

METROLOGIA

Dr inż. Eligiusz PAWŁOWSKI

Politechnika Lubelska

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Prezentacja do wykładu dla EINS

Zjazd 12, wykład nr 19



Prawo autorskie

Niniejsze materiały podlegają ochronie zgodnie z **Ustawą o prawie autorskim i prawach pokrewnych** (Dz.U. 1994 nr 24 poz. 83 z późniejszymi zmianami).

Materiał ten udostępniam **do celów dydaktycznych** jako materiały pomocnicze do wykładu z przedmiotu Metrologia prowadzonego dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Mogą z nich również korzystać inne osoby zainteresowane metrologią. Do tego celu materiały te można **bez ograniczeń przeglądać, drukować i kopiować wyłącznie w całości**.

Wykorzystywanie tych materiałów bez zgody autora w inny sposób i do innych celów niż te, do których zostały udostępnione, **jest zabronione**.

W szczególności **niedopuszczalne jest**: usuwanie nazwiska autora, edytowanie treści, kopiowanie fragmentów i wykorzystywanie w całości lub w części do własnych publikacji.

Eligiusz Pawłowski

Uwagi dydaktyczne

Niniejsza prezentacja stanowi **tylko i wyłącznie materiały pomocnicze** do wykładu z przedmiotu Metrologia prowadzonego dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Udostępnienie studentom tej prezentacji nie zwalnia ich z konieczności sporządzania **własnych notatek z wykładów** ani też nie zastępuje **samodzielnego studiowania** obowiązujących podręczników.

Tym samym zawartość niniejszej prezentacji w szczególności **nie może być** traktowana jako zakres materiału obowiązujący na egzaminie.

Na egzaminie obowiązujący jest **zakres materiału faktycznie wyłożony podczas wykładu** oraz zawarty w odpowiadających mu fragmentach **podręczników** podanych w wykazie literatury do wykładu.

Eligiusz Pawłowski

Tematyka wykładu

Metody zerowe: mostkowa i kompensacyjna

Mostki napięcia stałego czteroramienne

Mostki napięcia stałego sześcioramienne

Mostki niezrównoważone

Mostki napięcia przemiennego

Metody zerowe

Metoda mostkowa obok metody kompensacyjnej należy do grupy **metod zerowych**.

Pomiar metodą zerową polega na **sprowadzeniu do zera** sygnału równowagi, tzn. różnicy wielkości mierzonej X i wielkości znanej (kompensującej) X_w . Wynikiem pomiaru wielkości mierzonej X jest wówczas znana wartość wielkości kompensującej X_w .

Czynności badania różnicy $X - X_w$ w mostku i sprowadzania jej do zera nazywamy **równoważeniem mostka**.

Równoważenie realizowane jest za pomocą dwóch elementów: **detektora zera i urządzenia równoważącego**.

Mostki prądu stałego mogą być równoważone jednym elementem, a mostki prądu przemiennego – przynajmniej dwoma elementami.

Detektor

Detektor (wskaźnik równowagi) jest elementem lub zespołem, który po doprowadzeniu do niego różnicy $X - X_w$ jest zdolny sterować procesem równoważenia mostka.

Uwaga! W praktyce stan równowagi **nie może być określony** matematyczną równością $X - X_w = 0$, gdyż istnieje nieskończenie wiele wartości $|X - X_w| < \Delta_D X$ dla których detektor przyjmuje jeden i ten sam stan (traktowany jako stan zrównoważenia układu).

Wielkość $\Delta_D X$ nazywamy **progiem czułości** (pobudliwości). Dopiero po przekroczeniu tego progu stan detektora ulega zmianie. Ta niekorzystna właściwość detektora jest przyczyną występowania **błędu czułości** (lub nieczułości, zależnie od autora).

Detektor – wskaźnik równowagi mostka

W mostkach prądu stałego jako wskaźniki równowagi stosuje się **galwanometry** magnetoelektryczne, **wzmacniacze** elektroniczne prądu stałego lub **multimetry** cyfrowe z odpowiednim niskim zakresem napięć stałych.

W mostkach prądu przemiennego jako wskaźniki równowagi stosuje się **miliwoltomierze** napięcia przemiennego lub **multimetry** cyfrowe z odpowiednim niskim zakresem napięć przemiennych.

Metoda mostkowa

Metoda mostkowa jest to metoda pomiarowa oparta na pomiarze (lub sprowadzeniu do zera) różnicy dwóch spadków napięcia, wywołanych przez to samo źródło zasilania, w obwodzie elektrycznym złożonym co najmniej z dwóch gałęzi równoległych.

Charakterystyczną cechą dla tej metody jest **niezależność** wyniku pomiaru (w stanie równowagi układu) **od wartości napięcia** zasilającego.

Metoda kompensacyjna

Metoda kompensacyjna jest to metoda pomiarowa oparta na pomiarze (lub sprowadzeniu do zera) różnicy dwóch odrębnych i niezależnych spadków napięcia, wywołanych przez różne źródła zasilania.

Charakterystyczną cechą dla tej metody jest **zależność** wyniku pomiaru (nawet w stanie równowagi układu) **od wartości napięć zasilających**.

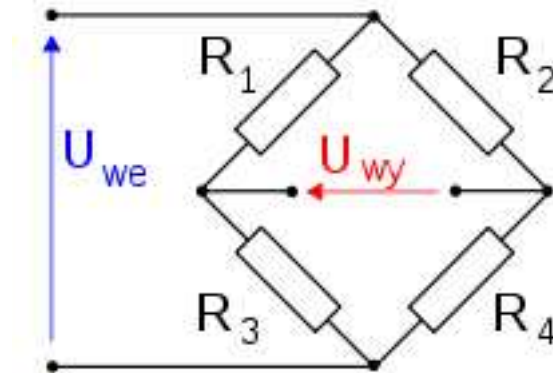
Zastosowania metod mostkowych i kompensacyjnych

Metoda mostkowa wykorzystuje tylko **jedno napięcie** (źródło zasilania) i może być wykorzystana przede wszystkim bezpośrednio do pomiarów parametrów obwodów elektrycznych (rezystancji, indukcyjności, pojemności) oraz pośrednio do pomiaru prądów i napięć po uwzględnieniu zależności pomiędzy nimi a parametrami obwodu.

Metoda kompensacyjna wykorzystuje **dwa napięcia** (z których jedno jest źródłem zasilania) i może być wykorzystana przede wszystkim do pomiarów sił elektromotorycznych, prądów i napięć oraz pośrednio do pomiaru parametrów obwodów elektrycznych (rezystancji, indukcyjności, pojemności) po uwzględnieniu zależności na występujące na nich spadki napięć.

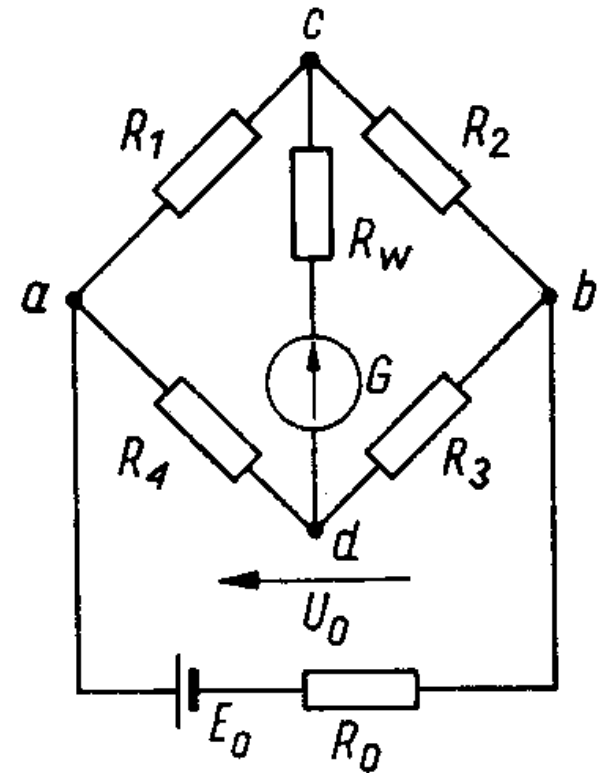
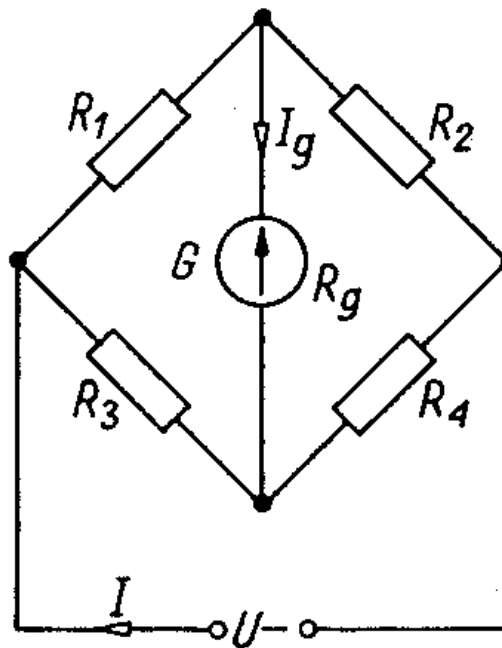
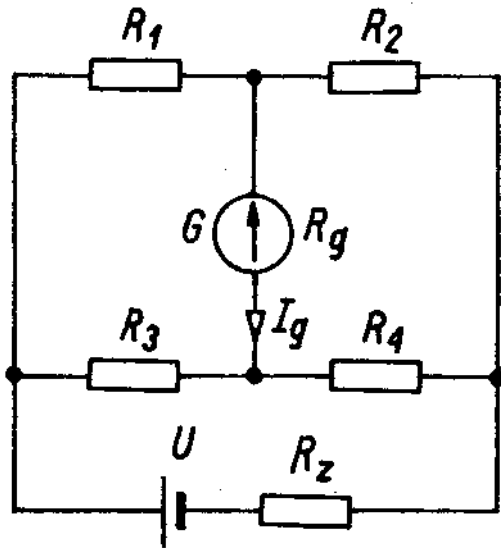
Mostkowy układ pomiarowy - mostek

Mostkowy układ pomiarowy (lub krótko: **mostek**) jest to czwórnik, w którym do jednej pary zacisków przyłącza się napięcie zasilające (lub prąd zasilający), a do drugiej wskaźnik równowagi (czuły wskaźnik prądu lub napięcia, np.: galwanometr).

