

Problemy pomiaru małych napięć w obwodach elektronicznych

Plan wykładu

- 1. Wymagania do woltomierzy DC.**
- 2. Korekcja wpływu rezystancji wejściowej woltomierza**
- 3. Układy wejściowe woltomierza.**
- 4. Układ wejściowy woltomierza ze wzmacniaczem instrumentalnym.**

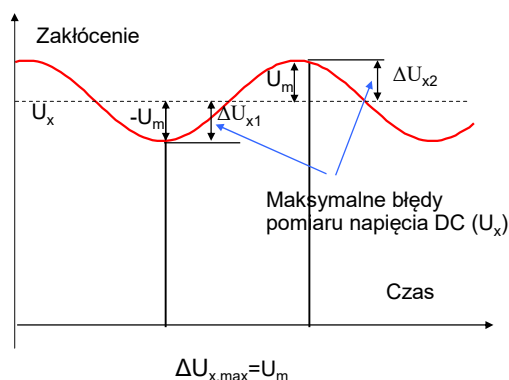
1. Wymagania do woltomierzy DC.

Ogólne wymagania do woltomierze przy pomiarach wartości napięcia DC podobne je do innych mierników.

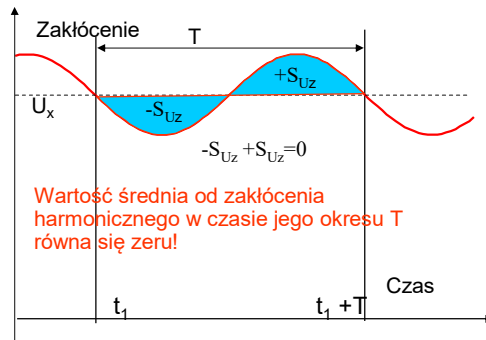
Z pośród nich najważniejsze to:

1. **Możliwość pomiaru wartości napięcia w zadanym zakresie** (małych jak i dużych wartości napięcia), jest to wymagania amplitudowe;
2. **Brak obciążenia obiektu badanego** – odpowiednia wartość rezystancji wejściowej;
3. **Zadana dokładność pomiaru**, zapewnia się odpowiednią klasą dokładności woltomierza oraz innymi wartościami jego parametrów: stabilnością temperaturową oraz czasową, **odpornością na zakłócenia i szumy**.

Wpływ zakłócenia

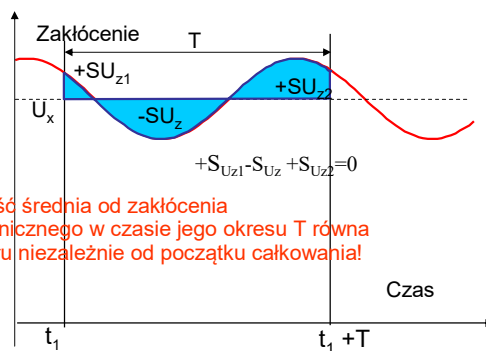


Wartość średnia zakłócenia w czasie okresu



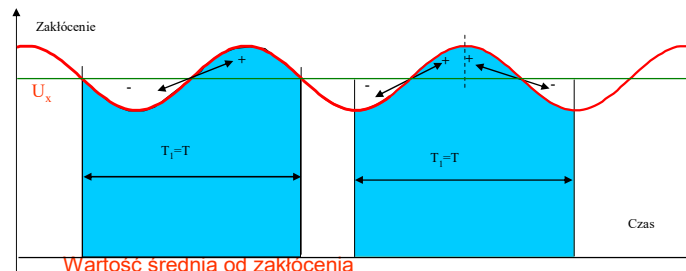
$$\int_{t_1}^{t_1+T} U_m \cdot \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right) dt = \int_{t_1}^{t_1+T} U_m \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) dt = 0 !!!$$

Wartość średnia zakłócenia w czasie okresu



$$\int_{t_1}^{t_1+T} U_m \cdot \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right) dt = \int_{t_1}^{t_1+T} U_m \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) dt = 0 !!!$$

Wartość średnia zakłócenia w czasie okresu



Wartość średnia od zakłócenia harmonicznego w czasie jego okresu T równa się zero niezależnie od początku całkowania!

$$\int_{t_1}^{t_1+T} U_m \cdot \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right) dt = \int_{t_1}^{t_1+T} U_m \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) dt = 0 !!!$$

Metoda tłumienia zakłóceń okresowych w woltomierze z dwukrotnym całkowaniem

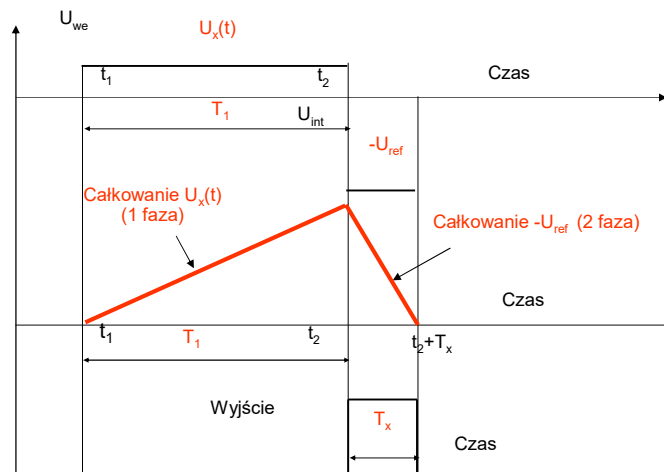
Metoda ta charakteryzuje się bardzo dobrymi parametrami metrologicznymi, zwłaszcza w stosunku dokładności przetwarzania oraz odporności na zakłócenia.

