

Лекція 7

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ІЗ ЗОСЕРЕДЖЕНИМИ СТАЛИМИ

Компоненти електричних кіл характеризуються рядом параметрів, які за фізичними величинами підрозділяються на основні та похідні. Основні параметри – це активний опір, електрична ємність, індуктивність, взаємна індуктивність. Похідні параметри (кут втрат, добротність, стала часу) виражаються через основні параметри і частоту. На результат вимірювання основних і похідних параметрів помітно впливають так звані паразитні параметри (ємність монтажу, ємність між витками котушки, індуктивність резисторів і т. ін.). З часом параметри електричних кіл з різних причин можуть змінюватися і їх відхилення від номінальних значень, як правило, є небажаними.

Визначення параметрів кіл можна здійснити різними методами. Найбільш розповсюджені при вимірюванні параметрів лінійних компонентів методи опосередкованих вимірювань, безпосередньої оцінки, порівняння, резонансний та генераторний методи.

Засоби вимірювань параметрів електричних кіл із зосередженими сталими позначають такими символами: E3 – вимірювачі індуктивностей; E4 – вимірювачі добротності; E6 – вимірювачі опору; E7 – вимірювачі універсальні (імпедансу); E8 – вимірювачі ємності; E9 – перетворювачі параметрів компонентів та кіл.

7.1 Метод вольтметра-амперметра

Метод вольтметра-амперметра є опосередкованим, порівняно простим і дозволяє вимірювати активний опір, ємність, індуктивність, повний опір компонентів електричних кіл.

Активний опір вимірюють на постійному струмі. Вмикання резистора R_x у вимірюване коло виконується за однією із схем (рис. 7.1). Вимірявши напругу U і силу струму I , функціонально зв'язані з резистором, активний опір обчислюють за законом Ома

$$R_x = U / I.$$

Обидві схеми (рис. 7.1) призводять до виникнення похибок взаємодії, які спричиняються власним споживанням електричної енергії вимірювальними приладами. Ці похибки можна скоригувати введенням поправок. Скориговане значення опору при вмиканні R_x за схемою (рис. 7.1, а) визначається за формулою

$$R_x = (U / I) - R_A,$$

а при вмиканні за схемою (рис. 7.1, б) – за формулою

$$R_x = U / (I - U / R_V),$$

де R_A і R_V – опори амперметра і вольтметра.

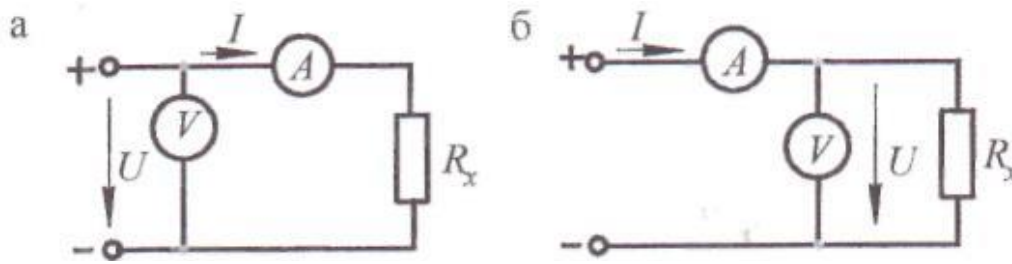


Рисунок 7.1 – Схеми вмикання резистора у вимірювальне коло

Якщо R_A і R_V невідомі, то схемою (рис. 7.1, а) слід користуватися тоді, коли вимірюваний опір великий порівняно з опором амперметра ($R_x \gg R_A$), а схемою (рис. 7.1, б) – при малих значеннях опору R_x порівняно з опором вольтметра ($R_x \ll R_V$).

Інструментальна складова основної похибки вимірювання опору цим методом визначається похибками взаємодії та класами точності вимірювальних приладів.

Якщо в схемах (рис. 7.1) замість резистора R_x увімкнути конденсатор або котушку індуктивності, то можна, вимірявши напругу U і силу струму I на заданій частоті, обчислити ємність, індуктивність та повний опір

$$C_x = \frac{I}{\omega U}; \quad L_x = \frac{U}{\omega I}; \quad Z_x = \frac{U}{I},$$

де $\omega = 2\pi f$ – кругова частота.

Похибка вимірювання опору на низьких частотах складає $\pm (0,5 \dots 10) \%$ і зростає зі збільшенням частоти. Точність вимірювання можна підвищити, якщо при обчисленнях врахувати активний опір об'єкта вимірювання.

