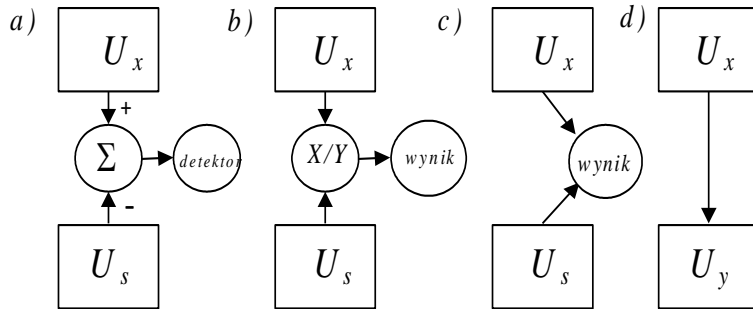
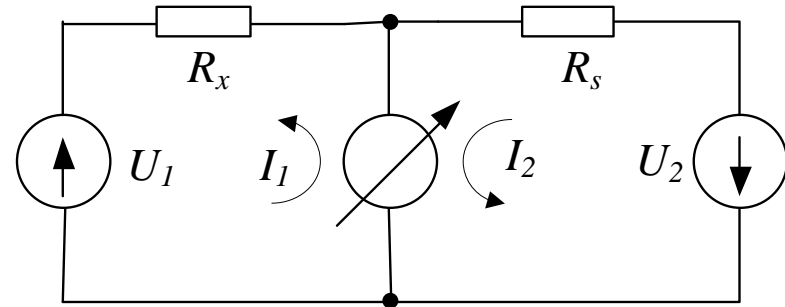


Metoda komparacyjna – pomiar rezystancji i impedancji



Rys. 1. Metoda komparacyjna (b) polega na określeniu stosunku między wielkością mierzoną U_x i wzorcową U_s .

Jest ona stosowana tam gdzie nie można użyć kompensacji a więc kiedy wielkość mierzona nie jest sygnałem (jest wielkością pasywną). Na przykład nie można skompensować (odjąć od siebie) dwóch rezystancji. Wtedy stosujemy metodą komparacji.



Rys.2 przedstawia przykład wykorzystania metody komparacyjnej do pomiaru rezystancji. Przy zastosowaniu kompensacji dwóch prądów.

Wskaźnik zera wykrywa równowagę prądi I_1 i I_2 a więc:

$$\frac{U_1}{R_x} = \frac{U_2}{R_s}$$

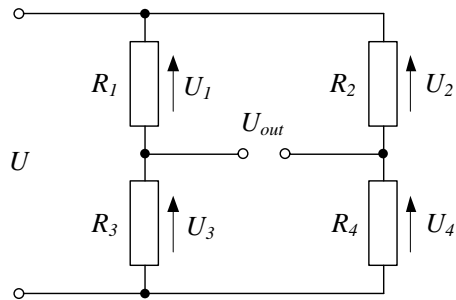
A więc

$$\frac{R_x}{R_s} = \frac{U_1}{U_2}$$

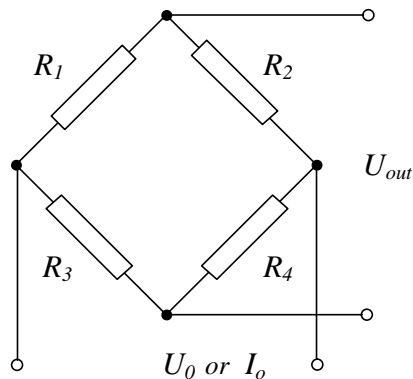
Mostek Wheatstonea

- Rys. 3. Przykładem wykorzystania metody komparacyjnej jest układ mostkowy stosowany kiedyś powszechnie do pomiaru rezystancji i impedancji

a)



B)



- Przedstawiony na rys. 3 układ mostkowy jest de facto połączeniem równoległym dwóch dzielników napięć, a więc.