Zasada przetwarzania polega na:

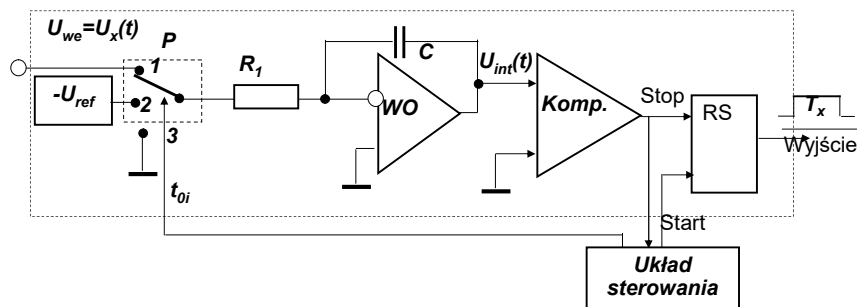
całkowaniu sygnału (napięcia, prądu) wejściowego $U_x(t)$ w ciągu interwału czasowego zadanej trwałości T_1 (pierwsza faza) i zgromadzeniu ładunku Q_1 proporcjonalnego wartości średniej sygnału wejściowego

z następną kompensacją tego ładunku przez całkowanie sygnału (napięcia, prądu) referencyjnego U_{ref} odwrotnej polaryzacji i wyznaczeniu interwału czasowego T_x tej kompensacji (druga faza).

Metoda tłumienia zakłóceń okresowych w woltomierze z dwukrotnym całkowaniem



Uproszczony schemat przetwornika napięcie – interwał czasowy z dwukrotnym całkowaniem



Metoda przetwarzania w woltomierze z dwukrotnym całkowaniem

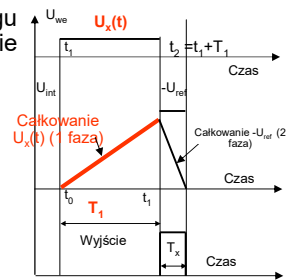
Podczas całkowania napięcie wejściowego $U_x(t)$ w interwale czasowym od $t_{1,i}$ do $t_{2,i}=t_{1,i}+T_1$ (w ciągu zadanego i stałego interwału czasowego T_1) napięcie na wyjściu integratora osiąga wartość

$$U_{\text{int}}(T_1) = \frac{1}{R_1 C} \int_{t_1}^{t_1+T_1} U_x(t) dt = \frac{T_1}{R_1 C} \overline{U_x} = \frac{Q_1}{C}$$

gdzie

$$\overline{U_x} = \frac{1}{T_1} \int_{t_1}^{t_1+T_1} \left[U_x + U_m \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \right] dt = U_x + U_m \frac{\sin\left(2\pi \frac{T_1}{T}\right)}{2\pi \frac{T_1}{T}}$$

jest wartością średnią napięcia wejściowego (przetwarzanego) w czasie pierwszego całkowania T_1 (pierwsza faza całkowania)

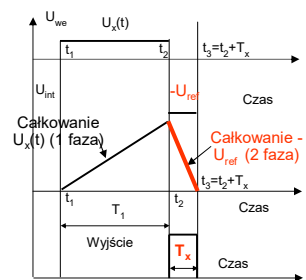


Metoda przetwarzania w woltomierze z dwukrotnym całkowaniem

Następnie do wejścia integratora zostaje podłączone napięcie referencyjne U_{ref} odwrotnej polaryzacji i na jego wyjściu wartość napięcia będzie się obniżać (2 faza całkowania) aż do zera w moment czasowy

$$t_3 = t_2 + T_x$$

$$U_{\text{int}}(t) = U_{\text{int}}(T_1) - \frac{1}{R_1 C} \int_{t_2}^{t_2+T_x} U_{\text{ref}} dt = U_{\text{int}}(T_1) - \frac{U_{\text{ref}} T_x}{R_1 C} = \frac{T_1}{R_1 C} \overline{U_x} - \frac{U_{\text{ref}} T_x}{R_1 C}$$



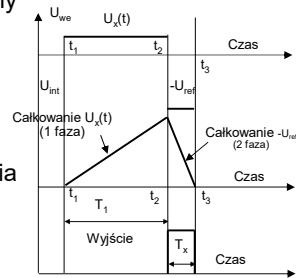
Metoda przetwarzania w woltomierze z dwukrotnym całkowaniem

Interwał czasowy podczas którego został rozładowany kondensator równa się

$$T_x = \frac{\overline{U}_x}{R_1 C U_{ref} / R_1 C} T_1 = \frac{T_1}{U_{ref}} \overline{U}_x$$

I jest proporcjonalny do wartości średniej napięcia wejściowego \overline{U}_x

I jest to **funkcja przetwarzania przetwornika**.



