

## ĆWICZENIE NR 10

**POMIARY TECHNICZNE REZYSTANCJI PRZY PRĄDZIE STAŁYM**

*(opracował Eligiusz Pawłowski)*

**Cel i zakres ćwiczenia**

Celem ćwiczenia jest poznanie wybranych metod pomiaru rezystancji prądem stałym, a zwłaszcza metody technicznej pomiaru rezystancji. Zakres ćwiczenia obejmuje pomiary bezpośrednie rezystancji, pomiary metodą techniczną przy poprawnie mierzonym prądzie i poprawnie mierzonym napięciu, pomiary rezystancji nieliniowej oraz pomiary rezystancji małych metodą czteroprzewodową, w tym rezystancji styków i przewodów połączeniowych.

**1. Informacje wstępne****1.1. Fizyczne podstawy zjawiska oporu elektrycznego**

Rezystancja (opór elektryczny) jest właściwością ciał, wynikającą z ograniczania swobodnego ruchu nośników prądu w materiale i skutkującą zamianą energii prądu elektrycznego na energię cieplną, która następnie ulega rozproszeniu zwiększając temperaturę przewodnika i jego otoczenia. W obwodach prądu przemiennego rezystancja danego elementu może również reprezentować straty innego pochodzenia, np.: straty w rdzeniu ferromagnetycznym transformatora reprezentowane są na jego schemacie zastępczym przez odpowiednią rezystancję zastępczą (więcej na ten temat w ćwiczeniu 17). Ogólnie rzecz biorąc, w obwodach prądu przemiennego rezystancją nazywa się składową czynną impedancji. Rezystancja ta odpowiada za moc czynną wydzielaną w danym elemencie w wyniku przepływu prądu przemiennego. W niniejszym ćwiczeniu rozpatrywane będą jedynie pomiary rezystancji przy prądzie stałym.

Zjawisko oporu elektrycznego metali na gruncie klasycznej mechaniki Newtona tłumaczy teoria Drudego – Lorentza. Według tej teorii, przyłożenie różnicy potencjałów do dwóch różnych punktów przewodnika wymusza w metalu ruch swobodnych elektronów. Elektrony te, natrafiając przypadkowo na jony będące węzłami siatki krystalicznej metalu, zderzają się z nimi, tracąc przy tym pęd i energię kinetyczną. Zderzenia te powodują hamowanie elektronów, czyli zjawisko oporu elektrycznego. W przeciwnym razie prędkość elektronów stale by rosła, a tym samym rosło by również nieograniczenie natężenie prądu. Uwzględniając dodatkowo drgania jonów sieci krystalicznej, można również uzasadnić zależność rezystancji od temperatury. Jeśli bowiem czynnikiem ograniczającym ruch nośników prądu są zderzenia elektronów z drgającymi jonami sieci krystalicznej, a wzrost temperatury zwiększa amplitudę tych drgań, to tym samym zwiększa się również prawdopodobieństwo zderzeń elektronów z jonami i opór elektryczny rośnie dla wyższych temperatur.

Teoria Drudego – Lorentza jest bardzo uproszczona i nie wyjaśnia wszystkich zagadnień związanych ze zjawiskiem oporu elektrycznego, jak np.: zjawiska nadprzewodnictwa, czyli zaniku oporu elektrycznego niektórych materiałów w bardzo niskich temperaturach. Nie ma również zastosowania do opisu zjawisk zachodzących w półprzewodnikach. Dokładniejszy opis tych zagadnień jest możliwy na gruncie mechaniki kwantowej.

**1.2. Podstawowe zależności związane ze zjawiskiem oporu elektrycznego**

Liczbowo rezystancja jest miarą oporu, z jakim dany element obwodu elektrycznego przeciwstawia się przepływowi prądu. Wskutek oporu stawianego przepływowi prądu na elemencie tym powstaje spadek napięcia. Zależność tę przedstawia prawo Ohma:

$$R = \frac{U}{I} , \quad (1)$$

gdzie:  $R$  - rezystancja,  
 $U$  - napięcie występujące na rezystancji,  
 $I$  - natężenie prądu płynącego przez rezystancję.

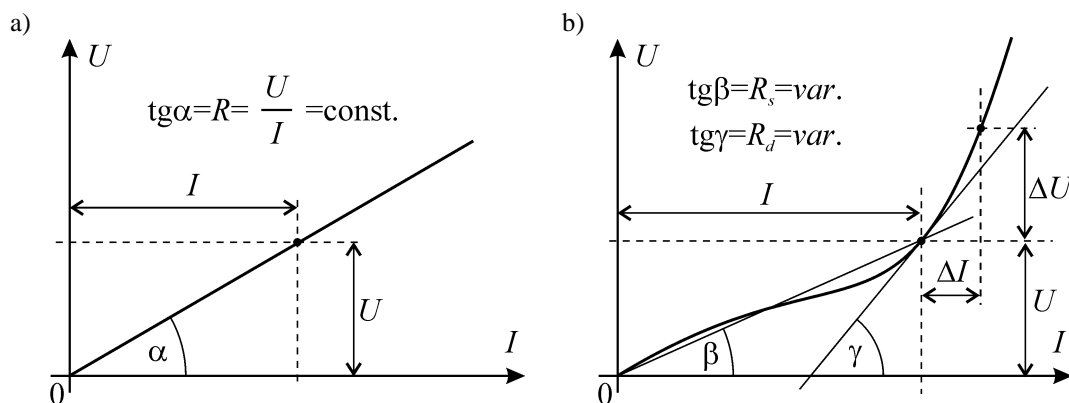
W układzie SI jednostką rezystancji jest om, którego symbolem jest grecka litera  $\Omega$  (omega) i zgodnie z zależnością (1):  $1\Omega = 1\text{V}/1\text{A}$ .

Z postaci prawa Ohma można by wyciągnąć wniosek, że rezystancja jest wprost proporcjonalna do napięcia i odwrotnie proporcjonalna do prądu. **Taki wniosek jest jednak całkowicie błędny w sensie przyczynowo - skutkowym.** Opór elektryczny nie zależy od parametrów prądu w sensie przyczynowo-skutkowym, lecz jest właściwością materiału przez który przepływa prąd i zależy od geometrii przewodnika oraz jego budowy wewnętrznej. Prawo Ohma (1) można poprawnie interpretować następująco: rezystancja  $R$  jest stałym współczynnikiem proporcjonalności pomiędzy prądem  $I$  płynącym przez tę rezystancję i powstającym na niej spadkiem napięcia  $U$ . Tym samym, w niezmiennych warunkach fizycznych (np. przy stałej temperaturze) opór elektryczny danego przewodnika jest stały.

Rozróżnia się elementy rezystancyjne liniowe i nieliniowe. Dla elementu liniowego charakterystyka prądowo-napięciowa  $U=f(I)$  jest linią prostą, tak jak przedstawiono to na rysunku 1a. Współczynnik kierunkowy tej linii prostej jest liczbowo równy wartości rezystancji  $R$ :

$$R = \frac{U}{I} = \text{tg}\alpha = \text{const.} , \quad (2)$$

gdzie:  $\alpha$  jest kątem nachylenia charakterystyki.



Rys. 1. Charakterystyka prądowo-napięciowa rezystancji: a) liniowej, b) nieliniowej

Dla elementu nieliniowego charakterystyka prądowo-napięciowa  $U=f(I)$  nie jest linią prostą, przykładowy jej kształt przedstawiono na rysunku 1b. W tym przypadku rezystancja określona zależnością (2) zmienia swoją wartość w różnych punktach charakterystyki. Dla elementu nieliniowego definiuje się rezystancję statyczną  $R_s$  i rezystancję dynamiczną  $R_d$ :

$$R_s = \frac{U}{I} = \text{tg}\beta , \quad (3)$$

$$R_d = \frac{dU}{dI} = \text{tg}\gamma \approx \frac{\Delta U}{\Delta I} . \quad (4)$$

W elemencie nieliniowym rezystancja statyczna  $R_s$  i dynamiczna  $R_d$  mają różne wartości w różnych punktach charakterystyki, przy czym rezystancja statyczna zawsze jest dodatnia, natomiast w niektórych elementach półprzewodnikowych występuje rezystancja dynamiczna ujemna (np. w diodzie tunelowej). Efekt ujemnej rezystancji można również uzyskać w układach elektronicznych ze sprzężeniem zwrotnym (np. w zasilaczu stabilizowanym), co może prowadzić do jego niestabilności.

Wartość rezystancji przewodnika może być wyznaczona na podstawie jego wymiarów geometrycznych, zależy ona od długości i pola przekroju poprzecznego oraz od rodzaju materiału, z którego został on wykonany:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (5)$$

gdzie:  $R$  - rezystancja przewodnika,  
 $\rho$  - rezystywność (rezystancja właściwa) materiału przewodnika,  
 $l$  - długość przewodnika.  
 $S$  - pole powierzchni przekroju przewodnika.

W układzie SI jednostką rezystywności jest  $\Omega \cdot m$ , ale w praktyce można się również spotkać z jednostką  $\Omega \cdot mm^2/m$ , która jest wygodniejsza w obliczeniach ( $1 \Omega \cdot m = 10^6 \Omega \cdot mm^2/m$ ).

Wartość oporu zależy także od temperatury przewodnika. Dla metali z dobrym przybliżeniem w wielu praktycznych zastosowaniach przyjmuje się liniową zależność rezystancji od temperatury (w zakresie do kilkuset  $^{\circ}C$ ):

$$R(t) = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta t), \quad (6a)$$

a po przekształceniu: 
$$t = t_0 + \frac{R(t) - R_0}{\alpha R_0}, \quad (6b)$$

gdzie:  $t$  - temperatura,  
 $t_0$  - temperatura początkowa,  
 $\Delta t$  - przyrost temperatury,  $\Delta t = t - t_0$ ,  
 $R(t)$  - rezystancja w temperaturze  $t$ ,  
 $R_0 = R(t_0)$  - rezystancja w temperaturze  $t_0$ ,  
 $\alpha$  - współczynnik temperaturowy rezystancji,

W układzie SI jednostką współczynnika temperaturowego rezystancji  $\alpha$  jest  $K^{-1}$ . W tabeli 1 zestawiono wartości rezystywności  $\rho$  oraz współczynnika temperaturowego rezystancji  $\alpha$  dla niektórych metali oraz stopów wykorzystywanych w przemyśle elektrotechnicznym.

Tab. 1. Rezystywność i współczynnik temperaturowy rezystancji wybranych materiałów [3]

metal / stop	rezystywność $\rho$	współczynnik $\alpha$	temp. topnienia
	$10^{-8} \Omega \cdot m$ (dla $t=0^{\circ}C$ )	$K^{-1}$	$^{\circ}C$
Srebro	1,62	0,00360	960
Miedź	1,54	0,00431	1083
Aluminium	2,42	0,00410	660
Wolfram	4,82	0,00460	3422
Nikiel	7,10	0,00440	1453
Platyna	10,60	0,00391	1769
Konstantan (55% Cu, 45% Ni)	48,00	0,00002	1225-1300
Manganin (86% Cu, 12% Mn, 2% Ni)	46,00	0,00003	960

Uwaga: wartości parametrów podane w tabelce zależą od zakresu temperatury, czystości materiałów oraz rodzaju i zawartości domieszek, dlatego dane z różnych źródeł mogą różnić się pomiędzy sobą.

