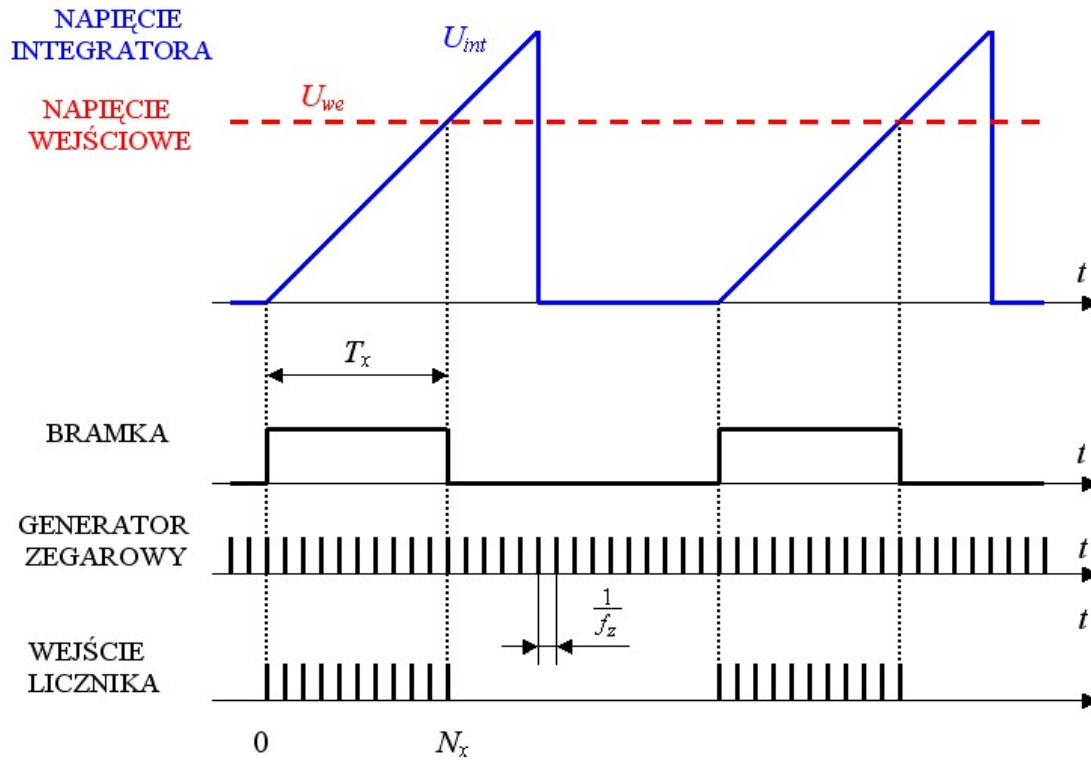


# WOLTOMIERZ CYFROWY

## Metoda czasowa prosta



$$U_{\text{int}} = \frac{1}{\tau} \cdot U_o \cdot t$$

gdzie:  $\tau$  – stała całkowania integratora

$$\frac{1}{\tau} \cdot U_o \cdot T = U_{\text{we}}$$

stąd:

$$T = \frac{\tau}{U_o} \cdot U_{\text{we}}$$

Ponieważ

$$T_z = \frac{1}{f_z}$$

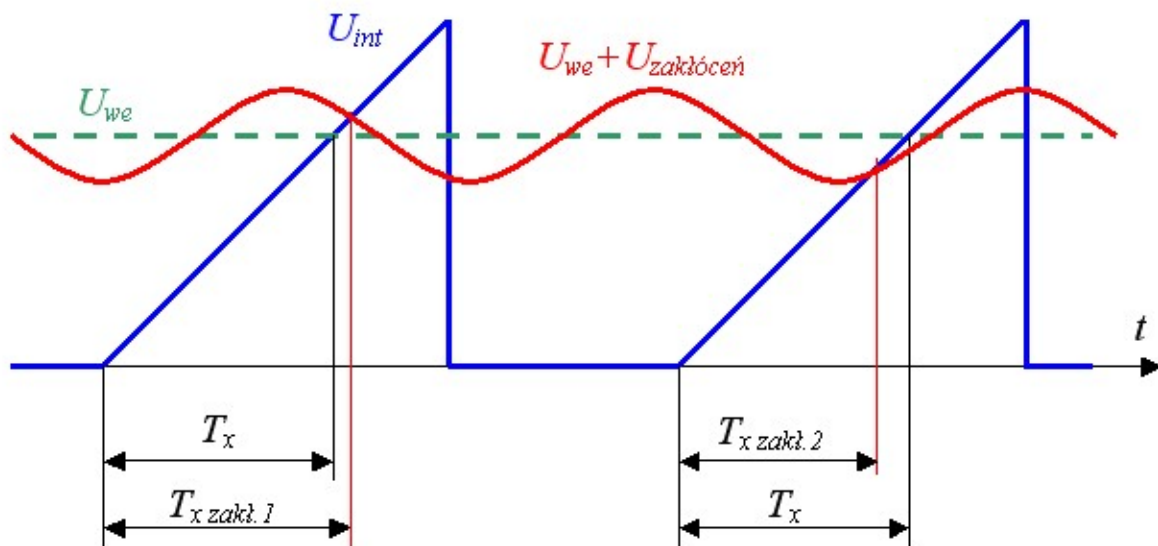
więc

$$N_x = \frac{T_x}{T_w} = \frac{T_x}{\frac{1}{f_z}} = T_x \cdot f_z$$

a stąd:

