

POLITECHNIKA  **BIAŁOSTOCKA**

WYDZIAŁ  **INŻYNIERII
ZARZĄDZANIA**

KATEDRA ZARZĄDZANIA PRODUKCJĄ

Instrukcja do zajęć laboratoryjnych z przedmiotu:

Podstawy techniki i technologii

Kod przedmiotu: ISO02123, INO02123

Ćwiczenie nr 13

POMIARY NAPIĘCIA, PRĄDU I REZYSTANCJI

O p r a c o w a ł :

dr inż. Arkadiusz Łukjaniuk

Białystok 2023

Wszystkie prawa zastrzeżone.

Wszystkie nazwy handlowe i towarów występujące w niniejszej instrukcji są znakami towarowymi zastrzeżonymi lub nazwami zastrzeżonymi odpowiednich firm odnośnych właścicieli.

Celem ćwiczenia jest nauczenie studentów poprawnego posługiwania się przyrządami do pomiaru napięcia, prądu i rezystancji. Powinni oni wiedzieć w jakiej sytuacji zastosować mierniki DC, AC i RMS.

1. POMIARY NAPIĘCIA I PRĄDU

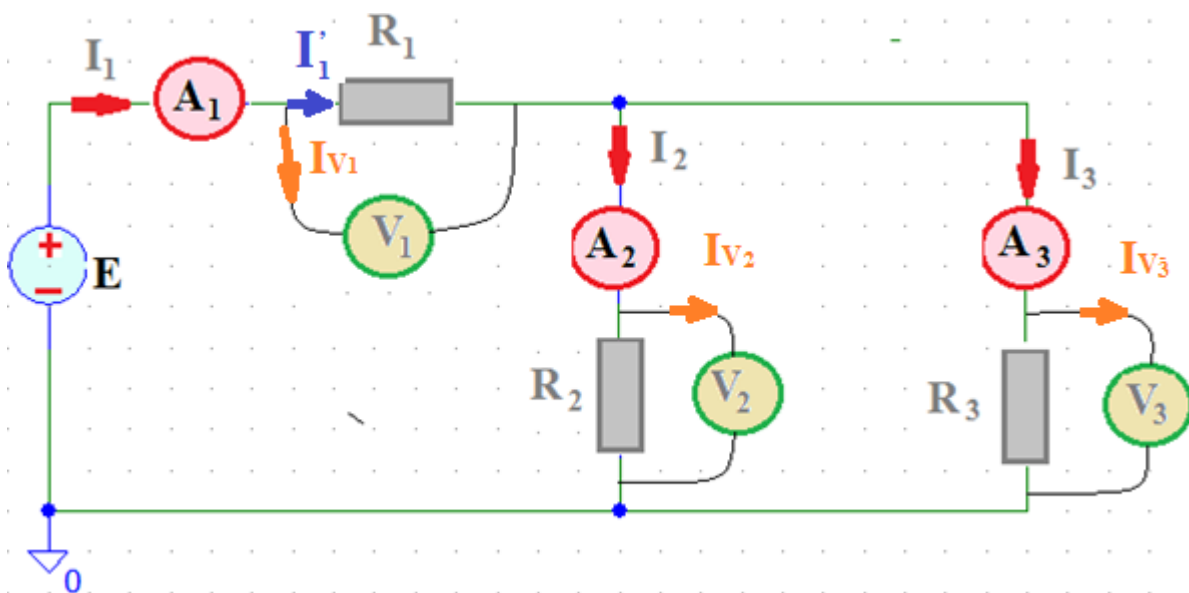
Napięcie jest różnicą potencjałów występujących między dwoma zaciskami obwodu elektrycznego. Obwody, w których dokonywany jest pomiar napięcia, mogą posiadać różną konfigurację i parametry. Na rys. 1 przedstawiony jest obwód elektryczny prądu stałego zasilanego ze źródła **E** z zaznaczonymi kierunkami przepływu prądu i przykładowymi miejscami podłączeń amperomierzy (**A**) i woltomierzy (**V**). Pomiar napięcia (prądu) w obwodach należy do najczęściej spotykanych w praktyce pomiarowej. Zakresy typowych przyrządów pozwalają na pomiary bezpośrednie napięć od kilkudziesięciu miliwoltów do setek woltów. Przyłączenie przyrządu pomiarowego do badanego obwodu narusza stan energetyczny obwodu powodując w nim zmiany napięć i rozpyły prądów, a więc zmianę wartości mierzonej. Zmiana ta będzie tym mniejsza, im mniejszą moc będzie pobierał włączony do obwodu przyrząd. Skutkiem tego wskazania przyrządów w zauważalny sposób mogą być inne od wartości występujących przed ich włączeniem. Włączenie do obwodu przyrządu pomiarowego powoduje zmianę wartości wielkości mierzonej.

Na rys. 1 podłączenie woltomierza **V₁** powoduje, że prąd **I'₁** płynący przez rezystor **R₁** jest mniejszy od prądu **I₁** o wartość prądu **I_{v1}** płynącego przez woltomierz **V₁**.

Moc pobierana przez woltomierz (amperomierz) zależy od rezystancji wewnętrznej woltomierza (amperomierza) i wynosi:

$$P_V = \frac{U_V^2}{R_V}; \quad P_A = R_A \cdot I_A^2 .$$

Zatem idealny woltomierz powinien mieć rezystancję **R_v=∞**. Warunek ten jest bliski do spełnienia w woltomierzach cyfrowych. Woltomierze analogowe (wskazówkowe) posiadają relatywnie dużą wartość rezystancji wewnętrznej zależną od zakresu pomiarowego.



Rys. 1. Prosty obwód elektryczny z podłączonymi przyrządami pomiarowymi.

Napięcie na rezystorze obliczamy z zależności:

$$V_1 = R_1 \cdot I_1, \quad (1)$$

a zgodnie z I prawem Kirchhoffa można zapisać:

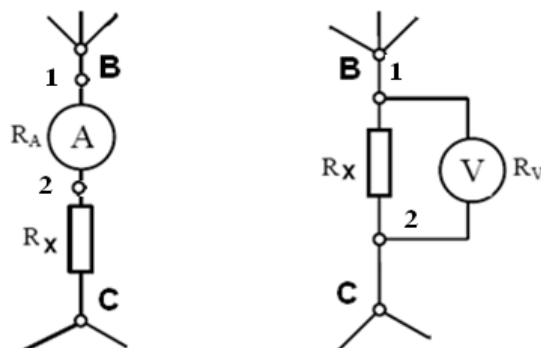
$$I_1 = I_2 + I_3. \quad (2)$$

Moc pobierana ze źródła **E** wyliczamy ze wzoru:

$$P_E = E \cdot I_1. \quad (3)$$

Planując pomiar, należy wybrać taką metodę oraz takie narzędzia pomiarowe, które w najmniejszym stopniu wpłynę na wynik pomiaru.

Najczęściej używanymi przyrządami pomiarowymi są amperomierze i woltomierze. Amperomierz włączany jest zawsze (lub prawie zawsze) szeregowo z gałęzią sieci, zaś woltomierz równoległe do gałęzi (rys.2).



Rys. 2. Typowe sposoby włączania podstawowych przyrządów pomiarowych.

Włączenie amperomierza powiększa rezystancję R_{BC} gałęzi, włączenie woltomierza zaś zmniejsza tę rezystancję (dla prostoty ograniczamy rozważania do obwodów prądu stałego). Jeżeli przed włączeniem amperomierza rezystancja gałęzi wynosiła R_x , to po włączeniu tego przyrządu będzie równa R_{BC} :

$$R_{BC} = R_x + R_A,$$

gdzie: R_A oznacza rezystancję wewnętrzną amperomierza.

Wpływ amperomierza na sieć będzie jak najmniejszy, tj. $R_x \approx R_{BC}$, wtedy gdy $R_A \ll R_x$. W przypadku woltomierza jest analogicznie: jeżeli przed jego włączeniem rezystancja gałęzi wynosiła R_x , to po włączeniu tego przyrządu wyniesie:

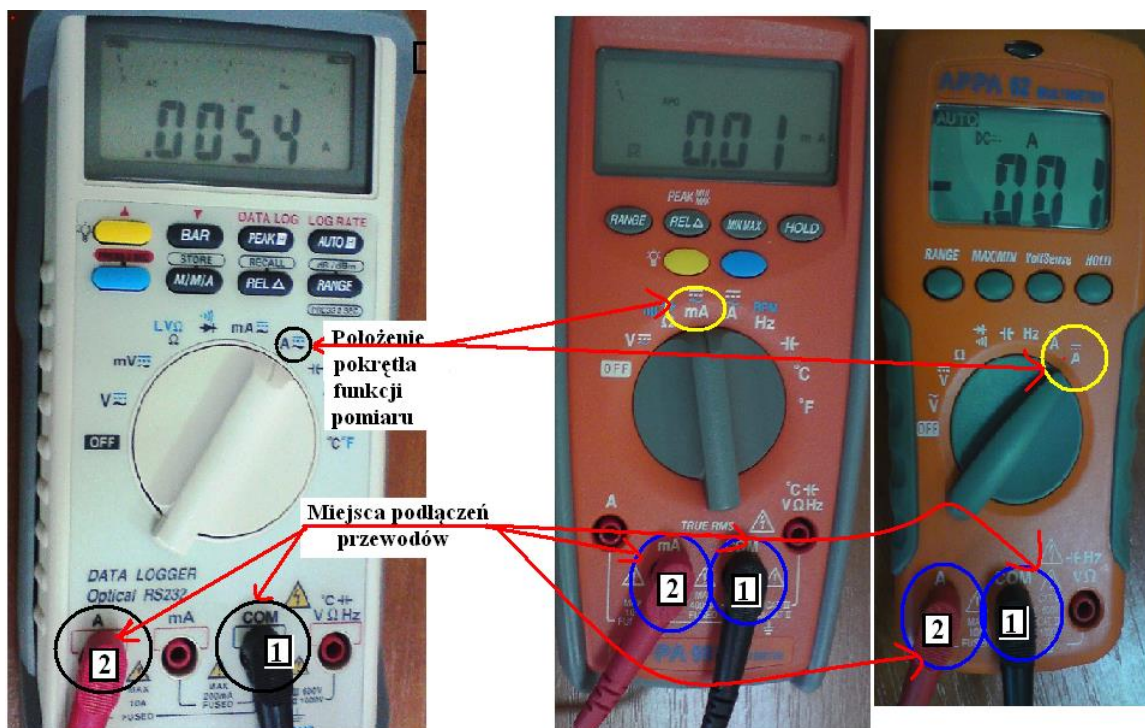
$$R_{BC} = \frac{R_x R_v}{R_x + R_v} = \frac{R_x}{\frac{R_x}{R_v} + 1}$$

Więc jeżeli chcemy, aby woltomierz jak najmniej zniekształcał stan mierzonej sieci, czyli aby $R_{BC} \approx R_x$, powinniśmy zadbać o spełnienie warunku:

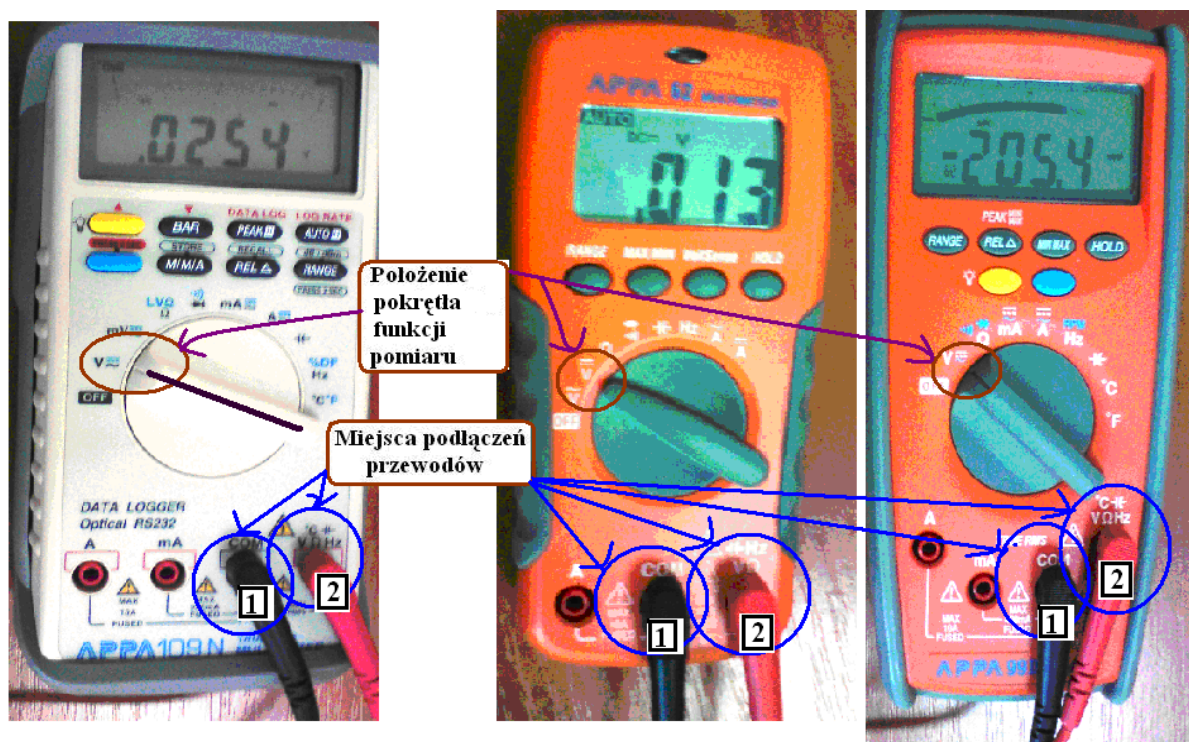
$$\frac{R_x}{R_v} \approx 0, \text{ tzn. aby } R_v \gg R_x.$$

Logicznym jest stwierdzenie, że zapewnienie, w trakcie pomiarów, niezmienności parametrów jednej gałęzi gwarantuje niezmiennosc stanu całej sieci.

Na rysunku 3 przedstawiony jest sposób włączania multimetrów cyfrowych wykorzystywanych do pomiaru prądu (punkty 1 i 2 odpowiadają miejscom podłączenia przyrządu pokazane na rysunku 2). Pokrętła wyboru funkcji pomiarowej powinny być ustawione naprzeciw symbolu A lub mA.



Rys. 3. Ilustracja miejsc podłączeń przewodów do multimetrów podczas pomiaru prądu.



Rys. 4. Ilustracja miejsc podłączeń przewodów do multimetrów podczas pomiaru napięcia.

Analogicznie jest pokazany sposób podłączenia multimetru podczas pomiaru napięcia (rys. 4).



Rys. 5. Ilustracja miejsca podłączeń przewodów do multimetru APPA207 podczas pomiaru napięcia (niebieski przycisk służy do zmiany trybu pomiaru AC/DC, żółte czworokąty oznaczają miejsca podłączeń przewodów przy pomiarze prądu, COM – oznacza gniazdo wejściowe dla wszystkich pomiarów).

W praktyce spotykamy się z pomiarami napięć stałych (DC) i zmiennych (AC). Te ostatnie mogą być sinusoidalnie zmiennie lub odkształcone.

Na rysunku 6 przedstawiony jest prosty obwód elektryczny zasilany napięciem zmiennym. Do wyznaczenia wartości prądów lub spadków napięć potrzebna jest znajomość rachunku liczb zespolonych. Liczbę zespoloną (np. impedancję) można zapisać w następujący sposób:

$$\underline{Z} = R + jX = Ze^{j\varphi}, \quad (4)$$

gdzie: Z – moduł impedancji w Ω ;

R - rezystancja w Ω ;

X – reaktancja w Ω ;

φ – faza w rad.

Moduł impedancji Z obliczamy:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (5)$$

a fazę φ :

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R}. \quad (6)$$

Z elektrotechniki wiadomo, że wartość prądu \underline{I}_1 możemy wyznaczyć z ilorazu napięcia zasilającego \underline{E} i impedancji obwodu \underline{Z} :

$$I_1 = \frac{E}{Z}, \quad (7)$$

gdzie:

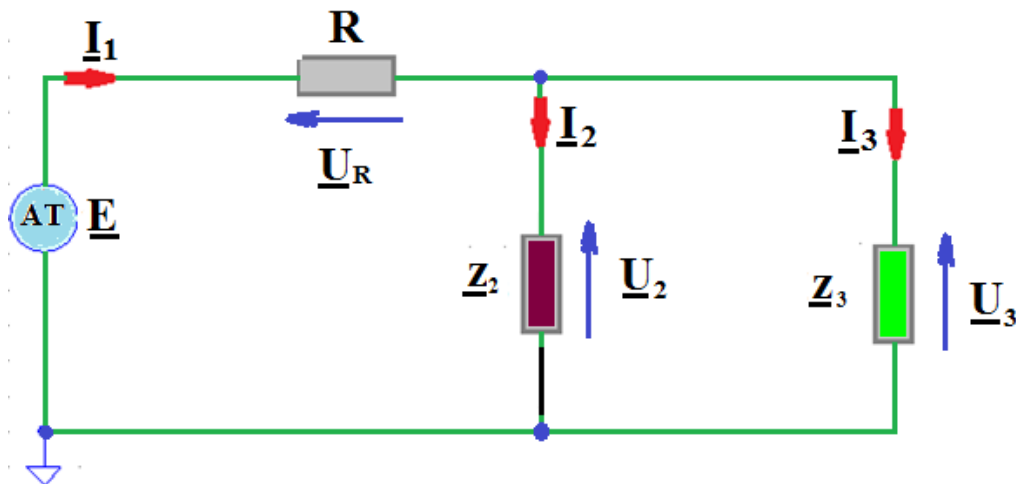
$$\underline{Z} = R + \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}. \quad (8)$$

Napięcie na rezystorze \underline{U}_{R1} obliczymy z prawa Ohma:

$$U_{R1} = I_1 \cdot R_1 \quad (9)$$

Analogicznie możemy wyliczyć napięcia \underline{U}_2 i \underline{U}_3 :

$$\underline{U}_3 = \underline{I}_3 \cdot \underline{Z}_3, \quad \underline{U}_2 = \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_2 \quad (10)$$



Rys. 6. Prosty obwód elektryczny prądu zmiennego.

