

Jang Man SIK

METODY LINEARYZACJI FUNKCJI PRZETWARZANIA W PRZETWORNIKACH DO POMIARU WARTOŚCI SKUTECZNEJ NAPIĘCIA LUB PRĄDU PRZEMIENNEGO

Streszczenie. W artykule opisano niektóre problemy i metody przetwarzania wartości skutecznej napięcia i prądu przemiennego w napięciu stałym. Na tle tych metod omówiono zagadnienie linearyzacji funkcji przetwarzania przetworników wartości skutecznej.

1. KLASYFIKACJA METOD LINEARYZACJI FUNKCJI PRZETWARZANIA

Pomiar wartości skutecznej napięcia lub prądu przemiennego może być, jak wiadomo, dokonany za pomocą różnych przetworników pomiarowych. Jednym z takich przetworników jest przetwornik termoelektryczny, czyli odpowiednio skonstruowany termoelement połączony z grzejnikiem, przez który przepływa prąd, którego wartość skuteczną chcemy zmierzyć. Siłą termoelektryczną e jest w przybliżeniu liniową funkcją temperatury T , a więc równanie przetwarzania przyjmie prostą postać

$$e = \alpha J^2,$$

gdzie:

- J - prąd stały lub wartość skuteczna prądu przemiennego,
- α - współczynnik przetwarzania (zależy od konstrukcji przetwornika).

Równanie to jest jednocześnie równaniem kwadratowej charakterystyki przetwarzania omawianego przetwornika termoelektrycznego. W rzeczywistości charakterystyka przetwarzania nie jest ściśle kwadratowa, gdyż siła termoelektryczna e nie jest ściśle liniowo zależna od temperatury T . Dążność do otrzymania przetworników o zmniejszonym uchybie powoduje konieczność linearyzacji funkcji przetwarzania e od T . Problem ten występuje oczywiście i w innego rodzaju przetwornikach wartości skutecznej. Metody linearyzacji funkcji przetwarzania przetworników - np. termoelektrycznych - można podzielić na dwie grupy:

- metody z wykorzystaniem sprzężenia zwrotnego,
- metody przetwarzania wykorzystujące tzw. kwadraturę sygnału.

Do metod opartych na przetwarzaniu operacyjnym należą:

- metoda prostego wyliczenia,
- metoda oalkowania iloczynu sumy i różnicy dwóch napięć,

- metoda dzielenia przez stałe napięcie wyjściowe przed uśrednieniem,
- metoda przetwarzania operacyjnego z przetwornikiem analogowo-cyfrowym.

2. METODY LINEARYZACJI FUNKCJI PRZETWARZANIA PRZETWORNIKÓW DO POMIARU WARTOŚCI SKUTECZNEJ NAPIĘCIA LUB PRĄDU

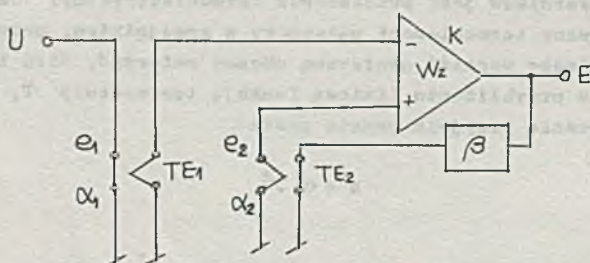
2.1. Linearyzacja funkcji przetwarzania przetworników termoelektrycznych w oparciu o metodę z wykorzystaniem sprzężenia zwrotnego

Przetworniki te przetwarzają skwadrstowaną wartość skuteczną napięcia lub prądu na napięcie stałe. Przetwarzanie rzeczywiście liniowe jest zasadniczo możliwe tylko wtedy, gdy przetworniki są włączone w układ komparacji automatycznej.

Omówimy niektóre takie przypadki.

2.1.1. Linearyzacja funkcji przetwarzania przetworników z termoelementami

Linearyzacja taka zostaje zrealizowana przez komparator "termoelektro-termoelektro" jak na rys. 1.



