



Politechnika Wroclawska

Laboratorium Metrologii Elektronicznej

Ćwiczenie nr 3

Pomiary rezystancji i impedancji

I. Zagadnienia do przygotowania na kartkówkę:

1. Rezystancja, rezystywność – podaj definicje oraz jednostki, w jakich wyrażamy te wielkości.
2. Konduktancja, konduktywność – podaj definicje oraz jednostki, w jakich wyrażamy te wielkości.
3. Podaj trzy zależności na obliczenie mocy wydzielanej na rezystorze.
4. Narysuj układ poprawnego pomiaru prądu i poprawnego pomiaru napięcia. Wyjaśnij, na czym polega błąd systematyczny w obu tych układach. Zdefiniuj pojęcie rezystancji granicznej.
5. Wyjaśnij zasadę działania mostka Wheatstone'a. Podaj zależność na wyznaczenie mierzonej rezystancji.
6. Na czym polega czteropunktowy pomiar rezystancji? Do pomiaru jakich rezystancji służy ten układ? Wyjaśnij, dlaczego czteropunktowy pomiar rezystancji jest lepszy od pomiaru dwupunktowego.
7. Związek między reaktancją, rezystancją a impedancją
8. Metody pomiaru impedancji

II. Literatura:

1. A. Chwaleba, M. Poniński, A. Siedlecki, *Metrologia elektryczna*, WNT, Warszawa 1998.

W czasie wykonywania ćwiczeń przestrzegaj przepisów BHP!

Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów

1. Wstęp

1.1. Definicje

Rezystancja elementu jest miarą oporu, z jakim element ten przeciwstawia się przepływowi prądu elektrycznego. Z definicji rezystancja jest współczynnikiem proporcjonalności między natężeniem prądu płynącego przez element a różnicą potencjałów pomiędzy elektrodami. Zależność tę przedstawia **prawo Ohma**¹:

$$R = \frac{U}{I}.$$

Jednostką rezystancji jest **om** ($1 \Omega = 1 \text{ V} \cdot \text{A}^{-1}$). Elementy, których rezystancja jest stała w danych warunkach środowiskowych (np. wszystkie elementy metalowe i większość stosowanych izolatorów) nazywamy **liniowymi**, tzn. że zależność natężenia prądu od napięcia jest – zgodnie z prawem Ohma – funkcją liniową. Z kolei te elementy, których rezystancja jest zależna od przyłożonego napięcia, nazywamy **nieliniowymi** (np. półprzewodniki).

Konduktancja materiału jest miarą podatności elementu na przepływ prądu elektrycznego. Jest ona odwrotnością rezystancji:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}.$$

Jednostką konduktancji jest **simens** ($1 \Omega = 1 \text{ A} \cdot \text{V}^{-1}$).

Rezystywnością nazywamy rezystancję właściwą, a więc cechę charakterystyczną dla danego materiału, nie dla elementu, który z niego wykonano. Dla prostoliniowego przewodnika o długości l oraz przekroju S rezystancja jest równa:

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

gdzie ρ jest rezystywnością materiału, z którego wykonano ten przewodnik. Jednostką rezystywności jest **om razy metr** ($1 \Omega \cdot \text{m}$).

Definiujemy również **konduktywność (przewodność)** – konduktancję właściwą, która jest odwrotnością rezystywności:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}.$$

Jednostką konduktywności jest **simens na metr** (1 S/m).

Dla większości materiałów rezystywność (a więc także konduktywność) jest zależna od temperatury. W przypadku elementów wykonanych z metalu ich opór rośnie wraz ze wzrostem temperatury.

Opór elektryczny jest związany ze stratą energii w danym elemencie. W przypadku elementów o charakterze rezystancyjnym energia jest rozpraszana w postaci ciepła. Podczas pracy element zwiększa swoją temperaturę wraz ze wzrostem prądu i napięcia. **Moc**, jaka jest wydzielana przez dany element, określona jest zależnościami:

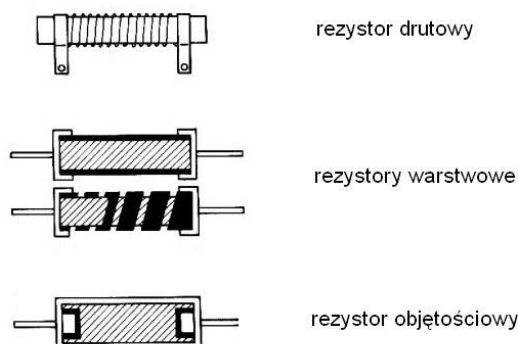
$$P = U \cdot I \text{ lub } P = \frac{U^2}{R} \text{ lub } P = I^2 \cdot R$$

Każdy element może pracować do pewnej maksymalnej temperatury, powyżej której zostanie zniszczony. Temperatura ta odpowiada **mocy maksymalnej**, podawanej przez producentów elementów elektronicznych.