7.2 Метод безпосередньої оцінки

Метод реалізується за допомогою омметрів, в яких вимірюваний опір оцінюється безпосередньо по шкалі, яка заздалегідь градується в одиницях опору. На практиці найбільшого застосування дістали омметри, які розділяються на електромеханічні та електронні.

7.2.1 Електромеханічні омметри

Електромеханічний омметр являє собою сукупність магнітоелектричного вимірювального механізму та джерела постійної напруги (сухого елемента, який розміщується в корпусі приладу, або перетворювача напруги змінного струму 220 В, 50 Гц в напругу постійного струму). Вимірюваний опір R_x вмикається послідовно або паралельно з вимірювальним механізмом.

Послідовна схема (рис. 7.2, а) використовується при вимірюванні середніх та великих опорів ($R_x = 10 \dots 10^7$ Ом), а паралельна схема (рис. 7.2, б) – при вимірюванні малих опорів ($R_x < 10$ Ом).

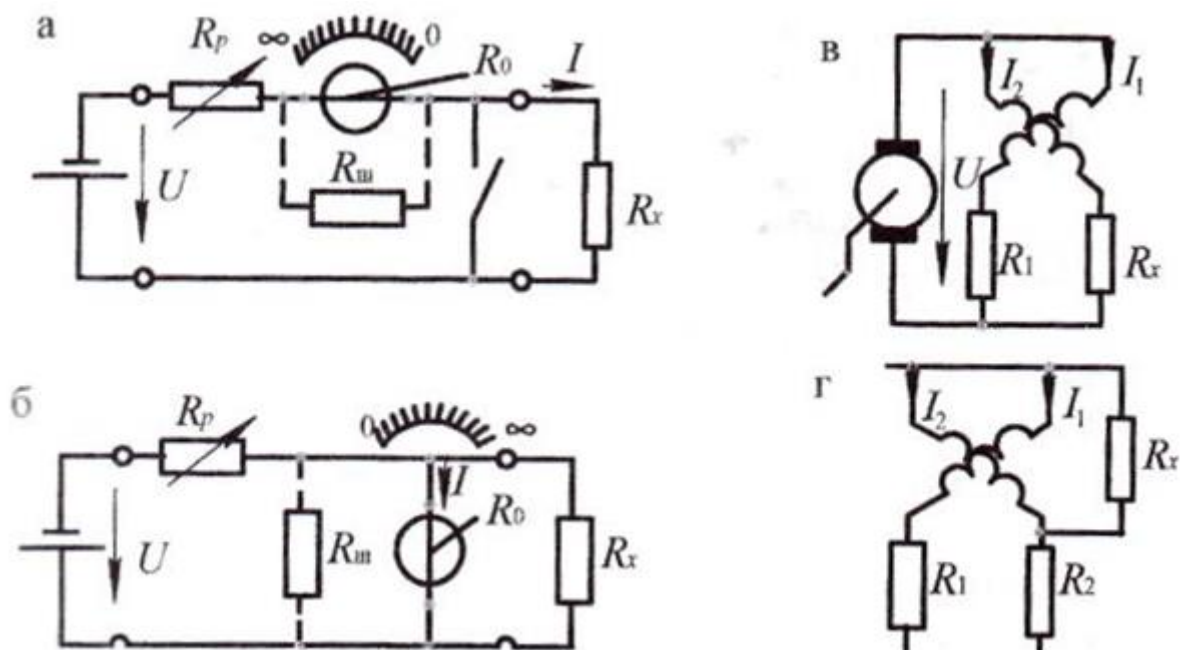


Рисунок 7.2 – Схеми електромеханічних омметрів

Кут відхилення покажчика омметра при послідовному увімкненні опору складає

$$\alpha = S_i I = S_i U / (R_x + R_p + R_0), \quad (7.1)$$

а при паралельному увімкненні опору –

$$\alpha = S_i I = S_i U / (R_p + R_0 + R_0 R_p / R_x), \quad (7.2)$$

де S_i – чутливість магнітоелектричного механізму до струму;

U – напруга джерела живлення;

I – сила струму у вимірювальному механізмі.

При незмінних значеннях опорів R_p , R_0 і напруги U кут відхилення покажчика омметра є однозначною функцією опору R_x . Як свідчать рівняння (7.1) і (7.2), шкали омметрів нерівномірні. Початок відліку (нуль шкали) у омметра з послідовною схемою включення R_x знаходиться на правому краю шкали, а у омметра з паралельною схемою – на лівому краю шкали. Як правило, омметри випускаються з декількома межами вимірювання. Зміна межі вимірювань здійснюється за допомогою резисторів R_m , які вмикаються паралельно вимірювальному механізму (рис. 7.2, а, б).