$$N_x = \frac{\tau \cdot f_z}{U_o} \cdot U_{we}$$

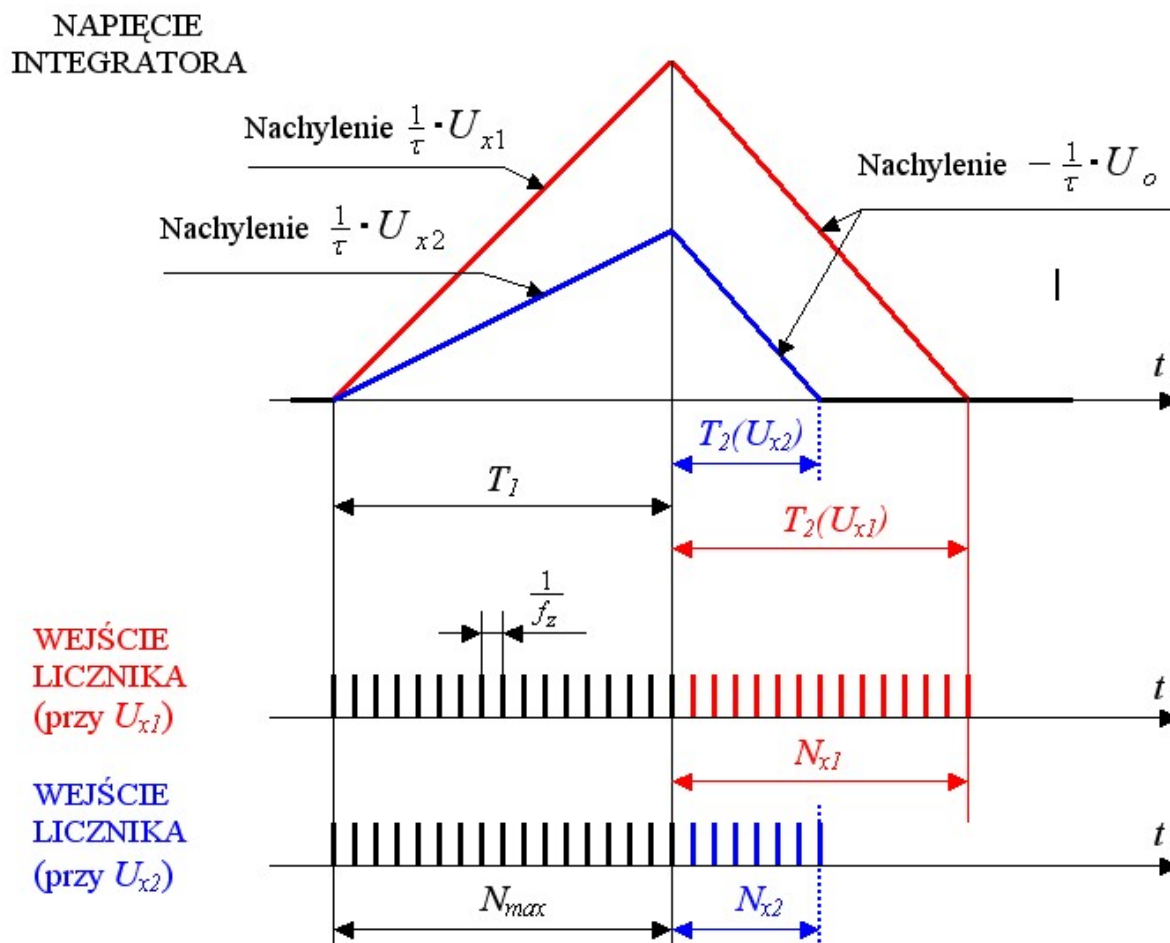
### Wpływ zakłóceń na pracę woltomierza cyfrowego realizującego metodę czasową prostą



Na wynik pomiaru mają negatywny wpływ:

1. **niestalość stałej całkowania** integratora,
2. niestalość częstotliwości generatora zegarowego,
3. **zakłócenia** napięcia wejściowego.

# WOLTOMIERZ CYFROWY Z PODWÓJNYM CAŁKOWANIEM



**Przebieg napięcia na integratorze w I fazie całkowania:**

$$U_I(t) = \frac{1}{\tau} \int U_x \cdot dt$$

Przy  $U_x = const$  można zapisać:

$$U_I(t) = \frac{1}{\tau} \cdot U_x \cdot t$$

**Przebieg napięcia na integratorze w II fazie całkowania:**

$$U_I(t) = U_I(T_1) - \frac{1}{\tau} \cdot U_o \cdot t$$

Napięcie po czasie  $T_1 + T_2$  wynosi:

$$U_I(T_1 + T_2) = \frac{1}{\tau} \cdot U_x \cdot T_1 - \frac{1}{\tau} \cdot U_o \cdot T_2 = 0$$

Stąd:

$$\frac{1}{\tau} \cdot U_x \cdot T_1 = \frac{1}{\tau} \cdot U_o \cdot T_2$$

a stąd:

$$T_2 = \frac{T_1}{U_o} \cdot U_x$$

Ponieważ  $U_o = const$  więc przy  $T_1 = const$  otrzymuje się, że czas  $T_2$  jest wprost proporcjonalny do napięcia mierzonego  $U_x$ .

