Korekcja oddziaływań systematycznych w cyfrowych przyrządach pomiarowych Cz_I

Plan:

1. Oddziaływania systematyczne addytywne
2. Oddziaływania systematyczne multiplikatywne
3. Oddziaływania systematyczne nieliniowe
4. Auto kalibracja toru pomiarowego: Korekcja oddziaływań stałych addytywnych i multiplikatywnych
5. Niepewność korekcji oddziaływań stałych addytywnych i multiplikatywnych.
6. Skuteczność korekcji i jej ograniczenia

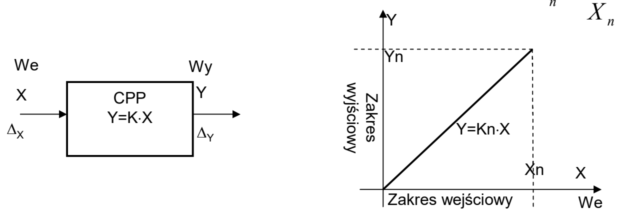
1.Oddziaływania systematyczne

Model funkcji przetwarzania toru liniowego przetwarzania CPP: $Y = K_n \cdot X$

gdzie K_n – nominalny współczynnik przetwarzania.

Wartości zakresów przetwarzania: na wejściu X_n; na wyjściu Y_n;

Wartość nominalnego współczynniku przetwarzania: $K_n = \dfrac{Y_n}{X_n}$

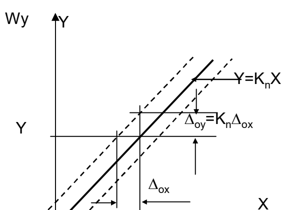


Liniowa funkcja przetwarzania (a, b)

1.Model oddziaływania: addytywny

$\Delta = \Delta_0$

gdzie Δ_0 – przesunięcie **addytywne** - równoległe przesunięcie charakterystyki niezależne od wartości przetwarzanej;



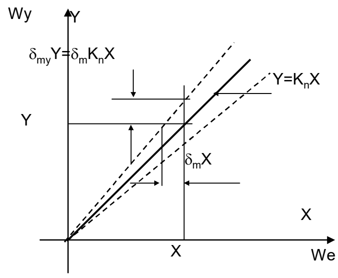
Addytywny (a) i multiplikatywny (b) błąd.

2.Model oddziaływania multiplikatywnego

$$\Delta_x = \delta_m X$$

$\delta_m X$ – **oddziaływanie multiplikatywne**, proporcjonalne do wartości przetwarzanej – kątowe odchylenie charakterystyki od nominalnej

δ_m – współczynnik - wartość względnego oddziaływania multiplikatywnego $\delta_x = \frac{\Delta_m}{X} = \frac{\delta_m X}{X} = \delta_m$



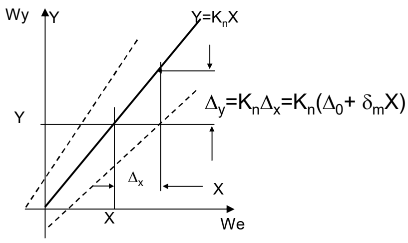
1-2. Model oddziaływania: addytywne + multiplikatywne

$$\Delta_x = \Delta_0 + \delta_m X$$

gdzie Δ_0 – **oddziaływanie addytywne** - równoległe przesunięcie charakterystyki niezależne od wartości przetwarzanej;

$\delta_m X$ – **oddziaływanie multiplikatywny**, proporcjonalny do wartości przetwarzanej – kątowe odchylenie charakterystyki od nominalnej

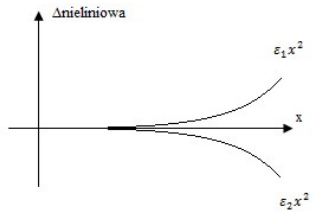
δ_m – współczynnik - wartość względnego błędu multiplikatywnego



Przesunięcia charakterystyki przetwarzania addytywne + multiplikatywne.

3. Model przesunięcia nieliniowego

$\Delta_{nel}=\varepsilon \cdot X^2$



ε – współczynnik przesunięcia nieliniowego

4. Auto kalibracja toru pomiarowego: Korekcja oddziaływań stałych addytywnych i multiplikatywnych

Korekcja oddziaływania addytywnego.