Rys. 1. Zasada działania układu komparatora typu "termoelement-termoelement" jako przetwornika wartości skutecznej napięcia

Z rysunku 1 wynika bezpośrednio:

$$e_1 = \alpha_1 U^{n_1}$$

$$e_2 = \alpha_2 (\beta E)^{n_2}$$

$$E = K (e_1 - e_2) = K [\alpha_1 U^{n_1} - \alpha_2 (\beta E)^{n_2}], \quad (2.1)$$

gdzie:

- e_1, e_2 - napięcia termoelektryczne odpowiednich przetworników TE_1 i TE_2 ,
- α_1, α_2 - współczynniki przetwarzania przetworników,
- U - napięcie wejściowe przetwornika, którego wartość skuteczną ma być zmierzona,

- E - napięcie wyjściowe przetwornika (napięcie stałe),
 β - współczynnik przenoszenia obciążenia sprzężenia zwrotnego,
 K - współczynnik wzmocnienia wzmacniacza operacyjnego użytego w układzie przetwornika (wzmocnienie wzmacniacza z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego),
 n_1, n_2 - wykładniki potęgowe w wyrażeniu aproksymującym funkcję przetwarzania.

Rozwiązując równanie (2.1), otrzymuje się napięcie wyjściowe E

$$E = \frac{U}{\beta} \sqrt{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}} (1 + \delta^v), \quad (2.2)$$

gdzie: δ^v - błąd z powodu nieliniowości

$$\delta^v = U \frac{n_1 - n_2}{n} \sqrt{1 - \frac{E}{K \alpha_1 U^{n_1}}} - 1$$

$$\approx U \frac{\Delta n}{n} \left(1 - \frac{E}{n_2 K \alpha_1 U^{n_1}}\right) - 1$$

przy identycznych termoelementach ($n_1 = n_2 = 2$)

$$E = \frac{U}{\beta} \sqrt{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}} (1 + \delta^v)$$

$$\delta^v = - \frac{E}{2 K \alpha_1 U^2} \approx - \frac{1}{2 K \beta U \sqrt{\alpha_1 \alpha_2}} \quad (2.3)$$

Z równania (2.3) wynika, że błąd δ^v zmniejsza się ze zwiększeniem iloczynu $K \beta$ i obniżeniem nieidentyczności $n = n_1 - n_2$ termoelementów TE1 i TE2.

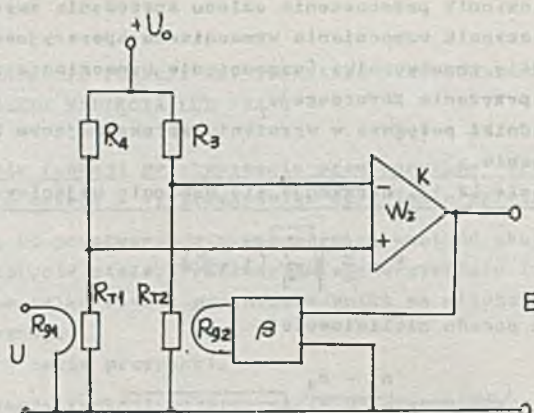
2.1.2. Przetwarzanie liniowe przetworników z bolometrami

Komparator bolometryczno-bolometryczny realizuje przetwarzanie liniowe.

Zależność rezystancji oporników R_{T1} , R_{T2} od mocy wydzielonej w ich grzejnikach R_{g1} i R_{g2} jest określona następującymi wyrażeniami:

$$R_{T1} = \alpha_1 \Psi_1 (P_1),$$

$$R_{T2} = \alpha_2 \Psi_2 (P_2)$$



Rys. 2. Zasada działania komparatora przetwornika bolometrycznego

oraz

$$P_1 = U^2/R_{g1},$$

$$P_2 = \beta^2 E^2/R_{g2},$$

gdzie:

α_1, α_2 - współczynnik przetwarzania przetworników,

β - współczynnik przenoszenia członu sprzężenia zwrotnego,

P_1, P_2 - odpowiednio moce czynne wydzielone w grzejnikach przetwornika bolometrycznego.

