ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: ELEKTRYKA z. 195 Nr kol. 1670

Zbigniew ŚWIDER, Bartosz TRYBUS
Katedra Informatyki i Automatyki
Politechnika Rzeszowska

ANALIZA BŁĘDÓW PRZEMYSŁOWEGO PRZETWORNIKA PPS-10

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę błędów wpływających na końcowy wynik przetwarzania przemysłowego przetwornika PPS-10. Rozpatrzono błędy zastosowanych w urządzeniu przetworników A/C i C/A, w tym szumy kwantyzacji i nieliniowości charakterystyk przetwarzania, oraz podano sposób programowej adiusacji stopnia wejściowego i wyjściowego. Dokonano oceny niedokładności aproksymacj wielomianowej dla funkcji linearyzujących charakterystyki dla termopar i termorezystorów Wzięto również pod uwagę błędy obliczeń numerycznych związane z zastosowaniem arytmetyki zmiennoprzecinkowej o ograniczonej precyzji i wykazano, że przy zastosowaniu 4-bajtowej arytmetyki są one pomijalnie małe[1].

ERROR ANALYSIS OF PPS-10 INDUSTRIAL CONVERTER

Summary. The paper describes errors analysis affecting final conversion result of the PPS-10 industrial converter. Errors of utilized A/D and D/A converters were considered including quantization noises and nonlinearity of conversion characteristic. Software procedure of input and output block adjustment was also described. Estimation of polynomial approximation inaccuracy for linearization function characteristic for thermocouples and thermoresistor sensors was made. Errors of numerical calculations as a result of using floating-point arithmetic with limited precision were also taken into account. It was proved that for 4-byte arithmetic roundoff errors are negligibly small.

1. WSTĘP

W przemysłowych układach automatyki coraz powszechniej stosowane są inteligentne mikroprocesorowe przetworniki pomiarowe. Umożliwiają one m.in. podłączenie czujników różnego typu, programową linearyzację charakterystyki przetwarzania, autokalibrację oraz transmisję danych do komputera nadrzędnego (stacji operatorskiej). Ich podstawowe cechy to zwykle małe rozmiary, montaż w pobliżu czujników, zasilanie bezpośrednio z wyjściowej pętli prądowej i stosunkowo niska cena. Takim urządzeniem jest opisywany tu przetwornik PPS-10.

Jednym z kryteriów decydujących o popularności na rynku danego urządzenia jest niepewność przetwarzania. Analiza jej składowych pozwala na określenie, które z nich wpływają znacząco na całkowitą niepewność oraz sygnalizuje możliwe kierunki jej zmniejszenia.

[1] Praca częściowo finansowana z grantu MNiI nr 4 T11A 017 24.

W artykule przedstawiono analizę niepewności przetwornika PPS-10 z uwzględnieniem poszczególnych bloków urządzenia, tzn. stopnia wejściowego, toru przetwarzania sygnału i stopnia wyjściowego. Głównymi źródłami niepewności są tutaj:

- błędy własne zastosowanych przetworników A/C i C/A (szumy kwantyzacji, nieliniowość charakterystyki przetwarzania),
- niedokładności aproksymacji wielomianowej dla funkcji linearyzującej charakterystyki dla termopar i termorezystorów (jej stosunkowo niski rząd),
- niedokładności związane z kompensacją rozrzutu wartości rezystorów (głównie w stopniu wejściowym – wzmacniacz wstępny, przełączanie zakresów),
- błędy obliczeń numerycznych związane z zastosowaniem arytmetyki zmiennoprzecinkowej o ograniczonej precyzji.

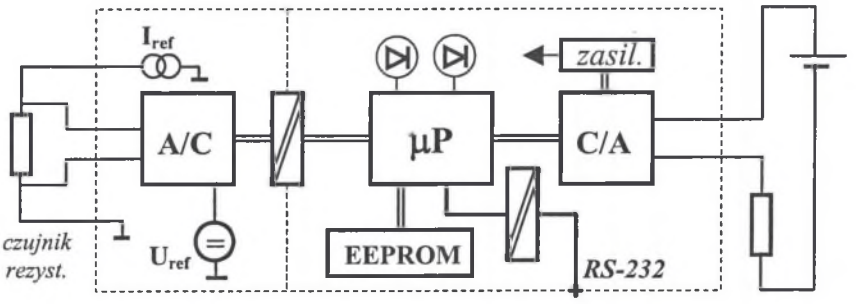
Podano oszacowania teoretyczne tych błędów oraz otrzymane w wyniku pomiarów rezultaty.