W przypadku, gdy impedancja \underline{Z}_2 jest cewka możemy zapisać:

$$\underline{Z}_2 = j\omega L, \quad (11)$$

gdzie: $\omega = 2\pi f$ – częstotliwość kołowa (pulsacja) w rad/s;

f - częstotliwość generatora w Hz;

L – indukcyjność cewki w henrach - H.

Natomiast, gdy impedancją \underline{Z}_3 jest kondensator, to:

$$\underline{Z}_3 = \frac{1}{j\omega C} = -j\frac{1}{\omega C}, \quad (12)$$

gdzie: C – pojemność kondensatora w faradach - F.

Prąd \underline{I}_2 można wyznaczyć z tzw. dzielnika prądowego:

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_1 \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}. \quad (13)$$

Natomiast prąd \underline{I}_3 obliczymy wykorzystując I prawo Kirchhoffa:

$$\underline{I}_3 = \underline{I}_1 - \underline{I}_2. \quad (14)$$

W obwodach zasilanych napięciem sinusoidalnym występuje moc czynna P , bierna Q i pozorna S .

Moc pozorna S jest to iloczyn wartości skutecznych napięcia U i natężenia prądu I (jednostka voltamper – VA):

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (15)$$

Moc czynną wyznaczamy z zależności:

$$P = R \cdot I^2 = UI \cos \varphi, \quad (16)$$

a moc bierną Q (jednostka voltamper – VA lub var):

$$Q = X \cdot I^2 = UI \sin \varphi. \quad (17)$$

Mierniki prądu zmiennego wskazują wartość skuteczną mierzonej wielkości, czyli moduł liczby zespolonej. Przy pomiarze wartości skutecznej napięć zmiennych odbiegających kształtem od sinusoidy należy wybierać te mierniki, które mają funkcję TRUE RMS (z ang. TRUE **R**oot **M**ean **S**quare – prawdziwa wartość skuteczna) oraz zwracać uwagę na częstotliwość mierzonego przebiegu napięcia (każdy miernik posiada górną granicę częstotliwości, przy której jeszcze mierzy poprawnie). W przypadku, gdy przebieg ma kształt sinusoidy wartość skuteczna wyznaczana jest z zależności:

$$U_{SK} = \frac{U_{m1}}{\sqrt{2}}, \quad (18)$$

gdzie: U_{m1} – wartość maksymalna (amplituda) sinusoidy.

Sygnaly odkształcone (np.: fala prostokątna, trójkątna, itp.) różnią się od sinusoidy i w zależności od swego kształtu zawierają większą lub mniejszą liczbę wyższych harmonicznych. W tym przypadku wartość skuteczna wyznaczana jest ze wzoru:

$$U = \sqrt{U_0^2 + \sum_{k=1}^n \left(\frac{U_{mk}}{\sqrt{2}} \right)^2}, \quad (19)$$

gdzie: U_0 – wartość sygnału stałego;

U_{mk} – wartość amplitudy k-tej harmoniki;

n- liczba harmonicznych wchodzących w skład sygnału odkształconego.

Przyrządy cyfrowe mierzące wartość TRUE RMS wykorzystują w swoim algorytmie pomiarowym zależność (19), natomiast pozostałe mierniki mają algorytm zbudowany na zależności (18). Logicznym więc jest, że ich wskazania będą identyczne tylko w przypadku przebiegów sinusoidalnych.

Pomiary rezystancji są zagadnieniami bardzo ważnymi zarówno w przemyśle jak i życiu codziennym. Od poprawnego pomiaru tej wielkości zależy prawidłowe działanie wielu urządzeń, systemów zabezpieczeń, szybkie przeprowadzenie napraw urządzeń, itp..

2. POMIARY REZYSTANCJI

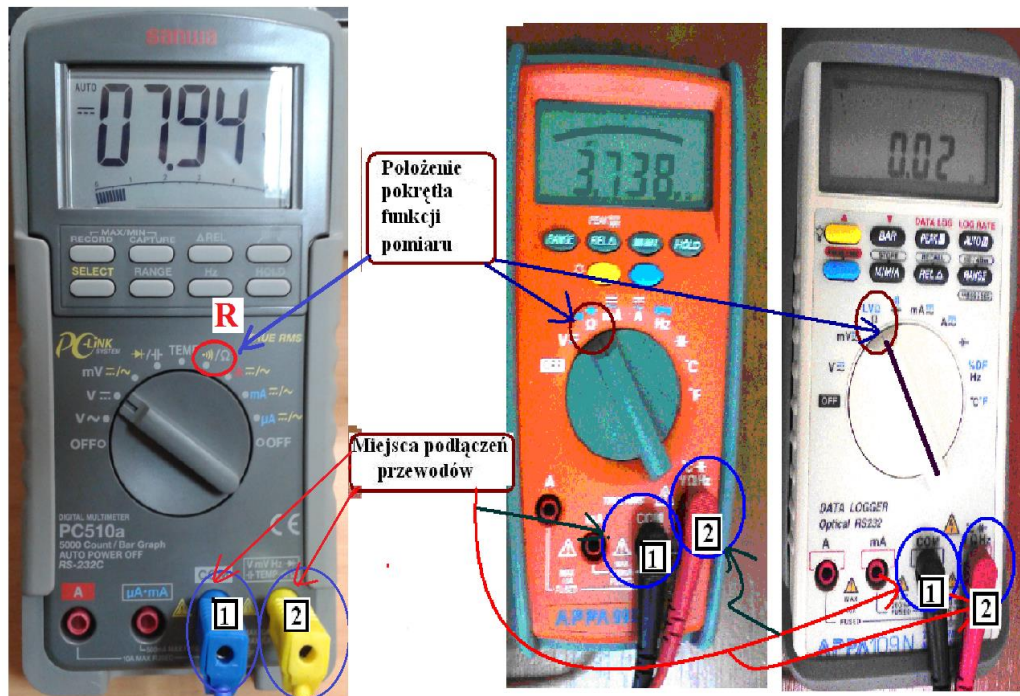
Pomiary rezystancję możemy wykonać za pomocą:

- multimetrem cyfrowym (funkcja pomiaru rezystancji);
- mostkiem (technicznym lub laboratoryjnym);
- metodą techniczną.

Wybór metody pomiaru zależy od wielu czynników, np.: jaki rząd wielkości reprezentuje badana rezystancja, dokładność, z jaką chcemy ją zmierzyć, czy też posiadany do dyspozycji sprzęt pomiarowy.

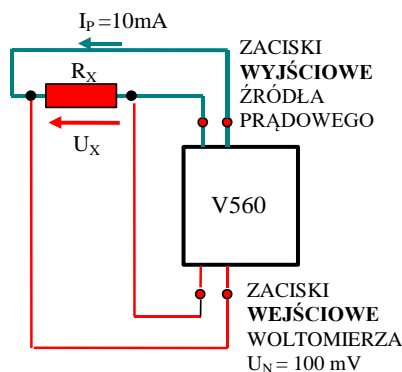
2.1. Cyfrowy pomiar rezystancji

Polega na jej proporcjonalnej zamianie na napięcie stałe. Potrzebny spadek napięcia wywoływany jest na mierzonej rezystancji przez prąd pochodzący z wbudowanego do multimetru źródła prądowego. Sposób podłączenia przewodów do multimetru podczas pomiaru rezystancji pokazany jest na rys.7 (cyfry 1 i 2). Przełącznik funkcyjny powinien znajdować się w pozycji oznaczonej symbolem „ Ω ”. Przed rozpoczęciem pomiarów sprawdzamy działanie przyrządu poprzez zwarcie przewodów podłączeniowych (wtedy na wyświetlaczu powinna pokazać się wartość „0.000” lub „0.001” Ω) – rozwarcie przewodów (na wyświetlaczu powinna pokazać się wartość „0L” i wartość jednostki $M\Omega$).



Rys. 7. Widok multimetrów przygotowanych do pomiaru rezystancji

Przy pomiarze „małych” rezystancji stosowana jest metoda czteropunktowa pomiaru. Polega ona na zasileniu mierzonego rezystora z oddzielnego źródła prądowego (wbudowanego do multimetru) o prądzie znamionowym 10 mA i pomiarze wywołanego tym prądem spadku napięcia woltomierzem na zakresie pomiarowym 100 mV. To dodatkowe źródło prądowe „generuje” prąd o natężeniu 100 razy większym niż źródło wykorzystywane przy pomiarze dużych rezystancji. Zaciski wyjściowe tego źródła znajdują się na tylnej ścianie przyrządu. W tej metodzie wymagane jest użycie czterech przewodów łączących. Dwa z nich doprowadzają do rezystora prąd ze źródła prądowego, dwa pozostałe doprowadzają zaś powstały spadek napięcia do zacisków woltomierza (rys.8).



Rys. 8. Schemat układu do pomiaru rezystancji metodą czteropunktową (multimetr V560).

