

POMIARY PRĄDU STAŁEGO

Plan wykładu

Wstęp. Jednostki prądu.

- 1. Wymagania do amperomierze DC**
- 2. Amperomierz magnetoelektryczny analogowy**
- 3. Zakresy i rezystancja wejściowa amperomierza ME**
- 4. Niepewność wskazania analogowych amperomierzy DC**
- 5. Ogólny schemat amperomierza cyfrowego
Układy wejściowe amperomierzy DC**
- 6. Niepewność wskazania amperomierza cyfrowego DC**
- 7. Wpływ ograniczonej wartości rezystancji wejściowej amperomierza**
- 8. Korekcja błędu od wpływu rezystancji amperomierza R_A .**
- 9. Pośredni pomiar prądu. Pomiary dużych prądów.**

Wstęp

Jednostką natężenia prądu elektrycznego jest Amper (oznaczenie A)

Amper – jest to natężenie prądu elektrycznego nie zmieniającego się, który, płynąc w dwóch równoległych prostoliniowych, nieskończenie długich przewodach o przekroju kołowych znikomo małym, umieszczonych w próżni w odległości 1 m od siebie, wywołałby między tymi przewodami siłę $2 \cdot 10^{-7}$ N na każdy metr długości.

Dla dużych prądów (ponad kilka set amper) wykorzystuje się kiloamper równy tysiąc (1000) amperów :

$$1\text{kA} = 1000 \text{ A}$$

Na przykład: zamiast 1250 A lepiej 1,250 kA

Wstęp

Dla małych prądów (poniżej kilka setnych (a nawet dziesiątych) ampera) wykorzystuje się miliamper równy jedna tysięczna (0,001) ampera :

$$1\text{mA} = 0,001 \text{ A} = 10^{-3} \text{ A}$$

$$(1\text{A} = 1000 \text{ mA} = 10^3 \text{ mA})$$

Na przykład: zamiast 0,0125 A lepiej 12,5 mA

Nawet często zamiast 0,125 A lepiej 125 mA.

Dla jeszcze mniejszych prądów (poniżej kilka setnych (a nawet dziesiątych) miliampera) wykorzystuje się mikroamper równy jedna tysięczna ($0,001=10^{-3}$) miliampera i jedna milionowa ($0,000001=10^{-6}$) ampera:

$$1 \mu\text{A} = 0,001 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ mA} = 0,000001 \text{ A} = 10^{-6} \text{ A}$$

$$(1 \text{ A} = 1000000 \mu\text{A} = 10^6 \mu\text{A})$$

Na przykład: zamiast 0,0642 mA lepiej 64,2 μA

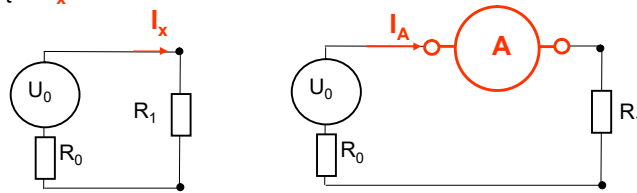
Nawet zamiast 0,345 mA lepiej 345 μA .

1. Wymagania do amperomierze DC

Do pomiaru natężenia prądu wykorzystuje się amperomierze.

Amperomierz jest włączany **szeregowo** w gałąź, w której mierzone prąd.

Na rys. pokazano obwód elektryczny, w którym należy zmierzyć wartość prądu I_x .



1. Wymagania do amperomierzy DC.

Ogólnymi wymaganiami do amperomierze przy pomiarach wartości prądu DC są:

- 1. Możliwość pomiaru wartości prądu w zadanym zakresie** (małych jak i dużych wartości prądu), jest to **wymagania zakresowe**;
- 2. Brak obciążenia obwodu w którym jest mierzony prąd** – odpowiednia wartość rezystancji wejściowej;

1. Wymagania amperomierzy DC.

- 3. Zadana dokładność pomiaru**, zapewnia się odpowiednią klasą dokładności miernika oraz innymi wartościami jego parametrów: stabilnością temperaturową oraz czasową, odpornością na inne wielkości wpływające min. **zakłócenia**;
- 4. Szybkość pomiaru** – ten problem jest ważny przy pomiarach wielkości szybko zmiennych (dynamicznych), jest związany z odpornością do wpływu zakłóceń;
- 5. Możliwość przesyłania danych pomiarowych do PC** – jest to ważne przy automatyzacji pomiarów oraz opracowania wyników.

