

POMIAR NAPIĘCIA STAŁEGO

Plan wykładu

Wstęp

1. Wymagania do woltomierzy DC.
2. Układy wejściowe woltomierza
3. Zasady doboru parametrów woltomierza
4. Ogólny schemat woltomierza cyfrowego
5. Niepewność wskazania woltomierza cyfrowego DC
6. Wpływ ograniczonej wartości rezystancji wejściowej woltomierza
7. Prosta metoda korekcji wpływu ograniczonej wartości rezystancji wejściowej woltomierza

Wstęp

Jednostką napięcia elektrycznego jest wolt

Oznaczenie **V**

Dla dużych napięć (ponad kilka set woltów) wykorzystuje się kilowolt równy tysiąc (1000) woltów :

$$1\text{kV}=1000\text{ V}$$

Na przykład: zamiast 3250 V lepiej 3,25 kV

Dla jeszcze większych napięć (powyżej kilka set kilowoltów) wykorzystuje się megawolt równy tysiąc (1000) kilowoltów (milion 10^6 woltów):

$$1\text{ MV}=1000\text{ kV}=10^3\text{ kV}=10^6\text{ V}$$

Wstęp

Dla małych napięć (poniżej kilka setnych (a nawet dziesiątych) wolta) wykorzystuje się miliwolt równy jedna tysięczną (0,001) wolta :

$$1\text{mV}=0,001\text{ V} = 10^{-3}\text{ V}$$

$$(1\text{ V}=1000\text{ mV} = 10^3\text{ mV})$$

Na przykład: zamiast 0,0625 V lepiej 62,5 mV

Nawet często zamiast 0,255 V lepiej 255 mV.

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

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

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

Na przykład: zamiast 0,0642 mV lepiej 64,2 μV

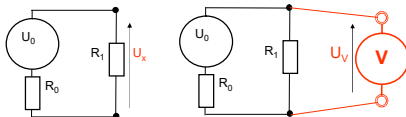
Nawet zamiast 0,145 mV lepiej 145 μV .

Wstęp

Do pomiaru napięcia wykorzystuje się woltomierze.

Woltomierz jest włączany **równolegle** do gałęzi obwodu elektrycznego, na której mierzono spadek napięcia.

Na rys. pokazano obwód elektryczny, w którym należy zmierzyć wartość spadku napięcia U_x .



1. Wymagania do woltomierzy DC.

Ogólnymi wymaganiami do woltomierzy przy pomiarach wartości napięcia DC są:

1. **Możliwość pomiaru wartości napięcia w zadanym zakresie** (małych jak i dużych wartości napięcia, prądu), jest to wymagania amplitudowe;
2. **Brak obciążenia obiektu badanego** – odpowiednia wartość rezystancji wejściowej;

1. Wymagania do woltomierzy oraz amperomierzy DC.

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**;

- Szybkość pomiaru** – ten problem jest ważny przy pomiarach wielkości szybko zmiennych (dynamicznych), jest związany z odpornością do wpływu zakłóceń;
- Możliwość przesyłania danych pomiarowych do PC** – jest to ważne przy automatyzacji pomiarów oraz opracowania wyników.

1. Wymagania do woltomierzy DC.

Podstawowymi parametrami każdego woltomierza są:

1. **Zakresy pomiarowe:** $U_{n,1}$; $U_{n,2}$; ..., $U_{n,k}$;

2. **Rezystancja wejściowa R_V** ;

3. **Klasa dokładności (kl)**.

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

$$U_{n,i} < U_x \leq U_{n,i+1}$$

1. Wymagania do woltomierzy DC

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

$$U_{n,i-1} < U_x \leq U_{n,i}$$

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

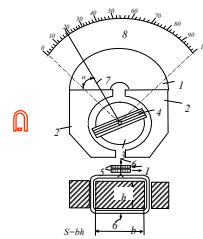
Standardowa niepewność wskazania woltomierza analogowego:

$$u_B(U_V) = k_V \frac{U_{n,i}}{\sqrt{3} \cdot 100\%}$$

Względna standardowa niepewność wskazania woltomierza analogowego:

$$u_{rel}(U_V) = \frac{u_B(U_V)}{|U_V|} 100\% = k_V \frac{U_{n,i}}{\sqrt{3} \cdot |U_V|}$$

2. Woltomierze magnetoelektryczne (ME)



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

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

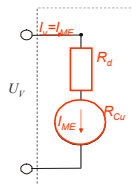
- gdzie $S_V = \frac{BSW}{k_{zwr}}$ - jest czułością organu ruchomego do wartości prądu