2. PROGRAMOWALNY PRZETWORNIK SYGNAŁÓW PPS-10

2.1. Charakterystyka ogólna

Programowalny Przetwornik Sygnałów PPS-10 (produkowany w Polsce, [1]) jest uniwersalnym urządzeniem mikroprocesorowym, umożliwiającym przetwarzanie sygnałów pochodzących z termopar, czujników termorezystancyjnych, rezystancyjnych nadajników położenia oraz różnego rodzaju źródeł napięcia i prądu na standardowy sygnał prądowy 4...20 mA. Jest on przetwornikiem dwuprzewodowym, tzn. jest zasilany z pomiarowej pętli prądowej i nie wymaga osobnego zasilacza. Przetwornik PPS-10 posiada separację galwaniczną między wejściem a wyjściem oraz separowany interfejs RS-232 służący do podłączania komputera PC dla programowania urządzenia.

Przetwornik PPS-10 składa się z dwu płytek drukowanych: (1) płytki mikroprocesorowej zawierającej mikrokomputer jednoukładowy PIC16F76, pamięć danych EEPROM, 16-bitowy przetwornik C/A (typ AD421) z modułem zasilacza i układ transmisji RS-232; (2) płytki przetwornika wejściowego zawierającej 16-bitowy przetwornik A/C *sigma-delta* (typ AD7715) z obwodami wejściowymi i układem separacji galwanicznej. Urządzenie mieści się w obudowie PHOENIX o szerokości 25 mm przystosowanej do montażu na szynie DIN 35 mm. Z przodu są umieszczone 2 diody LED sygnalizujące stan pracy przetwornika (praca, konfiguracja, adiustacja). Schemat blokowy PPS-10 przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy przetwornika PPS-10
Fig. 1. Block diagram of PPS-10 converter

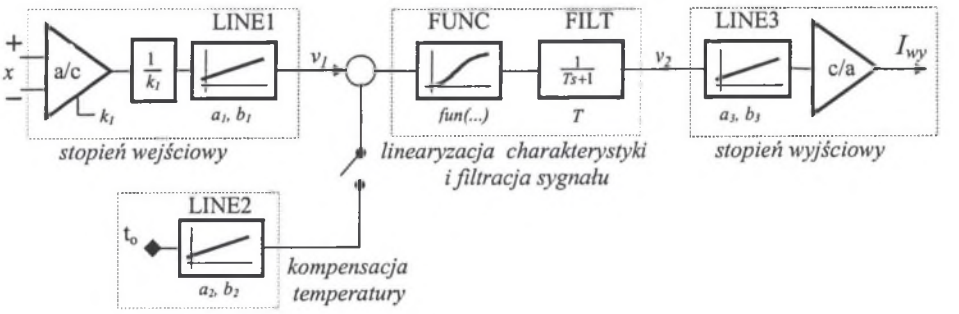
Program konfiguracyjny pracujący w systemie Windows służy do tworzenia lub modyfikowania danych konfiguracyjnych przetwornika oraz przesyłania ich do pamięci EEPROM urządzenia. Dane te można podzielić na cztery grupy: (1) informacje ogólne o konfiguracji nie mające wpływu na funkcje przetwornika (np. nazwa konfiguracji, autor, data utworzenia); (2) dane podstawowe (np. typ sygnału wejściowego, początek i koniec zakresu przetwarzania, sposób sygnalizacji alarmu); (3) parametry zależne od typu sygnału wejściowego (np. włączenie linearyzacji, wybór typu podłączenia czujnika rezystancyjnego); (4) parametry kalibracyjne (współczynniki adiustacji wejścia i wyjścia). Program pozwala również na bieżąco obserwować i rejestrować pomiary.

Podstawowe dane techniczne przetwornika PPS-10 to:

- *sygnały wejściowe*: termopary (typu B, J, K, R, S, T), termorezystory (Pt 100, Ni 100, Cu 100), napięciowe (1... 100 mV), rezystancyjne (0...1000 Ω), prądowe (0...20 mA),
- *zakres przetwarzania*: ustawiany programowo,
- *sygnał wyjściowy*: 4...20 mA (sygnalizacja alarmów 3,75 mA lub 22 mA po przekroczeniu zadeklarowanego zakresu o 10%),
- *deklarowane maksymalne błędy*: podstawowy na wszystkich zakresach ±0,1%; od wahań wewnętrznego źródła prądowego ±0,05%; od zmian temperatury „zimnych końców" ±0,05%; od wahań zasilania ±0,02%,
- *zasilanie*: z pomiarowej pętli prądowej.

2.2. Tor przetwarzania

Na rys. 2 przedstawiono uproszczony schemat blokowy toru przetwarzania PPS-10. Sygnał wejściowy z 16-bitowego przetwornika A/C (o programowo zmienianym współczynniku wzmocnienia w zakresie 2, 32, 128) poddawany jest skalowaniu w bloku LINE i ew. sumowany z sygnałem kompensacji temperatury „zimnych końców" t_o (dla termopar). W bloku FUNC realizowana jest linearyzacja charakterystyki zgodnie z odpowiednimi normami (dla termopar i termorezystorów) z wykorzystaniem wielomianów interpolacyjnych oraz ew. filtracja ze stałą czasową T (w bloku FILT). Na koniec sygnał poddawany jest skalowaniu (blok LINE3) i przekazywany do wyjściowego przetwornika C/A (16-bitowy, z wyjściem prądowym I_{wy}). Współczynniki skalujące a_i, b_i w poszczególnych blokach LINE ustalane są na etapie adiustacji (*off-line*) z wykorzystaniem programu konfiguracyjnego i zapamiętywane w nieulotnej pamięci EEPROM. Pozwala to na programowe skompensowanie rozrzutu wartości zastosowanych elementów biernych (rezystorów).



