

## РОЗДІЛ 9.

### ВИМІРЮВАЛЬНІ МОСТИ ТА ВИМІРЮВАЛЬНІ КОМПЕНСАТОРИ

#### 9.1 Загальні положення

Мостові схеми застосовуються для вимірювання параметрів електричних кіл та для вимірювання неелектричних величин сумісно з параметричними вимірювальними перетворювачами.

*Мостове коло* – це електричне коло, в якому можна виділити два розгалуження опорів, значення між якими дорівнює нескінченості при відповідному співвідношенні параметрів елементів кола і скінченному значенню, якщо це співвідношення не виконується. Засіб вимірювання, в основу якого покладене мостове коло, має назву *вимірювальний міст*.

Принцип дії *вимірювальних компенсаторів* полягає у компенсації (протиставленні) двох спрямованих назустріч фізичних величин, одна з яких вимірювана, а інша – зразкова.

Загальна класифікація вимірювальних мостів та вимірювальних компенсаторів наведена на рисунку 9.1.

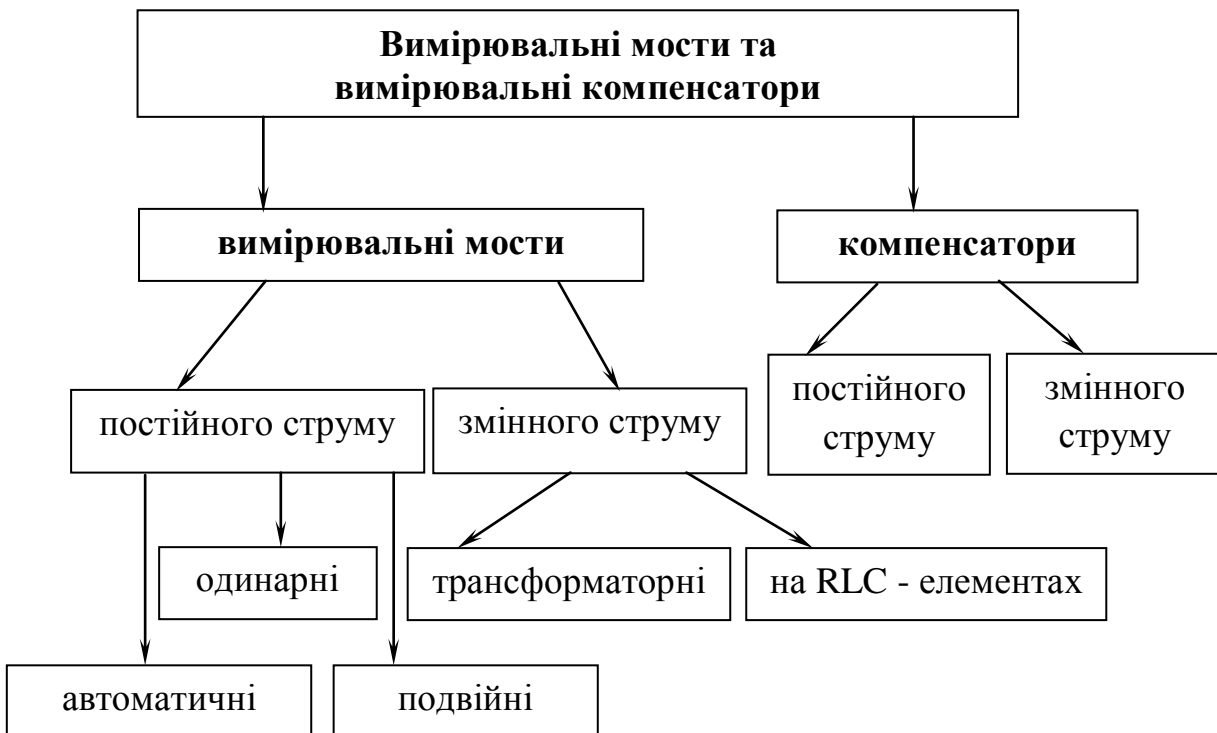


Рисунок 9.1 – Класифікація вимірювальних мостів та компенсаторів

Мости постійного струму призначені для точних вимірювань електричних опорів в широкому діапазоні частот від  $10^{-8}$  Ом до  $10^{16}$  Ом.

Для з'ясування принципів побудови мостових схем найчастіше використовують міст Уїтстона, схема якого подана на рисунку 9.2.

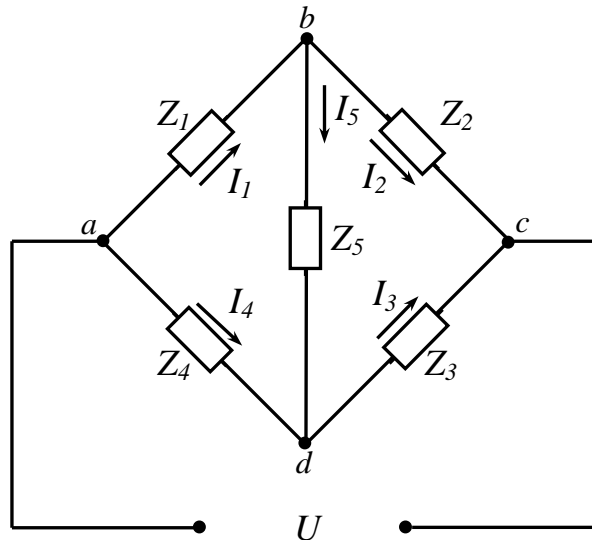


Рисунок 9.2 - Схема моста Уїтстона

Точки  $a, b, c, d$  – це **вершини моста**. Міст має чотири опори:  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$ , які мають назву **плечі моста** – це електричне коло між двома суміжними вершинами моста,

Електричне коло між двома протилежними вершинами має назву **діагональ моста**:  $ac$  – це **діагональ живлення**,  $bd$  – це **вимірювальна діагональ**. В коло вимірювальної діагоналі вмикається індикатор-рівноваги ІР, внутрішній опір якого  $Z_5$ .

Виведемо умову рівноваги для моста Уїтстона. Міст вважається зрівноваженим, коли струм  $I_5$  у вимірювальній діагоналі відсутній ( $I_5 = 0$ ).

Отже, у зрівноваженій схемі потенціали точок  $b$  і  $d$  однакові (точки  $b$  і  $d$  еквіпотенціальні). Однакові і спади напруг на першому  $Z_1$  і четвертому  $Z_4$  плечах, оскільки точка  $a$  є для них загальною

$$I_1 \cdot Z_1 = I_4 \cdot Z_4 \quad (9.1)$$

Те саме справедливе і для напруг на другому і третьому плечах моста

$$I_2 \cdot Z_2 = I_3 \cdot Z_3 \quad (9.2)$$

У зрівноваженому мостовому колі  $I_5 = 0$ , отже,  $I_1 = I_2$ ;  $I_3 = I_4$ .

Після проміжних математичних перетворень умова рівноваги має вигляд

$$Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4. \quad (9.3)$$

З умови рівноваги (9.3) маємо дві умови рівноваги для мостів змінного струму

$$\{ Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4; \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4. \quad (9.4)$$

Рівняння системи (9.4) показують, що для зрівноваження моста змінного струму він повинен мати два регульованих елементи, які дозволяють змінювати модуль та аргумент комплексного числа. Зрівноваження моста змінного струму здійснюється почерговим регулюванням двох елементів. Число регулювань, необхідних для досягнення рівноваги моста, має назву «*збіжність моста*». Кількісно «*збіжність моста*» не оцінюється, її слід оцінювати тільки якісно: хороша (швидка) «*збіжність*» чи погана.