Z analizy mostka złożonego z rezystancji R_{T1}, R_{T2}, R_3, R_4 (jak na rys. 2) otrzymujemy:

$$E = K \left(\frac{R_{T1}}{R_{T1} + R_4} - \frac{R_{T2}}{R_{T2} + R_3} \right) U_0 \quad (2.4)$$

Z równania (2.4)

$$\varphi_2 \left(\beta^2 E^2/R_{g2} \right) = \frac{R_3 \alpha_1 \gamma_1(P_1)}{\alpha_2 R_4} \left[1 - \frac{E(\alpha_1 \varphi_1(P_1) + R_4)(\alpha_2 \varphi_2(P_2) + R_3)}{K U_0 R_3 \alpha_1 \varphi_1(P_1)} \right]$$

Stąd

$$E = \frac{U}{\beta} \sqrt{\frac{R_{g2}}{R_{g1}}} (1 + \delta), \quad (2.5)$$

gdzie: δ - uchyb od nieliniowości

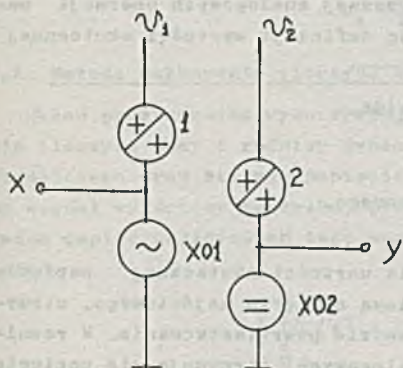
przy

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi, \quad \alpha_1 R_3 = X_2 R_4$$

$$\delta = - \frac{\varphi(P_1) \Delta}{2 P_1 \varphi'(P_1)} \quad (2.6)$$

$$\Delta = \frac{[\alpha_1 \varphi(P_1) + R_4] [\alpha_2 \varphi(P_2) + R_3] \cdot E}{K \alpha_1 \varphi(P_1) R_3 U_0}$$

2.2. Linearyzacja przetwarzania z wykorzystaniem metody kwadratury sygnału



Rys. 3. Zasada przetwarzania liniowego metodą kwadratury

Metoda ta jest oparta na sumowaniu średniokwadratowych wartości sygnałów metodą kwadratury.

Dla przypadku gdy przetwarzany sygnał wejściowy $X = 0$, wyjściowy sygnał X_{01} pierwszego pomocniczego źródła sterującego ustala się na pewnej wartości granicznej X_k , a sygnał X_{02} przyrównuje się do zera. W tym przypadku średniokwadratowe wartości v_1 i v_2 na wyjściach kwadratów sumujących 1 i 2 są jednakowe i równe X_k . Przy doprowadzeniu sygnału mierzonego $X \neq 0$ wartości v_1 i v_2 zmieniają się. Dla układu przedstawionego na rysunku 3 spełnione są równania:

$$v_1^2 = X^2 + X_{01}^2, \quad v_2^2 = X_{01}^2 + X_{02}^2 \quad (2.7)$$

Zę wzorów (2.7) otrzymuje się

$$y = X_{02} = \sqrt{X^2 + v_2^2 - v_1^2} \quad (2.8)$$

Przy $v_1 = v_2$ sygnał wyjściowy y jest równy x , ponieważ jednak równość $v_1 = v_2$ nie może być realizowana, dlatego

$$y = x (1 + \delta), \quad (2.9)$$

gdzie: δ - uchyb od liniowości

$$\gamma^v = \sqrt{1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{x^2}} \approx \frac{v_2 \Delta v}{x^2}$$

gdzie:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

$$\Delta v = v_2 - v_1.$$

3. ANALOGOWE PRZETWORNIKI OPERACYJNE

Analogowe przetworniki operacyjne przetwarzają wprost wartość skuteczną napięcia mierzonego na napięcie stałe. Działanie tych przetworników jest oparte na wykonaniu na drodze elektrycznej analogowych operacji matematycznych na napięciu wejściowym według definicji wartości skutecznej

$$U_s = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt},$$

gdzie:

$U(t)$ - wartość chwilowa napięcia mierzonego,

T - okres uśrednienia.

Zgodnie z tym równaniem w celu wyznaczenia wartości skutecznej napięcia trzeba podnieść do kwadratu wartość chwilową napięcia wejściowego, otrzymany wynik uśrednić, a następnie przeprowadzić pierwiastkowanie. W rezultacie, z tych matematycznych operacji analogowych, otrzymuje się napięcie stałe o wartości proporcjonalnej do wartości skutecznej.

Istnieją różnego rodzaju przetworniki operacyjne realizujące analogowe operacje matematyczne.