**Otrzymany wynik nie zależy od stałej czasowej integratora!**

Czasy  $T_1$  i  $T_2$  odmierzone są za pomocą generatora zegarowego o okresie:

$$T_z = \frac{1}{f_z}$$

Uwzględniając to otrzymuje się:

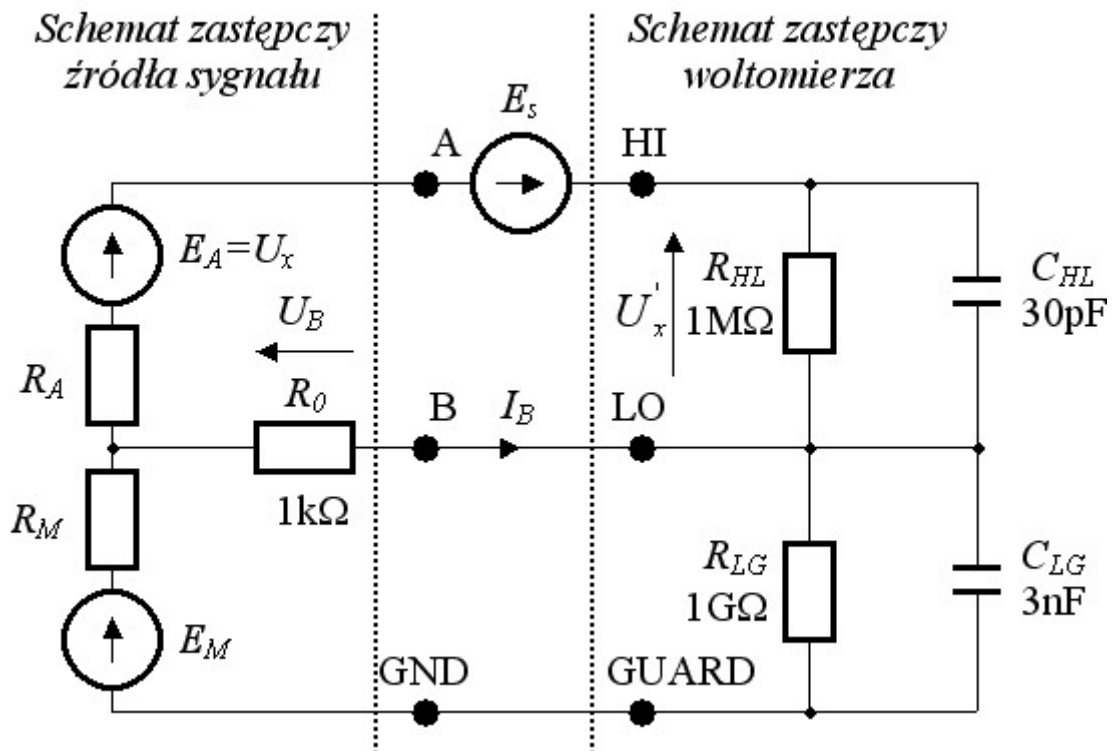
$$N_2 \cdot T_z = \frac{N_1 \cdot T_z}{U_o} \cdot U_x$$

a stąd ostatecznie:

$$N_2 = \frac{N_1}{U_o} \cdot U_x$$

**Otrzymany wynik nie zależy od częstotliwości generatora zegarowego!**

## Wpływ zakłóceń na wynik pomiaru napięcia



### Zakłócenia równoległe

$$I_B = \frac{E_M}{R_M + R_B + R_{LG}} \approx \frac{E_M}{R_{LG}}$$

$$U_B = R_B \cdot I_B \approx \frac{R_B}{R_{LG}} \cdot E_M$$

$$U'_x = U_x + U_B$$

Powstaje błąd metody:

$$\Delta_m U = U'_x - U_x = U_B$$

czyli:

$$\Delta_m U \approx \frac{R_B}{R_{LG}} \cdot E_M$$

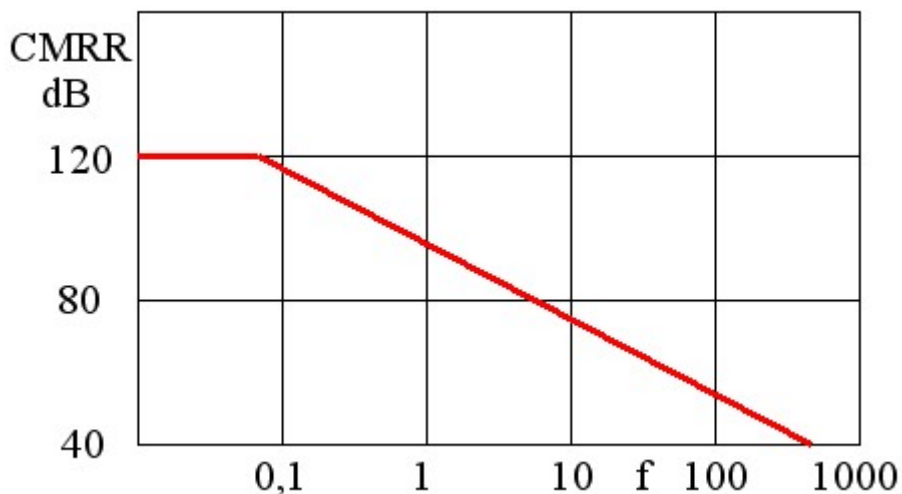
Stosunek  $\frac{E_M}{\Delta_m U}$  wyrażony w mierze logarytmicznej (w dB) jest

