

Rys. 36.5. Przebiegi prądów i napięć w przetworniku wartości średniej

Napięcie u_1 za diodą D_1 jest inwersją półfali dodatniej napięcia e_1 . Spadek napięcia na złączu diody D_1 nie wpływa na przetwarzany sygnał u_1 ponieważ wzmacniacz W_1 wymusza prąd, który płynie przez diodę D_1 , rezystor R do wejścia odwracającego wzmacniacza W_1 . Prąd ten jest równy prądowi płynącemu ze źródła e_1 przez rezystor R do wejścia odwracającego tego wzmacniacza. Napięcie wejściowe e_1 oraz otrzymane napięcie u_1 są sumowane na wejściu nieodwracającym wzmacniacza W_2 i na jego wyjściu, gdy nie jest dołączony kondensator C , otrzymuje się napięcie wyprostowane e_o . Dołączenie kondensatora C o odpowiednio dużej wartości pojemności powoduje uśrednienie napięcia e_o (bez pulsacji) tak, że na wyjściu wzmacniacza W_2 otrzymuje się napięcie \bar{E}_o .

Zasadę działania przetwornika wartości średniej można opisać za pomocą formuł matematycznych. Przyjmujemy, że rezystor R_1 jest równy rezystorowi R ($R_1=R$), wówczas napięcie wyjściowe przetwornika

$$e_o = -(i_1 + i_2)R = -\left(\frac{e_1}{R} + 2\frac{u_1}{R_2}\right)R = -(e_1 + 2u_1). \quad (36.19)$$

Pracę przetwornika rozpatrzmy oddzielnie dla dodatnich i ujemnych wartości napięcia wejściowego e_1 .

Gdy $e_1 > 0$, dla dodatnich wartości e_1
to $u_1 = -e_1$
i $e_o = -(e_1 - 2e_1) = +e_1. \quad (36.20)$

Gdy $e_1 \leq 0$, dla ujemnych i równych zero wartości napięć e_1
to $u_1 = 0$
i $e_o = -(-e_1) = +e_1. \quad (36.21)$

Stąd możemy zapisać, że

$$e_o = |e_1|. \quad (36.22)$$

Błąd przetwarzania przetwornika wartości średniej nie przekracza 0,1%. Przetworniki wartości średniej są stosowane w tańszych multimetrach analogowych i cyfrowych mierzących wartości skuteczne napięć i prądów sinusoidalnych. W połączeniu z układami mnożącymi realizującymi operacje mnożenia w jednej ćwiartce, umożliwiają prowadzenie operacji podnoszenia do kwadratu.

Analiza metrologiczna przetwornika

Z analizy działania przetwornika wynika, że ujemne wartości sygnału wejściowego e_1 przetwarza tylko wzmacniacz W_2 . Dla ujemnych wartości sygnału wejściowego napięcie wyjściowe wzmacniacza W_2 po uwzględnieniu jego wejściowego napięcia i prądu niezrównoważenia, zgodnie ze wzorem (2.30) jest równe

$$e_o(e_1) = -e_1 + 2V_{os2} + I_{os2}R, \quad (36.23)$$

przy założeniu, że $R_1=R$.

Gdy sygnał wejściowy e_1 jest dodatni to sygnał ten jest przetwarzany w dwóch torach przez wzmacniacze W_1 i W_2 i napięcie wyjściowe e_o określono z zasady superpozycji.

Składowa napięcia wyjściowego $e_o(e_1)$ wzmacniacza W_2 wywołana bezpośrednio przez napięcie e_1 jest równa wyrażeniu (36.23).

Składową napięcia wyjściowego wzmacniacza W_2 przetwarzaną przez wzmacniacze W_1 i W_2 określamy następująco.