Analizując tabelę 1 (uwzględniając dodatkowo ceny tych metali), można łatwo uzasadnić, dlaczego przewody elektryczne wykonuje się z miedzi lub aluminium, styki i złącza pokrywa się warstwą srebra, oporniki wzorcowe wykonuje się z konstantanu i manganinu, a czujniki temperatury wykonuje się z platyny i niklu. Zależność (6b) umożliwia pomiar temperatury  $t$  poprzez pomiar rezystancji  $R(t)$  czujnika wykonanego z metalu o znanym współczynniku temperaturowy rezystancji  $\alpha$  oraz o znanej rezystancji  $R_0$  w temperaturze początkowej  $t_0$ . Najpopularniejszym czujnikiem tego rodzaju stosowanym powszechnie w przemyśle i w laboratoriach jest Pt<sub>100</sub>. Jest to czujnik temperatury wykonany z platyny, posiadający rezystancję 100Ω w temperaturze 0°C.

Należy również zwrócić uwagę na parametry wolframu, który ze względu na wysoką temperaturę topnienia (3422 °C) jest wykorzystywany do produkcji żarników tradycyjnych żarówek oraz żarówek halogenowych. W ćwiczeniu żarówka będzie badana jako element nieliniowy. Mając na uwadze współczynnik temperaturowy rezystancji dla wolframu  $\alpha=0,0046 \text{ K}^{-1}$ , oraz biorąc pod uwagę, że żarnik podczas pracy żarówki osiąga temperaturę rzędu 2000 .. 3000 °C, ze wzoru (6a) wynika, że rezystancja gorącej żarówki po włączeniu jest kilkanaście razy większa od rezystancji początkowej żarówki zimnej. Dlatego w chwili włączenia zimnej żarówki płynie przez nią początkowo prąd znacznie większy od prądu znamionowego, co często powoduje przepalenia żarówki w chwili jej włączania. W ćwiczeniu jednym z zadań będzie obliczenie temperatury żarnika żarówki na podstawie zmierzonej rezystancji, korzystając z zależności (6b).

Warto również zapamiętać, że 1 mb przewodu miedzianego o przekroju 1mm<sup>2</sup> w temperaturze 20°C posiada rezystancję około 18÷22 mΩ, zależnie od producenta, konstrukcji żyły, czystości miedzi i typu przewodu [7]. Rezystancja ta jest istotnym problemem przy pomiarze bardzo małych rezystancji, co wymaga stosowania odpowiednich układów pomiarowych. Zagadnienie to będzie wyjaśnione w dalszej części instrukcji.

### 1.3. Rezystory i ich podstawowe parametry

Element obwodu elektrycznego specjalnie zaprojektowany w celu uzyskania założonej wartości rezystancji nazywamy rezystorem (opornikiem). W praktyce wykorzystywane są rezystory o różnej konstrukcji, różniące się właściwościami i parametrami.

Rezystory węglowe kompozytowe zbudowane są w postaci wałka, lub rurki węglowej z przylutowanymi wyprowadzeniami. Zaletą tych rezystorów jest ich niska indukcyjność, wadami są: wysoka pojemność własna, wysoki współczynnik temperaturowy, dużą zależność od napięcia, wysoki szum i niska stabilność czasowa.

Rezystory węglowe warstwowe składają się z rurki ceramicznej, na której jest naparowana warstwa węgla o danej wartości rezystancji. W tej warstwie wykonywane są spiralne nacięcia przy pomocy ostrza diamentowego lub lasera w celu osiągnięcia właściwej wartości rezystancji. Ich główną zaletą są niskie koszty produkcji.

Rezystory warstwowe metalowe różnią się od węglowych tym, że warstwa węgla została zastąpiona warstwą metalu. Proces produkcji jest podobny. Posiadają dobre właściwości dla wysokich częstotliwości ze względu na niską pojemność własną. Zaletami są: niski współczynnik temperaturowy, mała zależność od napięcia, niski poziom szumów i dobra stabilność długoterminowa.

Rezystory grubowarstwowe, nazywane również cermetowymi, posiadają warstwę oporową z mieszaniny tlenków metali i szkła lub ceramiki nałożoną metodą sitodruku na korpus ceramiczny. Tego typu rezystory mają dobre właściwości przy wysokich częstotliwościach i niskich rezystancjach. Mają niską pojemność własną, małą zależność rezystancji od napięcia i bardzo dobrą stabilność długoterminową.

Rezystory cienkowarstwowe mają bardzo cienką warstwę metalu, najczęściej niklu i chromu, który jest naparowywany na korpus szklany lub ceramiczny. Rezystory są trawione

i korygowane przy pomocy lasera, aby uzyskać właściwą rezystancję. Mają bardzo dobry współczynnik temperaturowy rezystancji oraz małą zależność od napięcia i nadzwyczaj dobrą stabilność długoterminową. Szumy są najniższe ze wszystkich typów rezystorów warstwowych powierzchniowych. Często stosuje się w układach precyzyjnych, jako np. bardzo dokładne dzielniki napięcia.

Rezystory drutowe wykonane są z drutu o wysokiej rezystywności  $\rho$ , na ogół z manganinu lub konstantanu (patrz tabela 1), 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. Własności dla wysokich częstotliwości są słabe, posiadają dużą indukcyjność i wysoką pojemność. Zaletami są mały współczynnik temperaturowy, niewielka zależność od napięcia i bardzo niski poziom szumów. Mogą pracować przy wysokich temperaturach, nawet rzędu 200 - 400 °C.

#### 1.4. Metody pomiaru rezystancji

Rezystancja jest parametrem nie tylko rezystorów (oporników), ale również innych elementów obwodów elektrycznych. W praktyce zachodzi więc potrzeba pomiaru nie tylko rezystancji rezystorów, ale również innych elementów stawiających opór przepływającemu przez nie prądowi: przewodów połączeniowych, styków łączników, izolacji, uziołów, instalacji odgromowych, uzwojeń maszyn elektrycznych (silników, prądnic, transformatorów itp.), ogniw elektrochemicznych, grzałek, żarówek, nitowanych połączeń poszycia samolotów i śmigłowców, spawów, i wielu innych. Wiele z tych zagadnień wymaga zastosowania specyficznych metod pomiarowych, które nie będą tu rozpatrywane. Omówione zostaną jedynie typowe, najczęściej stosowane metody pomiaru rezystancji przy prądzie stałym.

Techniczny pomiar oporności przy prądzie stałym może być wykonany miernikami oporności o bezpośrednim odczycie wartości mierzonej, lub metodą pośrednią za pomocą amperomierza i woltomierza. Do najczęściej stosowanych technicznych mierników oporności można zaliczyć między innymi:

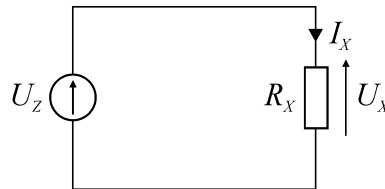
- omomierze magnetoelektryczne szeregowe i równoległe,
- omomierze magnetoelektryczne ilorazowe, w tym również induktorowe mierniki izolacji,
- mostki techniczne Wheatstone'a i Thomsona oraz
- omomierze elektroniczne, najczęściej stanowiące wyposażenie multimetrów cyfrowych.

Bezpośredni pomiar rezystancji tymi miernikami jest wygodny, szybki i stosunkowo dokładny, ale jest odpowiedni tylko dla rezystancji liniowych. Jak już wyjaśniono wcześniej, dla elementów liniowych rezystancja statyczna i dynamiczna są sobie równe i mają wartość stałą w każdym punkcie charakterystyki prądowo-napięciowej. Oznacza to, że pomiar rezystancji elementów liniowych może być zrealizowany przy dowolnej wartości prądu, która nie musi być znana. Do tego celu można więc zastosować dowolny z wymienionych mierników. Inaczej jest w przypadku elementów nieliniowych. Dla elementów nieliniowych rezystancje statyczna  $R_s$  (3) i rezystancja dynamiczna  $R_d$  (4) mają różne wartości w różnych punktach charakterystyki prądowo-napięciowej  $U=f(I)$ . Dlatego pomiar ich rezystancji musi być realizowany przy znanej wartości prądu. Zazwyczaj wartość tego prądu jest z góry narzucona, najczęściej pomiary wykonuje się przy znamionowej wartości prądu obciążenia badanego elementu. Ponieważ typowe przyrządy do pomiaru rezystancji nie zapewniają możliwość kontroli wartości prądu pomiarowego, to nie powinny być stosowane do pomiarów rezystancji nieliniowych. Dlatego do pomiaru rezystancji elementów nieliniowych najczęściej stosuje się właśnie metodę techniczną, mimo jej znanych wad. Oczywiście metodę techniczną można również stosować z powodzeniem do pomiaru rezystancji elementów liniowych, ale te pomiary można zrealizować wygodniej i dokładniej innymi metodami.

## 2. Metoda techniczna pomiaru rezystancji

### 2.1. Zasada pomiaru rezystancji metodą techniczną

Metoda techniczna pomiaru rezystancji polega na zmierzeniu napięcia i natężenia prądu w danym oporze i obliczeniu wartości mierzonej rezystancji  $R_X$  na podstawie prawa Ohma. Zasadę pomiaru przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Zasada pomiaru rezystancji metodą techniczną

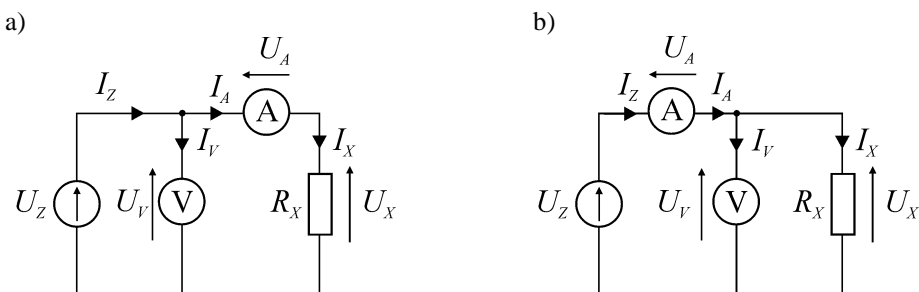
Źródło napięcia stałego  $U_Z$  zasilające układ wymusza przepływ prądu  $I_X$  przez mierzony rezystor  $R_X$ , na którym powstaje spadek napięcia  $U_X$ . Wartość mierzonej rezystancji  $R_X$  oblicza się na podstawie prawa Ohma:

$$R_X = \frac{U_X}{I_X}, \quad (7)$$

gdzie:  $U_X$  - napięcie na zaciskach badanego opornika,  
 $I_X$  - natężenie prądu płynącego przez opornik.

Metoda techniczna jest więc metodą pomiarową pośrednią, a zależność (7) definiuje tzw. funkcję pomiarową [2]. Aby praktycznie zrealizować pomiar rezystancji metodą techniczną należy w układzie przedstawionym na rysunku 2 zastosować do pomiaru prądu i napięcia odpowiedni amperomierz i woltomierz. Idealny amperomierz powinien mieć rezystancję równą zero, a idealny woltomierz powinien mieć rezystancję nieskończenie wielką [1]. Niestety, rzeczywiste mierniki nie spełniają tych warunków i po włączeniu ich do układu spowodują one przepływ dodatkowych prądów i powstanie dodatkowych spadków napięć, a tym samym zakłóca poprawny pomiar rezystancji, co powoduje powstanie błędów pomiaru.

Dlatego w praktyce wyróżnia się dwa układy pomiarowe realizujące techniczną metodę pomiaru rezystancji, przedstawione na rysunku 3, które różnią się sposobem włączenia amperomierza i woltomierza: układ z poprawnie mierzonym prądem (rys. 3a) i układ z poprawnie mierzonym napięciem (rys. 3b). Układy te różnią się właściwościami i dlatego będą omówione każdy z osobna.