**współczynnikiem tłumienia zakłóceń równoległych napięcia stałego CMRR** (ang. *Common Mode Rejection Ratio*):

$$CMRR = 20 \lg \frac{E_M}{\Delta_m U} = 20 \lg \frac{R_{LG}}{R_B}$$

Współczynnik ten podawany jest dla woltomierza przy założeniu, że  $R_B = 1k\Omega$ .

Dla typowych wartości (jak na rysunku) CMRR wynosi przy prądzie stałym 120dB, a przy częstotliwości 50Hz już tylko 60dB



**Znając wartość CMRR oraz rzeczywistą wartość  $R_B$  można wyznaczyć wartość błędu metody.**

## Zakłócenia szeregowe

Szeregowe napięcie zakłócające  $E_s$  włączone jest szeregowo w obwód pomiarowy.

Jeżeli  $E_s$  jest napięciem stałym, to dodaje się ono wprost do napięcia mierzonego  $U_x$  i wywołuje błąd o wartości bezwzględnej  $E_s$ .

Źródłem  $E_s$  są - zakłócające siły termoelektryczne i elektrochemiczne.

Błędu tego można uniknąć przez odpowiedni montaż połączeń, tj.:

- odpowiedni dobór materiałów przewodów (miedziane zaciski – miedziane przewody),
- czystość montażu – czyste, nieutlenione końcówki i zaciski,
- dobre dociśnięcie zacisków.

Szeregowe napięcie zakłócające  $E_s$  może być też napięciem zmiennym.

Jego źródłem mogą być:

- napięcia indukowane w przewodach od zakłócających pól elektromagnetycznych,
- napięcie tętnień w badanym układzie.

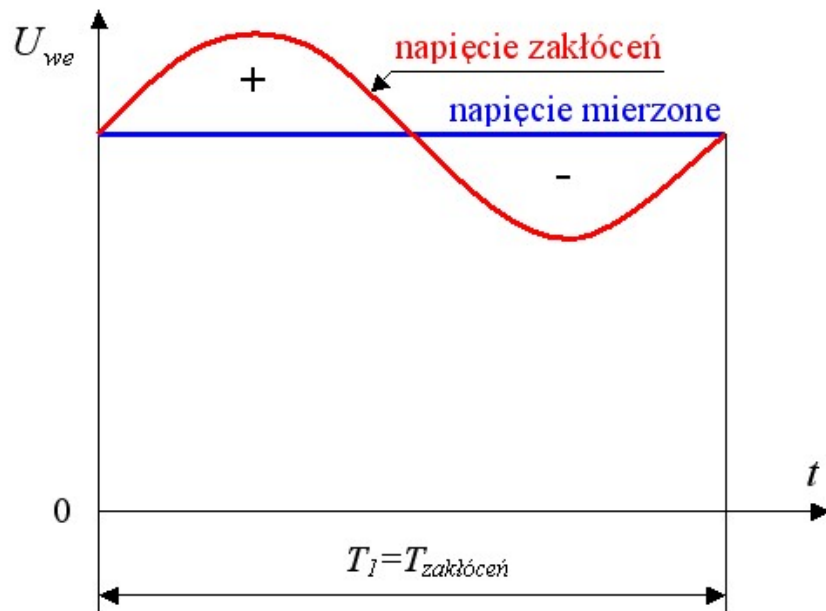
Napięć indukowanych unika się przez prowadzenie przewodów blisko siebie i ich ekranowanie.

Współczynnik tłumienia zmiennonapięciowych zakłóceń szeregowych **NMRR** (ang. *Normal Mode Rejection Ratio*) zdefiniowany jest wzorem:

$$NMRR = 20 \lg \frac{U_{s\sim}}{\Delta U}$$

gdzie:  $\Delta U$  - zmiana wskazań woltomierza wywołana przez  $U_{s\sim}$

Wpływ tych zakłóceń w woltomierzach całkujących ogranicza się przede wszystkim przez odpowiedni **dobór czasu całkowania** napięcia mierzonego.