Napięcie wyjściowe wzmacniacza W_1 po uwzględnieniu jego wejściowego napięcia i prądu niezrównoważenia ma postać

$$u_1(e_1) = -e_1 + 2V_{os1} + I_{os1}R. \quad (36.24)$$

Napięcie to pobudza wzmacniacz W_2 i na jego wyjściu otrzymujemy drugą składową napięcia

$$e_o(u_1) = -2(-e_1 + 2V_{os1} + I_{os1}R) + 3V_{os2} + I_{os2}R. \quad (36.25)$$

Po zsumowaniu składowych napięć zgodnie z zasadą superpozycji i przyjęciu najbardziej niekorzystnego przypadku, w którym wejściowe napięcia i prądy niezrównoważenia sumują się otrzymano

$$e_o = e_o(e_1) + e_o(u_1) = e_1 + 4V_{os1} + 5V_{os2} + 2(I_{os1} + I_{os2})R. \quad (36.26)$$

Z porównania wyrażen (36.23.) i (36.26) określających napięcia wyjściowe przetwornika wynika, że największe błędy występują gdy przetwornik przetwarza półfalę dodatnią. Implikuje to, że błędy przetwornika należy wyznaczyć ze wzoru (36.26).

Gdy przyjmiemy, że wzmacniacze W_1 i W_2 mają takie same parametry

$$V_{os1} = V_{os2} = V_{os}, \quad I_{os1} = I_{os2} = I_{os},$$

to powyższa zależność ma postać

$$e_o = e_1 + 9V_{os} + 4I_{os}R. \quad (36.27)$$

W wzorze tym błąd przetwarzania wywołany wejściowymi napięciami i prądami niezrównoważenia przyjmuje wartość graniczną, która jest wartością zawyżoną.

Przykład

Wyznaczyć błąd przetwarzania przetwornika wartości średniej utworzonego z dwóch wzmacniaczy operacyjnych $\mu A 741$ i rezystorów $R=R_1=10 \text{ k}\Omega$. Wartość średnia przetwarzanego napięcia e_1 wynosi $E_1=5 \text{ V}$.

Błąd przetwarzania wzmacniacza wyznaczono ze wzoru (36.27), uwzględniając wartości średnie napięć e_1 i e_o

$$E_o = E_1 + 9V_{os} + 4I_{os}R = E_1 + \Delta E_o.$$

Wejściowe napięcie niezrównoważenia wzmacniacza μA 741 wynosi $V_{os}=1 \cdot 10^{-3}$ V, a wejściowy prąd niezrównoważenia $I_{os}= 0,1 \cdot 10^{-6}$ A. Po podstawieniu tych wartości do wzoru (36.27) otrzymano

$$E_o=5+9 \cdot 1 \cdot 10^{-3}+4 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^3=(5+13 \cdot 10^{-3})V.$$

Błąd względny przetwarzania wynosi

$$\delta E_o = \frac{\Delta E_o}{E_o} \approx \frac{\Delta E_o}{E_1} = \frac{13 \cdot 10^{-3}}{5} = 2,6 \cdot 10^{-3} = 0,26\%$$

i ma zawyżoną wartość.

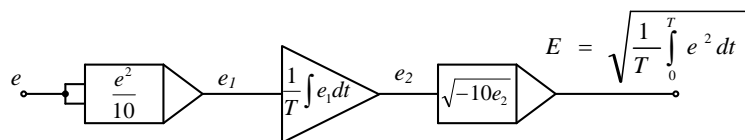
Błąd przetwornika można zmniejszyć stosując układ do zerowania wejściowego napięcia i prądu niezrównoważenia wzmacniaczy operacyjnych względnie stosując wzmacniacz operacyjny o mniejszych wartościach napięcia i prądu niezrównoważenia.

36.3. Przetworniki wartości skutecznej

Przetworniki wartości skutecznej ze względu na wzory opisujące zasadę działania przetworników dzielimy na przetworniki opisane funkcją jawną i uwikłaną [1, 2, 3, 5, 7].

36.3.1. Przetwornik wartości skutecznej opisany funkcją jawną

Przetwornik wartości skutecznej opisany funkcją jawną przedstawiono na rys.36.6.



