

**Wacław GAWĘDZKI**

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA METROLOGII

## Autokalibracja torów pomiarowych poprzez interpolację funkcji przetwarzania za pomocą liniowych funkcji sklepanych

Dr inż. Wacław GAWĘDZKI

Ukończył studia na kierunku Elektrotechnika w Akademii Górniczo-Hutniczej w roku 1979 uzyskując dyplom w zakresie automatyki i metrologii elektrycznej. Po studiach pracował jako asystent w Zakładzie Metrologii Akademii Górniczo-Hutniczej. W roku 1988 uzyskał stopień doktora nauk technicznych w zakresie elektrotechniki. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z pomiarami wielkości nieelektrycznych oraz właściwościami dynamicznymi aparatury pomiarowej.

e-mail: waga@uci.agh.edu.pl



### Streszczenie

W artykule zaproponowano pewną metodę kalibracji toru pomiarowego wielkości nieelektrycznych poprzez wyznaczanie czułości łącznej. Pokazano sposoby implementacji algorytmów autokalibracji dla różnych rodzajów torów pomiarowych w zależności od typu funkcji przetwarzania czujnika wielkości nieelektrycznych. Rozpatrzono często stosowane czujniki z wyjściem stosunkowym (czujniki zintegrowane, układy mostkowe), w których wielkość mierzona jest przetwarzana na stosunek napięcia wyjściowego czujnika do jego napięcia zasilania. Uwzględniono przy tym przypadki liniowej i nieliniowej funkcji przetwarzania toru pomiarowego. Przyjęto interpolację funkcji przetwarzania za pomocą liniowych funkcji sklepanych. Pokazano przykład implementacji algorytmu autokalibracji.

**Słowa kluczowe:** kalibracja, autokalibracja, czujniki, interpolacja.

### Self-calibration of measurement channels by means of linear spline interpolation of conversion function

#### Abstract

In the paper certain method is proposed, concerning calibration of a channel for measurements of non-electrical quantities, by means of total sensitivity evaluation. The implementation ways of self-calibration algorithms are shown, for different types of measurement channels, depending on the type of conversion function of non-electrical quantity sensor. Frequently used sensors with ratio output have been examined (integrated sensors, bridge circuits), in which a measurand is converted to a ratio of sensor output voltage to its supply voltage. The cases of linear and non-linear conversion function of a measurement channel have been taken into consideration. The interpolation of conversion function has been realized with linear spline functions. An example of implementation of self-calibration algorithm is shown.

**Keywords:** calibration, self-calibration, sensors, interpolation.

### 1. Wprowadzenie

W procesie pomiarów bądź monitoringu (przypadek pomiaru długotrwałego) wielkości nieelektrycznych wyznaczane są wartości wielkości fizycznych. Pomiarom mogą podlegać np. stany konstrukcji mechanicznych, parametry klimatyczne, zanieczyszczenie powietrza i wód itp. Ponieważ systemy pomiarowe mogą pracować w warunkach długotrwałego pomiaru i znacznego rozproszenia punktów pomiarowych istotne jest zastosowanie specjalnych procedur autodiagnostyki i analizy stanu technicznego poszczególnych elementów układu pomiarowego oraz metod autokalibracji torów pomiarowych systemu, niezależnie od wykonywanej wstępnie kalibracji toru pomiarowego. Pozwalają one na uniezależnienie wyników pomiarów od ewentualnych zmian parametrów elementów elektronicznych układów pomiarowych spowodowanych niestabilnością czasową i termiczną.

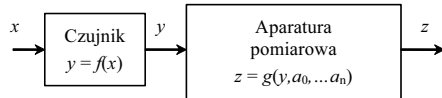
Procedury kalibracji torów pomiarowych wielkości nieelektrycznych dotyczą wyznaczania czułości łącznej toru pomiarowego, na którą składają się: czułość czujnika wielkości nieelektrycznej i czułość części elektronicznej toru pomiarowego. Czułość czujnika najczęściej przyjmuje się na podstawie kalibracji przeprowadzonej przez producenta czujników i załączonej w metryce, bądź określana jest przez użytkownika na etapie montażu lub okresowej kontroli systemu pomiarowego. Wyznacza się ją wtedy w procesie kalibracji poprzez porównanie wskazań badanego czujnika oraz czujnika wzorcowego, lub poprzez pomiar wartości wielkości wyjściowej czujnika dla znanej, wzorcowej wartości wielkości wejściowej. Czułość części elektronicznej toru pomiarowego należy dobrać w taki sposób, aby przy uwzględnieniu czułości czujnika, wartość wyjściowa toru pomiarowego była liczbowo równa wartości wielkości mierzonej. W przypadku stosowania uniwersalnej aparatury pomiarowej przeznaczonej do współpracy z czujnikami wielkości nieelektrycznych dobór jej czułości wymaga określenia: jednostki wielkości fizycznej (np. kg, g, kPa itp.), nominalnej wartości wielkości mierzonej oraz odpowiadającej jej wartości wielkości wyjściowej czujnika, zakresu pomiarowego oraz precyzji reprezentacji wyniku pomiaru (liczba miejsc po przecinku).