Ponieważ **wartość średnia napięcia zakłóceń szeregowych za okres** wynosi:

$$U_{zakl.,sr} = \frac{1}{T_{zakl.}} \cdot \int_0^{T_{zakl.}} U_{zakl.m} \sin \frac{2\pi}{T_{zakl.}} \cdot dt = 0$$

więc **przy dobraniu  $T_I = T_{zakłóceń}$  wpływ zakłóceń szeregowych na wynik pomiaru napięcia mierzonego jest eliminowany.**

Przy dobraniu **czasu całkowania napięcia wejściowego równego okresowi sieci, tj. równego 20ms** lub całkowitej krotności tego okresu, tj. 40ms, 60ms, itd. **wpływ zakłóceń sieciowych na wynik pomiaru jest eliminowany.**

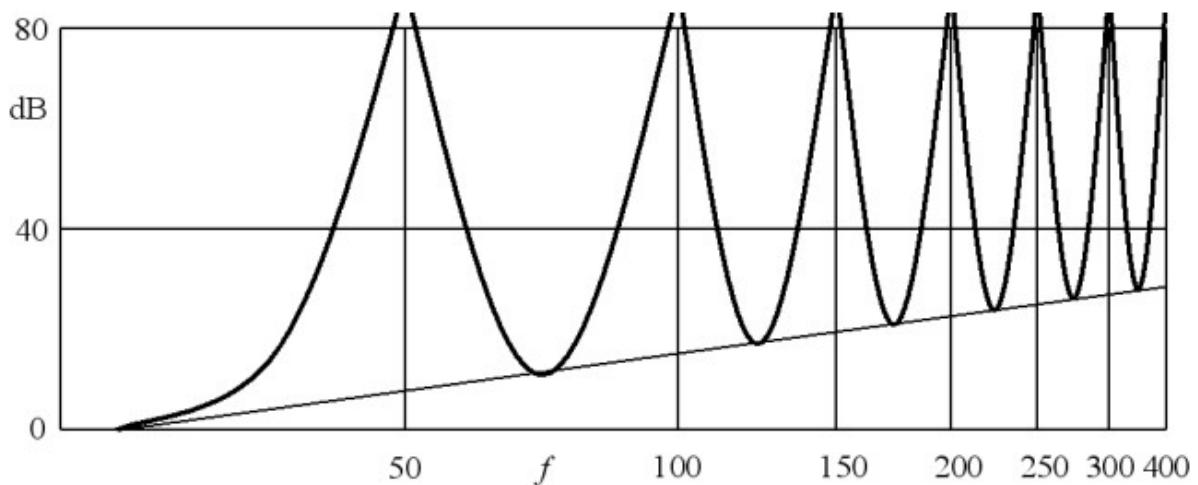
*W niektórych regionach świat (Ameryka Płn i Płd) częstotliwość sieci wynosi **60 Hz**. Okres napięcia sieciowego wynosi więc **16,66... ms**.*



Jeżeli dobierze się czas całkowania napięcia wejściowego równy **100ms**, to woltomierz będzie tłumiał zarówno zakłócenia sieciowe od sieci 50Hz jak i od sieci 60Hz

**Tłumione są również, ale w mniejszym stopniu, zakłócenia szeregowe o częstotliwościach nie odpowiadających pełnym krotnościom częstotliwości 50 Hz.**

Przebieg współczynnika NMRR w funkcji częstotliwości:



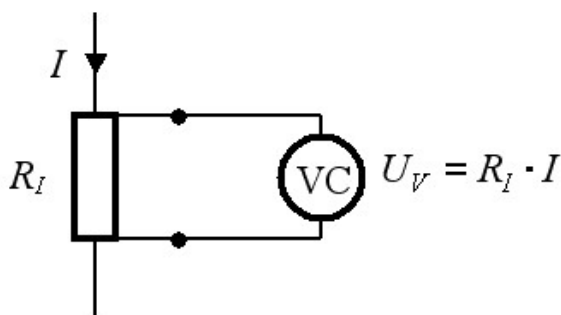
## PODSUMOWANIE:

### Zalety woltomierza cyfrowego z podwójnym całkowaniem:

1. wynik pomiaru **nie zależy od stałej całkowania** integratora,
2. wynik pomiaru **nie zależy od częstotliwości generatora zegarowego**,
3. występuje **eliminacja wpływu zakłóceń sieciowych** na wynik pomiaru.

## Pomiar prądu stałego woltomierzem cyfrowym

Prąd stały mierzy się poprzez **pomiar spadku napięcia na rezystorze** o znanej rezystancji włączonym w obwód mierzonego prądu.



**Wartość rezystancji** przyjmuje się wg wzoru:

$$R_I = 1 \cdot 10^n \Omega$$

W taki sposób wynik pomiaru napięcia **odpowiada liczbowo wartości mierzonego prądu**.

Należy tylko w odpowiednim miejscu ustawić przecinek i dobrać jednostki (np.  $\mu\text{A}$ ,  $\text{mA}$ ,  $\text{A}$ ).

Ponieważ rezystancja  $R_I$  ma wartość niezerową więc taki **pomiar obarczony jest pewnym błędem metody**.