Jeśli **oddziaływanie addytywne** (Δ_0) jest systematycznym (tzn., że przy powtórnych pomiarach (przynajmniej w krótkim zakresie czasowym) pozostaje stałym, wtedy, ponieważ wynik pomiaru równa się

$$N_x=K_{wnom}\cdot(U_x + \Delta_0)$$

i jest zależne od 2-ch wielkości: U_x, Δ_0

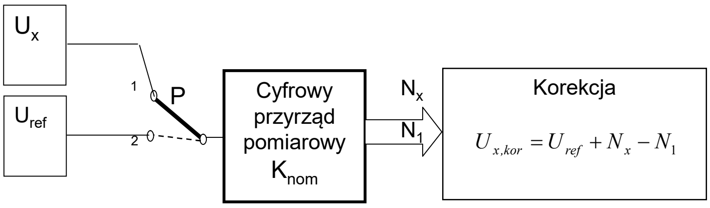
Δ_0 może być skorygowane na podstawie wyników minimalnie 2-ch pomiarów :

- pomiaru U_x **(napięcie wejściowe) – wynik pomiaru** N_x
- pomiaru U_{ref} **(napięcie referencyjne) – wynik pomiaru** N_1

4. Kalibracja toru pomiarowego

Korekcja oddziaływania addytywnego

wtedy przy $K_{nom}=1$

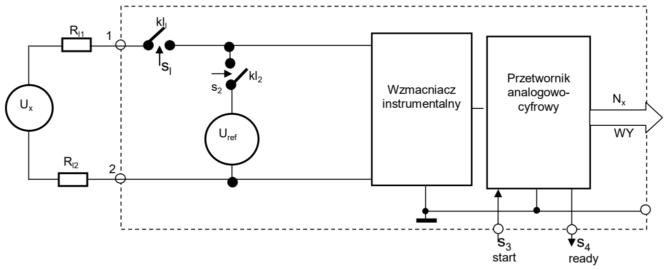


$$\boxed{U_{x,kor} = U_{ref} + N_x - N_1}$$

4. Kalibracja toru pomiarowego

Korekcja oddziaływania addytywnego

Dodatkowy pomiar napięcia referencyjnego



$$\boxed{U_x = N_x - N_1 + U_{ref}}$$

4. Auto kalibracja toru pomiarowego

Korekcja oddziaływania addytywnego

1) $N_x=K_{nom}\cdot(U_x+\Delta_0)$

2) $N_1=K_{nom}\cdot(U_{ref}+\Delta_0)$

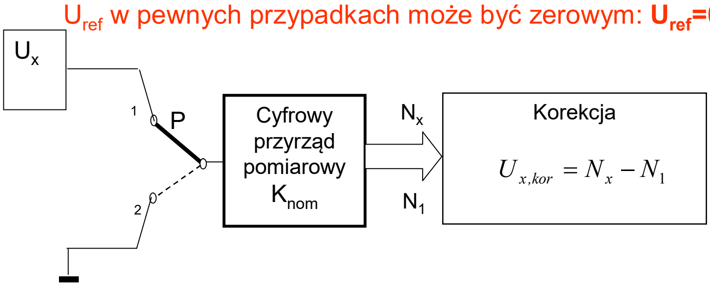
Przy $\mathbf{K_{nom}}$ =1 skorygowany wynik

