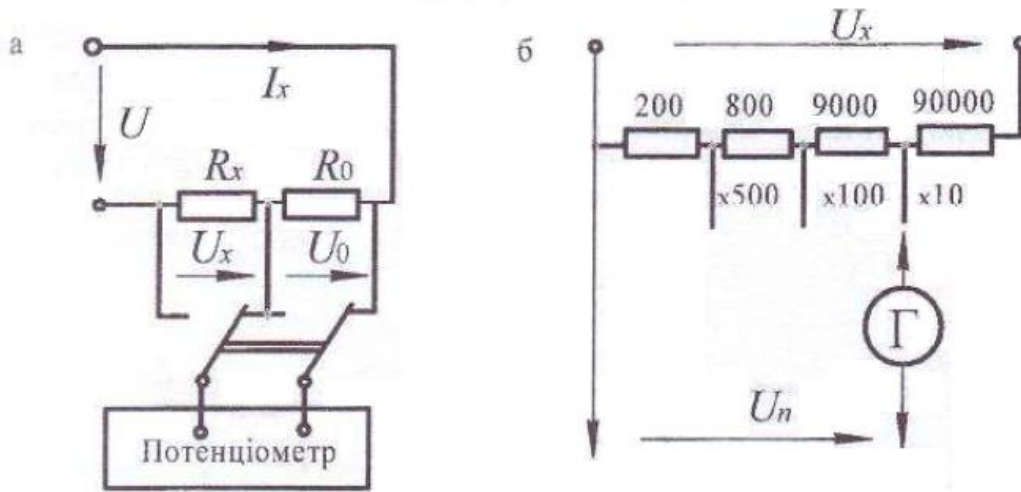


Рисунок 4.4 – Схема вимірювання сили струму за допомогою потенціометра

Розширення межі вимірювань напруги здійснюється за допомогою зразкового подільника напруги (рис. 4.4, б).

Для забезпечення високоточного результату необхідно одержати відлік числового значення вимірюваної напруги з достатньою кількістю десяткових знаків. Для цього резистор R_B (рис. 4.2) виготовляється у вигляді багатодекадного магазину опор так, щоб його опір робочому струмові не залежав від положення декадних важелів, тобто щоб в схемі завжди виконувалась умова $R_B = \text{const}$ і забезпечувалась стабільність робочого струму та його незалежність від регулювання компенсуючої напруги U_k .

Найпростіший дводекадний магазин опорів являє собою послідовне з'єднання резисторів двох номіналів: R і $0,1R$ (рис. 4.5). Перший знак відліку компенсуючої напруги U_k визначається положенням важеля А, а другий десятковий знак – положенням важеля В

$$U_k = nRI_p + m \cdot 0,1RI_p = RI_p(n + m \cdot 0,1).$$

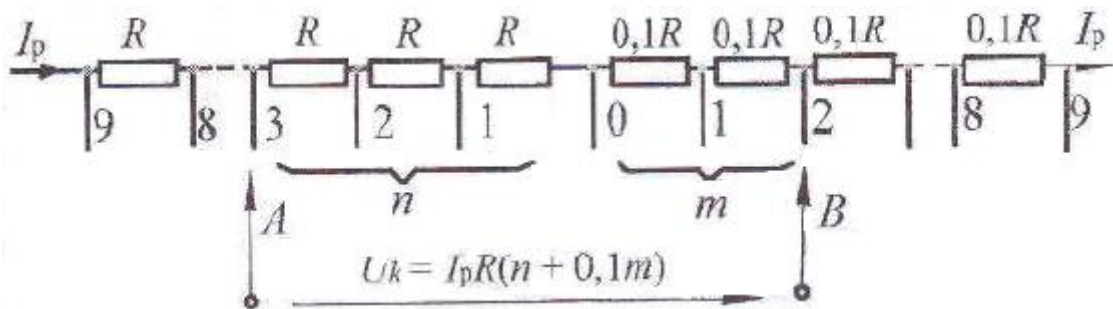


Рисунок 4.5 – Будова дводекадного магазину опорів

Послідовне з'єднання двох дводекадних магазинів опору, побудованих за схемою (рис. 4.5), дозволить одержати числове значення результату вимірювання з чотирма десятковими знаками. Очевидно, опори резисторів другого магазину мають дорівнювати $0,01R$ і $0,001R$.