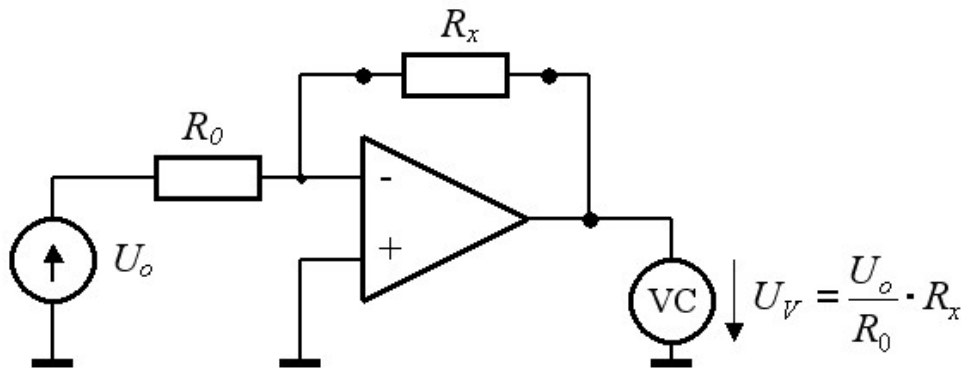
Należy sprawdzić czy ten błąd metody nie jest pomijalnie mały.

Jeżeli tak to należy go **uwzględnić w wyniku pomiaru**.

## Pomiar rezystancji woltomierzem cyfrowym

Pomiar rezystancji za pomocą woltomierza cyfrowego może być realizowany przez:

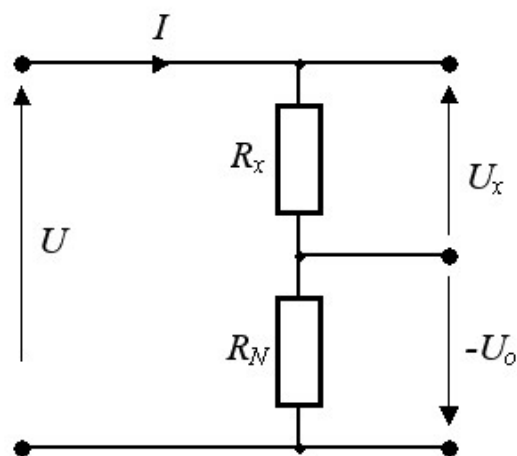
- **pomiar spadku napięcia na rezystorze** przy zasilaniu go wymuszonym prądem o znanej wartości



- **pomiar stosunku napięć na rezystorze badanym i rezystorze wzorcowym** (metoda porównawcza)

Woltomierz cyfrowy z podwójnym całkowaniem mierzy stosunek napięć:

$$N_2 = N_1 \cdot \frac{U_x}{U_o}$$

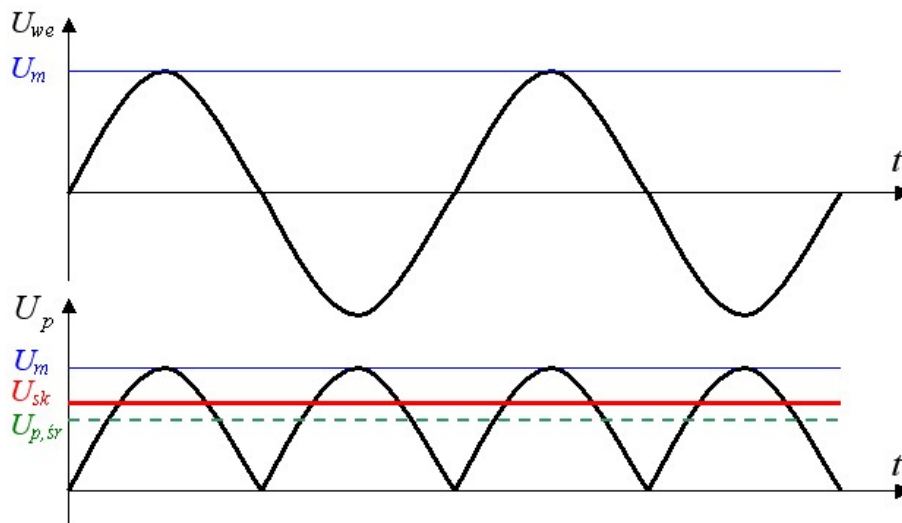


W ten sposób można bezpośrednio zmierzyć wartość rezystancji mierzonej.

# POMIAR NAPIĘCIA ZMIENNEGO WOLTOMIERZEM CYFROWYM

Woltomierz cyfrowy mierzy bezpośrednio napięcie stałe, a ściśle biorąc wartość średnią napięcia za czas pomiaru. Chcąc za pomocą woltomierza cyfrowego zmierzyć napięcie zmienne należy zastosować przetwornik napięcia zmiennego na napięcie stałe (przetwornik AC/DC). Dla zapewnienia odpowiednio dużej dokładności przetwarzania napięcia zmiennego na stałe stosuje się aktywne przetworniki AC/DC. Poniżej przedstawione zostaną podstawowe rozwiązania tych przetworników.

