ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1983

Seria: AUTOMATYKA z. 66 Nr kol. 752

Edward HRYNKIEWICZ

Instytut Elektroniki
Politechnika Śląska

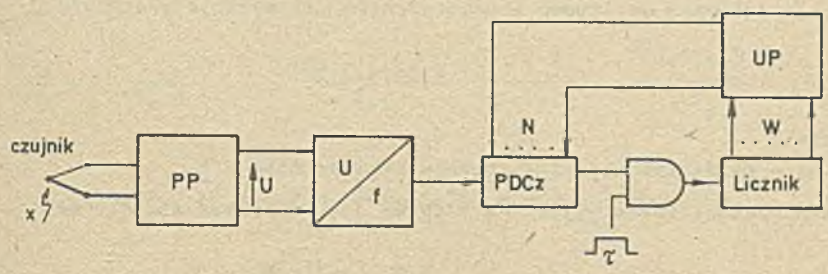
LINEARYZUJĄCY PRZETWORNIK A/C

Streszczenie. Artykuł przedstawia sposób linearyzacji charakterystyki przetwornika pomiarowego w układzie z przetwornikiem A/C, działającym w oparciu o przetwarzanie napięcia na częstotliwość; pomiędzy licznik i przetwornik U/f wprowadza się binarny programowany dzielnik częstotliwości, a liczbę programującą ten dzielnik zmienia się w czasie przetwarzania tak, by uzyskać liniową zależność wyniku od wielkości mierzonej.

1. Wstęp

W układach pomiarowych występuje często konieczność współpracy przetwornika A/C z nieliniowym przetwornikiem pomiarowym.

Aby w takim przypadku uzyskać liniową zależność liczby od wielkości mierzonej można dokonać modyfikacji przetwornika A/C w sposób przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy układu linearyzującego

Modyfikacja polega na tym, że pomiędzy przetwornik U/f a bramkę AND włączony został binarny programowany dzielnik częstotliwości (BPDCz), programowany tak (w zależności od stanu licznika), by uzyskać zależność

$$w = k_p x$$

gdzie:

w - wynik przetwarzania (pomiaru);

x - wartość wielkości mierzonej;

k_p - współczynnik proporcjonalności.

Chcąc uprościć strukturę układu programującego (UP) można założyć, że liczba N (liczba programująca BPDCz) jest przedziałami stała. Wtedy należy liczyć się z pewnym błędem liniowości wewnątrz przedziału.

2. Zasady doboru liczb programujących

2.1. Wariant I

Przy takim jak wyżej postawieniu problemu należy zastanowić się, w jaki sposób wybierać liczby programujące BPDCz oraz przy jakich wartościach "w" należy je zmieniać.

Załóżmy w pierwszym przypadku, że zakres zmienności "x" ($0 < x < x_{max}$) dzielimy na "i" przedziałów oraz, że dla końca k-tego przedziału wynik przetwarzania w_k wynosi $k_p x_k$ (zakres zmienności liczby "w" dzieli się także na "i" przedziałów, a osiągnięcie przez licznik poszczególnych wartości w_k - $k = 1,2,\ldots,i$ - wyznacza momenty zmiany liczby programującej N).

Przetwornik pomiarowy można opisać równaniem:

$$U = f(x) \tag{1}$$

a częstotliwość wyjściową z przetwornika U/f wyrazić następująco:

$$f_i = k_f\, f(x) \tag{2}$$

gdzie:

k_f - współczynnik przetwarzania przetwornika U/f.

Zatem częstotliwość wyjściowa z BPDCz [1, 2] wyraża się wzorem:

$$f_o = \frac{f_i N}{2^n} = \frac{k_f f(x) N}{2^n} \tag{3}$$

gdzie:

n - liczba stopni BPDCz.

Uwzględniając to, że liczba N zmienia się po osiągnięciu przez stan licznika górnej granicy każdego przedziału, można dla poszczególnych wartości x_k ($k = 1,2,\ldots,i$) napisać równania:

$$\frac{k_f f(x_i = x_{max})}{2^n}(N_1\tau_1^i + N_2\tau_2^i + \dots + N_{i-1}\tau_{i-1}^i + N_i\tau_i^i) = k_p x_{max}$$

$$\frac{k_f f(x_{i-1})}{2^n}(N_1\tau_1^{i-1} + N_2\tau_2^{i-1} + \dots + N_{i-1}\tau_{i-1}^{i-1}) = k_p x_{i-1} \qquad (4)$$

$$\vdots$$

$$\frac{k_f f(x_1)}{2^n} N_1\tau_1^1 = k_p x_1$$

gdzie:

τ_k^{i-m} - czas, przez który liczba programująca N_k podana jest na wejście programujące BPDCz w sytuacji, gdy wielkość mierzona posiada wartość x_{i-m} ($m = 0,1,\dots,i$; $k = 1,2,\dots,i-m$).