Rys. 2. Schemat blokowy procesu przetwarzania w PPS-10
Fig. 2. Block diagram of conversion process in PPS-10

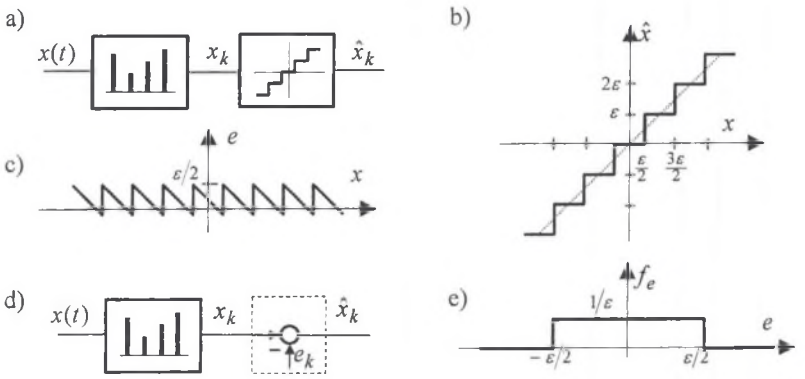
3. STOPIEŃ WEJŚCIOWY

3.1. Wariancja błędu przetwornika A/C

Typowe przetwarzanie A/C obejmuje dwa etapy [2,3]: (1) próbkowanie sygnału $x(t)$ dające ciąg dyskretnych wartości $\{x_k\}$; (2) kwantyzacja wartości x_k do poziomów $\hat{x}_k$ określonych przez rozdzielczość przetwornika. Odpowiadają temu bloki na rys. 3a. Wartość $\hat{x}_k$ jest B-bitowym słowem w wybranym kodzie, przeważnie "uzupełnienia do 2" (U2). Spośród B bitów słowa jeden bit określa znak, a pozostałe $b = B - 1$ wartość. Rozważmy przetwornik A/C o wyjściu $\hat{x}$ należącym do znormalizowanego przedziału $[-1, 1]$. Charakterystykę kwantyzatora zaokrąglającego, spotykanego najczęściej, pokazano na rys. 3b. Błąd kwantyzacji, zdefiniowany jako $e = \hat{x} - x$, nie przekracza w tym wypadku $\frac{\varepsilon}{2}$ (rys. 3c), gdzie

$$\varepsilon = 2^{-b}, \tag{1}$$

odpowiada najmniej znaczącemu bitowi przetwornika i jest nazywany krokiem kwantyzacji.



Rys. 3. Przetwornik A/C: a) model nieliniowy z układem próbkującym i kwantyzatorem, b) charakterystyka kwantyzatora zaokrąglającego, c) błąd kwantyzacji, d) model stochastyczny, e) gęstość prawdopodobieństwa błędu

Fig. 3. A/C converter: a) nonlinear model with sampler and quantizier, b) input-output characteristic, c) quantization error characteristic, d) statistical model, e) error uniform probability distribution

W literaturze [2,3] przyjmuje się, że modelem kwantyzatora z rys. 3a jest sumator wprowadzający błąd przypadkowy e_k (rys. 3d). Zakłada się, że e_k stanowi dyskretny szum biały, nieskorelowany z wartościami x_k, o rozkładzie równomiernym, tzn. o następującej funkcji gęstości prawdopodobieństwa

$$f_e(e) = \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon} & \text{dla} \quad e \in [-\frac{\varepsilon}{2}, \frac{\varepsilon}{2}], \\ 0 & \text{poza tym,} \end{cases} \tag{2}$$

(por. rys. 3e). Wartość średnia błędu e jest wtedy zerowa, a jego wariancja wynosi

$$\sigma_e^2 = E\{(e-0)^2\} = \int_{-\infty}^{\infty}(e-0)^2 f_e(e)de = \frac{1}{\varepsilon}\int_{-\varepsilon/2}^{\varepsilon/2} e^2 de = \frac{\varepsilon^2}{12}, \tag{3}$$

gdzie $E\{\cdot\}$ oznacza operator wartości oczekiwanej [6].