Metoda przetwarzania w woltomierze z dwukrotnym całkowaniem

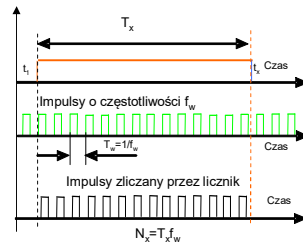
W interwale czasowym T_x będą zliczane impulsy o częstotliwości wzorcowej f_w , dlatego wynik przetwarzania A/C w zależności od wartości średniej napięcia wejściowego

(**funkcja przetwarzania**) opisuje się wzorem

$$N_x = T_x f_w = \frac{T_x f_w}{U_{ref}} \overline{U}_x = k_{A/C} \cdot \overline{U}_x$$

Gdzie $k_{A/C} = \frac{T_x f_w}{U_{ref}}$

jest **współczynnikiem przetwarzania** przetwornika A/C z dwukrotnym całkowaniem



Współczynnik tłumienia zakłócenia okresowego w woltomierzu z dwukrotnym całkowaniem

Jeśli czas całkowania w pierwszej fazie jest równy okresu zakłócenia okresowego

$$T_1 = T$$

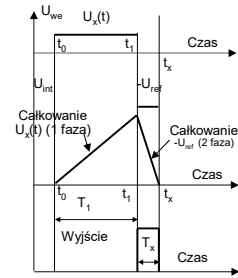
Wtedy wartość składowej od zakłócenia

$$\sin\left(2\pi \frac{T_1}{T}\right) = 0$$

To jest we wzorze dla wartości średniej składowa od zakłócenia też równa się zero:

$$U_m \cdot \frac{\sin\left(\pi \frac{T_1}{T}\right)}{\pi \frac{T_1}{T}} = 0$$

To jest wynik przetwarzania nie zależy od wartości zakłócenia a tylko od wartości napięcia korzystnego U_x



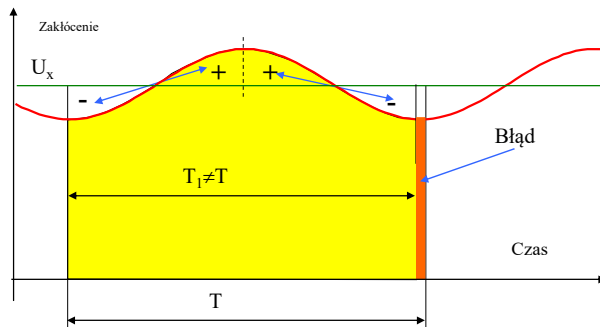
$$\bar{U}_x = U_x + U_m \cdot \frac{\sin\left(2\pi \frac{T_1}{T}\right)}{2\pi \frac{T_1}{T}} = U_x$$

Współczynnik tłumienia zakłócenia okresowego w woltomierzu z dwukrotnym całkowaniem

Jeśli jednak czas całkowania w pierwszej fazie nie jest równy okresu zakłócenia okresowego

$$T_1 \neq T,$$

na przykład w wyniku odchylenia częstotliwości f od wartości nominalnej f_n wtedy wartość składowej od zakłócenia w wyniku całkowania zakłócenia nie równa się zero i przy :



Współczynnik tłumienia zakłócenia okresowego w woltomierzu z dwukrotnym całkowaniem

Jeśli

$$\delta_f = \frac{f - f_n}{f_n}$$

względnym odchyleniem częstotliwości od nominalnej i jest małym

$$|\delta_f| \ll 1$$

wtedy wartość składowej od zakłócenia (wartość błędu) w wyniku całkowania zakłócenia nie równa się zero i równa się :

$$\Delta U_z = U_m \cdot \frac{\sin(\pi(1 + \delta_f))}{\pi(1 + \delta_f)} = U_m \cdot \frac{\sin(\pi\delta_f)}{\pi(1 + \delta_f)} \approx U_m \cdot \delta_f \neq 0$$

Wynik przetwarzania nie zależy od wartości zakłócenia a tylko od wartości napięcia korzystnego U_x

Współczynnik tłumienia zakłócenia okresowego w woltomierzu z dwukrotnym całkowaniem

Współczynnikiem tłumienia zakłóceń szeregowych (K_{it} , NMRR – normal mode rejection ratio) jest wyrażony decybeli stosunek amplitudy U_m zakłócenia sinusoidalnego do wartości maksymalnego błędu $\Delta U_{z,max}$ spowodowanego oddziaływaniem tego zakłócenia

$$K_{it} = NMRR = 20 \lg \left| \frac{U_m}{\Delta U_{z,max}} \right|$$

Dla małych odchyżeń częstotliwości zakłócenia od nominalnej (jak na przykład w przypadku zakłócenia sieciowego) $|\delta_f| \ll 1$ wartość współczynnika tłumienia zakłóceń zależy tylko od $|\delta_f|$

$$K_{it} = NMRR = 20 \lg \left| \frac{U_m}{U_m \cdot \delta_f} \right| = -20 \lg |\delta_f|$$

Współczynnik tłumienia zakłócenia okresowego w woltomierzu z dwukrotnym całkowaniem

Dla $|\delta_f| \approx 0,01$ (1%)

$$K_{it} = -20\lg|\delta_f| - 20\lg|0,01| = 40 \text{ dB} \quad (100 \text{ razy})$$

Współczynnik tłumienia zakłócenia okresowego w woltomierzu z dwukrotnym całkowaniem

Jeśli odchylenia częstotliwości zakłócenia od nominalnej jest duże wtedy teoretyczna wartość współczynnika tłumienia zakłóceń wyznaczana jest wzorem

$$K_{it,teor}(v = f_z \cdot T_1) = -20\lg \left| \frac{\sin(\pi v)}{\pi v} \right|$$

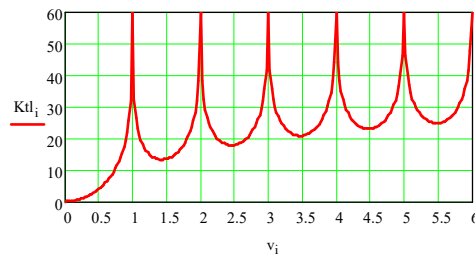
Gdzie $v = f_z \cdot T_1$

Jest względną częstotliwością (według czasu całkowania w pierwszej fazie)