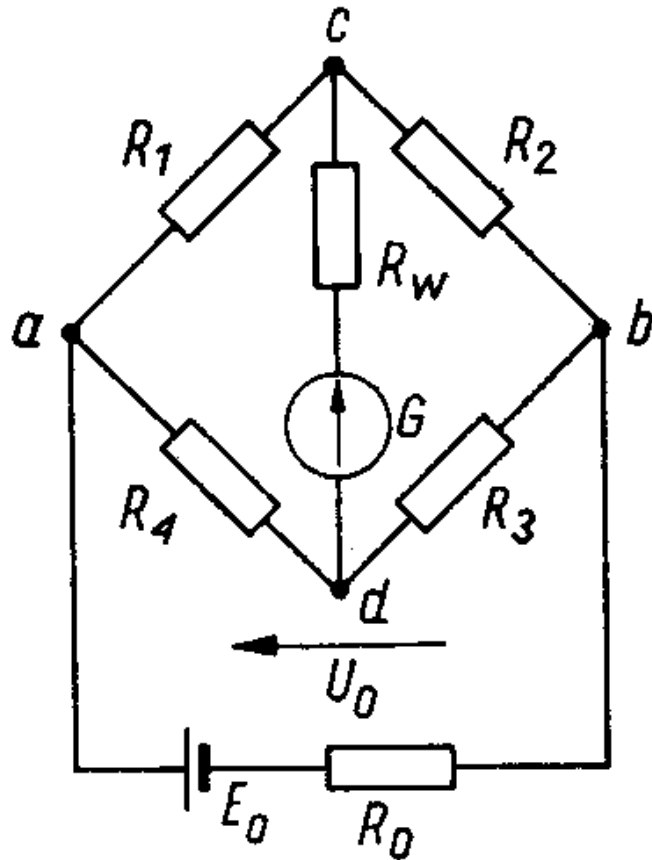


Mostki – schematy i oznaczenia

Nie ma określonego jednolitego sposobu rysowania schematu mostków oraz systemu oznaczania elementów. Dlatego trzeba zawsze przeanalizować przyjęty sposób oznaczania.



Mostki – nazewnictwo



abcd – wierzchołki (węzły) mostka

$R_1 R_2 R_3 R_4$ – ramiona mostka

a-b – przekątna zasilania mostka

c-d – przekątna wskaźnika równowagi

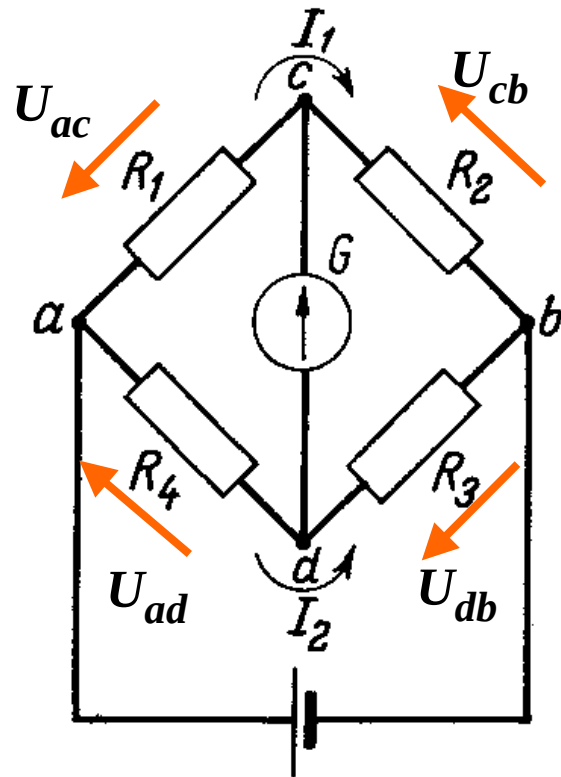
$R_1 R_2$ – gałąź górna mostka

$R_3 R_4$ – gałąź dolna mostka

G – wskaźnik równowagi

E_0 – zasilanie mostka

Mostek czteroramienny – warunki równowagi



W stanie równowagi mamy:

$$U_{cd} = 0 \Rightarrow U_{ac} = U_{ad}, U_{cb} = U_{db}$$

Czyli że:

$$U_{ac} = I_1 R_1$$

$$U_{cb} = I_1 R_2$$

$$U_{ad} = I_2 R_4$$

$$U_{db} = I_2 R_3$$

Po podstawieniu i przekształceniu:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}, \text{ a więc również:}$$

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3}, \text{ a więc również:}$$

$$R_1 R_3 = R_4 R_2$$

Mostek czteroramienny – warunki równowagi

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \quad \Leftrightarrow \quad R_1 R_3 = R_4 R_2$$

Wszystkie trzy warunki są sobie **równoważne**, trzeba tylko zwrócić uwagę na przyjęty **sposób oznaczenia ramion mostka**.

Warto zapamiętać, że w stanie równowagi mostka

iloczyny rezystancji przeciwległych ramion są sobie równe:

$$R_1 R_3 = R_4 R_2$$

Mostki – różne rodzaje pracy, nazewnictwo

Należy rozróżniać **cztery** sformułowania:

-mostek w stanie równowagi: wartości rezystancji spełniają warunek równowagi mostka, wskaźnik równowagi pokazuje zero,

-mostek w stanie nierównowagi: wartości rezystancji nie spełniają warunku równowagi mostka, wskaźnik równowagi nie pokazuje zera,

-mostek zrównoważony: podczas pomiaru doprowadzamy mostek do stanu równowagi, wynik pomiaru obliczamy z warunku równowagi mostka, gdy wskaźnik równowagi pokazuje zero,

-mostek niezrównoważony: podczas pomiaru nie doprowadzamy mostka do stanu równowagi, w chwili wykonywania pomiaru mostek zazwyczaj jest w stanie nierównowagi, wynik pomiaru odczytujemy ze wskaźnika równowagi, który pokazuje zero tylko dla jednej wartości.

Rodzaje mostków prądu stałego

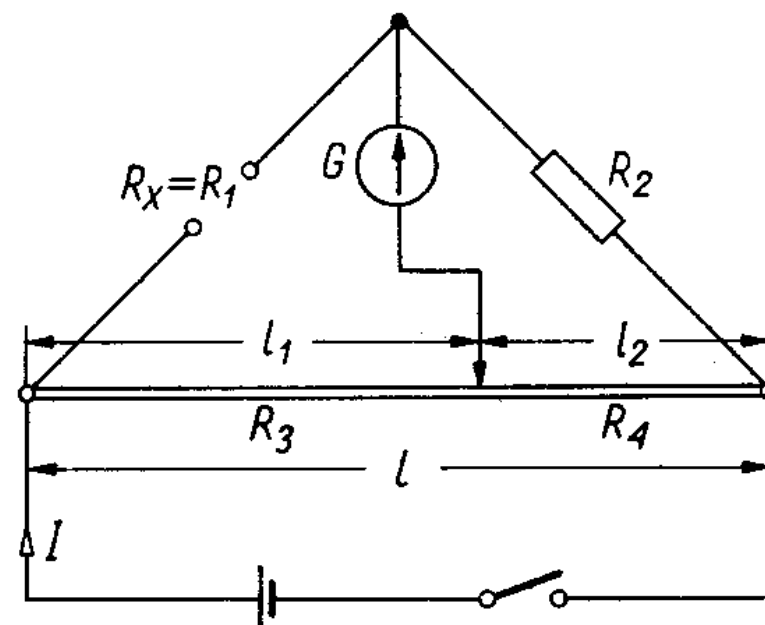
Mostki czteroramienne:

- Równoważone drutem ślizgowym - **techniczny** mostek Wheatstone'a
- Równoważone opornikami dekadowymi – **laboratoryjny** mostek Wheatstone'a

Mostki sześcioramienne:

- Równoważone drutem ślizgowym - **techniczny** mostek Thomsona
- Równoważone opornikami dekadowymi – **laboratoryjny** mostek Thomsona