$$\boxed{U_{x,kor}=U_{ref}+N_x-N_1}$$

4. Kalibracja toru pomiarowego

Korekcja oddziaływania addytywnego

U_{ref} w pewnych przypadkach może być zerowym: $\mathbf{U_{ref}=0}$



$$\boxed{U_{x,kor}=N_x-N_1}$$

4. Auto kalibracja toru pomiarowego

Korekcja oddziaływania addytywnego

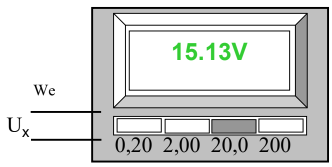
1) $N_x=K_{wnom}\cdot(U_x+\Delta_0)$

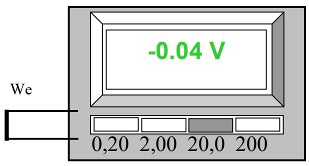
2) $N_1=K_{wnom}\cdot\Delta_0$

Przy $\mathbf{K}_{nom}$ =1 skorygowany wynik

$$\boxed{U_{x,kor} = N_x - N_1}$$

4. Auto kalibracja toru pomiarowego





U_x=15.13 V **U_0=-0.04 V**

Wynik skorygowany

$U_{kor}=U_x-U_0$=15.13V-(-0.04V)=15.17 V

4. Auto kalibracja toru pomiarowego

Korekcja oddziaływania addytywnego

Lepsze rozwiązanie jest wykorzystanie przetwarzania komutacyjnego z inwersją wejścia:

Realizuje się 2 pomiary:

1)- pomiar U_x – wynik N_{x1}

2)- pomiar $-U_x$ – (odwrócenie) - wynik N_{x2}

1) $N_{x1}=K_{wnom}\cdot(U_x+\Delta_0)$

2) $N_{x2}=K_{wnom}\cdot(-U_x+\Delta_0)$

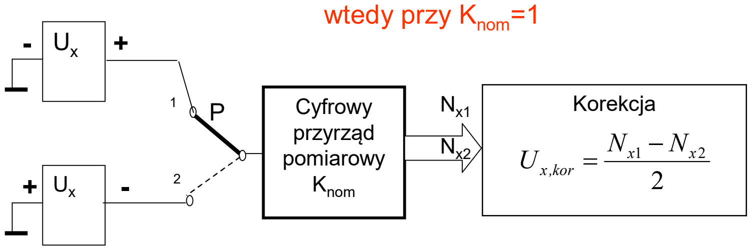
Wtedy skorygowany wynik

$$\boxed{K_{Wnom}U_x = \frac{N_{x1}-N_{x2}}{2}}$$

4. Kalibracja toru pomiarowego

Korekcja błędu addytywnego z przetwarzaniem komutacyjnym z inwersją wejścia

wtedy przy $K_{nom}=1$



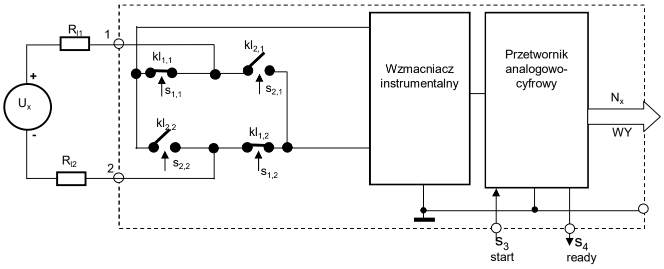
$$\boxed{U_{x,kor} = \frac{N_{x1}-N_{x2}}{2}}$$

4. Kalibracja toru pomiarowego

Korekcja oddziaływania addytywnego

Odwrócenie sygnału wejściowego

Wykorzystanie multipleksera na wejściu



$$U_x = \frac{N_{x+} - N_{x-}}{2}$$

4. Auto kalibracja toru pomiarowego

Korekcja błędu addytywnego oraz multiplikatywnego

Jeśli **błąd addytywny** (Δ_0) oraz względny **błąd multiplikatywny** (δ_m) są błędami systematycznymi (tzn., że przy powtórnym wykorzystaniu CPP (przynajmniej w krótkim zakresie czasowym) pozostają stałymi), wtedy, ponieważ wynik pomiaru równa się

$$N_x=\Delta_0+K_{nom}(1+\delta_m)\ U_x$$

i jest zależne od 3-ch wielkości: U_x, Δ_0 , δ_m,

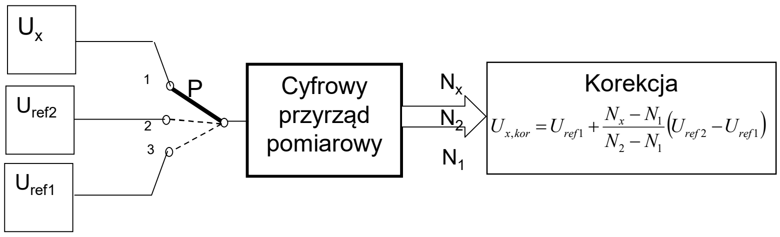
one mogą być skorygowane na podstawie wyników minimalnie 3-ch pomiarów :