Ponieważ każda konwersja trwa przez czas "τ", zatem:

$$\tau_1^i + \tau_2^i + \dots + \tau_{i-1}^i + \tau_i^i = \tau$$

$$\tau_1^{i-1} + \tau_2^{i-1} + \dots + \tau_{i-1}^{i-1} = \tau \qquad (5)$$

$$\vdots$$

$$\tau_1^1 = \tau$$

Na podstawie (4) i (5) uzyskuje się:

$$\frac{x_1}{N_1} + \frac{x_2 - x_1}{N_2} + \dots + \frac{x_{i-1} - x_{i-2}}{N_{i-1}} + \frac{x_i - x_{i-1}}{N_i} = \frac{\tau k_f f(x_i)}{2^n k_p}$$

$$\frac{x_1}{N_1} + \frac{x_2 - x_1}{N_2} + \dots + \frac{x_{i-1} - x_{i-2}}{N_{i-1}} = \frac{\tau k_f f(x_{i-1})}{2^n k_p} \qquad (6)$$

$$\vdots$$

$$\frac{x_1}{N_1} = \frac{\tau k_f f(x_1)}{2^n k_p}$$

Stąd

$$\frac{N_1}{2^n} = \frac{k_p x_1}{\tau k_f f(x_1)}$$

$$\frac{N_2}{2^n} = \frac{k_p(x_2-x_1)}{\tau k_f\left[f(x_2) - f(x_1)\right]}$$
$$\vdots \qquad (7)$$
$$\frac{N_i}{2^n} = \frac{k_p(x_i-x_{i-1})}{\tau k_f\left[f(x_i) - f(x_{i-1})\right]}$$

Jeżeli przyjąć, że zakres zmienności "x" podzielony jest na równe przedziały, to:

$$\frac{N_k}{2^n} = \frac{k_p x_{max}}{\tau k_f i} \cdot \frac{1}{f(k\frac{x_{max}}{i}) - f\left[(k-1)\frac{x_{max}}{i}\right]} \qquad k = 1,2,\ldots,i. \qquad (8)$$

Znając liczby programujące BPDCz, w przyjętych przedziałach Δx, można wyznaczyć błąd nieliniowości wewnątrz każdego z tych przedziałów (w obliczeniach nie uwzględniamy wpływu na błąd pomiaru nierównomierności rozkładu impulsów wyjściowych z BPDCz, gdyż jest on niewielki w porównaniu z błędem nieliniowości).

Dla $x_{s-1} < x \leq x_s$ uzyskuje się:

$$\frac{k_f N_1 f(x)}{2^n}\tau_1 = k_p x_1$$
$$\frac{k_f N_2 f(x)}{2^n}\tau_2 = k_p(x_2-x_1) \qquad (9)$$
$$\vdots$$
$$\frac{k_f N_s f(x)}{2^n}\tau_s = w-k_p x_{s-1}$$

gdzie:

$\tau_1, \tau_2, \ldots, \tau_s$ - odcinki czasu, przez które na wejściu programującym BPDCz znajdują się odpowiednio liczby programujące N_1, $N_2, \ldots, N_s$.

Odstęp czasu τ_s można wyliczyć następująco:

$$\tau_s = \tau - \tau_1 - \tau_2 - \ldots - \tau_{s-1} \qquad (10)$$

Podstawiając za τ_k $(k = 0,1,\ldots,s-1)$ wielkości wyliczone z równań (9) dochodzi się do wyrażenia:

$$\tau_s = \tau - \frac{k_p 2^n}{k_f f(x)} \sum_{k=1}^{s-1} \frac{x_k - x_{k-1}}{N_k} \tag{11}$$

Wynik przetwarzania dla x z rozpatrywanego przedziału można przedstawić teraz w postaci:

$$w = k_p x_{s-1} + \tau_s \frac{k_f N_s f(x)}{2^n} \tag{12}$$

a błąd pomiaru jest równy:

$$\tau = k_p x - w \tag{13}$$

Podstawiając (11) do (12), a następnie (12) do (13) uzyskuje się:

$$\delta = k_p N_s \left(\sum_{k=1}^{s-1} \frac{x_k - x_{k-1}}{N_k} + \frac{x - x_{s-1}}{N_s} \right) - \frac{\tau k_f N_s f(x)}{2^n} \tag{14}$$

Wzór (14) dla równych przedziałów Δx przyjmuje postać:

$$\delta = k_p N_s \frac{x_{max}}{i} \sum_{k=1}^{s-1} \frac{1}{N_k} + k_p (x - x_{s-1}) - \frac{\tau k_f N_s f(x)}{2^n} \tag{15}$$