На постійному струмі опори мостової схеми є чисто активними

$$Z_1 = R_1; Z_2 = R_2; Z_3 = R_3; Z_4 = R_4.$$

Тому мостова схема на постійному струмі буде зрівноваженою, коли виконується умова рівноваги моста постійного струму

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4. \quad (9.5)$$

Порівнявши умови рівноваги (9.5) і (9.4) можна зробити висновок, що для зрівноваження мостів на змінному струмі необхідно досягти двох умов рівноваги (9.4), а на постійному – тільки одну (9.5). В цьому і є *основна особливість зрівноваження мостів постійного і змінного струму*.

Залежно від наявності напруги в вимірювальній діагоналі у моменті відліку вимірюваної величини мости поділяють на зрівноважені та незрівноважені. Незрівноважені мости застосовують для вимірювання неелектричних величин, попередньо перетворених на електричний опір.

## 9.2 Вимірювальні мости постійного струму

Мости постійного струму застосовуються для вимірювання активних опорів і для вимірювання неелектричних величин сумісно з резистивними параметричними вимірювальними перетворювачами.

Практичне розповсюдження з мостів постійного струму одержали **одинарний** (чотириплечий) та **подвійний** (шестиплечий) мости.

Розглянемо **одинарний** (чотириплечий) вимірювальний міст постійного струму.

Схема одинарного моста постійного струму наведена на рисунку 9.3.

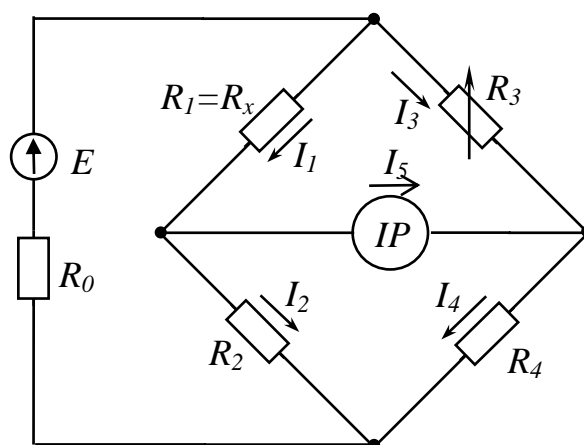


Рисунок 9.3 – Схема одинарного моста постійного струму

Міст живиться від джерела постійного струму - в діагоналі живлення знаходиться джерело живлення з е.р.с.  $E$  та внутрішнім опором  $R$ . Оскільки умова рівноваги моста (9.5) визначається лише співвідношенням опорів плечей моста і залежить від напруги джерела живлення, то до джерел живлення не висувають жодних спеціальних вимог. Завдяки цій особливості мостові вимірювальні кола широко застосовують в практиці вимірювань. У вимірювальній діагоналі ввімкнено індикатор-рівноваги (IP).

Процес вимірювання за допомогою одинарного моста полягає в тому, що в одне з плечей (наприклад,  $R_1$ ) вмикають вимірюваний опір  $R_x$ .

Умова рівноваги для одинарного моста має вигляд

$$R_x \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3, \quad (9.6)$$

звідки

$$R_x = R_3 \cdot \frac{R_2}{R_4}, \quad (9.7)$$

де  $R_2, R_4$  – плечі відношення;

$R_3$  – плече порівняння.

Із математичного виразу (9.7) видно, що значення опору  $R_x$  порівнюється із значенням опору  $R_3$  в масштабі  $R_2/R_4$ . Тому міст приводиться до рівноваги регулюванням опору  $R_3$ , а  $R_2/R_4$  – масштабний множник, значення якого вибирається рівним  $10^n$ , де  $n$  – ціле додатне або від’ємне число, або  $n = 0$ .

Плече моста  $R_3$  має назву **плече зрівноваження (порівняння)**, а плечі  $R_2$  та  $R_4$  – це **плечі відношення** вимірювального моста, призначення яких – це вибір границі вимірювання моста. У широкодіапазонних одинарних мостах постійного струму плече порівняння виготовляють у вигляді важільного магазину опорів, який використовують для плавного ручного зрівноваження моста – рисунок 9.4.

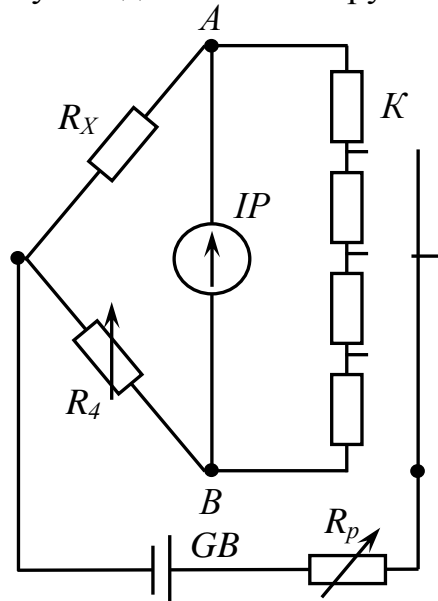


Рисунок 9.4 – Схема широкодіапазонного одинарного моста постійного струму

Сумарний опір плеча порівняння становить  $10000 \text{ Ом}$ , а дискретність –  $0,1; 0,01; 0,001 \text{ Ом}$ . Потрібне відношення  $R_2/R_4$  встановлюють незалежною зміною кожного з них, якщо вони виконані у вигляді штепсельних магазинів опорів

або зміною відношення опорів цих плечей за незмінної суми опорів між точками А і В.

Тоді відношення  $R_2/R_4$  подається у вигляді коефіцієнта  $K$  – рисунок 9.4, значення якого переважно дорівнює 0,01; 0,1; 1,0; 10 або 100.

Нижня границя вимірювання одинарних мостів за найпростішою двозатискачевою схемою увімкнення вимірюваного опору обмежується похибками, які вносять опори  $r_1$  і  $r_2$  з'єднувальних проводів і перехідних контактів, та переважно не нижча за 50 Ом.

При використанні чотиризатискачевої схеми увімкнення опорів – рисунок 9.5, розширюють нижню межу вимірювань одинарних мостів до 0,5...0,001 Ом.

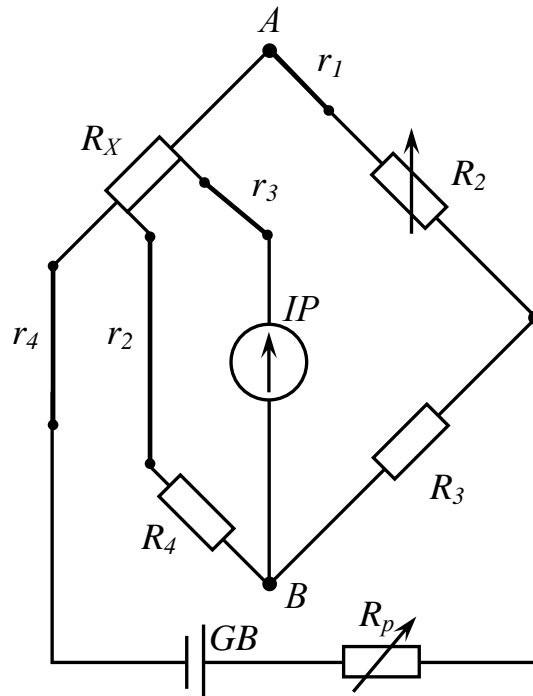


Рисунок 9.5 – Чотиризатискачева схема одинарного моста постійного струму

Так, в момент рівноваги опори з'єднувальних проводів  $r_3$  і  $r_4$  не впливають у цій схемі на результат вимірювань, так як вони увімкнені в діагоналях моста відповідно послідовно з джерелом живлення і показчиком рівноваги, а вплив опорів  $r_1$  і  $r_2$  істотно зменшується, так як вони додаються до плечей моста, які вибирають значно більшими від  $R_X$ . Щоб звести цей вплив до мінімального, в мостах опори плечей  $R_2$  та  $R_4$  зменшують заздалегідь на значення опору

$r_k$  каліброваних з'єднувальних проводів, за допомогою яких вимірювані опори підключають до вимірювального моста.