- pomiaru U_x **(napięcie wejściowe) – wynik pomiaru N_x**
- pomiaru U_{ref1} **(napięcie referencyjne) – wynik pomiaru N_1**
- pomiaru U_{ref2} **(napięcie referencyjne)– wynik pomiaru N_2**

4. Kalibracja toru pomiarowego

Korekcja oddziaływania addytywnego i multiplikatywnego

Ogólny schemat korekcji toru pomiarowego



4. Kalibracja toru pomiarowego

Korekcja oddziaływania addytywnego i multiplikatywnego

1) $N_x = \Delta_0 + K_{nom}(1+\delta_m)\, U_x$

2) $N_1 = \Delta_0 + K_{nom}(1+\delta_m)\, U_{ref1}$

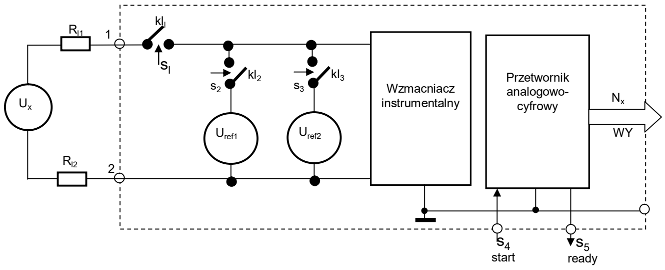
3) $N_2 = \Delta_0 + K_{nom}(1+\delta_m)\, U_{ref2}$

Skorygowany wynik

$$\boxed{U_{x,kor} = \frac{(N_x - N_1)U_{ref2} + (N_2 - N_x)U_{ref1}}{N_2 - N_1}}$$

4. Kalibracja toru pomiarowego

Korekcja oddziaływania addytywnego i multiplikatywnego

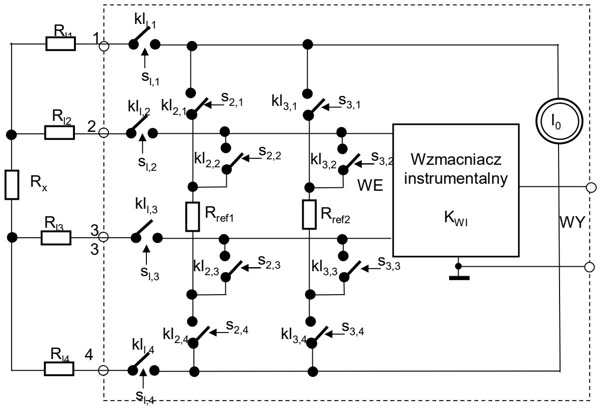


$$U_{x,ref} = U_{ref1} + \frac{N_x - N_1}{N_2 - N_1}\left(U_{ref2} - U_{ref1}\right)$$

4. Kalibracja toru pomiarowego

Korekcja oddziaływania addytywnego i multiplikatywnego

Miernik rezystancji: 2 rezystory referencyjne

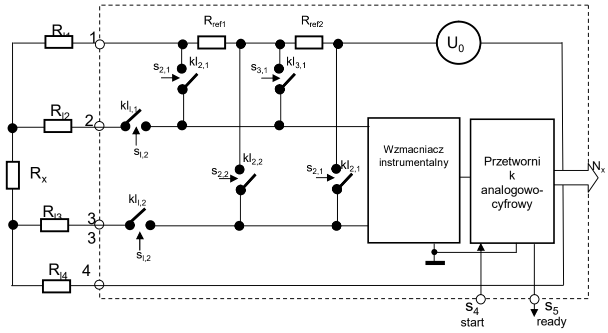


$$R_{x,kor} = R_{ref1} + \frac{N_x - N_1}{N_2 - N_1}\left(R_{ref2} - R_{ref1}\right)$$