Dla zakresu podstawowego (0...100) mV efektywna rozdzielczość zastosowanego w PPS-10 przetwornika A/C wynosi około 14 bitów, co daje znormalizowaną (do przedziału $[-1,1]$) wariancję błędu $\sigma_e^2 \cong 3\cdot 10^{-10}$ lub w jednostkach fizycznych $\sigma_e^2 \cong 3\cdot 10^{-6}$ mV (odchylenie standardowe $\sigma_e \cong 1{,}7$ μV). Z przeprowadzonych badań laboratoryjnych wynika, że błąd pomiaru nie przekracza ±1 bitu (a więc kroku kwantyzacji $\varepsilon \cong 5$ μV), daje to dokładność co najmniej równą 0,005% zakresu.

3.2. Adiustacja stopnia wejściowego

Potrzeba adiustacji stopnia wejściowego wynika z faktu, iż w PPS-10 zastosowano elementy o tolerancji 1% (rezystory na wejściu przetwornika A/C, elementy źródła prądowego i napięcia odniesienia), więc ich ew. rozrzut musi być skompensowany programowo.

Przyjęto, że układ wejściowy przetwornika A/C (por. rys. 2) opisywany jest równaniem liniowym

$$x_{AC} = (\alpha_1 k_1 x + \beta_1)/k_1, \tag{4}$$

gdzie α_1, β_1 są odpowiednio współczynnikiem wzmocnienia (*gain*) i przesunięcia zera (*offset*) przetwornika A/C oraz k_1 ustawianym programowo wzmocnieniem (gdzie k_1 = 2, 32, 128). Blok LINE1 (rys. 2) realizuje funkcję

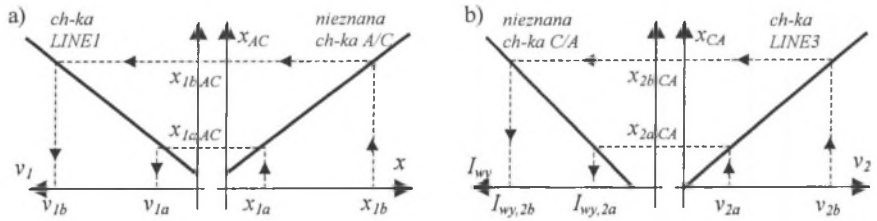
$$v_1 = a_1 \cdot x_{AC} + b_1 = a_1\alpha_1 x + \alpha_1\beta_1/k_1 + b_1, \tag{5}$$

gdzie a_1, b_1 są współczynnikami adiustacji stopnia wejściowego.
W przypadku idealnej adiustacji $a_1 = 1/\alpha_1$, $b_1 = -\alpha_1\beta_1/k_1$. Ponieważ jednak parametry α_1, β_1 nie są znane i zależą od wartości elementów zastosowanych w danym egzemplarzu urządzenia, więc wartości współczynników a_1, b_1 należy wyznaczyć doświadczalnie. Do tego celu wykorzystywany jest program pracujący w środowisku Windows i specjalne stanowisko pomiarowe.

Procedura adiustacji stopnia wejściowego przebiega następująco. Na wejście PPS-10 podawane jest napięcie testowe x_{1a} o wartości ok. 10% zakresu i jego dokładna wartość wpisywana jest do okna w programie. Następnie na wejście podawane jest napięcie testowe x_{1b} o wartości ok. 90% zakresu i jego wartość znowu wpisywana do okna w programie. Przetwornik PPS-10 mierzy oba napięcia $x_{1a,AC}$, $x_{1b,AC}$ i na ich podstawie oblicza współczynniki a_1, b_1, tak aby spełnione były zależności (por. rys. 4a)

$$v_{1a} = x_{1a}, \qquad v_{1b} = x_{1b}. \tag{6}$$

Dodatkowo, jak wynika z równania (5), dla uzyskania dużej dokładności potrzebne są osobne współczynniki dla każdego zakresu (ze względu na zależność współczynnika b_1 od wzmocnienia k_1). Adiustację stopnia wyjściowego opisano w pkt. 5.1.



Rys. 4. Zasada adiustacji: a) stopnia wejściowego, b) stopnia wyjściowego
Fig. 4. Calibration principle of: a) input block, b) output block

4. BLOK PRZETWARZANIA SYGNAŁU

4.1. Błędy arytmetyki zmiennoprzecinkowej

W literaturze [4,5] można spotkać oszacowania wariancji błędu elementarnych operacji zmiennoprzecinkowych (kwantyzacji, dodawania i mnożenia) na poziomie $(0{,}18\ldots0{,}23)\cdot Q^2$, gdzie $Q=2^{-b}$, a b oznacza liczbę bitów mantysy liczby w zapisie zmiennoprzecinkowym. Oszacowania takie często pochodzą z symulacji lub obliczeń teoretycznych, ale przy niepraktycznych założeniach co do rozkładów liczb wejściowych. Autorowi [7] udało się jednak uzyskać analityczne wzory pozwalające wprowadzić *jednolite* oszacowanie wariancji błędu operacji zmiennoprzecinkowych na poziomie $\sigma^2=0{,}18\cdot Q^2$.