## Przetworniki AC/DC z prostownikami liniowymi



gdzie:  $U_m$  – amplituda napięcia,

$U_{p, \text{sr}}$  – wartość średnia napięcia wyprostowanego dwupołkowo

$U_{sk}$  – wartość skuteczna napięcia

Stosunek  $k$  wartości skutecznej do wartości średniej napięcia wyprostowanego zależy od kształtu napięcia zmiennego, stąd jego nazwa: **współczynnik kształtu**

$$\frac{U_{sk}}{U_{p, \text{sr}}} = k$$

stąd

$$U_{sk} = k \cdot U_{p, \text{sr}}$$

Dla przetworzenia napięcia zmiennego na napięcie stałe należy:

1. wyprostować napięcie zmienne za pomocą prostownika,
2. uśrednić wartość otrzymanego napięcia za pomocą układu uśredniającego (np. filtru dolnoprzepustowego),
3. wzmacnić otrzymaną wartość napięcia o wartość współczynnika kształtu  $k$ .

Po wykonaniu tych operacji otrzymuje się napięcie stałe o wartości odpowiadającej wartości skutecznej napięcia wejściowego.

Dla napięć o różnych kształtach współczynniki kształtu są różne, np.:

dla przebiegu sinusoidalnego:  $k = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,11$

dla przebiegu prostokątnego:  $k = 1,00$

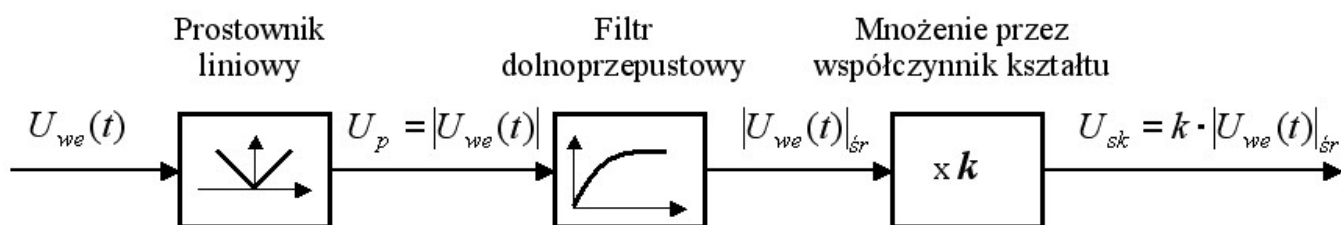
dla przebiegu trójkątnego:  $k \approx 1,15$

Zwykle przetwornik wzorcuje się dla napięcia sinusoidalnego, uwzględniając  $k_w \approx 1,11$ . Jeżeli tak wywzorcowany przetwornik zastosuje się do pomiaru napięcia o innym współczynniku kształtu, to wynik pomiaru obarczony będzie błędem wynikającym z różnych wartości współczynnika  $k_x$  napięcia badanego i współczynnika  $k_w$  napięcia wzorcowego.

$$\delta_k = \frac{k_x - k_w}{k_w}$$

Ten błąd ma charakter błędu metody, tzn., że jeżeli znany jest współczynnik kształtu  $k_x$  napięcia badanego to można wyznaczyć poprawkę.

Schemat blokowy przetwornika:



## Przetworniki AC/DC prawdziwej wartości skutecznej (TRUE RMS)

### Przetworniki funkcyjne

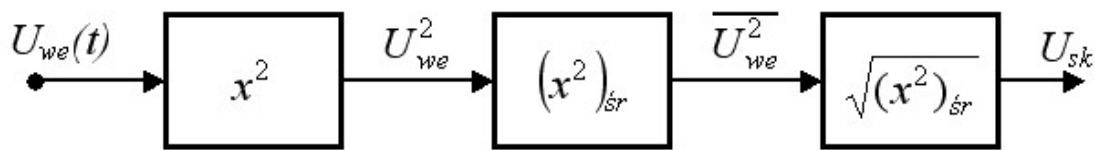
Definicja wartości skutecznej:

$$U_{sk} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

uproszczona definicja wartości skutecznej (łatwiejsza w realizacji)

$$U_{sk} = \sqrt{(u^2(t))_{sr}}$$

Schemat blokowy przetwornika funkcyjnego realizującego operacje zgodnie z powyższą zależnością przedstawia się następująco:



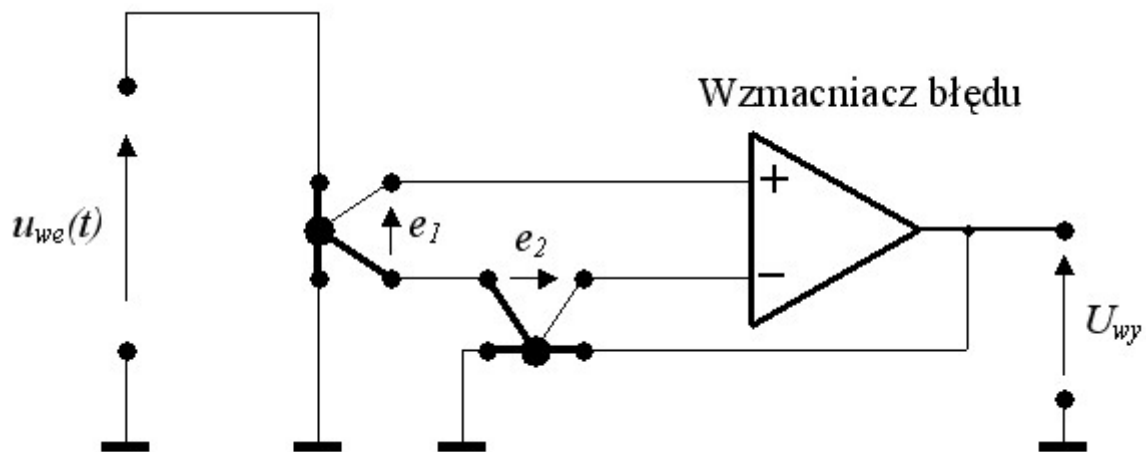
Zaletą tych przetworników jest to, że wynik przetwarzania nie zależy od współczynnika kształtu przetwarzanego napięcia, w związku z czym mogą być one stosowane do przetwarzania napięć o różnych kształtach. Przetwarzanie tymi przetwornikami nie jest więc obciążone błędami metody od współczynnika kształtu.