Rys. 36.6. Układ funkcyjny przetwornika wartości skutecznej opisanego funkcją jawną

Przetwornik składa się z układów podnoszącego do potęgi drugiej, całkującego i pierwiastkującego. Parametry metrologiczne układów scharakteryzowano zależnościami:

- układ podnoszący do potęgi drugiej

$$e_1 = k_k (1 + \delta k_k) \frac{(e + X)^2}{10}, \quad (36.28)$$

- układ całkujący

$$e_2 = -k_c (1 + \delta k_c) \frac{1}{T} \int_0^T (e_1 + Y) dt, \quad (36.29)$$

- układ pierwiastkujący

$$E = k_p (1 + \delta k_p) \sqrt{-10(e_2 - Z)}, \quad (36.30)$$

przy czym:

e – przetwarzany sygnał wejściowy,

e_1, e_2 – sygnały na wyjściach układów podnoszącego do potęgi drugiej i całkującego,

E – sygnał na wyjściu układu pierwiastkującego, którego wartość średnia jest proporcjonalna do wartości skutecznej sygnału wejściowego e ,

k_k, k_c, k_p – stałe przetwarzania układów odpowiednio podnoszącego do potęgi drugiej, całkującego i pierwiastkującego,

$\delta k_k, \delta k_c, \delta k_p$ – błędy stałych przetwarzania układów, błędy multiplikatywne,

X, Y, Z – wejściowe napięcie niezrównoważenia układów, błędy addytywne.

Stale przetwarzania, błędy stałych przetwarzania oraz wejściowe napięcia niezrównoważenia wymienionych układów przedstawiono w roz. 15, 34 i 35. Błędy multiplikatywne powodują zmianę wartości stałej przetwarzania – zmianę nachylenia charakterystyki przetwarzania. Błędy addytywne sumują się z sygnałem wejściowym układu – powodują równoległe przesunięcie charakterystyki przetwarzania.

Równanie opisujące proces przetwarzania przetwornika opisanego funkcją jawną otrzymano po podstawieniu zależności (36.28), (36.29) do wyrażenia (36.30)

$$E = k_p (1 + \delta k_p) \sqrt{10 \left\{ k_c (1 + \delta k_c) \frac{1}{T} \int_0^T \left[k_k (1 + \delta k_k) \frac{(e + X)^2}{10} + Y \right] dt + Z \right\}}. \quad (36.31)$$

Po przyjęciu, że błędy addytywne i multiplikatywne nie zależą od czasu i, że e jest sygnałem przemiennym, po uproszczeniach i pominięciu wyrazów o znaczeniu drugorzędym otrzymano

$$E = k_p^2 (1 + \delta P) \sqrt{k_c k_k \frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt}, \quad (36.32)$$

przy czym δP charakteryzuje błąd przetwornika określony zależnością

$$\delta P = \delta k_p + \frac{1}{2} \left(\delta k_c + \delta k_k + \frac{X^2 + 10Y}{E^2} + \frac{10Z}{k_c k_k E^2} \right). \quad (36.33)$$

Przyjmując, stałe przetwarzania $k_k = k_c = k_p = 1$ otrzymano

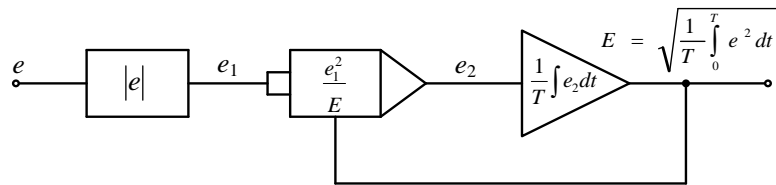
$$E = (1 + \delta P_J) \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt}, \quad (36.34)$$

$$\delta P_J = \delta k_p + \frac{1}{2} \left[\delta k_c + \delta k_k + \frac{X^2 + 10(Y + Z)}{E^2} \right]. \quad (36.35)$$