Rys. 3. Schematy układów do pomiaru rezystancji metodą techniczną: a) z poprawnie mierzonym prądem, b) z poprawnie mierzonym napięciem

## 2.2. Układ z poprawnie mierzonym prądem

W pierwszym układzie (rys. 3a) prąd  $I_A$  płynący przez amperomierz jest równy prądowi  $I_X$  płynącemu przez mierzoną rezystancję  $R_X$ , a więc  $I_A = I_X$ , czyli że amperomierz mierzy prąd rzeczywiście płynący przez opornik. Jest to więc **układ z poprawnie mierzonym prądem** i pod taką nazwą zazwyczaj występuje w literaturze. Natomiast w układzie tym napięcie  $U_V$  na zaciskach woltomierza jest sumą napięcia  $U_X$  na mierzonej rezystancji  $R_X$  oraz spadku napięcia  $U_A$  na amperomierzu:  $U_V = U_X + U_A$ , a więc napięcie  $U_X$  nie jest mierzone poprawnie, jest ono zawyżone. Powstający błąd pomiaru napięcia  $U_X$  skutkuje błędem pomiaru rezystancji  $R_X$ . Prąd  $I_V$  płynący przez woltomierz nie wpływa w tym układzie na wynik pomiaru i jedynie zwiększa wartość prądu  $I_Z = I_A + I_V$  zasilającego układ pomiarowy.

Wobec tego mierzona rezystancja ma wartość:

$$R_X = \frac{U_X}{I_X} = \frac{U_V - U_A}{I_A} = \frac{U_V}{I_A} - \frac{U_A}{I_A} . \quad (8)$$

Jeśli amperomierz posiada rezystancję  $R_A$ , to  $U_A = I_A \cdot R_A$  i zależność (8) możemy przekształcić do następującej postaci:

$$R_X = \frac{U_V}{I_A} - R_A . \quad (9)$$

Zazwyczaj rezystancja amperomierza  $R_A$  jest znacznie mniejsza od mierzonej rezystancji  $R_X$  i może być we wzorze (9) pominięta. Opuszczając ją otrzymujemy wzór przybliżony:

$$R'_X = \frac{U_V}{I_A} . \quad (10)$$

Przekształcając (9) i podstawiając do (10) możemy wykazać, że:

$$R'_X = R_X + R_A . \quad (11)$$

Z postaci zależności (11) wynika wniosek, że w układzie z poprawnie mierzonym prądem mierzona jest suma szeregowo połączonej rezystancji nieznannej  $R_X$  i rezystancji amperomierza  $R_A$ . Stosując wzór uproszczony (10) popełniamy w układzie z poprawnie mierzonym prądem błąd bezwzględny  $\Delta_A$  pomiaru rezystancji  $R_X$ :

$$\Delta_A = R'_X - R_X = R_A . \quad (12)$$

Z porównania wzorów (9) i (10) wynika, że przybliżona wartość  $R'_X$  jest zawsze większa od wartości dokładnej  $R_X$ , a błąd (12) jest **zawsze dodatni**. Błąd (12) nie wynika z błędów przyrządów pomiarowych, lecz jest skutkiem zastosowanej metody pomiarowej. Dlatego stosujemy wobec niego sformułowanie, że jest to **błąd metody**. Ponieważ błąd ten w danych warunkach pomiaru ma stałą wartość i można tę wartość wyznaczyć (12), to jest to również **błąd systematyczny**. Błędy systematyczne należy obliczać i odejmować od wyniku pomiaru w celu uzyskania dokładnego wyniku (9), pozbawionego błędu systematycznego. Można jednak pomijać błędy systematyczne jeśli są one mniejsze od błędów podstawowych wnoszonych przez przyrządy pomiarowe, określone przez ich klasę.

Zazwyczaj błąd (12) przedstawiamy jako błąd względny wyrażony w procentach:

$$\delta_A = \frac{\Delta_A}{R_X} \cdot 100\% = \frac{R_A}{R_X} \cdot 100\% . \quad (13)$$

Ze wzoru (13) wynika, że w układzie z poprawnie mierzonym prądem (rys. 3a) błąd pomiaru jest tym mniejszy, im większa jest wartość mierzonej rezystancji  $R_X$ . Oznacza to, że **układ z poprawnie mierzonym prądem jest odpowiedni do pomiaru rezystancji dużych**. Zastosowanie tego układu do pomiaru małych rezystancji jest nieodpowiednie i skutkuje pojawieniem się dużych błędów.

### 2.3. Układ z poprawnie mierzonym napięciem

W drugim układzie (rys. 3b) napięcie  $U_V$  mierzone przez woltomierz jest równe spadkowi napięcia  $U_X$  występującemu na mierzonej rezystancji  $R_X$ , a więc  $U_V = U_X$ , czyli że woltomierz mierzy napięcie rzeczywiście panujące na oporniku. Jest to więc **układ z poprawnie mierzonym napięciem** i pod taką nazwą zazwyczaj występuje w literaturze. Natomiast w układzie tym prąd  $I_A$  płynący przez amperomierz jest sumą prądu  $I_X$  płynącego przez mierzoną rezystancję  $R_X$  oraz prądu  $I_V$  płynącego przez woltomierz:  $I_A = I_X + I_V$ , a więc prąd  $I_X$  nie jest mierzony poprawnie, jest on zawyżony. Powstający błąd pomiaru prądu  $I_X$  skutkuje błędem pomiaru rezystancji  $R_X$ . Spadek napięcia  $U_A$  powstający na amperomierzu nie wpływa w tym układzie na wynik pomiaru i jedynie zmniejsza wartość napięcia  $U_X$  w stosunku do napięcia  $U_Z$  zasilającego układ pomiarowy:  $U_X = U_Z - U_A$ .

Wobec tego mierzona rezystancja ma wartość:

$$R_X = \frac{U_X}{I_X} = \frac{U_V}{I_A - I_V} . \quad (14)$$

Jeśli woltomierz posiada rezystancję  $R_V$ , to  $U_V = I_V R_V$  i zależność (14) możemy przekształcić do następującej postaci:

$$R_X = \frac{U_V}{I_A - \frac{U_V}{R_V}} . \quad (15)$$

Zazwyczaj rezystancja woltomierza  $R_V$  jest znacznie większa od mierzonej rezystancji  $R_X$  i prąd  $I_V$  płynący przez woltomierz może być we wzorze (14) pominięty. Pomijając go otrzymujemy wzór przybliżony:

$$R_X'' = \frac{U_V}{I_A} . \quad (16)$$

Przekształcając (16) łatwo możemy wykazać, że:

$$R_X'' = \frac{U_V}{I_A} = \frac{U_V}{I_V + I_X} = \frac{U_V}{\frac{U_V}{R_V} + \frac{U_V}{R_X}} = \frac{1}{\frac{1}{R_V} + \frac{1}{R_X}} = \frac{R_V R_X}{R_V + R_X} . \quad (17)$$

Z postaci zależności (17) wynika wniosek, że w układzie z poprawnie mierzonym napięciem mierzona jest rezystancja wypadkowa równoległego połączenia rezystancji nieznanej  $R_X$  i rezystancji woltomierza  $R_V$ . Stosując wzór uproszczony (16) popełniamy w układzie z poprawnie mierzonym napięciem błąd bezwzględny  $\Delta_V$  pomiaru rezystancji  $R_X$ , który po nieskomplikowanych przekształceniach można zapisać w postaci:

$$\Delta_V = R_X'' - R_X = \frac{R_V R_X}{R_V + R_X} - R_X = -\frac{R_X^2}{R_V + R_X} . \quad (18)$$



Z porównania wzorów (15) i (16) wynika, że przybliżona wartość  $R''_X$  jest zawsze mniejsza od wartości dokładnej  $R_X$ , a błąd (18) jest **zawsze ujemny**. Podobnie jak w układzie pierwszym (rys. 3a), błąd (18) również nie wynika z błędów przyrządów pomiarowych, lecz jest skutkiem zastosowanej metody pomiarowej. Jest to więc również **błąd metody** oraz również jest to **błąd systematyczny**. Błąd ten także można pominąć jeśli jest on mniejszy od błędów podstawowych wnoszonych przez przyrządy pomiarowe, określone przez ich klasę.

Zazwyczaj błąd (18) przedstawiamy jako błąd względny wyrażony w procentach:

$$\delta_V = \frac{\Delta_V}{R_X} \cdot 100\% = \frac{-1}{1 + \frac{R_V}{R_X}} \cdot 100\% \approx -\frac{R_X}{R_V} \cdot 100\% . \quad (19)$$

Zastosowane przybliżenie wynika z założenia, że rezystancja woltomierza jest znacznie większa od rezystancji mierzonej:  $R_V \gg R_X$ . Ze wzoru (19) wynika, że w układzie z poprawnie mierzonym napięciem (rys. 3b) błąd pomiaru jest tym mniejszy, im mniejsza jest wartość mierzonej rezystancji  $R_X$ . Oznacza to, że **układ z poprawnie mierzonym napięciem jest odpowiedni do pomiaru rezystancji małych**. Zastosowanie tego układu do pomiaru dużych rezystancji jest nieodpowiednie i skutkuje pojawieniem się dużych błędów.

#### 2.4. Błąd graniczny metody technicznej pomiaru rezystancji

Z porównania wzorów (13) oraz (19) wynika, że ze względu na błąd metody układ z poprawnie mierzonym prądem (rys. 3a) jest korzystny przy pomiarze oporów dużych, natomiast układ z poprawnie mierzonym napięciem (rys. 3b) jest korzystny przy pomiarze oporów małych. Ponieważ jednak rezystancja woltomierza  $R_V$  i rezystancja amperomierza  $R_A$  są od siebie niezależne, to ze wzorów (13) i (19) wprost nie wynika, jaka wartość rezystancji mierzonej  $R_X$  powinna być uznana za dużą, a jaka za małą rezystancję.

Istnieje pewna graniczna wartość rezystancji mierzonej, powyżej której korzystniejszy jest układ z poprawnie mierzonym prądem (rys. 3a), natomiast poniżej – układ z poprawnie mierzonym napięciem (rys. 3b), jest to tzw. **rezystancja graniczna  $R_{X\text{ gr}}$** . Rezystancję graniczną wyznaczamy przyrównując do siebie wartości bezwzględne błędów metody, wyrażonych wzorami (13) oraz (19), w zależności (19) pomijamy więc znak minus:

$$\frac{R_A}{R_{X\text{ gr}}} = \frac{R_{X\text{ gr}}}{R_V} , \quad (20)$$

skąd otrzymujemy, że:

$$R_{X\text{ gr}} = \sqrt{R_A R_V} . \quad (21)$$

Wartość rezystancji granicznej  $R_{X\text{ gr}}$  zależy jak widać ze wzoru (21), jedynie od rezystancji wewnętrznej mierników: amperomierza  $R_A$  i woltomierza  $R_V$ .