Współczynnik tłumienia zakłócenia okresowego w woltomierzu z dwukrotnym całkowaniem

Jeśli odchylenia częstotliwości zakłócenia od nominalnej jest duże wtedy teoretyczna wartość współczynnika tłumienia zakłóceń wyznaczana jest wzorem

$$K_{it,teor}(v = f_z \cdot T_1) = -20 \lg \left| \frac{\sin(\pi v)}{\pi v} \right|$$



Współczynnik tłumienia zakłócenia okresowego w woltomierzu z dwukrotnym całkowaniem

Wnioski:

1. Dla pełnego tłumienia zakłócenia harmonicznego należy całkować sygnał wejściowy w czasie jednego lub kilku okresów zakłócenia

$$T_1 = m \times T_z = m / f_z$$
1. Oprócz pierwszej składowej harmonicznego będą tłumione wszystkie wyższe składowe: wielokrotności podstawowej $f_k = k \times f_z$
2. Jeśli częstotliwość zakłócenia zmienia się tak, że w czasie całkowania **nie umieszczają się całkowita liczba okresów zakłócenia**, to zakłócenia nie będą tłumione całkowicie i pozostawiają **niezerowy błąd od zakłócenia**.
3. **Współczynnikiem tłumienia** zakłócenia szeregowego (K_{it}) jest wyrażony decybeli stosunek amplitudy U_m zakłócenia sinusoidalnego do wartości maksymalnego błędu $\Delta U_{z,max}$

$$K_{it} = 20 \lg \left| \frac{U_m}{\Delta U_{z,max}} \right|$$
4. Dla małych odchyżeń częstotliwości zakłócenia od nominalnej wartość współczynnika tłumienia zakłóceń zależy tylko od względnej niestabilności częstotliwości

$$K_{it} = -20 \lg |\delta_f|$$

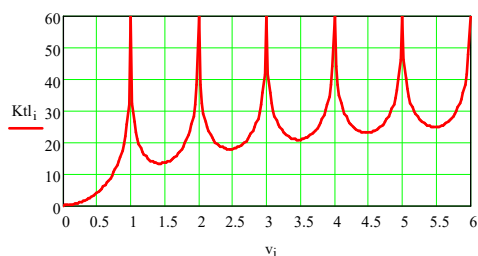
Współczynnik tłumienia zakłócenia okresowego w woltomierzu z dwukrotnym całkowaniem

7. Dla dużych odchyleń częstotliwości zakłócenia od nominalnej wartość współczynnika tłumienia zakłóceń osiąga teoretycznie nieskończone wartości na częstotliwościach krotnych odwrotności interwału czasowego całkowania w pierwszej fazie

$$f_k = k \times 1/T_1$$

a dla częstotliwości pomiędzy tymi częstotliwościami osiąga minimalne wartości

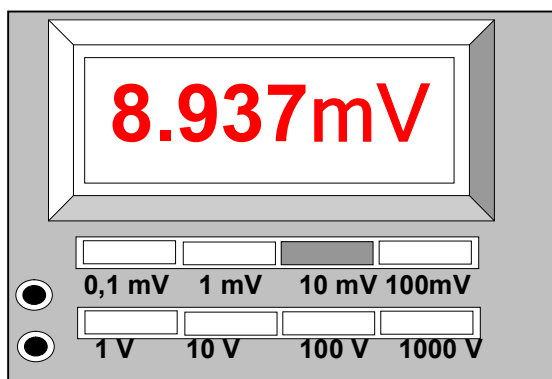
$$K_{tl, teor.} \approx 20 \lg |\pi(k + 0,5)|$$



2. Wymagania do woltomierzy DC. Zakresy

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

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



2. Wymagania do woltomierzy DC. Zakresy

Typowe zakresy woltomierzy są krotne:
wartościom 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 wartościom $2 \cdot 10^n$, $(4 \cdot 10^n \cdot 5 \cdot 10^n)$ na przykład :

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

2. Wymagania do woltomierzy DC. Zakresy

Z zakresami pomiarowymi są powiązane **liczba cyfr** (miejsc znaczących) wskazania oraz **wartość cyfry najmniej znaczącej**.

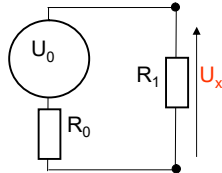
W woltomierze cyfrowym z liczbą cyfr dziesiętnych n z zakresem 10^n krotnym istnieją różnych wskazań

od $\underbrace{00\dots0}_n$ do $\underbrace{99\dots9}_n$,

przy tym wartości cyfry najmniej znaczącej – CNZ (ang. LSB) równa się:

$$CNZ = LSB = \frac{U_z}{10^n}$$

2. Wpływ ograniczonej wartości rezystancji wejściowej woltomierza

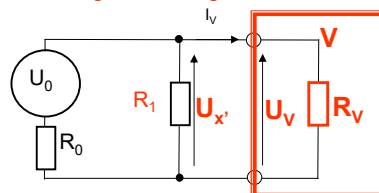


Do podłączenia woltomierza wartość napięcia mierzonego wynosi

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

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

2. Wpływ ograniczonej wartości rezystancji wejściowej woltomierza

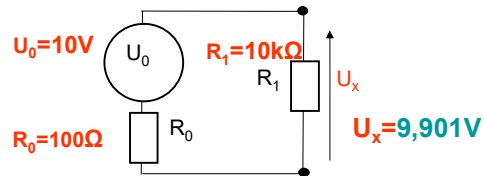


Po podłączeniu woltomierza wynik pomiaru tego napięcia wynosi

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

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

2. Wpływ ograniczonej wartości rezystancji wejściowej woltomierza: Przykład:



Przykład 1.