В вимірювальних мостах передбачаються перемички або перемикачі, за допомогою яких можна здійснювати дво- або чотиризатискачеве приєднання вимірюваних опорів.

Розглянемо **подвійний** (шестиплечий) вимірювальний міст постійного струму.

При вимірюванні дуже малих опорів у діапазоні від 100 до  $10^{-7} \dots 10^{-8} \text{ Ом}$  одинарним мостом навіть при чотирипровідному підключенні вимірюваного опору допускаються методичні похибки. В цих випадках застосовуються **подвійні** мости, нижня границя вимірювання яких  $10^{-8} \text{ Ом}$ , а верхня - 100 Ом.

Схема подвійного вимірювального моста наведена на рисунку 9.6.

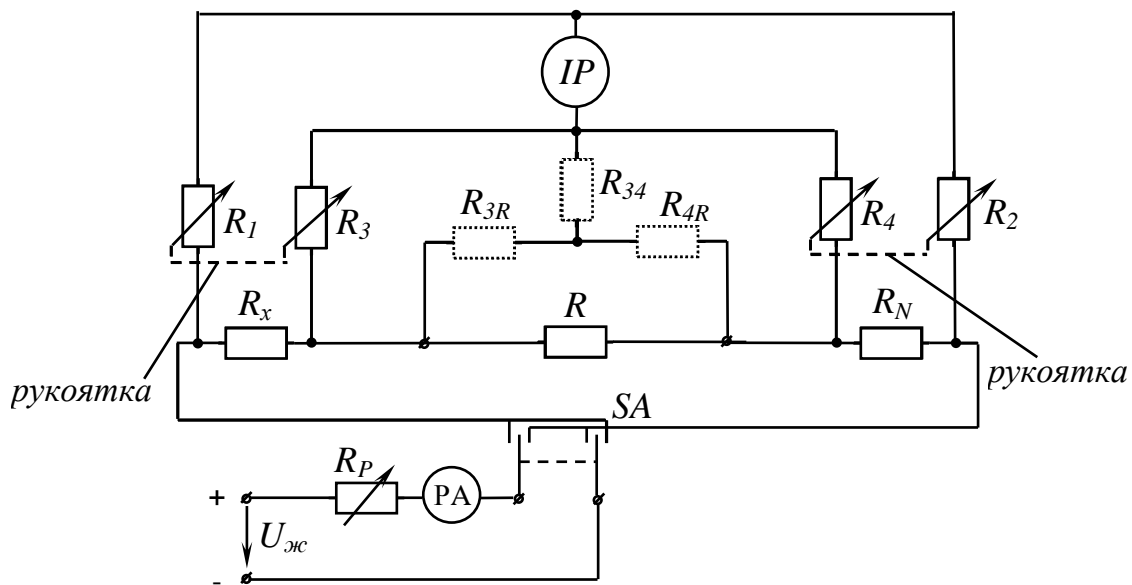


Рисунок 9.6 – Схема подвійного вимірювального моста постійного струму

Вимірюваний опір  $R_x$  та зразковий  $R_N$  мають по чотири затискачі.  $R$  – опір короткого та товстого провідника, який з'єднує  $R_x$  та  $R_N$ . Він містить опори перехідних контактів. Значення цього опору дуже мале.

Для одержання рівняння рівноваги перетворимо трикутник  $R_3$ - $R$ - $R_4$  в еквівалентну зірку за виразом

$$R_{34} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4 + R}; \quad (9.8)$$

$$R_{3R} = \frac{R_3 \cdot R}{R_3 + R_4 + R}; \quad (9.9)$$

$$R_{4R} = \frac{R \cdot R_4}{R_3 + R_4 + R}, \quad (9.10)$$

Після таких перетворень отримуємо чотириплечий міст, умова рівноваги для якого має вигляд

$$(R_x + R_{3R}) \cdot R_2 = R_1 \cdot (R_{4R} + R_N); \quad (9.11)$$

$$R_x \cdot R_2 = R_1 \cdot R_{4R} + R_1 \cdot R_N - R_2 \cdot R_{3R}. \quad (9.12)$$

Підставимо в вираз (9.11) формули (9.8)...(9.10) для опорів еквівалентної зірки

$$R_x \cdot R_2 = R_1 \cdot \frac{R_1 \cdot R_4 \cdot R}{R_3 + R_4 + R} + R_1 \cdot R_N - R_2 \cdot \frac{R_2 \cdot R_3 \cdot R}{R_3 + R_4 + R}. \quad (9.13)$$

звідки

$$R_x = R_N \cdot \frac{R_1}{R_2} + \frac{R}{R_3 + R_4 + R} \cdot \left( \frac{R_1 \cdot R_4}{R_2} - R_3 \right). \quad (9.14)$$

Аналіз виразу (9.14) дозволив зробити висновок, що величина  $R_x$  залежить від величини опору  $R$ , який входить до другої складової виразу. Другу складову можна виключити, тобто зробити її рівною нулю, якщо виконати умову  $\left( \frac{R_1 \cdot R_4}{R_2} - R_3 \right) = 0$ . Але на практиці точно виконати цю умову не можливо із-за неточності виготовлення резисторів  $R_1, R_2, R_3, R_4$ . Тому то, для того, щоб друга складова виразу (9.14) була якомога меншою, потрібно, щоб опір  $R$  був якомога меншим. А величина вимірюваного опору  $R_x$  буде дорівнювати

$$R_x = R_N \cdot \frac{R_1}{R_2}. \quad (9.15)$$

В конструкції подвійного моста є дві рукоятки регулювання, які призначені для забезпечення рівностей  $R_1 = R_3$  та  $R_2 = R_4$ , щоб  $\left( \frac{R_1 \cdot R_4}{R_2} - R_3 \right) = 0$ .



Цими рукоятками змінюють одночасно  $R_1$  та  $R_3$ , а також  $R_2$  та  $R_4$ .

Як було зазначено вище, подвійний міст призначений для вимірювання малих опорів при великому струмовому навантаженні, чим вони суттєво відрізняються від одинарних мостів. Мости постійного струму є переносними та лабораторними.

Клас точності переносних мостів від 0,1 до 5 в залежності від значень вимірюваних опорів у діапазоні від  $10^{-4}$ ... $10^5$  Ом. Класи точності лабораторних мостів від 0,005 до 0,01. Діапазон вимірювань одинарними мостами становить від  $10^{-3}$  до  $10^8$  Ом, подвійними мостами – від  $10^2$  до  $10^{-8}$  Ом, при цьому в діапазоні опорів  $10^2$ ... $10^{-5}$  Ом клас точності 0,005...0,05, в діапазоні опорів  $10^{-5}$ ... $10^{-8}$  Ом клас точності становить 0,1...5.

Зрівноваження мостів постійного струму можна автоматизувати. На рисунку 9.7 наведена схема автоматичного моста.