1. Wymagania do amperomierzy DC.

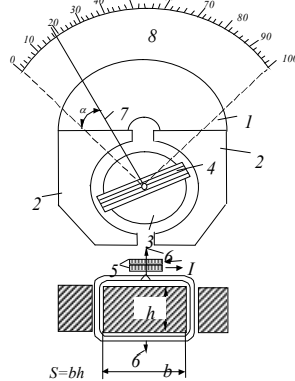
Podstawowymi parametrami każdego amperomierza są:

- 1. Zakresy pomiarowe:** $I_{n,1}; I_{n,2}; \dots, I_{n,k}$;
- 2. Rezystancja wejściowa amperomierza R_A (ma być bardzo małą)**
- 3. Klasa dokładności (kl).**

Zakres pomiarowy amperomierza ma być dobrany w taki sposób, żeby jego wskazanie I_A było większe od zakresu poprzedniego $I_{n,i+1}$ i jak najbliższe do zakresu następnego $I_{n,i+1}$

$$I_{n,i} < I_x = I_A \leq I_{n,i+1}$$

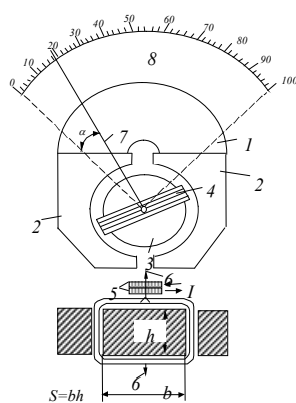
2. Amperomierz magnetoelektryczny analogowy (ME)



- Symbol

- 1 – Magnes trwały;
- 2 i 3 – rdzeń (miękki materiał ferromagnetyczny)
- 4 – ruchoma cewka (ramka);
- 5 – sprężyny spiralne;
- 6 – mocowanie (zawierzenie) części ruchomej;
- 7 – strzałka;
- 8 – podziałka.

2. Amperomierze magnetoelektryczne (ME)



- Odchylenie (α) organu ruchomego jest proporcjonalne do wartości prądu (I_{ME}) płynącego przez cewkę

$$\alpha = \frac{BSW}{k_{zwr}} I_{ME} = S_I I_{ME},$$

- gdzie $S_I = \frac{BSW}{k_{zwr}}$ - jest czułością organu ruchomego do wartości prądu

- Symbol

2. Amperomierze magnetoelektryczne (ME)



Podstawowe parametry przetwornika ME:

- 1) Dopuszczalny prąd I_{nA} - prąd pełnego odchylenia, zwykle bezpośrednio do 0,5 A
- 2) rezystancja cewki R_{Cu} (Cu – miedź, materiał, z którego wytworzona cewka)
- 3) Klasa dokładności: kl, zwykle od 0,05 do 2,5

Klasa dokładności: wyrażony w % stosunek maksymalnego błędu dopuszczalnego (MBD) do zakresu X_n miernika.

3. Zakresy i rezystancja wejściowa amperomierza ME

Zakresy pomiarowe amperomierze dla prądów powyżej 500 mA najczęściej są realizowane poprzez wykorzystanie dzielników prądu w postaci wbudowanych boczników – równoległe podłączonych rezystorów o małej rezystancji R_b .

Rezystancja wejściowa amperomierza powinna być bardzo mała, teoretyczne zerową: $R_A \rightarrow 0$

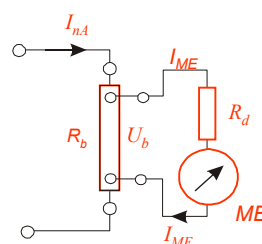
Rezystancja bocznika

$$R_b = (R_{Cu} + R_d) \frac{1}{k_b - 1}$$

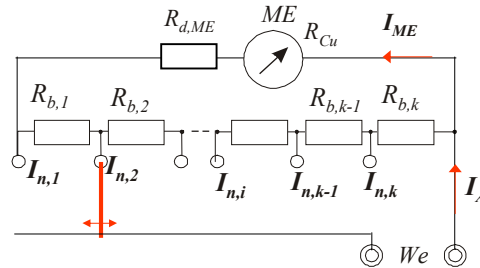
Gdzie R_d - rezystancja dodatkowa, potrzebna do ograniczenia wpływu zmian temperatury cewki;

$$k_b = I_{nA} / I_{ME}$$

- współczynnik (przekładnia) bocznika.