Ostatnie równanie wskazuje, że błąd przetwarzania dla małych wartości skutecznych znacząco zależy od wejściowych napięć niezrównoważenia układu całkującego i podnoszącego do kwadratu (Y, Z)

36.3.2. Przetwornik wartości skutecznej opisany funkcją uwikłaną

Układ przetwornika wartości skutecznej opisanego funkcją uwikłaną pokazany jest na rys. 36.7



Rys. 36.7. Układ funkcyjny przetwornika wartości skutecznej opisanego funkcją uwikłaną

Przetwornik jest utworzony z układu realizującego wartość bezwzględną, układów mnożąco-dzielącego i całkującego.

Ogólna zasada działania przetwornika jest następująca. Na wyjściu układu mnożąco-dzielącego napięcie

$$e_2 = \frac{e_1^2}{E} = \frac{e^2}{E}, \quad (36.36)$$

które po scałkowaniu w integratorze wynosi

$$\frac{1}{T} \int_0^T \frac{e^2}{E} dt = E \quad (36.37)$$

i jest opisane funkcją uwikłaną (funkcją uwikłaną – niewiadoma występuje po obu stronach równania). Ponieważ napięcie E ma wartość ustaloną, to napięcie na wyjściu przetwornika jest równe

$$E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt}. \quad (36.38)$$

Poniżej przedstawiono analizę metrologiczną przetwornika.

Parametry metrologiczne układów scharakteryzowano zależnościami:

- układ realizujący wartość bezwzględną

$$e_1 = k_b(1 + \delta k_b)(|e| + X), \quad (36.39)$$

- układ mnożąco-dzielący

$$e_2 = k_F(1 + \delta k_F) \frac{(e_1 + Y)^2}{E + Z}, \quad (36.40)$$

- układ całkujący

$$E = k_c(1 + \delta k_c) \frac{1}{T} \int_0^T (e_2 + W) dt, \quad (36.41)$$

przy czym:

e – przetwarzany sygnał wejściowy,

e_1, e_2 – sygnały na wyjściach układów wartości bezwzględnej i mnożąco-dzielącego,

E – sygnał na wyjściu układu pierwiastkującego, którego wartość średnia jest równa wartości skutecznej sygnału e ,

k_b, k_F, k_c – stałe przetwarzania odpowiednio układów wartości względnej, funkcyjnego i całkującego,

$\delta k_b, \delta k_F, \delta k_c$ – błędy stałych przetwarzania układów, błędy multiplikatywne,

X, Y, Z, W – wejściowe napięcie niezrównoważenia układów, błędy addytywne.

Po podstawieniu relacji (36.39) i (36.40) do wyrażenia (36.41) otrzymano

$$E = k_c(1 + \delta k_c) \frac{1}{T} \int_0^T \left[k_F(1 + \delta k_F) \frac{k_b^2(1 + 2\delta k_b)^2 (|e| + X)^2 + 2k_b(1 + \delta k_b)(|e| + X)Y + Y^2}{E + Z} + W \right] dt. \quad (36.42)$$

Po przekształceniach, po przyjęciu, że przetwarzane napięcie e ma przebieg sinusoidalny i założeniu, że stałe przetwarzania $k_b = k_c = k_F = 1$ otrzymano napięcie wyjściowe przetwornika

$$E = (1 + \delta P_N) \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}, \quad (36.43)$$

przy czym błąd przetwarzania δP_N jest równy

$$\delta P_N = \frac{1}{2} \left[\delta k_F + 2\delta k_b + \delta k_c + \frac{Z + W + \frac{4\sqrt{2}}{\pi}(X + Y)}{E} + \frac{(X + Y)^2}{E^2} \right]. \quad (36.44)$$

W analizowanym przetworniku przy przetwarzaniu sygnałów o małych wartościach błędy addytywne w mniejszym stopniu wpływają na błąd przetwarzania, aniżeli w przetworniku opisanym funkcją jawną, ponieważ błędy addytywne występujące w licznikach mają ten sam wykładnik potęgowy co napięcie wyjściowe E występujące w mianownikach.