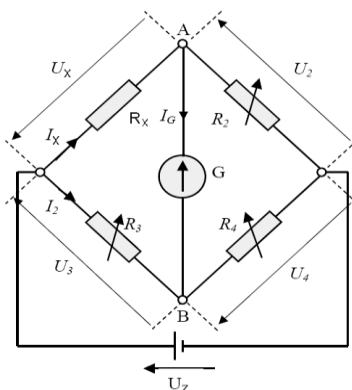
2.2. Metody zerowe (mostki)

Pomiar rezystancji mostkami zalicza się do **metod zerowych**. Cechą metod zerowych jest eliminacja wpływu elektrycznych przyrządów zarówno wskazówkowych jak i cyfrowych na wartość błędu pomiaru rezystancji.

Mostki do pomiaru rezystancji dzielą się na:

- Wheatstone'a (pomiar z wysoką dokładnością rezystancji z przedziału od ok. 1Ω do ok. $10 \text{ M} \Omega$);
- Thomsona (Kelvina) - pozwala na pomiar rezystancji w zakresie $0,000001 \Omega - 10 \Omega$.

Wymienione mostki mogą być laboratoryjne lub techniczne. Na rys. 9 przedstawiony jest schemat ideowy mostka Wheatstone'a. Oprócz rezystora mierzzonego R_x występują w nim trzy rezystory wewnętrzne: R_2 , R_3 , R_4 o regulowanych wartościach. W przekątnej pionowej A , B mostka znajduje się detektor zera (galwanometr magnetoelektryczny G). Zadaniem galwanometru jest wskazywanie stanu równowagi mostka, to znaczy stanu, w którym różnica potencjałów między punktami A , B staje się równa zero. Stan ten otrzymuje się w wyniku regulacji rezystancji R_2 , R_3 , R_4 , zaś sam proces regulacji nazywany jest równoważeniem mostka.



Rys.9. Schemat ideowy mostka Wheatstone'a

W stanie równowagi mostka mierzona rezystancja R_x jest określona zależnością:

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4} \quad (20)$$

Uwaga: warunkiem równowagi mostka jest równość: $U_{AB} = 0$.

Zależność (20) nie jest zupełnie dokładna, bowiem nie uwzględnia spadków napięć na odcinkach przewodów łączących poszczególne rezystancje w układ mostkowy.

Nieścisłość we wzorze (20) nie powoduje znaczących błędów tak długo, jak długo rezystancje oporników mostka znacznie przewyższają rezystancje przewodów łączących. Na przykład rezystancja miedzianego przewodu łączącego o długości 1 m i polu przekroju poprzecznego $1,5 \text{ mm}^2$ ma rezystancję ok. $12 \text{ m}\Omega$. Stanowi to 0,012 % wartości 100 omowego rezystora.

Błąd nieczułości mostka

Oprócz błędu podstawowego, pomiar rezystancji mostkiem Wheatstone'a obarczony jest jeszcze błędem nieczułości.

Bezwzględnym błędem nieczułości Δn nazywa się największy przyrost rezystancji mierzonej ΔR_x nie wywołujący zmiany wskazania galwanometru. Określenie to ma znaczenie jedynie teoretyczne, bowiem niemożliwe jest wyznaczenie przyrostu ΔR_x bez drobnej choćby zmiany wskazania galwanometru, dlatego w praktyce stosowane jest inne określenie tego błędu.

Bezwzględnym błędem nieczułości Δn nazywa się przyrost rezystancji mierzonej ΔR_x , wywołujący najmniejsze dostrzegalne przemieszczenie wskazówki galwanometru Δa . Umownie przyjmuje się $\Delta a = 0,1 \text{ mm}$. Tak więc:

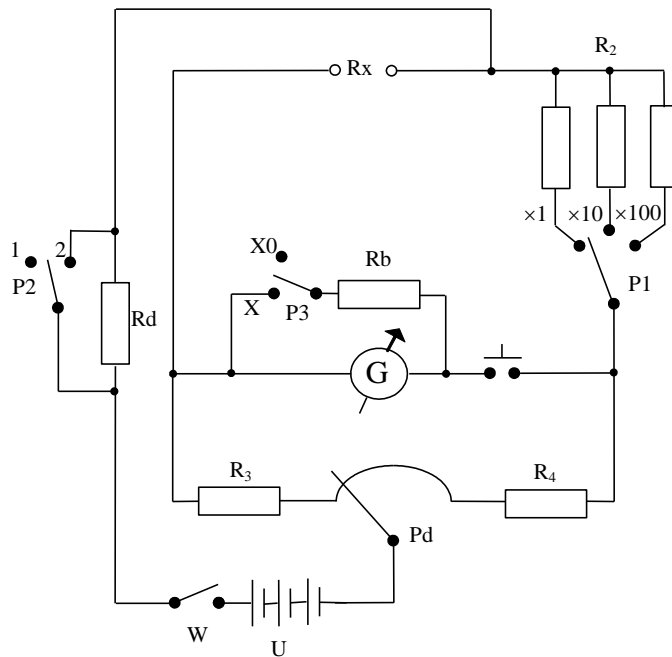
$$|\Delta n| = |\Delta R_x|, \quad \text{gdy } \Delta a = 0,1 \text{ mm.}$$

Techniczny mostek Wheatstone'a MW-4

Techniczny mostek Wheatstone'a MW-4 pozwala na szybki pomiar rezystancji w zakresie od $0,5\Omega$ do $500\text{k}\Omega$. Dokładność pomiaru jest jednak o wiele mniejsza niż mostka laboratoryjnego i wynosi:

- na zakresie $0,5\text{-}5\Omega$ $\pm 2\%$;
- na zakresie $5\Omega\text{-}500\text{k}\Omega$ $\pm 1\%$.

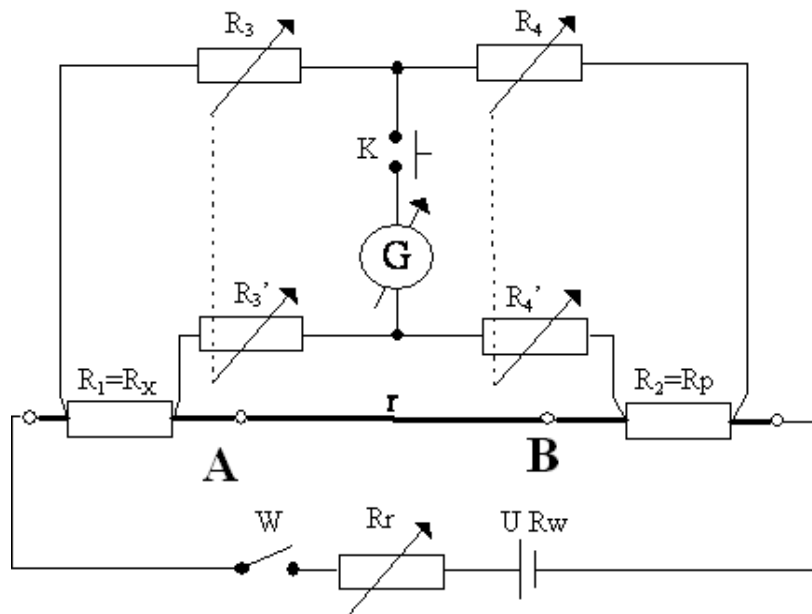
Na rysunku 10 przedstawiony jest uproszczony schemat takiego mostka.



Rys. 10. Uproszczony układ technicznego mostka Wheatstone'a: P1 - przełącznik zmiany zakresów pomiarowych; P2 - przełącznik czułości mostka; Pd - potencjometr drutowy [2].

Równoważenie mostka odbywa się przez obrót suwaka potencjometru drutowego Pd. Oznacza to zmianę ilorazu **R3/R4** aż do osiągnięcia stanu równowagi. Wynik pomiaru odczytuje się z położenia obrotowej podziałki, połączonej z pokrętkiem potencjometru oraz z uwzględnieniem mnożnika zakresu. Wartości rezystancji części regulowanej i części stałych są tak dobrane, aby iloraz R3/R4 mógł zmieniać się w granicach zapewniających zachodzenie na siebie zakresów pomiarowych, nastawionych przełącznikiem P1. Obecnie techniczne mostki Wheatstone'a tracą swoje znaczenie, gdyż ich funkcje przejmują cyfrowe mierniki uniwersalne zawierające omomierze (multimetry cyfrowe).

W przypadku konieczności pomiaru rezystancji **R_x < 1Ω** stosowanie mostka Wheatstone'a daje wyniki obarczone dużymi błędami pomiarowymi. Błędy te są rezultatem wpływu rezystancji przewodów łączeniowych, rezystancji w gałęziach mostka oraz rezystancji styków. Wartości wymienionych rezystancji są porównywalne z wartościami mierzonymi. Eliminacje tych błędów dokonuje się w zmodyfikowanym mostku Wheatstone'a do postaci sześcioramiennej zw. mostkiem Thomsona (Kirchhoffa). Modyfikacja mostka Wheatstone'a (rysunek 11) polega na zastąpieniu rezystorów **R3** i **R4** drutem ślizgowym, kalibrowanym ze stopu oporowego (manganinu, nikrothalu) o długości 0.5m (czasem 1m). Stan równowagi tego mostka, przy R_p=const, osiąga się ustawiając w odpowiednim położeniu suwak na listwie z drutem oporowym.