2. Woltomierze magnetoelektryczne (ME)

Ponieważ kąt odchylenia organu ruchomego jest proporcjonalny do prądu przepływającego w cewce, w woltomierzu analogowym magnetoelektrycznym napięcie mierzone U_V jest przetwarzane na prąd I_{ME} według prawa Ohma:

$$I_{ME} = I_V = \frac{U_V}{R_V} = \frac{U_V}{R_{Cu} + R_d}$$

Gdzie R_V jest rezystancją wejściową woltomierza R_{Cu} jest rezystancją ramki (miedz) mechanizmu ME R_d jest rezystancją dodatkową



2. Woltomierze magnetoelektryczne (ME)

Zakresy pomiarowe woltomierzy analogowych najczęściej są realizowane poprzez wykorzystanie rezystorów dodatkowych (szeregowych) $R_{d,i}$

Rezystancja wejściowa woltomierza powinna być bardzo duża, teoretycznie nieskończoną: $R_V \rightarrow \infty$

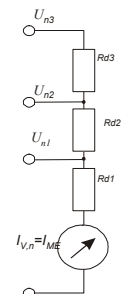
Na najmniejszym zakresie ($U_{n,1}$) rezystancja $R_{d,1}$ wyznaczana jest z warunku kompensacji temperaturowej:

$$R_{d,1} \geq \frac{4 - k_I}{k_I} R_{Cu}$$

Na większych zakresach wartości rezystancji wyznaczane są wg wzoru

$$R_{d,i} = \frac{U_{n,i} - U_{n,i-1}}{I_{ME}}$$

$$I_{ME} = I_{V,n} = \frac{U_{n,i}}{R_{Cu} + R_{d,i}}$$



2. Voltomierze magnetoelektryczne (ME) Rezystancja wejściowa woltomierza analogowego

Na każdym zakresie $U_{n,i}$ woltomierza rezystancja wejściowa woltomierza $R_{V,i}$ jest różną:

$$R_{V,i} = \frac{U_{n,i}}{I_{V,n}}$$

Natomiast prąd przez woltomierz $I_{V,n}$ przy różnych napięciach zakresowych zwykle jest jednakowym, rzędu **kilku miliamper**.

2. Voltomierze magnetoelektryczne (ME) Rezystancja wejściowa woltomierza analogowego

Na przykład, przy prądzie nominalnym przez woltomierz $I_{V,n} = 3\text{mA}$ na zakresie pomiarowym $U_{n1} = 15\text{V}$ rezystancja wejściowa woltomierza analogowego równa się

$$R_{V,i} = \frac{15\text{V}}{3\text{mA}} = 5\text{k}\Omega$$

A na zakresie pomiarowym $U_{n2} = 60\text{V}$ rezystancja wejściowa woltomierza analogowego równa się

$$R_{V,i} = \frac{60\text{V}}{3\text{mA}} = 20\text{k}\Omega$$

3. Zasady doboru parametrów woltomierze DC

Przykład:

Mierzone jest napięcie $U_x \approx 12\text{V}$

Woltomierz analogowy 1:

Zakresy: 3V; 7,5V; 15V; 30V, 60V, klasa dokładności 1,5

Woltomierz analogowy 2:

Zakresy: 2; 5; 10V; 20V; 50V; 100V, klasa dokładności 1,0

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

Rozwiązanie:

1. Ponieważ mierzone napięcie $U_x \approx 12\text{V}$ dlatego

Zakres pomiarowy woltomierza 1 : $U_{n1} = 15\text{V}$

Zakres pomiarowy woltomierza 2 : $U_{n2} = 20\text{V}$

3. Zasady doboru parametrów woltomierze DC

Woltomierz analogowy 1: zakresy: 3V; 7,5V; 15V; 30V, 60V, klasa dokładności 1,5
Woltomierz analogowy 2: zakresy 2; 5; 10V; 20V; 50V; 100V, klasa dokładności 1,0

2. Standardowa niepewność wskazania woltomierza 1 ($U_{n1} \approx U_x$):

$$u_B(U_{V1}) = 1,5 \cdot \frac{15\text{V}}{\sqrt{3} \cdot 100\%} = 0,130\text{V}$$

3. Względna standardowa niepewność wskazania woltomierza 1:

$$u_{B,rel}(U_{V1}) = \frac{0,130\text{V}}{12\text{V}} \cdot 100\% = 1,08\%$$

4. Standardowa niepewność wskazania woltomierza 2 ($U_{n2} \approx U_x$):

$$u_B(U_{V2}) = 1,0 \cdot \frac{20\text{V}}{\sqrt{3} \cdot 100\%} = 0,115\text{V}$$