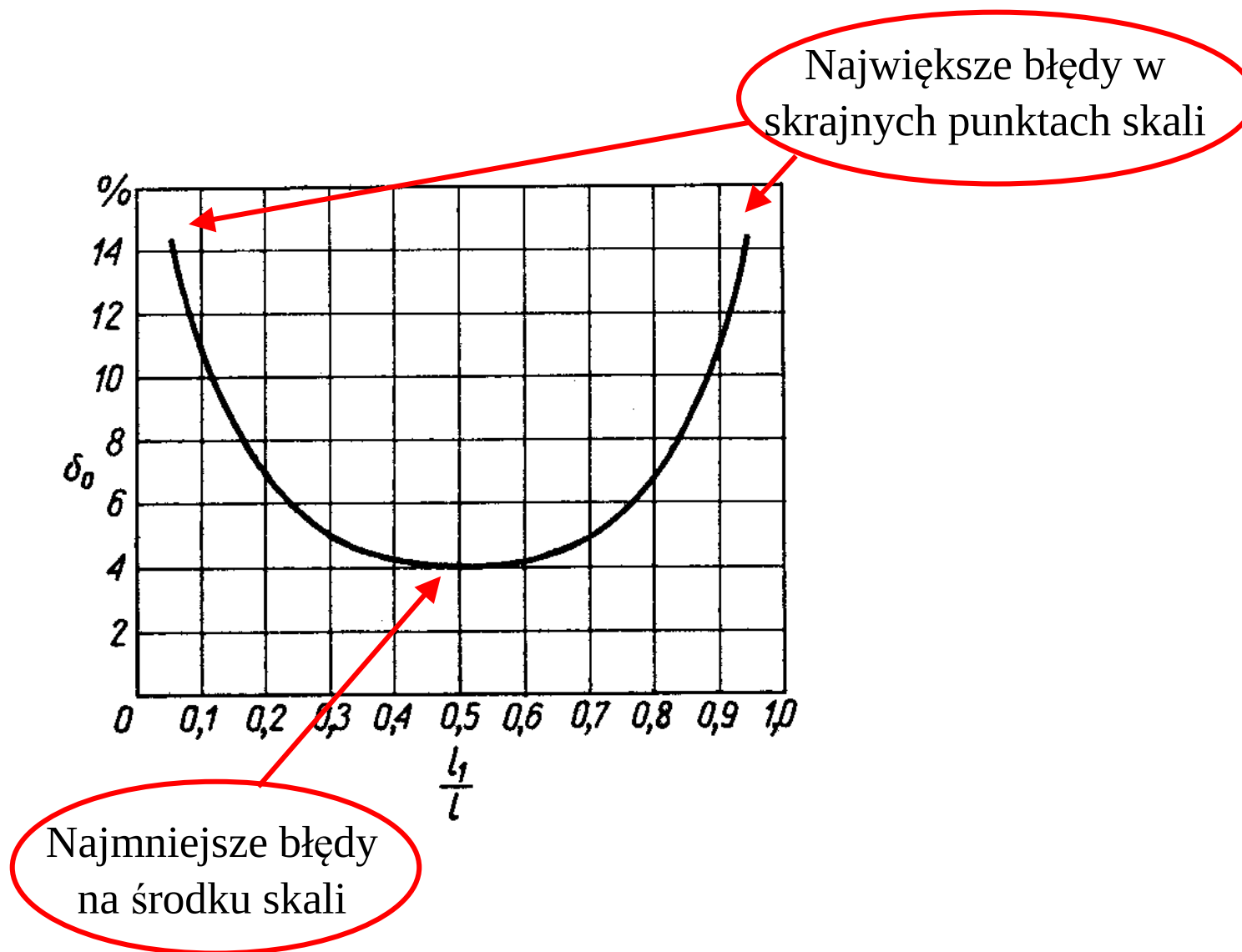
Mostek techniczny Wheatstone'a z drutem oporowym



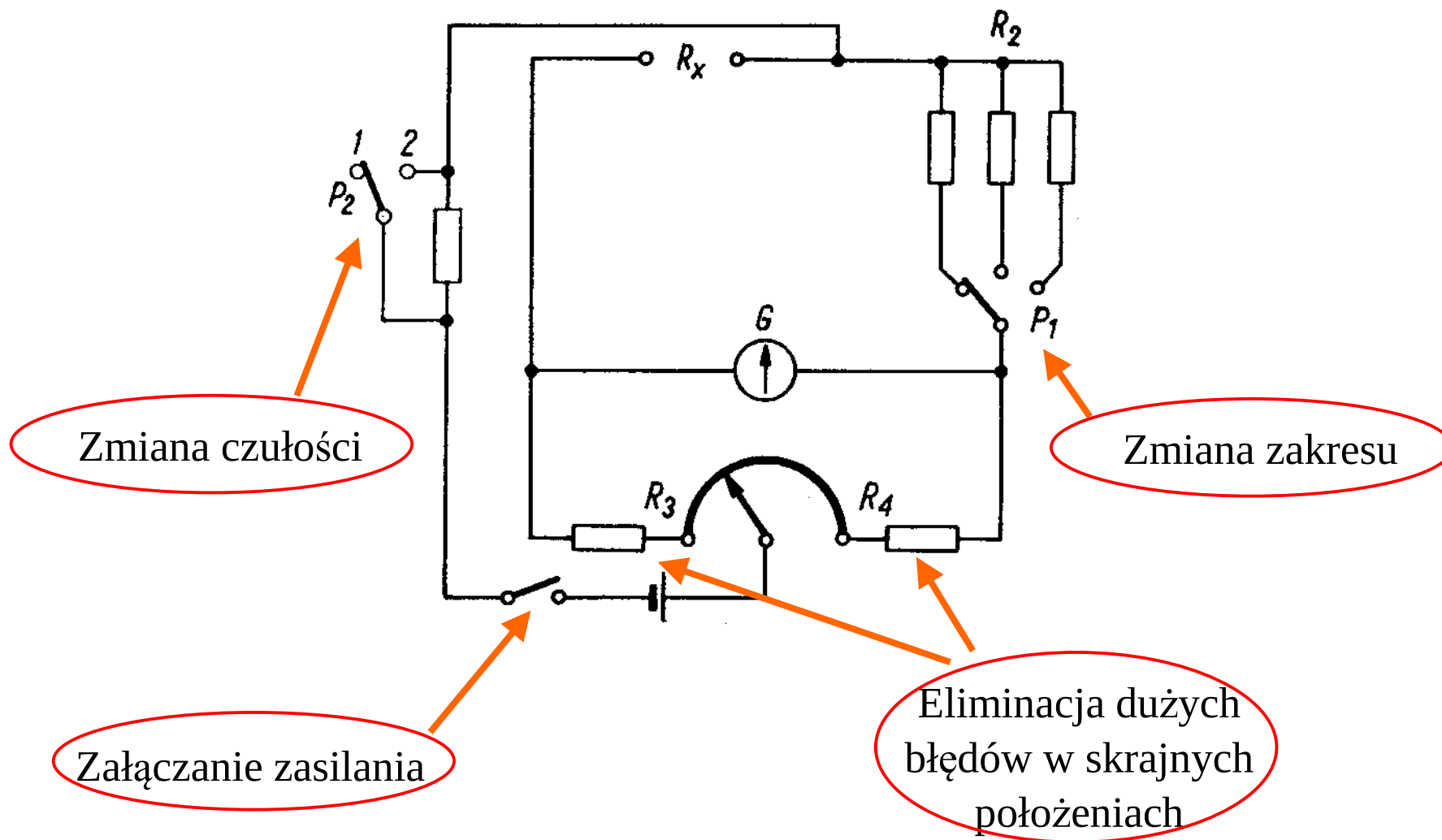
$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