Napięcie zasilania: $U_0 = 10V$

Rezystancje:

$R_0 = 100\Omega$, $R_1 = 10k\Omega$

Wartość napięcia mierzonego:

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

2. Wpływ ograniczonej wartości rezystancji wejściowej woltomierza: Przykład:

Przykład 1. Woltomierz analogowy.

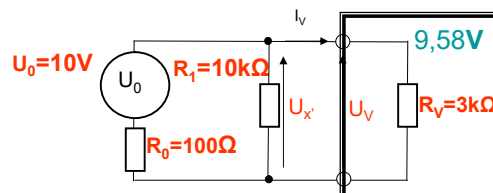
Rezystancja wejściowa woltomierza: $R_V = 3k\Omega$,

Wskazanie woltomierza:

Błąd metodyczny bezwzględny:

Błąd metodyczny względny:

lub bezpośrednio



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

$$\Delta_{R_V}(U) = U_V - U_x = 9,58V - 9,901V \approx -0,321V$$

$$\delta_{R_V} = \frac{\Delta_{R_V}(U)}{U_x} = \frac{-0,321V}{9,901V} \cdot 100\% \approx -3,19\%$$

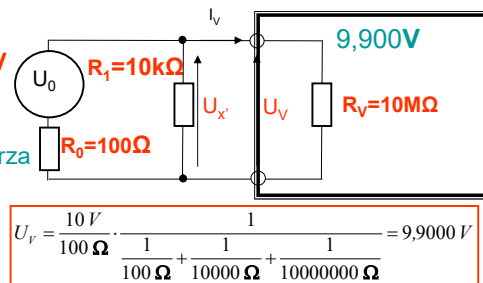
$$\delta_{R_V} = \frac{\Delta_{R_V}(U)}{U_x} = -\frac{100\Omega}{3000\Omega} \cdot \frac{1}{1 + \frac{100\Omega}{10000\Omega} + \frac{100\Omega}{3000\Omega}} = -3,19\%$$

3. Prosta metoda korekcji wpływu ograniczonej wartości rezystancji wejściowej woltomierza

Woltomierz cyfrowy.

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

Wskazanie woltomierza



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

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

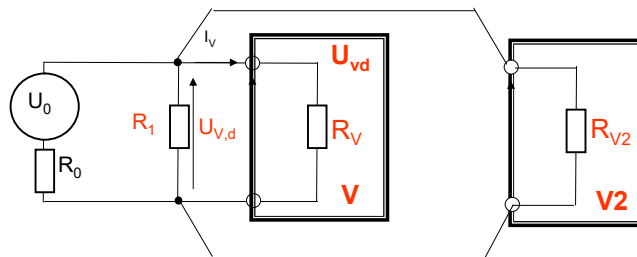
Błąd metodyczny względny:

$$\delta_{R_V} = \frac{\Delta_{R_V}(U)}{U_x} = \frac{-0,0010 \text{ V}}{9,901 \text{ V}} \cdot 100\% \approx -0,010\%$$

lub bezpośrednio

$$\delta_{R_V} = \frac{\Delta_{R_V}(U)}{U_x} = -\frac{100 \Omega}{1000000 \Omega} \cdot \frac{1}{1 + \frac{100 \Omega}{10000 \Omega} + \frac{100 \Omega}{1000000 \Omega}} = -0,0099\% \approx -0,010\%$$

3. Prosta metoda korekcji wpływu ograniczonej wartości rezystancji wejściowej woltomierza

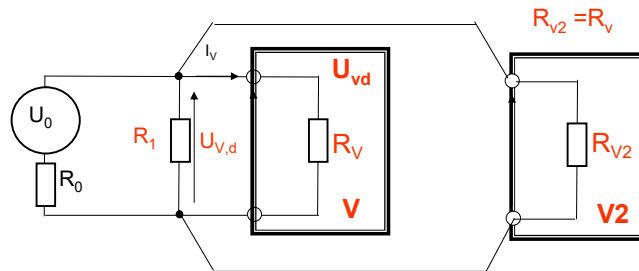


Równoległe do woltomierza podłączenie drugiego (V_2) woltomierza, najlepiej o takiej samej rezystancji wejściowej: ($R_{V2} = R_V$)