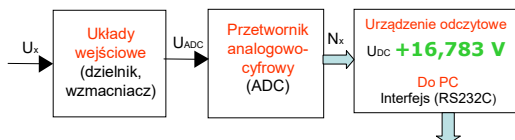
5. Względna standardowa niepewność wskazania woltomierza 2 :

$$u_{B,rel}(U_{V2}) = \frac{0,115\text{V}}{12\text{V}} \cdot 100\% = 0,962\%$$

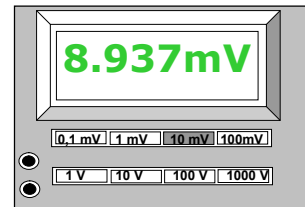
4. Ogólny schemat woltomierza cyfrowego DC

Schemat zawiera 3 podstawowe części:

1. Układy wejściowe, zapewniające odpowiednie zakresy pomiarowe, odpowiednią rezystancję wejściową, oraz inne wymagania;
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, ...)



4. Ogólny schemat woltomierza cyfrowego DC



Możliwość pomiaru wartości napięcia w różnych zakresach zapewnia się wykorzystaniem na wejściu woltomierza

- **wzmacniacza** - dla małych wartości napięć;
- **dzielnika** - dla dużych wartości napięć.

4. Układy wejściowe woltomierza cyfrowego DC Dzielnik wejściowy

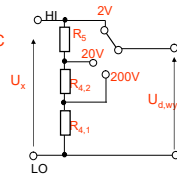
W celu zapewnienia **rozszerzenia zakresów napięć powyżej zakresu przetwarzania ADC** wykorzystuje się rezystancyjny **dzielnik wejściowy**.

Współczynnik przetwarzania dzielnika:

$$K_{d,j} = \frac{U_{d,wy}}{U_{z,j}} = \frac{R_{d,j}}{R_{d,j} + R_5} = \frac{1}{1 + R_5/R_{d,j}}$$

Rezystancja wejściowa woltomierza równa się rezystancji dzielnika:

$$R_v = R_5 + R_{d,1} + R_{d,2} + \dots + R_{d,j}$$



4. Układy wejściowe woltomierza cyfrowego DC Wzmacniacz wejściowy

W celu zapewnienia **rozszerzenia zakresów w stronę napięć poniżej zakresu przetwarzania przetwornika ADC** wykorzystuje się **wzmacniacz napięcia, zbudowany na bazie wzmacniacza operacyjnego (WO)**.

Dla zapewnienia kilku zakresów pomiarowych wykorzystuje się **kilku rezystorów R_{2,j}** w obwodzie sprzężenia zwrotnego WO.

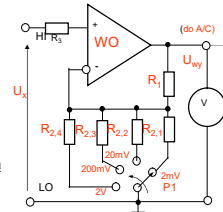
Wartości **współczynnika wzmocnienia** równają się:

$$K_{w,j} = \frac{R_{2,j} + R_1}{R_{2,j}} = 1 + R_1/R_{2,j}$$

Przełącznik P zapewnia zadany współczynnik wzmocnienia.

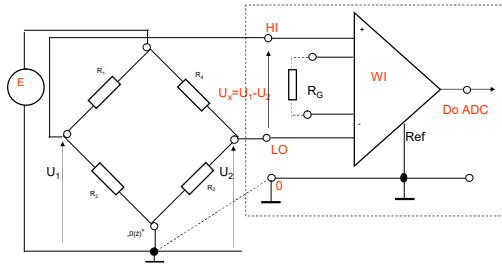
Napięcie wyjściowe wzmacniacza:

$$U_{wy} = U_x \cdot K_w$$



4. Układ wejściowy woltomierza ze wzmacniaczem instrumentalnym.

W takim układzie woltomierz jest wyposażony w trzy wejścia (sygnałowo wysokie – „HI” i niskie „LO” oraz masę „0”).



4. Układy wejściowe woltomierza cyfrowego DC Zakresy cyfrowych woltomierzy DC

Typowe zakresy woltomierzy są krótkie:

wartościami 10^n , gdzie n – liczba całkowita, ujemna i dodatnia, na przykład

0,001 V (1 mV) 0,01 V (10 mV); 0,1 V (100 mV); 1 V, 10 V, 100 V; 1000 V,

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

0,002 V (2 mV) 0,02 V (20 mV); 0,2 V (200 mV); 2 V, 20 V, 200 V.

5. Niepewność wskazania woltomierza cyfrowego DC

Wartość niepewności wskazania woltomierza cyfrowego DC U_v jednoznacznie wyznaczana jest przez znane wartości graniczne:

a % (ppm) od wskazania U_v ,

oraz b% (ppm) od zakresu U_n .