3.1. Metoda prostego wyliczenia

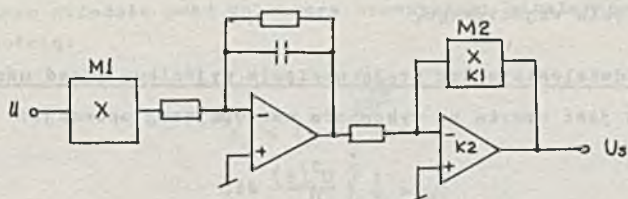
Metoda ta jest oparta na wykonaniu operacji matematycznych w kolejności wynikającej z wyrażenia wyznaczającego wartość skuteczną. Zasada przetwarzania wykorzystująca wspomnianą metodę przedstawiona jest na rys. 4. Dla układu przetwornika możemy wówczas napisać:

$$K_2 \left(\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt - K_1 U_s^2 \right) = - U_s$$

Stąd

$$U_s^2 - \frac{1}{K_1 K_2} U_s - \frac{1}{K_1 T} \int_0^T U^2(t) dt = 0$$

$$U_s = \sqrt{\left(\frac{1}{2 K_1 K_2} \right)^2 + \frac{1}{K_1 T} \int_0^T U^2(t) dt} + \frac{1}{2 K_1 K_2} \quad (3.1)$$



Rys. 4. Zasada działania metody prostego wyliczenia

Jeżeli $K_1 = 1$, $K_2 \gg 1$, to

$$U_s = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt} \quad (3.1)$$

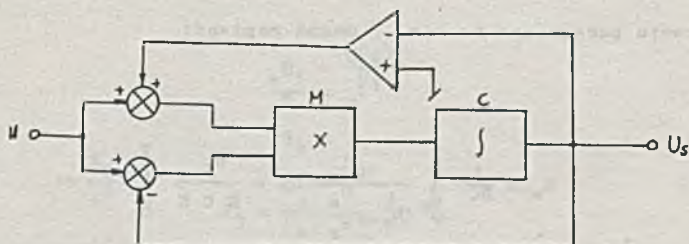
3.2. Metoda całkowania iloczynu sumy i różnicy dwóch napięć

Układ przetwornika wykorzystujący tę metodę działa na zasadzie całkowania iloczynu sumy i różnicy dwóch napięć, tj. wartości chwilowej napięcia wejściowego oraz stałego napięcia wyjściowego. W stanie ustalonym całkowany sygnał wyjściowy mnożnika, proporcjonalny do iloczynu sumy i różnicy dwóch napięć wejściowych tego mnożnika, jest bliski zeru, można więc napisać:

$$\frac{1}{T} \int_0^T (U(t) + U_s)(U(t) - U_s) dt = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T (U^2(t) - U_s^2) dt = 0$$

$$U_s = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt} \quad (3.3)$$



Rys. 5. Zasada działania metody całkowania iloczynu sumy i różnicy

Z tego wynika, że napięcie wyjściowe U_S jest równe wprost wartości skutecznej napięcia wejściowego.

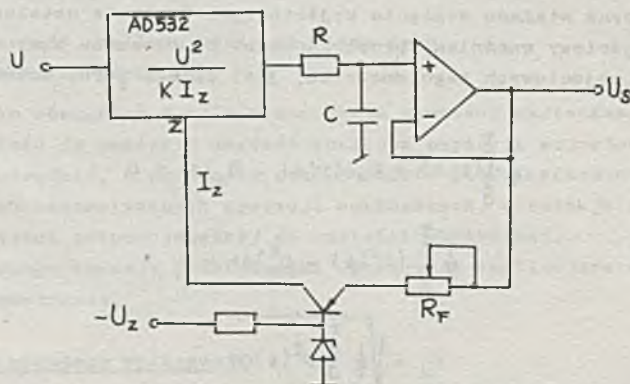
3.3. Metoda dzielenia przez stałe napięcie wyjściowe przed uśrednieniem

Metoda ta jest oparta na wykonaniu następującej operacji:

$$U_s = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U^2(t)}{U_s} dt.$$

3.3.1. Układ dzielący przez stałe napięcie wyjściowe

Układ scalony AD 532 - mnożnik wykonuje operacje U^2/z . Sygnał wyjściowy mnożnika jest uśredniony przez dolnoprzepustowy filtr RC i zostaje wzmocniony przez wzmacniacz operacyjny. Napięcie wyjściowe U_s zostaje dostarczone do wejścia Z układu scalonego AD 532 przez układ sprzężenia zwrotnego, przetwarzającego napięcie wyjściowe U_s na prąd J_z odpowiedniej wartości.