Niech x oznacza liczbę rzeczywistą, a $\hat{x}$ jej B-bitowy odpowiednik zmiennoprzecinkowy powstały w wyniku kwantyzacji z krokiem Q, tzn. $[x]_Q=\hat{x}$. Liczba $\hat{x}$ jest reprezentowana przez iloczyn

$$\hat{x}=[x]_Q=\pm|\hat{m}|\cdot 2^p=\hat{m}\cdot 2^p, \tag{7}$$

gdzie $\hat{m}$ jest mantysą o długości b bitów, znormalizowaną do przedziału $[\frac{1}{2},1)$, p wykładnikiem całkowitym (cechą) o długości s bitów a $\pm$ reprezentuje 1-bitowy znak liczby. Dla zapisu B-bitowego mamy zatem $B=b+s+1$. Należy pamiętać, że kwantyzacja $[x]_Q$ dotyczy jedynie mantysy i następuje przez jej zaokrąglenie do najbliższej wielokrotności kroku Q.

Błąd względny zaokrąglania wyniku x dla elementarnych operacji zmiennoprzecinkowych jest określany jako

$$\varepsilon=\frac{[x]_Q-x}{x}=\frac{\hat{x}-x}{x}. \tag{8}$$

Ponieważ $\hat{x}=x+x\varepsilon=x(1+\varepsilon)$, więc błąd ε ma charakter *multiplikatywny* a nie addytywny jak w przypadku kwantyzatora stałoprzecinkowego (funkcjonującego tak samo jak kwantyzator przetwornika A/C z pkt. 3.1). W pracy [7] podano szczegółowe wyprowadzenie wzorów analitycznych na wariancje błędu dla podstawowych operacji zmiennoprzecinkowych. Wykazano, że dla operacji mnożenia i dodawania wariancja błędu wynosi

$$\sigma_\varepsilon^2\cong 0{,}18\cdot 2^{-2b}. \tag{9}$$

Tak więc dla $b=24$ (standard IEEE 754 według normy IEC 1131-3 dotyczącej oprogramowania urządzeń mikroprocesorowych, zastosowany w PPS-10) wyniesie ona $\sigma_\varepsilon^2\cong 6{,}4\cdot 10^{-16}$.

4.2. Linearyzacja charakterystyki przetwarzania

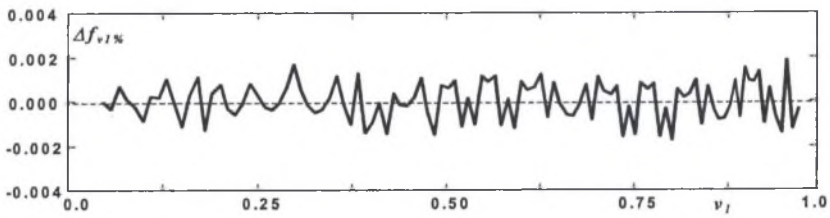
Ze względu na budowę czujników termoelektrycznych (rezystancyjnych) i termoelementów ich charakterystyka termometryczna, tzn. zależność rezystancji R bądź siły termoelektrycznej E od temperatury, jest nieliniowa. Tablice definiujące te charakterystyki są określone odpowiednimi normami i odniesione do temperatury 0°C. Konieczna jest więc programowa linearyzacja wypadkowej charakterystyki toru przetwarzania.

4.2.1. Funkcja aproksymująca FUNC

W urządzeniu PPS-10 w bloku FUNC (por. rys. 2) wykorzystano interpolację wielomianami 5 rzędu. Dla każdego rodzaju czujnika zdefiniowano dwa zestawy współczynników, rozdzielając cały zakres pomiarowy na dwa podzakresy tak dobrane, aby wypadkowy błąd charakterystyki był jak najmniejszy. Dla przykładu, znormalizowana funkcja dla czujnika Pt 100 (termorezystor) dana jest zależnością

$$f(v_1)=\begin{cases}1{,}546v_1^5-0{,}6496v_1^4-0{,}3577v_1^3+0{,}4288v_1^2+0{,}887v_1-0{,}242, & v_1<0{,}25,\\ 0{,}0263v_1^5-0{,}0348v_1^4+0{,}0734v_1^3+0{,}108v_1^2+0{,}957v_1-0{,}247, & v_1\geq 0{,}25.\end{cases} \tag{10}$$

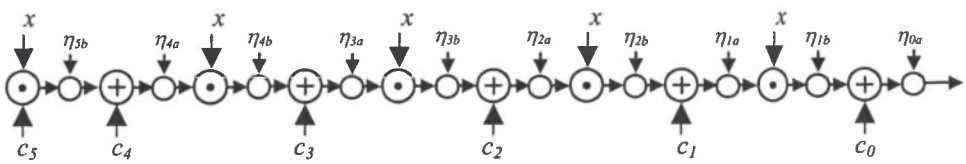
Względny błąd procentowy nie przekracza wtedy ±0,002% zakresu, a jego wykres przedstawiono na rys. 5. Podobnie kształtują się błędy na pozostałych zakresach.