3. Rezystancja wejściowa amperomierza analogowego



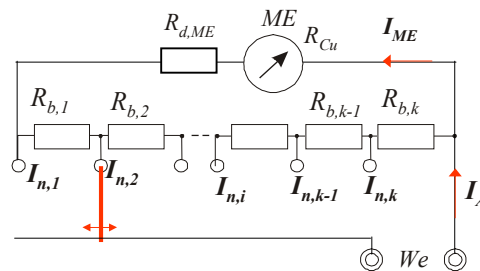
Na **każdym zakresie** rezystancja wejściowa amperomierza $R_{A,i}$ za zwyczaj jest **inna** i równa się:

$$R_{A,i} = \frac{U'_{ME}}{I_{n,i}} \cdot \frac{1 - \frac{I_{ME}}{I_{n,1}}}{1 - \frac{I_{ME}}{I_{n,i}}} = R_{A,1} \frac{I_{n,1}}{I_{n,i}} \cdot \frac{1 - \frac{I_{ME}}{I_{n,1}}}{1 - \frac{I_{ME}}{I_{n,i}}}$$

Jeśli **prąd przez cewkę** mechanizmu jest w **dużym stopniu mniejszy** od prądów zakresowych $I_{ME} \ll I_{n,i}$, wtedy:

$$R_{A,i} \approx \frac{U'_{ME}}{I_{n,i}} = R_{A,1} \frac{I_{n,1}}{I_{n,i}}$$

3. Zakresy i rezystancja wejściowa amperomierza ME



Natomiast **spadek napięcia** na amperomierze $U_{A,n}$ przy różnych prądach zakresowych w **przybliżeniu** jest **jednakowym**:

$$U_{A,n,i} = I_{n,i} \cdot R_{A,i} = U'_{ME} \cdot \frac{1 - \frac{I_{ME}}{I_{n,1}}}{1 - \frac{I_{ME}}{I_{n,i}}} \cong U'_{ME}$$

rzędu **kilka dziesiąt – kilka setek miliwoltów**.

3. Rezystancja wejściowa amperomierza analogowego

Przykład:

Przy **spadku napięcia nominalnym** na amperomierzu $U_{A,n} = 15 \text{ mV}$
(prąd mechanizmu $I_{ME} = 0,1 \text{ mA}$)

- 1) na zakresie pomiarowym $I_{n,1} = 3 \text{ mA}$ rezystancja wejściowa amperomierza analogowego równa się

$$R_{A,1} = \frac{15 \text{ mV}}{3 \text{ mA}} = 5 \Omega$$

- 2) na zakresie pomiarowym $I_{n,2} = 30 \text{ mA}$ rezystancja wejściowa amperomierza analogowego równa się

$$R_{A,2} = \frac{15 \text{ mV}}{30 \text{ mA}} \cdot \frac{1 - \frac{0,1 \text{ mA}}{30 \text{ mA}}}{1 - \frac{0,1 \text{ mA}}{3 \text{ mA}}} \approx 0,516 \Omega$$

- 3) na zakresie pomiarowym $I_{n,3} = 300 \text{ mA}$ rezystancja wejściowa amperomierza analogowego równa się

$$R_{A,3} = \frac{15 \text{ mV}}{300 \text{ mA}} \cdot \frac{1 - \frac{0,1 \text{ mA}}{300 \text{ mA}}}{1 - \frac{0,1 \text{ mA}}{3 \text{ mA}}} \approx 0,0517 \Omega$$

4. Niepewność wskazania analogowych amperomierzy DC

Zakres pomiarowy amperomierza ma być dobrany w taki sposób, żeby jego wskazanie I_A było większe od zakresu poprzedniego $I_{n,i+1}$ i jak najbliższe do zakresu następnego $I_{n,i+1}$

$$I_{n,i-1} < I_x = I_A \leq I_{n,i}$$

Ponieważ w takim przypadku otrzymuje się największą dokładność wyniku – najmniejszą niepewność.