Rys. 6. Zasada działania układu dzielącego przez stałe napięcie wyjściowe

Ze schematu pokazanego na rys. 6 można napisać:

$$J_z = \frac{U_s}{R_F}$$

$$U_s = \frac{1}{RC} \int_0^T \frac{U^2}{K \cdot \frac{U_s}{R_F}} dt = \frac{R_F}{RC K} \int_0^T \frac{U^2}{U_s} dt$$

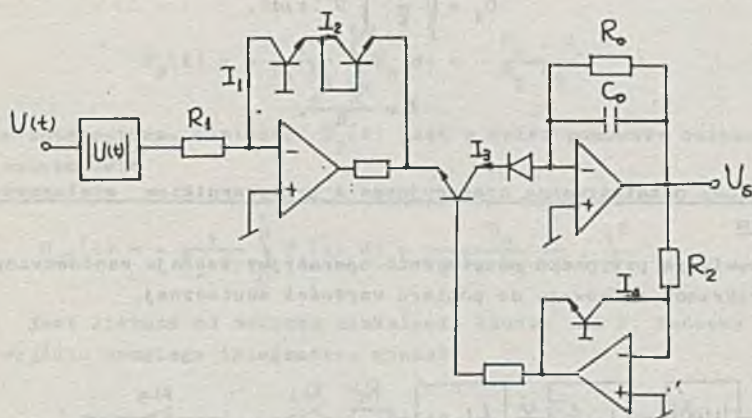
Stąd

$$U_s = \sqrt{\frac{R_F}{R \cdot C \cdot K} \int_0^T U^2 dt} \quad (3.4)$$

3.3.2. Układ dzielenia logarytmującego

W omawianym układzie prąd kolektora tranzystora bipolarnego jest opisany zależnością:

$$I_c = I_s e^{\frac{U_{EB}}{KT}} \quad (3.5)$$



Rys. 7. Zasada działania układu dzielenia logarytmującego

W układzie tym jest spełniona zależność

$$U_{EB1} + U_{EB2} - U_{EB3} - U_{EB4} = 0 \quad (3.6)$$

Ze wzorów (3.5) i (3.6)

$$I_1 \cdot I_2 = I_3 \cdot I_4, \quad (3.7)$$

gdzie:

$$I_1 = \frac{U(t)}{R_1}$$

$$I_2 = I_1$$

$$I_3 = \frac{U_s}{R_0} + C_0 \frac{d}{dt} U_s \quad (3.8)$$

$$I_4 = \frac{U_s}{R_2}$$

Z zależności (3.7) i (3.8) otrzymuje się:

$$\frac{R_0 C_0}{2} \frac{d}{dt} U_s^2 + U_s - \frac{R_2 R_0}{R_1^2} U^2(t) = 0 \quad (3.9)$$

Jeżeli $\frac{R_2 R_0}{R_1^2} = 1$, to

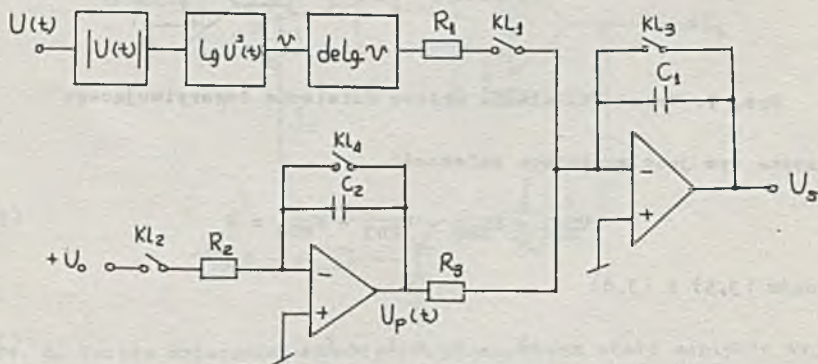
$$U_s = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^T U^2(t) dt},$$

gdzie:

$$\tau = \frac{R_0 C_0}{2}.$$

3.4. Metoda przetwarzania operacyjnego z przetwornikiem analogowo-cyfrowym

W omawianym przypadku przetwornik operacyjny zostaje zastosowany do budowy przyrządu cyfrowego do pomiaru wartości skutecznej.



Rys. 8. Zasada działania przetwornika operacyjnego realizującego konwersję A/C

Przetwornik ten działa na zasadzie komparacji dwóch napięć, tj. napięcia stałego proporcjonalnego do wartości skutecznej oraz wzorcowego napięcia stałego określonego przez zastosowanie podwójnego całkowania.