Po podłączeniu dodatkowego woltomierza wskazanie woltomierza wynosi

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

2. Prosta metoda korekcji wpływu ograniczonej wartości rezystancji wejściowej woltomierza



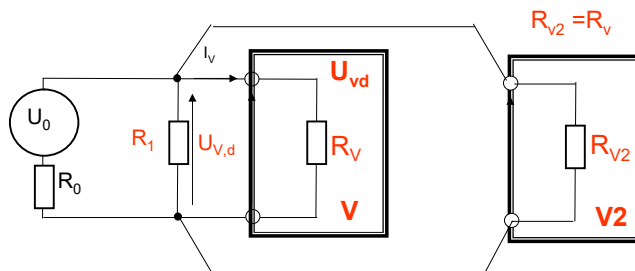
Stosunek obydwu wskazań woltomierza

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

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

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

3. Prosta metoda korekcji wpływu ograniczonej wartości rezystancji wejściowej woltomierza



Skorygowana wartość zmierzonego napięcia

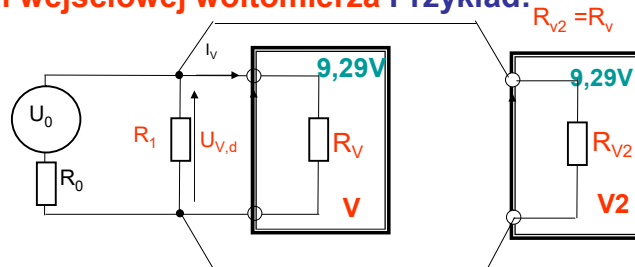
$$U_x \approx U_{kor} = U_V \frac{\beta}{1 + \beta - \gamma_V}$$

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

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

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

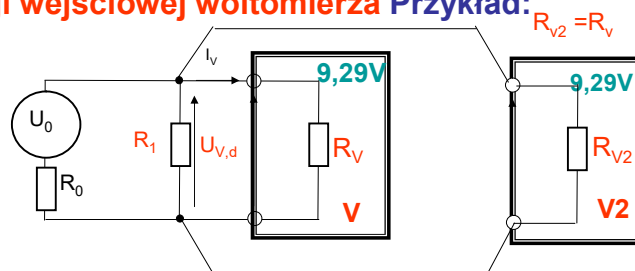
3. Prosta metoda korekcji wpływu ograniczonej wartości rezystancji wejściowej woltomierza Przykład:



Przykład dla analogowego woltomierza:

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

3. 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:

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

$$U_x = 9,901\ V$$

3. Korekcja wpływu rezystancji wejściowej woltomierza. Woltomierz Cyfrowy

- Przykład 1d. $U_0=10\text{ V}$, $R_0=100\text{ Ohm}$, $R_1=1\text{ MOhm}$, $R_2=1\text{ MOhm}$, $R_V=10\text{ MOhm}$

1. Wartość rzeczywista napięcia

$$U_x = \frac{U_0}{R_0 + R_1} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_0 + R_1} + \frac{1}{R_2}} = 4,99975\text{ V}$$

2. Wynik pierwszego pomiaru

$$U_V = \frac{U_0}{R_0 + R_1} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_0 + R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_V}} = 4,76166\text{ V}$$

3. Wynik drugiego pomiaru przy $R_b=R_V$ ($\beta=1$)

$$U_{Vb} = \frac{U_0}{R_0 + R_1} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_0 + R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_V} + \frac{1}{R_b}} = 4,54521\text{ V}$$

3. Korekcja wpływu rezystancji wejściowej woltomierza. Woltomierz Cyfrowy

- Przykład 1d. $U_0=10\text{ V}$, $R_0=100\text{ Ohm}$, $R_1=1\text{ MOhm}$, $R_2=1\text{ MOhm}$, $R_V=10\text{ MOhm}$

4. Wartość współczynnika

$$\gamma = \frac{U_V}{U_{Vb}} = \frac{4,76166\text{ V}}{4,54521\text{ V}} \approx 1,04762$$

5. Skorygowany wynik pomiaru

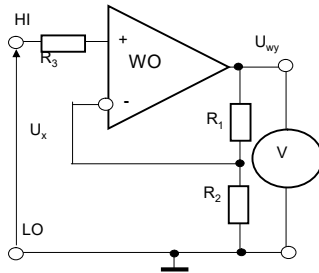
$$U_x = \frac{U_V}{2 - \gamma} = \frac{4,76166\text{ V}}{2 - 1,04762} = 4,99975\text{ V}$$

Co odpowiada rzeczywistej wartości napięcia

4. Układy wejściowe woltomierza

W celu zapewnienia dużej rezystancji wejściowej na wejściu woltomierza wykorzystuje wzmacniacz nieodwracający, zbudowany na wzmacniaczu operacyjnym (WO) ze sprzężeniem zwrotnym z dzielnikiem napięcia na rezystorach R_1 oraz R_2 .

Do wyjścia wzmacniacza jest podłączony przetwornik A/C (lub analogowy woltomierz).

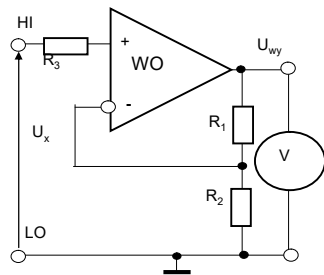


Równanie przetwarzania dla struktury bazowej:

$$U_V = U_x \cdot K_{wu}$$

gdzie K_{wu} - współczynnik wzmocnienia napięcia

4. Układy wejściowe woltomierza



$$K_{wu} = \frac{R_2 + R_1}{R_2} = 1 + R_1/R_2$$

Rezystancja wejściowa woltomierza równa się rezystancji wejściowej wzmacniacza:

$$R_V = R_3 + R_{we} \geq R_{we,WO} (1 + A_0/K_w)$$

gdzie $R_{we,WO}$ - jest rezystancją wejściową wzmacniacza operacyjnego,
 A_0 - współczynnik wzmocnienia rozwartego WO

4. Układy wejściowe woltomierza

Wpływ zmian wejściowego napięcia przesuwu e_{we} : $\Delta U(e_{we}) = e_{we}$

Wpływ zmian wejściowego prądu przesuwu Δi_{we} : $\Delta U(\Delta i_{we}) = \Delta i_{we} R_3$