¹ Georg Simon Ohm (1789–1854) – niemiecki matematyk, profesor uniwersytetów w Monachium i Norymberdze

1.2. Rezystor

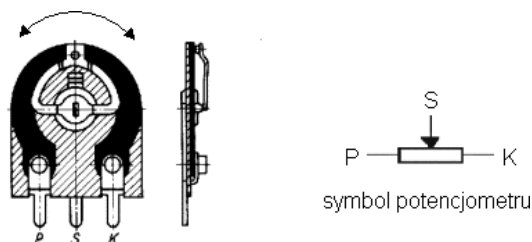
W układach elektronicznych elementem reprezentującym właściwie jedynie rezystancję jest **rezystor** (opornik). Rezystor jest elementem biernym (odbiornikiem), tzn. nie dostarcza do obwodu żadnej energii, a jedynie ją odbiera. Jest on elementem bezbiegunowym – podłączony w obu kierunkach działa tak samo. Składa się z korpusu, części oporowej i pokrycia zabezpieczającego część oporową przed uszkodzeniem:



W zależności od rodzaju materiału użytego na część oporową rozróżnia się rezystory:

- **warstwowe** (bardzo cienka warstwa z węgla lub metalu naniesiona na rurkę ceramiczną). Rezystory warstwowe węglowe lub rezystory z warstwą węglową składają się z rurki ceramicznej, na której jest naparowana warstwa węgla o danej wartości rezystancji. Aby uzyskać właściwą rezystancję, w warstwie tej można wykonać nacięcia spiralne aż do 10 zwojów przy pomocy ostrza diamentowego lub lasera. Rezystory warstwowe metalowe różnią się od węglowych tym, że warstwa węgla została zastąpiona warstwą metalu. Proces produkcji jest podobny. Rezystory warstwowe są najtańszą i najczęściej spotykaną grupą rezystorów.
- **drutowe** (drut ze stopów oporowych nawinięty na rurkę ceramiczną). Rezystory drutowe nawijane składają się z drutu o wysokiej rezystancji nawiniętego na korpus z ceramiki, szkła lub włókna szklanego. Izoluje się je plastikiem, silikonem, glazurą, albo są zamknięte w obudowie aluminiowej, aby łatwiej mogły przenosić ciepło do chłodzącego podłoża. Produkuje się je do zastosowań precyzyjnych, gdzie wymagana jest wysoka jakość i stabilność, oraz do zastosowań o dużej mocy, w których potrzebny jest gruby i wytrzymały drut.
- **objętościowe** (lity element oporowy, np. węgiel elektrochemiczny, przewodzący prąd całą swoją objętością).

Ze względu na możliwości regulacji dzieli się rezystory na: **stałe** (których rezystancja została ustalona w czasie produkcji i użytkownik nie może jej zmienić) oraz nastawne, tzw. **potencjometry**.



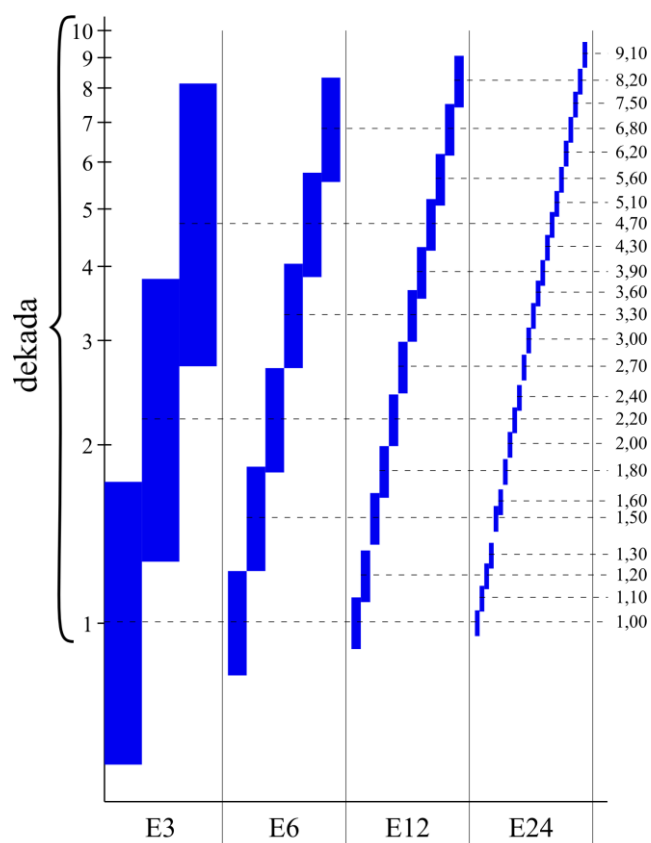
Potencjometr składa się z części izolacyjnej pokrytej masą oporową oraz szczotki przemieszczającej się po części oporowej. Potencjometr ma trzy końcówki: dwie zewnętrzne (p i k) oraz szczoteczkę (s). Parametry potencjometrów są analogiczne do parametrów rezystorów stałych. Obracając trzpieniem, do którego zamontowana jest szczoteczka, zmieniamy odległość pomiędzy tą szczoteczką a wyprowadzeniem początkowym. Rezystancja między końcówką początkową (p) i szczoteczką (s), w zależności od typu potencjometru, może zmieniać się liniowo lub logarytmicznie.