Standardowa niepewność wskazania amperomierza analogowego:

$$u_B(I_A) = kl_A \frac{I_n}{\sqrt{3} \cdot 100\%}$$

Względna standardowa niepewność wskazania amperomierza analogowego:

$$u_{B,rel}(I_A) = \frac{u_B(I_A)}{|I_A|} 100\% = kl_A \frac{I_n}{\sqrt{3} \cdot |I_A|}$$

4. Niepewność wskazania analogowych amperomierzy DC

Przykład:

Mierzone jest natężenie prądu $I_x \approx 25 \text{ mA}$

Amperomierz analogowy 1:

Zakresy: **3mA; 7,5mA; 15mA; 30mA, 75mA; 150mA,**
klasa dokładności **1,0**

Amperomierz analogowy 2:

Zakresy: **1mA; 2mA; 5mA; 10mA; 20mA; 50 mA; 100mA; 200mA,**
klasa dokładności **0,5**

Dobrać odpowiednie zakresy pomiarowe i wyznaczyć standardowe (bezwzględne i względne) niepewności oczekiwanych wskazań obydwu amperomierze.

Rozwiązanie:

1. Ponieważ mierzony prąd $I_x \approx 25 \text{ mA}$ dlatego

Zakres pomiarowy amperomierza 1 : $I_{n1} = 30 \text{ mA}$

Zakres pomiarowy amperomierza 2 : $I_{n2} = 50 \text{ mA}$

4. Niepewność wskazania analogowych amperomierzy DC

Amperomierz analogowy 1:

zakresy: **3mA; 7,5mA; 15mA; 30mA, 75mA; 150mA,** klasa dokładności **1,0**

Amperomierz analogowy 2:

zakresy: **1mA; 2mA; 5mA; 10mA; 20mA; 50 mA; 100mA; 200mA,** klasa dokładności **0,5**

2. Standardowa niepewność wskazania amperomierza 1 ($I_{A1} \approx I_x$):

$$u_B(I_{A1}) = 1,0 \frac{30 \text{ mA}}{\sqrt{3} \cdot 100\%} = 0,173 \text{ mA}$$

3. Względna standardowa niepewność wskazania amperomierza 1:

$$u_{B,rel}(I_{A1}) = \frac{0,173 \text{ mA}}{25 \text{ mA}} 100\% = 0,693\%$$

4. Standardowa niepewność wskazania amperomierza 2 ($I_{A2} \approx I_x$):

$$u_B(I_{A2}) = 0,5 \frac{50 \text{ mA}}{\sqrt{3} \cdot 100\%} = 0,144 \text{ mA}$$

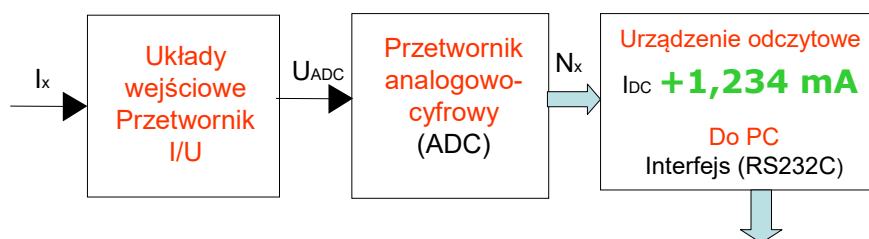
5. Względna standardowa niepewność wskazania amperomierza 2 :

$$u_{B,rel}(I_{A2}) = \frac{0,144 \text{ mA}}{25 \text{ mA}} 100\% = 0,577\%$$

5. Ogólny schemat amperomierza cyfrowego Układy wejściowe amperomierzy DC

Schemat zawiera 3 podstawowe części:

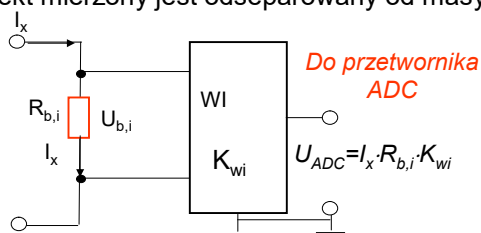
1. **Układy wejściowe**, zapewniające odpowiednie zakresy pomiarowe, odpowiednią rezystancję wejściową, oraz przetwarzanie prądu na napięcie;
2. **Przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC)**, zapewniający przetwarzanie napięcia U_{ADC} w wartość cyfrową N_x ;
3. **Urządzenie odczytowe + układy do przesyłania danych do PC**, zapewniające wizualizację wyniku pomiaru oraz jego przesyłanie do PC (narzędzia interfejsowe: RS232C, GPIB, USB,...)