Rys. 5. Względny błąd procentowy dla czujnika Pt100
Fig. 5. Relative percent error for Pt100 sensor

4.2.2. Wariancja błędów obliczeń

Model błędów zaokrągleń zmiennoprzecinkowych przy obliczaniu bloku FUNC (np. funkcji $f(x)$ danej zależnością (10)) metodą Hornera przedstawia rys. 6.



Rys. 6. Model błędów zmiennoprzecinkowych dla bloku FUNC
Fig. 6. Model of FP roundoff errors for FUNC block

Poszczególne błędy cząstkowe, odpowiadające pojedynczym operacjom mnożenia i dodawania, wynoszą (por. (8) i rys. 6)

$$\begin{aligned}
&\eta_{5b} \cong c_5 x \cdot \varepsilon_{5b}, && \eta_{0a} \cong (((((c_5 x + c_4)x + c_3)x + c_2)x + c_{1a})x + c_0) \cdot \varepsilon_{0a}, \\
&\eta_{4a} \cong (c_5 x + c_4) \cdot \varepsilon_{4a}, && \eta_{1b} \cong ((((c_5 x + c_4)x + c_3)x + c_2)x + c_{1a})x \cdot \varepsilon_{1b}, \\
&\eta_{4b} \cong (c_5 x + c_4)x \cdot \varepsilon_{4b}, && \eta_{1a} \cong ((((c_5 x + c_4)x + c_3)x + c_2)x + c_{1a}) \cdot \varepsilon_{1a}, \\
&\eta_{3a} \cong ((c_5 x + c_4)x + c_3) \cdot \varepsilon_{3a}, && \eta_{2b} \cong (((c_5 x + c_4)x + c_3)x + c_2)x \cdot \varepsilon_{2b}, \\
&\eta_{3b} \cong ((c_5 x + c_4)x + c_3)x \cdot \varepsilon_{3b}, && \eta_{2a} \cong (((c_5 x + c_4)x + c_3)x + c_2) \cdot \varepsilon_{2a}.
\end{aligned} \tag{11}$$

Zakładając niezależność poszczególnych szumów $\eta_i = C_i \cdot \varepsilon_i$ względem siebie i sygnału wejściowego, wariancja błędów zaokrągleń zmiennoprzecinkowych przy obliczaniu bloku FUNC wyniesie

$$\sigma_\eta^2 = \sum C_i^2 \sigma_{\varepsilon_i}^2, \tag{12}$$

gdzie $\sigma_\varepsilon^2 = 0{,}18 \cdot 2^{-2b}$ jest wariancją błędu pojedynczej operacji dodawania lub mnożenia (9). Dla $x = 1$ (górna granica zakresu pomiarowego) i współczynników jak dla funkcji (10) wyniesie ona $\sigma_1^2 \cong 1{,}18 \cdot 10^{-14}$ oraz $\sigma_2^2 \cong 0{,}23 \cdot 10^{-14}$ odpowiednio, a więc błąd zaokrągleń w obliczeniach zmiennoprzecinkowych jest znacznie mniejszy niż błąd spowodowany odchyłką aproksymowanej charakterystyki.

4.2.3. Filtr dolnoprzepustowy

Dla zmniejszenia wpływu zewnętrznych zakłóceń i wahań sygnału w torze pomiarowym w PPS-10 zastosowano cyfrowy filtr dolnoprzepustowy odpowiadający transmitancji ciągłej $G(s) = 1/(Ts + 1)$, gdzie T jest stałą czasową filtru. Jego odpowiednik dyskretny w dziedzinie operatora δ (iloraz różnicowy, $\delta = (z - 1)/T_p$, gdzie z oznacza dyskretny operator przesunięcia, a T_p okres próbkowania) ma transmitancję

$$G(\delta) = \frac{1}{T'\delta + 1}, \qquad \text{gdzie} \quad T' = \frac{T_p}{1 - e^{-T_p/T}}. \tag{13}$$

Tłumienie szumu białego przez filtr, tzn. stosunek wariancji szumu wyjściowego do wariancji szumu wejściowego, określa wzór [7, 8]

$$r = \frac{T_p}{2T' - T_p} \tag{14}$$

i dla przyjętego w PPS-10 zakresu zmian stałej czasowej T filtru wynosi $r \in (0{,}0001 \ldots 0{,}1)$.