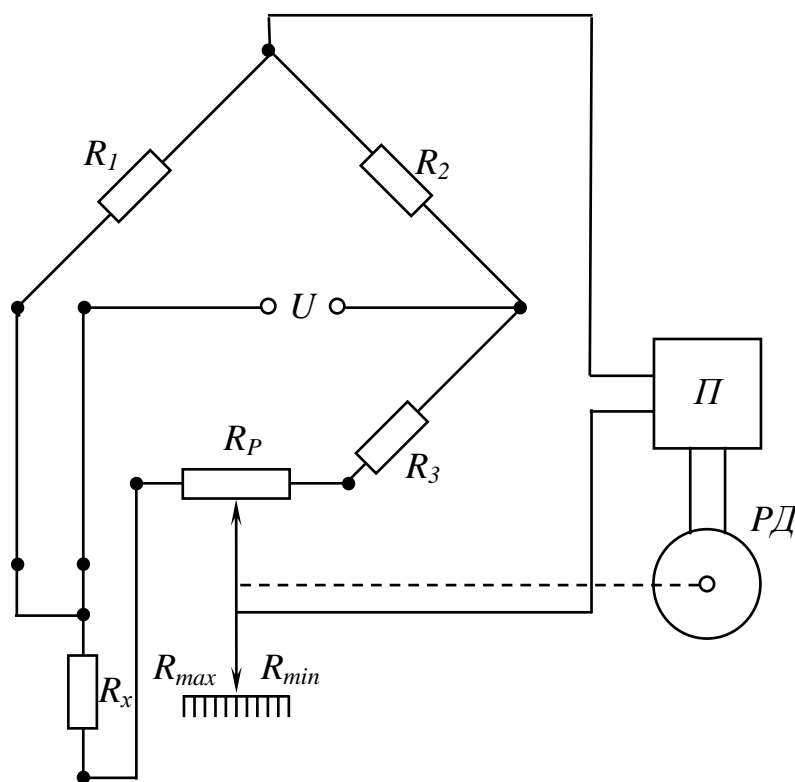


Рисунок 9.7 – Схема автоматичного вимірювального моста

Автоматичний міст містить три постійні резистори  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  та резистор  $R_x$ , опір якого необхідно виміряти, реохорд  $R_p$ , підсилювач  $\Pi$  та реверсивний електродвигун  $PД$ .

При підключенні вимірювального моста до джерела змінної напруги промислової частоти стрілочний показчик на шкалі знаходиться в вільному положенні.

При підключенні до вимірювального моста невідомого резистора в вимірювальній діагоналі з'являється напруга небалансу моста, яка через підсилювач надходить на живлення керуючої обмотки реверсивного електродвигуна. Ротор електродвигуна пов'язаний з повзунком реохорда та показчиком приладу.

Ротор починає обертатися та пересувати повзунок по реохорду до моменту рівноваги мостової схеми. Обертання ротору здійснюється до тих пір, доки не настане рівновага моста і напруга небалансу моста дорівнюватиме нулю. Реверсивний електродвигун зупиняється. По положенню повзунка на реохорді та на шкалі приладу можна визначити величину опору резистора  $R_x$ .

Зведена похибка автоматичних мостів дорівнює 0,25 %, швидкодія становить 0,25 с. Автоматичні мости широко застосовуються для вимірювання неелектричних величин, попередньо перетворених на зміну електричного опору.

### **9.3 Мости змінного струму**

Мости змінного струму призначені для вимірювань комплексних опорів. Найпростішими та найпоширенішими є чотириплечі мости змінного струму.

Мости змінного струму застосовують для вимірювання індуктивності у діапазоні від  $10^{-9}$  до  $10^4$  Гн, ємності – від  $10^{10}$  до  $10$  мкФ, тангенса кута втрат – від  $10^5$  до 10, добротності – від  $10^{-1}$  до  $10^3$  та активного опору – від  $10^{-9}$  до  $10^4$  Ом, активної провідності – від  $10^{-7}$  до 1 См в діапазоні частот від  $10 \dots 5 \cdot 10^5$  Гц.

Перевагами мостів є широкий діапазон вимірювань, висока точність, можливість автоматизації вимірювання.

Схема моста з чотирма плечами змінного струму ідентична до схеми оди-  
нарного моста постійного струму – рисунок 9.8.

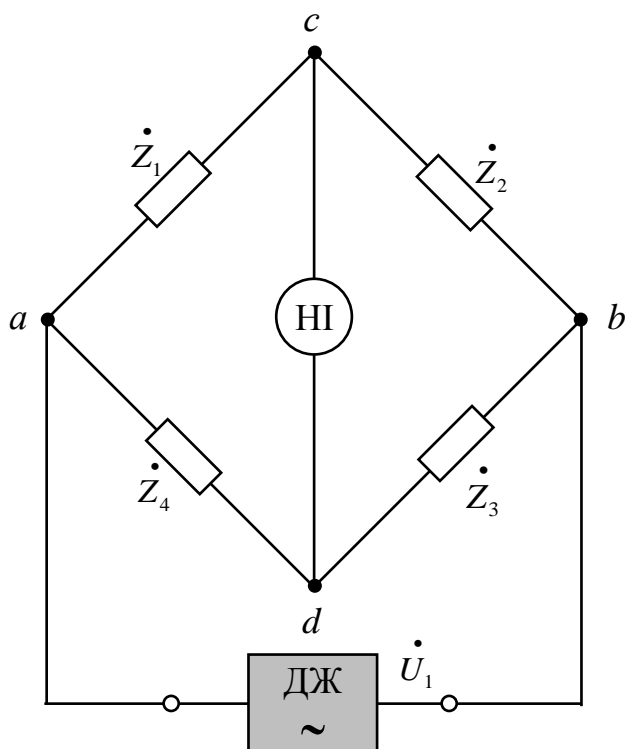


Рисунок 9.8 - Схема вимірювального моста змінного струму

За аналогією з мостом постійного струму складена умова рівноваги моста змінного струму, за якої напруга в вимірювальній діагоналі та струм нуля-індикатора змінного струму дорівнюють нулю

$$\dot{Z}_1 \cdot \dot{Z}_3 = \dot{Z}_2 \cdot \dot{Z}_4, \quad (9.16)$$

де  $\dot{Z}_1, \dot{Z}_3, \dot{Z}_2, \dot{Z}_4$  – комплексні значення опорів плечей моста.

Так як комплексний опір можна виразити як

$$\dot{Z} = Z e^{j\varphi}, \quad (9.17)$$

де  $Z$  – модуль комплексного опору;

$\varphi$  – кут зсуву фаз між струмом і напругою на цьому опорі.

Умову рівноваги моста (9.16) представимо у вигляді

$$Z_1 \cdot Z_3 e^{j(\varphi_1 + \varphi_3)} = Z_2 \cdot Z_4 e^{j(\varphi_2 + \varphi_4)}. \quad (9.18)$$

Умова рівноваги для моста змінного струму можлива за двох умов, які повинні виконуватись одночасно

$$Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4; \quad (9.19)$$

$$\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4. \quad (9.20)$$

*Висновок:* для досягнення *рівноваги моста змінного струму* необхідно, щоб добутки модулів, а також суми фазових кутів опорів протилежних плечей були рівними.

Змінними параметрами плечей моста можуть бути активний опір  $R$ , ємність  $C$  або індуктивність  $L$ , однак перевагу слід надавати змінному активному опору, так як будувати магазини опору технологічно значно легше, ніж магазини ємності чи індуктивності. Мірою досконалості моста щодо швидкості зрівноважування є його *збіжність*, яка характеризує кількість почергових регулювань параметрів плечей моста, які необхідні для досягнення рівноваги.

Мости змінного струму поділяються на *частотозалежні* та на *частотно-незалежні*. Перші застосовуються для вимірювання частоти змінних сигналів, а другі – для вимірювання параметрів електричних кіл змінного струму.

Розглянемо схеми мостів для вимірювань ємності  $C_x$  і тангенса кута втрат  $\operatorname{tg}\delta_x$ . На рисунку 9.9 наведена схема моста змінного струму для вимірювань ємності  $C_x$  і тангенса кута втрат  $\operatorname{tg}\delta_x$  з малими втратами ( $\operatorname{tg}\delta_x = 10^{-5} \dots 10^{-2}$  град.).

Умова рівноваги такого моста має вигляд

$$\left( R_x + \frac{1}{j\omega \cdot C_x} \right) \cdot R_3 = \left( R_4 + \frac{1}{j\omega \cdot C_4} \right) \cdot R_2, \quad (9.21)$$

звідки

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad C_x = \frac{R_3 \cdot C_4}{R_2}; \quad \operatorname{tg}_x = \omega \cdot C_x \cdot R_x = \omega \cdot R_4 \cdot C_4, \quad (9.22)$$

де  $R_x$  – активний опір конденсатора, який характеризує його активні втрати.