5. Układy wejściowe amperomierze cyfrowych

5.1. Układ wejściowy amperomierza z bocznikiem

Dla pomiarów prądów o stosunkowo **dużej wartości** (od kilku miliamperów i **wyżej**) wykorzystuje się układ pomiarowy amperomierza z **bocznikiem na wejściu** oraz ze wzmacniaczem instrumentalny (WI), zwłaszcza w przypadkach kiedy obiekt mierzony jest odseparowany od masy wspólnej.



Dla takiego układu napięcie wyjściowe wynosi

$$U_{ADC} = U_{wy} = U_b \cdot K_{wi} = I_x R_{b,i} \cdot K_{wi}$$

K_{wi} - jest współczynnikiem wzmocnienia WI

5. Układy wejściowy cyfrowych amperomierze

5.1. Układy wejściowe amperomierza z bocznikiem

Dla takiego układu wejściowego:

Rezystancja wejściowa amperomierza równa się rezystancji bocznika :

$$R_A = R_{b,i}$$

Wartość spadku napięcia na amperomierze:

$$U_A = I_x \cdot R_{b,i}$$

5.12 Zakresy cyfrowych amperomierze DC

Typowe zakresy woltomierzy są krotne:
wartościom 10^n , gdzie n – liczba całkowita, ujemna i
dodatnia, na przykład

1 μ A; 10 μ A; 100 μ A; 1 mA; 10 mA; 100 mA; 1 A, 10 A

lub krotne wartościom $2 \cdot 10^n$, na przykład :

2 μ A; 20 μ A; 200 μ A; 2 mA; 20 mA; 200 mA; 2 A, 20 A,

lub krotne wartościom $4 \cdot 10^n$ ($5 \cdot 10^n$), na przykład :

5 μ A; 50 μ A; 500 μ A; 5 mA; 50 mA; 500 mA; 5 A

6. Niepewność wskazania amperomierza cyfrowego DC

W razie przyrządu cyfrowego wartość niepewności wskazania amperomierza I_A jednoznacznie wyznaczana jest przez znane wartości graniczne:

a % (ppm) od wskazania I_A ;

oraz b % (ppm) od zakresu I_n .

Przy założeniu jednostajnego rozkładu prawdopodobieństwa odchyłeń wskazań amperomierza w przedziale wartości granicznych niepewność **standardowa** **wskazania amperomierza cyfrowego** równa się:

$$u_B(I_A) = \frac{a \cdot I_A + b \cdot I_n}{\sqrt{3} \cdot 100\%}$$

Względna niepewność **standardowa** **wskazania amperomierza cyfrowego** równa się

$$u_{B,rel}(I_A) = \frac{u_B(I_A)}{|I_A|} 100\% = \frac{a + b \cdot (I_n / I_A)}{\sqrt{3}}$$

6. Niepewność wskazania amperomierza cyfrowego DC

Jeśli druga składowa wartości granicznej odchylenia wskazania jest zadana przez:

liczbę c cyfr **najmniej znaczących** wskazania (CNZ):

a **pierwsza** dalej przez a % (ppm) od wskazania I_A .

$$CNZ = \frac{I_n}{N_{kw}}$$

Wtedy przy założeniu jednostajnego rozkładu prawdopodobieństwa odchyłeń wskazań amperomierza w przedziale wartości granicznych niepewność **standardowa** **wskazania amperomierza cyfrowego** równa się:

$$u_B(I_A) = \frac{\frac{a}{100\%} \cdot I_A + c \cdot CNZ}{\sqrt{3}}$$

Względna niepewność **standardowa** **wskazania woltomierza cyfrowego** równa się

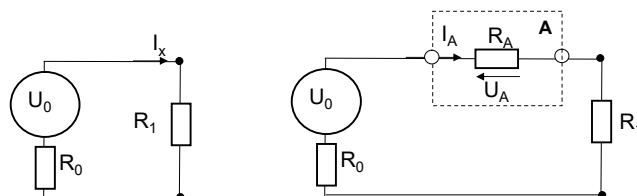
$$u_{B,rel}(I_A) = \frac{u_B(I_A)}{|I_A|} 100\% = \frac{a + c \cdot \left(\frac{CNZ}{|I_A|} \right)}{\sqrt{3}} 100\%$$