2.2. Wariant II

Tak jak w wariancie poprzednim, dzielimy zakres zmienności wielkości mierzonej na "i" przedziałów. Zakładamy zgodność charakterystyki rzeczywistej z idealną w środku każdego przedziału. Jeżeli przez w_k oznaczyć wynik przetwarzania dla $x = x_k$, to pamiętając, że każda konwersja trwa przez czas "τ" oraz że liczba programująca zmienia się na granicy przedziałów, można dla środka każdego z przedziałów napisać:

$$\frac{2^n}{k_f f\left(\frac{x_i + x_{i-1}}{2}\right)} \left(\frac{w_1}{N_1} + \frac{w_2 - w_1}{N_2} + \ldots + \frac{w_{i-1} - w_{i-2}}{N_{i-1}} + \frac{k_p \frac{x_i - x_{i-1}}{2} - w_{i-1}}{N_i} \right) = \tau$$

$$\frac{2^n}{k_f f\left(\frac{x_{i-1} + x_{i-2}}{2}\right)} \left(\frac{w_1}{N_1} + \frac{w_2 - w_1}{N_2} + \ldots + \frac{k_p \frac{x_{i-1} + x_{i-2}}{2} - w_{i-2}}{N_{i-1}} \right) = \tau$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$\frac{2^n}{k_f f(\frac{x_1}{2})} \cdot \frac{k_p \frac{x_1}{2}}{N_1} = \tau \tag{16}$$

Podobne równania podaje się także dla końca każdego przedziału:

$$\frac{2^n}{k_f f(x_1 = x_{max})}\left(\frac{w_1}{N_1} + \frac{w_2 - w_1}{N_2} + \ldots + \frac{w_{i-1} - w_{i-2}}{N_{i-1}} + \frac{w_i - w_{i-1}}{N_i}\right) = \tau$$

$$\frac{2^n}{k_f f(x_{i-1})}\left(\frac{w_1}{N_1} + \frac{w_2 - w_1}{N_2} + \ldots + \frac{w_{i-1} - w_{i-2}}{N_{i-1}}\right) = \tau$$

$$\vdots \tag{17}$$

$$\frac{2^n}{k_f f(x_1)} \frac{w_1}{N_1} = \tau$$

Z równań (16) i (17) wylicza się:

$$\frac{N_k}{2^n} = \frac{k_p \frac{x_k + x_{k-1}}{2} - w_{k-1}}{\tau k_f f(\frac{x_k + x_{k-1}}{2}) - \sum_{m=1}^{k-1} \frac{2^n}{N_m}(w_m - w_{m-1})} \tag{18}$$

oraz:

$$w_k = w_{k-1} + \frac{N_k}{2^n} k_f \tau f(x_k) - \sum_{k=1}^{k-1} \frac{N_k}{N_m}(w_m - w_{m-1}) \qquad k = 1,2,\ldots,i. \tag{19}$$

Z zależności (18) wynika, że obliczanie liczb programujących BPDCz (wariant II) najwygodniej przeprowadzić obliczając na przemian N_k i w_k. Wynika to stąd, że do obliczania liczby N_{k+1} potrzebna jest znajomość stanu licznika w_k.

Błąd wewnątrz przedziału $x_{s-1} < x \leqslant x_s$ wylicza się w wariancie II następująco:

$$\delta = k_p x - w_{s-1} - \frac{N_s f(x) k_f}{2^n} \tau_s$$

$$\tau_s = \tau - \frac{2^n}{k_f f(x)} \sum_{m=1}^{s-1} \frac{w_m - w_{m-1}}{N_m}$$

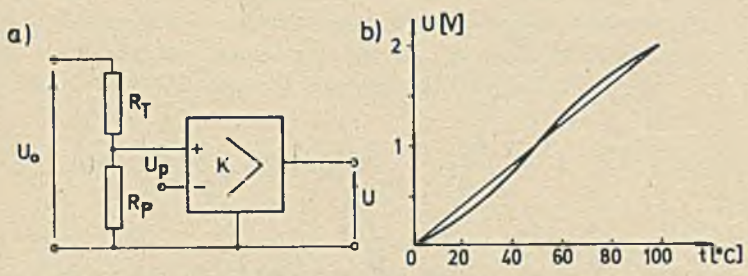
stąd:

$$\delta = k_p x - w_{s-1} - \frac{N_s f(x) k_f}{2^n} \tau + \sum_{m=1}^{s-1} \frac{N_s}{N_m}(w_m - w_{m-1}) \qquad (20)$$

3. Przykład

Układ zawiera przetwornik pomiarowy [3] z czujnikiem termistorowym (rys. 2), pracujący w zakresie 0-100°C. Termistor opisany jest równaniem:

$$R_T = 908 \cdot 10^{-8} e^{\frac{4174}{T}}$$



Rys. 2. Przetwornik pomiarowy
a) schemat, b) charakterystyka

Przyjmijmy: $k_f = 10^3 \frac{Hz}{V}$; $k_p = 10$; $k = 1.33 \frac{V}{V}$; $\tau = 1$ s; $i = 5$; $U_o = 2$ V; licznik - 3 dekady.