Zasada działania układu może być opisana w sposób następujący. Jeżeli napięcie wejściowe $U(t)$ jest dostarczone do prostownika i klucze $K1$ 1 i $K1$ 2 są początkowo zamknięte, a klucze $K1$ 2 i $K1$ 3 otwarte, to napięcie wyjściowe U_{s1} wynosi:

$$U_{s1}(t) = - \frac{1}{R_1 C_1} \int_0^t U^2(t) dt$$

Po upływie czasu T

$$U_{s1}(T) = -\frac{1}{R_1 C_1} \int_0^T U^2(t) dt \quad (3.10)$$

Następnie po czasie T klucze $K1\ 1$, $K1\ 3$, $K1\ 4$ zostają otwarte, a klucz $K1\ 2$ zostaje zamknięty.

W integratorze C_2 napięcie stałe U_0 jest całkowane, zgodnie z zależnością

$$U_p(t) = -\frac{1}{R_2 C_2} \int_0^t U_0 dt = -\frac{U_0 \cdot t}{R_2 C_2} \quad (3.11)$$

W drugim integratorze napięcie $U_p(t)$ jest z kolei ponownie całkowane, zgodnie z zależnością

$$U_{s2}(t) = -\frac{1}{R_3 C_1} \int_0^t U_p(t) dt = \frac{U_0}{R_2 C_2 R_3 C_1} \cdot \frac{t^2}{2} \quad (3.12)$$

Czas t jest liczony od momentu zamknięcia klucza $K1\ 2$. Końcowe napięcie na wyjściu drugiego integratora wynosi

$$U_s = U_{s1} + U_{s2} = -\frac{1}{R_1 C_1} \int_0^T U^2(t) dt + \frac{U_0}{R_2 C_2 R_3 C_1} \frac{T^2}{2}$$

Po czasie T_x napięcie U_s osiągnie wartość zero.

Dlatego

$$\frac{1}{R_1 C_1} \int_0^T U^2(t) dt = \frac{U_0}{R_2 C_2 R_3 C_1} \frac{T_x^2}{2} \quad (3.13)$$

$$T_x = \sqrt{K \int_0^T U^2(t) dt}$$

gdzie:

$$K = \frac{2 R_2 C_2 R_3}{R_1 U_0}$$

Jeżeli wybierzemy wartości rezystorów i kondensatorów tak, aby $k = \frac{1}{T}$, wówczas czas T_x będzie proporcjonalny do wartości skutecznej napięcia wejściowego.

Opisany układ realizuje więc następujące operacje:

- całkuje przebieg wejściowy kwadratowany w zadanym przedziale czasu,
- mnoży całkę przez wielkość stałą proporcjonalną do odwrotności czasu T ,
- pierwiastkuje wynik końcowy,
- zamienia sygnał napięciowy na odcinek czasu, czyli realizuje konwersję A/C.

LITERATURA

- [1] Szczepaniak C.: Komparatory elektryczne pomiarowe. WNT, Warszawa 1979.
- [2] Nadachowski M., Kulka Z.: Analogowe układy scalone. WKL, Warszawa 1979.
- [3] Wolgin R.I.: Izmeritelnyje preobrazowateli pieremiennawo naprjażenja w postojannoje. Sowietskoje radio, 1977.
- [4] Electronic Design. Vol. NO21 OCT 11. 1973.
- [5] Electronic Design. Vol. NO22 FEB 15. 1974.
- [6] Sprawozdanie z pracy badawczej Fb - 57/1. Instytut Spawalnictwa, Gliwice 1979.

Recenzent: Prof. dr inż. Stanisław Malzacher

Wpłynęło do Redakcji 12.01.1983 r.

МЕТОДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА
НА ПОСТОЯННОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

Р е з ю м е

В статье описано некоторые проблемы и методы преобразования действующего значения переменного напряжения и тока на постоянное напряжение. На основе этих методов оговорено вопросы линеаризации функции преобразования преобразователей действующего значения.

METHODS OF TRANSFER FUNCTIONS LINEARIZATION IN rms VOLTAGE
AND CURRENT TRANSDUCERS

S u m m a r y

In the paper some problems and methods of rms voltage and current conversion into direct voltage is considered. This is a back ground to discuss a problem of linearization of rms value transducers.