7. Wpływ ograniczonej wartości rezystancji wejściowej amperomierza

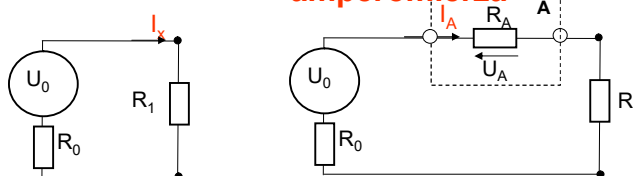
Amperomierz jest włączany szeregowo w gałąź, w której mierzono prąd. Dlatego ogólnym **wymaganiem do amperomierza** jest zapewnienie **małej rezystancji wejściowej** w porównaniu do rezystancji gałęzi.

Niezerowa rezystancja amperomierza powoduje zmianę rezystancji w gałęzi co z kolei powoduje **zmianę prądu w gałęzi**, to jest powstaje **błąd metodyczny pomiaru prądu**

Na rys. pokazano obwód elektryczny, w którym należy zmierzyć wartość prądu I_x .



7. Wpływ ograniczonej wartości rezystancji wejściowej amperomierza



Do wprowadzenia amperomierza wartość tego prądu wynosi

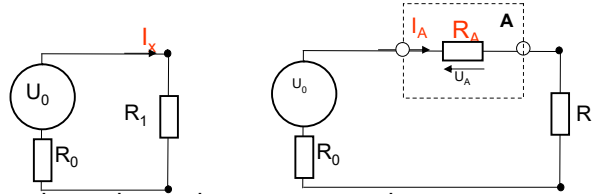
$$I_x = \frac{U_0}{R_0 + R_1} = \frac{U_0}{R_{01}}$$

Gdzie $R_{01} = R_0 + R_1$

Po **szeregowym włączeniu amperomierza** z rezystancją wejściowej R_A zmieni się ekwiwalentna **rezystancja obwodu**, w wyniku czego **zmieni się prąd mierzony** (wskazanie amperomierza)

$$I_A = I_{x'} = \frac{U_0}{R_{01} + R_A}$$

7. Wpływ ograniczonej wartości rezystancji wejściowej amperomierza



Zmniejszenie prądu pomiarowego wynosi

$$\Delta_{R_A}(I) = I_A - I_x = -I_A \frac{R_A}{R_{01}} = -\frac{R_A}{R_{01} + R_A} I_x$$

Względny błąd pomiaru prądu

$$\delta_{R_A} = \frac{\Delta_{R_A}(I)}{I_x} = -\frac{U_A}{U_0} = -\frac{R_A}{R_{01} + R_A}$$

7. Wpływ ograniczonej wartości rezystancji wejściowej amperomierza

Przykład 1a. Amperomierz analogowy

Przy $R_0=100 \Omega$, $R_1=1 \text{ k}\Omega$ oraz $R_A=1 \Omega$, $U_0=1 \text{ V}$

otrzymuje się:

$$I_x = \frac{U_0}{R_0 + R_1} = \frac{1 \text{ V}}{100 \Omega + 1 \text{ k}\Omega} = 0,90909 \text{ mA}$$

Wskazanie mikroamperomierza:

$$I_A = \frac{U_0}{R_0 + R_1 + R_A} = \frac{1 \text{ V}}{100 \Omega + 1 \text{ k}\Omega + 1 \Omega} = 0,90827 \text{ mA}$$

Błąd metodyczny względny:

$$\delta_{R_v} = \frac{I_A - I_x}{I_x} = \frac{0,90827 \text{ mA} - 0,90909 \text{ mA}}{0,90909 \text{ mA}} 100\% \approx -0,091\%$$

7. Wpływ ograniczonej wartości rezystancji wejściowej amperomierza

Przykład 1b amperomierz cyfrowy.