Wariancję błędu zaokrągleń w obliczeniach zmiennoprzecinkowych przy realizacji transmitancji (13) określa wzór [8]

$$\sigma_e^2 \cong r[r(\tfrac{T'}{T_p})^2 + 2r + 2]\sigma_\varepsilon^2 \sigma_x^2, \tag{15}$$

gdzie $\sigma_\varepsilon^2 \cong 0{,}18 \cdot 2^{-2b}$ oznacza wariancję błędu pojedynczej operacji zmiennoprzecinkowej, a σ_x^2 wariancję szumu na wejściu filtru (np. łącznego szumu od błędów obliczeń z poprzednich

bloków, szumów przetwornika A/C czy innych). Po podstawieniu danych liczbowych otrzymujemy $\sigma_e^2 \cong (0{,}14\ldots3{,}0)\cdot 10^{-16}\cdot\sigma_x^2$, a więc jest ona również do pominięcia.

4.2.4. Kompensacja „zimnych końców" dla termopar

Jak wspomniano wcześniej, charakterystyki termometryczne dla termopar są odniesione do temperatury 0°C. Dla innej temperatury „zimnych końców" siłę termoelektryczną E_t oblicza się według wzoru

$$E_t = E_{0°C} - E_{t_o}, \tag{16}$$

gdzie $E_{0°C}$ oznacza siłę termoelektryczną dla temperatury 0°C (bezpośrednio z tabel), a E_{t_o} siłę termoelektryczną spoin odniesienia w temperaturze t_o.
Odpowiednia korekta wyliczana jest w bloku kompensacji temperatury (por. rys. 2) poprzez pomiar temperatury t_o spoin odniesienia. Charakterystyka czujnika temperatury i pomocniczego przetwornika A/C (10-bitowego) korygowana jest w bloku LINE2, w podobny sposób jak to przedstawiono w pkt. 3.2. Niepewność pomiaru nie przekracza tu ±0,1°C.

5. STOPIEŃ WYJŚCIOWY

5.1. Błędy przetwornika C/A

W stopniu wyjściowym zastosowano 16-bitowy przetwornik C/A (typu sigma-delta) z wbudowanym wyjściem prądowym 4...20 mA, stabilizatorem do zasilania mikroprocesora sterującego oraz źródłami napięcia odniesienia. Producent układu deklaruje całkowity błąd nieliniowości na poziomie ±0.01% zakresu, błąd wzmocnienia ±0,2% (dla 20 mA) i błąd przesunięcia zera ±0,2% (dla 4 mA).

Podczas testowania przetwornika PPS-10 w warunkach przemysłowych okazało się, że dodatkowym źródłem błędów są zakłócenia z innych urządzeń automatyki pracujących w pobliżu. Analiza tych błędów jest jednak trudna ze względu na brak odpowiednich modeli matematycznych a także brak dostępu w trakcie badań do specjalistycznej aparatury pomiarowej. Zmierzony wpływ zakłóceń przemysłowych podczas badań nie przekraczał jednak 0,1% zakresu pomiarowego.

5.2. Adiustacja stopnia wyjściowego

Adiustacja stopnia wyjściowego odbywa się na podobnych zasadach jak dla stopnia wejściowego (opisanych w pkt. 3.2). Przyjęto, że stopień wyjściowy opisywany jest równaniem $I_{wy} = \alpha_3 x_{CA} + \beta_3$, gdzie $I_{wy} \in [4\ldots20]$ mA, α_3, β_3 są odpowiednio współczynnikami wzmocnienia i przesunięcia zera przetwornika C/A. Blok LINE3 (rys. 2) realizuje funkcję $x_{CA} = a_3 v_2 + b_3$. Otrzymujemy zatem

$$I_{wy} = \alpha_3 a_3 \cdot v_2 + \alpha_3 b_3 + \beta_3, \tag{17}$$

więc wartości współczynników wynoszą $a_3 = 16/\alpha_3$, $b_3 = (4-\beta_3)/\alpha_3$.

Procedura adiustacji stopnia wyjściowego przebiega następująco. PPS-10 ustawia wartość $v_2 = 0{,}1$ i zmierzony prąd wyjściowy I_{wy} jest wpisywany do okna w programie. Następnie ustawiana jest wartość $v_2 = 0{,}9$ i prąd wyjściowy wpisywany ponownie do okna. Na tej pod-

stawie obliczane są współczynniki a_3, b_3, tak aby spełniona była następująca zależność (por. rys. 4b w pkt. 3.2)

$$I_{wy} = 16{,}0 \cdot v_2 + 4{,}0 . \tag{18}$$

Ze względu na brak zewnętrznych elementów biernych (rezystorów) w obwodach wyjściowych przetwornika C/A adiustacja stopnia wyjściowego jest znacznie prostsza i dokładniejsza niż stopnia wejściowego.

6. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono analizę błędów wpływających na końcowy wynik przetwarzania w przemysłowym przetworniku PPS-10 z uwzględnieniem poszczególnych bloków urządzenia. Rozpatrzono szumy przetworników A/C i C/A, podano analityczny wzór na wariancję szumu oraz wyniki pomiarów. Zamieszczono również sposób programowej adiustacji stopnia wejściowego i wyjściowego zastosowany w PPS-10.