Przy racjonalnym doborze układu połączeń największy błąd metody technicznej występuje w przypadku pomiaru rezystancji granicznej  $R_X = R_{X\text{ gr}}$ . Wartość tego błędu otrzymujemy podstawiając (21) do (13) lub (19). Wynika stąd, że błąd graniczny  $\delta_{\text{gr}}$  metody technicznej wynosi:

$$\delta_{\text{gr}} = \sqrt{\frac{R_A}{R_V}} \cdot 100\% . \quad (22)$$

Analizę błędu metody można również przeprowadzić rozważając moce pobierane przez opornik badany i poszczególne mierniki. Mianowicie, mnożąc licznik i mianownik we wzorze (13) przez  $I_A^2$  oraz we wzorze (19) przez  $U_V^2$ , otrzymujemy odpowiednio inne, równoważne postacie wzorów na błędy metody:

$$\delta_{grA} = \frac{P_A}{P_X} \cdot 100\% , \quad (23)$$

oraz: 
$$\delta_{grV} = \frac{P_V}{P_X} \cdot 100\% , \quad (24)$$

gdzie:  $P_A$ ,  $P_V$ ,  $P_X$  oznaczają odpowiednio moc pobieraną w czasie pomiaru przez amperomierz, woltomierz oraz mierzoną rezystancję.

Wzory (23) i (24) pozwalają wysnuć wniosek, że bez względu na wartość  $R_X$  układ 3a jest korzystniejszy przy mniejszym poborze mocy  $P_A$  przez amperomierz, zaś układ 3b przy mniejszym poborze mocy  $P_V$  przez woltomierz. Oba układy są sobie równoważne, gdy obydwaj mierniki pobierają jednakową moc. Ponadto ze wzorów (23) i (24) wynika, że błąd metody rośnie przy zmniejszaniu mocy  $P_X$  mierzonej rezystancji. Zatem metoda techniczna nie nadaje się do pomiaru oporności obiektów, których pobór mocy jest mały, np. porównywalny do poboru mocy użytych mierników.

Rozważając błąd metody na podstawie poboru mocy mierników, należy pamiętać, że pobór mocy miernika maleje w stosunku do jego mocy znamionowej podanej w katalogu odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu wskazania.

## 2.5. Błąd całkowity w metodzie technicznej pomiaru rezystancji

Na całkowity błąd pomiaru rezystancji metodą techniczną składają się przede wszystkim następujące błędy:

- błąd metody,
- błędy wskazań mierników wynikające z ich klasy,
- błędy wynikające z wpływu warunków wykonywania pomiaru: prądu, napięcia, temperatury, wilgotności, ciśnienia itp. na rezystancję badanego obiektu.

Błąd metody, który zgodnie z wcześniejszymi uwagami może być obliczony odpowiednio ze wzoru (13) lub (19), jest błędem systematycznym i powinien być skorygowany (tzn. odjęty od wyniku pomiaru), a jeśli jest znacząco mniejszy od błędów wskazań mierników, to można go pominąć. Błąd wynikający z warunków pomiaru można zmniejszyć do odpowiednich granic i pominąć w obliczeniach, jeśli tylko zapewnimy odpowiednie środowisko pomiarów.

Zawsze jednak należy dokonać analizy błędów wnoszonych przez przyrządy pomiarowe, wynikających z ich klasy dokładności. Ponieważ metoda techniczna realizuje pomiar pośredni, to błędy należy wyznaczyć metodą różniczki zupełnej [2]. Na podstawie klasy amperomierza  $kl_A$  i klasy woltomierza  $kl_V$  wyznacza się błędy graniczne pomiaru prądu  $\Delta_{gr}I_X$  i napięcia  $\Delta_{gr}U_X$ :

$$\Delta_{gr}I_X = \frac{kl_A}{100} \cdot I_{zn} , \quad \Delta_{gr}U_X = \frac{kl_V}{100} \cdot U_{zn} , \quad (25)$$

gdzie:  $I_{zn}$ ,  $U_{zn}$  są zakresami amperomierza i woltomierza.

Metoda różniczki zupełnej umożliwia wyliczenie błędu granicznego  $\delta_{gr}R_X$  pomiaru rezystancji. Wymaga ona obliczenia odpowiednich pochodnych cząstkowych z funkcji pomiarowej (7), przemnożeniu ich przez błędy graniczne poszczególnych mierników (25) i zsumowania wartości bezwzględnych [1]:

$$\delta_{gr} R_X = \frac{\Delta_{gr} R_X}{R_X} = \left| \frac{1}{R_X} \frac{\partial R_X}{\partial I_X} \Delta_{gr} I_X \right| + \left| \frac{1}{R_X} \frac{\partial R_X}{\partial U_X} \Delta_{gr} U_X \right|. \quad (26)$$

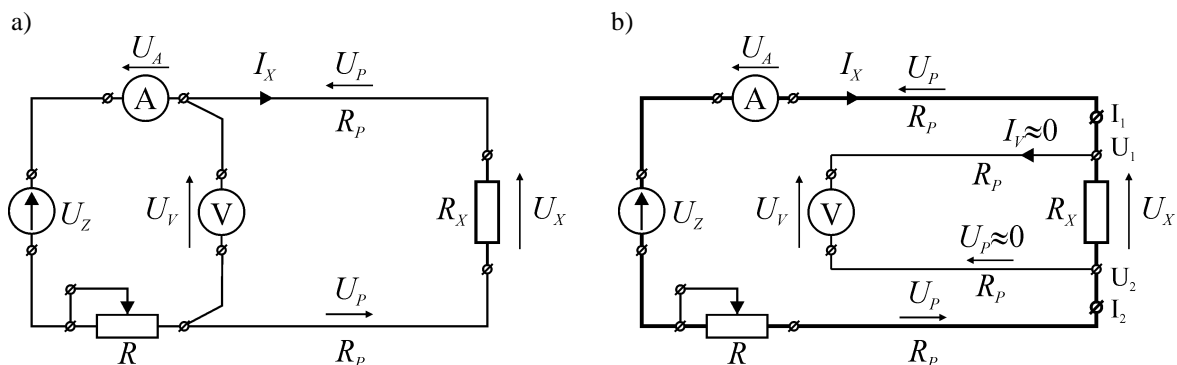
Po wykonaniu odpowiednich przekształceń otrzymamy zależność [1]:

$$\delta_{gr} R_X = \left| \frac{kl_A I_{zn}}{100 I_X} \right| + \left| \frac{kl_V U_{zn}}{100 U_X} \right|. \quad (27)$$

Podsumowując opis metody technicznej należy stwierdzić, że jest ona czasochłonna i kłopotliwa w stosowaniu, wymaga odpowiedniego doboru mierników, właściwej konfiguracji układu pomiarowego (z poprawnie mierzonym prądem lub z poprawnie mierzonym napięciem), wykonania dodatkowych obliczeń i analizy błędów pomiarowych, a przy tym nie zapewnia zbyt dużej dokładności. Metoda techniczna umożliwia jednak pomiar rezystancji przy dowolnie wybranej wartości prądu lub napięcia, co pozwala na pomiar parametrów dwójnika w warunkach jego normalnej pracy. Jest to ważna zaleta metody technicznej, dająca możliwość pomiaru oporności nieliniowych, zależnych od wartości prądu czy napięcia. Pomiarów rezystancji tego typu elementów nie można poprawnie zrealizować stosując mierniki z bezpośrednim odczytem wyniku pomiaru. Dlatego, w pewnych sytuacjach, techniczna metoda pomiaru rezystancji jest nie do zastąpienia. W ćwiczeniu przykładem takiej sytuacji będzie pomiar rezystancji żarówki.

## 2.6. Problemy pomiarów rezystancji bardzo małych

Przy pomiarach rezystancji bardzo małych, około  $1 \Omega$  i mniejszych, istotnym problemem stają rezystancje przewodów połączeniowych i styków. Zagadnienie to wyjaśnia rysunek 4a, na którym przedstawiono mierzony rezystor  $R_X$  dołączony do układu pomiarowego za pomocą dwóch przewodów o rezystancji  $R_p$  każdy. Dodatkowo zaznaczono zaciski przyłączeniowe każdego z elementów układu.



Rys. 4. Schematy układów do pomiaru bardzo małych rezystancji metodą techniczną: a) połączenie dwuprzewodowe (2W), b) połączenie czteroprzewodowe (4W)

Zgodnie z wcześniejszymi wnioskami zastosowano układ z poprawnie mierzonym napięciem, który jest odpowiedni do pomiaru małych rezystancji. Aby otrzymać wystarczająco duże do pomiarów spadki napięć należy zastosować źródło zasilania  $U_Z$  o odpowiednio dużym prądzie wyjściowym. Rezystor regulowany  $R$  umożliwia doregulowanie wymaganej wartości prądu  $I_X$  i zabezpiecza przed przeciążeniem źródła zasilania. W wyniku przepływu prądu  $I_X$ , na rezystancjach przewodów  $R_p$  powstają spadki napięć  $U_p$ , które sumują się za spadkiem napięcia  $U_X$  na mierzonej rezystancji  $R_X$ . Napięcie  $U_V$  na woltomierzu jest więc zawyżone w stosunku do napięcia  $U_X$  na mierzonej rezystancji ( $U_V = U_X + 2U_p$ ), co

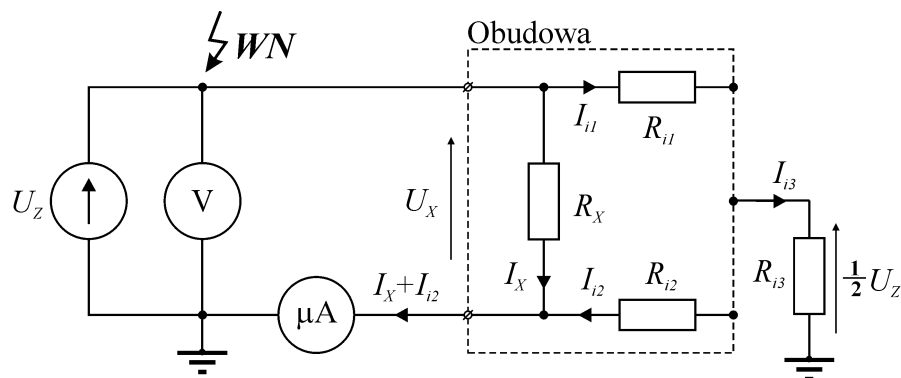
skutkuje dodatkowymi błędami pomiaru. Im cieńsze i dłuższe są zastosowane przewody połączeniowe, tym większy będzie błąd pomiaru przez nie wprowadzony.

Rozwiązaniem tego problemu jest czteroprzewodowe dołączenie mierzonej rezystancji do układu pomiarowego, przedstawione na rysunku 4b. Do jednej pary zacisków  $I_1, I_2$  (nazywanych prądowymi) mierzonego rezystora  $R_X$  dołączony jest obwód prądowy, złożony ze źródła zasilania, amperomierza i rezystora regulacyjnego  $R$ . Do drugiej pary zacisków  $U_1, U_2$  (nazywanych napięciowymi) mierzonego rezystora  $R_X$  dołączony jest obwód napięciowy, złożony tylko z woltomierza. W tym układzie spadki napięcia  $U_P$  na rezystancjach  $R_P$  przewodów obwodu prądowego nie wpływają na wynik pomiaru napięcia woltomierzem. Ponieważ rezystancja  $R_V$  woltomierza jest bardzo duża, to prąd  $I_V$  płynący w obwodzie napięciowym jest bardzo mały ( $I_V \approx 0$ ), a tym samym również spadki napięcia  $U_P$  na przewodach łączących woltomierz z mierzonym rezystorem  $R_X$  można uznać za pomijalnie małe ( $U_P \approx 0$ ). W tym układzie mierzona jest tylko rezystancja znajdująca się dokładnie pomiędzy zaciskami napięciowymi  $U_1$  i  $U_2$ . Pomiar rezystancji małych przedstawioną metodą wymaga wykorzystania czterech przewodów połączeniowych i czterech zacisków na mierzonym rezystorze  $R_X$ , dlatego znana jest ona pod nazwą czteroprzewodowa metoda techniczna pomiaru małych rezystancji (lub metoda czterozaciskowa). Od nazwiska twórcy nazywana jest również metodą Kelvina. W języku angielskim (np. w dokumentacjach technicznych mierników) stosuje się również skrót 4W, od słowa *wire* - *przewód, drut*.