$$U_3 = U \frac{R_3}{R_1 + R_3} \quad U_4 = U \frac{R_4}{R_2 + R_4}$$

- w stanie równowagi a więc gdy na wyjściu napięcie jest równe zero mamy $U_3 = U_4$ a więc :

$$R_3(R_2 + R_4) = R_4(R_1 + R_3)$$

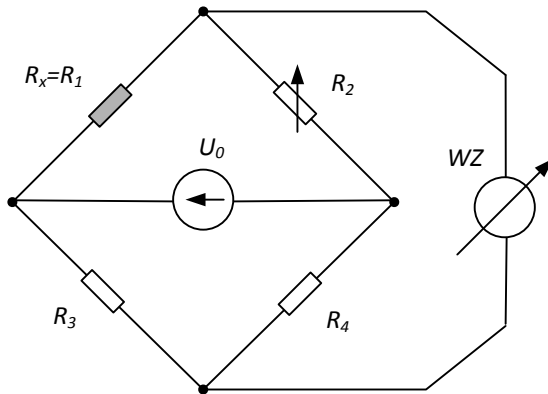
- Stąd otrzymujemy warunek równowagi układu mostkowego:

$$R_3 R_2 = R_1 R_4$$

- Mówimy że w stanie równowagi iloczyn rezystancji leżących naprzeciw siebie (rys. 3b) jest sobie równy.

Pomiar rezystancji mostkiem zrównoważonym

•Rys.4. Mostek Wheatstonea (mostek z czterema opornikami) w zastosowaniu do pomiaru rezystancji.



W stanie równowagi a więc gdy wskaźnik zera WZ wskaże zero obowiązuje warunek

$$R_x R_4 = R_2 R_3$$

•A więc:

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

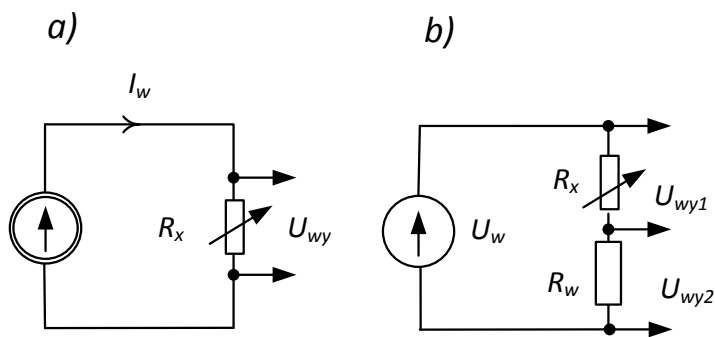
•Jeśli R_3/R_4 ma wartość 1 to po doprowadzeniu układu do równowagi przez zmianę R_2 wartość R_2 będzie miarą mierzonej wielkości R_x .

Zazwyczaj $R_3/R_4 = 0.01; 0.1; 1; 10$ itd. A więc zmieniając R_3/R_4 zmieniamy zakres pomiaru.

•Przedstawiona metoda pomiar (tzw mostek zrównoważony) była kiedyś podstawową metodą dokładnego pomiaru rezystancji. Dziś zastąpiła ją metoda techniczna.

Metoda techniczna pomiaru rezystancji

•Rys. 5. Pomiar rezystancji metodą techniczną



•Jeśli przez mierzona rezystancję przepuścimy prąd wzorcowy I_w to w sposób oczywisty zgodnie z prawem Ohma mierzone napięcie U_{wy} będzie równe:

$$U_{wy} = I_w R_x$$

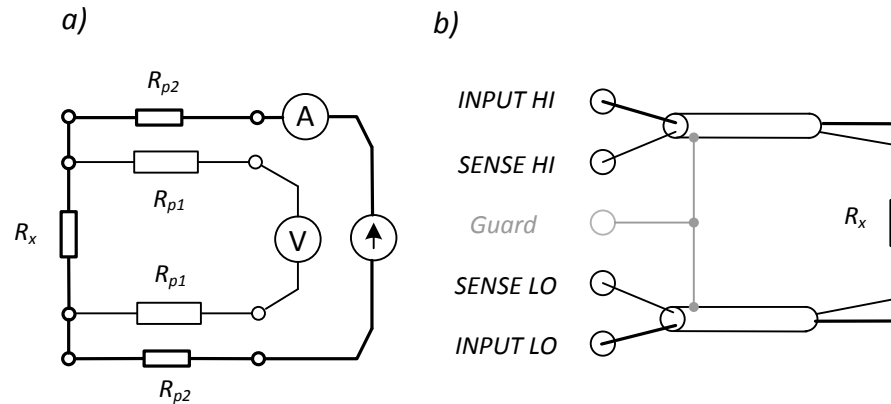
A więc jeśli znamy wartość I_w to mierząc spadek napięcia na rezystorze mierzymy od razu R_x . Powstaje pytanie : jeśli tak prosto można zmierzyć R_x to po co stosowano do tego celu mostek Wheatstonea?