Rys. 11. Schemat technicznego mostka Thomsona: $R_1=R_X$ - rezystor mierzony; $R_2=R_P$ - rezystor porównawczy (wzorcowy); R_3 i R_3' oraz R_4 i R_4' - rezystancje ilorazowe (nastawne) – sprzężone; r - rezystancja mała przewodu łączącego zaciski prądowy A rezystora mierzonego R_X z zaciskiem prądowym B rezystora porównawczego (wzorcowego) $R_2(R_P)$ [2].

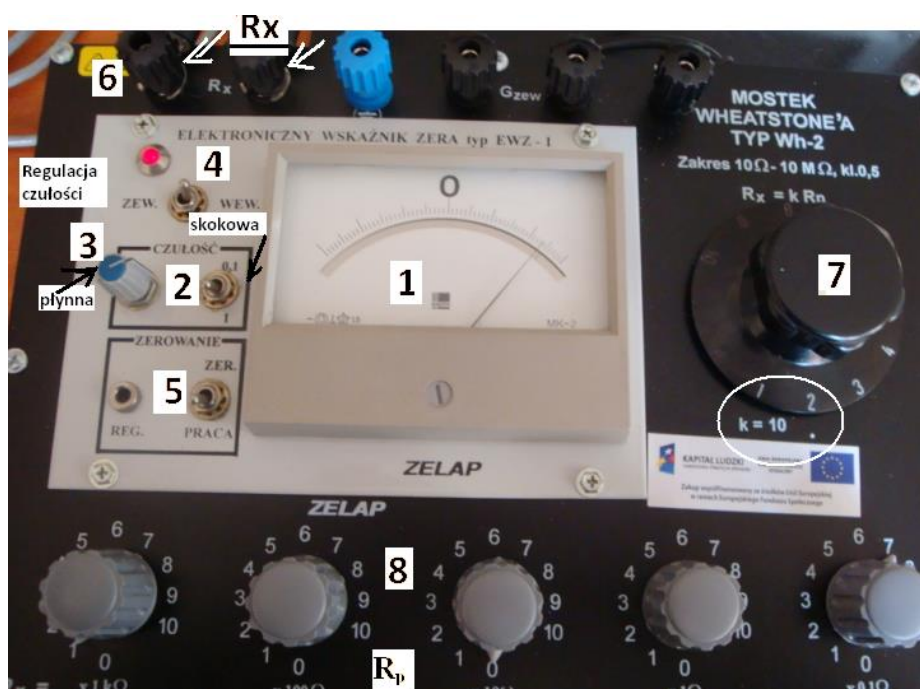
Rezystancję mierzoną R_x (R_1) oraz porównawczą R_p (R_2), o wartościach zbliżonych do R_1 , przyłącza się do mostka z zewnątrz, przy czym wyróżnia się tu zaciski prądowe (masywne) i napięciowe (o małym przekroju). Regulując wartościami rezystorów ilorazowych (sprzężonych) R_3 i R_3' oraz R_4 i R_4' osiąga się stan równowagi mostka objawiający się zerowym wychyleniem galwanometru ($\alpha_g=0$), przy którym słuszna jest zależność:

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

Laboratoryjny mostek Wheatstone'a

Przygotowanie mostka do pomiarów

Na rysunku 12 przedstawiony jest widok z góry mostka laboratoryjnego Wheatstone'a.



Rys.12. Płyta czołowa laboratoryjnego mostka Wheatstone’a: 1- wskaźnik zera; 2 –przełącznik skokowej regulacji czułości wskaźnika zera 1; 3 - pokrętło płynnej regulacji wskaźnika zera 1; 4 - przełącznik rodzaju wskaźnika zera (powinien być w pozycji **WEW.**); 5 – przełącznik trybu pracy (przy pomiarach w pozycji **PRACA**); 6 – zaciski podłączenia rezystancji badanego tensometru; 7 – pokrętło ustawiania mnożnika **k**; 8 – rezystor dekadowy **R_p**, służący do równoważenia mostka.

Przed rozpoczęciem pomiarów należy sprawdzić położenia poszczególnych przełączników na panelu mostka Wheatstone’a:

- przełącznik 4 w pozycji **WEW.**;
- przełącznik 2 w pozycji **0,1**;
- przełącznik 5 w pozycji **PRACA**;
- potencjometr 3 w środkowym położeniu.

Następnie zmierzyć za pomocą multimetru nieznaną rezystancję i ustawić jej wartość przy pomocy dekad rezystora **R_p** w następujący sposób np.: jeżeli zmierzona multimetrem rezystancja **R_x** wynosi 125,3 Ω, to na pierwszej z lewa dekadzie ustawiamy **1**, na drugiej - **2**, na trzeciej – **5**, na czwartej - **3**, na piątej -**0**.

Wartość mnożnika **k** ustawiamy pokrętłem 7 po uprzednim wyznaczeniu z zależności 21 (w przytoczonym przykładzie **R_p**=1253,0 Ω, a **R_p/R_x**=10, to **k=2**):

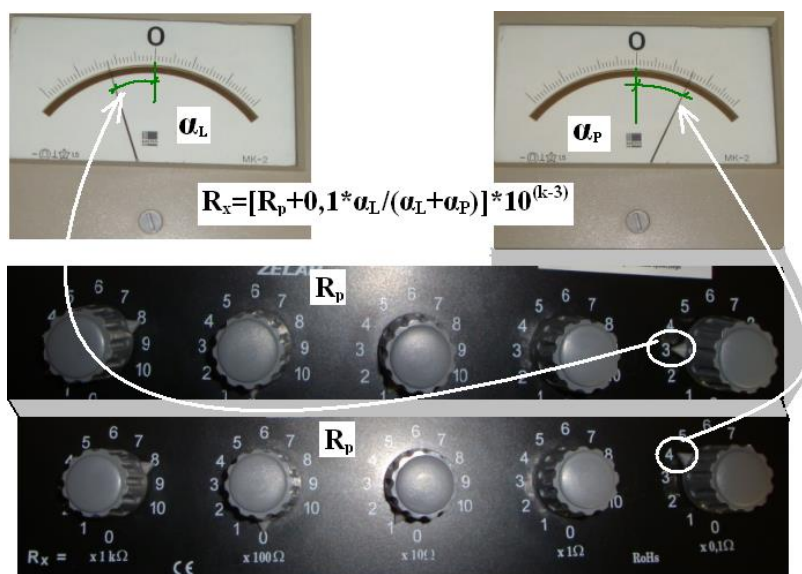
$$\frac{R_p}{R_x} = 10^{k-3} \tag{21}$$

Podłączamy badany rezystor przy pomocy przewodów do zacisków R_x mostka.

Włączamy mostek przełącznikiem znajdującym się z tyłu obudowy (zapali się lampka kontrolna na panelu mostka).

Przeprowadzenie pomiarów

- regulując dekadami (zaczynając od najmniejszej – tej z prawej strony panelu mostka) doprowadzić do wyzerowania wskaźnika zera **1** (rys. 12);
- zmienić skokowo czułość mostka z **0,1** na **1** przełącznikiem **2**;
- regulując ostatnią dekadą R_p doprowadzić do stanu, gdy przełączenie ostatniej dekady R_p o jedną wartość powoduje zmianę wychylenia wskaźnika zera z lewego na prawe (w razie potrzeby można zwiększyć czułość pokrętłem płynnej regulacji 3);
- zapisać wartość R_p dla lewego wychylenia wskaźnika zera oraz wartość wychylenia wskazówki α_L w działkach – rys.13);



Rys. 13. Ilustracja metodyki wyznaczania dokładnej wartości rezystancji R_x .

- zwiększyć o jedną wartość ostatnią dekadę R_p , odczytać i zanotować wychylenie prawe wskaźnika zera (rys.13).

Dokładną wartość rezystancji R_x wyznaczamy z zależności:

$$R_x = [R_p + 0,1 \cdot \alpha_L / (\alpha_L + \alpha_P)] \cdot 10^{(k-3)} \Omega.$$

3. BŁĘDY POMIARÓW WYKONYWANYCH MIERNIKAMI CYFROWYMI

Dokładność cyfrowych przyrządów pomiarowych określana jest w sposób bardziej złożony niż elektrycznych mierników wskazówkowych. Nie istnieje tu pojęcie klasy dokładności, tak charakterystycznej dla przyrządów wskazówkowych. Poza tym brak jest jednolitego sposobu podawania przez różnych wytwórców granicznych błędów wskazań charakteryzujących dokładność ich wyrobów. Sposób określania błędów jest w dodatku różny dla poszczególnych funkcji pomiarowych w ramach tego samego przyrządu (np. inny dla pomiaru napięć stałych, a inny dla napięć zmiennych).

Należy dodać, że renomowane firmy produkujące aparaturę pomiarową najwyższej klasy podają wartości błędów wskazań swoich produktów, zastrzegając jednocześnie, że wartości te gwarantowane są tylko w określonym przedziale czasu (przeważnie 1 rok), po upływie którego powinny być ponownie poddane sprawdzeniu u wytwórcy.