Похибка вимірювання омметром істотно залежить від стабільності напруги U джерела живлення. Тому для компенсації можливої зміни напруги застосовується додатковий резистор R_p . Перед кожним вимірюванням проводиться перевірка та регулювання напруги (встановлення електричного нуля). В омметрі з послідовним вмиканням R_x (рис. 7.2, а) покажчик відлікового пристрою встановлюють на позначку «0» шкали при замиканні на затискачах « R_x », а в омметрі з паралельним вмиканням R_x (рис. 7.2, б) його суміщують з позначкою « ∞ » при розімкнутих затискачах « R_x ».

Основну зведену похибку омметра, яка визначає клас точності приладу, виражають як відношення абсолютної похибки Δl в одиницях довжини до довжини шкали l

$$\gamma = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100, \%$$

Для вимірювання опору ізоляції електротехнічних установок застосовують мегаомметри, створені на базі магнітоелектричного логометра. В коло однієї рамки вмикається відомий опір R_1 , а в коло другої рамки послідовно або паралельно – опір R_x (рис. 7.2, в, г). Схема з послідовним включенням R_x застосовується для вимірювання великих опорів (одиниці – сотні мегаом). При використанні паралельної схеми включення R_x межа вимірювання опору знижується до сотень кілоом.

Як показано вище, кут повороту рухомої частини магнітоелектричного логометра залежить від відношення струмів в котушках вимірювального механізму

$$\alpha = F(I_1/I_2). \quad (7.3)$$

Для схеми (рис. 7.2, в) $I_1 = U/R_1; I_2 = U/R_x$. Підставляючи значення струмів в (7.3), дістанемо

$$\alpha = F(I_1/I_2) = F(R_x/R_1) = F(R_x),$$

тобто при сталому значенні опору R_1 , показання приладу пропорційні вимірюваному опору.

Аналогічно для схеми (рис. 7.2, г) кут відхилення рухомої частини вимірювального механізму

$$\alpha = F(R'_2 R_x + R_2(R'_2 R_x))/R_1 R_x = F(R_x).$$

Достоїнством логометричних мегаомметрів є незалежність їх показань від коливань напруги джерела живлення, яким є спеціальний генератор постійного струму, розміщений у корпусі приладу. Ротор генератора приводиться в рух вручну зі швидкістю 100...120 об/хв або електродвигуном. Оскільки логометричні мегаомметри призначаються для вимірювань у високоомних та високовольтних колах, номінальну напругу джерела живлення вибирають високою: 100, 250, 500 та 1000 В. Це мегаомметри класу точності 1,0 з межею вимірювань до 500 МОм.

7.2.2 Електронні омметри

Електронні омметри створюються на основі операційних підсилювачів. На вході підсилювача вмикається зразковий резистор R_0 , а в коло зворотного зв'язку – резистор R_x (рис. 7.3, а). Вихідна напруга підсилювача лінійно залежить від вимірюваного опору R_x

$$U_{вих} = U \frac{R_x}{R_0},$$

де $U_{вих}$ – вихідна напруга підсилювача;
 U – напруга джерела живлення.

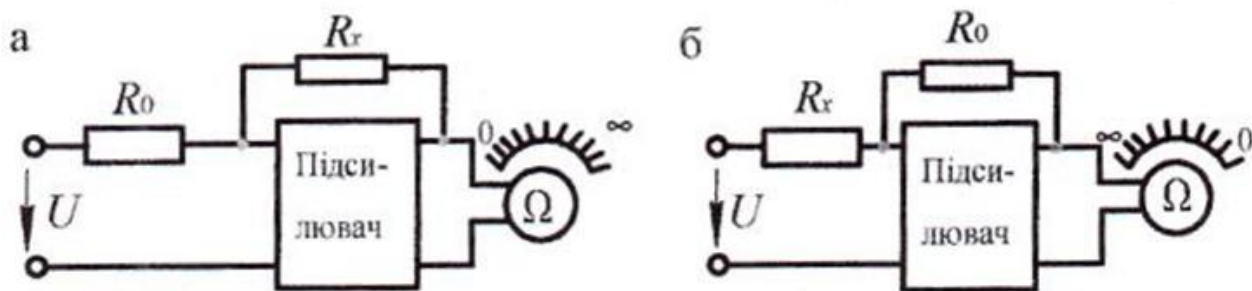


Рисунок 7.3 – Спрощені схеми електронних омметрів

Вихідна напруга підсилювача вимірюється магнітоелектричним вольтметром, шкала якого відградуєвана в одиницях опору. Шкала омметра рівномірна і кінцева. Омметр забезпечує вимірювання активних опорів від 10 Ом до 1 МОм (рис. 7.3, а). При вимірюванні великих опорів (понад 1 МОм) резистори R_x і R_0 (рис. 7.3, б) міняють місцями. В такому разі вихідна напруга підсилювача

