

**Cel ćwiczenia:** Zapoznanie się z mostkiem Wheatstone'a do pomiaru rezystancji oraz jego właściwościami w zastosowaniach: jako mostek zrównoważony i wychyłowy

### 1.1 Program ćwiczenia

#### 1.2 Mostek zrównoważony

1.2.1 Ocenic, jaki wpływ na dokładność pomiarów przeprowadzonych z wykorzystaniem mostka Wheatstone'a mają następujące czynniki:

- stosunek wartości rezystorów  $R_4/R_3$  stosowanych w układzie mostka,
- napięcie zasilania mostka,
- nieczułość wskaźnika zrównoważenia mostka,
- ziarno regulacji rezystancji wzorcowej.

W tym celu do makiety mostka dołączyć jako  $R_1$  dekadę rezystancyjną i zrównoważyć nią mostek kolejno dla  $R_2=100\Omega$  oraz  $R_2=1k\Omega$ , przy różnych wartościach stosunku  $R_4/R_3$  (1, 10, 0.1). Pomiary przeprowadzić dla dwóch różnych wartości napięcia zasilania (np.: 2,5 V i 5 V). W każdym przypadku określić najmniejszą możliwą do uzyskania zmianę wskazania wskaźnika zrównoważenia mostka  $\Delta U_{AC}$  (Metex) oraz stwierdzić, co ją ogranicza: nieczułość wskaźnika zrównoważenia mostka na zmianę rezystancji  $R_1$  czy ziarno regulacji rezystora  $R_1$ ?

1.2.2 Przeprowadzić pomiary rezystancji z wykorzystaniem mostka zrównoważonego, podłączając jako  $R_2$  zewnętrzną dekadę rezystancyjną i mierząc wskazane wartości rezystorów  $R_x=R_1$ . Wartość stosunku  $R_4/R_3$  oraz napięcia zasilania dobrać kierując się wnioskami z punktu 1.1. Określić niepewność pomiaru każdego z rezystorów.

#### 1.3 Mostek wychyłowy

1.3.1 Sprawdzić, jak zmienia się czułość mostka wychyłowego w pobliżu stanu równowagi. W tym celu nastawić  $R_2=R_3=R_4=1k\Omega$  i zrównoważyć mostek opornikiem dekadowym podłączonym jako  $R_1$ . Następnie dla stałego napięcia zasilania (np.: 5 V) zmierzyć napięcie wyjściowe mostka zmieniając rezystancję opornicy dekadowej  $R_x$  w zakresach:

- $0 \div 2R_1$ ,
- $0,9 \div 1,1R_1$ ,
- $0,99 \div 1,01R_1$ .

Na każdy zakres powinno przypadać co najmniej 10 wartości. Dla każdego zakresu sporządzić wykresy  $U_{wy} = f(R_x)$ .

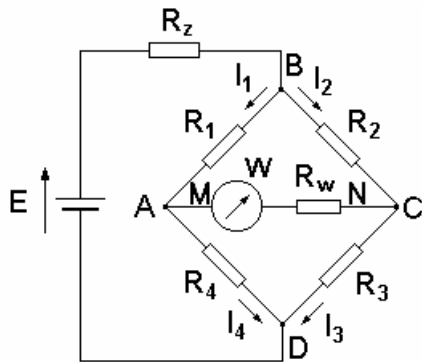
1.3.2 Zmienić rezystancje  $R_3$  i  $R_4$  na  $100\Omega$ . Powtórzyć pomiary jak dla punktu 1.2.1. Narysować wykresy  $U_{wy} = f(R_x)$  i porównać je z otrzymanymi w poprzednim punkcie. Wyciągnąć wnioski.

1.3.3 Na podstawie otrzymanych charakterystyk zmierzyć wartość nieznanej rezystancji. W tym celu w miejsce dekady rezystancyjnej podłączyć mierzony rezystor i zmierzyć wartość napięcia w przekątnej pomiarowej.

## 2 Wprowadzenie

Pomiary mostkowe są powszechnie stosowaną techniką pomiaru rezystancji, indukcyjności i pojemności, tj. parametrów charakteryzujących obwody elektryczne. Słowo „mostek” oznacza w tym przypadku fakt, iż w takich pomiarach dwa punkty obwodu są połączone („zmostkowane”) przez wskaźnik zrównoważenia (przyrząd mierzący prąd lub napięcie), który wykrywa występowanie między tymi punktami różnicy potencjałów, w szczególnym przypadku zerowej. Najczęstsze zastosowania układów mostkowych, krótko: mostków, to: porównywanie wzorców R, L, C (rezystancji, indukcyjności i pojemności), pomiary elementów RLC w procesach ich wytwarzania i selekcji oraz przetworniki pomiarowe wielkości nieelektrycznych na elektryczne. Najprostszą formą układów mostkowych są mostki rezystancyjne.