Otóż w mostku Wheatstonea wynik nie zależy od napięcia zasilającego podczas gdy w metodzie technicznej zależy od dokładności prądu wzorcowego I_w . Dziś umiemy zrealizować takie dokładne źródło prądowe, kiedy nie było takiej możliwości.

W układzie z rysunku 5b uniezależniamy się też od wartości prądu wzorcowego. Mierząc dwa spadki napięć (na oporniku mierzonym i wzorcowym) mamy

$$\frac{U_{wy1}}{U_{wy2}} = \frac{I_w R_x}{I_w R_w} = \frac{R_x}{R_w}$$

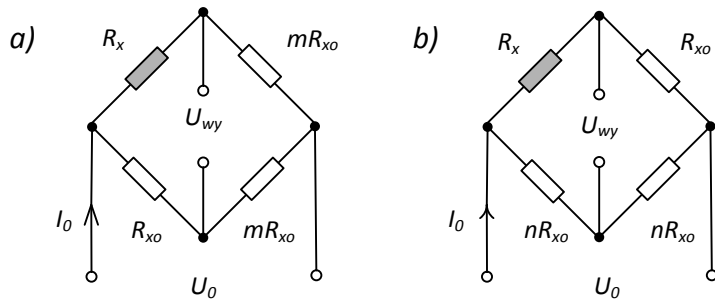
Pomiar rezystancji czteroprzewodowo



- Gdy dołączamy mierzona rezystancję do miernika w sposób oczywisty do rezystancji mierzonej dodaje się rezystancja przewodów łączących rzędu kilkadziesiąt $m\Omega$. Jeśli mierzona rezystancja jest dostatecznie duża to wpływ rezystancji przewodów łączących jest pomijalnie mały. Stosujemy wtedy zwykłą [połączenie dwuprzewodowe – opcja 2w.
- Jeśli mierzona rezystancja jest mała, poniżej 1Ω to należy stosować połączenie czteroprzewodowe jak na rysunku powyżej. Wówczas rezystancje R_{p2} nie wpływają na wyniki (są poza układem pomiarowym). Także rezystancje R_{p1} nie wpływają na wynik dzięki bardzo dużej rezystancji woltomierza (pomiar praktycznie bez poboru prądu)

Zasada działania mostka niezrównoważonego

- Rys.7. Mostek niezrównoważony



O ile mostek zrównoważony do pomiaru rezystancji przeszedł do historii o tyle mostek niezrównoważony (rys. 7) jest wciąż powszechnie stosowany ale w zupełnie innym celu. Jeśli mostek wstępnie zrównoważymy to po zmianie rezystancji R_x napięcie wyjściowe będzie równe:

$$U_{wy} = S U_o \frac{\Delta R_x}{R_x}$$

- Gdzie S jest współczynnikiem czułości, U_o jest napięciem zasilającym.
- Napięcie wyjściowe układu mostkowego jest więc miarą względnej zmiany rezystancji R_x . A więc jest to podstawowe zastosowanie tego mostka jako przetwornika zmiany rezystancji czujnika $\Delta R_x/R_x$ na napięcie .
- W technice istnieje bardzo dużo tzw czujników parametrycznych, a więc gdy mierzona wielkość wpływa na parametr, np. rezystancję. Rezystancja nie jest sygnałem –nie możemy jej przesłać. Najpierw musimy ją zamienić na napięcie. I do tego celu stosowany jest układ mostka niezrównoważonego.
- Powstaje pytanie czy nie można i tu stosować metody technicznej. W metodzie technicznej mierzymy $R_x + \Delta R_x$ a więc do dużego spadku napięcia na czujniku dodaje się niewielki sygnał zmiany rezystancji. W metodzie mostkowej ta składowa stała jest eliminowana w procesie wstępnego zrównoważenia i mierzymy tylko sygnał proporcjonalny do $\Delta R_x/R_x$