$$U_{вих} = U \frac{R_0}{R_x}.$$

Шкала омметра стає нелінійною з межами вимірювання від нуля до нескінченності. Для зміни меж вимірювань використовують набір зразкових резисторів R_0 .

Застосування в одному приладі обох схем (рис. 7.3, а, б) дозволяє створити омметри з широкими діапазонами вимірювань. До електронних омметрів відносяться прилади типів ЕК6-7, Е6-13, Е6-14 та ін. Наведемо метрологічні характеристики тераомметра Е6-13А: межі вимірювань на лінійній шкалі: $10 \dots 10^6$ Ом, межа допустимої похибки: $\pm 2,5$ % від кінцевого значення встановленого піддіапазону; межі вимірювань на нерівномірній шкалі: $10^6 \dots 10^{14}$ Ом, межа допустимої похибки: $\pm (2,5 \dots 10)$ % від довжини робочої частини шкали.

7.3 Метод порівняння

Найбільшого розповсюдження із відомих ЗВТ, в яких реалізований метод порівняння, дістали прилади для вимірювання параметрів електричних кіл на основі мостових схем. Такі прилади характеризуються високою точністю та чутливістю, широким діапазоном вимірювань. Відрізняють мости постійного і змінного струму. Мости постійного струму застосовуються для вимірювання активного опору, а мости змінного струму – для вимірювання ємностей, індуктивностей та похідних величин: кута втрат, добротності.

7.3.1 Мости постійного струму

Мости постійного струму поділяють на одинарні та подвійні, зрівноважені та незрівноважені. У мостових схемах постійного струму здійснюється порівняння опору досліджуваного об'єкта з опором зразкових резисторів, виконаних з певною точністю.

Одинарні мости. Схема одинарного мосту наведена на рис 7.4, а. Зразкові резистори R_1 , R_2 , R_3 та резистор R_x створюють плечі мосту. Гілку AB , в яку вмикається джерело живлення, називають діагоналлю живлення, а гілку CD з індикатором (високочутливим приладом) – індикаторною (нульовою) діагоналлю.