4. Kalibracja toru pomiarowego

Korekcja oddziaływania addytywnego i multiplikatywnego

Miernik rezystancji: 2 szeregowe rezystory referencyjne

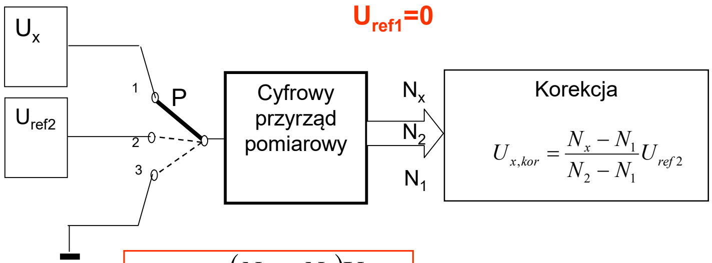


$$R_{x,kor} = R_{ref1} + \frac{N_x - N_1}{N_2 - N_1}\left(R_{ref2} - R_{ref1}\right)$$

4. Kalibracja toru pomiarowego

Korekcja oddziaływania addytywnego i multiplikatywnego

Jedno z U_{ref} w pewnych przypadkach może być zerowym. Na przykład **U_{ref1}=0**



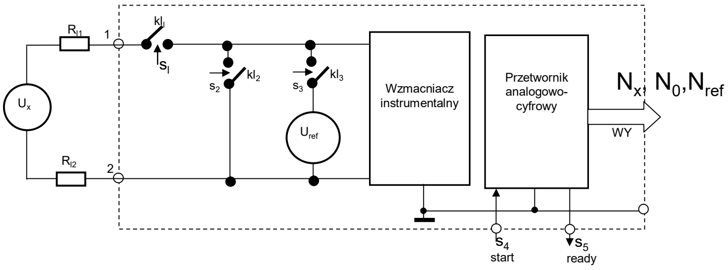
$$U_{x,kor} = \frac{N_x - N_1}{N_2 - N_1} U_{ref2}$$

wtedy

$$U_{x,kor} = \frac{(N_x - N_1)U_{ref2}}{N_2 - N_1}$$

4. Kalibracja toru pomiarowego

Korekcja oddziaływania addytywnego i multiplikatywnego

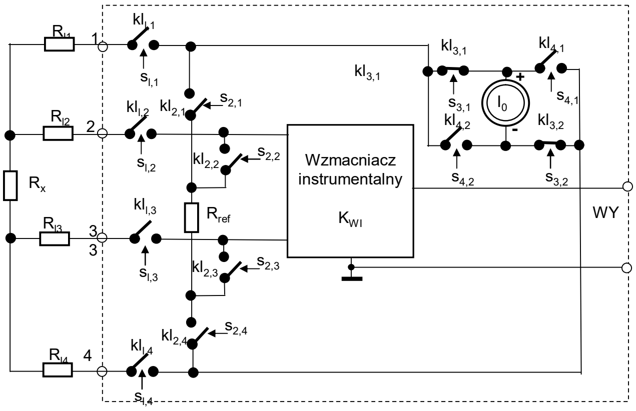


$$N_{kor} = \frac{N_x - N_0}{N_{ref} - N_0} U_{ref}$$

4. Kalibracja toru pomiarowego

Korekcja oddziaływania addytywnego i multiplikatywnego

Miernik rezystancji: 1 rezystor referencyjny i odwrócenie prądu



$$R_{x,kor} = R_{ref} \frac{N_{x+} - N_{x-}}{N_{ref+} - N_{ref-}}$$

5. Niepewność korekcji oddziaływań stałych addytywnych i multiplikatywnych

Otrzymany skorygowany wynik jest wynikiem idealnym!.

W praktyce:

1) wartości napięć referencyjnych **U_{ref1} oraz U_{ref2}** charakteryzują się niepewnością: u(**U_{ref1}**) ; u(**U_{ref2}**)

2) Podczas każdego pomiaru oprócz oddziaływań systematycznych są oddziaływania losowe (szumowe) oraz ma miejsce kwantowanie wyników pomiaru, które powodują niepewności:

- $u(N_{x,kw})$ **– od kwantowania** ; $u(N_{x,sz})$ **– od wpływu szumów**
- $u(N_{1,kw})$ **– od kwantowania** ; $u(N_{1,sz})$ **– od wpływu szumów**
- $u(N_{2,kw})$ **– od kwantowania** ; $u(N_{2,sz})$ **– od wpływu szumów**

5. Niepewność korekcji oddziaływań stałych addytywnych i multiplikatywnych

Jeśli warunki podczas 3-ch pomiarów nie zmieniają się wtedy standardowe niepewności skorygowanego wyniku od kwantowania i szumów wyznaczane sa wg zalezności