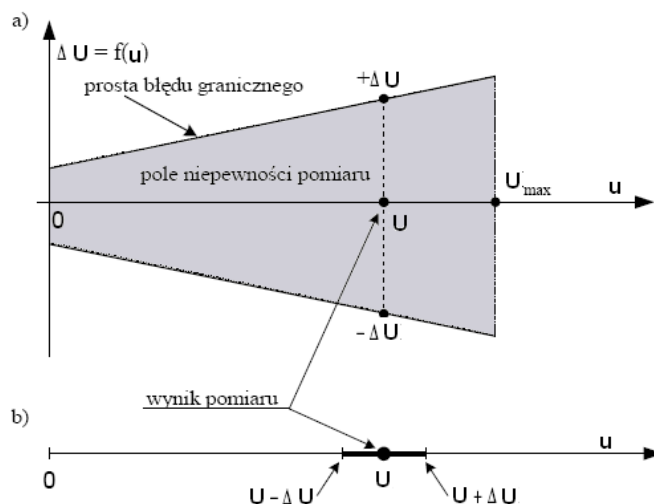
Błąd graniczny ΔU pomiaru napięcia przyrządem cyfrowym jest sumą dwóch składników:

- **błądu multiplikatywnego Δp** , podawanego zwykle w % i stanowi on ułamek wartości mierzonej U (ang. % of reading - **% rdg**). Może też się zdarzyć, że wytwórca podaje błąd w postaci (0,01% of range + 5D);
- **błądu addytywnego Δz** - zależnego od zakresu przyrządu, na którym wykonuje się pomiar, wyrażonego w jednostkach wartości mierzonej.

Wartość składnika addytywnego jest podawana:

- często jako wielokrotność ziarna - n cyfr (znaków, ziaren), np. 3 dgt oznacza 3 ziarna;
- czasem jako ułamek (%) zakresu: $\Delta z = \delta_z \cdot U_{zakr}$.

Niżej zaprezentowano kilka charakterystycznych sposobów określania przez wytwórców, zarówno krajowych jak i zagranicznych niedokładności wskazań produkowanych przez nich multimetrów cyfrowych. Podane przykłady, powinny w dostatecznym stopniu wyjaśnić sposoby korzystania przez użytkowników z informacji podawanych w instrukcjach fabrycznych cyfrowych przyrządów pomiarowych.



Rys.14. Przedstawienie pojęć błędu granicznego dla przyrządów cyfrowych: a) zmiana wartości błędu granicznego w funkcji wartości mierzonej w zakresie od 0 do U_{\max} ; b) niedokładność pomiaru jako symetryczny przedział wokół wyniku pomiaru U ograniczony przez błąd graniczny [4].

3.1. Multimetry - błąd pomiaru napięć DC i AC

W tabeli 1 przedstawione zostały parametry metrologiczne mierników używanych w tym ćwiczeniu. Wytwórca podaje w tym wypadku następującą informację (np. APPA 62 pomiar DC): **zakres 200 V, wartość ostatniej cyfry 100 mV i dokładność $\pm(0,5\%wm+2c)$** . Wyrażenie w nawiasach rozszyfrowuje się następująco: 0,5% wartości mierzonej +2 cyfry. Oznacza to, że **graniczny (maksymalny) błąd bezwzględny wskazań ΔU_X** wyraża się następująco:

$$\Delta U_X = \pm (0,5\% \text{ wartości mierzonej} + 2 \cdot 100\text{mV}).$$

Przykład 1. Oblicz błąd graniczny, z jakim mierzone jest napięcie $U_X = 23,0 \text{ V}$ na zakresie pomiarowym $U_n = 200,0 \text{ V}$ (miernik APPA 62).

Rozwiązanie:

$$\Delta U_X = \pm (0,5\% \cdot 23,0\text{V} + 2 \cdot 100 \text{ mV}) = \pm(0,115\text{V} \pm 0,2\text{V}) = \pm 0,315\text{V}$$

Założono tu skrajnie niekorzystny przypadek, gdy oba składniki błędu mają ten sam znak.

Znajomość tego błędu pozwala na określenie przedziału, w którym z wysoką ufnością ($p=0,9973$, $k_p=3$) zawiera się wartość rzeczywista mierzonego napięcia.

Niepewność rozszerzona wyniesie:

$$U(\widehat{U}_X) \approx \Delta U_X = 0,315 \approx 0,3\text{V},$$

a zapis wyniku pomiaru: $U_X = U_X \pm \Delta U_X = (23,0 \pm 0,3)\text{V}$.

Tabela 1. Parametry metrologiczne multimetrów (pomiar napięć DC/AC)

23°C±5°C < 80%RH	DC			AC		
	Zakres	Wartość ostatniej cyfry	Dokładność	Zakres	Wartość ostatniej cyfry	Dokładność
APPA 62	200,0 mV	0,1mV	$\pm(0,5\%wm+2c)$	200,0 mV	0,1mV	$\pm(1,5\%wm+5c)$ (50Hz-300Hz)
	2,000 V	1 mV		2,000 V	1 mV	
	20,00 V	10 mV		60,00 V	10 mV	
	200,0 V	100 mV		600,0 V	100 mV	
	1000 V	1 V		750 V	1 V	
APPA 99II	400,0 mV	0,1mV	$\pm(0,25\%wm+5c)$	400,0 mV	0,1mV	$\pm(2,0\%wm+8c)$ (50-60Hz)
	4,000 V	1 mV	$\pm(0,4\%wm+1c)$	4,000 V	1 mV	$\pm(1,3\%wm+5c)$ (40Hz-1kHz)
	40,00 V	10 mV	$\pm(0,25\%wm+1c)$	40,00 V	10 mV	lub dla odczytu >50% zakresu $\pm(1,5\%wm+5c)$ (500Hz-1kHz)
	400,0 V	100 mV		400,0 V	100mV	
	1000 V	1 V		750 V	1 V	
APPA 17	3,000 V	1 mV	$\pm(0,7\%wm+2c)$	3,000 V	1 mV	$\pm(1,7\%wm+5c)$ (40Hz-500Hz)
	30,00 V	10 mV		30,00 V	10 mV	
	300,0 V	100 mV		300,0 V	100 mV	
	600 V	1 V		600 V	1 V	
23°C±5°C < 80%RH	Zakres	Wartość ostatniej cyfry	Dokładność	Zakres	Wartość ostatniej cyfry	Dokładność
APPA 109N	20,00 mV	0,01mV	$\pm(0,06\%wm+60c)$	20,00 mV	0,01mV	$\pm(0,7\%wm+80c)$ (40-100Hz)
	200,00 mV	0,01 mV	$\pm(0,06\%wm+20c)$	200,0 mV	0,1mV	$\pm(1,0\%wm+80c)$ (100-1000Hz)
	2,000 V	1 mV	$\pm(0,06\%wm+10c)$	2,000 V	1 mV	$\pm(0,7\%wm+50c)$ (40-100Hz)
	20,000 V	1 mV		20,00 V	10 mV	$\pm(1,0\%wm+50c)$ (100-1000Hz)
				20,00 V	10 mV	$\pm(2,0\%wm+60c)$ (1-10kHz)
200,00 V	10 mV	200,0 V	100 mV	$\pm(3,0\%wm+70c)$ (10-20kHz)		
				$\pm(5,0\%wm+80c)$ (20-50kHz)		
1000,0 V	100 m V	750 V		$\pm(10\%wm+100c)$ (50-100kHz)		
				$\pm(0,7\%wm+50c)$ (40-100Hz)		
APPA 207	Dane u prowadzącego ćwiczenia					

Tabela 2. Parametry metrologiczne multimetrów (pomiar prądów DC)

	DC		
	Zakres	Wartość ostatniej cyfry	Dokładność
APPA 62	2,000A	1mA	$\pm(1,0\%wm+3c)$
	10,00A	10mA	
APPA 99II	40,00mA	10 μ A	$\pm(0,6\%wm+2c)$
	400,0 mA	0,1 mA	$\pm(0,7\%wm+2c)$
	10,00 A	10 mA	$\pm(1,0\%wm+3c)$
APPA 109N	20,00 mA	0,01 mA	$\pm(0,2\%wm+40c)$
	200,0 mA	0,1 mA	
	2,000 A	1 mA	
	10,00 A	10 mA	
APPA 207	Dane u prowadzącego ćwiczenia		

3.2. Multimetry - błąd pomiaru rezystancji

Pomiar rezystancji, tak jak i innych wielkości mierzonych multimetrem, obarczony jest pewnym błędem. Użytkownik powinien umieć (na podstawie parametrów metrologicznych przyrządu) określić przedział niepewności zmierzonej rezystancji. W tabeli 3 przedstawione zostały (podane przez producenta) parametry metrologiczne przy pomiarze rezystancji multimetrami APPA 62, APPA 109N, APPA 99II i APPA 17. Przykład 2 ilustruje sposób określenia przedziału niepewności mierzonej rezystancji.