Рисунок 4.6 – Будова шунтуючої декади

Широко застосовуються шунтуючі декади. Шунтуюча декада (рис. 4.6) складається з двох подільників, один з яких (нижній) має дев'ять резисторів номіналу R і підключається паралельно будь-якому резистору того ж номіналу верхнього подільника. У нижньому подільнику сила струму в 10 разів менше, ніж сила струму в резисторах верхнього ряду. Вихідна напруга формується як сума спадів напруги на резисторах верхнього та нижнього рядів, які знаходяться між точками А і В декади

$$U_k = I_p nR + 0,1 I_p mR = I_p R (n + 0,1 m).$$

4.2 Засоби вимірювання напруги і сили змінного струму

Вимірювання напруги і сили струму в різних частотних діапазонах виконуються різними методами і засобами вимірювальної техніки. В діапазоні промислових частот широко застосовуються електромагнітні, електродинамічні, феродинамічні вольтметри та амперметри. Як правило, вони призначаються для вимірювань на фіксованих частотах (50 або 400 Гц) і забезпечують визначення діючих значень синусоїдних і несинусоїдних напруг і сил струмів.

Магнітоелектричні прилади з перетворювачами дозволяють вимірювати напругу і силу струму в більш широких діапазонах частот: випрямні від 15 Гц до 15...20 кГц, термоелектричні – від 10 Гц до 10 МГц. Аналогові електронні вольтметри вимірюють напругу на частотах від 10...15 Гц до 1000 МГц.

При вимірюваннях змінних ЕРС в малопотужних колах, де вмикання приладів безпосередньої оцінки може призвести до порушення режиму роботи об'єкта внаслідок споживання енергії, застосовують компенсаційний метод.

4.2.1 Випрямні вольтметри та амперметри

Випрямний прилад – це поєднання випрямного перетворювача і магнітоелектричного вимірювального механізму. Випрямні перетворювачі будуються на основі напівпровідникових діодів (германієвих або кремнієвих). Недоліком напівпровідникових діодів як випрямних перетворювачів є нелінійність та нестабільність вольт-амперної характеристики, її залежність від температури і частоти.