$$R_x = R_1 = R_2 \frac{l_1}{l_2} = R_2 \frac{l_1}{l - l_2}$$

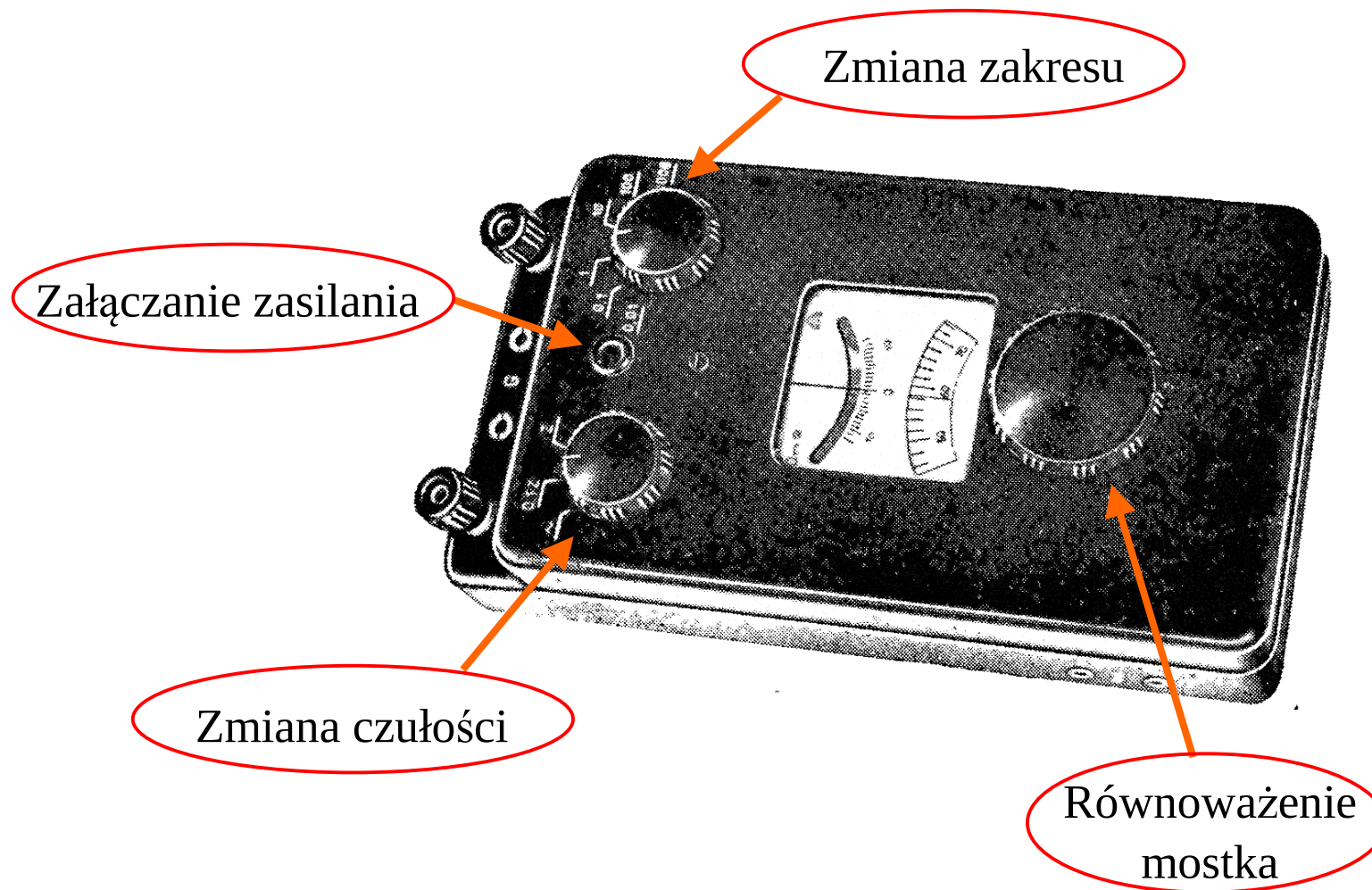
Techniczny mostek Wheatstone'a – krzywa błędów



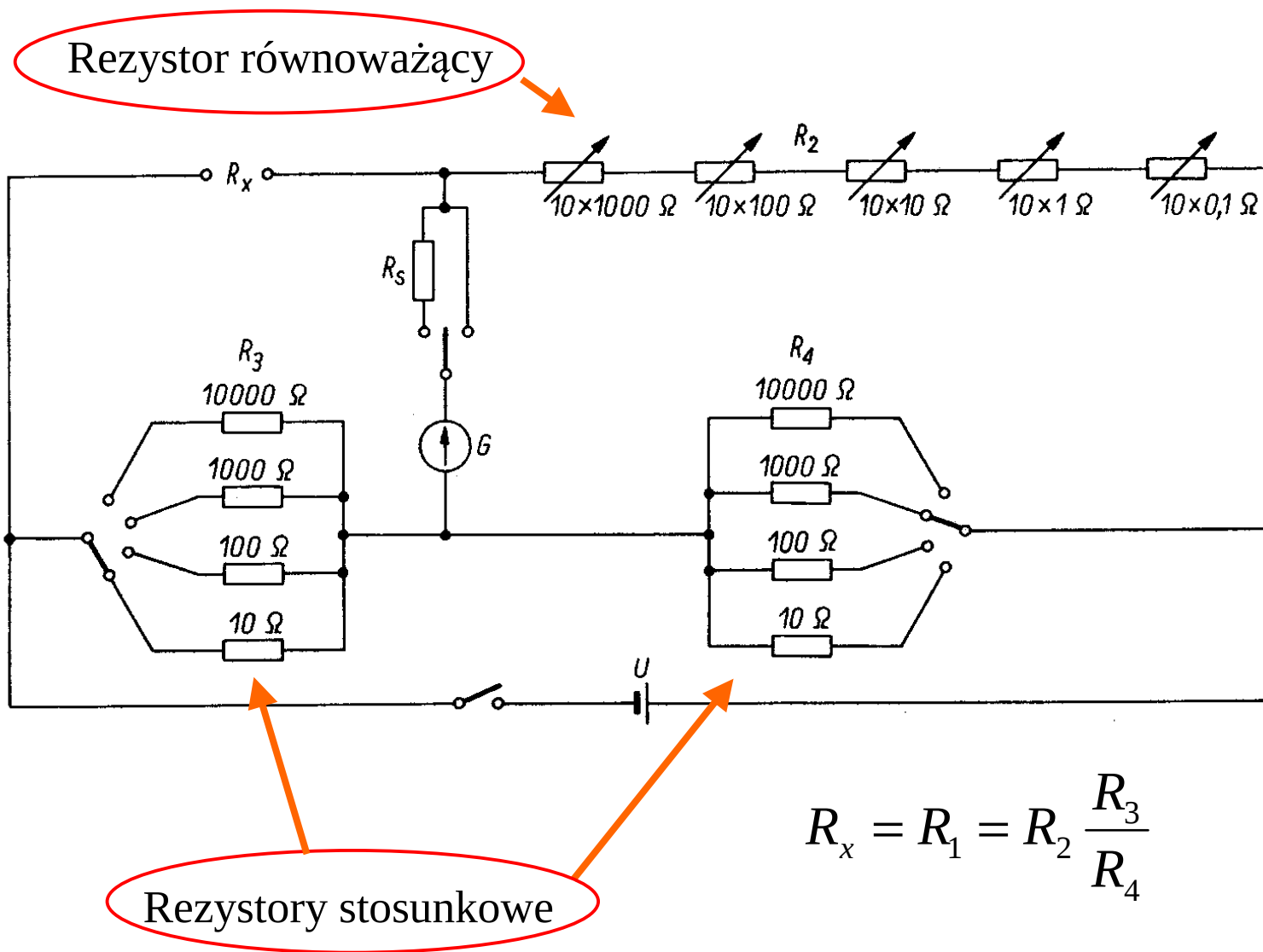
Techniczny mostek Wheatstone'a – schemat rzeczywisty



Techniczny mostek Wheatstone'a – budowa



Laboratoryjny mostek Wheatstone'a - schemat



Laboratoryjny mostek Wheatstone'a/Thomsona - budowa



Laboratoryjny mostek Wheatstone'a - błędy

Na błędy pomiaru mostkiem Wheatstone'a składają się:

- błędy wykonania oporników mostka (0,02 – 0,05%),
- rezystancja połączeń i styków w przełącznikach,
- błąd nieczułości,
- wpływ temperatury i innych czynników zewnętrznych,
- występowanie sił termoelektrycznych.

$$\delta_{gr} R_x = \left| \delta_{gr} R_2 \right| + \left| \delta_{gr} R_3 \right| + \left| \delta_{gr} R_4 \right|$$

Błąd nieczułości mostka Wheatstone'a

Błąd nieczułości mostka jest to najmniejsza względna zmiana rezystancji mierzonej, która wywołuje dostrzegalne odchylenie wskazówki galwanometru z położenia równowagi

$$\delta_{ncz} R_x = \frac{\Delta R_{xncz}}{R_x}$$

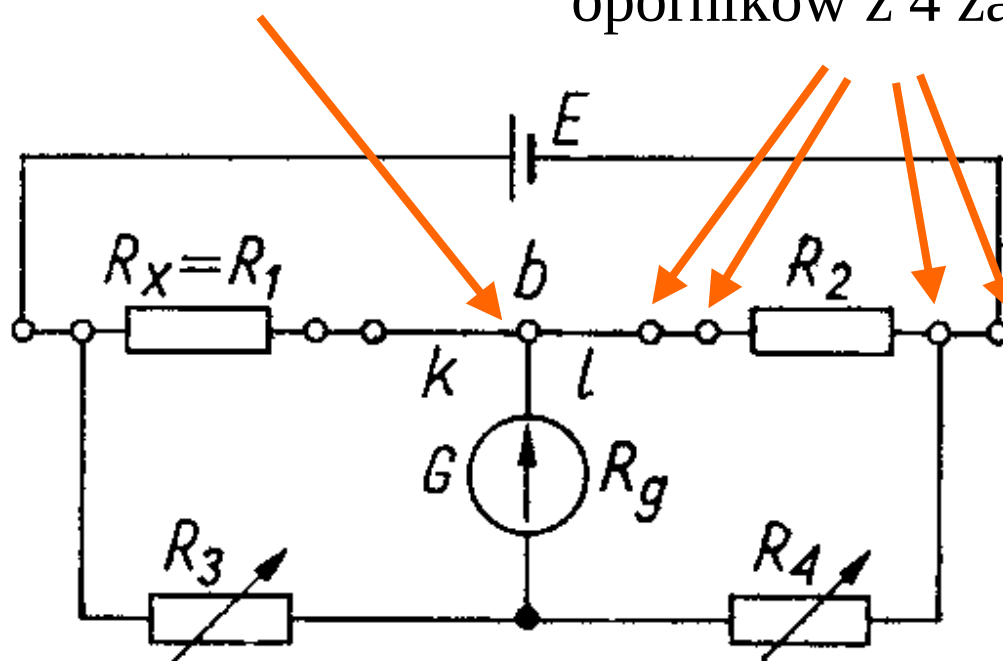
W praktyce błąd nieczułości mostka wyznaczamy doświadczalnie rozregulowując rezystor R_2 .