Podstawową zaletą pomiaru mostkowego jest możliwość określania nawet bardzo niewielkich zmian rezystancji występujących na tle znacznie większej stałej wartości rezystancji. Jest to szczególnie przydatne w przypadku niektórych przetworników wielkości nieelektrycznych na elektryczne (tensometry oporowe, termorezystory), gdzie mierzone zmiany rezystancji wynoszą często ułamki procentów jej całkowitej wartości.



Oznaczenia:

- E – źródło napięcia stałego zasilającego
- $R_z$  – rezystancja wewnętrzna źródła
- W – wskaźnik zrównoważenia mostka (mostek zrównoważony) lub miernik napięcia na wyjściu mostka (pomiar wychyłowy); galwanometr lub woltomierz
- $R_w$  – rezystancja wewnętrzna wskaźnika

Rys. 1 Schemat mostka Wheatstone'a

Najprostszą formą mostka rezystancyjnego jest czteroramienny mostek Wheatstone'a, zasilany ze źródła napięcia stałego (rys. 1). Mostek czteroramienny ma dwie przekątne: zasilającą BD, do której dołącza się źródło zasilania oraz pomiarową AC (wyjście mostka), do której dołącza się wskaźnik zrównoważenia W – galwanometr lub miernik elektroniczny. W mostku zrównoważonym (zerowym) wskaźnik W służy do wykrywania stanu zerowej różnicy potencjałów między punktami A i C mostka, natomiast w mostku niezrównoważonym (wychyłowym) służy do pomiaru napięcia lub prądu występującego między punktami A i C. Dla pomijalnie małej rezystancji źródła napięcia ( $R_z \approx 0$ ) oraz bardzo dużej rezystancji wewnętrznej wskaźnika zrównoważenia ( $R_w \rightarrow \infty$ ) napięcie wyjściowe mostka opisane jest równaniem:

$$U_{wy} = U_{AC} = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) \cdot E \quad (1)$$

Istotną cechą mostka pomiarowego jest jego czułość S. W ogólnym przypadku wyraża ona zmianę wartości sygnału na wyjściu mostka, odpowiadającą określonej zmianie wartości mierzonej. Może to być zmiana wartości napięcia na wyjściu wywołana zmianą mierzonej rezystancji  $R_x$ .

$$S = \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta R_x} \quad (2)$$

Typowym zastosowaniem mostka Wheatstone'a są pomiary rezystancji w zakresie od  $1\Omega$  do  $10\text{M}\Omega$ . Dolne ograniczenie wynika z wpływu rezystancji styków oraz przewodów łączeniowych, górne – z maksymalnej wartości produkowanych precyzyjnych rezystorów dekadowych.

### 2.1 Mostek zrównoważony

Pomiar w stanie równowagi mostka ma miejsce wtedy, kiedy napięcie na jego wyjściu przyjmuje wartość zerową. Zgodnie z równaniem (1) warunek ten jest spełniony, jeśli:

$$\frac{R_1}{R_1 + R_4} = \frac{R_2}{R_2 + R_3} \quad (3)$$

$$\text{stąd } R_1 = R_2 \frac{R_4}{R_3} \quad (4)$$

Jeżeli  $R_1$  jest rezystancją mierzoną, wtedy  $R_2$  jest regulowanym wzorcem rezystancji, a  $R_3$  i  $R_4$  ustalają stosunek. Mostek można równoważyć zmieniając wartość rezystancji wzorca  $R_2$  (jest to wykorzystane podczas wykonywania ćwiczenia) lub/ oraz zmieniając stosunek  $R_4/R_3$ . Mostek można równoważyć ręcznie lub automatycznie. Z zależności (1) wynika, że jeżeli mostek zbudowany jest wyłącznie z elementów liniowych, napięcie zasilania nie ma wpływu na stan jego równowagi. Warunek równowagi nie zależy także od czułości mostka, rezystancji wewnętrznej źródła ani rezystancji wejściowej wskaźnika niezrównoważenia.