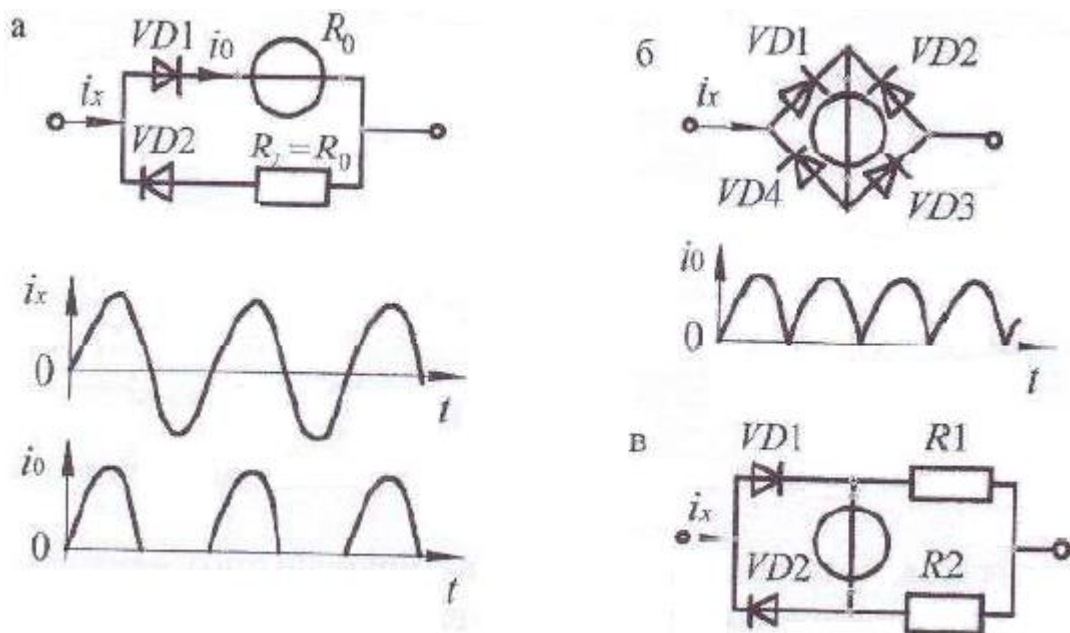


Рисунок 4.7 – Схеми випрямних перетворювачів

У випрямних приладах використовують одно- та двопівперіодні схеми випрямлення. У схемі однопівперіодного випрямляча використовуються два діоди (рис. 4.7, а), які включаються у паралельні кола. У котушці магнітоелектричного механізму протікає лише півхвиля змінного струму однієї полярності, а півхвиля струму іншої полярності – через діод $VD2$ і резистор R_2 ($R_2 = R_0$). Діод $VD2$ захищає діод $VD1$ від пробоя та створює коло для струму через навантаження під час дії півхвилі протилежної полярності. Однопівперіодна схема випрямлення використовується в мілівольтметрах. Вона забезпечує більш високе значення коефіцієнта випрямлення діодів при вимірюванні малих напруг, а отже, і більш високу чутливість мілівольтметра.

При використанні схеми двопівперіодного випрямлення випрямлений струм проходить через вимірювальний механізм в обидві половини періоду і, отже, при вимірюванні середніх і великих напруг чутливість цих схем вища, ніж однопівперіодних (рис. 4.7, б).

Якщо вимірюється синусоїдний струм $i = I_m \sin \omega t$, то миттєвий оберताल-

ний момент вимірювального механізму при протіканні по його котушці пульсуючого струму визначається виразом $M_{об} = BnS_a i$. Відхилення рухомої частини вимірювальною механізму при однопівперіодному випрямленні визначається середнім значенням моменту, що дорівнює

$$M_{об\ cер} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} BnS_a I_m |\sin \omega t| dt = BnS_a I_m / \pi = \psi_0 I_m / \pi = \psi_0 I_{cер}, \quad (4.3)$$

а при двопівперіодному випрямленні –

$$M_{об\ cер} = \frac{1}{T} \int_0^T BnS_a I_m |\sin \omega t| dt = 2\psi_0 I_m / \pi = 2\psi_0 I_{cер}, \quad (4.4)$$

де T – період; $I_{cер} = I_m / \pi$ – середнє значення струму при однопівперіодному випрямленні.

Кут повороту рухомої частини вимірювального механізму при одно- та двопівперіодному випрямленні відповідно дорівнює

$$\begin{aligned} \alpha &= \psi_0 I_{cер} / W, \\ \alpha &= 2\psi_0 I_{cер} / W. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Отже, кут повороту рухомої частини випрямного приладу пропорційний середньовипрямленому значенню сили (напруги) змінного струму.

В багатомежових випрямних приладах застосовуються схеми двопівперіодних випрямлячів, в яких кількість діодів зменшено удвічі (рис. 4.7, в). Перевагою таких схем є зменшення залежності показань вимірювального приладу від зміни температури навколишнього середовища. Водночас знижується чутливість приладу та збільшується споживання ним потужності, оскільки резистори R_1, R_2 виконують роль шунтів.

При вимірюваннях в колах змінного струму найбільш важливим є діюче (середньоквадратичне) значення струму (напруги). Тому шкали випрямних приладів градуують в діючих значеннях синусоїдного струму (напруги), тобто на шкали наносять середньовипрямлені значення сили струму (напруги), помножені на коефіцієнт форми синусоїди $K_\phi = I / I_{cер} = 1,11$. Внаслідок цього при вимірюванні діючого значення несинусоїдної величини в результат вимірювання вноситься методична похибка

$$\delta = (1,11 - K_\phi) \cdot 100 / K_\phi, \%$$

де K_ϕ – коефіцієнт форми несинусоїдної величини.

Сукупність магнітоелектричного вимірювального механізму, схем випрямлення, шунтів або додаткових резисторів утворює амперметр (рис. 4.8, а) або вольтметр (рис. 4.8, б). Випрямні прилади виконуються переносними, універсальними, з кількома межами вимірювань; вони дозволяють вимірювати крім сил і напруг змінних та постійних струмів ще й опір резисторів або ємність конденсаторів.