Najważniejszymi parametrami rezystorów są:

- **rezystancja znamionowa**, podawana z największymi dopuszczalnymi odchyłkami (tolerancjami) zawartymi w przedziale 0,1% – 20%. Najbardziej popularne rezystory mają tolerancję o wartości 5%;
- **moc znamionowa**, równa największej dopuszczalnej mocy możliwej do wydzielenia w rezystorze.

Rezystory oferowane są z wartościami ze ściśle określonych znormalizowanych szeregów wartości. Szeregi wartości oznaczane są literą E i liczbą wskazującą liczbę wartości na dekadę (np. E24 oznacza że na jeden rząd przypadają 24 wartości). Liczba wartości w szeregu odpowiada przy tym tolerancji wartości elementu: dla szeregu E3 jest to 50%, dla E6 – 20%, dla E12 – 10%, dla E24 – 5% itd. Wartości dobrane są tak, aby przy założonej tolerancji przedziały tolerancji nieznacznie zachodziły na siebie.












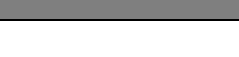
szereg E6 tolerancja: 20%	szereg E12 tolerancja: 10%	szereg E24 tolerancja: 5%
10	10	10
	12	11
15	15	12
	18	13
22	22	15
	27	16
33	33	18
	39	20
47	47	22
	56	24
68	68	27
	82	30
		33
		36
		39
		43
		47
		51
		56
		62
		68
		75
		82
		91



Na podstawie: Wikimedia Commons → File:Preferred_number-example_PL.svg

Wartość rezystancji jest oznakowana na każdym rezystorze bądź w postaci opisu cyfrowego, bądź też za pomocą kodu paskowego. W pierwszym przypadku stosuje się nadruk liczbowy, przy czym przecinek dziesiętny zastępuje się zwykle (dla skrócenia drukowanego symbolu) literą określającą współczynnik wagowy: kilo – *k*, mega – *M*. „Pojedyncze omy” oznacza się literą *R* lub brakiem symbolu. W myśl tej zasady rezystor **1 kΩ** będzie oznaczony jako **1k0**, rezystor **5,6 MΩ** – jako **5M6**, a rezystor **2,2 Ω** – jako **2R2**.

Najczęściej stosuje się jednak kolorowy kod paskowy naniesiony na rezystorze. Gdy rezystor oznaczony jest trzema paskami, odczytujemy dwa pierwsze paski jako dwie cyfry znaczące i pasek trzeci jako mnożnik (10^n). Tolerancja wykonania takiego rezystora wynosi zawsze 20%. W przypadku gdy rezystor oznaczony jest czterema paskami, odczytujemy je jako cyfra 1, cyfra 2, mnożnik, tolerancja. Gdy rezystor oznaczony jest pięcioma paskami, wartość jego odczytujemy według zasady: cyfra 1, cyfra 2, cyfra 3, mnożnik, tolerancja. Kolory pasków ustalone są w odpowiednich normach:

Kolor		cyfra lub wykładnik mnożnika	tolerancja
	srebrny	mnożnik: -2	10%
	złoty	mnożnik: -1	5%
	czarny	0	
	brązowy	1	1%
	czerwony	2	2%
	pomarańczowy	3	
	żółty	4	
	zielony	5	0,5%
	niebieski	6	0,25%
	fioletowy	7	0,1%
	szary	8	
	biały	9	

Na przykład:



$$10 \cdot 10^1 \Omega = 100 \Omega \pm 20\%$$



$$33 \cdot 10^5 \Omega = 3,3 \text{ M}\Omega \pm 5\%$$



$$487 \cdot 10^3 \Omega = 487 \Omega \pm 1\%$$

1.3. Metody pomiaru rezystancji

Rezystancję można zmierzyć za pomocą kilku różnych metod.

Najbardziej popularne z nich to:

- metody pośrednie
- metody zerowe (np. mostkowe)
- metoda bezpośrednia.

1.3.1. Metoda techniczna

Metody pośrednie pomiaru rezystancji polegają na zestawieniu przyrządów pomiarowych (woltomierza, amperomierza) i badanego obiektu w odpowiedni obwód pomiarowy i bezpośrednim wykorzystaniu prawa Ohma. Metoda taka bardzo często jest nazywana metodą techniczną. Zmierzona rezystancja jest równa ilorazowi napięcia wskazanego przez woltomierz przez natężenie wskazane przez amperomierz:

$$R = \frac{U_V}{I_A}$$

Niepewność takiego pomiaru wyznaczona z wykorzystaniem prawa propagacji niepewności jest równa:

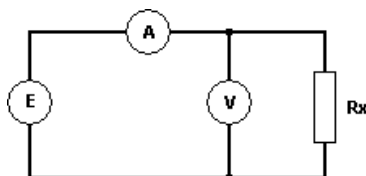
$$u(R_{zm}) = \sqrt{\left(\frac{1}{I_A} \cdot u(U_V)\right)^2 + \left(\frac{-U_V}{(I_A)^2} \cdot u(I_A)\right)^2},$$

gdzie $u(U_V)$ i $u(I_A)$ to niepewności pomiaru napięcia i prądu. Niepewność względna wynosi natomiast:

$$\delta R_{zm} = \pm(\delta U_V + \delta I_A).$$

Niestety, wykorzystywane urządzenia nie są idealne. Posiadają pewną określoną i skończoną rezystancję wewnętrzną, która po włączeniu urządzenia do układu wpływa na wynik pomiaru. Wartość wskazywana przez woltomierz nie jest spadkiem napięcia *tylko* na rezystorze albo wskazywane przez amperomierz natężenie prąd nie jest natężeniem prądu płynącego *jedynie* przez rezystor. Wynik pomiaru rezystancji jest więc obciążony błędem metody (błędem systematycznym).

Pomiar rezystancji metodą pośrednią można wykonać na dwa sposoby: mierząc poprawnie natężenie prądu lub mierząc poprawnie napięcie. **Układ poprawnego pomiaru napięcia** przedstawiony jest na poniższym rysunku:



Poprawny pomiar napięcia oznacza, że $U_v = U_{R_x}$. Natomiast amperomierz w tym wypadku pokazuje natężenie prądu równe sumie natężeń prądów płynących przez rezystor (I_{R_x}) oraz przez woltomierz (I_v). Poprawna wartość mierzonej rezystancji wyrażona jest więc wzorem:

$$R_x = \frac{U_v}{I_A - I_v}$$

Bezwzględny błąd systematyczny jest równy:

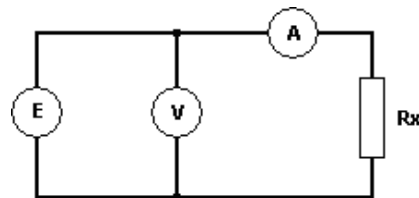
$$\Delta R_s = R_{zm} - R_x = \frac{R_x \cdot R_v}{R_x + R_v} - R_x = \frac{-(R_x)^2}{R_x + R_v},$$

a błąd względny:

$$\delta R_s = \frac{-R_x}{R_x + R_v} \cdot 100\%.$$

W przypadku pomiaru dużej rezystancji (rzędu megaomów) wynik uzyskany w układzie poprawnego pomiaru napięcia obarczony będzie dużym błędem, gdyż woltomierz zbocznikuje mierzoną rezystancję i zmieni prąd wskazywany przez amperomierz. W związku z tym układ poprawnego pomiaru napięcia jest właściwy do pomiaru małych rezystancji.

W **układzie poprawnego pomiaru natężenia prądu** napięcie wskazywane na woltomierzu to suma spadków napięć na elemencie mierzonym i na amperomierzu o niezerowej rezystancji ($I_A = I_{R_x}$).



Poprawna wartość mierzonej rezystancji jest równa

$$R_x = \frac{U_v - U_A}{I_A} = \frac{U_v}{I_A} - R_A,$$

a bezwzględny błąd systematyczny (metody):

$$\Delta R_s = R_{zm} - R_x = R_A.$$

Błąd względny metody wynosi więc:

$$\delta R_s = \frac{R_A}{R_x} \cdot 100\%$$

Należy zauważyć, że w przypadku pomiaru małej rezystancji (rzędu pojedynczych omów) wynik uzyskany w układzie poprawnego pomiaru natężenia prądu obarczony będzie dużym błędem, gdyż spadek napięcia na amperomierzu będzie miał istotny udział w napięciu mierzonym przez woltomierz. W związku z tym układ poprawnego pomiaru natężenia prądu jest właściwy do pomiaru dużych rezystancji.

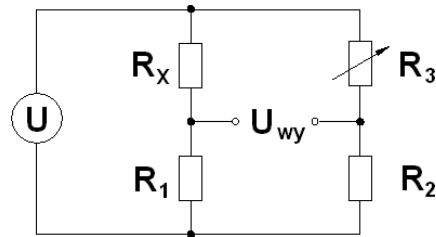
Wzory na błąd względny posłużyły do wyznaczenia tzw. **rezystancji granicznej**. Wyraża się ona wzorem:

$$R_{gr} = \sqrt{R_A \cdot R_v}.$$

Jeżeli spodziewana wartość rezystancji jest większa od rezystancji granicznej, to stosuje się układ poprawnie mierzonego natężenia prądu. Jeżeli jest mniejsza – układ poprawnie mierzonego napięcia. Warto zauważyć, że w pewnych szczególnych przypadkach błędy systematyczne można pominąć, jeżeli są dużo mniejsze niż niepewność pomiaru spowodowana klasą stosowanych przyrządów. W przypadku pomiaru obiema metodami rezystancji równej rezystancji granicznej otrzymamy identyczne wyniki.