$u(N_{x,kw}) = u(N_{1,kw}) = u(N_{2,kw}) = u(N_{kw}) = CNZ/2\sqrt{3}$

$u(N_{x,sz}) = u(N_{1,sz}) = u(N_{2,sz}) = u(N_{sz})$

5. Niepewność korekcji oddziaływań stałych addytywnych i multiplikatywnych

Współczynniki wpływu składowych niepewności jako pochodne skorygowanego wyniku względem składowych

$$\boxed{U_x = U_{ref1} + \frac{N_x - N_1}{N_2 - N_1}\left(U_{ref2} - U_{ref1}\right)}$$

$$C_1 = C_{U_{ref1}} = 1 - \frac{N_x - N_1}{N_2 - N_1} = \frac{N_2 - N_x}{N_2 - N_1} \qquad C_2 = C_{U_{ref2}} = \frac{N_x - N_1}{N_2 - N_1}$$

$$C_3 = C_{N_x} = \frac{U_{ref2} - U_{ref1}}{N_2 - N_1} \qquad C_4 = C_{N_1} = \frac{N_x - N_2}{\left(N_2 - N_1\right)^2}\left(U_{ref2} - U_{ref1}\right)$$

$$C_5 = C_{N_2} = -\frac{N_x - N_1}{\left(N_2 - N_1\right)^2}\left(U_{ref2} - U_{ref1}\right)$$

5. Niepewność korekcji oddziaływań stałych addytywnych i multiplikatywnych

Złożona standardowa niepewność skorygowanego wyniku równa się:

$$u_c\left(U_{x,kor}\right) = \sqrt{\left(C_1 \cdot u\left(U_{ref1}\right)\right)^2 + \left(C_2 \cdot u\left(U_{ref2}\right)\right)^2 + \left(C_3 \cdot u\left(N_x\right)\right)^2 + \left(C_4 \cdot u\left(N_1\right)\right)^2 + \left(C_5 \cdot u\left(N_2\right)\right)^2}$$

$$\boxed{u_c\left(U_{x,kor}\right) = \frac{\left|U_{ref2} - U_{ref1}\right|}{\left|N_2 - N_1\right|}\sqrt{\left(1 + \frac{\left(N_2 - N_x\right)^2 + \left(N_1 - N_x\right)^2}{\left(N_2 - N_1\right)^2}\right) \cdot \left(u^2\left(N_{sz}\right) + \frac{CNZ^2}{12}\right) + \frac{\left(N_2 - N_x\right)^2 u^2\left(U_{ref1}\right) + \left(N_x - N_1\right)^2 u^2\left(U_{ref2}\right)}{\left(U_{ref2} - U_{ref1}\right)^2}}.}$$

5. Niepewność korekcji oddziaływań stałych addytywnych i multiplikatywnych

Złożona standardowa niepewność skorygowanego wyniku przy $U_{ref1}=0$

$$U_x = \frac{N_x - N_1}{N_2 - N_1} U_{ref\,2}$$

($C_1=0$) równa się:

$$u_c(U_{x,kor}) = \sqrt{(C_2 \cdot u(U_{ref\,2}))^2 + (C_3 \cdot u(N_x))^2 + (C_4 \cdot u(N_1))^2 + (C_5 \cdot u(N_2))^2}$$

$$\boxed{u_c(U_{x,kor}) = \frac{|U_{ref2}|}{|N_2 - N_1|}\sqrt{\left(1 + \frac{(N_2 - N_x)^2 + (N_1 - N_x)^2}{(N_2 - N_1)^2}\right)\cdot\left(u^2(N_{sz}) + \frac{CNZ^2}{12}\right) + \frac{(N_x - N_1)^2 u^2(U_{ref2})}{U_{ref2}^2}}.}$$

Przy $N_1 \approx 0$ przybliżono

$$\boxed{u_c(U_{x,kor}) = \frac{|U_{ref\,2}|}{|N_2|}\sqrt{2 \cdot \frac{N_2^2 + N_x^2 - N_2 N_x}{N_2^2}\cdot\left(u^2(N_{sz}) + \frac{CNZ^2}{12}\right) + N_x^2 \cdot u_{rel}^2(U_{ref\,2})}.}$$