Czujniki termorezystancyjne i termoelektryczne wymagają programowej linearyzacji charakterystyki przetwarzania. W PPS-10 realizowane jest to za pomocą interpolacji wielomianami stosunkowo niskiego rzędu, tj. piątego. Jak wykazano, względny błąd procentowy odchylenia charakterystyki rzeczywistej od idealnej nie przekracza wtedy ±0,002% zakresu pomiarowego, co jest wartością wystarczająca dla zastosowań przemysłowych.

Kolejnym źródłem niepewności mogą być zaokrąglenia przy wykonywaniu obliczeń z zastosowaniem arytmetyki zmiennoprzecinkowej o skończonej precyzji (4-bajtowej). Jak jednak wykazano w artykule, poziom tych błędów jest co najmniej o kilka rzędów niższy niż pozostałych i w tym przypadku jest do pominięcia.

Przeprowadzone badania i analiza otrzymanych wyników pozwoliły na skorygowanie oprogramowania przetwornika w celu poprawy jego dokładności przetwarzania.

Literatura

1. Programowalny Przetwornik Sygnałów PPS-10. *Dokumentacja Techniczno-Ruchowa.* ZPDA, Ostrów Wielkopolski 2003.
2. Franklin G.F., Powell J.D. and Workman M.L.: *Digital Control of Dynamic Systems.* Addison-Wesley, London 1998.
3. Katz P.: *Digital control using microprocessors.* Prentice-Hall Int., London 1993.
4. Smith, L.M., Bomar, B.W., Joseph, R.D. and Yang, G.C.J.: *Floating-point roundoff noise analysis of second-order state-space digital filter structures. IEEE Trans. on Circuits and Systems II (ADSP)*, **39**, p. 90-97, 1992.
5. Williamson D.: *Digital Control and Implementation.* Prentice-Hall International, Sydney 1991.
6. Świder Z.: *δ- and γ-domain filters for A/D quantization errors.* Archives of Control Sciences, v.**6** (XLII), no. 1-2, p.61-74, 1997.
7. Świder Z.: *Errors of floating-point operations in control algorithms.* Archives of Control Sciences, v.**13** (XLIX), no. 4, p. 506-526, 2003.
8. Świder Z.: *Floating-point roundoff errors in first order filters of digital controllers.* Archives of Control Sciences, v.**6** (XLII), no. 3/4, p. 229-247, 1997.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Brunon Szadkowski

Wpłynęło do Redakcji dnia 7 grudnia 2004

Abstract

The paper describes errors analysis affecting final conversion result of the PPS-10 industrial converter. PPS-10 is an intelligent microprocessor converter with common input for thermocouples and thermoresistor sensors, resistance, voltage and current signals. Its structure is shown in Fig.1 and the conversion process diagram is shown in Fig. 2. Basic technical data, configuration parameters and configuration software are shortly presented in Sec.2. A sequence of input signal processing is also described. Main sources of uncertainty of the PSS-10 are: (1) quantization and nonlinearity errors in A/D and D/A converters; (2) inaccuracy of polynomial approximation of thermosensor (thermocouples and thermoresistor) characteristics; (3) inaccuracy due to scatter of passive element values (resistors, voltage reference sources); (4) errors of numerical calculations resulting from floating point arithmetic with limited precision. These errors are analyzed in succeeding sections.

The A/D conversion process with sampler and quantizer is described in Sec.3. The quantizer characteristic is shown in Fig.3b. The quantization error is described in probabilistic categories with model presented in Fig.3d and its probability density function in Fig. 3e and equation (2). Output error variance of A/D converter is given by equation (3). Laboratory tests showed that measure uncertainty is as low as 0.005% of the scale (±1bit).

Principle of calibration for input block is shown in Fig.4. Adjusting of the converter is done with specialized equipment and PC software using linear equation (5) with two calibration coefficients a_l, b_l. Calibration process of output block is done in a similar way. It is illustrated in Fig. 4b and described in Sec.5, together with D/A converter errors.

Sec.4 covers signal processing block errors including standard floating point number representation (Eq.(7)) and relative error definition (8). Uniform variance for elementary floating-point operations, i.e. quantization, multiplication and addition, based on recent author works is also presented. Due to nonlinear characteristics of thermosensors in PPS-10 a 5th order polynomial is used for its approximation in FUNC block. Relative percent error for Pt100 sensor is presented as an example in Fig. 5. A model of floating point errors for polynomial from Eq.(10) is shown in Fig. 6 with particular partial errors (Eq.(11)) and total error variance (Eq.(12)). Floating-point output error variance for PPS-10 low-pass first-order digital filter with transfer function of Eq.(13) is given by Eq.(15). It is also possible to compensate cold ends temperature of the thermocouples via Eq. (16).

The analysis of various sources of uncertainty suggest that most errors can be ignored. The 5th order polynomial approximation of thermosensors is sufficient for industrial appliances while numerical errors are negligibly small for 4-byte arithmetic. Results of the research has been used to improve converting precision of the PPS-10.