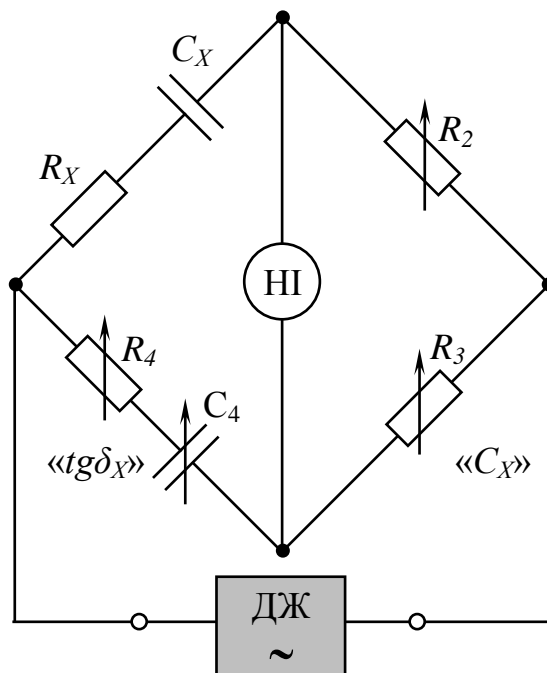


Рисунок 9.9 – Схема моста змінного струму для вимірювань ємності  $C_x$  і тангенса кута втрат  $tg\delta_x$  з малими втратами

Аналіз виразу (9.22) показав, що опір плеча  $R_3$  входить тільки у вираз для визначення ємності  $C_x$ , тому таке плече градуують в одиницях « $C_x$ », а активний опір плеча  $R_4$  входить тільки у вираз для визначення тангенса кута втрат « $tg\delta_x$ », що забезпечує роздільний відлік вимірюваних величин. Зрівноваження схеми такого вимірювального моста здійснюють по чергові зміною опорів плечей  $R_2$  та  $R_4$ , при цьому розширення діапазону вимірювання ємності здійснюється зміною ємності плеча  $C_4$ , а розширення діапазону вимірювання опору – зміною опору плеча  $R_2$ , відношення яких,  $C_4/R_2 = N = 10^{\pm n}$ , де  $n$  – де ціле число.

На рисунку 9.10 наведена схема моста змінного струму для вимірювань ємності  $C_x$  і тангенса кута втрат  $tg\delta_x$  з великими втратами ( $tg\delta_x = 10^{-2} \dots 1$ ).

Для схеми справедливі співвідношення

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad C_x = \frac{R_3 \cdot C_4}{R_2}; \quad tg_x = \frac{1}{\omega \cdot C_x \cdot R_x} = \frac{1}{\omega \cdot C_4 \cdot R_4} \cdot (9.23)$$

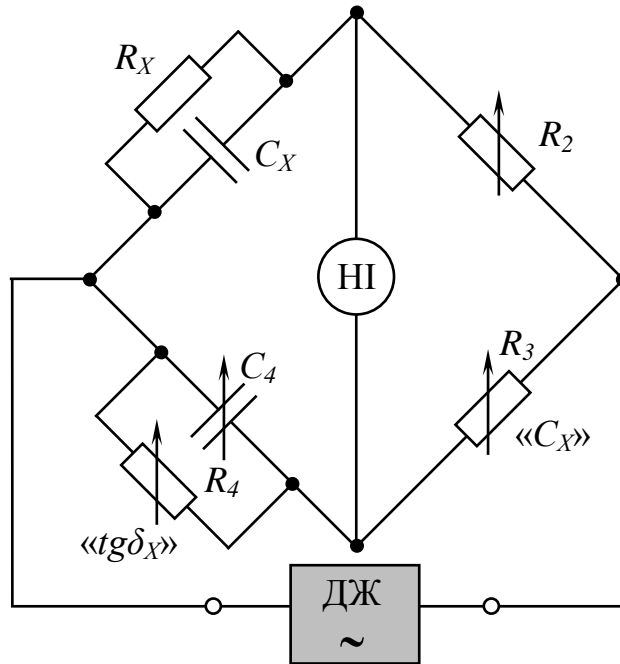


Рисунок 9.10 – Схема моста змінного струму для вимірювань ємності  $C_x$  і тангенса кута втрат  $tg\delta_x$  з великими втратами

У такому разі схему моста зрівноважують по чергові зміню опорів плечей  $R_3$  та  $R_4$ , які відповідно проградуєвані в одиницях « $C_x$ » і « $tg_x$ », а розширення діапазону вимірювання – зміню відношення  $C_4 / R_2 = N$ .

Розглянемо схеми мостів для вимірювань індуктивності  $L_x$  і добротності  $Q_x$  котушок індуктивності без феромагнітного осердя та з феромагнітним осердям. На рисунку 9.11 наведена схема моста змінного струму для вимірювань індуктивності  $L_x$  і добротності  $Q_x$  котушок індуктивності без феромагнітного осердя, яким властиві втрати, що зумовлені активним опором обмотки.

Умова рівноваги моста має вигляд

$$(R_x + j\omega \cdot L_x) \cdot \frac{R_3}{j\omega \cdot C_3} = R_2 \cdot R_4, \quad (9.24)$$

$$\left( R + \frac{1}{j\omega \cdot C_3} \right)$$

звідки

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad L_x = C_3 \cdot R_2 \cdot R_4; \quad (9.25)$$

$$Q_x = \frac{1}{tg\delta_x} = \frac{\omega \cdot L_x}{R_x} = \omega \cdot C_3 \cdot R_3. \quad (9.26)$$

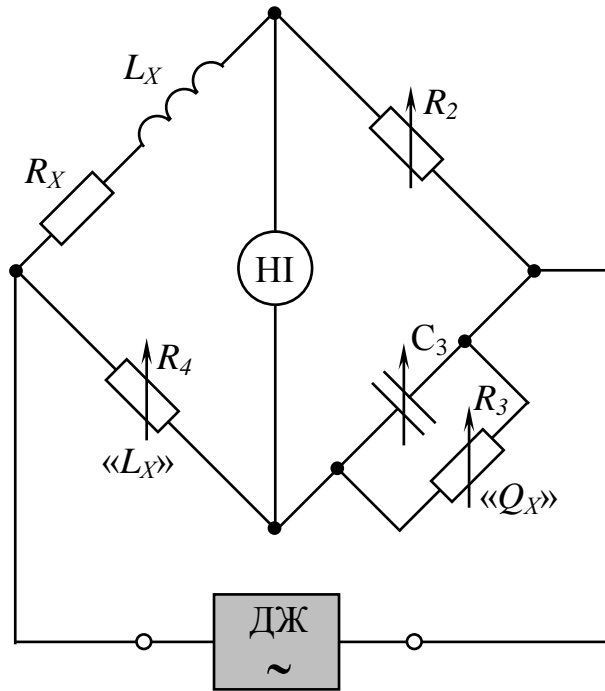


Рисунок 9.11 – Схема моста змінного струму для вимірювань індуктивності  $L_x$  і добротності  $Q_x$  котушок індуктивності без феромагнітного осердя

Аналіз виразів (9.25) та (9.26) показав, що опір плеча  $R_4$  входить тільки у вираз для визначення індуктивності  $L_x$ , тому таке плече градуують в одиницях « $L_x$ », а активний опір плеча  $R_3$  входить тільки у вираз для визначення добротності « $Q_x$ », тому його градуують в одиницях « $Q_x$ », що забезпечує роздільний відлік вимірюваних величин. Зрівноваження схеми такого вимірювального моста здійснюють по чергово зміною опорів плечей  $R_3$  та  $R_4$ , при цьому розширення діапазону вимірювання індуктивності здійснюється зміною ємності плеча  $C_3$ , а розширення діапазону вимірювання опору – зміною опору плеча  $R_2$ , добуток яких,  $C_3 \cdot R_2 = N = 10^{\pm n}$ , де  $n$  – це ціле число.