Tabela 3. Parametry metrologiczne wybranych multimetrów (pomiar rezystancji)

APPA 62		APPA 109N	
Zakres	Dokładność	Zakres	Dokładność
200,0 Ω	$\pm(0,7\%wm+3c)$	200 Ω , 2 k Ω , 20 k Ω , 200 k Ω	$\pm(0,3\%wm+30c)$
200,0 k Ω	$\pm(0,7\%wm+3c)$	2 M Ω	$\pm(0,3\%wm+50c)$
		20 M Ω	$\pm(5,0\%wm+50c)$
2,000 M Ω	$\pm(1,0\%wm+3c)$	200 M Ω	$\pm(5,0\%wm+20c)$
20,00 M Ω	$\pm(1,5\%wm+3c)$	2 G Ω	$\pm(5,0\%wm+8c)$
APPA 99II		APPA 17	
Zakres	Dokładność	Zakres	Dokładność
400,0 Ω	$\pm(0,7\%wm+3c)$	300,0 Ω	$\pm(1,2\%wm+4c)$
4,000-400,0k Ω	$\pm(0,4\%wm+3c)$	3,000 -300,0k Ω	$\pm(1,0\%wm+2c)$
4,000 M Ω	$\pm(0,6\%wm+3c)$	3,000 M Ω	$\pm(1,5\%wm+3c)$
40,00 M Ω	$\pm(1,5\%wm+5c)$	30,00 M Ω	$\pm(3,0\%wm+5c)$
APPA 207		40,00 M Ω	$\pm(0,3\%+2c)$

Przykład 2: Obliczyć błąd maksymalny (graniczny), z jakim mierzona jest rezystancja $R_x = 380,0\Omega$ na zakresie pomiarowym $R_n = 400,0\Omega$.

Rozwiązanie:

Dla APPA 99II producent podaje (tabela 3):

$$\Delta R_x = \pm (\% \text{wart. mierzonej} + \text{ilość cyfr}) = \pm (0,7\% \text{wm} + 3\text{c}).$$

W naszym przypadku wartość mierzona = $380,0\Omega$, wartość jednej cyfry na zakresie $400,0\Omega$ wynosi $0,1\Omega$, stąd:

$$\Delta R_x = \pm (0,7\% \cdot 380\Omega + 3 \cdot 0,1\Omega) = \pm (0,007 \cdot 380\Omega + 0,3\Omega) = 2,96\Omega \approx 3,0\Omega.$$

Założono tu skrajnie niekorzystny przypadek, gdy oba składniki błędu mają ten sam znak. Znajomość tego błędu pozwala na określenie przedziału, w którym z wysoką ufnością ($p = 0,9973$, $k_p = 3$) zawiera się wartość rzeczywista mierzonej rezystancji:

$$380,0\Omega - 3,0\Omega \leq R_x \leq 380,0\Omega + 3,0\Omega,$$

stąd:
$$377,0\Omega \leq R_x \leq 383,0\Omega.$$

Ostatecznie wynik pomiaru rezystancji powinien być zapisany w postaci:

$$R_x = (380,0 \pm 3,0) \Omega.$$

4. WYZNACZANIE NIEPEWNOŚCI POMIARU

Błąd pomiaru jest to różnica między wartością dokładną a wielkością zmierzona. Niestety wartości dokładnej nigdy nie poznamy, więc i nie poznamy dokładnego błędu pomiaru. Jednak celem każdego pomiaru wykonywanego przez inżyniera (i nie tylko) jest podanie wielkości mierzonej wraz z pewną miarą niedokładności pomiaru. Jak wyznaczyć tę niedokładność?

W teorii pomiarów ta niedokładność nazywana jest niepewnością (*uncertainty*) i definiowana jest jako: „parametr, związany z wynikiem pomiaru, charakteryzujący rozrzut wartości, które można w uzasadniony sposób przypisać wielkości mierzonej”.

Rozróżniamy niepewność standardową i standardową złożoną.

Niepewność standardowa (*standard uncertainty*) jest to niepewność wyniku pomiaru wyrażona jako odchylenie standardowe $u(\hat{x}_i) = \sigma(\hat{x}_i)$ lub pierwiastek z estymaty wariancji $s^2(\hat{x}_i)$, jeżeli wariancja jest nieznana.

Niepewność standardowa złożona (*combined uncertainty*) wyznacza się jako wartość funkcji innych wielkości zwanych wejściowymi, wyrażoną w postaci zależności od wariancji lub estymat wariancji (to jest od kwadratów niepewności) wartości wielkości wejściowych przyjmowanych do obliczenia wyniku pomiaru.

Niepewność standardową oblicza się stosując dwie metody:

- **metodę typu A** opartą na rozkładach częstości;
- **metodę typu B** opartą na rozkładach danych lub przyjętych *a priori*.

Niepewność typu A ocenia się za pomocą metod statystycznych. Na podstawie serii N niezależnych pomiarów \hat{x}_k wielkości mierzonej X_i oblicza się wartość średnią \bar{x}_i wyniku pomiaru:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \hat{x}_k \quad (22)$$

Niepewność standardowa typu A wyznacza się jako odchylenie standardowe z średniej:

$$u_A(\hat{x}_i) = s(\bar{x}_i) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (\hat{x}_k - \bar{x}_i)^2}{N(N-1)}} \quad (23)$$

Do wyznaczenia **niepewności typu B** niezbędne są informacje o parametrach metrologicznych aparatury pomiarowej (najczęściej wystarczy znajomość wartości błędu granicznego). Przy założonym jednostajnym rozkładzie błędów aparatury niepewność typu B oblicza się z zależności:

$$u_B^2 = \frac{\Delta_g^2}{3}; \quad \text{lub} \quad u_B = \frac{\Delta_g}{\sqrt{3}}, \quad (24)$$

gdzie: Δ_g błąd graniczny przyrządu pomiarowego (podany przez producenta).

Złożoną niepewność standardową wyznacza się z zależności:

$$U_C^2(\hat{x}) = U_A^2(\hat{x}) + U_B^2(\bar{x}). \quad (25)$$

Wielkość zmierzona powinna być przedstawiona w postaci:

$$\hat{X} = \bar{X} \pm U(\hat{x}). \quad (26)$$

Wielkość $U(\hat{x})$ jest nazywana **niepewnością rozszerzoną** i oblicza się z wyrażenia:

$$U(\hat{x}) = k_p \cdot U_C(\hat{x}), \quad (27)$$

gdzie: k_p – współczynnik rozszerzenia (przy poziomie ufności $p=0,95$ - $k_p=2$, a dla $p=0,9973$ – $k_p=3$).

Przykład 3. Omomierzem cyfrowym o zakresie $2,5 \text{ k}\Omega$ i błędzie granicznym $\pm(0,4\% \text{ wm} + 5\text{c})$ zmierzono pięciokrotnie rezystancję. Wyniki pomiaru: $0,381\text{k}\Omega$, $0,380\text{k}\Omega$, $0,381\text{k}\Omega$, $0,382\text{k}\Omega$, $0,380\text{k}\Omega$. Obliczyć niepewność pomiaru rezystancji:

Rozwiązanie:

Wartość średnia rezystancji zgodnie z (22) wynosi:

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \hat{R}_k = 0,3808\text{k}\Omega.$$

Niepewność standardowa typu A wg wzoru (23): $U_A=0,374\Omega$.

Niepewność standardowa typu B: w naszym przypadku wartość średnia rezystancji $\bar{R} = 0,3808\text{k}\Omega = 380,8\Omega$, wartość jednej cyfry na zakresie $2,500\text{k}\Omega$ wynosi $0,001\text{k}\Omega$, czyli 1Ω , stąd:

$$U_B = \frac{\Delta_g}{\sqrt{3}} = \frac{0,004 \cdot 380,8\Omega + 5 \cdot 1\Omega}{\sqrt{3}} = 3,766\Omega.$$

Niepewność rozszerzona wyniesie:

$$U(\hat{R}) = k_p \cdot U_C = 3\sqrt{0,374^2 + 3,766^2} = 6,52 \approx 7\Omega.$$

Ostatecznie wynik pomiaru można zapisać:

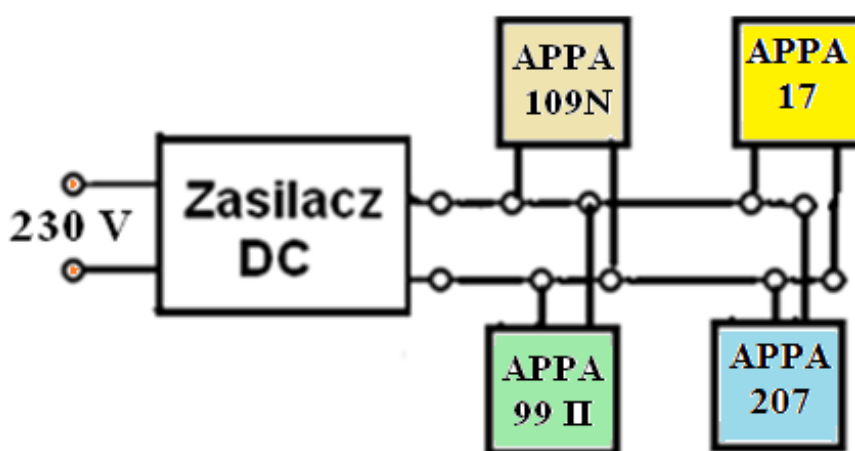
$$\overline{R_x} = \bar{R} \pm U(\hat{R}) = (381 \pm 7)\Omega.$$

5. PRZEBIEG POMIARÓW

5.1. Pomiar napięć stałych DC.

Połączyć układ pomiarowy zgodnie z rysunkiem 15. Wykonać pomiary napięć z zasilacza DC (wartości wskaże prowadzący ćwiczenie). Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli 4.