1.3.2. Metody zerowe

Metody zerowe pomiaru rezystancji polegają na pomiarze bezprądowym. Mierzony element podłączamy do odpowiednio skonstruowanego układu odniesienia wyposażonego we wskaźnik przepływu prądu (mikroamperomierz, galwanometr lub podobny). Pomiar polega na doborze parametrów układu referencyjnego aż do uzyskania braku przepływu prądu przez wskaźnik. Proces ten nazywamy równoważeniem. Najczęściej spotykanymi metodami zerowymi pomiaru rezystancji są metody mostkowe. Najbardziej znany mostek do pomiaru rezystancji – mostek Wheatstone’a – pokazano na rysunku poniżej:



Zasada działania tego mostka opiera się na dwóch dzielnikach napięciowych. Pierwszy z dzielników składa się z mierzonego elementu (R_x) oraz znanego rezystora R_1 . Drugi z dzielników składa się z rezystora stałego R_2 oraz potencjometru R_3 .

Po dostarczeniu do układu napięcia U za pomocą rezystora zmiennego R_3 doprowadzamy do sytuacji, kiedy oba dzielniki napięciowe mają jednakowy współczynnik podziału, a w związku z tym – jednakowe napięcie wyjściowe. Wystąpienie takiej sytuacji (nazywanego stanem równowagi) obserwujemy za pomocą woltomierza, który wskaże brak napięcia pomiędzy wyjściami dzielników, lub też za pomocą amperomierza łączącego oba zaciski wyjściowe, który wskaże brak przepływu prądu pomiędzy dzielnikami (co wskazuje na brak różnicy potencjałów). W stanie równowagi:

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

skąd:

$$\frac{1}{\frac{R_x}{R_1} + 1} = \frac{1}{\frac{R_3}{R_2} + 1},$$

czyli ostatecznie warunek równowagi jest następujący:

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

Zatem rezystancja mierzonego elementu wynosi:

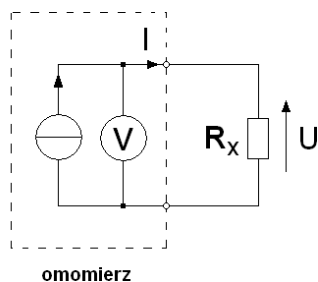
$$R_x = R_3 \cdot \frac{R_1}{R_2}.$$

Znając stosunek R_1 do R_2 , możemy odczytać R_x bezpośrednio z odpowiednio spreparowanej skali potencjometru R_3 .

Metoda mostkowa nie jest współcześnie używana bezpośrednio w przyrządach pomiarowych, jednakże spotyka się ją bardzo często w mikroelektronice w układach pomiarowych wykorzystujących czujniki rezystancyjne (np. temperatury lub ciśnienia).

1.3.3. Metoda bezpośrednia

We współczesnych omomierzach najczęściej wykorzystywana jest **metoda bezpośrednia** pomiaru rezystancji. Polega ona na odczycie rezystancji bezpośrednio ze wskazań przyrządu przeznaczanego do jej mierzenia, a więc omomierza. Najczęściej w urządzeniach cyfrowych omomierz jest realizowany przez pomiar spadku napięcia na badanym elemencie po zasileniu go prądem z wbudowanego źródła prądowego o znanym, stabilnym natężeniu prądu.



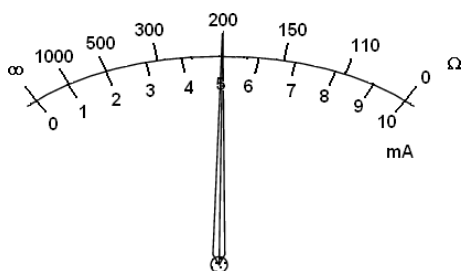
W takim układzie:

$$R_x = \frac{U}{I}.$$

W urządzeniach analogowych jest odwrotnie. Do elementu przykładane jest napięcie o znanej wartości, a płynący przez ten element prąd powoduje wychylenie wskazówki na nieliniowej skali, opisanej w omach. Nieliniowość skali wynika z zależności prądu od mierzonej rezystancji:

$$I = \frac{1}{R_x} \cdot U.$$

Przykład. Przyrząd analogowy ma źródło napięcia 1 V oraz ustrój magnetoelektryczny, którego wskazówka wychyla się do końca skali dla prądu o natężeniu 10 mA. Gdy mierzymy rezystancję 100 Ω lub mniej, przez ustrój magnetoelektryczny płynie prąd co najmniej 10 mA. Wskazówka wychyla się do końca skali. Gdy mierzymy rezystancję 200 Ω, płynący prąd ma natężenie 5 mA, a więc wskazówka wychyla się jedynie do połowy skali. Dla rezystancji 300 Ω będziemy mieli do czynienia z prądem 3,3 mA, dla 500 Ω otrzymamy 2 mA itd. Wskazówka znajdzie się na początku skali tylko wtedy, gdy przez mierzony element nie popłynie żaden prąd, a więc będzie on miał nieskończenie dużą rezystancję. Skala tego przyrządu musi więc wyglądać następująco:



1.4. Rezystancja doprowadzeń

Przy pomiarach małych rezystancji bardzo często spotykamy się z problemem wpływu przewodów pomiarowych na odczytywaną z przyrządu wartość. Wyznamy rezystancję jednometrowego przewodu miedzianego o średnicy 0,5 mm.