Котушкам індуктивності з *феромагнітним осердям* властиві втрати, що зумовлені вихровими струмами і перемагнічуванням осердя, тому схема моста змінного струму для вимірювань індуктивності  $L_x$  і добротності  $Q_x$  таких котушок наведена на рисунку 9.12, для якої справедливі співвідношення

$$R_x = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3}; \quad L_x = C_3 \cdot R_2 \cdot R_4; \quad (9.27)$$

$$Q_x = \frac{R_x}{\omega \cdot L_x} = \frac{1}{\omega \cdot C_3 \cdot R_3}. \quad (9.28)$$

Зрівноваження таких мостів здійснюється почергово зміною опорів плечей  $R_4$  та  $R_3$ , які відповідно проградуйовані в одиницях « $L_x$ » і « $Q_x$ », а розширення діапазону вимірювання – зміною добутку  $C_3 \cdot R_2 = N$ .

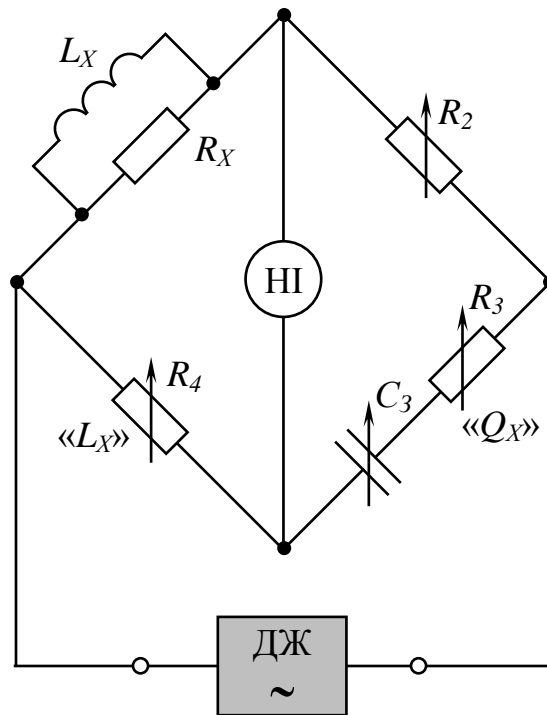


Рисунок 9.12 - Схема моста змінного струму для вимірювань індуктивності  $L_x$  і добротності  $Q_x$  котушок з феромагнітним осердям

Конструктивно мости змінного струму виготовляють з вмонтованими нуль-індикаторами, джерелами живлення, найчастіше на фіксовані частоти 50, 1000, 5000 та 10000 Гц. Промислові мости змінного струму є універсальними, так як в єдину конструкцію об'єднані декілька вимірювальних схем. Такі вимірювальні мости призначені для вимірювань комплексних опорів, ємності, індуктивності, тангенса кута втрат і тангенса кута зсуву фаз між векторами напруги та струму.

Діапазони вимірювань дорівнюють: ємності від  $10^{-9}$  до  $10^2$  мкФ, індуктивності від  $10^{-7}$  до  $10^2$  Гн, опору від  $10^{-2}$  до  $10^6$  Ом, тангенса кута втрат і тангенса кута зсуву фаз від  $10^{-4}$  до 1. Робочі частоти при цьому дорівнюють 1; 5; 10 і 50 кГц, а основна похибка вимірювання на частоті 1 кГц складає при вимірюваннях: ємності 0,02%, індуктивності 0,05%, опору 0,1%, тангенса кута втрат 1,0%.



Для точних вимірювань параметрів кіл змінного струму, а також неелектричних величин і магнітних характеристик матеріалів застосовують *трансформаторні мости*. Основними компонентами трансформаторних мостів є індуктивні елементи з тісним зв'язком.

На рисунку 9.13.а наведена автотрансформаторна схема чотириплечого трансформаторного моста. На рис. 9.13.б наведена трансформаторна схема чотириплечого трансформаторного моста.

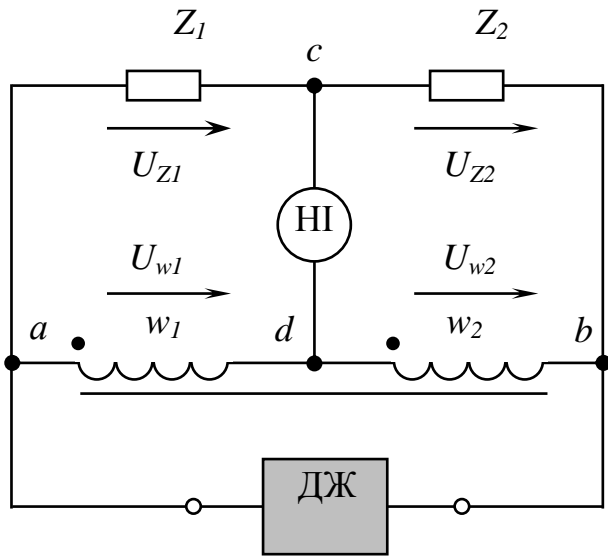


Рис. 9.13.а - Автотрансформаторна схема чотириплечого трансформаторного моста

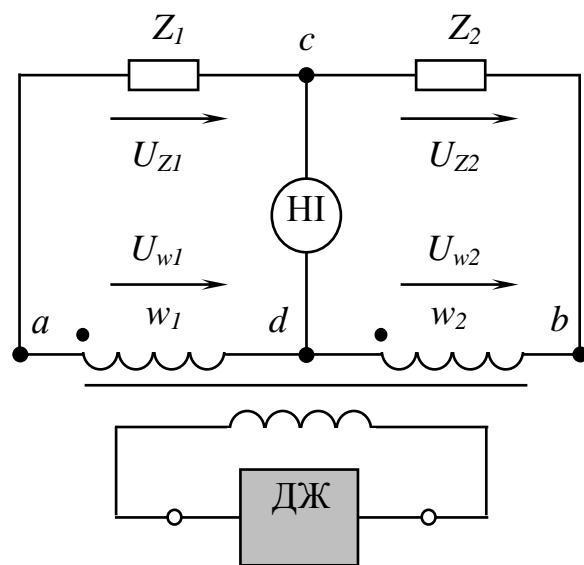


Рис. 9.13.б - Трансформаторна схема чотириплечого трансформаторного моста

Рівновага схем мостів, зображених на рисунку 9.13, настає за умови, коли напруги  $U_{w1}$  і  $U_{w2}$  на плечових елементах з кількістю витків відповідних обмоток  $w_1$  та  $w_2$  дорівнюють за модулем і збігаються за фазою відповідно з напругами  $U_{Z1}$  і  $U_{Z2}$  на комплексних опорах  $Z_1$  і  $Z_2$

$$U_{w1} = U_{Z1}; U_{w2} = U_{Z2}. \quad (9.29)$$

Так як для елементів з тісним індуктивним зв'язком справедливе співвідношення

$$\frac{U_{w1}}{U_{w2}} = \frac{w_1}{w_2}, \quad (9.30)$$

тоді

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (9.31)$$

При підключенні у плече  $Z_1$  вимірюваного комплексного опору  $Z_x$ , а у плече  $Z_2$  – зразкового комплексного опору  $Z_N$ , тоді

$$Z_x = Z_N \cdot \frac{w_1}{w_2}. \quad (9.32)$$

Рівностями (9.31) та (9.32) пояснюється висока точність трансформаторних мостів, оскільки відношення витків  $\frac{w_1}{w_2}$  може бути відоме, з похибкою в ідеальному випадку близькою до 0. В реальності для забезпечення співвідношення (9.31) необхідно виконати ряд додаткових умов, а саме, рівності активних опорів  $R_{w1}$  і  $R_{w2}$  відповідних обмоток і зведення до мінімуму магнітних потоків розсіювання та паразитних міжвиткових ємностей (це досягається спеціальною технологією виготовлення елементів з тісним індуктивним зв'язком).