Nieliniowość mostka niezrównoważonego

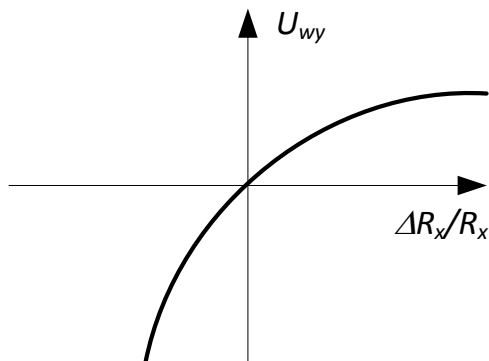
•Równanie:



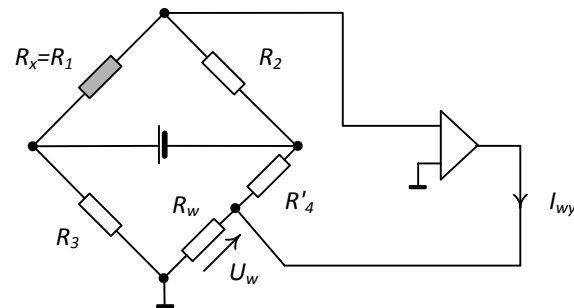
•Jest równaniem przybliżonym – bardziej prawe jest równanie

$$U_{wy} = SU_o \frac{\Delta R_x / R_x}{1 + \Delta R_x / R_x}$$

A więc układ mostka niezrównoważonego jest nieliniowy co widać na poniższym rysunku



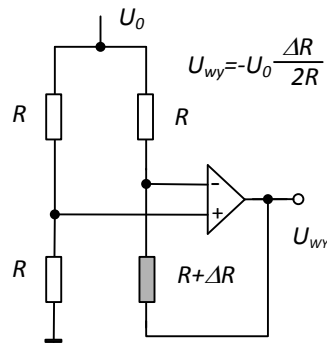
•Najlepszą metodą linearyzacji mostka jest zastosowanie ujemnego sprzężenia zwrotnego, jak w schemacie poniżej:



Układ ten jest automatycznie równoważącym się przetwornikiem zmiany rezystancji na prąd. Zmiana rezystancji czujnika R_1 powoduje pojawienie się na wejściu wzmacniacza napięcia nierównowagi. To napięcie po wzmocnieniu powoduje przepływ prądu przez opornik R_w ten dodatkowy spadek napięcia równoważy mostek. Mostek ten jest więc praktycznie stale w pobliżu równowagi a więc jest praktycznie liniowy.

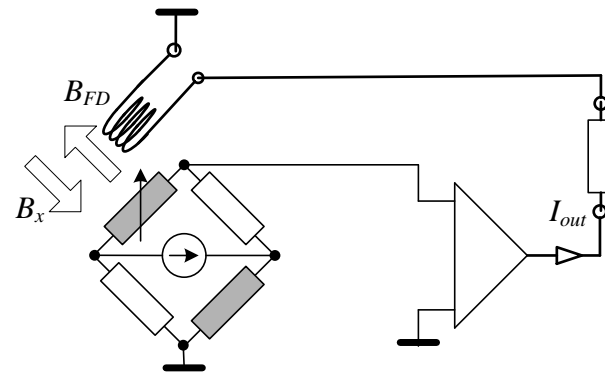
Inne układy mostkowe ze sprzężeniem zwrotnym

- Układ mostkowy ze sprzężeniem zwrotnym jest niekiedy przedstawiany w nieco innej postaci.



Ale po porównaniu widać że są to te same

Na rys. 11 przedstawiono inny układ ze sprzężeniem zwrotnym. Do pomiaru pola magnetycznego wykorzystuje się tutaj czujnik zwany magnetorezystorem – czujnik w którym rezystancja zależy od pola magnetycznego.