Procedury autokalibracji dotyczą najczęściej przypadków realizacji długoterminowych pomiarów (monitoringu) wielkości nieelektrycznych, podczas których może dojść do zmian parametrów elementów elektronicznych układów pomiarowych spowodowanych na przykład niestabilnością czasową i termiczną, a także pozwalają one uniknąć kłopotliwych, wstępnych regulacji elementów torów pomiarowych lub umożliwiają zastosowanie gorszych jakościowo lecz tańszych elementów systemu (np. napięciowe źródła referencyjne) bez pogarszania dokładności i stabilności całości systemu pomiarowego [1]. Procedury autokalibracji przeważnie ograniczone są do części elektronicznej systemów pomiarowych i polegają na bieżącym wyznaczaniu aktualnych wartości parametrów funkcji przetwarzania. Niezbędne jest przy tym zastosowanie kalibrujących elementów referencyjnych (w zależności od rodzaju czujnika np. wzorcowe źródła napięciowe, wzorcowe rezystancje, dzielniki napięcia, itp.); dwóch dla liniowej funkcji przetwarzania, lub większej ich liczby dla funkcji nieliniowej [1, 2]. W zdecydowanej większości przypadków procedury autokalibracji nie obejmują czujników, gdyż wymagałoby to kłopotliwego i często trudnego do realizacji stosowania wzorców mierzonych wielkości nieelektrycznych o znanych wartościach.

W torach pomiarowych wielkości nieelektrycznych często stosowane są czujniki z wyjściem napięciowym, zintegrowane czujniki z wyjściem stosunkowym (ratiometric output sensor) oraz czujniki z wyjściem stosunkowym o silnym tłumieniu (układy mostkowe) [1]. W czujnikach tych wielkość mierzona jest przetwarzana na stosunek napięcia wyjściowego czujnika do jego napięcia zasilania. Wyznaczanie wielkości mierzonej na podstawie pomiaru stosunku napięć pozwala na skuteczne zaimplementowanie algorytmu autokalibracji.

### 2. Kalibracja torów pomiarowych

Rozpatrzmy proces kalibracji toru pomiarowego wielkości nieelektrycznych – rys. 1, którego funkcję przetwarzania możemy przedstawić jako złożenie funkcji przetwarzania czujnika wielkości nieelektrycznej  $f$  i części elektronicznej toru pomiarowego  $g$  [2].



Rys. 1. Schemat toru pomiarowego  
Fig. 1. Measurement channel diagram

Dla ogólnego przypadku nieliniowych funkcji  $f$  oraz  $g$  zachodzi:

$$y = f(x), \quad (1)$$

$$z = g(y, a_0, a_1, \dots, a_n). \quad (2)$$

gdzie:  $a_0, a_1, \dots, a_n$  – parametry toru przetwarzania aparatury pomiarowej, niezależne od wielkości mierzonej  $x$ , które mogą zmieniać się z czasem, temperaturą, bądź innymi czynnikami wpływającymi.

Podstawiając (1) w (2) mamy:

$$z = g(f(x), a_0, a_1, \dots, a_n). \quad (3)$$

Wyznamy czułość toru pomiarowego:

$$S = \frac{dz}{dx} = \frac{\partial z}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dx} + \sum_{i=0}^n \frac{\partial z}{\partial a_i} \cdot \frac{da_i}{dx}, \quad (4)$$

a przy spełnieniu założenia, iż  $a_i$  są niezależne od  $x$  i przyjmując, że czułości aparatury  $S_A$  oraz czujnika  $S_{CZ}$  wynoszą odpowiednio:

$$S_A(y) = \frac{dz}{dy} \quad i \quad S_{CZ}(x) = \frac{dy}{dx}, \quad (5)$$

mamy ostatecznie:

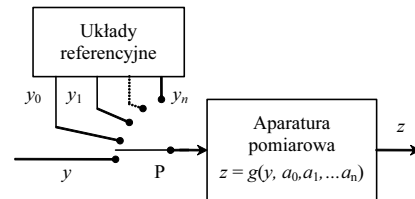
$$S = g'(y) \cdot f'(x) = S_{CZ}(x) \cdot S_A(y, a_0, a_1, \dots, a_n). \quad (6)$$

Wypadkowa łączna czułość toru pomiarowego jest iloczynem czułości składowych elementów toru. W przypadku, gdy struktura toru będzie zawierała więcej elementów składowych przetwarzania, czułość łączna będzie iloczynem czułości wszystkich elementów składowych toru (wynika to z zasady różniczkowania funkcji złożonej). Takie podejście umożliwia kształtowanie czułości całkowitej toru przez dobór indywidualnych czułości poszczególnych elementów toru.