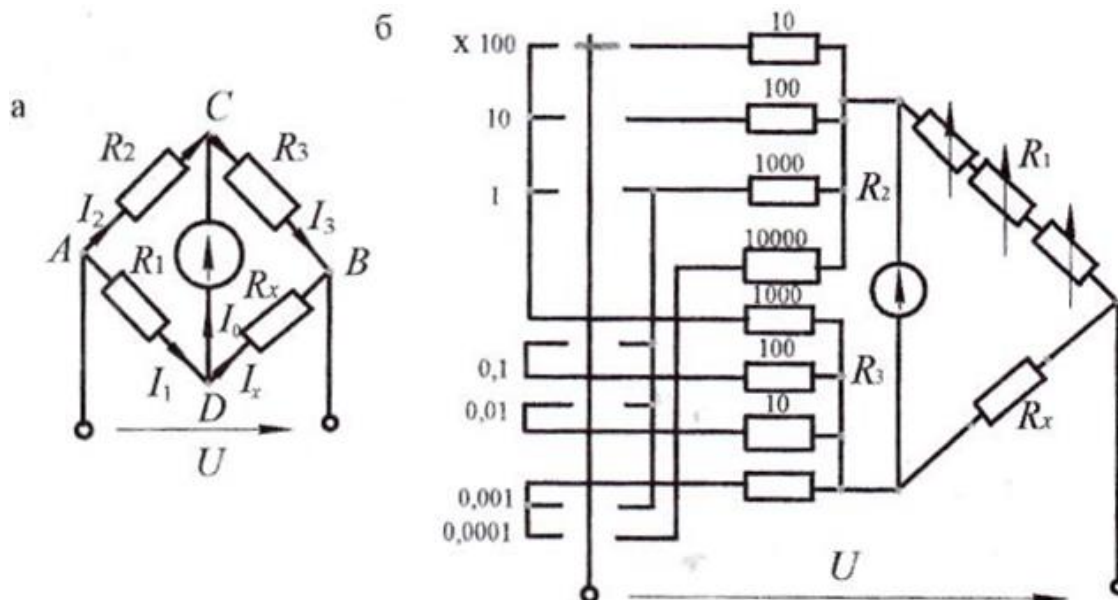


Рисунок 7.4 – Схема одинарного мосту

Вимірювання мостом полягає у його зрівноваженні. Міст вважається зрівноваженим, якщо струм в індикаторній діагоналі дорівнює нулю. При виконанні цієї умови в резисторах R_1 і R_x буде протікати один і той же струм $I_1 = I_x$, в резисторах R_2 і R_3 – струм $I_2 = I_3$, а напруга між точками C і D буде дорівнювати нулю. Тоді згідно з законом Кірхгофа

$$I_1 R_x = I_2 R_3;$$

$$I_1 R_1 = I_2 R_2.$$

Поділивши перше рівняння на друге, дістанемо

$$\frac{R_x}{R_1} = \frac{R_3}{R_2},$$

звідки шуканий опір

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}. \quad (7.4)$$

Для визначення R_x слід знати опір плеча R_1 , яке називають плечем порівняння, і відношення опорів плечей R_2 і R_3 , які називають плечами відношення. Для зрівноважування мосту опір плечей R_1 , R_2 і R_3 має бути регульований. На рис. 7.4, б показана принципова схема одинарного мосту, яка дозволяє встановлювати різні межі вимірювання при тих самих значеннях опору R_1 .

Точність зрівноважування мостової схеми визначається трьома факторами: чутливістю індикатора S_i ; значенням напруги джерела живлення U та вибором найбільш вигідних співвідношень опорів плечей мосту. Аналіз показує, що найвища чутливість має місце за умови $R_x = R_1, R_2 = R_3$.

Крім того, точність вимірювань залежить від точності градуювання опору плечей мосту, а також від значення вимірюваного опору. Основна похибка кращих зразків мостів постійного струму досягає сотих і навіть тисячних часток процента.

Незрівноважені та процентні мости. При масових вимірюваннях опору резисторів одного номіналу використовують незрівноважені та процентні чотириплечі (рис. 7.4) мости.

Опори R_1, R_2 і R_3 плечей незрівноваженого мосту обирають такими, щоб міст був зрівноважений при номінальному значенні опору резистора R_x . При відхиленні значення опору R_x від номінального в діагоналі гальванометра з'являється струм силою ΔI , який функціонально пов'язаний з прирощенням опору ΔR_x . За значенням сили струму ΔI можна судити про значення вимірюваного опору R_x , при цьому шкалу гальванометра слід відградувати в одиницях опору.

Точність незрівноважених мостів невисока, але ці мости прості в експлуатації і забезпечують високу продуктивність праці при масових вимірюваннях опорів одного номіналу.

Найчастіше процентні мости вимірюють не абсолютне значення опору R_x , а відносне відхилення вимірюваного опору від значення, що приймається за номінальне. Якщо вимірюване значення опору R_x дорівнює номінальному, то міст зрівноважений і має місце рівність

$$R_{x \text{ ном}} = \frac{R_1 R_3}{R_2} = Y_2 R_1 R_3. \quad (7.5)$$

Якщо вимірюваний опір відрізняється від номінального на величину ΔR_x , то міст можна зрівноважити змінюванням провідності Y_2 на деяке значення ΔY_2 . Новому стану рівноваги мосту буде відповідати рівність

$$R_{x \text{ ном}} + \Delta R_x = (Y_2 + \Delta Y_2) R_1 R_3,$$

або

$$R_{x \text{ ном}} \left(1 + \frac{\Delta R_x}{R_{x \text{ ном}}} \right) = Y_2 R_1 R_3 \left(1 + \frac{\Delta Y_2}{Y_2} \right).$$

Якщо врахувати рівняння (7.5), одержимо

$$\frac{\Delta R_x}{R_{x \text{ ном}}} = \frac{\Delta Y_2}{Y_2}.$$

Таким чином, відносному прирощенню опору $\Delta R_x / R_{x \text{ ном}}$ відповідає рівне відносне прирощення провідності $\Delta Y_2 / Y_2$. Тому орган регулювання провідності Y_2 може бути відградуваний в процентах відхилення значення опору від номінального.

Процентні мости бувають як з ручним, так і з автоматичним зрівноважуванням.