$$\delta_{ncz} R_x = \frac{\Delta R_{xncz}}{R_x} = \frac{\Delta R_{2ncz}}{R_2}$$

Mostek Wheatstone'a – problem pomiaru małych rezystancji

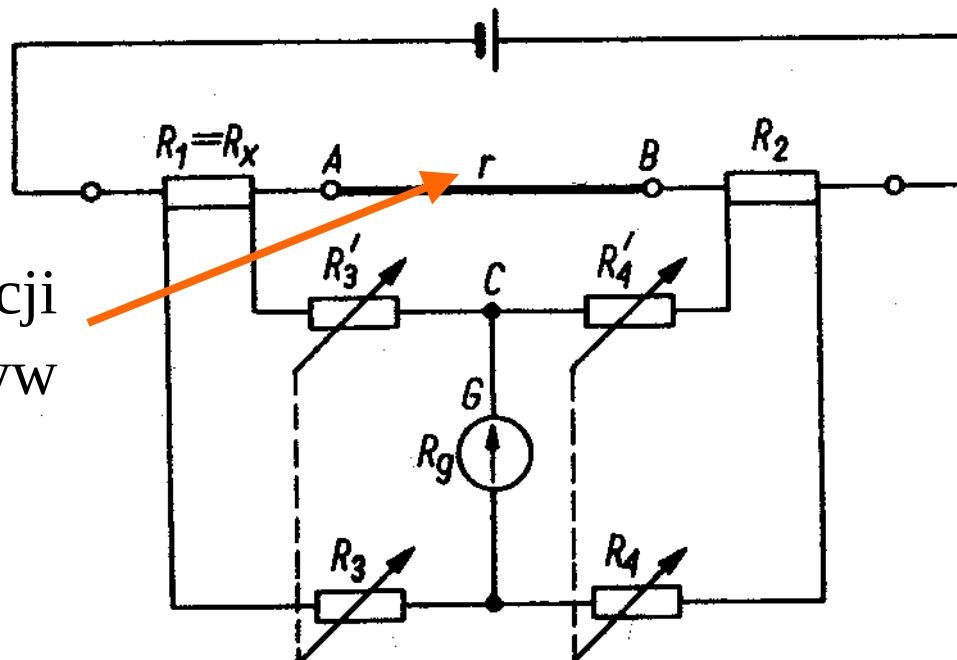
Problem stanowi ten punkt
dołączenia galwanometru

Pomiar małych rezystancji
wymaga zastosowania
oporników z 4 zaciskami



Sześcioramienny mostek Thomsona (Kelvina)