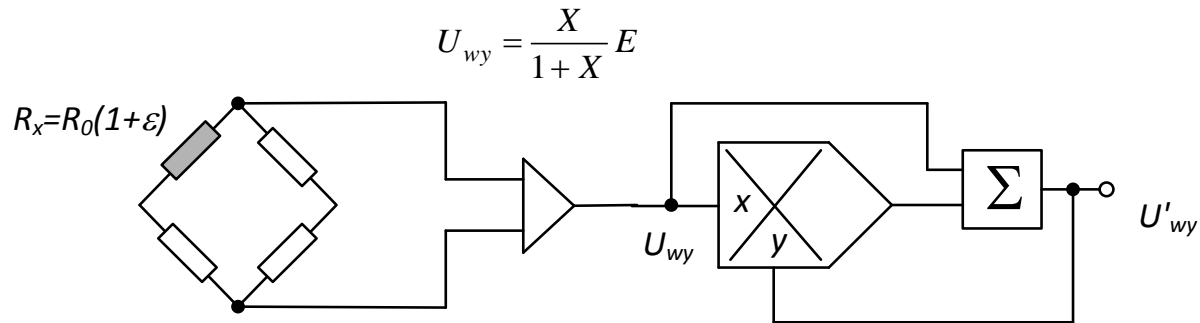


Rys. 11. Przetwornik pola magnetycznego na prąd

Zmiana pola magnetycznego powoduje pojawienie się na wejściu wzmacniacza napięcia nierównowagi.: To napięcie po wzmocnieniu powoduje przepływ prądu przez dodatkową cewkę na czujniku wytwarzającą przeciwnie skierowane pole magnetyczne B_{FD} . A więc zarówno mostek jest stale w stanie równowagi jak i czujnik jest stale w polu równym zero. Dzięki sprzężeniu zwrotnemu uzyskujemy liniowy przetwornik mimo że zarówno mostek jak i czujnik są nieliniowe

Linearyzacja mostka przy wykorzystaniu mnożnika.

- Układ mostkowy jest nieliniowy bo przetwarza zmianę rezystancji $X = \Delta R_x / R_x$ następująco:



W powyższym układzie na wyjście układu włączono mnożnik. W rezultacie sygnał wyjściowy opisuje równanie:

$$U'_{wy} = U_{wy} + \frac{U_{wy} U'_{wy}}{K_u} = \frac{U_{wy}}{1 - U_{wy}} = \frac{\frac{X}{1+X}}{1 - \frac{X}{1+X}} U_o = XU_o$$

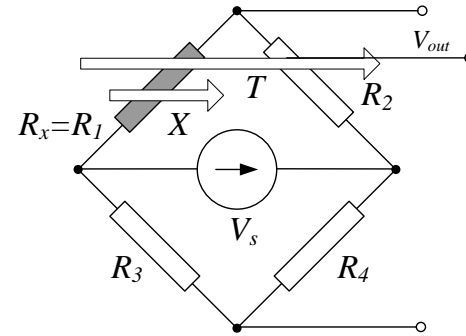
Praca różnicowa układu mostkowego

•Praca różnicowa jest jedną z największych zalet układu mostka nie zrównoważonego. Napięcie nierównowagi zależy od zmian rezystancji ramion następująco:

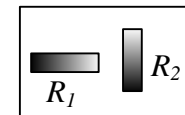
$$U_{wy} = \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) U_o$$

•A więc wpływy zmian rezystancji w sąsiednich ramionach odejmują się (znoszą się). Ta właściwość umożliwia eliminację zakłóceń, a przede wszystkim eliminację bardzo uciążliwego błędu jakim jest pełzanie zera, przede wszystkim temperaturowe pełzanie zera.

•W układzie jak na rysunku obok na czujnik R_x (czujnik aktywny) działa sygnał X ale równocześnie działa też temperatura T . Jeśli teraz w sąsiednie ramię mostka wstawimy taki sam czujnik ale na który nie działa sygnał X (czujnik pasywny) ale jest w tej samej temperaturze. Dzięki pracy różnicowej wpływ temperatury zostanie wyeliminowany.

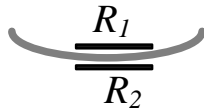


•Wyobraźmy sobie że tym czujnikiem jest tensometr – czujnik odkształcenia lub naprężenia. Jeśli jeden z czujników jest umieszczony zgodnie z kierunkiem siły (czujnik aktywny na który działa siła i temperatura) a drugi prostopadle do siły (czujnik pasywny na który działa tylko temperatura to wyeliminujemy w ten sposób wpływ temperatury.

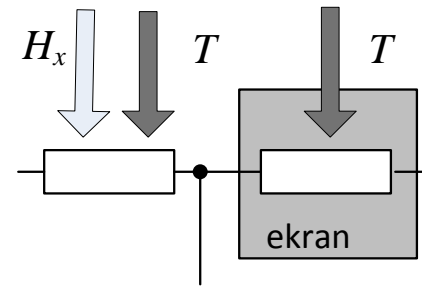


Inne przykłady pracy różnicowej

•W przykładzie na poprzednim slajdzie zastosowano dwa czujniki – pasywny i aktywny. Podobny efekt można uzyskać stosując dwa czujniki ale różnicowe.