Подвійні мости. Вимірювання малих опорів одинарними мостами ускладнюється тим, що вимірюваний опір може стати порівняним з опором з'єднувальних провідників і контактів у місцях з'єднання провідників з вимірюваним опором та мостом. Для того, щоб опори з'єднувальних провідників і контактних переходів не викривляли результат вимірювання, необхідно вимірюваний об'єкт підключати до мосту за схемою з чотирма затискачами. Найпростіше цей спосіб реалізується при вимірюванні опору шини або дроту методом вольтметра і амперметра (рис. 7.5, а). Струм підводиться до затискачів A і B , а напруга вимірюється між контактами C і D , які виконуються у вигляді призм (ножів), притиснутих гострими ребрами до шини.

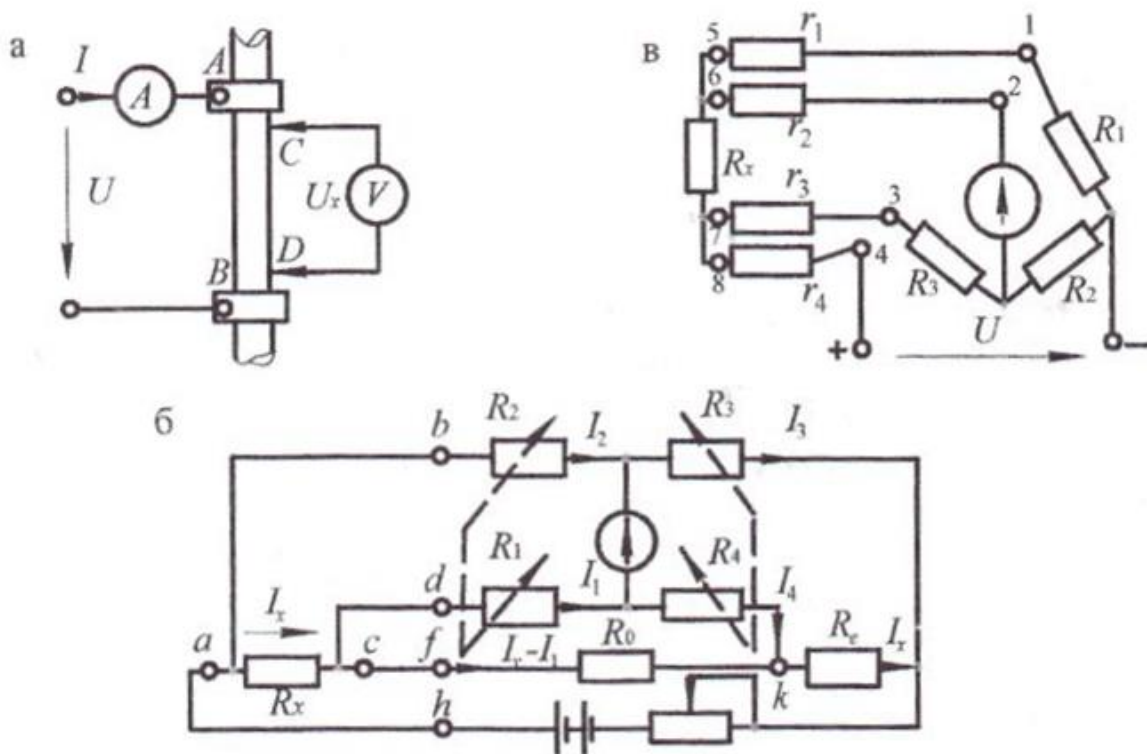


Рисунок 7.5 – Схеми подвійних мостів

У вимірювальній практиці визначення малих і дуже малих опорів виконують подвійними мостами. Принципова схема подвійного мосту наведена на рис. 7.5, б. Вимірюваний об'єкт обладнується двома парами затискачів і приєднується до виводів b, d, f, h мосту за допомогою чотирьох провідників. При цьому провідники ab і cd і контактні переходи вмикаються послідовно з резисторами R_x і R_2 , опір яких набагато більший опору з'єднувальних провідників і контактів, а провідники cf і ah опиняються поза вимірювальною схемою, і їх опір теж не впливає на результат вимірювання.