Spełnienie tej proporcji
eliminuje wpływ
rezystancji przewodu r



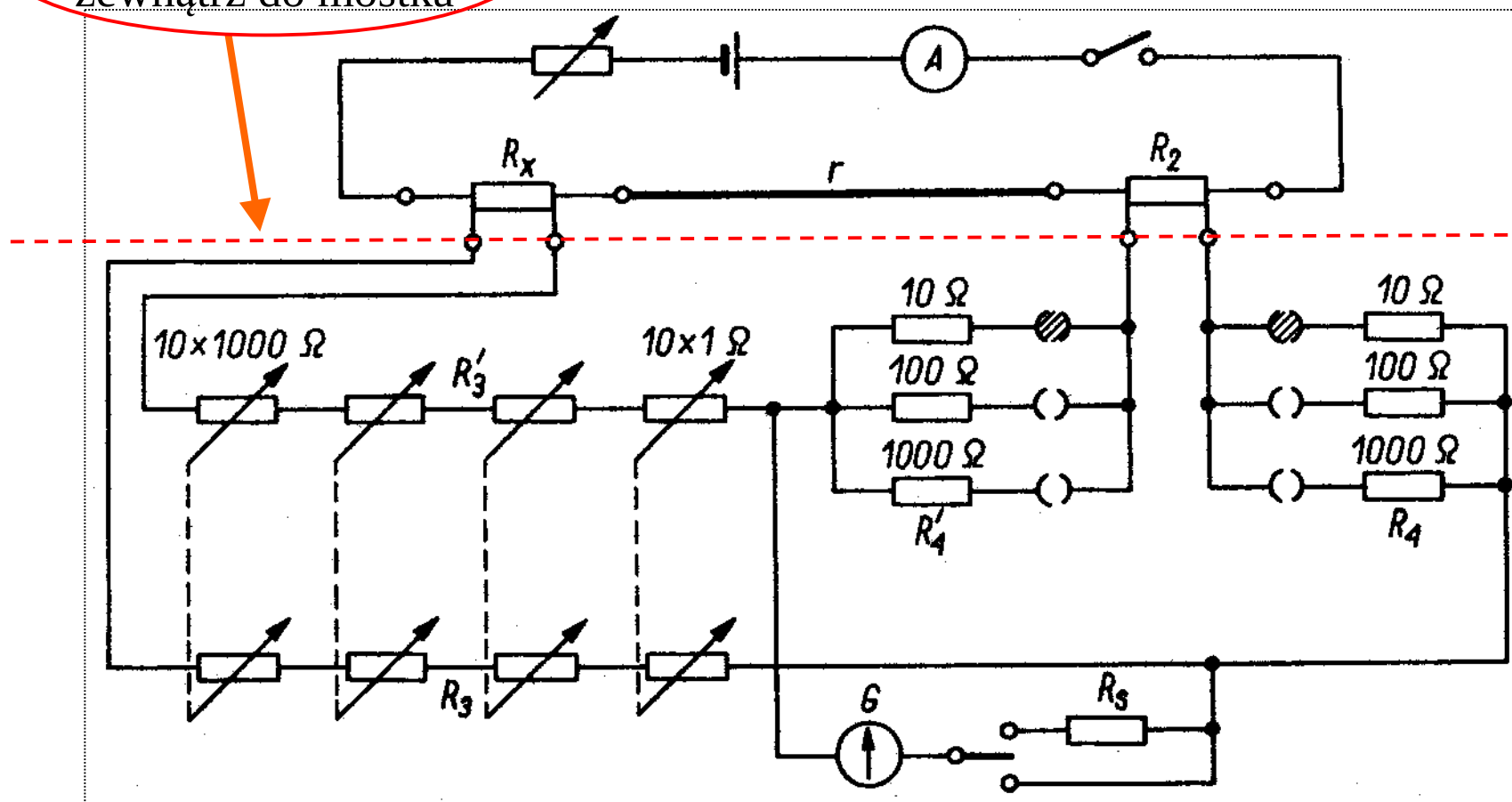
$$\frac{R_3'}{R_3} = \frac{R_4'}{R_4}$$

$$R_3 = R_3', R_4 = R_4'$$

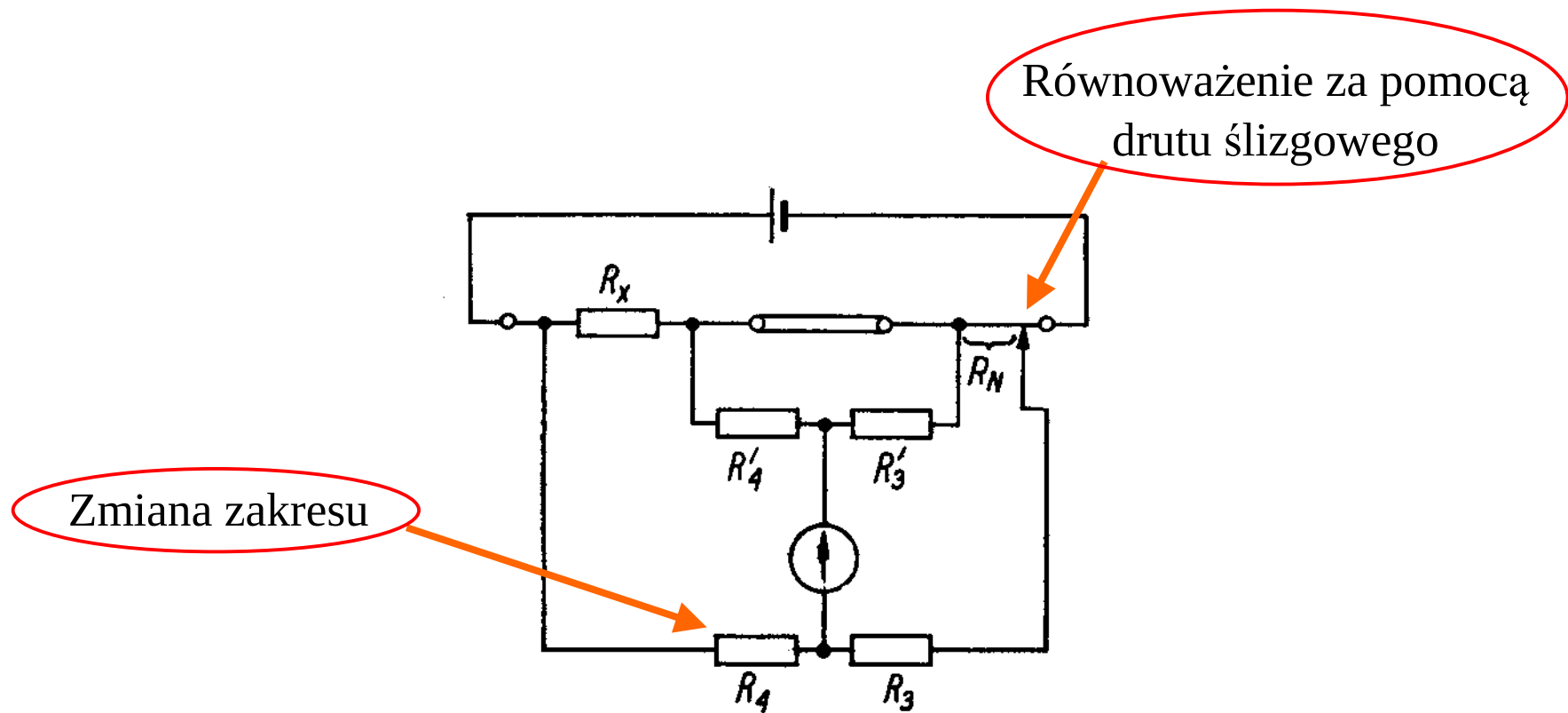
$$R_x = R_1 = R_2 \frac{R_3}{R_4}$$

Laboratoryjny mostek Thomsona (Kelvina) - schemat

Elementy dołączane z zewnątrz do mostka



Techniczny mostek Thomsona (Kelvina) - schemat



$$\frac{R_3'}{R_3} = \frac{R_4'}{R_4} \qquad R_x = R_1 = R_N \frac{R_3}{R_4}$$

Techniczny mostek Thomsona – budowa

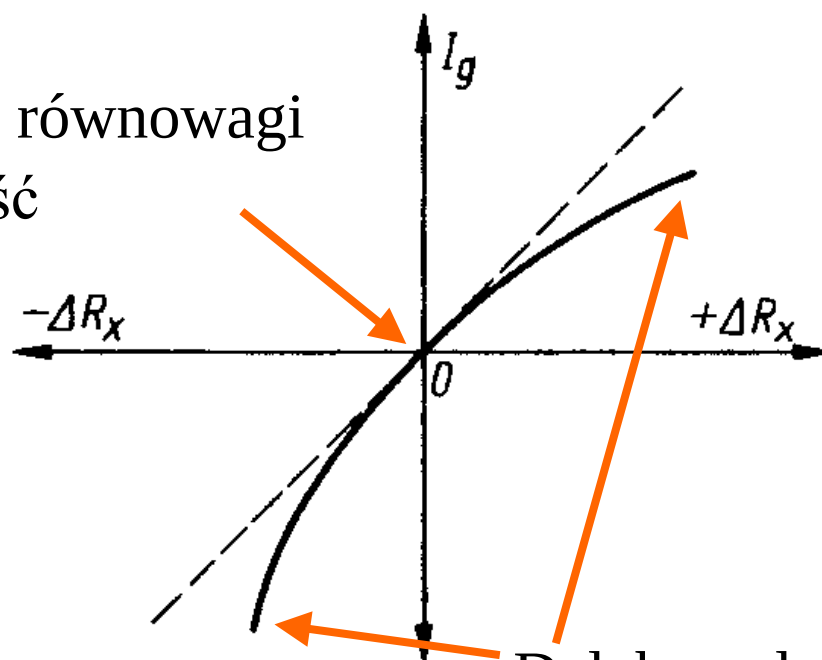


Pomiary od $0,5\text{m}\Omega$

Mostek Wheatstone'a **niezrównoważony** 1R - charakterystyka

$$I_g = U_z \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 R_2 (R_3 + R_4) + (R_1 + R_2) [R_3 R_4 + R_g (R_3 + R_4)]}$$

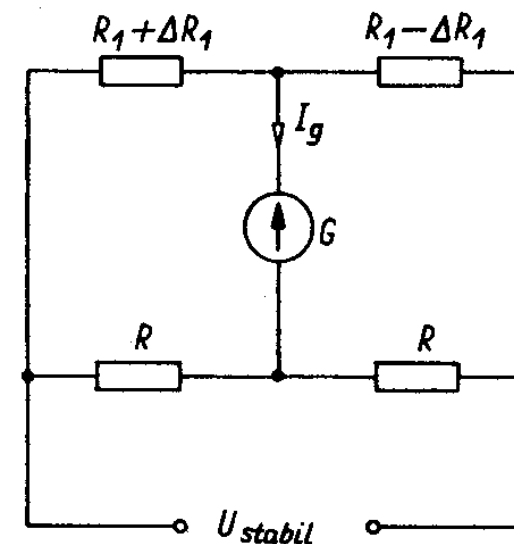
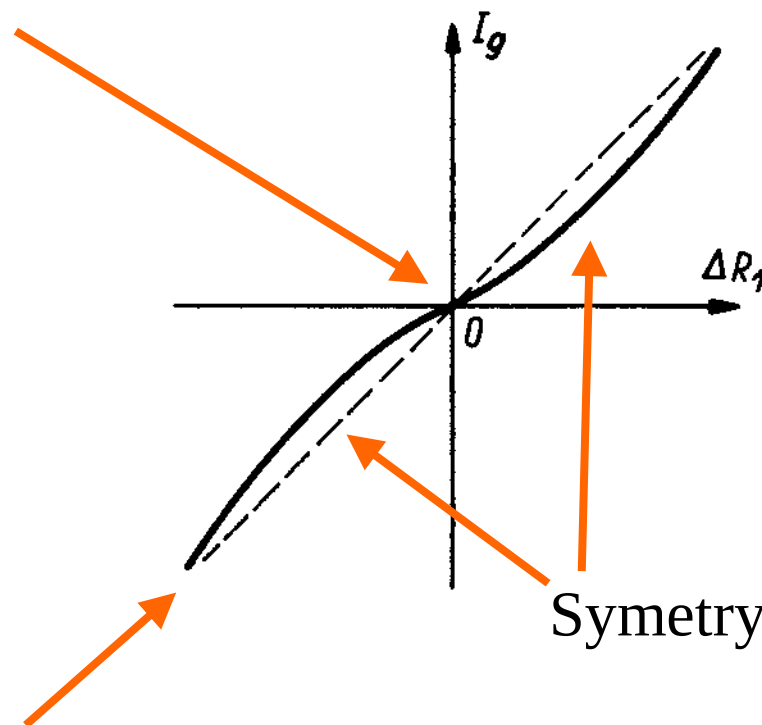
Wokół punktu równowagi
dobra liniowość



Daleko od punktu równowagi
duża nieliniowość

Mostek Wheatstone'a **niezrównoważony** 2R - charakterystyka

Wokół punktu równowagi
dobra liniowość

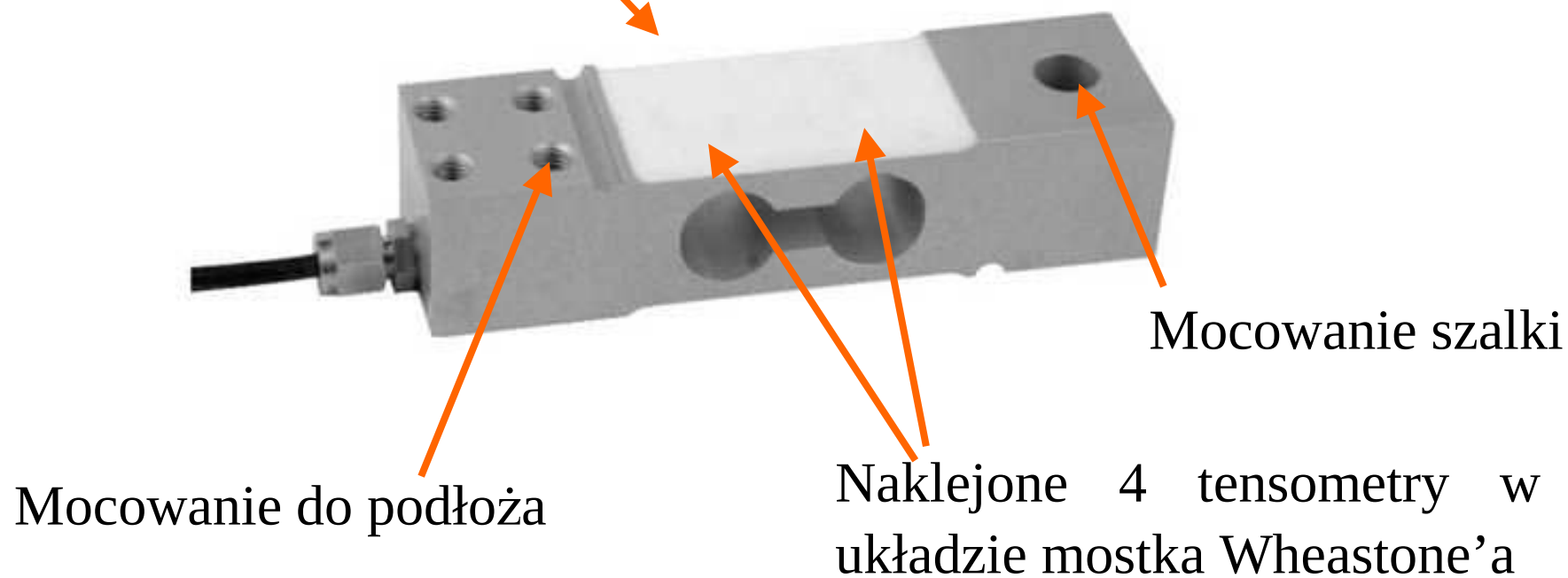
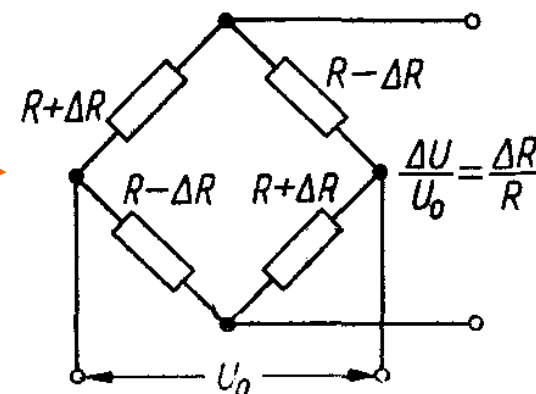