W przypadku, gdy funkcja przetwarzania czujnika (1) ma charakter nieliniowy, można linearyzować charakterystykę łączną toru poprzez dobór funkcji  $g$  przetwarzania aparatury jako funkcji odwrotnej względem funkcji  $f$  przetwarzania czujnika (3). Wniosek ten obrazuje znana z literatury metoda bezpośredniej linearyzacji przetworników [4]. Produkowane obecnie i stosowane w systemach pomiarowych czujniki wielkości nieelektrycznych charakteryzują się dobrze zlinearyzowanymi oraz stabilnymi czasowo i temperaturowo funkcjami przetwarzania. Spełnienie nominalnych warunków stosowania czujników gwarantuje zachowanie dokładności oraz stabilności jego parametrów. Występująca ewentualnie nieliniowość charakterystyki przetwarzania jest dobrze rozpoznana, bądź wręcz określona przez producenta i dzięki temu może być łatwo korygowana w mikroprocesorowych systemach pomiarowych (np. korekcja cyfrowa charakterystyk termorezystorów, termoelementów itp.).

Na rys. 2. przedstawiono schemat układu do kalibracji i autokalibracji części elektronicznej toru pomiarowego. Pozycja „y” przełącznika P oznacza funkcję pomiaru nieznaną wielkość nieelektryczną  $x$  (rys.1 i 2). W procesie kalibracji toru pomiarowego pozycje  $y_0$  do  $y_n$  oznaczają reakcję czujnika na  $n$  wzorcowych wartości wielkości nieelektrycznej  $x_0$  do  $x_n$ , a funkcja przetwarzania  $g$  (2) jest ustalana w taki sposób, aby odpowiednie wartości wyjściowe toru  $z_0$  do  $z_n$  były im liczbowo równe. Wyniki

pomiarów pomiędzy punktami kalibracyjnymi wyznacza się najczęściej stosując (w zależności od liczby punktów kalibracyjnych) interpolację liniową, przedziałami liniową lub wielomianową, a w przypadku znajomości analitycznej postaci funkcji przetwarzania jej odwrotność.



Rys. 2. Schemat układu kalibracji i autokalibracji toru pomiarowego  
Fig. 2. Schematic diagram of a measurement channel calibration and self-calibration

W przypadku pomiarów długoterminowych (starzenie elementów) lub w przypadku oddziaływania wielkości zakłócających (np. wpływ temperatury) istnieje potrzeba zastosowania bieżącej procedury autokalibracji, szczególnie w odniesieniu do wstępnej, analogowej części aparatury pomiarowej. W procesie tym wyznaczone są aktualne wartości parametrów funkcji przetwarzania aparatury pomiarowej części toru pomiarowego. Wykorzystuje się w tym celu układy referencyjne  $y_0$  do  $y_n$  (w zależności od rodzaju wielkości wyjściowej czujnika np. napięciowe źródło referencyjne, wzorcowe rezystancje, dzielniki napięcia, itp.), które zastępują sygnał wyjściowy z czujnika [1, 2, 3].

### 3. Kalibracja i autokalibracja dla liniowej funkcji przetwarzania

Rozpatrzmy najczęstszy w praktyce przypadek kalibracji toru pomiarowego, gdy charakterystyki przetwarzania czujnika i aparatury pomiarowej można przyjąć za liniowe. Określenie postaci funkcji przetwarzania toru sprowadza się wówczas do tzw. kalibracji 2 punktowej. Czułość czujnika jest znana (określona przez producenta lub wyznaczona w procesie kalibracji za pomocą wzorcowej wartości wielkości nieelektrycznej), a kalibracja toru polega na takim określeniu parametrów aparatury pomiarowej, aby jej wskazania były liczbowo równe wartości mierzonej przy zdefiniowanej uprzednio jednostce, w jakiej ma ona być wyrażana. Czułość toru pomiarowego (6) przy założeniu liniowości funkcji przetwarzania (1) i (2) możemy wyrazić w postaci:

$$S = \frac{z}{x} = S_{CZ} \cdot S_A, \quad (7)$$

gdzie czułość czujnika jest znana i wynosi:

$$S_{CZ} = \frac{y}{x}, \quad (8)$$

a czułość aparatury pomiarowej można wyrazić w postaci:

$$S_A = M_{skal} \cdot \frac{z_{skal}}{y_{skal}}, \quad (9)$$

gdzie dostępne do nastawy w aparaturze wielkości oznaczają:

- $M_{skal}$  – mnożnik skali (określa ilość miejsc wyniku po przecinku),
- $z_{skal}$  – wartość nominalna wielkości mierzonej,
- $y_{skal}$  – nominalna wartość wielkości wyjściowej czujnika (wejściowej aparatury).