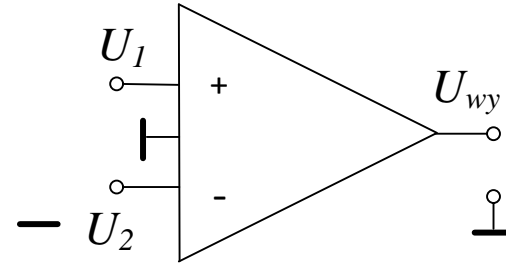
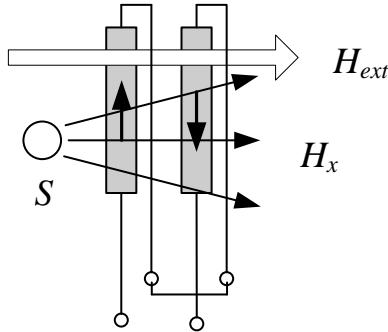


•Wyobraźmy sobie że mierzymy odkształcenie mostu. Jeśli umieścimy jeden czujnik na górze a drugi na dole to jeden będzie się kurczył a drugi rozszerzał a więc jeden będzie miał sygnał $-\Delta R_x/R_x$ a drugi $+\Delta R_x/R_x$. Czujniki będą różnicowe i jeśli umieścimy je w sąsiednich gałęziach mostka to ich wpływ się doda. Z kolei wpływ temperatury się odejmie. Uzyskujemy eliminację wpływu temperatury i równocześnie podwojenie sygnału wyjściowego.



•W układzie jak wyżej mamy czujnik typu magnetorezystor na który działa pole magnetyczne H_x ale i temperatura T (czujnik aktywny). W sąsiednie ramię mostka włączmy drugi czujnik na który też działa temperatura ale nie działa pole magnetyczne bo jest ekranowany (czujnik pasywny). W ten sposób można wyeliminować wpływ temperatury na pracę czujnika.

Praca różnicowa - cd



•Powyższy przykład przedstawia pracę układu zwanego gradiometrem. Chcemy zmierzyć bardzo małe pole magnetyczne H_x np. pole aktywności mózgu rzędu nT. Ale obiekt znajduje się w zewnętrznym polu magnetycznym ziemskim o wartości około 50uT. Jeśli włączymy dwa czujniki różnicowo to wpływ pola magnetycznego ziemskiego się zniesie. Z kolei pole od mózgu jest nieco większe dla czujnika który znajduje się bliżej obiektu. A więc układ jest w stanie wykryć bardzo małą różnicę pola magnetycznego w obecności dużego pola zakłócającego pomiar.

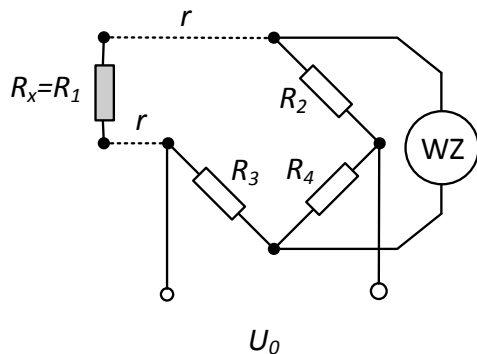
•Warto zwrócić uwagę że każdy wzmacniacz operacyjny realizuje pracę różnicową [ponieważ:

$$U_{wy} = K_u (U_1 - U_2)$$

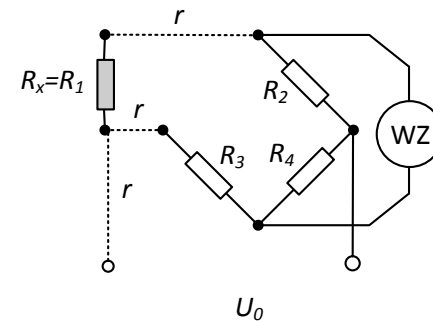
•Dzięki czemu mamy eliminację wpływu zakłóceń zewnętrznych działających na oba wejścia. Ten ważny parametr nosi nazwę CMR – common mode rejection.