5. Niepewność korekcji oddziaływań stałych addytywnych i multiplikatywnych

Bez uwzględnienia wpływu szumów i kwantowania złożona standardowa niepewność skorygowanego wyniku przy $U_{ref1}=0$ i $N_1 \approx 0$

$$u_c(U_{x,kor}) = \left|\frac{U_{ref\,2}}{N_2} N_x\right| \cdot u_{rel}(U_{ref\,2}) = |U_{x,kor}| \cdot u_{rel}(U_{ref\,2})$$

jest to teoretyczna wartość złożonej standardowej niepewności skorygowanego wyniku

Względna teoretyczna wartość złożonej standardowej niepewności skorygowanego wyniku

$$\boxed{u_{c,rel}(U_{x,kor}) = \frac{u_c(U_{x,kor})}{|U_{x,kor}|} 100\% = u_{rel}(U_{ref\,2})}$$

6. Skuteczność korekcji oddziaływań stałych addytywnych i multiplikatywnych

Skuteczność korekcji wyznaczana jest jako stosunek złożonej standardowej niepewności wyniku do korekcji do złożonej standardowej niepewności wyniku po korekcji

$$E_{kor} = \frac{u_c(U_x)}{u_c(U_{x,kor})}$$

Przy pomiarze miernikiem cyfrowych z dopuszczalnymi wartościami granicznymi a% od wskazania U_x i b% od zakresu U_n złożona standardowa niepewność wyniku do korekcji

$$\boxed{u_c(U_x) = \frac{a \cdot U_x + b \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot 100\%}}$$

6.Skuteczność korekcji oddziaływań stałych addytywnych i multiplikatywnych

Przykład.

Un=20V; a=0.25; b=0.20; CNZ=0.01V

U_{ref1}=0V; U_{ref2}=15V, d_{ref}=0.02%

N_x=17.43V; N_2=14.92V; N_1=-0.04V

Skorygowany wynik cyfrowego pomiaru

$$U_{x,kor} = \frac{N_x - N_1}{N_2 - N_1} U_{ref\,2} = \frac{17.34 - (-0.04)}{14.92 - (-0.04)} 15V = 17.517\,V$$

Niepewność standardowa wskazania cyfrowego miernika (do korekcji)

$$u_c(U_x) = \frac{a \cdot U_x + b \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot 100\%} = \frac{0.25\% \cdot 17.43V + 0.20\% \cdot 20V}{\sqrt{3} \cdot 100\%} = 0.0483\,V$$

6.Skuteczność korekcji oddziaływań stałych addytywnych i multiplikatywnych

Przykład.

Un=20V; a=0.25; b=0.20; CNZ=0.01V

U_{ref1}=0V; U_{ref2}=15V, d_{ref}=0.02%

N_x=17.43V; N_2=14.92V; N_1=-0.04V

Względna niepewność standardowa wskazania cyfrowego miernika (do korekcji)

$$\boxed{u_{c,rel}(U_x) = \frac{u_c(U_x)}{|U_x|}100\% = \frac{0.0483\,V}{17.43\,V}100\% = 0.277\%}$$

Względna teoretyczna wartość złożonej standardowej niepewności skorygowanego wyniku

$$\boxed{u_{c,rel}(U_{x,kor}) = u_{rel}(U_{ref2}) = \frac{d_{ref}}{\sqrt{3}} = \frac{0.02\%}{\sqrt{3}} = 0.0115\%}$$

Teoretyczna skuteczność korekcji

$$\boxed{E_{teor,kor} = \frac{u_{c,rel}(U_x)}{u_{c,,rel}(U_{ref2})} = \frac{0.277\%}{0.0115\%} = 23.8}$$

6.Skuteczność korekcji oddziaływań stałych addytywnych i multiplikatywnych

Przykład.