Względny wpływ wartości współczynnika wzmocnienia WO A_0 :

$$\delta_I(A_0) = 1/(1 + A_0/K_{wu})$$

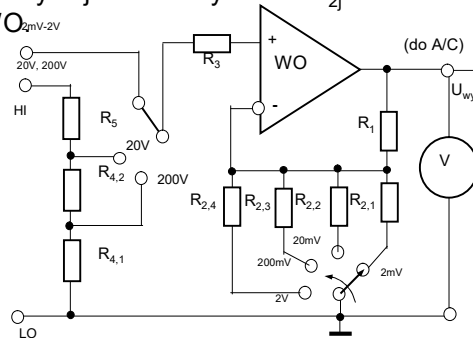
Rezystancja wyjściowa: $R_{wy} \cong R_{wy,WO} / (1 + A_0/K_{wu})$

Wymagania do WO:

- duża rezystancją wejściową wzmacniacza operacyjnego ,
- małe wartości wejściowego napięcia przesuwu oraz
- wejściowego prądu przesuwu,
- duża wartość współczynnika A_0 wzmocnienia WO

4. Układy wejściowe woltomierza

W celu zapewnienia rozszerzenia zakresów w stronę napięć mniejszych (poniżej około 1 V) wykorzystuje kilku rezystorów R_{2j} w obwodzie sprzężenia zwrotnego WO_{2mV-2V}

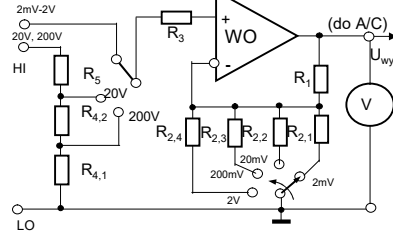


Wtedy współczynnik wzmocnienia równa się:

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

zwykle maksymalne wzmocnienie stanowi 10^3 - 10^4 razy.

4. Układy wejściowe woltomierza



W celu zapewnienia rozszerzenia zakresów w stronę napięć większych (ponad około 10 V) jak w DMM wykorzystuje się dzielnik wejściowy
 Równanie przetwarzania dla struktury na rys:

$$U_v = U_x \cdot K_{d,i} \cdot K_{w,j}$$

gdzie $K_{d,i}$ - współczynnik podziału napięcia wejściowego dzielnika

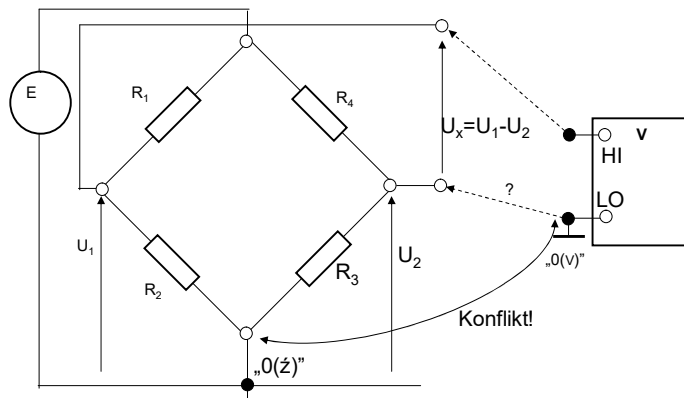
$$K_{d,i} = \frac{R_{4,i}}{R_{4,i} + R_5} = \frac{1}{1 + R_5/R_{4,i}}$$

Rezystancja wejściowa woltomierza w tym przypadku równa się rezystancji dzielnika R_d (przyjmując że rezystancja wejściowa wzmacniacza WO jest w dużym stopniu większa od rezystancji dzielnika):

$$R_V = R_5 + R_{4,1} + R_{4,2} + \dots = R_d$$

5. Układ wejściowy woltomierza ze wzmacniaczem instrumentalnym.

Przy pomiarach napięć z obiektów, wyjścia którego są odseparowani od masy wspólnej (ziemi), podłączenie tych wyjść do wejść woltomierza z uziemionym wejściem „LO” może powodować sytuację konfliktową.

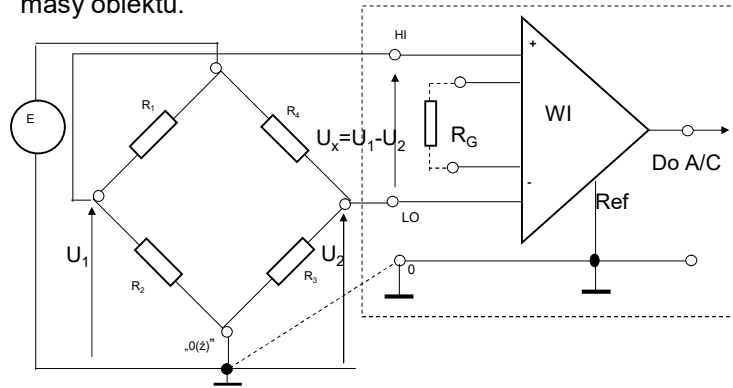


5. Układ wejściowy woltomierza ze wzmacniaczem instrumentalnym.

W celu uniknięcia takiej sytuacji układ woltomierza powinien mieć symetryczne (odseparowane od masy) wejścia. Taki warunki mogą być spełnione przy wykorzystaniu wzmacniacza instrumentalnego.

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

Do sygnałowych wejść są dołączone punkty obwodu obiektu, różnicę potencjałów należy zmierzyć. Wejście masy mogą być podłączone do masy obiektu.