Przy $R_0=100 \Omega$, $R_1=1 \text{ k}\Omega$ oraz $R_A=0,1 \Omega$, $U_0=1 \text{ V}$ otrzymuje się:

Wskaźanie cyfrowego mikroamperomierza:

$$I_A = \frac{U_0}{R_0 + R_1 + R_A} = \frac{1 \text{ V}}{100 \Omega + 1 \text{ k}\Omega + 0,1 \Omega} = 0,909008 \text{ mA}$$

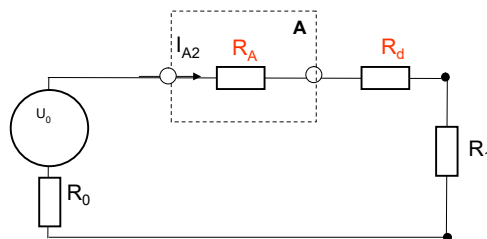
Błąd metodyczny względny:

$$\delta_{R_v} = \frac{I_A - I_x}{I_x} = \frac{0,909008 \text{ mA} - 0,90909 \text{ mA}}{0,90909 \text{ mA}} 100\% \approx -0,0091\%$$

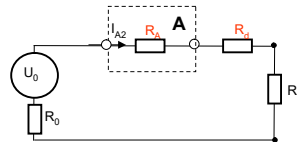
10 razy mniej w porównaniu do poprzedniego przykładu.

8. Korekcja błędu od wpływu rezystancji amperomierza R_A

Wpływ rezystancji amperomierza R_A na wynik pomiaru prądu może być skorygowany przez dodatkowy pomiar prądu z włączeniem dodatkowej rezystancji R_d o znanej wartości, na przykład taki samy amperomierz: $R_d=R_A$.



8. Korekcja błędu od wpływu rezystancji amperomierza R_A



Wtedy wynik pomiaru prądu w drugim pomiarze

$$I_{A2} = \frac{U_0}{R_{01} + R_A + R_d} = \frac{U_0}{R_{01} + 2R_A}$$

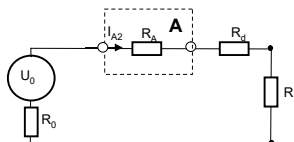
Z wartości wyników pomiaru I_A oraz I_{A2} można wyznaczyć wartość I_x

$$I_x = I_A \left(1 + \frac{R_A}{R_{01}} \right) = I_A \left(1 + \frac{R_A}{\frac{R_d}{a-1} - R_A} \right) = I_A \cdot \left(\frac{\beta}{1 + \beta - a} \right)$$

$$\beta = \frac{R_d}{R_A}$$

$$a = \frac{I_A}{I_{A2}} > 1$$

8. Korekcja błędu od wpływu rezystancji amperomierza R_A



Przy $R_d = R_A$ $\beta = 1$

Dlatego skorygowana wartość prądu

$$I_x = \frac{I_A}{2 - a}$$

8. Korekcja błędu od wpływu rezystancji amperomierza R_A

Przykład 1d. $U_0=10\text{ V}$, $R_0+R_1=10\ \Omega$, $R_A=1\ \Omega$.

Wartość rzeczywista prądu $I_x = \frac{U_0}{R_0 + R_1} = \frac{10\text{ V}}{10\ \text{Ohm}} = 1,000\ \text{A}$

Wynik pierwszego pomiaru $I_A = \frac{U_0}{R_0 + R_1 + R_A} = \frac{10\text{ V}}{10\ \text{Ohm} + 1\ \text{Ohm}} = 0,909091\ \text{A}$

Wynik drugiego pomiaru $I_{A2} = \frac{U_0}{R_0 + R_1 + R_A + R_A} = \frac{10\text{ V}}{10\ \text{Ohm} + 1\ \text{Ohm} + 1\ \text{Ohm}} = 0,8333333\ \text{A}$

Wartość współczynnika $a = \frac{I_A}{I_{A2}} = \frac{0,909091}{0,833333} \approx 1,0909091$

Skorygowana wartość prądu $I_x = \frac{U_0}{R_0 + R_1} = \frac{I_A}{2 - a} = \frac{0,909091}{2 - 1,0909091} = 1,000\ \text{A}$

Co odpowiada rzeczywistej wartości prądu.