Jeśli rezystor  $R_X$  posiada tylko dwa zaciski, to odpowiednie przewody obwodu prądowego i napięciowego należy dołączyć do tych samych zacisków rezystora  $R_X$ . Często do tego celu stosuje się odpowiednie sondy pomiarowe specjalnej konstrukcji, tzw. klipsy (krokodylki) Kelvina, z których każdy posiada po dwa styki. Ze względu na wymagane duże wartości prądu  $I_X$ , obwód prądowy zazwyczaj łączy się grubszym przewodem, co zaznaczono na schemacie grubszą linią. Przewody w obwodzie napięciowym mogą być cieńsze.

## 2.7. Problemy pomiarów rezystancji wielkich

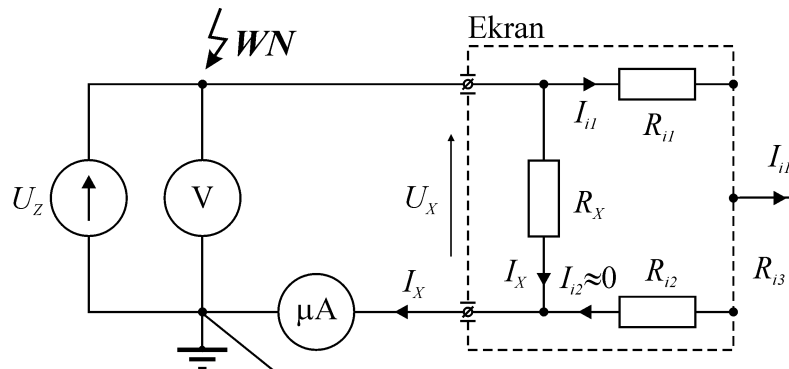
Przy pomiarach rezystancji bardzo dużych, rzędu  $10^6 \Omega$  i większych, problemem stają się prądy płynące przez rezystancję izolacji badanego elementu. Takie rezystancje, których pomiary wymagają zastosowania specjalnych układów ze względu na istotny wpływ prądów płynących przez izolację, w literaturze nazywane są rezystancjami wielkimi. Przed wszystkim pomiary rezystancji wielkich wymagają zastosowania wysokich napięć zasilających, aby uzyskać wartości prądów możliwych do zmierzenia dostępną aparaturą. Ze względów bezpieczeństwa oraz wytrzymałości napięciowej aparatury pomiarowej, nie stosuje się napięć większych od 1000 V, co przy zastosowaniu czułego mikroamperomierza o zakresie  $1 \mu A$  umożliwia pomiar rezystancji  $10^9 \Omega$  i większych. Odpowiedni schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Wpływ rezystancji izolacji na pomiar rezystancji wielkich

Ze względów bezpieczeństwa jeden z zacisków źródła wysokiego napięcia (ujemny) jest uziemiony. Pomiar prądu mikroamperomierzem realizowany jest w przewodzie dołączonym do uziemionego zacisku źródła napięcia zasilającego, dzięki czemu na mikroamperomierzu nie występuje wysokie napięcie, które mogłoby uszkodzić jego izolację oraz stwarzałoby dodatkowe niebezpieczeństwo porażenia podczas jego obsługi. Z wyjaśnionych już wcześniej względów zastosowano układ z poprawnie zmierzonym prądem, odpowiedni do pomiaru rezystancji dużych. Rezystory  $R_{i1}$  i  $R_{i2}$  reprezentują rezystancje izolacji pomiędzy zaciskami mierzonej rezystancji  $R_X$  i jej obudową, a rezystor  $R_{i3}$  reprezentuje rezystancję izolacji pomiędzy tą obudową i ziemią. Przez rezystancję  $R_X$  płynie prąd  $I_X$ , który powinien być zmierzony przez mikroamperomierz. Niestety, przez rezystancje izolacji  $R_{i1}$ ,  $R_{i2}$  oraz  $R_{i3}$  również płyną prądy, odpowiednio:  $I_{i1}$ ,  $I_{i2}$  i  $I_{i3}$ . Prądy te nazywane są prądami upływu (upływnościowymi) izolacji i mogą mieć wartości tego samego rzędu, co prąd płynący przez mierzoną rezystancję  $R_X$ . Jeśli rezystancja  $R_{i3}$  jest znacznie większa od rezystancji  $R_{i1}$  i  $R_{i2}$ , to prąd  $I_{i3}$  można pominąć, a wtedy cały prąd  $I_{i1} = I_{i2}$  doda się do prądu  $I_X$  i zostanie zmierzony przez mikroamperomierz wprowadzając błąd pomiaru. Dodatkowo, dwie rezystancje izolacji  $R_{i1}$  i  $R_{i2}$  o zbliżonych wartościach tworzą dzielnik napięciowy, skutkiem czego na obudowie mierzonego rezystora pojawi się niebezpiecznie wysokie napięcie równe około  $\frac{1}{2} U_Z$ , które może spowodować porażenie osoby wykonującej pomiary. Jeśli rezystancje  $R_{i1}$ ,  $R_{i2}$  oraz  $R_{i3}$  będą porównywalne, to część prądu  $I_{i1}$  płynącego przez izolację wpłynie do ziemi, co zmniejszy błąd pomiaru, nie rozwiąże to jednak tego problemu całkowicie.

W tym celu należy zastosować odpowiednie ekranowanie układu pomiarowego, przedstawione na rysunku 6. Ekran jest dodatkową obudową wykonaną z materiału dobrze przewodzącego prąd (najczęściej z metalu), w której zamocowano izolowane zaciski mierzonej rezystancji. Ekran należy uziemić w sposób pokazany na schemacie (rys. 6), tzn. należy podłączyć go za mikroamperomierzem w miejscu uziemienia ujemnego zacisku źródła wysokiego napięcia. Dzięki temu prąd  $I_{i1}$  popłynie bezpośrednio do ujemnego bieguna napięcia zasilającego i nie będzie wpływał na wynik pomiaru prądu  $I_X$ . Prąd  $I_{i2}$  będzie natomiast równy zero, gdyż po uziemieniu ekranu, z obu stron rezystancji izolacji  $R_{i2}$  będzie występował potencjał ziemi (ponieważ rezystancja mikroamperomierza jest bardzo mała). W układzie tym wpływ rezystancji izolacji  $R_{i1}$  i  $R_{i2}$  na wynik pomiaru zostanie więc skutecznie wyeliminowany. W tym samym celu można również zastosować dodatkowo ekranowanie przewodów połączeniowych oraz wszystkich użytych przyrządów pomiarowych. Wszystkie ekrany, aby ich użycie było skuteczne, należy ze sobą połączyć i uziemić w tym samym punkcie układu pomiarowego. Rozwiązanie takie zastosowano np. w mierniku rezystancji izolacji IMI, którego schemat przedstawiono w dalszej części instrukcji na rysunku 10. Na schematach ideowych ekranowanie oznacza się liniami przerywanymi.



Rys. 6. Układ z ekranem zapewniający poprawny pomiar rezystancji wielkich

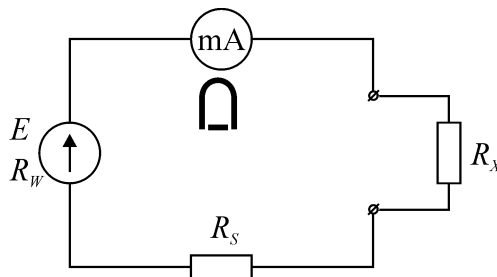
## 2.8. Wpływ temperatury i nieliniowości

Przy pomiarach rezystancji istotnym zagadnieniem jest jej zależność od temperatury i wynikająca stąd nieliniowość. Jeżeli zależność taka występuje, to musi być określona temperatura otoczenia podczas pomiaru, a prąd płynący przez mierzoną oporność powinien być na tyle mały i na tak krótko włączony, by efekt nagrzewania się mierzonego opornika można było pominąć. Często jednak zachodzi konieczność wyznaczenia wartości rezystancji występująca nie w temperaturze otoczenia, lecz w stanie nagrzany opornika, uzyskanym poprzez przepuszczenie przez niego prądu o zadanej wartości lub przyłożenie zadanego napięcia. Na przykład, celem pomiaru może być określenie oporności żarówki lub grzałki elektrycznej podczas pracy przy znamionowym napięciu. W takim przypadku pomiar można wykonać dopiero po odpowiednio długim czasie, gdy badany element osiągnął już ustaloną wartość temperatury. Ważne są wtedy również warunki chłodzenia.

## 3. Inne metody pomiaru rezystancji

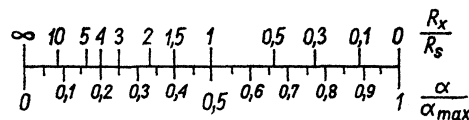
### 3.1. Omomierze szeregowe

Uproszczony schemat omomierza szeregowego przedstawiono na rysunku 7. Składa się on ze źródła zasilania  $E$ , posiadającego rezystancję wewnętrzną  $R_w$ , miliamperomierza magnetoelektrycznego i rezystancji szeregowej  $R_s$ . Wszystkie elementy wraz z rezystancją mierzoną  $R_x$  są połączone szeregowo.



Rys. 7. Uproszczony schemat omomierza szeregowego

Napięcie zasilające  $E$ , zakres miliamperomierza i rezystancja szeregową  $R_s$  są tak dobrane, aby dla  $R_x=0$  miliamperomierz wychylał się do końca swojej skali, gdzie naniesiona jest wartość  $0 \Omega$ . Gdy mierzona rezystancja jest równa wartości rezystora szeregowego  $R_x=R_s$ , to miliamperomierz wychylił się dokładnie do połowy swej skali. W miarę wzrostu mierzonej rezystancji wychylenie miliamperomierza maleje i skala się zagęszcza. Dla wychylenia zerowego naniesiona jest wartość  $\infty$ . Omomierze szeregowe są proste w konstrukcji i wygodne w stosowaniu, posiadają jednak nieliniową skalę przedstawioną na rysunku 8.



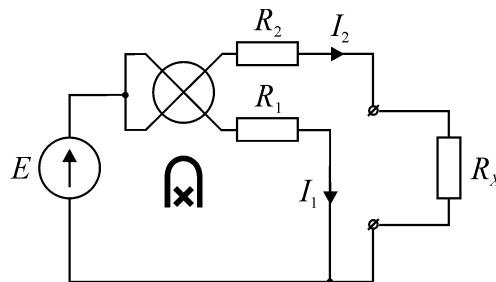
Rys. 8. Nieliniowa podziałka omomierza szeregowego

Omomierze szeregowe zazwyczaj zasilane są z baterii, które podczas pracy ulegają rozładowaniu, co powoduje zmianę wskazań. Dlatego omomierze szeregowe są wyposażone w dodatkowy układ umożliwiający okresowe korygowanie wskazań, najczęściej poprzez zastosowanie regulowanego bocznika włączonego równolegle do miliamperomierza. Zaleca się okresowo zwierać przewodem zaciski omomierza i wyregulować bocznikiem położenie

wskazówki na działkę  $0 \Omega$ . Najpierw jednak zawsze należy przy rozwartych zaciskach omomierza wyregulować zero mechaniczne wskazówki. Omomierze szeregowe są budowane jako samodzielne przyrządy oraz z reguły stanowią wyposażenie mierników uniwersalnych. Rzadziej stosowane są omomierze równoległe o podobnej konstrukcji [1].