Rezystancję R_p wybiera się tak, by punkt przegięcia charakterystyki wypadł w środku zakresu; w przykładzie $R_p = 3.053$ k.

Napięcie U_p (rys. 2) przesuwa charakterystykę przetwornika pomiarowego o 143 mV w dół.

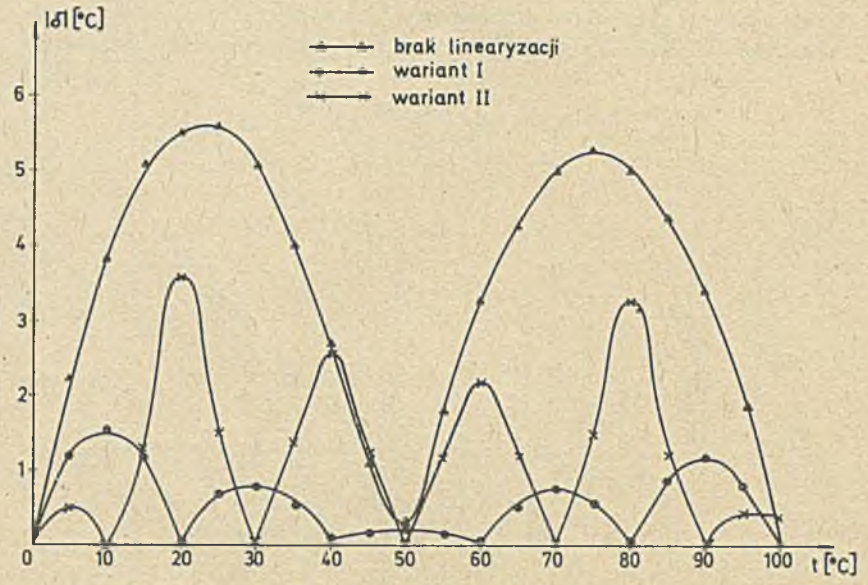
Jeśli dla takiego przetwornika pomiarowego zastosować linearyzację według wariantu I, to uzyskuje się:

$N_1 = 179$
$N_2 = 112$
$N_3 = 98$
$N_4 = 118$
$N_5 = 173$

Zmiana liczby programującej następuje dla w = 0, 200, 400, 600, 800. Natomiast dla wariantu II:

$N_1 = 211$
$N_2 = 77$
$N_3 = 122$
$N_4 = 85$
$N_5 = 204$

a zmiana liczby programującej ma miejsce dla w = 0, 236, 374, 622, 766.



Rys. 3. Wykresy błędu dla rozpatrywanego przykładu

Przebieg błędu dla układu niezlinearyzowanego oraz dla obydwu wariantów przedstawia rys. 3 (w układzie bez linearyzacji $k_f = 500 \frac{Hz}{V}$). W rozpatrywanym przykładzie okazuje się, że mniejsze błędy nieliniowości uzyskuje się przy linearyzacji według wariantu I. Nie można jednak powiedzieć, że jest to wariant optymalny. Najlepszy podział zakresu pomiarowego na przedziały i wybór miejsca, w którym powinna zachodzić zgodność między charakterystyką idealną i rzeczywistą może być przedmiotem dalszych zainteresowań.

LITERATURA

[1] Arnstein W. i inni: Digital Linear Interpolation and the BRM, Control Engineering, June 1964.

[2] Winston G.C.: Curvilinear Rate Multiplier for Precise Interpolation, Control Engineering, April 1968.

[3] Kuzma E.: Termometry termistorowe, PWN 1967.
[4] Badźmirowski K. i inni: Cyfrowe systemy pomiarowe, WNT 1979.

Recenzent: Prof. dr hab. F. Wagner

Wpłynęło do Redakcji 1.VII.1982 r.

ЛИНЕАРИЗИРУЮЩИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ А/Ц

Р е з ю м е

В статье представлен метод линеаризации измерительного преобразователя работающего совместно с преобразователем А/Ц который состоит из преобразователя напряжение - частота. Метод состоит в том, что между счётчик а преобразователь напряжение - частота включается двоичный умножитель, которого программное число изменяется таким образом, чтобы получить линейную зависимость выходного числа от входной измерямой величины.

A/D CONVERTER USED FOR LINEARIZATION

S u m m a r y

The paper describes the linearization method suitable for a measuring devices. This method, which is implemented by the modification of A/D converter of the V-to-f type, requires the rate multiplier connected between the pulses counter and the V-to-f converter. The programming number of the rate multiplier is set-up in such a manner that the linear relationship between digital output and the quantity to be measured is obtained.