Wadą tych przetworników jest konieczność stosowania do ich budowy przetworników trudniejszych w realizacji (kwadrator, układ pierwiastkujący) co powoduje, że dokładność aparaturowa tych przetworników jest mniejsza niż przetworników AC/DC z prostownikami liniowymi.

### Przetworniki AC/DC z przetwornikami termicznymi

**Wartość skuteczna prądu przemiennego** jest to **taka wartość prądu stałego**, jaki na takim samym obciążeniu i w tym samym czasie **wydzieli taką samą ilość energii (ciepła) co prąd przemienny**.

### Przetwornik kompensacyjny wartości skutecznej:



$$e_1 - e_2 \approx 0$$

stąd

$$e_2 \approx e_1$$

Przy założeniu, że oba termoelementy są identyczne otrzymuje się:

$$U_{wy} = U_{we,sk}$$

### Główne źródła błędów przetwornika:

- różnice w charakterystykach termoelementów,
- skończone wzmocnienie wzmacniacza błędu,
- dryft zera wzmacniacza,
- błędy częstotliwościowe termoelementów.

Całkowity błąd układu – do kilku dziesiątych procenta.

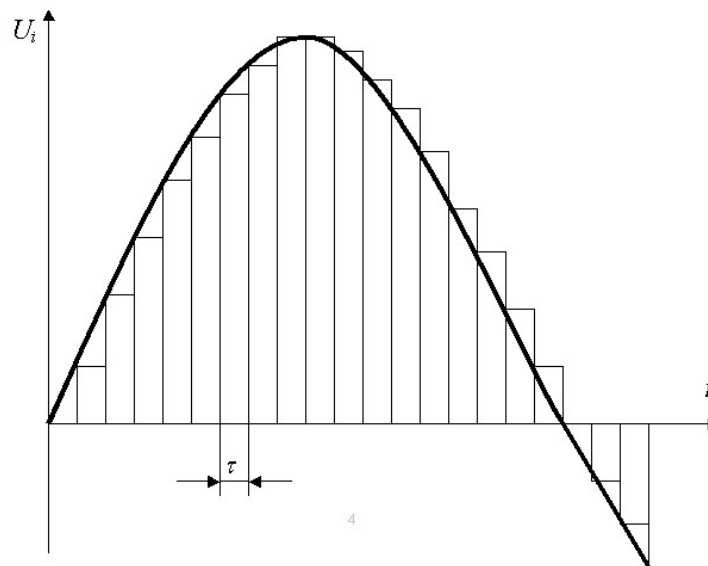
W bardziej złożonych układach z przetwornikami termicznymi uzyskuje się dokładności na poziomie 0,01%, a w najbardziej złożonych wykorzystujących przetworniki A/C o dużej dokładności i mikroprocesory nawet na poziomie 0,001% i mniej.

Pasma częstotliwościowe takich przetworników dochodzi do kilku MHz (przy błędach na poziomie 0,5%), a w niektórych przetwornikach przy dopuszczeniu większych błędów przetwarzania (rzędu kilku %) nawet do setek MHz.

### Pomiar wartości skutecznej napięcia w woltomierzu próbkującym

**Próbkowanie** – pomiar wartości napięcia w dyskretnych chwilach czasu.

**Kwantowanie** – zamiana wartości ciągłych napięcia na wartości dyskretne (za pomocą przetwornika A/C).



gdzie:  $\tau$  – okres próbkowania,

$$f_p = \frac{1}{\tau} \text{ – częstotliwość próbkowania,}$$

$$U_i = N_i \cdot q \text{ – próbki napięcia}$$

$N_i$  – wartość liczbową i-tej próbki napięcia,

$q$  – kwant napięcia

Próbki napięcia pobierane są przez przetwornik analogowo-cyfrowy (A/C).

Po przetworzeniu i zapamiętaniu w pamięci mikroprocesora wymaganej liczby  $n$  próbek obliczana jest wartość skuteczna napięcia z zależności:

$$U_{sk} = K_{A/C} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n N_i^2}$$

gdzie:  $K_{A/C}$  – współczynnik przetwarzania przetwornika A/C.

Częstotliwość próbkowania  $f_p$ , zgodnie z twierdzeniem Shannona powinna być co najmniej dwukrotnie większa od częstotliwości najwyższej harmonicznej napięcia mierzonego, co znacznie ogranicza pasmo częstotliwościowe takich woltomierzy napięcia zmiennego