### 3.2. Omomierze ilorazowe

Zaletą omomierzy ilorazowych (logometrycznych), w stosunku do omomierzy szeregowych, jest niezależność wskazań od napięcia zasilającego. Omomierze te wykorzystują ustrój magnetoelektryczny z dwoma cewkami, w którym wychylenie wskazówki jest proporcjonalne do ilorazu dwóch prądów (stąd ich nazwa: ustroje ilorazowe). Uproszczony schemat omomierza ilorazowego przedstawiono na rysunku 9.

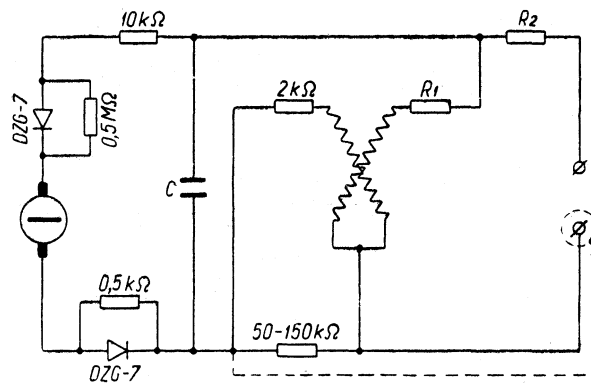


Rys. 9. Uproszczony schemat omomierza ilorazowego

Przez jedną z cewek i rezystor  $R_1$  płynie prąd  $I_1$ , proporcjonalny do napięcia zasilającego  $E$ . Przez drugą cewkę i rezystor  $R_2$  płynie prąd  $I_2$  zależny od mierzonej rezystancji  $R_X$ . Wychylenie  $\alpha$  wskazówki zależy od stosunku tych dwóch prądów:

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{R_2 + R_X}{R_1}\right). \tag{28}$$

Ponieważ rezystancje  $R_1$  i  $R_2$  mają stałe wartości, to wychylenie  $\alpha$  wskazówki jest jednoznacznie funkcją mierzonej rezystancji  $R_X$ . Do zasilania omomierzy ilorazowych zazwyczaj wykorzystuje się wysokonapięciowe prądniczki napędzane ręcznie - tzw. induktry, co umożliwia pomiary dużych rezystancji. Stosuje się napięcia od 250 V do 5 kV, co umożliwia uzyskanie zakresów pomiarowych od 20 M $\Omega$  do 10 G $\Omega$ . Schemat ideowy indukcyjnego miernika rezystancji izolacji typu IMI-1 przedstawiono na rysunku 10 [4].



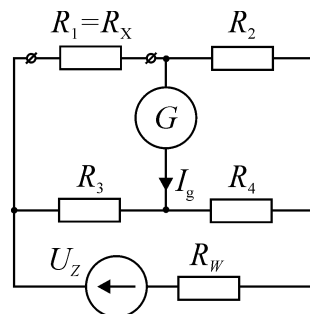
Schemat ideowy mierników IMI-1 i IMI-2

Rys. 10. Schemat indukcyjnego miernika izolacji IMI [4]

Rezystor  $R_1$  i połączona z nim szeregowo cewka stanowią obwód napięciowy. Rezystor  $R_2$  jest rezystorem szeregowym w torze prądowym. Diody  $DZG-7$  i kondensator  $C$  zapewniają zasilanie napięciem stałym. Należy zwrócić uwagę na sposób dołączenia ekranu otaczającego jeden z zacisków (przerywana linia na schemacie), co zostało wyjaśnione we wcześniejszym rozdziale dotyczącym pomiarów rezystancji wielkich i problemu prądów upływu izolacji.

### 3.3. Mostki do pomiaru rezystancji

Schemat czteroramiennego mostka do pomiaru rezystancji, zwanego również mostkiem Wheatstone'a, przedstawiono na rysunku 11. Cztery rezystory  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  stanowią cztery ramiona mostka. Do przekątnej poziomej mostka dołączone jest źródło zasilania  $U_Z$  o rezystancji wewnętrznej  $R_W$ . Do przekątnej pionowej dołączony jest wskaźnik równowagi mostka, np. galwanometr  $G$ . Pomiar polega na takim dobraniu wartości rezystorów, aby mostek był w stanie równowagi, tzn. aby przez wskaźnik równowagi  $G$  nie płynął prąd.

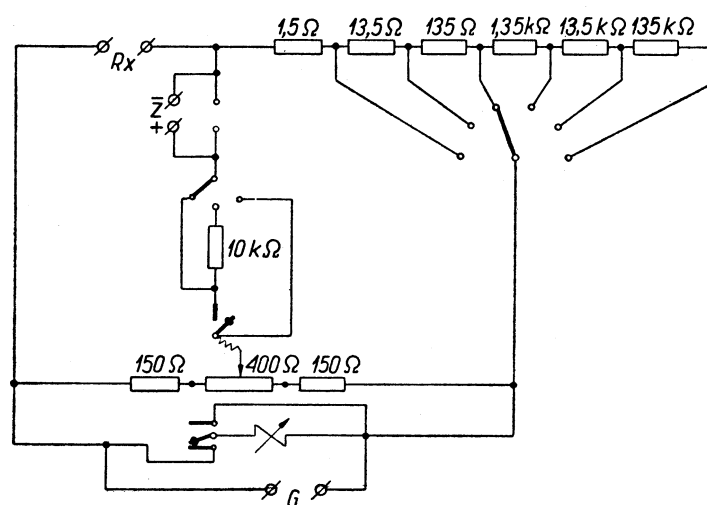


Rys. 11. Zasada pomiaru rezystancji mostkiem czteroramiennym

Jeśli rezystor  $R_1$  jest rezystorem mierzonym  $R_x$ , to jego wartość w stanie równowagi mostka ( $I_g=0$ ) można wyznaczyć ze znanej i łatwej do wyprowadzenia zależności [1]:

$$R_x = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_4} \quad (29)$$

Mostki Wheatstone'a są wykonywane w dwóch wersjach: jako mostki laboratoryjne (dokładniejsze) i mostki techniczne (mniej dokładne). Na rysunku 12 przedstawiono schemat technicznego mostka Wheatstone'a typu MW-4 [5].



Rys. 12. Schemat technicznego mostka Wheatstone'a typu MW-4 [5]

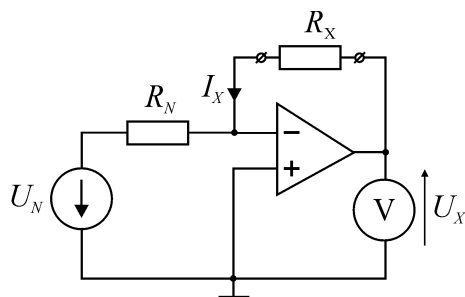


Rezystor  $R_2$  z rysunku 11 w rzeczywistości (rys. 12) składa się z zestawu 6 rezystorów i przełącznika zakresów. Rezystory  $R_3$  i  $R_4$  mostka wykonano w postaci potencjometru  $400\ \Omega$  uzupełnionego dwoma rezystorami  $150\ \Omega$ . Potencjometr jest wprost wyskalowany w wartościach mierzonej rezystancji. Zasilanie  $Z$  włączone jest w przekątną pionową, a galwanometr  $G$  w przekątną poziomą. Mostek umożliwia pomiar rezystancji od  $0,5\ \Omega$  do  $500\ \text{k}\Omega$  z błędem  $1\%$  [5]. Możliwe jest również zasilanie mostka z zewnętrznego źródła napięcia przemiennego, wtedy jako wskaźnik równowagi zaleca się zastosowanie słuchawek.

Do pomiarów rezystancji mniejszych od  $0,5\ \Omega$  stosuje się sześcioramienne mostki Thomsona, w których wpływ przewodów na wynik pomiaru jest wyeliminowany poprzez czteroprzewodowe dołączenie rezystancji mierzonej [1]. Techniczne mostki Thomsona umożliwiają pomiary rezystancji przeciętnie od  $0,5\ \text{m}\Omega$  do  $5\ \Omega$  z błędem  $1\%$ .

### 3.3. Omomierze elektroniczne

Bardzo popularne, wygodne w stosowaniu i stosunkowo dokładne są omomierze elektroniczne. Budowane są one jako samodzielne przyrządy pomiarowe, lub jako wyposażenie multimetrów elektronicznych analogowych i cyfrowych [6]. Stosowane w praktyce omomierze elektroniczne wykorzystują wiele różnych struktur układów pomiarowych. Na rysunku 13 przedstawiono jedno ze stosowanych rozwiązań, wykorzystujące wzmacniacz operacyjny z ujemnym sprzężeniem zwrotnym [2]. W rozwiązaniu tym zastosowano układ w konfiguracji wzmacniacza odwracającego, w którym mierzona rezystancja  $R_X$  jest elementem pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego. Drugi z rezystorów  $R_N$  umożliwia zmianę zakresów, a napięcie wzorcowe  $U_N$  dobrane jest odpowiednio do zakresu woltomierza dołączonego do wyjścia wzmacniacza operacyjnego.



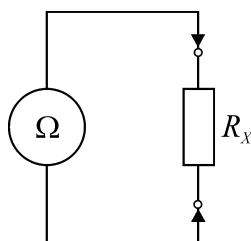
Rys. 13. Omomierz elektroniczny z przetwornikiem typu rezystancja-napięcie

Napięcie wyjściowe  $U_X$  wzmacniacza, mierzone przez woltomierz, jest wprost proporcjonalne do mierzonej rezystancji  $R_X$ :

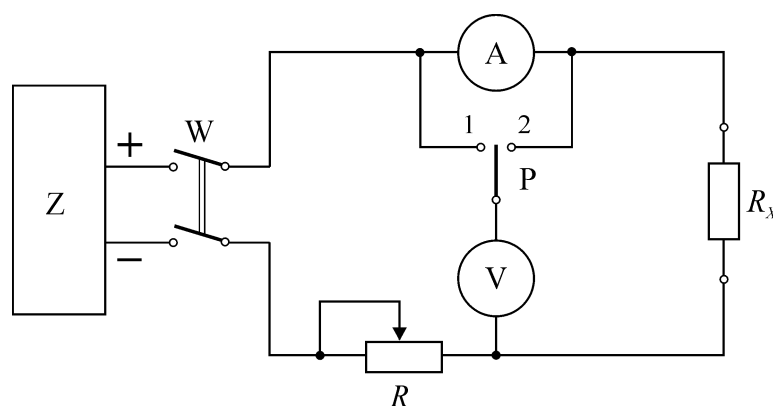
$$U_X = -U_N \frac{R_X}{R_N} . \quad (30)$$

Układ ten jest bardzo często stosowany w multimetrach cyfrowych, gdyż po odpowiednim dobraniu wartości napięcia wzorcowego  $U_N$  i rezystora  $R_N$ , woltomierz cyfrowy wprost pokazuje poprawną wartość mierzonej rezystancji  $R_X$ . Konieczne jest tylko odpowiednie umiejscowienie na wyświetlaczu przecinka dziesiętnego. Pomiar na danym zakresie odbywa się przy stałej wartości prądu, równej ilorazowi  $U_N/R_N$ . Najczęściej wykorzystywany jest zakres woltomierza  $100\ \text{mV}$ , a prąd pomiarowy zazwyczaj nie przekracza wartości  $1\ \text{mA}$ . Uzyskuje się przy tym bardzo wysokie dokładności, a błędy są na poziomie kilku setnych części procenta [6]. Lepszej klasy multimetry cyfrowe umożliwiają również pomiar rezystancji dwuprzewodowy lub czteroprzewodowy (2W/4W, litera W od słowa *Wire*).