Якщо міст зрівноважений (струм в діагоналі гальванометра дорівнює нулю), можна скласти такі рівняння за законом Кірхгофа

$$\begin{aligned}
I_x R_x + I_1 R_1 - I_2 R_2 &= 0; \\
I_x R_e + I_4 R_4 - I_3 R_3 &= 0; \\
(I_x - I_1) R_0 - I_1 R_1 - I_4 R_4 &= 0.
\end{aligned}$$

Якщо врахувати, що у зрівноваженого мосту $I_1 = I_4$ і $I_2 = I_3$, то спільне розв'язання цих рівнянь відносно R_x дає

$$R_x = \frac{R_e R_2}{R_3} + \left(\frac{R_4}{R_3} - \frac{R_1}{R_2} \right) \cdot \frac{R_0 R_2}{R_0 + R_1 + R_2}. \quad (7.6)$$

Якщо виконати умову $R_3 = R_4$ і $R_1 = R_2$, то рівняння (7.6) набуде простого вигляду

$$R_x = \frac{R_e R_2}{R_3}. \quad (7.7)$$

Опори резисторів R_1, R_2, R_3, R_4 , що входять у вимірювальне коло, обирають досить великим (сотні і тисячі ом), а точки f і k мостової схеми з'єднують відрізком товстої мідної шини з дуже малим опором R_0 . Таким чином, при роботі подвійного мосту в колі джерела живлення забезпечується досить велика сила струму (5...10 А), що дозволяє одержати помітний спад напруги на малих опорах R_x і R_e , тим самим забезпечується потрібна чутливість схеми.

Сучасні подвійні мости забезпечують вимірювання опору від декількох десятків до $10^{-6} \dots 10^{-8}$ Ом з відносною похибкою 0,02...2 %. Похибка зростає при зменшенні вимірюваного опору.

Малий опір може бути виміряний одинарним мостом, якщо його підключити до мосту за схемою з чотирма затискачами (рис. 7.5, в). При цьому з'єднувальні провідники r_1 і r_3 і контактні переходи 1, 5, 3, 7 опиняються увімкнутими послідовно з досить великими опорами R_1 і R_3 і, отже, їх вплив на результат вимірювання мізерний, а з'єднувальні провідники r_2 і r_4 і контактні переходи 2, 6, 4, 8 опиняються в діагоналях гальванометра та джерела живлення і теж не впливатимуть на результат вимірювання.

7.3.2 Особливості вимірювань великих опорів

При вимірюванні великих опорів необхідно враховувати ряд факторів, якими звичайно нехтують при вимірюванні опору в середньому діапазоні значень:

1) при зростанні вимірюваного опору збільшується вплив шунтуючої дії опору ізоляції та опору навколишнього середовища. Струм витікання через ізоляцію стає порівняним зі струмом через високоомний опір. Похибка за рахунок цього може досягати декількох процентів;

2) при зростанні вимірюваного опору зменшується сила струму у вимірювальних колах, що призводить до падіння чутливості вимірювального пристрою та до зростання впливу внутрішніх і зовнішніх завад. Похибка, зумовлена цим чинником, може досягати 1...10 %;

3) при наявності навіть порівняно малих ємностей об'єкта вимірювання та вимірювального кола (що неминуче) необхідно враховувати збільшення часу перехідних процесів, які можуть стати причиною появи значної похибки, якщо вимірювання проводити до встановлення сталого режиму.

Для підвищення точності вимірювань великих опорів застосовуються спеціальні заходи, основними з яких є суцільне екранування високоомних вимірювальних кіл і джерела живлення; рівнопотенціальний захист від струмів витікання; застосування високоякісних ізоляційних матеріалів; застосування показуючих приладів і нуль-індикаторів з високоомним входом. Проте повністю виключити такі похибки неможливо. В результаті зростання вимірюваного опору (від $10^5 \dots 10^6$ Ом і вище) точність вимірювань істотно знижується. Особливістю вимірювань великих опорів є і те, що завжди в цесі вимірювань бере участь зразкова (еталонна) міра опору або ємності. Промисловістю випускаються високоомні резистори з номінальним значенням опору $10^7 \dots 10^{12}$ Ом.

Основними методами вимірювання високоомних опорів є метод подільника та мостовий метод.

Принципова схема вимірювання методом подільника наведена на рис. 7.6. Подільник напруги складається зі зразкового R_0 і вимірюваного R_x резисторів і живиться від стабільного джерела напруги U_0 . Напруга на зразковому резисторі підсилюється електрометричним підсилювачем (ЕМП) і вимірюється магнітоелектричним приладом. Щоб уникнути електростатичних завад, схема ретельно екранується. У серійних приладах для розміщення об'єкта вимірювання передбачається спеціальна екрануюча камера. Схема (рис. 7.6) використана в тераометрі Ф507. Її вихідна напруга U_x зв'язана з вимірюваним опором

$$R_x = R_0 \left(k \frac{U_0}{U_x} - 1 \right),$$

де k – коефіцієнт підсилення ЕМП.