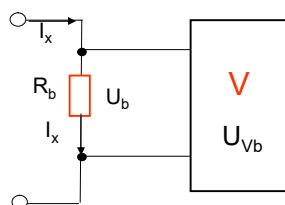
Pomiary pośrednie. Pomiar dużych prądów DC

Wykorzystani bocznika zewnętrznego

Dla pomiarów prądów o dużej wartości - od kilku amperów do setek amperów wykorzystuje się **metoda pośrednia**: poprzez

- włączenie w gałąź rezystora R_b o małej, jednak precyzyjnie znanej rezystancji, – tak zwanego **bocznika**, i
- pomiar woltmierzem V spadku napięcia na tym rezystorze U_{Vb} .

Dla takiego układu wg prawa Ohma **wartość mierzonego prądu wynosi**:



$$I_x = \frac{U_b}{R_b} = \frac{U_{Vb}}{R_b}$$

Pomiary pośrednie. Pomiar dużych prądów DC

Niepewność pośredniego pomiaru prądu.

Według równania pomiaru:

$$I_x = \frac{U_b}{R_b} = \frac{U_{Vb}}{R_b}$$

Niepewność wyniku pomiaru prądu $u(I)$ składa się z dwóch składowych:

Niepewności wyniku pomiaru napięcia woltomierzem $u_B(U_V)$

Niepewności wartości rezystancji bocznika: $u_B(R_b)$

Jeśli podczas pomiaru wstępuje więcej niż jedna składowa niepewności (w tym zagadnieniu 2) wtedy obliczana jest tak zwana złożona niepewność standardowa $u_c(I)$.

Tj. względna złożona niepewność standardowa pośredniego pomiaru prądu równa się pierwiastkowi z sumy kwadratów względnych niepewności pomiaru spadku napięcia i rezystancji bocznika

$$x = f(y_1, y_2) = \frac{y_1}{y_2} = \frac{U_{Vb}}{R_b}$$

$$u_c(x) = \sqrt{C_1^2 u^2(y_1) + C_2^2 u^2(y_2)}$$

$$C_1 = \frac{\partial f(y_1, y_2)}{\partial y_1} = \frac{\partial (y_1/y_2)}{\partial y_1} = \frac{\partial (U_{Vb}/R_b)}{\partial U_{Vb}} = \frac{1}{R_b}$$

$$C_2 = \frac{\partial f(y_1, y_2)}{\partial y_2} = \frac{\partial (y_1/y_2)}{\partial y_2} = \frac{\partial (U_{Vb}/R_b)}{\partial R_b} = -\frac{U_{Vb}}{R_b^2}$$

$$u_c(I_x) = \sqrt{\frac{u^2(U_{Vb})}{R_b^2} + \frac{U_{Vb}^2 \cdot u^2(R_b)}{R_b^4}}$$

$$u_{c,rel}(I_x) = \frac{u_c(I_x)}{|I_x|} = \frac{u_c(I_x) \cdot R_b}{|U_{Vb}|} = \sqrt{u_{rel}^2(U_{Vb}) + u_{rel}^2(R_b)}$$

Pomiary pośrednie

Jest to ogólne prawo:

Jeśli wynik pomiaru (równanie pomiaru) jest iloczyn-iloraz wyników pomiaru innych wielkości x_1, x_2, x_3, x_4 , wtedy **względna** złożona niepewność standardowa $u_c(x)$ wyniku pośredniego pomiaru równa się pierwiastkowi z **sumy kwadratów względnych niepewności wyników pomiaru tych wielkości**.

$$y = \frac{x_1 x_2}{x_3 x_4}$$

$$u_{c,rel}(y) = \frac{u_c(y)}{|y|} = \sqrt{u_{rel}^2(x_1) + u_{rel}^2(x_2) + u_{rel}^2(x_3) + u_{rel}^2(x_4)}$$

Warunkiem jest niezależność wyników pomiaru wielkości x_1, x_2, x_3, x_4

Oprócz tego:

2) względna złożona niepewność standardowa potęgi rzędu m wartości x równa się iloczynowi względnej niepewności wartości x oraz tego rzędu:

$$y = x^m \quad u_{rel}(y) \approx |m| \cdot u_{rel}(x)$$

3) względna złożona niepewność standardowa pierwiastka rzędu m wartości x równa się ilorazowi względnej niepewności wartości x oraz tego rzędu:

$$y = \sqrt[m]{x} \quad u_{rel}(y) \approx \frac{1}{|m|} u_{rel}(x)$$