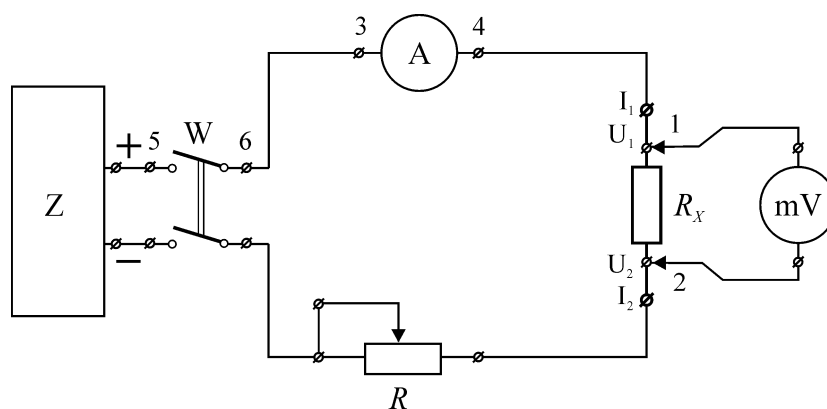
#### 4. Schematy układów pomiarowych stosowanych w ćwiczeniu



Rys. 14. Schemat układu do bezpośredniego pomiaru rezystancji



Rys. 15. Schemat układu do pomiaru rezystancji metodą techniczną



Rys. 16. Schemat układu do pomiaru małych rezystancji metodą techniczną czteroprzewodową

#### Oznaczenia:

- $R_x$  – rezystor mierzony – 4 rezystancje liniowe oraz 1 rezystancja nieliniowa,
- $\Omega$  – omomierz – 3 rodzaje różnego typu,
- A – amperomierz magnetoelektryczny wielozakresowy,
- V – woltomierz magnetoelektryczny wielozakresowy na zakresie 15 V,
- mV – miliwoltomierz – multimetr cyfrowy na zakresie 100mV,
- R – rezystor suwakowy regulacyjny,
- Z – zasilacz prądu stałego,
- W – rozłącznik dwubiegunowy,
- P – przełącznik dwupozycyjny.

## 5. Wykonanie ćwiczenia

### 5.1. Przygotowanie protokołu i wykazu wykorzystywanej aparatury

- 5.1.1. Protokół należy przygotować **przed zajęciami**. Protokół powinien zawierać:
- temat ćwiczenia, datę i dane personalne obecnych na zajęciach członków zespołu,
  - kolejne tematy zadań przewidzianych do realizacji podczas ćwiczenia,
  - schematy ideowe wykorzystywanych układów pomiarowych,
  - tabele niezbędne do zapisywania wyników pomiarów,
  - odpowiednie wzory obliczeniowe.

5.1.2. Przed rozpoczęciem pomiarów należy zanotować do protokołu parametry wykorzystywanej aparatury stosując oznaczenia zgodnie ze schematami na rysunkach 14 do 16. Wykorzystać informacje z tabliczek znamionowych aparatury i dostępnej dokumentacji.

Dla mierników wskazówkowych należy przepisać wszystkie informacje umieszczone na podzielniku. Zwrócić szczególną uwagę na klasę oraz na sposób zapisu wartości rezystancji wewnętrznej amperomierza i woltomierza. Dla uniknięcia pomyłki należy w protokole zapisać te wartości przede wszystkim w postaci podanej przez producenta miernika, a następnie przeliczyć odpowiednio do wykorzystywanych w ćwiczeniu zakresów pomiarowych.

Dla multimetru cyfrowego należy z jego dokumentacji przepisać te parametry, które będą niezbędne do wykonania sprawozdanie: wykorzystywane zakresy pomiarowe, rezystancje wewnętrzne, informacje o błędach granicznych. Pomiar rezystancji wykonać metodą 2W.

Przepisać z tabliczki znamionowej i z płyty czołowej parametry zasilacza.

Zanotować wszystkie dostępne informacje o badanych elementach. Do pomiarów będą wykorzystane następujące elementy:

$R_{X1}$  – rezystor warstwowy metalizowany MŁT,

$R_{X2}$  – rezystor drutowy,

$R_{X3}$  – rezystor dodatkowy do woltomierza TLEM-2 rozszerzający zakres 300 V na 600 V

$R_{X4}$  – Uzwojenie wtórne laboratoryjnego przekładnika prądowego 50-25-10 A/5A,

$R_{X5}$  – żarówka z włóknem wolframowym 230 V/60 W.

### 5.2. Bezpośrednie pomiary rezystancji

5.2.1. W układzie przedstawionym na rysunku 14 zmierzyć metodą bezpośrednią rezystancję czterech danych oporników liniowych  $R_{X1}$ ,  $R_{X2}$ ,  $R_{X3}$ ,  $R_{X4}$ . i jednego elementu nieliniowego  $R_{X5}$  (żarówki). W omomierzach wskazówkowych należy przed pomiarami sprawdzić i ewentualnie wyregulować położenie wskazówki dla wartości  $R=\infty$  oraz  $R=0$ , posługując się przy tym opisem w instrukcji obsługi danego przyrządu. Wyniki pomiarów zapisywać w tabelce 2. Zanotować również temperaturę  $t_0$  w laboratorium.

**Uwaga:** w tabelce nie należy wpisywać wyników pomiarów w postaci  $0 \Omega$  lub  $\infty$ . Jeżeli rezystancja mierzona okaże się większa lub mniejsza od wartości granicznej zakresu pomiarowego przyrządu, należy oszacować tę wartość graniczną i zapisać wynik pomiaru za pomocą symboli  $>$  lub  $<$  od tej wartości granicznej.

5.2.2. Na podstawie dokumentacji omomierzy uzupełnić tabelkę 2 wartościami błędów bezwzględnych  $\Delta R_X$  i względnych  $\delta R_X$  pomiarów każdej z rezystancji. W sprawozdaniu należy dodatkowo wskazać najodpowiedniejszy omomierz do pomiaru każdej z rezystancji.

### 5.3. Pomiary rezystancji liniowych metodą techniczną

5.3.1. W układzie przedstawionym na rysunku 15 zmierzyć metodą techniczną rezystancję czterech danych oporników liniowych  $R_{X1}$ ,  $R_{X2}$ ,  $R_{X3}$ ,  $R_{X4}$ . Każdy z rezystorów należy zmierzyć dwukrotnie: raz w układzie z poprawnie mierzonym prądem i drugi raz w układzie z poprawnie mierzonym napięciem. Wyniki pomiarów zapisywać odpowiednio w tabelce 3

oraz w tabelce 4. Odpowiednią konfigurację układu pomiarowego należy uzyskiwać poprzez właściwe ustawienia przełącznika  $P$  w pozycję 1 lub 2. Dla każdego zrealizowanego pomiaru należy w tabelkach zanotować rezystancję amperomierza  $R_A$  i woltomierza  $R_V$  na wykorzystywanym w danym pomiarze zakresie.

**Uwaga:** Podczas wykonywania pomiarów rezystancji metodą techniczną miernikami wskazówkowymi należy pamiętać o przestrzeganiu następujących zasad:

- nie przekraczać w układzie napięcia 15 V, nie zmieniać zakresu woltomierza,
- przed dołączeniem kolejnego rezystora  $R_X$  do układu pomiarowego należy otworzyć łącznik  $W$ , ustawić maksymalną wartość rezystora regulacyjnego  $R$  oraz maksymalny zakres pomiarowy na amperomierzu i minimalną wartość napięcia zasilającego,
- po włączeniu zasilania, dla każdego mierzonego rezystora należy tak dobrać zakresy przyrządów pomiarowych i ustawienia elementów regulacyjnych (napięcie zasilania i rezystor regulacyjny), aby wskazania amperomierza i woltomierza były jak najbliższe pełnemu wychyleniu wskazówki, co zapewnia najdokładniejszy pomiar,
- wskazania przyrządów wskazówkowych należy odczytywać precyzyjnie z rozdzielczością  $1/5$  działki i nie wolno ich bardziej zaokrąglić. Dla uniknięcia błędów paralaksy należy odpowiednio korzystać z lusterka znajdującego się pod skalą,
- przed każdym pomiarem zaleca się w miarę możliwości ustawić wskazanie jednego z przyrządów (amperomierza lub woltomierza) precyzyjnie na wybraną działkę w pobliżu końca zakresu (najlepiej na końcu zakresu pomiarowego), a wskazania drugiego z przyrządów należy odczytywać precyzyjnie z rozdzielczością  $1/5$  działki,
- pomiar rezystancji danego rezystora należy wykonać w układzie z poprawnie mierzonym prądem i w układzie z poprawnym mierzonym napięciem w ten sposób, aby jeden z przyrządów (amperomierz lub woltomierz) pokazywał w obu układach tę samą lub zbliżoną wartość, wtedy łatwo można ocenić wpływ konfiguracji układu na wynik pomiaru.

5.3.2. W sprawozdaniu należy dla każdego pomiaru wyznaczyć oporność  $R'_X$ ,  $R''_X$  ze wzoru przybliżonego (10), (16) oraz oporność  $R_X$  z odpowiedniego wzoru ścisłego (9), (15). Obliczyć błędy metody  $\delta_A$  (13) i  $\delta_V$  (19), błąd graniczny wnoszony przez mierniki  $\delta_{gr}R_X$  (27) oraz wartość rezystancji granicznej  $R_{Xgr}$  (21). Wszystkie wyniki obliczeń zapisać odpowiednio w tabelce 3 lub 4.

5.3.3. We wnioskach należy określić, który z układów jest korzystniejszy do pomiaru każdej z wartości rezystancji i wyjaśnić dlaczego. Porównać błędy metody  $\delta_A$  i  $\delta_V$  z błędami granicznymi  $\delta_{gr}R_X$  wnoszonymi przez mierniki, wyciągnąć wnioski.

## 5.4. Pomiary rezystancji nieliniowej metodą techniczną

5.4.1. W układzie przedstawionym na rysunku 15 wyznaczyć kilka punktów (od 5 do 8 równomiernie rozmieszczonych pomiarów) charakterystyki prądowo – napięciowej  $U_X=f(I_X)$  elementu nieliniowego  $R_{X5}$ . W tym celu należy:

- na podstawie tabelki 2 ustalić początkową wartość rezystancji  $R_{X5}$  i na tej podstawie ustalić właściwą konfigurację układu pomiarowego, zapewniającą dokładniejsze pomiary,
- ustawić wybraną konfigurację układu pomiarowego za pomocą przełącznika  $P$  i zanotować w protokole. Wstępnie oszacować punkt początkowy i końcowy charakterystyki możliwe do uzyskania w wykorzystywanym układzie pomiarowym i na tej podstawie zaplanować i zapisać w tabelce 5 proponowane wartości prądu lub napięcia (5 – 8 punktów),
- wykonać zaplanowane pomiary i zapisać wyniki w tabelce 5.

5.4.2. Opracować wyniki pomiarów analogicznie jak w punkcie 5.3. Dodatkowo obliczyć rezystancję statyczną  $R_s$  (3) i dynamiczną  $R_d$  (4) oraz temperaturę włókna żarówki (6b).