Po uwzględnieniu (8) i (9) w (7) otrzymujemy:

$$S = S_{CZ} \cdot M_{skal} \cdot \frac{z_{skal}}{y_{skal}} \quad (10)$$

przy czym równocześnie iloczyn  $M_{skal} \cdot z_{skal}$  określa zakres pomiarowy wielkości mierzonej. Następnie wykorzystując znaną wartość czułości czujnika oraz zależność (10) dobieramy wartości nastaw aparatury:  $M_{skal}, z_{skal}$  i  $y_{skal}$  tak, aby:

- czułość całkowita  $S=1$ , wówczas miernik pokazuje wartość liczbowo równą wielkości mierzonej,
- wartość iloczynu  $M_{skal} z_{skal}$  (będąca zakresem pomiarowym), odpowiadała przyjętemu zakresowi wielkości mierzonych.

Ten sposób kalibracji toru pomiarowego umożliwia skuteczną realizację nastaw na przykład w rodzinie wzmacniaczy pomiarowych do współpracy z czujnikami tensometrycznymi (siły, masy, ciśnienia itp.), indukcyjnościowymi i LVDT firmy HBM.

Zastosowanie w tym układzie 2 punktowej metody autokalibracji sprowadza się do zadania dwóch wielkości referencyjnych (rys. 2)  $y_0=0$  oraz  $y_1=y_{skal}$ , dzięki czemu wyznacza się aktualną wartość offsetu oraz wzmocnienia aparatury.

#### 4. Algorytm autokalibracji toru metodą przedziałami liniowej interpolacji funkcji przetwarzania

Rozpatrzmy przypadek kalibracji toru pomiarowego, gdy charakterystyki przetwarzania czujnika i aparatury pomiarowej mogą być nieliniowe. Określenie postaci funkcji przetwarzania toru sprowadza się wówczas do kalibracji wielopunktowej, przy czym liczba punktów kalibracyjnych  $y_0$  do  $y_n$  musi być co najmniej równa liczbie parametrów funkcji przetwarzania. Czułość czujnika jest znana (określona przez producenta lub wyznaczona w procesie kalibracji za pomocą wzorcowych wartości wielkości nieelektrycznej) i dana w postaci tablicy lub analitycznej, a kalibracja toru polega na takim określeniu parametrów aparatury pomiarowej, aby jej wskazania były liczbowo równe wartości mierzonej. Czułość toru jest wówczas ustalana przez dobór wartości parametrów  $a_0, a_1, \dots, a_n$  funkcji przetwarzania aparatury pomiarowej. Nieliniową funkcję przetwarzania aparatury pomiarowej można interpolować w różny sposób, najczęściej stosując interpolację funkcjami: przedziałami liniową bądź wielomianową. W publikacji [2] omówiono sposób funkcjonowania algorytmu autokalibracji poprzez zastosowanie wielomianowej interpolacji funkcji przetwarzania. Tutaj zaprezentowany jest algorytm autokalibracji z przedziałami liniową metodą interpolacji. Obydwa typy rozwiązania stosowane są w profesjonalnej aparaturze pomiarowej, nie mają one jednak zaimplementowanych algorytmów autokalibracji i w efekcie parametry funkcji interpolującej nie są automatycznie aktualizowane. Zastosowanie procedury autokalibracji pozwoli na bieżące wyznaczanie aktualnych wartości parametrów funkcji przetwarzania aparatury pomiarowej.

Załóżmy dla uproszczenia, że charakterystyka przetwarzania czujnika jest liniowa i znana, natomiast rozpatrzmy przypadek nieliniowej charakterystyki aparatury z możliwością zmian parametrów jej funkcji przetwarzania w czasie pomiaru długotrwałego lub na skutek oddziaływania zakłóceń (np. temperatura).