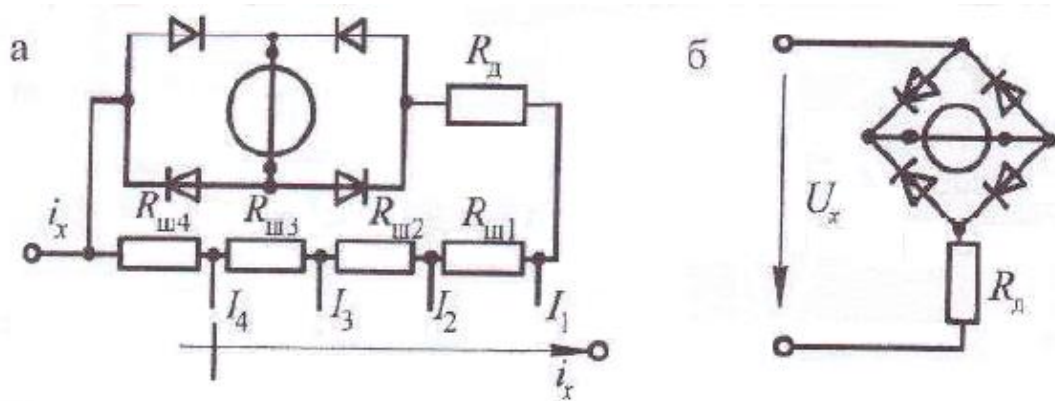


Рисунок 4.8 – Спрощені схеми випрямних амперметра та вольтметра

Випрямні прилади за точністю поступаються магнітоелектричним приладам. Їхній клас точності визначається похибками магнітоелектричного механізму і похибками випрямляча. Останні обумовлені зміною властивостей діодів при зміні температури навколишнього середовища, частоти та форми кривої вимірюваної величини. Зменшення похибок випрямних приладів досягається застосуванням параметричних схем компенсації температурної та частотної похибок (рис. 4.9)

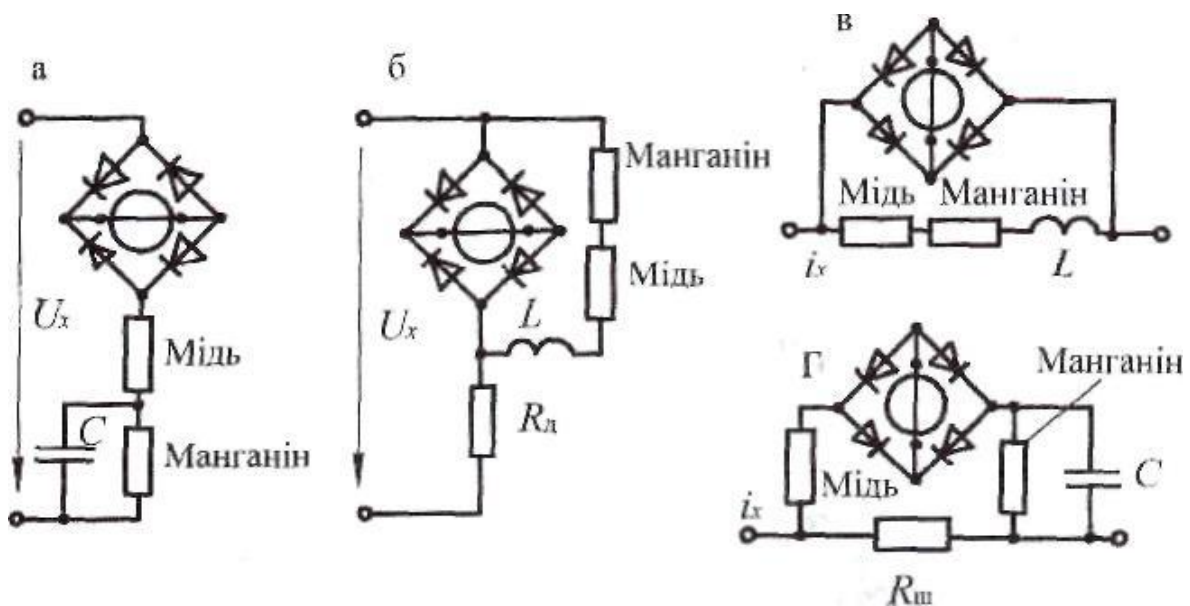


Рисунок 4.9 – Схеми компенсації температурної та частотної похибок

У вольтметрів, розрахованих на малі значення напруги (рис. 4.9, а), тобто з невеликим опором додаткового резистора R_d , зменшення опору випрямної схеми при підвищенні температури навколишнього середовища компенсується збільшенням опору додаткового резистора, що частково виконується з міді. У вольтметрів, розрахованих на великі значення напруги (рис. 4.9, б), паралельно випрямній схемі включається резистор з мідного дроту. Тому з підвищенням температури у випрямну схему відгалужується відносно більша частина струму, що і компенсує зменшення коефіцієнта випрямлення.