Symetryczna charakterystyka

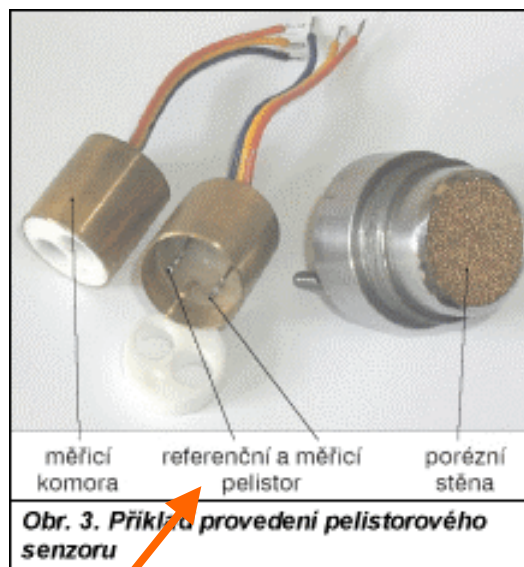
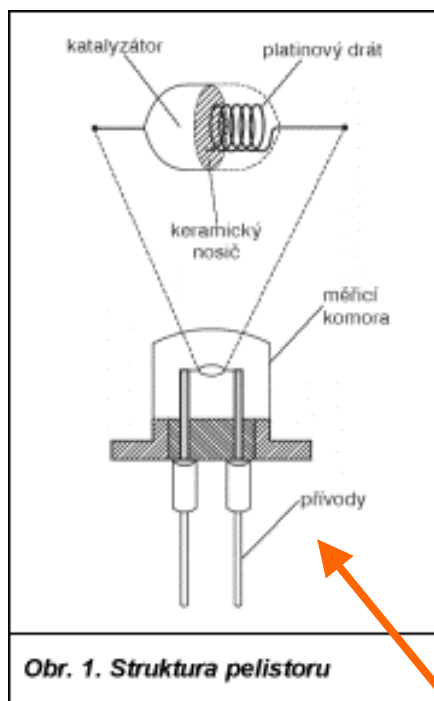
Daleko od punktu równowagi
również dobra liniowość

Mostek Wheatstone'a niezrównoważony - zastosowanie

Tensometryczny przetwornik
siły do wagi elektronicznej

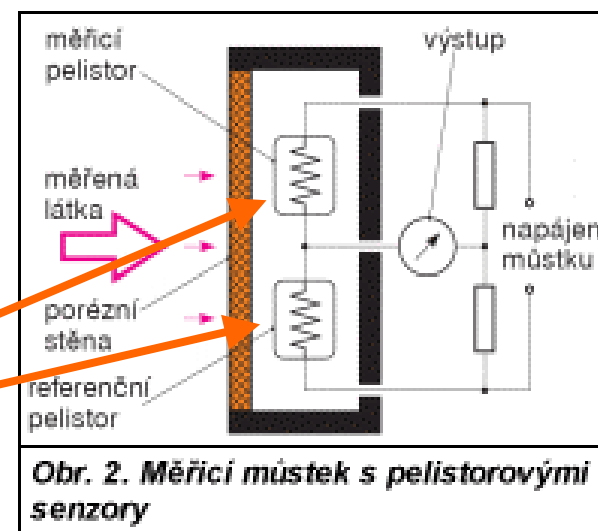


Mostek Wheatstone'a nie zrównoważony - zastosowanie

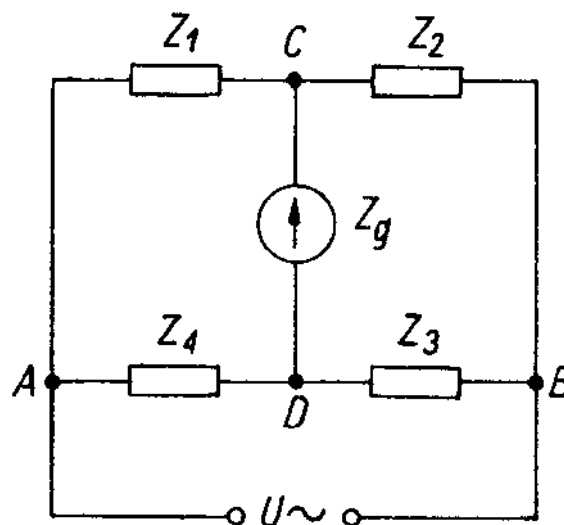


Pelistorowy czujnik gazu

Pelistory w układzie mostka Wheatstone'a



Mostki prądu przemiennego – warunki równowagi

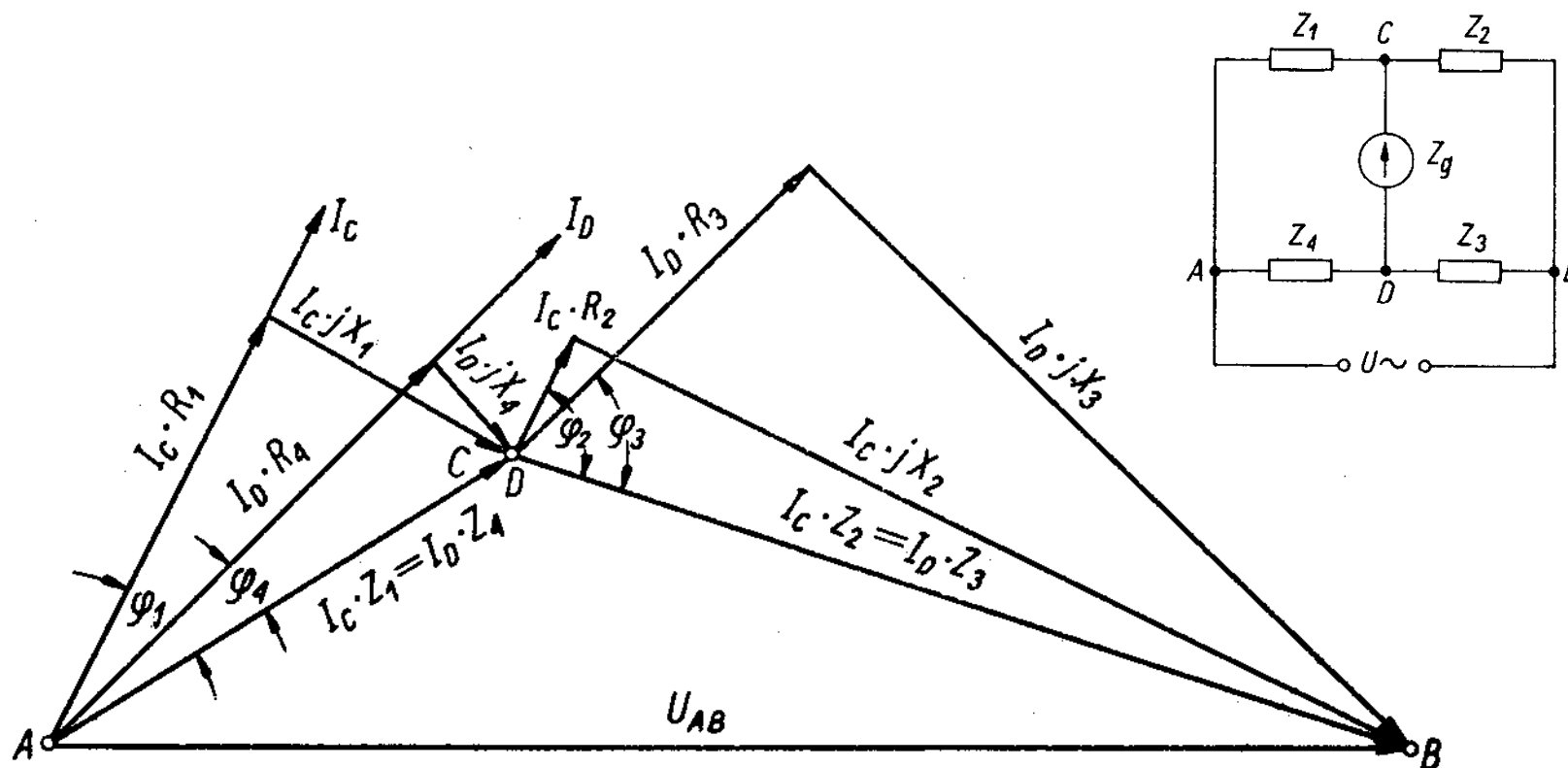


W stanie równowagi mostka prądu przemiennego

iloczyny impedancji przeciwległych ramion są sobie równe:

$$\underline{Z}_1 \underline{Z}_3 = \underline{Z}_4 \underline{Z}_2 \quad \longleftrightarrow \quad \begin{cases} Z_1 Z_3 = Z_4 Z_2 \\ \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_4 + \varphi_2 \end{cases}$$