Uwaga! Wartości ΔU_{xi} i U_i (ΔI_{xi} i I_i) w tabelach 4,5,6 obliczyć zgodnie z przykładem 1.



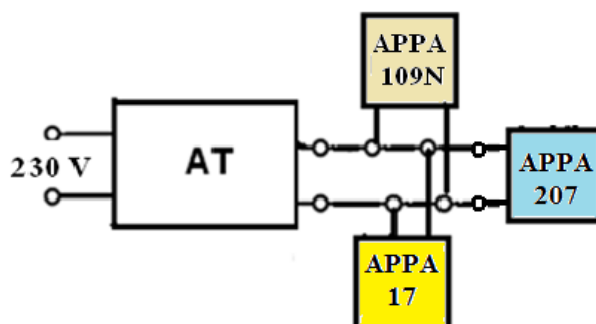
Rys. 15. Schemat połączeń do pomiaru napięć DC.

Tabela 4.

Przyrząd	U_{xi}		ΔU_{xi}		$U_i = U_{xi} \pm \Delta U_{xi}$	
	V		V		V	
Napięcie zasilacza			X	X	1	2
Multimetr APPA207						
Multimetr APPA99II						
Multimetr APPA109N						
Multimetr APPA 17						

5.2. Pomiar napięć AC (f=50 Hz).

Połączyć układ pomiarowy zgodnie z rysunkiem 16. Wykonać pomiary napięć z autotransformatora (wartości wskaże prowadzący ćwiczenie). Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli 5.



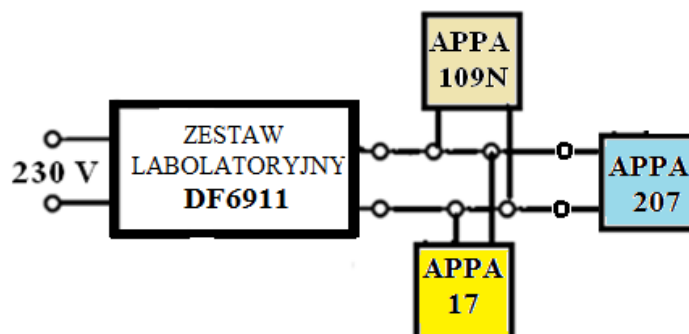
Rys. 16. Schemat połączeń do pomiaru napięć AC.

Tabela 5.

Przyrząd	U_{xi}		ΔU_{xi}		$U_i = U_{xi} \pm \Delta U_{xi}$	
	V		V		V	
Napięcie AT			X	X		
APPA 207						
APPA 17						
APPA109N						

5.3. Pomiar napięć odkształconych z funkcją True RMS

Połączyć układ pomiarowy zgodnie z rysunkiem 17. Wykonać pomiary napięć z generatora znajdującego się w zestawie laboratoryjnym DF6911 (sygnał prostokątny o częstotliwości 50 Hz, 500 Hz i 5kHz, wartość napięcia wskaże prowadzący ćwiczenie). Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli 6.



Rys.17. Schemat połączeń do pomiaru napięć odkształconych

Tabela 6.

Przyrząd	U_{xi}			ΔU_{xi}			$U_i = U_{xi} \pm \Delta U_{xi}$		
	V			V			V		
Częstotliwość generatora	50 Hz	5 kHz	50 kHz	50 Hz	5 kHz	50 kHz	50 Hz	5 kHz	50 kHz
Multimetr APPA207				X	X	X			
Multimetr APPA17									

W sprawozdaniu należy:

- obliczyć brakujące wielkości w tabelach: 4,5 i 6;
- skomentować otrzymane wartości napięć.

5.4. Pomiar rezystancji

Wykonać za pomocą multimetru pomiary rezystancji wskazanej przez prowadzącego (każdy student wykonuje oddzielnie pomiar rezystancji i wyniki pomiaru zapisuje w tabeli 7).

Tabela 7.

Metoda pomiaru rezystancji	R_{x1i}	$U(\hat{R}_{x1})$	R_{x2i}	$U(\hat{R}_{x2})$	$R_1 = R_{x1} \pm \pm U(\hat{R}_{x1})$	$R_2 = R_{x2} \pm \pm U(\hat{R}_{x2})$
	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω
Multimetr						
.....						

W sprawozdaniu należy:

- obliczyć brakujące wielkości wg procedury opisanej w p. 4 (przykłady obliczeń zamieścić w sprawozdaniu).

5.5. Pomiar napięć i prądów DC

Połączyć układ pomiarowy zgodnie z rysunkiem 1 (wartości rezystorów poda prowadzący ćwiczenia). Po ustawieniu napięcia na zasilaczu DC (wartości wskaże prowadzący ćwiczenie), odczytać wartości napięć i prądów. Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli 8.

Tabela 8.

	E	I ₁	I ₂	I ₃	U ₁	U ₂	U ₃	P _E	P _{R1}	P _{R2}	P _{R3}
	V	A			V			W			
Pomiar											
Obliczenia											
Pomiar											
Obliczenia											

W sprawozdaniu należy:

- obliczyć brakujące wielkości w tabeli 8 zgodnie z teorią rozwiązywania obwodów prądu stałego;
- porównać uzyskane wyniki i skomentować otrzymane różnice.

6. PYTANIA I ZADANIA KONTROLNE

1. Wyjaśnij wpływ woltomierza na wielkość mierzoną.
2. Wyjaśnij wpływ amperomierza na wielkość mierzoną.
3. Wyznacz maksymalny błąd bezwzględny wskazań miernika cyfrowego.
4. Zapisz i skomentuj zapis: $\pm(1,5\%wm+5c)$ dla (50Hz-300Hz).
5. Zdefiniuj i opisz skrót RMS, TRUE RMS.
6. Wyjaśnij metodykę pomiaru napięcia (prądu, rezystancji) multimetrem.
7. Zdefiniuj pojęcie rezystancji, reaktancji, impedancji oraz podaj jednostki tych wielkości.
8. Zdefiniuj pojęcie mocy czynnej, biernej i pozornej oraz podaj jednostki tych wielkości.
9. Opisz metodykę wyznaczania niepewności rozszerzonej.

LITERATURA

1. Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A.: *Metrologia elektryczna*, Wyd. 11, WNT Warszawa 2011.
2. Chwaleba A. i inni. *Metrologia elektryczna* WNT, Warszawa 2003.
3. Piotrowski R. *Ćwiczenia laboratoryjne z metrologii*, Wyd. Politechniki Białostockiej, Białystok 2008.
4. Tumański S. *Technika pomiarowa*, WNT, Warszawa 2007

WYMAGANIA BHP

Warunkiem przystąpienia do praktycznej realizacji ćwiczenia jest zapoznanie się z instrukcją BHP i instrukcją przeciwpożarową oraz przestrzeganie zasad w nich zawartych. Wybrane urządzenia dostępne na stanowisku laboratoryjnym mogą posiadać instrukcje stanowiskowe. Przed rozpoczęciem pracy należy zapoznać się z instrukcjami stanowiskowymi wskazanymi przez prowadzącego.

W trakcie zajęć laboratoryjnych należy przestrzegać następujących zasad.

- Sprawdzić, czy urządzenia dostępne na stanowisku laboratoryjnym są w stanie kompletnym, nie wskazującym na fizyczne uszkodzenie.
- Sprawdzić prawidłowość połączeń urządzeń.
- Załączenie napięcia do układu pomiarowego może się odbywać po wyrażeniu zgody przez prowadzącego.
- Przyrządy pomiarowe należy ustawić w sposób zapewniający stałą obserwację, bez konieczności nachylania się nad innymi elementami układu znajdującymi się pod napięciem.
- Zabronione jest dokonywanie jakichkolwiek przełączeń oraz wymiana elementów składowych stanowiska pod napięciem.
- Zmiana konfiguracji stanowiska i połączeń w badanym układzie może się odbywać wyłącznie w porozumieniu z prowadzącym zajęcia.
- W przypadku zaniku napięcia zasilającego należy niezwłocznie wyłączyć wszystkie urządzenia.
- Stwierdzone wszelkie braki w wyposażeniu stanowiska oraz nieprawidłowości w funkcjonowaniu sprzętu należy przekazywać prowadzącemu zajęcia.
- Zabrania się samodzielnego włączania, manipulowania i korzystania z urządzeń nie należących do danego ćwiczenia.
- W przypadku wystąpienia porażenia prądem elektrycznym należy niezwłocznie wyłączyć zasilanie stanowisk laboratoryjnych za pomocą wyłącznika bezpieczeństwa, dostępnego na każdej tablicy rozdzielczej w laboratorium. Przed odłączeniem napięcia nie dotykać porażonego.