Для компенсації частотної похибки в схемі (рис. 4.9, а) застосовується конденсатор C , а в схемі (рис. 4.9, б) – котушка індуктивності L . З підвищенням частоти завдяки зменшенню ємнісного опору конденсатора сила струму через вимірюваний механізм зростає, чим і компенсується зменшення коефіцієнта випрямлення діодів. У схемі (рис. 4.9, б) з підвищенням частоти збільшується опір шунтуючого кола і у випрямну схему відгалужується відносно більший струм, що приводить до компенсації частотної похибки.

Випрямні амперметри можна розглядати як мілівольтметри, що вимірюють спад напруги на шунті. Тому компенсація температурної та частотної похибок таких амперметрів здійснюється за тим самим принципом, що і вольтметрів. На рис. 4.9, в наведена схема компенсації температурної та частотної похибок амперметрів на малі сили струмів, а на рис. 4.9, г – амперметрів на великі значення сил струму.

Основні достоїнства випрямних приладів – висока чутливість, мале споживання потужності від вимірюваного кола, можливість роботи на підвищених частотах. Випрямними приладами без частотної компенсації можна користуватися для вимірювання сил струмів і напруг до частот 5000...10000 Гц, а в приладах з частотною компенсацією робочий діапазон частот розширюється до 20 кГц.

4.2.2 Термоелектричні прилади

Термоелектричний прилад – це поєднання термоперетворювача та магнітоелектричного вимірювального механізму з відліковим пристроєм. У найпростішому випадку термоперетворювач складається з термопари і нагрівача (рис. 4.10, а).

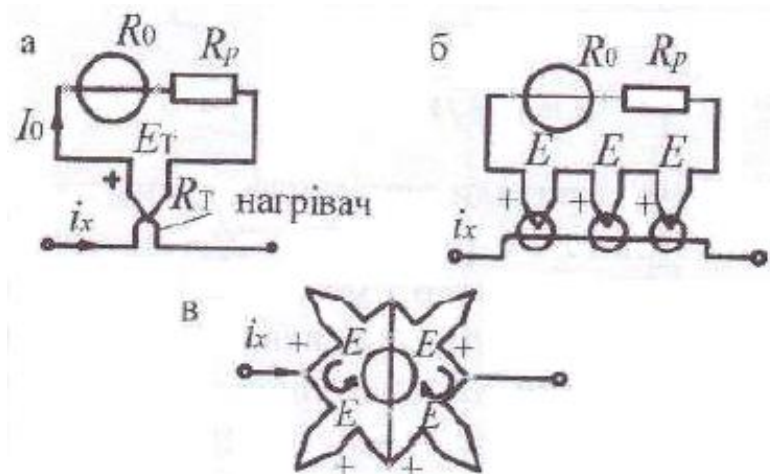


Рисунок 4.10 – Схеми термоелектричних приладів

Нагрівач виконується з тонкого платино-іридієвого або константанового проводу завдовжки 6...10 мм. При таких розмірах нагрівача паразитні параметри та поверхневий ефект нехтовно малі і не виявляються до частот в декілька сотень мегагерц. Термопара виконується з різнорідних металів і сплавів (наприклад,

розповсюджені пари хромель-копель, залізо-константан тощо), які дозволяють одержати високу чутливість (30...50 мкВ/°С). Робочим кінцем термопара приварюється до середини нагрівача, а до вільних кінців термопари приєднується вимірювальний механізм. Послідовно з термопарою вмикається підгінний резистор R_p з манганіну для регулювання сили струму відповідно з чутливістю вимірювального механізму. Через нагрівач тече вимірюваний струм і на вільних кінцях термопари виникає термо-ЕРС, пропорційна температурі в місці контакту нагрівача з термопарою. Температура контакту пропорційна квадрату вимірюваної сили струму, і тому термо-ЕРС також пропорційна квадрату сили струму

$$E_T = K \cdot I_X^2, \quad (4.6)$$

де K – постійний коефіцієнт, який залежить від матеріалу термопари.

При номінальному значенні вимірюваної сили струму температура нагрівача досягає 600...1000 °С, а термо-ЕРС – 30...50 мВ.

Термо-ЕРС викликає струм в контурі вимірювального механізму, сила якого визначається виразом

$$I_0 = \frac{E_T}{R_0 + R_T + R_p} = C \cdot I_X^2,$$

а кут відхилення покажчика становить

$$\alpha = \psi_0 I_0 / W = C \psi_0 I_X^2 / W. \quad (4.7)$$

Термоелектричні прилади придатні для вимірювання напруги і сили постійного і змінного струмів. Шкала термоелектричного приладу має квадратичний характер і може відградуїюватись в діючих значеннях змінного струму або напруги. Проте квадратичний характер шкала має тільки на початковій частині, при збільшенні теплових втрат нагрівача внаслідок зростання сили струму цей ефект зникає.