W tabeli 36.1 przedstawiono parametry przetworników wartości skutecznej. Przetworniki R501 i R502 firmy Intronics są opisane funkcją jawną, przetworniki AD 536 i AD 637 firmy Analog Devices są opisane funkcją uwikłaną.

Tabela 36.1. Parametry przetworników wartości skutecznej

Przetwornik	R 301	R 310	AD 536	AD 637
Błąd przetwarzania	$\pm 0,1\%$ $\pm 0,02\% / ^\circ \text{C}$	$\pm 0,05\%$ $\pm 0,01\% / ^\circ \text{C}$	$\pm 0,2\%$ $\pm 0,002\% / ^\circ \text{C}$	$\pm 0,05\%$ $\pm 0,001\% / ^\circ \text{C}$
Wyjściowe napięcie niezrównoważenia V_{OSO}	5mV	5mV	1mV	0,5mV
Napięcie wejściowe przy $U_{\text{ZZ}} = \pm 15\text{V}$ przebiegi okresowe U przebiegi impulsowe u_{pp}	0...7V 20V	0...7V 20V	0...7V 20V	0...7V 15V
Błąd przetwarzania przebiegu prostokątnego o wartości skutecznej 1V i współczynniku kształtu zależnym od wypełnienia	a) $\pm 60 \text{ mV}, k_S=3$ $\pm 200\text{mV}, k_S=8$	a) $\pm 60 \text{ mV}, k_S=3$ $\pm 200\text{mV}, k_S=8$	$\pm 0,1\%, k_S=3$ $\pm 1\%, k_S=7$	$\pm 0,1\%, k_S=3$ $\pm 1\%, k_S=10$
Pasma przenoszenia (błąd 1%) przy napięciu U	100kHz, $U_{\text{pp}} < 2\text{V}$ 1MHz, $U_{\text{pp}} < 20\text{V}$	100kHz, $U_{\text{pp}} < 2\text{V}$ 1MHz, $U_{\text{pp}} < 20\text{V}$	45kHz, $U_{\text{pp}} > 0,1\text{V}$ 120kHz, $U_{\text{pp}} < 20\text{V}$	66kHz, $U_{\text{pp}} > 0,2\text{V}$ 200kHz, $U_{\text{pp}} < 2\text{V}$

a) – nie podano wartości napięcia odniesienia, ani też sposobu wyznaczenia błędu bezwzględnego

Przykład

Wyznaczyć błąd przetwarzania przetworników wartości skutecznej opisanych funkcjami jawną i uwikłaną dla sygnałów sinusoidalnych o wartościach od 0,01 V do 10 V.

Błędy stałych przetwarzania i wyjściowe napięcie niezrównoważenia są równe i wynoszą odpowiednio:

$$\delta k = \delta k_b = \delta k_c = \delta k_F = \delta k_k = \delta k_p = \pm 0,1\%$$

$$X = Y = Z = W = \pm 0,5\text{mV}.$$

Wzory (36.35), (36.44) dla danych podanych w przykładzie przyjmują postać

$$\delta P_J = 2\delta k + \frac{10X + \frac{1}{2}X^2}{E^2} \approx 2\delta k + \frac{10X}{E^2},$$

$$\delta P_N = 2\delta k + \frac{X \left(1 + \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \right)}{E} + \frac{2X^2}{E^2}.$$