W stanie zbliżonym do stanu równowagi, dla idealnego źródła napięcia i idealnego woltomierza, wyrażenie opisujące czułość mostka ma postać:

$$S = \frac{E \cdot \frac{\Delta R_x}{R_1}}{2 + \frac{R_4}{R_1} + \frac{R_1}{R_4}} = \frac{E \cdot \frac{\Delta R_x}{R_1}}{2 + \frac{R_4}{R_1} + \frac{R_2}{R_3}} \quad (5)$$

gdzie  $\Delta R_x$  jest różnicą pomiędzy rezystancją  $R_x$  w gałęzi AB a rezystancją w stanie równowagi mostka  $R_1$ . Wyrażenie (5) ma maksimum dla  $R_4/R_1=1$ , tzn. gdy wszystkie ramiona mają jednakowe rezystancje, co oznacza że mostek o jednakowych ramionach jest najbardziej czuły na zmiany rezystancji, a co za tym idzie, umożliwia najdokładniejszy jej pomiar. Czułość rośnie także ze zwiększeniem napięcia zasilania układu. Maksymalne napięcie zasilające mostek ograniczone jest przez dopuszczalną wartość prądu pomiarowego płynącego przez badany rezystor (dopuszczalną moc wydzielaną w nim).

Dokładność pomiaru rezystancji mostkiem zrównoważonym zależy od następujących czynników:

- dokładności wykonania wzorców rezystancji  $R_2$ ,  $R_3$  i  $R_4$ ,
- błędu nieczułości mostka  $\Delta_n$ , definiowanego jako najmniejsza zauważalna zmiana regulowanego wzorca rezystancji możliwa do wykrycia za pomocą stosowanego wskaźnika zrównoważenia,
- błędu ziarnistości  $\Delta_z$ , wynikającego z najmniejszej możliwej do uzyskania zmiany nastawy dekadowego rezystora wzorcowego.

Błędy względne opisanych wielkości sumują się.

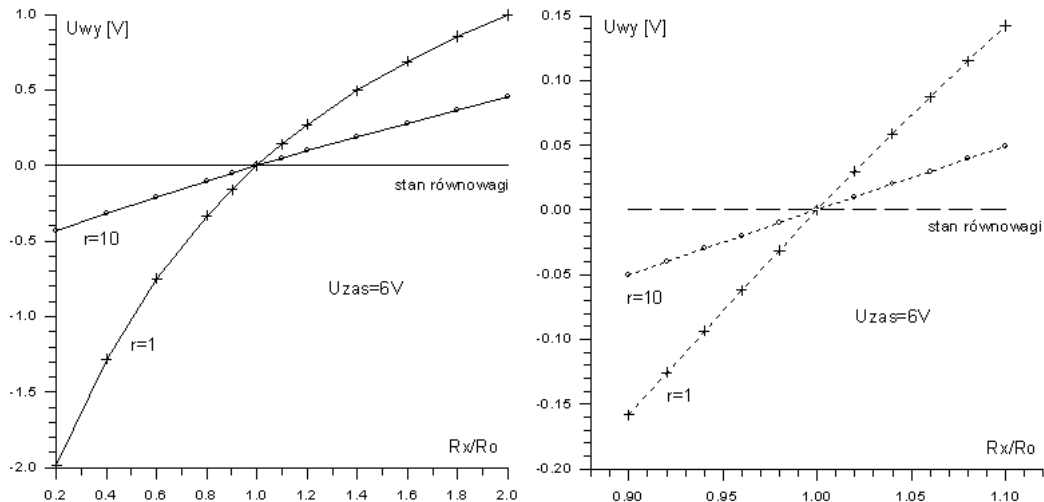
$$|\Delta R_x| = \left| \frac{dR_x}{dR_2} \Delta R_2 \right| + \left| \frac{dR_x}{dR_3} \Delta R_3 \right| + \left| \frac{dR_x}{dR_4} \Delta R_4 \right| + |\Delta_n| + |\Delta_z| \quad (6)$$

Do zalet mostka zrównoważonego należy niezależność wyniku pomiaru od napięcia zasilania, wartości rezystancji źródła zasilania i rezystancji wskaźnika zera oraz prostota obliczeń. Ze względu na konieczność każdorazowego równoważenia mostka, metoda ta nawet podczas stosowania automatycznego równoważenia jest stosunkowo wolna, nie nadaje się więc do pomiarów w czasie rzeczywistym szybko zmieniających się wielkości. Problemy mogą wystąpić także podczas pomiarów bardzo małych zmian rezystancji, kiedy wymagane jest zastosowanie bardzo dokładnego wzorca, wnoszącego niewielki błąd ziarnistości.