Основними *перевагами* всіх трансформаторних мостів є висока точність, широкий частотний діапазон (до сотень мегагерц), захищеність від впливу зовнішніх електромагнітних завад і внутрішніх електричних та магнітних зв'язків і, що особливо важливо, висока збіжність.

## 9.4 Компенсаційні засоби вимірювань

Принцип дії компенсаційного засобу вимірювань (компенсатора) полягає в компенсації (протиставленні) двох спрямованих назустріч фізичних величин, одна з яких вимірювана, а інша – зразкова (відома з високою точністю).

### 9.4.1 Компенсатори постійного струму

Принцип дії компенсатора напруги постійного струму – рисунок 9.14, полягає у тому, що вимірювана ЕРС,  $E_x$ , врівноважується відповідним спадом напруги  $U_k = I_p \cdot R_{кx}$  на компенсаційному резисторі  $R_k$  у разі проходження через нього струму  $I_p$  від зовнішнього джерела напруги  $GB$ . У момент рівноваги, яка досягається регулюванням компенсаційної напруги, показ нуль-індикатора,

увімкненого в досліджуване коло (перемикач  $SA$  встановлюється в положення «X»), дорівнюватиме нулю. Тоді

$$E_x = U_{\kappa} = I_p \cdot R_{\kappa x}, \quad (9.33)$$

де  $R_{\kappa x}$  – частина компенсаційного опору, з якого знімають компенсаційну напругу.

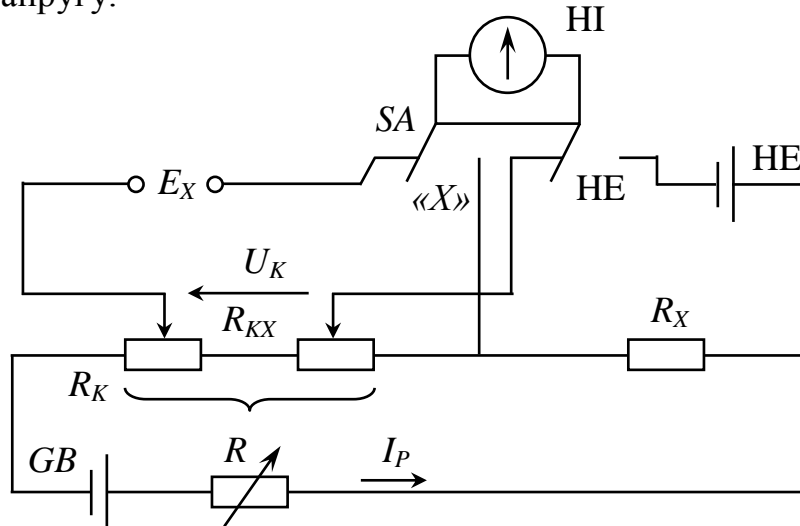


Рисунок 9.14 – Компенсатор постійного струму

Значення компенсаційної напруги можна визначити за положенням декадного перемикача компенсаційного опору, тобто за значенням  $R_{\kappa x}$  лише за умови, що через  $R_{\kappa}$  протікає робочий струм  $I_p$  точно відомого значення. Щоб встановити робочий струм, перемикач  $SA$  встановлюється в положення «HE» і за допомогою регульовального резистора  $R$  досягають рівності напруги на опорі  $R_y$  та ЕРС нормального елемента (HE),  $E_N$ , про що свідчить нульовий показ нуля-індикатора. Тоді

$$I_p = \frac{E_N}{R_y}, \quad (9.34)$$

при цьому

$$E_x = U_{\kappa} = \frac{E_N}{R_y} \cdot R_{\kappa x} = E_N \cdot \frac{R_{\kappa x}}{R_y}. \quad (9.35)$$

Отже, вимірювання  $E_x$  зводиться до порівняння його значення зі значенням ЕРС нормального елемента в масштабі відношення  $\frac{R_{\kappa x}}{R_y}$ , а похибка вимі-

рювання  $E_x$  визначається сумою похибок ЕРС нормального елемента та похибкою відношення  $\frac{R_{кх}}{R_y}$ .

При точних значеннях  $E_N$  та  $R_y$  і високій чутливості нуль-індикатора значення робочого струму встановлюється з високою точністю.

Компенсатори постійного струму поділяються на *дві групи: компенсатори великого опору і компенсатори малого опору*. У перших опір робочих кіл (компенсаційних декад) досягає 10000 Ом на 1 В, їх робочий струм здебільшого дорівнює  $10^{-4}$  А. Верхня межа вимірювання таких компенсаторів 1,2...2,5 В. Компенсатори малого опору, якщо верхня межа вимірювання становить десятки мілівольт, мають робочий струм 1...25 мА.

Слід відзначити дуже важливу властивість компенсаторів, яка полягає у тому, що в момент компенсації струм у вимірювальному колі практично відсутній, від досліджуваного об'єкту практично не споживається енергія.

#### **9.4.2 Компенсатори змінного струму**

Принцип роботи компенсаторів змінного струму, як й постійного, полягає у зрівноваженні вимірюваної напруги  $U_x$  відомою напругою  $U_k$ .

Рівноваги двох змінних величин можна досягти тільки тоді, коли їх частоти й амплітудні значення однакові, а фази протилежні.

Для того щоб частоти вимірюваної та компенсаційної напруги були однакові необхідно забезпечити живлення досліджуваного об'єкту та вимірювального кола компенсатора від спільного джерела напруги, при цьому їх слід розділити гальванічно. Так як форми напруг  $U_x$  і  $U_k$ , які утворені у різних електричних колах, можуть відрізнитись від синусоїди, тому то для фіксації моменту рівноваги використовують частотнобііркові індикатори змінного струму, налаштовані на основну гармоніку.

Відповідно до двох форм запису векторних величин у полярних та прямокутних координатах існує два способи зрівноваження вимірюваної напруги і

два різновиди компенсаторів змінного струму – компенсатори полярно-координатні та компенсатори прямокутно-координатні.

Найпоширенішими є прямокутно-координатні компенсатори – рисунок 9.15.

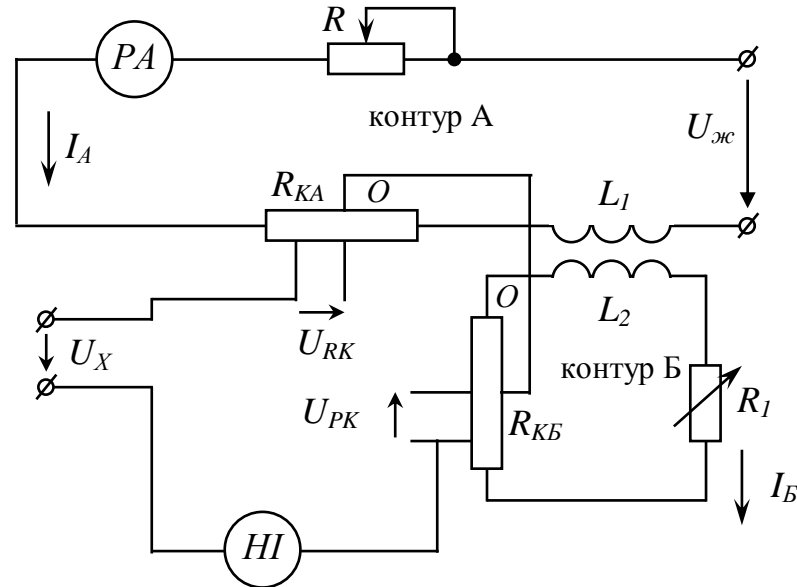


Рисунок 9.15 – Схема прямокутно-координатного компенсатора

Напруга  $U_{кx}$  створюється робочим струмом  $I_{рx}$ , який протікає через компенсаційний опір (реохорд)  $R_{кx}$  і збігається з робочим струмом за фазою. Для отримання напруги  $U_{кy}$  використовується котушка взаємної індуктивності  $M$ , у вторинному колі якої є компенсаційний опір (реохорд)  $R_{кy}$ . У момент рівноваги, настання якої визначається за нульовим показанням нуль-індикатора, спостерігається рівність

$$|U_x| = U_{кx}; \quad |U_{xy}| = U_{кy}. \quad (9.36)$$

Встановлюють робочий струм за допомогою резистора  $R$  за показаннями амперметра  $PA$ .