5.4.3 W sprawozdaniu na podstawie danych znamionowych żarówki  $U_N$ ,  $P_N$  obliczyć jej rezystancję znamionową  $R_N$  przy zasilaniu znamionowym napięciem. Korzystając z danych

zawartych w tabelce 1 dla wolframu, obliczyć na podstawie zależności (6b) temperaturę  $t_N$  włókna żarówki w znamionowych warunkach pracy oraz podczas wykonanych pomiarów.

5.4.4. Przedstawić na wykresach: charakterystykę prądowo – napięciową żarówki oraz rezystancję statyczną, rezystancję dynamiczną i temperaturę włókna żarówki w funkcji prądu.

## 5.5. Pomiary rezystancji małych metodą techniczną czteroprzewodową

5.5.1. W układzie przedstawionym na rysunku 16 zmierzyć rezystancję metodą techniczną czteroprzewodową rezystora o małej wartości, rezystancję przewodu połączeniowego, rezystancję amperomierza oraz rezystancję styku łącznika. W tym celu należy:

– na podstawie tabelki 2 ustalić rezystor o najmniejszej wartości i dołączyć go do układu pomiarowego. Na rysunku 16 nie zaznaczono woltomierza i przełącznika  $P$ , które występują na wcześniejszym schemacie. **Nie należy jednak ich odłączać**, gdyż ich obecność nie wpływa na wyniki pomiarów po przestawieniu przełącznika  $P$  w pozycję 1. Multimetr cyfrowy skonfigurować do pomiaru napięć stałych DCV na zakresie 100 mV.

– ustawić za pomocą rezystora regulacyjnego  $R$  możliwie dużą wartość prądu, zwracając uwagę, aby nie przeciążyć zasilacza i amperomierza.

5.5.2. Zmierzyć rezystancję rezystora o małej wartości dołączając multimetr cyfrowy do punktów 1 – 2 na rezystorze. Jeśli są dostępne oddzielne zaciski napięciowe i prądowe, to należy je odpowiednio wykorzystać zgodnie ze schematem. Zapisać wyniki pomiaru w tabelce 6.

5.5.3. Zmierzyć rezystancję przewodu połączeniowego dołączając multimetr cyfrowy do punktów 1 – 4 na końcach przewodu. Zanotować do protokołu długość przewodu, jego przekrój i typ. Zapisać wyniki pomiaru w tabelce 6. W sprawozdaniu należy obliczyć rezystancję przewodu o długości 1 km i porównać z danymi katalogowymi [7].

5.5.4. Zmierzyć rezystancję styków łącznika  $W$  dołączając multimetr cyfrowy do punktów 5 – 6 na tym łączniku. Zapisać wyniki pomiaru w tabelce 6.

5.5.5. Zmierzyć rezystancję wewnętrzną amperomierza dołączając multimetr cyfrowy do punktów 3 – 4 na tym amperomierzu. Zapisać wyniki pomiaru w tabelce 6. Porównać uzyskany wynik z danymi producenta.

5.5.6. Opracować wyniki pomiarów analogicznie jak w punkcie 5.3.

## 5.6. Przykładowe tabelki na wyniki pomiarów i obliczeń

Tab. 2. Wyniki bezpośrednich pomiarów rezystancji

Typ omomierza	Wyniki pomiarów i wartości błędów bezpośrednich pomiarów rezystancji														
	$t_0 =$ °C														
	$R_{X1}$	$\Delta R_{X1}$	$\delta R_{X1}$	$R_{X2}$	$\Delta R_{X2}$	$\delta R_{X2}$	$R_{X3}$	$\Delta R_{X3}$	$\delta R_{X3}$	$R_{X4}$	$\Delta R_{X4}$	$\delta R_{X4}$	$R_{X5}$	$\Delta R_{X5}$	$\delta R_{X5}$
	$\Omega$	$\Omega$	%	$\Omega$	$\Omega$	%	$\Omega$	$\Omega$	%	$\Omega$	$\Omega$	%	$\Omega$	$\Omega$	%

Tab. 3. Wyniki pomiarów rezystancji metodą techniczną w układzie z poprawnie mierzonym prądem

Ip.	Rezystor	P	$I_A$	$U_V$	$R'_X$	$R_X$	$R_A$	$R_V$	$R_{X\ gr}$	$\delta_A$	$\delta_{gr} R_X$
		pozycja	A	V	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	%	%
1	$R_{X1}$										
2	$R_{X2}$										
3	$R_{X3}$										
4	$R_{X4}$										

Tab. 4. Wyniki pomiarów rezystancji metodą techniczną w układzie z poprawnie mierzonym napięciem

Ip.	Rezystor	P	$I_A$	$U_V$	$R''_X$	$R_X$	$R_A$	$R_V$	$R_{X_{gr}}$	$\delta_V$	$\delta_{gr} R_X$
		pozycja	A	V	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	%	%
1	$R_{X1}$										
2	$R_{X2}$										
3	$R_{X3}$										
4	$R_{X4}$										

Tab. 5. Wyniki pomiarów rezystancji nieliniowej metodą techniczną

Mierzony rezystor	P	$R_A$	$R_V$	$R_{X_{gr}}$	$U_N$	$P_N$	$I_N$	$R_N$	$R(t_0)$	$t_N$	
	pozycja	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	V	W	A	$\Omega$	$\Omega$	$^{\circ}\text{C}$	
$R_{X5}$											
Wyniki pomiarów i obliczeń										$t_0 =$	$^{\circ}\text{C}$
Ip.	$I_A$	$U_V$	$I_X$	$U_X$	$R'_X$	$R_X$	$R_s$	$R_d$	$\delta_A$	$\delta_{gr} R_X$	$t$
	A	V	A	V	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	%	%	$^{\circ}\text{C}$
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											

Tab. 6. Wyniki pomiarów rezystancji małych metodą techniczną czteroprzewodową

Ip.	Punkty pomiarowe	Opis pomiaru	$I_A$	$U_V$	$R''_X$	$R_X$	$R_A$	$R_V$	$R_{X_{gr}}$	$\delta_V$	$\delta_{gr} R_X$
			A	mV	m $\Omega$	m $\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	%	%
1	1 - 2										
2	4 - 1										
3	5 - 6										
4	3 - 4										

### 5.7. Opracowanie wyników pomiarów i przygotowanie sprawozdania

W sprawozdaniu należy przedstawić opis stanowiska pomiarowego oraz w punktach kolejno praktycznie zrealizowane zadania pomiarowe podając: temat zadania pomiarowego, schemat układu pomiarowego, wykaz przyrządów, tabelkę z wynikami pomiarów i obliczeń, niezbędne wzory obliczeniowe, przykładowe obliczenia, wykresy przewidziane programem ćwiczenia.

Opracowując wyniki pomiarów należy pamiętać o przestrzeganiu następujących zasad:

– w pierwszej kolejności obliczamy wartości błędów i zaokrąglamy je zawsze w górę do jednej lub dwóch cyfr znaczących, tak aby zaokrąglenie nie przekraczało 20%. W praktyce zazwyczaj błędy podajemy tylko z jedną cyfrą znaczącą lub co najwyżej z dwoma cyframi znaczącymi, jeśli pierwsza z nich jest jedyneką. Nigdy nie podajemy błędów z trzema i więcej cyframi znaczącymi.

– w drugiej kolejności zaokrąglamy poprawnie wynik pomiaru, odpowiednio w górę lub w dół zgodnie z ogólnymi zasadami, tak aby odrzucić wszystkie cyfry leżące na pozycjach

o wartościach mniejszych od wartości obliczonych błędów. Niewłaściwe jest podawanie wyniku pomiaru zarówno ze zbyt dużą liczbą cyfr znaczących (niezaokrąglonego), jak i ze zbyt małą liczbą cyfr znaczących (za bardzo zaokrąglonego).

We wnioskach należy przedstawić własne uwagi na temat zrealizowanych pomiarów, omówić napotkane trudności, podsumować uzyskane wyniki i błędy. W szczególności należy przeanalizować i skomentować następujące zagadnienia:

- jakiego rodzaju rezystory były mierzone w ćwiczeniu ?
- które z mierzonych rezystorów należało potraktować jako duże, a które jako małe ?
- ile wynosiła rezystancja graniczna w poszczególnych pomiarach ?
- ile wyniosły błędy metody, a ile błędy wnoszone przez mierniki ? Które były mniejsze ?
- czy udało się zauważyć nieliniowość rezystancji któregoś z obiektów ?
- jaką rezystancję posiadają przewody połączeniowe użyte w ćwiczeniu ?
- czy rezystancja przewodów okazała się istotna w pomiarach któregoś z obiektów ?
- czy zmierzona rezystancja przewodu jest zgodna z danymi katalogowymi ?
- czy metodą techniczną można było zmierzyć rezystancję wszystkich badanych elementów z wystarczającą dokładnością ?

## 6. Pytania kontrolne

1. Wyjaśnij pojęcia: rezystancja, rezystor.
2. Przedstaw fizyczne podstawy zjawiska oporu elektrycznego.
3. Omów problemy występujące w pomiarach rezystancji bardzo małych i wyjaśnij sposoby ich rozwiązywania. Objasnij symbole  $2W / 4W$ .
4. Omów problemy występujące w pomiarach rezystancji wielkich i wyjaśnij sposoby ich rozwiązywania. Wyjaśnij cel stosowania ekranu i sposób jego podłączenia.
5. Jakie rezystancje traktujemy jako małe, a jakie jako duże ?
6. Jakie rezystancje traktujemy jako bardzo małe, a jakie jako wielkie ?
7. Co to jest rezystancja graniczna w metodzie technicznej pomiaru rezystancji ?
8. Kiedy i dlaczego stosujemy metodę techniczną z poprawnie mierzonym prądem ?
9. Kiedy i dlaczego stosujemy metodę techniczną z poprawnie mierzonym napięciem ?
10. Jak obliczamy błędy metody technicznej ?
11. Jak w metodzie technicznej obliczamy błędy wnoszone przez mierniki ?
12. Które z błędów w metodzie technicznej są błędami systematycznymi i jakie z tego wynikają wnioski i zalecenia ?
13. Co to są elementy liniowe i nieliniowe ? Podaj przykłady.
14. Wyjaśnij prawo Ohma i jego zastosowanie w pomiarach rezystancji.
15. Czy rezystancja mierzona przy prądzie stałym i przemiennym jest taka sama ?
16. Omów budowę omomierza szeregowego.
17. Omów budowę omomierza ilorazowego.
18. Wyjaśnij zasadę działania i przeznaczenie miernika typu IMI.
19. Omów zastosowanie mostków w pomiarach rezystancji.
20. Wyjaśnij na schemacie budowę technicznego mostka Wheatstone'a
21. Jakie są zalety i wady metody technicznej pomiaru rezystancji ?

## 7. Literatura

1. Chwaleba A. i inni, Metrologia elektryczna, WNT, Warszawa 2009.
2. Marcyniuk A. i inni, Podstawy metrologii elektrycznej, WNT, Warszawa 1984.
3. Tablice fizyczno-astronomiczne, Wyd. Adamantan, Warszawa 1995.
4. Induktorowy miernik oporności izolacji IMI, Instrukcja eksploatacji, ZWPP "ERA"
5. Techniczny mostek Wheatstone'a typ MW-4, Instrukcja eksploatacji, ZWPP "ERA"
6. Agilent 34405 5½ Digit Multimeter User's and Service Guide.
7. Kable i przewody elektroenergetyczne, Katalog Tele-Fonika Kable S.A.