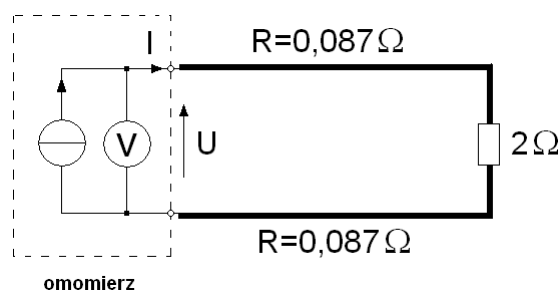
- rezystywność miedzi jest równa $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$,
- powierzchnia przekroju tego przewodu to:

$$\pi \cdot \left(\frac{0,0005}{2}\right)^2 \approx 1,9635 \cdot 10^{-7} \text{m}^2,$$

– korzystając z podanej wcześniej zależności na rezystancję prostoliniowego przewodnika otrzymujemy:

$$R = \rho \frac{l}{S} = 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{1,9635 \cdot 10^{-7}} \approx 0,087 \Omega.$$

Zmierzmy rezystancję opornika wzorcowego (a więc bardzo dokładnego) o znamionowej wartości 2Ω za pomocą dwóch jednometrowych przewodów w układzie jak na rysunku:



Otrzymamy:

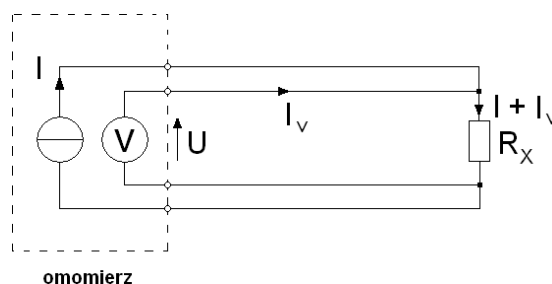
$$U = I \cdot R = I(0,087 + 2 + 0,087) ,$$

$$R = \frac{U}{I} = 2,174 \Omega.$$

Zmierzona w takim układzie rezystancja jest zawyżona o $0,174 \Omega$, czyli 8,7%.

Z powyższych rozważań możemy wywnioskować, że do pomiarów małych rezystancji należy używać jak najkrótszych przewodów o jak największym przekroju. Rezystancja takich przewodów będzie bardzo mała, więc błąd systematyczny pomiaru będzie zaniedbywalny.

Innym, lepszym rozwiązaniem takiego problemu jest pomiar rezystancji **metodą czteropunktową**. W przyrządach wykorzystujących taką metodę oddzielamy przewody doprowadzające prąd do mierzonego obiektu (tzw. przewody prądowe) od przewodów mierzących napięcie (tzw. przewody napięciowe). Otrzymujemy układ:



Napięcie na zaciskach woltomierza wynosi (zgodnie z prawami Kirchoffa² i prawem Ohma):

$$U = I_V \cdot R_{\text{przewodu}} + (I + I_V) \cdot R_x + I_V \cdot R_{\text{przewodu}} \quad .$$

Ponieważ rezystancja wejściowa woltomierza jest bardzo duża (typowo 10 MΩ), natężenie prądu I_V jest bardzo małe (rzędu nanoamperów). Z kolei natężenie prądu I jest dość duże ze względu na małą rezystancję R_x (układ czteroprzewodowy służy do pomiaru małych rezystancji). W związku z tym możemy napisać, że w przybliżeniu:

$$U = I \cdot R_x \quad .$$

Wartość zmierzona przez woltomierz jest dzielona przez znane natężenie prądu generowane przez wewnętrzne źródło prądowe (I), a więc rezystancja, jaką wyświetli przyrząd, będzie równa rezystancji, którą chcemy zmierzyć. Wyeliminowaliśmy w ten sposób wpływ rezystancji przewodów doprowadzających. Należy jedynie pamiętać o tym, że punkt połączenia przewodów prądowych i przewodów napięciowych powinien znajdować się jak najbliżej mierzonego elementu.

W multimetrach laboratoryjnych funkcja pomiaru rezystancji metodą czteroprzewodową jest oznaczona jako 4W (ang. *4-wire* – czteroprzewodowy) w odróżnieniu od klasycznego układu omomierza oznaczonego jako 2W (ang. *2-wire* – dwuprzewodowy).

1.5. Reaktancja i impedancja

Reaktancja jest parametrem związanym z obecnością pojemności lub indukcyjności w obwodzie prądu przemiennego. Reaktancja pojemnościowa opisywana jest zależnością:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

gdzie C – pojemność, ω – pulsacja.

Reaktancja indukcyjna opisywana jest zależnością:

$$X_L = \omega L$$

gdzie L – indukcyjność, ω – pulsacja.