## 2.2 Mostek niezrównoważony

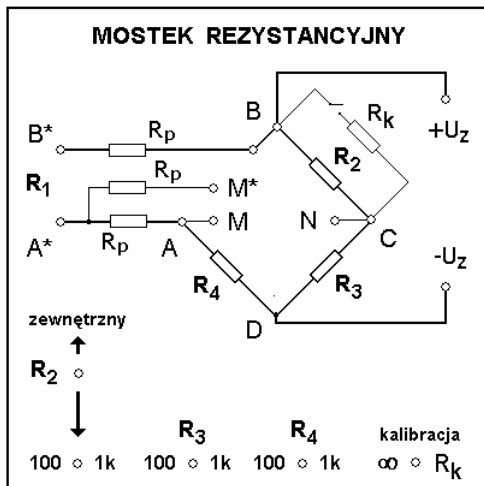
W przypadkach gdy trzeba mierzyć małe i szybko zachodzące zmiany rezystancji, mostek bywa często stosowany jako układ wychyłowy (niezrównoważony). Pomiar polega wtedy na pomiarze napięcia lub prądu na wyjściu mostka i wyznaczeniu na tej podstawie mierzonej rezystancji. Obliczenia są w tym przypadku bardziej skomplikowane niż dla stanu równowagi. W pomiarach wykonywanych automatycznie i sterowanych komputerowo nie ma to jednak istotnego znaczenia. Rezygnacja z każdorazowego równoważenia mostka umożliwia przyspieszenie pomiarów oraz uniezależnienie wyniku od błędu ziarnistości. Uzyskany w postaci napięcia wynik pomiaru jest łatwy do dalszego przetwarzania. Dokładność pomiaru mostkiem wychyłowym zależy od dokładności stosowanych rezystorów wzorcowych oraz dokładności woltomierza mierzącego napięcie wyjściowe, wpływają na nią ponadto zmiany napięcia zasilającego, rezystancja wewnętrzna źródła oraz rezystancja wejściowa woltomierza.

Czułość mostka wychyłowego zmienia się wraz z jego niezrównoważeniem. Z największą czułością mamy do czynienia, kiedy mostek znajduje się w stanie bliskim równowagi (rys. 2). Napięcie na wyjściu zależy wtedy prawie liniowo od wartości niezrównoważenia, przy czym współczynnik kierunkowy prostej (czułość) jest największy, kiedy rezystory wzorcowe są identyczne (patrz podpunkt 2.1). Pomiar w pobliżu stanu równowagi jest więc najkorzystniejszy. Napięcie wyjściowe zależy od napięcia zasilającego – jest do niego wprost proporcjonalne.



Rys. 2 Przykładowe zależności napięcia wyjściowego mostka wychyłowego od stosunku rezystancji: zmierzonej  $R_x$  i w stanie równowagi  $R_0$ .

3 Opis stosowanej makiety



Rys. 3 Makieta mostka Wheatstone'a do pomiaru rezystancji

Uwagi do makiety mostka i jej stosowania:

- $R_1$  – rezystor zewnętrzny dołączany do gniazdek A i B (bezpośrednio do mostka) lub  $A^*$  i  $B^*$  (za pośrednictwem rezystancji  $R_p$ ).
- $R_p$  – rezystancje przewodów łączących rezystor  $R_1$  z mostkiem oraz przewodu kompensacyjnego.
- $R_2$  – do wyboru:
  - rezystor wewnętrzny, 100  $\Omega$  lub 1 k $\Omega$ , wybierany przełącznikiem,
  - dołączany zewnętrznie, do gniazdek B i C rezystor dekadowy.
- Rezystory  $R_3$  i  $R_4$  – wbudowane, wartości 100 $\Omega$  lub 1 k $\Omega$ , wybierane przełącznikami.
- $R_k$  – wewnętrzny rezystor kalibracyjny.
- Wskaźnik zrównoważenia (multimetr Metex) dołączyć do gniazdek M i N, rezystor  $R_1$  – do gniazdek A i B.
- Napięcie zasilania mostka nie może przekraczać 6 V.

4 Przykładowe tabele pomiarowe

4.1 Pomiary – mostek zrównoważony

l.p.	$R_2$	$R_4/R_3$	$R_1$	E	$\Delta U_{AC}$	Czynnik ograniczający
	$\Omega$	-	$\Omega$	V	mV	
1						
2						

4.2 Pomiary – wyznaczenie charakterystyki dla mostka wychyłowego, dla określonych wartości rezystancji  $R_2$ ,  $R_3$  i  $R_4$  oraz stałego napięcia zasilającego E.

l.p.	$R_x/R_1$	$R_x$	$U_{AC}$
		$\Omega$	mV
1			
2			

5 Zestaw przyrządów pomiarowych

Makieta „mostek Wheatstone’a”, opornik dekadowy, METEX

Opracowali: prof. Zbigniew Moroń, mgr inż. Nina Tewel

Instytut Inżynierii Biomedycznej i Pomiarowej Wydziału PPT Politechniki Wrocławskiej