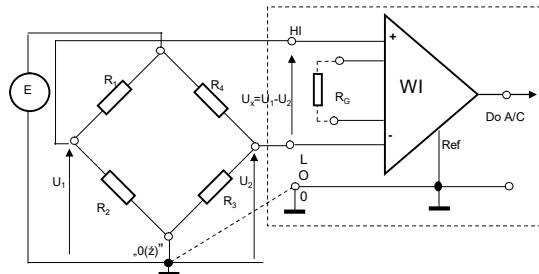
5. Układ wejściowy woltomierza ze wzmacniaczem instrumentalnym.

Równanie przetwarzania dla struktury woltomierza ze wzmacniaczem instrumentalnym:

$$U_V = U_x K_{WI}$$

gdzie $K_g = K_{WI}$ - współczynnik wzmocnienia wzmacniacza instrumentalnego.

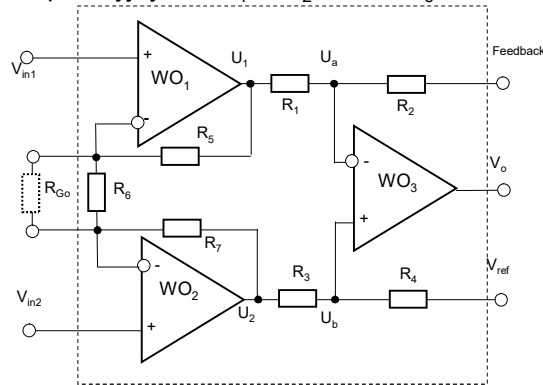
Rezystancja wejściowa takiego układu równa się rezystancji wejściowej wzmacniacza instrumentalnego.



5. Układ wejściowy woltomierza ze wzmacniaczem instrumentalnym.

Wzmacniacz instrumentalny jest zbudowany na podstawie kilku wzmacniaczy operacyjnych (WO) ze sprzężeniem zwrotnym utworzonych za pomocą rezystorów wewnętrznych, wartości rezystancji których wyznaczają współczynnik wzmocnienia WI.

W jednym układzie scalonym może być kilku wzmacniaczy instrumentalnych. Typowy układ WI jest zbudowany na trzech wzmacniaczach operacyjnych WO₁, WO₂ oraz WO₃.



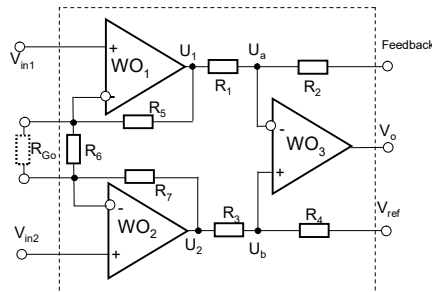
5. Układ wejściowy woltomierza ze wzmacniaczem instrumentalnym.

W razie spełnienia warunku dla wartości rezystancji rezystorów

$$R_2/R_1 = R_4/R_3 = K_2$$

napięcie wyjściowe ma wartość

$$K_g = K_1 K_2 = \left(1 + \frac{R_5 + R_7}{R_6}\right) \frac{R_2}{R_1}$$



6. Współczynnik tłumienia wejściowego napięcia wspólnego

Współczynnik tłumienia wejściowego napięcia wspólnego (synfazowego) – CMMR (ang. *Common Mode Rejection Ratio*) –

stosunek napięcia wspólnego U_{cm} do wartości różnicowego napięcia U_{dif} , które należy podać do wejść WI, żeby otrzymać taką samą wartość napięcia wyjściowego U_{wy}

$$CMMR = U_{cm}/U_{dif} = U_{cm}/(U_{wy}/K_g) = K_g(U_{cm}/U_{wy}) = K_g/K_{cm}$$

K_{cm} równa się stosunku napięcia wyjściowego U_{wy} do wartości powodującego jego napięcia wejściowego wspólnego

$$U_{cm} = U_{we1} = U_{we2} \text{ lub } U_{cm} = (U_{we1} + U_{we2})/2$$

(jednakowego na obydwu wejściach tzn. przy zerowym napięciu różnicowym

$$U_{dif} = U_{we1} - U_{we2} = 0$$

CMMR zwykle jest wyrażany w decybeli

$$CMMR = 20 \lg \frac{K_G}{K_s} = 20 \lg \frac{U_s}{V_o(U_{s,we})/K_G}$$

6. Współczynnik tłumienia wejściowego napięcia wspólnego

Przy wartości napięcia wspólnego $U_{s,we}$

Ograniczenie wartości współczynnika CMMR powoduje powstanie błędu

$$\Delta U_r = \frac{U_{cm}}{10^{\frac{CMMR}{20}}}$$

Które odbierane jest jako niekorzystne napięcie różnicowe wejściowe

Przykładowo, jeżeli CMMR=100 dB, oraz $U_{we1}=U_{we2}=10 \text{ V}$

wtedy odbierane niekorzystne napięcie różnicowe wejściowe (błąd wejściowy) wynosi

$$\Delta U_r = \frac{V_{cm}}{10^{\frac{CMMR}{20}}} = \frac{10 \text{ V}}{10^{\frac{100}{20}}} = \frac{10 \text{ V}}{10^5} = 10^{-4} \text{ V} = 0,1 \text{ mV} = 100 \text{ mkV}$$

Jak widać, wpływ ograniczenia wartości CMMR przy niezerowej wartości napięcia wejściowego wspólnego może być dużym.