W typowych układach elektronicznych należy również uwzględnić szeregowo obecną rezystancję, co daje następujące wartości impedancji:

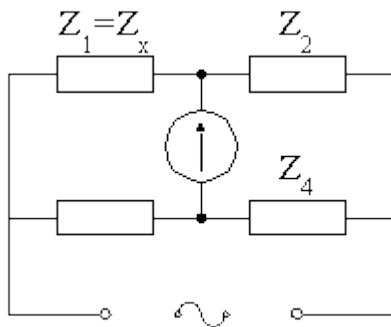
$$Z_L = R_L + j\omega L$$

$$Z_C = R_C - \frac{j}{\omega C}$$

W przypadku wyliczania modułów impedancji, wypadkową wyznacza się na podstawie sumy geometrycznej.

1.6. Pomiary impedancji

Impedancję wyznacza się metodą podstawiania (metoda mostkowa), przy użyciu tzw. mostka impedancyjnego (czteroramiennego). Przy użyciu takiego przyrządu pomiaru dokonuje się dla konkretnej wartości częstotliwości. Pomiar polega na dobraniu takich wartości elementów w ramieniu kompensującym, aby skompensować (zrównoważyć) impedancję mierzoną, włączoną do ramienia pomiarowego.



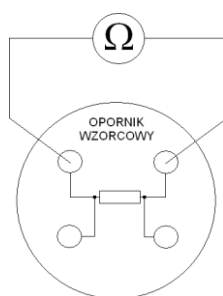
Alternatywną metodą jest pomiar z wykorzystaniem tzw. techniki spektroskopii impedancyjnej, gdzie urządzenie wyznacza widmowe zależności transmitancji elementu badanego (amplitudowe i fazowe). Uproszczoną wersją tego podejścia może być pomiar oscyloskopowy, gdzie wyznaczając w/w parametry, można zarejestrować relacje między sygnałem pobudzenia i odpowiedzi i dokonać szacowania/ dopasowania w oparciu o znane modele układów obwodów elektrycznych.

² Gustav Kirchhoff (1824–1887) – niemiecki fizyk, profesor uniwersytetów we Wrocławiu, Heidelbergu i Berlinie

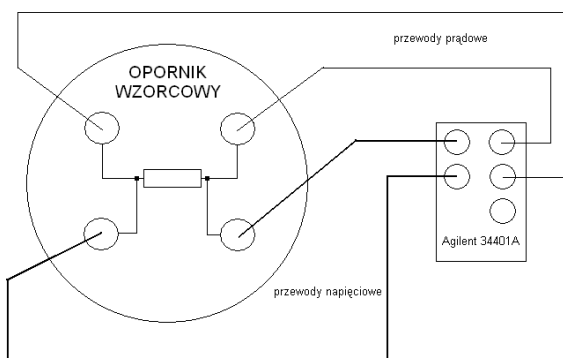
2. Przebieg ćwiczenia

Uwaga! Podczas pomiarów za każdym razem notować na jakim zakresie znajduje się przyrząd pomiarowy!

1. Odczytać wartość nominalną wszystkich rezystorów znajdujących się na stanowisku (opornik wzorcowy, płytka z jednym rezystorem, płytka z trzema rezystorami). Obok odczytanej wartości zapisać tolerancję, z jaką producent wykonał każdy z rezystorów.
2. Za pomocą omomierza Agilent 34401A zmierzyć w układzie dwupunktowym (funkcja 2W) rezystancję wszystkich oporników znajdujących się na stanowisku. **Do pomiaru użyć najkrótszych dostępnych przewodów.** W tabeli z wynikami zostawić wolną jedną kolumnę. Sposób pomiaru opornika wzorcowego przedstawia rysunek:



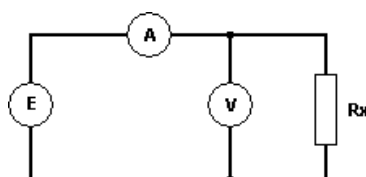
3. Za pomocą omomierza analogowego Axiomet AX-7003 zmierzyć rezystancję oporników znajdujących się na przezroczystej płytce z trzema elementami. W tabeli wyników zostawić wolną jedną kolumnę.
4. Zmierzyć trzy oporniki wzorcowe z różnych stanowisk znajdujących się w laboratorium. Wybrać oporniki o wartościach 1 Ω , 10 Ω , 100 Ω (po jednym). Zapisać numer stanowiska, z którego pochodzi opornik, i klasę dokładności podaną przez producenta. Pomiaru dokonać omomierzem Agilent 34401A w układzie czteropunktowym (funkcja 4W). **Po wykonaniu pomiarów oddać niezwłocznie opornik na stanowisko, z którego pochodzi.** W tabeli wyników zostawić wolną jedną kolumnę. Wybranie pomiaru czteropunktowego jest sygnalizowane przez wyświetlenie się znaków „4W” w prawej części wyświetlacza przyrządu. Sposób podłączenia przewodów do przyrządu przedstawia rysunek:



5. Za pomocą omomierza Agilent 34401A zmierzyć rezystancję opornika z żółtym radiatorem, znajdującego się na osobnej płytce. Pomiaru dokonać w układzie dwupunktowym kolejno za pomocą cienkich przewodów o długości jednego metra, grubych przewodów o długości jednego metra oraz grubych przewodów o długości 20 cm. Wyniki zebrać w tabeli. Wyjaśnić różnicę wskazań.
6. Omomierzem Agilent 34401A zmierzyć rezystancję trzech par przewodów z poprzedniego punktu. Wybrać pomiar dwupunktowy (funkcja 2W), dwa końce przewodów wpiąć do gniazd miernika, a dwa pozostałe zewrzeć ze sobą. Odjąć otrzymane wartości od rezystancji otrzymanych w punkcie 5. Poprawiony w ten sposób wynik pomiaru rezystora z osobnej płytki zapisać w osobnej tabeli.
7. Zmierzyć rezystancję rezystora z punktu 5 za pomocą omomierza Agilent 34401A w układzie czteropunktowym. Do podłączenia przewodów napięciowych wykorzystać zaciski krokodylowe. **Przypiąć je jak najbliżej rezystora.** Porównać wynik pomiaru z wynikiem z punktu 5 oraz z wynikiem z punktu 6.
8. Oszacować maksymalne napięcie, jakie można przyłożyć do opornika z osobnej płytki (żółty radiator), tak aby nie przekroczyć mocy 50 W. Oszacować maksymalne natężenie prądu, jakie może mieć prąd płynący przez ten opornik, aby ta moc nie była przekroczona. Skorzystać z wzorów:

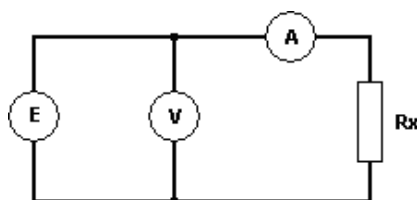
$$P = \frac{U^2}{R} \text{ oraz } P = I \cdot R$$

9. Dokonać analogicznego oszacowania dla pozostałych oporników (oprócz wzorcowego). Przyjąć, że maksymalna dopuszczalna moc tych rezystorów to 2 W.
10. Zestawić układ do poprawnego pomiaru napięcia.



Do zasilenia układu użyć **nieregulowanego** wyjścia zasilacza laboratoryjnego (5 V/3 A, dwa skrajne prawe gniazda zasilacza). W układzie tym zmierzyć natężenie prądu i napięcie kolejno dla wszystkich czterech oporników znajdujących się na stanowisku (oprócz opornika wzorcowego!). W tabeli z wynikami zostawić cztery wolne kolumny.

11. Zestawić układ do poprawnego pomiaru natężenia prądu.



Do zasilenia układu użyć **nieregulowanego** wyjścia zasilacza laboratoryjnego (5 V/3 A, dwa skrajne prawe gniazda zasilacza). W układzie tym zmierzyć natężenie prądu i napięcie kolejno dla wszystkich czterech oporników znajdujących się na stanowisku (oprócz opornika wzorcowego). W tabeli z wynikami zostawić cztery wolne kolumny.

12. Wyznaczyć rezystancję oporników na podstawie pomiarów natężenia prądu i napięcia w punktach 10 i 11.
13. Wyznaczyć rezystancję graniczną dla multimetru Agilent 34401A. Rezystancja wewnętrzna woltomierza to $10\text{ M}\Omega$, rezystancja wewnętrzna amperomierza jest równa $5\ \Omega$ na dwóch górnych zakresach oraz $0,1\ \Omega$ na dwóch zakresach dolnych. Ocenic, czy otrzymane wyniki pomiarów (punkt 10 i 11) potwierdziły zasadę wyboru metody pomiaru (poprawnego pomiaru natężenia prądu lub poprawnego pomiaru napięcia).
14. Wyznaczyć niepewność pomiaru w punktach 2, 3, 4 przebiegu ćwiczenia. Wyniki wpisać do odpowiednich tabel do kolumn zostawionych wcześniej jako puste.
15. Wyznaczyć niepewność pomiaru (prawo propagacji niepewności) oraz błąd systematyczny względny i bezwzględny w punktach 10 i 11. Wyniki wpisać do pozostawionych wolnych kolumn w odpowiednich tabelach.
16. Do wyjścia generatora sygnałowego i wejścia oscyloskopu podłączyć za pomocą przewodów koncentrycznych moduł testowy. Ustawić sygnał sinusoidalny o amplitudzie 1 V . Zmieniając częstotliwość od 10 Hz do 10 MHz (trzy do pięciu punktów na dekadę), zarejestrować wartości napięcia wyjściowego. Na podstawie wykreślonego wykresu wyznaczyć częstotliwości graniczne (przejście z obszaru impedancji do obszaru rezystancji), a następnie dysponując tymi wartościami wyliczyć wartości składowych R , L , C .