З метою підвищення чутливості термоелектричного приладу декілька термопар включають послідовно, створюючи термобатарей (рис. 4.10, б). При цьому термопари не торкаються нагрівача. Але великого виграшу термобатарей не дає, бо при послідовному з'єднанні термопар зростає як сумарна ЕРС, так і опір кола приладу. Крім того, через наявність ізоляційної прокладки між термопарою та нагрівачем збільшується теплова інерція перетворювача. Більш ефективно термо-ЕРС можна використати при з'єднанні термопар за мостовою схемою (рис. 4.10, в). Термопари в плечах моста з'єднуються так, що струм у вимірювальному механізмі спричиняється дією всіх термопар, а опір цьому струму дорівнює опору тільки одного плеча моста. У міліамперметрах з діапазоном вимірювань до 150...300 мА використовують вакуумні термоперетворювачі. В них нагрівач і термопара розміщуються в скляному балоні, з якого відкачують повітря. При цьому досягається зменшення втрат на тепловіддачу в навколишню середовище і, отже, для нагрівання робочого кінця термопари потрібна менша потужність.

Розширення меж вимірювання термоелектричних амперметрів на силу струму до 1 А виконується вмиканням вимірювального механізму з окремими термоперетворювачами на кожну межу вимірювання. При вимірюванні сили струму, яка перевищує 1 А, для розширення меж вимірювання користуються високочастотними трансформаторами струму (рис. 4.11, а). В термоелектричних вольтметрах розширення меж вимірювань проводиться за допомогою додаткових резисторів, що включаються послідовно з нагрівачем (рис. 4.11, б).

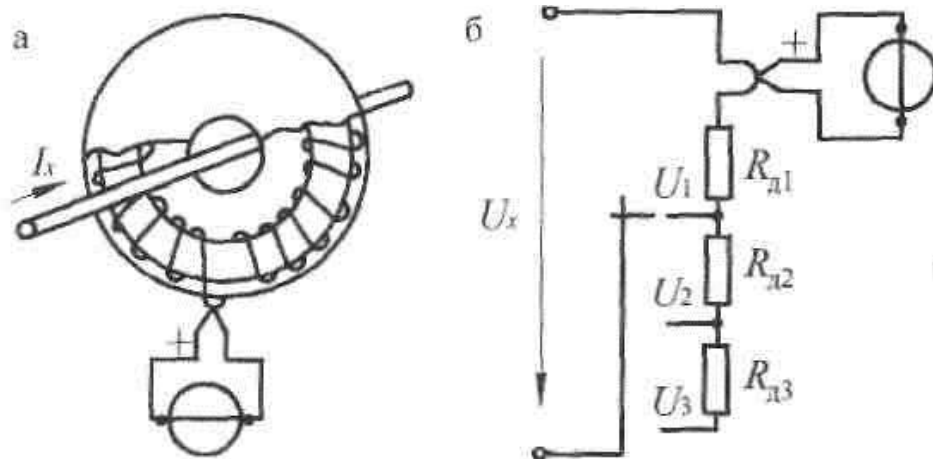


Рисунок 4.11 – Схеми розширення меж вимірювання термоелектричних приладів

Похибка вимірювань термоелектричного приладу залежить від похибки магнітоелектричного вимірювального механізму, температури навколишнього середовища та частоти, на якій виконуються вимірювання. Температурна похибка виникає за рахунок зміни опору нагрівача та термо-ЕРС при зміні температури навколишнього середовища. Звичайно ця похибка не перевищує 1...2 %, Частотна похибка виникає за рахунок поверхневого ефекту та паразитних ємностей. Частотна похибка вольтметрів значно більша, ніж у амперметрів через вплив індуктивності додаткових резисторів.

Основним достоїнством термоелектричних приладів є порівняно висока точність вимірювань у розширеному діапазоні частот і незалежність показань від форми кривої струму (напруги). До недоліків слід віднести малу перевантажну здатність та обмежений термін служби термоперетворювачів, залежність показань приладу від температури і значне власне споживання потужності (в амперметрах на 5 А воно складає приблизно 1 ВА, а струм повного відхилення вольтметрів становить від 10 до 15 мА).