Trójprzewodowe podłączenie czujnika do mostka

•Jeśli podłączymy czujnik do układu mostkowego jak poniżej to w sposób oczywisty rezystancje przewodów łączących r dodają się do rezystancji czujnika. Może to powodować znaczny błąd spowodowany zmianą rezystancji przewodów z temperaturą.



•Możemy jednak tego uniknąć wykorzystując różnicowe właściwości mostka w tzw. Połączeniu trójprzewodowym jak na rysunku obok



•W układzie trójprzewodowym warunek równowagi ma postać

$$(R_x + r)R_4 = R_2(R_3 + r)$$

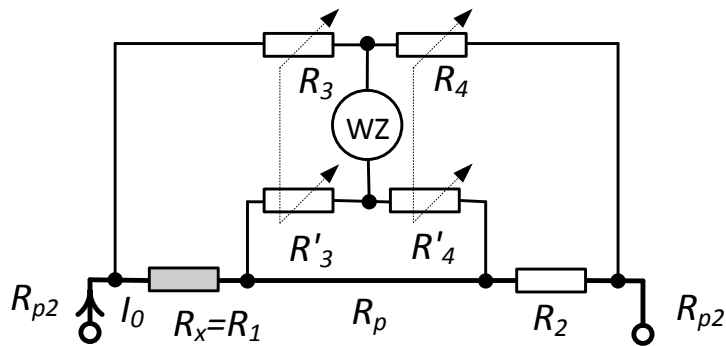
•A więc

$$R_x R_4 = R_2 R_3 + r(R_2 - R_4)$$

•Jeśli $R_2 = R_4$ wpływ przewodów doprowadzających jest wyeliminowany.

Mostek Thomsona

• O ile mostek Wheatstonea w zastosowaniu do pomiaru rezystancji nie jest już w zasadzie stosowany to jego modyfikacja zwana mostkiem Thomsona jest nie do zastąpienia w przypadku pomiaru bardzo małych rezystancji.



• W powyższym układzie dzięki połączeniu czteroprzewodowemu rezystancje R_{p2} nie wpływają na wynik bo są poza układem mostka. Pozostaje jednak rezystancja R_p .

• Dla układu mostka Thomsona warunek równowagi ma postać:

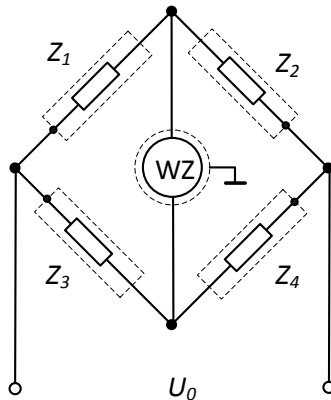
$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4} + R_p \frac{R_3 R'_4 - R'_3 R_4}{R_4 (R'_3 + R'_4 + R_p)}$$

• Jeśli więc mostek R_3, R_4, R'_3 i R'_4 będzie w równowadze (licznik drugiego składnika równy zero) to wpływ oporu R_p będzie wyeliminowany. Osiąga się to sprzęgając mechanicznie oporniki R_2, R_3, R'_3 oraz R_4, R'_4 .

• W mostku w stanie równowagi znika drugi składnik powyższego równania.

Mostki prądu przemiennego

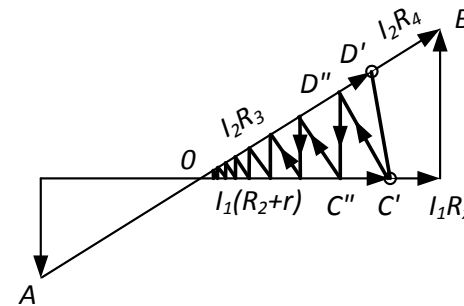
- Zamiast rezystancji jak w mostku Wheatstonea można łączyć też impedancje.



- Warunek równowagi jest wtedy bardziej skomplikowany

$$\begin{cases} |Z_1||Z_4| = |Z_2||Z_3| \\ \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \end{cases}$$

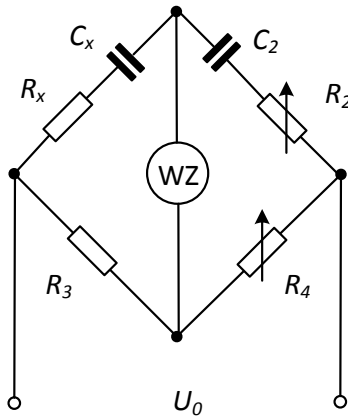
- Oznacza to że stan równowagi osiąga się zmieniając dwa elementy. W rezultacie równoważenie jest dość żmudne bo wymaga wielu operacji jak to widać poniżej



- Dodatkowo elementy muszą być ekranowane lub musi być stosowany dodatkowy układ zwany gałęzią Wagnera do zmniejszenia wpływu pojemności doziemnych.
- Dlatego dzisiaj mostki prądu przemiennego nie są tak popularne jak dawniej i szuka się innych metod pomiaru impedancji.