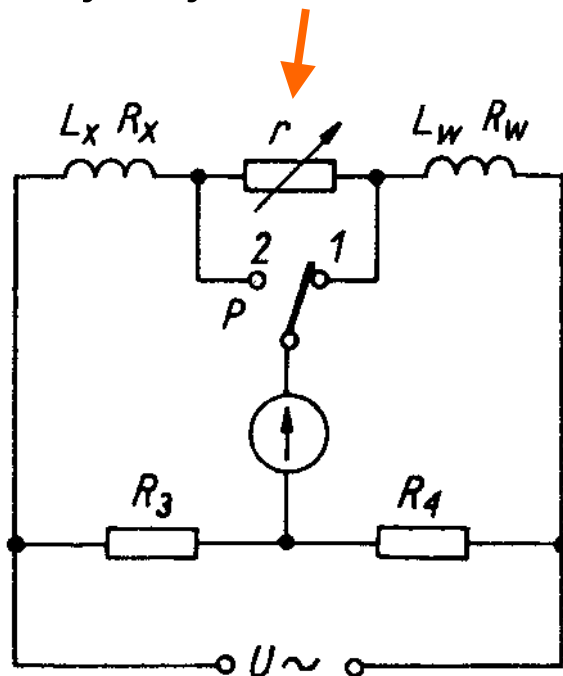
Mostki prądu przemiennego – wykres wskazowy



Wykres wskazowy w stanie równowagi, AB - zasilanie, CD - wskaźnik zera

Mostek Maxwella do pomiaru indukcyjności

dodatkowy rezystor r :



$$L_x = L_w \frac{R_3}{R_4}$$

$$R_x = R_w \frac{R_3}{R_4}$$

Ten sam
ułamek

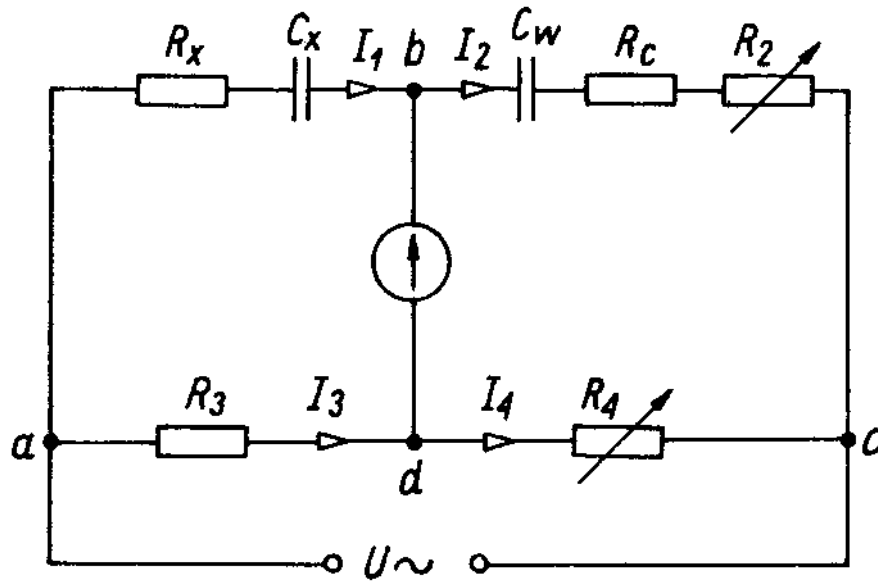
Należy więc spełnić dodatkowo warunek:

$$\frac{L_x}{R_x} = \frac{L_w}{R_w}$$

W tym celu stosuje się dodatkowy rezystor r :

$$\frac{L_x}{R_x + r} = \frac{L_w}{R_w}$$

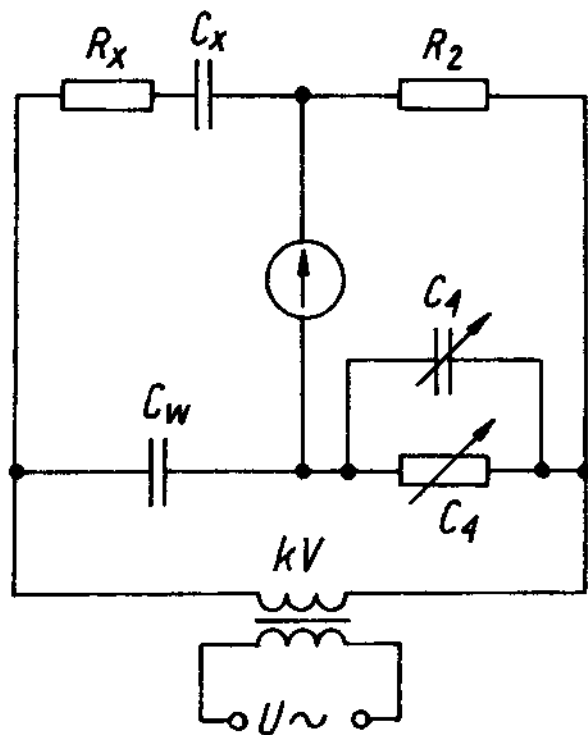
Mostek Wienera do pomiaru pojemności



$$C_x = C_w \frac{R_4}{R_3}$$

$$R_x = (R_C + R_2) \frac{R_3}{R_4}$$

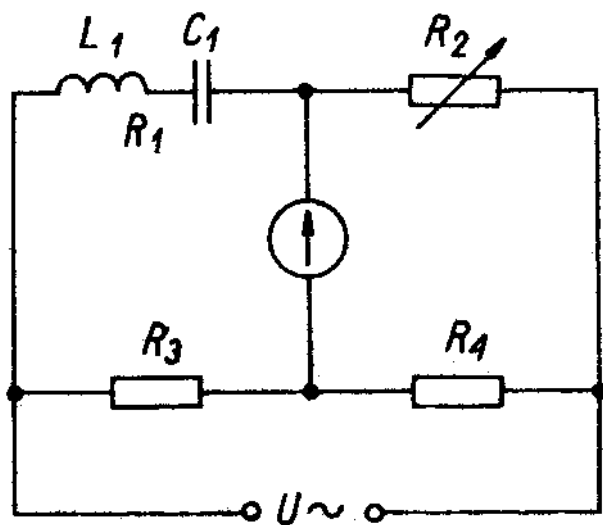
Wysokonapięciowy mostek Scheringa



$$C_x = C_w \frac{R_4}{R_2}$$

$$R_x = R_2 \frac{C_4}{C_w}$$

Mostek rezonansowy



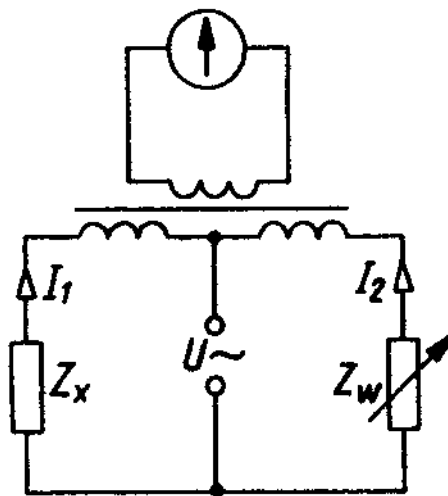
Warunki równowagi mostka:

$$R_1 = R_2 \frac{R_3}{R_4}$$

$$\omega^2 L_1 C_1 = 1$$

Możliwy jest pomiar jednego z parametrów: L , C lub ω

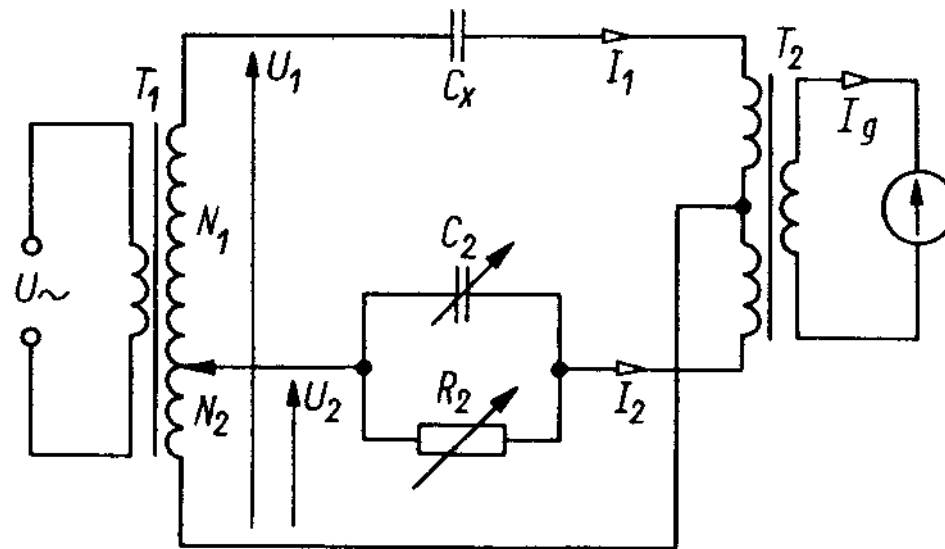
Mostek z transformatorem różnicowym



Warunek równowagi mostka:

$$\underline{Z}_x = \underline{Z}_w$$

Mostek z dwoma transformatorami



$$C_x = C_2 \frac{N_1}{N_2}$$

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{1}{\omega R_2 C_2}$$