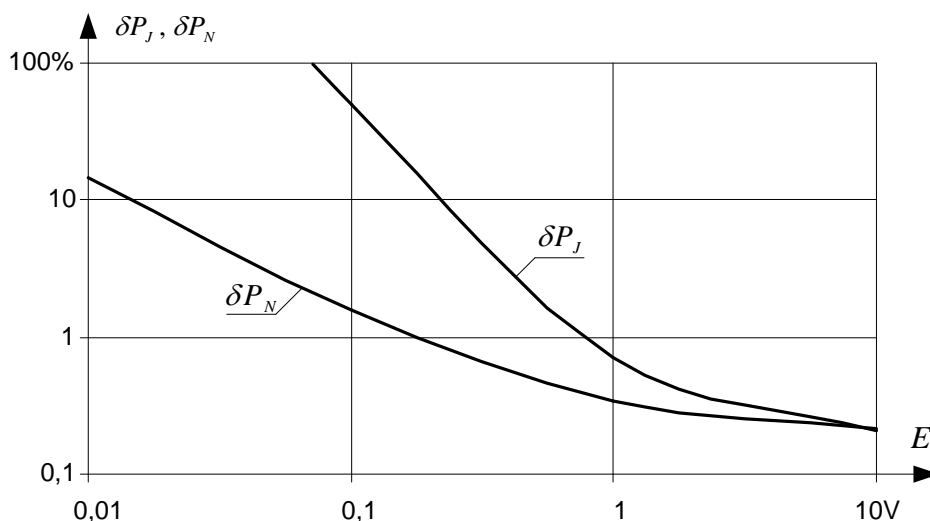
Dla dużych wartości $E=10\text{ V}$ błędy przetwarzania zależą od multiplikatywnych błędów przetwarzania

$$\delta P_J = \delta P_N = 2\delta k.$$

Natomiast dla małych wartości E na błędy przetwarzania wpływ mają wyłącznie wejściowe napięcia nie zrównoważenia (błędy addytywne). Przebiegi błędów przetworników w funkcji wartości skutecznej napięcia wejściowego pokazano na rys.36.8.

Przeprowadzona porównawcza analiza metrologiczna wskazuje, że dla sygnałów o mniejszych wartościach nieporównywalnie lepsze parametry mają przetworniki wartości skutecznej opisane funkcją uwikłaną, ponieważ w tych przetwornikach operacje matematyczne wewnątrz przetworników wykonywane są na sygnałach o znacznie większych wartościach.

Początkowo budowano przetworniki opisane funkcją jawną. Dla dużych wartości napięć mają błędy przetwarzania na poziomie 0,5% a nawet 0,05%. Znaczący rozwój technologii i techniki układowej umożliwił realizowanie operacji matematycznej przy wykorzystaniu funkcji logarytmicznych i wykładniczych. W tych układach w sposób naturalny jest prowadzone przetwarzanie zgodnie z opisem funkcji niejawnej.



Rys. 36.8. Błędy graniczne przetworników wartości skutecznej opisanych funkcjami jawną i uwikłaną, wyznaczone dla $\delta k = \pm 0,1\%$ i $X = \pm 0,5\text{ mV}$

Właściwości dynamiczne przetworników wartości skutecznej: błędy występujące przy małych i dużych częstotliwościach, szybkość odpowiedzi oraz czas ustalenia wskazań podano w [1,7].

Literatura

- [1] Durnaś M., Matusiak J.: *Przetwornik wartości skutecznej sygnałów okresowych*, PAK, 1989, nr 1.
- [2] Golde W., Śliwa L.: *Wzmacniacze operacyjne i ich zastosowania*, WNT, Warszawa 1982.
- [3] Kitchin Ch., Counts L.: *RMS to DC conversion application guide*, Analog Devices, Norwood, 1986.
- [4] Nadachowski M., Kulka Z.: *Analogowe układy scalone*, WKiŁ, Warszawa, 1983.
- [5] Sheingold D.H.: *Nonlinear circuits handbook*, Analog Devices, Massachusetts, 1976.
- [6] Tietze U., Schenk Ch.: *Układy półprzewodnikowe*, WNT, Warszawa, 2005.
- [7] Wong Y.J., Ott W.E.: *Function circuits, Design and applications* Mc Graw-Hill, New York, 1976.