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

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

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

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

5. Niepewność wskazania woltomierza cyfrowego DC

Jeśli druga składowa wartości granicznej odchylenia wskazania woltomierza jest zadana przez:

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

$$CNZ = \frac{U_{gr}}{N_{br}}$$

a **pierwsza** dalej podana jako **a% (ppm) od wskazania U_v .**

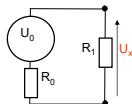
Wtedy przy założeniu jednostajnego rozkładu prawdopodobieństwa odchyłeń wskazań woltomierza w przedziale wartości granicznych niepewność **standardowa** **wskazania woltomierza cyfrowego** równa się:

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

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

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

6. Wpływ ograniczonej wartości rezystancji wejściowej woltomierza

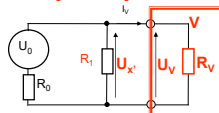


Do podłączenia woltomierza wartość napięcia mierzonego wynosi

$$U_x = U_0 \frac{R_1}{R_0 + R_1} = \frac{U_0}{R_0} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1}} = \frac{U_0 G_0}{G_0 + G_1}$$

$$G_0 = \frac{1}{R_0}, G_1 = \frac{1}{R_1}$$

6. Wpływ ograniczonej wartości rezystancji wejściowej woltomierza

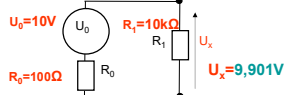


Po podłączeniu woltomierza wynik pomiaru tego napięcia wynosi

$$U_V = U_0 \frac{R_1 \parallel R_V}{R_0 + R_1 \parallel R_V} = \frac{U_0}{R_0} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_V}} = \frac{U_0 G_0}{G_0 + G_1 + G_V}$$

$$G_0 = \frac{1}{R_0}, G_1 = \frac{1}{R_1}, G_V = \frac{1}{R_V}$$

6. Wpływ ograniczonej wartości rezystancji wejściowej woltomierza: Przykład:



Przykład 1.

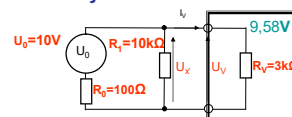
Napięcie zasilania: $U_0 = 10 \text{ V}$

Rezystancje:
 $R_0 = 100 \Omega, R_1 = 10 \text{ k}\Omega$

Wartość napięcia mierzonego:

$$U_x = \frac{U_0}{R_0} \frac{1}{\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1}} = \frac{10 \text{ V}}{100 \Omega} \frac{1}{\frac{1}{100 \Omega} + \frac{1}{10 \text{ k}\Omega}} = 9,901 \text{ V}$$

6. Wpływ ograniczonej wartości rezystancji wejściowej woltomierza: Przykład:



Przykład 1. Woltomierz analogowy.
Rezystancja wejściowa woltomierza: $R_V = 3 \text{ k}\Omega$,

Wskazanie woltomierza:

$$U_V = \frac{10 \text{ V}}{100 \Omega} \frac{1}{\frac{1}{100 \Omega} + \frac{1}{10000 \Omega} + \frac{1}{3000 \Omega}} \approx 9,58 \text{ V}$$

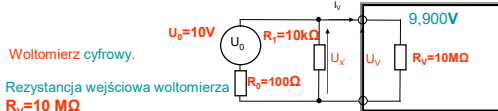
Błąd metodyczny bezwzględny: $\Delta_R(U) = U_V - U_x = 9,58 \text{ V} - 9,901 \text{ V} \approx -0,321 \text{ V}$

Błąd metodyczny względny: $\delta_R = \frac{\Delta_R(U)}{U_x} = \frac{-0,321 \text{ V}}{9,901 \text{ V}} \cdot 100\% \approx -3,19\%$

lub bezpośrednio

$$\delta_R = \frac{\Delta_R(U)}{U_x} = \frac{100 \text{ Ohm}}{3000 \text{ Ohm}} \frac{1}{1 + \frac{100 \text{ Ohm}}{10000 \text{ Ohm}} + \frac{100 \text{ Ohm}}{3000 \text{ Ohm}}} = -3,19\%$$

6. Wpływ ograniczonej wartości rezystancji wejściowej woltomierza: Przykład:



Woltomierz cyfrowy.