Un=20V; a=0.25; b=0.20; CNZ=0.01V; u_{sz}=0.02V

U_{ref1}=0V; U_{ref2}=15V, d_{ref}=0.02%

N_x=17.43V; N_2=14.92V; N_1=-0.04V

Rzeczywista niepewność skorygowanego wyniku:

$$u_c(U_{x,kor}) = \frac{|U_{ref2}|}{|N_2 - N_1|}\sqrt{\left(1 + \frac{(N_2 - N_x)^2 + (N_1 - N_x)^2}{(N_2 - N_1)^2}\right)\cdot\left(u^2(N_{sz}) + \frac{CNZ^2}{12}\right) + (N_1 - N_x)^2 u_{rel}^2(U_{ref2})}. =$$

$$= \frac{15}{14.92 - (-0.04)}\sqrt{\left(1 + \frac{(14.92 - 17.43)^2 + ((-0.04) - 17.43)^2}{(14.92 - (-0.04))^2}\right)\cdot\left(0.02^2 + \frac{0.01^2}{12}\right) + (17.43 - (-0.04))^2 \cdot \left(\frac{0.02\%}{3\cdot 100\%}\right)}. = 0.0314\,V$$

Względna niepewność skorygowanego wyniku:

$$u_{c,rel}(U_{x,kor}) = \frac{u_c(U_{x,kor})}{|U_{x,kor}|}100\% = \frac{0.0314V}{17.517V}100\% = 0.179\%$$

Rzeczywista skuteczność korekcji:

$$\boxed{E_{kor} = \frac{u_{c,rel}(U_x)}{u_{c,rel}(U_{x,kor})} = \frac{0.277\%}{0.179\%} = 1.54}$$

Tylko 1.5 razy!

6.Skuteczność korekcji oddziaływań stałych addytywnych i multiplikatywnych

Przykład.

CNZ=0.01V; u_{sz}=0.01V

U_{ref1}=0V; U_{ref2}=15V, d_{ref}=0.02%

N_x=17.43V; N_2=14.92V; N_1=-0.04V

Rzeczywista niepewność skorygowanego wyniku:

$$u_c(U_{x,kor}) = 0.0163\ V$$

Względna niepewność skorygowanego wyniku:

$$u_{c,rel}(U_{x,kor}) = 0.093\%$$

Rzeczywista skuteczność korekcji: $\boxed{E_{kor} = \frac{0.277\%}{0.093\%} = 3}$

Około 3 razy

6.Skuteczność korekcji oddziaływań stałych addytywnych i multiplikatywnych

Przykład.

CNZ=0.01V; u_{sz}=0.005V

U_{ref1}=0V; U_{ref2}=15V, d_{ref}=0.02%

N_x=17.43V; N_2=14.92V; N_1=-0.04V

Rzeczywista niepewność skorygowanego wyniku:

$$u_c(U_{x,kor}) = 0.00918\ V$$

Względna niepewność skorygowanego wyniku:

$$u_{c,rel}(U_{x,kor}) = 0.0524\%$$

Rzeczywista skuteczność korekcji: $\boxed{E_{kor} = \frac{0.277\%}{0.0524\%} = 5.3}$

Ponad 5 razy.

6.Skuteczność korekcji oddziaływań stałych addytywnych i multiplikatywnych

Przykład.

CNZ=0.01V; Nawet jeśli u_{sz}=0 V

U_{ref1}=0V; U_{ref2}=15V, d_{ref}=0.02%

N_x=17.43V; N_2=14.92V; N_1=-0.04V

Rzeczywista niepewność skorygowanego wyniku:

$$u_c\left(U_{x,kor}\right) = 0.00491\,V$$

Względna niepewność skorygowanego wyniku:

$$u_{c,rel}\left(U_{x,kor}\right) = 0.0280\%$$

Rzeczywista skuteczność korekcji: $\boxed{E_{kor} = \frac{0.277\%}{0.0280} = 9.8}$

Około 10 razy, a teoretycznie około 24 razy!

Przyczyną jest efekt kwantowania!

Podsumowanie

Korekcja oddziaływań systematycznych addytywnych (offset error) oraz multiplikatywnych (gain error) może być skuteczną tylko przy wykonaniu następnych warunków:

1) **Rozdzielczość wskazania miernika jest wystarczającą dużą, tj. WCNZ jest małą,**
2) **Szumy i zakłócenia podczas popmiarów są na bardzo niskim poziomie, tj. muszą być stłumione do poziomu porównywalnego do WCNZ**
3) **Nieliniowość funkcji przetwarzania miernika też musi być na poziomie , około WCNZ**