Основне призначення компенсаторів змінного струму – це дослідження малопотужних кіл змінного струму та безпосереднього вимірювання ЕРС та напруги, а також для опосередкованого вимірювання струму, магнітного потоку, індукції, напруженості магнітного поля, повного, активного та реактивного опорів. Компенсатори постійного та змінного струму можуть бути забезпечені пристроями для автоматичної компенсації вимірюваної напруги. Так само, як і

в автоматичних мостах, напруга небалансу після підсилення підсилювачем подається на електродвигун, увімкнений у коло зворотного зв'язку. За допомогою електродвигунів (одного у компенсаторі постійного струму та двох в компенсаторі змінного струму) пересуваються повзунки реохордів до настання моменту компенсації.

### **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 9**

- 1 Наведіть основні поняття та означення для мостових засобів вимірювання.
- 2 За якими ознаками класифікують мостові засоби вимірювань?
- 3 Які особливості в зрівноваженні мостів постійного і змінного струму?
- 4 В зрівноваженій мостовій схемі змінного струму визначити  $R_x$ ,  $L_x$  і  $Q_x$ , якщо  $R_2 = 5 \text{ Ом}$ ,  $L_2 = 0,1 \text{ Гн}$ ,  $R_3 = 20 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 10 \text{ Ом}$ . Наведіть структурну схему і виведіть умову рівноваги. Наведіть методику вимірювання.
- 5 Одинарний міст. Методика вимірювання активних опорів.
- 6 В зрівноваженій мостовій схемі змінного струму визначити  $R_x$ ,  $L_x$  і  $Q_x$ , якщо  $R_2 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 20 \text{ Ом}$ ,  $C_3 = 0,1 \text{ мкФ}$ ,  $R_4 = 20 \text{ Ом}$ . Наведіть структурну схему і виведіть умову рівноваги. Наведіть методику вимірювання.
- 7 Подвійний міст. Схема, умова рівноваги, галузь застосування.
- 8 В зрівноваженій мостовій схемі змінного струму для вимірювання ємності з малими втратами визначити  $R_x$ , і  $C_x$ , якщо  $R_2 = 100 \text{ Ом}$ ,  $C_2 = 0,1 \text{ мкФ}$ ,  $R_3 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 200 \text{ Ом}$ . Наведіть структурну схему і виведіть умову рівноваги. Наведіть методику вимірювання.
- 9 Автоматичний міст постійного струму: структурна схема, принцип дії, галузь застосування.
- 10 В зрівноваженій мостовій схемі змінного струму для вимірювання ємності з великими втратами визначити  $R_x$ , і  $C_x$ , якщо  $R_2 = 100 \text{ Ом}$ ,  $C_2 = 0,1 \text{ мкФ}$ ,  $R_3 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 200 \text{ Ом}$ . Наведіть структурну схему і виведіть умову рівноваги. Наведіть методику вимірювання.
- 11 Наведіть принципову схему компенсатора постійного струму, поясніть принцип дії та наведіть основні метрологічні характеристики.

12 Наведіть принципову схему прямокутно-координатного компенсатора змінного струму, поясніть принцип дії та наведіть основні метрологічні характеристики.

### **ТЕСТОВІ КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ ДО РОЗДІЛУ 9**

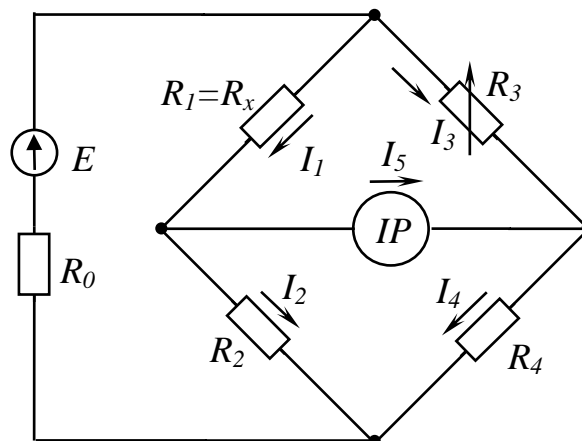
1. В конструкції якого засобу вимірювання покладене мостове вимірювальне коло?

- 1 вимірювального моста
- 2 вимірювального компенсатора
- 3 компаратора
- 4 вимірювального приладу

2. Чому вимірювальний міст постійного струму має назву одинарний?

- 1 так як складається з реохорду та чотирьох плечей моста
- 2 так як складається з чотирьох плечей моста
- 3 так як складається з шести плечей моста
- 4 так як складається з чотирьох плечей моста, з реохорду та підсилювача

3. Схема якого вимірювального моста наведена на рисунку?



- 1 одинарний вимірювальний міст постійного струму
- 2 автоматичний вимірювальний міст
- 3 компенсатор
- 4 подвійний вимірювальний міст

4. Яку назву мають резистори  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  в конструкції одинарного вимірювального моста постійного струму?

- 1 вимірювальна діагональ
- 2 плечі моста
- 3 вершини моста
- 4 діагональ моста

5. Плече вимірювального моста постійного струму – це ...

- 1 це електричне коло між двома вершинами моста, до якого включений резистор постійного струму
- 2 це електричне коло між двома протилежними вершинами моста, до якого включено джерело живлення постійного струму
- 3 це електричне коло між двома протилежними вершинами моста, до якого включений показчик рівноваги - електровимірювальний прилад з нульовою симетричною шкалою
- 4 це реохорд

6. Вершина вимірювального моста постійного струму – це ...

- 1 електричний вузол з'єднання двох протилежних плечей моста
- 2 електричний вузол з'єднання двох сусідніх плечей моста та один з проводів, що живить діагональ моста
- 3 електричний вузол з'єднання двох діагоналей моста
- 4 електричне коло між двома протилежними вершинами моста, до якого включений показчик рівноваги - електровимірювальний прилад з нульовою симетричною шкалою

7. Кількість операцій, які необхідні для досягнення рівноваги вимірювального моста з найменшим часом вимірювання має назву ...

- 1 зрівноваження вимірювального моста
- 2 збіжність вимірювального моста
- 3 не зрівноваження вимірювального моста
- 4 порівняння фізичної величини

8. Складіть умову рівноваги вимірювального моста, схема якого наведена в питанні 3, та оберіть вірний варіант відповіді

- |                                   |                                   |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 $R_1 \cdot R_2 = R_3 \cdot R_4$ | 3 $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$ |
| 2 $Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4$ | 4 $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$ |



9. Оберіть три вірні відповіді. Які три додаткові пристрої необхідно застосувати, щоб вимірювальний міст з ручним врівноваженням став автоматичним?

- 1 реверсивний електродвигун
- 2 реохорд
- 3 показчик рівноваги
- 4 підсилювач
- 5 діагональ живлення

10. В якому приладі, принцип дії оснований на компенсації ЕРС або напруги?

- 1 в вимірювальному мості змінного струму
- 2 в автоматичному вимірювальному мості
- 3 в вимірювальному мості постійного струму
- 4 в вимірювальному компенсаторі