Mostek Wien i mostek Maxwella

•Mostek Wien może być stosowany do pomiaru pojemności

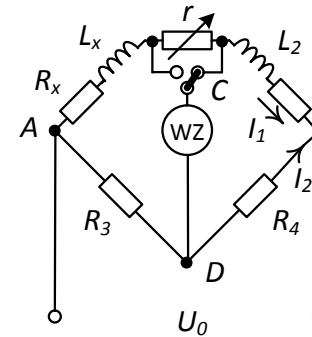


•Dla mostka tego obowiązują następujące warunki równowagi

$$C_x = C_2 \frac{R_4}{R_3}$$

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

•Mostek Maxwella może być stosowany do pomiaru indukcyjności



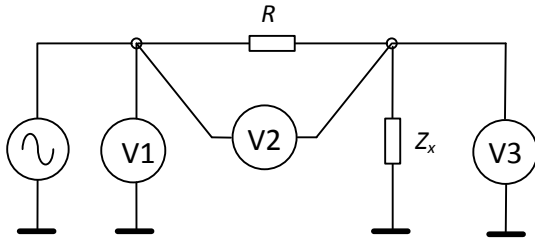
Dla mostka tego obowiązują następujące warunki równowagi

$$L_x = L_2 \frac{R_3}{R_4}$$

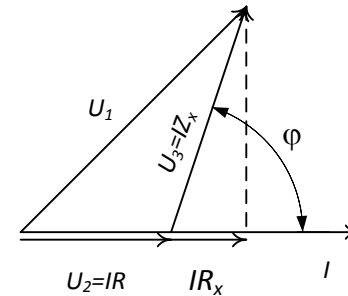
$$R_x = (R_2 + r) \frac{R_3}{R_4}$$

Metoda trzech woltomierzy

•Jako alternatywą dla mostków prądu przemiennego możemy rozważyć metodę trzech woltomierzy jak na rysunku poniżej



•Mierzmy napięcie zasilania U_1 , napięcie na oporniku o znanej wartości U_2 i napięcie na badanej impedancji U_3 (oczywiście zamiast trzech woltomierzy możemy mierzyć trzy napięcia jednym woltomierzem)



•Zgodnie wykresem wektorowym jak wyżej możemy napisać:

$$\cos \varphi = \frac{U_1^2 - U_2^2 - U_3^2}{2U_2U_3}$$

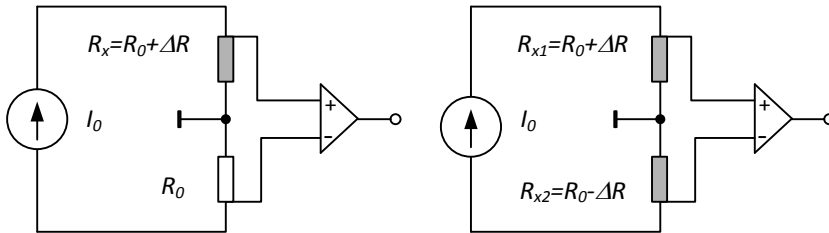
•A dalej:

$$Z_x = \frac{U_3}{I} = \frac{U_3}{U_2} R \quad R_x = Z_x \cos \varphi$$

$$X_x = \sqrt{Z_x^2 - R_x^2}$$

Pętla Andersona

•Jako alternatyw dla mostka niezrównoważonego można rozważyć układ Andersona który wykorzystuje pracę różnicową wzmacniacza operacyjnego:



- Układ ma wszystkie cechy mostka niezrównoważonego, a więc:
- przetwarza rezystancję na napięcie
- usuwa składową stałą
- realizuje pracę różnicową

•Dużą zaletą układu Andersona jest możliwość podłączenia wielu czujników w tzw pętli Andersona (Anderson loop):