Rezystancja wejściowa woltomierza
 $R_V = 10 \text{ M}\Omega$

Wskazanie woltomierza

$$U_V = \frac{10 \text{ V}}{100 \Omega} \frac{1}{\frac{1}{100 \Omega} + \frac{1}{10000 \Omega} + \frac{1}{10000000 \Omega}} = 9,9000 \text{ V}$$

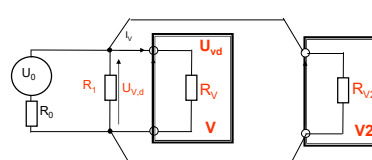
Błąd metodyczny bezwzględny $\Delta_R(U) = U_V - U_x = 9,9000 \text{ V} - 9,9010 \text{ V} \approx -0,0010 \text{ V}$

Błąd metodyczny względny: $\delta_R = \frac{\Delta_R(U)}{U_x} = \frac{-0,0010 \text{ V}}{9,901 \text{ V}} \cdot 100\% \approx -0,010\%$

lub bezpośrednio

$$\delta_R = \frac{\Delta_R(U)}{U_x} = -\frac{100 \text{ Ohm}}{1000000 \text{ Ohm}} \frac{1}{1 + \frac{100 \text{ Ohm}}{10000 \Omega} + \frac{100 \text{ Ohm}}{10000000 \Omega}} = -0,0099\% \approx -0,010\%$$

7. Prosta metoda korekcji wpływu ograniczonej wartości rezystancji wejściowej woltomierza

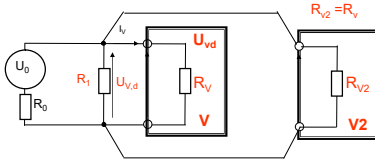


Równolegle do woltomierza podłączenie drugiego (V_2) woltomierza, najlepiej o takiej samej rezystancji wejściowej: ($R_{V2} = R_V$)

Po podłączeniu dodatkowego woltomierza wskazanie woltomierza wynosi

$$U_{V,d} = \frac{U_0 G_0}{G_0 + G_1 + G_V + G_{V2}} = \frac{U_0 G_0}{G_0 + G_1 + 2G_V}$$

7. Prosta metoda korekcji wpływu ograniczonej wartości rezystancji wejściowej woltomierza



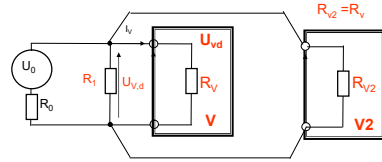
Stosunek obydwu wskazań woltomierza

$$\gamma_V = \frac{U_V}{U_{V,d}} = \frac{G_0 + G_1 + G_V + G_{V2}}{G_0 + G_1 + G_V} = 1 + \frac{G_{V2}}{G_0 + G_1 + G_V} > 1$$

lub $\gamma_V = \frac{U_V}{U_{V,d}} = 1 + \frac{\beta}{\frac{G_0 + G_1}{G_V} + \beta}$

$$\beta = \frac{R_V}{R_{V,d}}$$

7. Prosta metoda korekcji wpływu ograniczonej wartości rezystancji wejściowej woltomierza



Skorygowana wartość zmierzonych napięcia

$$U_x \approx U_{kor} = U_V \frac{\beta}{1 + \beta - \gamma_V}$$

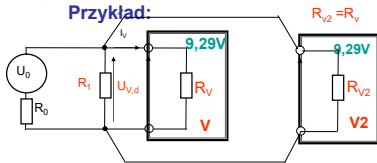
$$\gamma_V = \frac{U_V}{U_{V2}}$$

A przy $R_{V2} = R_V$: $\beta = 1$ i wtedy

$$U_x \approx U_{kor} = U_V \frac{1}{2 - \gamma_V}$$

7. Prosta metoda korekcji wpływu ograniczonej wartości rezystancji wejściowej woltomierza

Przykład:

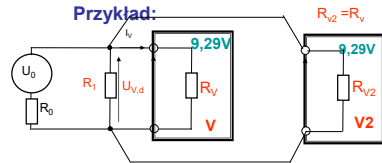


Przykład dla analogowego woltomierza:

$$R_{V2} = R_V = 3k \Omega; \quad U_x = 9,901 V; \quad U_V = 9,58 V$$

7. Prosta metoda korekcji wpływu ograniczonej wartości rezystancji wejściowej woltomierza

Przykład:



Po podłączeniu dodatkowego woltomierza wskazanie woltomierza wynosi:

$$U_{V,d} = \frac{U_V G_0}{G_0 + G_1 + G_V + G_{V2}} \approx 9,29 V$$

Stosunek napięć: $\gamma_V = \frac{U_V}{U_{V,d}} = \frac{9,58V}{9,29} \approx 1,031$

Skorygowana wartość wyniku pomiaru napięcia
Dokładna wartość:

$$U_x \approx U_k = \frac{U_V}{2 - \gamma_V} = \frac{9,58 V}{2 - 1,031} \approx 9,989 V$$

$$U_x = 9,901 V$$