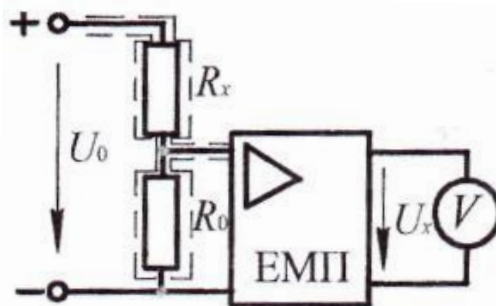


Рисунок 7.6 – Схема вимірювання опору методом подільника

Для вимірювання великих опорів з високою точністю застосовують високоомні чотириплечі і двоплечі мости.

На рис. 7.7, а показана схема чотириплечого мосту. Вимірюваний R_x і зразковий R_1 опори створюють високоомний подільник напруги, а резистори R_2 і R_3 , опір кожного з яких не перевищує 10^5 Ом, складають низькоомний подільник.

В індикаторну діагональ вмикається електрометричний підсилювач (на рисунку не показаний), навантажений на нуль-індикатор НІ (магнітоелектричний прилад). Вхідний опір підсилювача має бути високим, в іншому разі чутливість схеми різко падає. Вимірювальна схема встановлюється на ізоляторах, розміщених у вузлових точках *A*, *B*, *C*. Точка *D* мосту приєднується до екрану та заземлюється, що забезпечує стійку роботу електрометричного підсилювача.

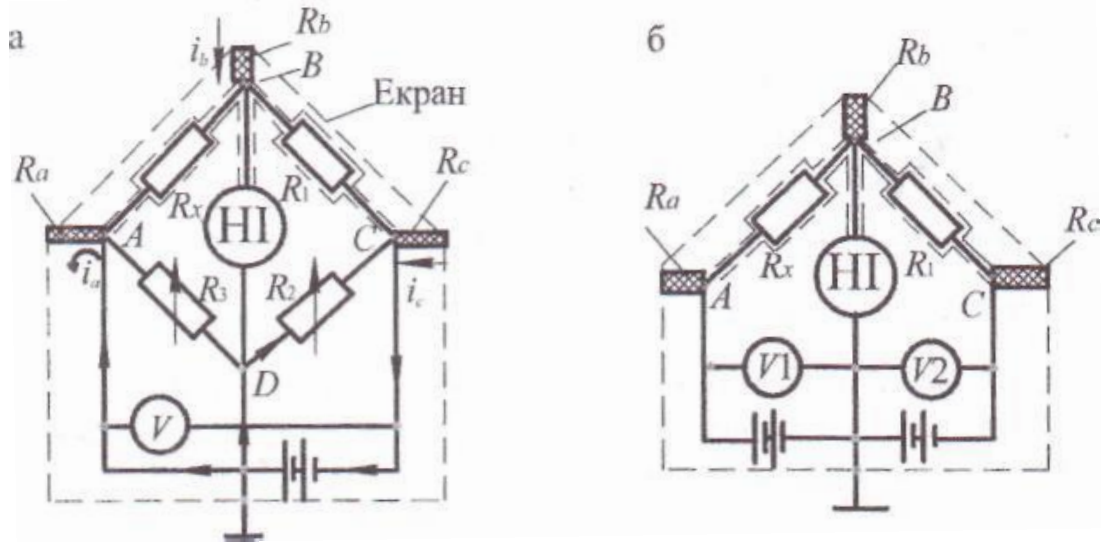


Рисунок 7.7 – Схеми високоомних мостів

Двоплечій міст (рис. 7.7, б) складається з двох високоомних резисторів: вимірюваного R_x і зразкового R_1 . Два інших плеча створюють вольтметри V_1 і V_2 . В схемі мосту використовуються два джерела живлення. Напругу одного з них можна змінювати східцями, а напругу другого – плавно і тим зрівноважити міст. Зрівноваженому стану відповідає рівність

$$R_x = R_1 \frac{U_1}{U_2}.$$

Для високоомних мостів вирішальне значення мають опір та паразитні струми ізоляторів, їх поляризація та екранування високоомних вузлів з метою захисту мосту від електромагнітних полів. Всі елементи мосту, включаючи і джерела живлення, розміщують всередині металевого екрану.