Przedstawmy interpolację funkcji przetwarzania aparatury pomiarowej za pomocą funkcji sklejanych I rzędu (tzw. funkcje przedziałami liniowe) w przedziale domkniętym  $\langle \alpha; \beta \rangle$  dla  $(n+1)$  punktów kalibracji  $y_0, y_1, \dots, y_n$ , przy czym [5]:

$$\alpha = y_0 < y_1 < \dots < y_{n-1} < y_n = \beta \quad (11)$$

Punkty  $y_i$  dla  $i = 0, 1, \dots, n$  ( $n \geq 1$ ) określają podział przedziału  $\langle \alpha; \beta \rangle$  na  $n$  podprzedziałów, przy czym zakładając, iż podział ten jest równomierny mamy:

$$y_i = y_0 + i \cdot h \quad h = \frac{\beta - \alpha}{n} \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (12)$$

Przedstawmy przedziałami liniową interpolację  $\varphi(y)$  funkcji przetwarzania aparatury pomiarowej  $g(y; a_0, a_1, \dots, a_n)$  (2):

$$\varphi_1(y) = \frac{z_1 - z_0}{y_1 - y_0} \cdot y + \frac{z_0 y_1 - z_1 y_0}{y_1 - y_0} \quad y \in \langle y_0; y_1 \rangle$$

$$\varphi_2(y) = \frac{z_2 - z_1}{y_2 - y_1} \cdot y + \frac{z_1 y_2 - z_2 y_1}{y_2 - y_1} \quad y \in \langle y_1; y_2 \rangle \quad (13)$$

$$\dots$$

$$\varphi_n(y) = \frac{z_n - z_{n-1}}{y_n - y_{n-1}} \cdot y + \frac{z_{n-1} y_n - z_n y_{n-1}}{y_n - y_{n-1}} \quad y \in \langle y_{n-1}; y_n \rangle$$

a uwzględniając (12) dla  $i$ -tego przedziału funkcję interpolującą  $\varphi_i(y)$  można zapisać w postaci:

$$\varphi_i(y) = \frac{1}{h} \cdot [(z_i - z_{i-1}) \cdot y + (z_{i-1} y_i - z_i y_{i-1})] \quad i = 1, \dots, n \quad (14)$$

Łatwo zauważyć, że w węzłach interpolacyjnych określających  $i$ -ty przedział  $\langle y_{i-1}; y_i \rangle$  wartości funkcji interpolującej wynoszą odpowiednio:

$$\varphi_i(y_{i-1}) = g(y_{i-1}) = z_{i-1} \quad \varphi_i(y_i) = g(y_i) = z_i \quad i = 1, \dots, n \quad (15)$$

Przyjmując oznaczenia:

$$p_i = \frac{1}{h} \cdot (z_i - z_{i-1}) \quad q_i = \frac{1}{h} \cdot (z_{i-1} y_i - z_i y_{i-1}) \quad i = 1, \dots, n \quad (16)$$

otrzymujemy ostateczną zależność dla liniowej funkcji interpolującej w  $i$ -tym przedziale:

$$\varphi_i(y) = p_i \cdot y + q_i \quad i = 1, \dots, n \quad (17)$$

Dla zadanych  $n+1$  wzorcowych wartości  $y_0, y_1, \dots, y_n$  (rys. 2) należy wyznaczyć  $n+1$  odpowiadających im wartości wyjściowych  $z_0, z_1, \dots, z_n$  aparatury (zgodnie z (15)), a następnie należy określić współczynniki  $p_i$  oraz  $q_i$  funkcji interpolującej zgodnie z (16).

Stosowanie interpolacji tego typu jest znane, jednakże istotą proponowanej metody jest bieżąca aktualizacja parametrów  $p$  i  $q$  funkcji interpolującej dzięki zastosowaniu odpowiedniej procedury autokalibracji. Możliwe jest wtedy korygowanie dwóch podstawowych składników błędów (błąd czułości oraz błąd nieliniowości), które mogą się ujawnić w torze pomiarowym, poprzez wyznaczanie aktualnej wartości rzeczywistego nachylenia charakterystyki przetwarzania oraz składników opisujących nieliniowość generowaną (bądź modyfikowaną) przez czynniki zakłócające w torze pomiarowym. Podobny efekt autokalibracji można uzyskać również dla innych funkcji interpolujących, a algorytm oraz przykład dla wielomianowej interpolacji Lagrange'a przedstawiono w [2]. W każdym przypadku autokalibracji poprzez interpolację funkcji przetwarzania niezbędne jest zadawanie referencyjnych wielkości wzorcowych (rys. 2). Dokładność oraz stabilność wielkości referencyjnych będzie decydowała o dokładności i skuteczności procedury autokalibracji.

#### 5. Przykład implementacji algorytmu autokalibracji

Rozpatrzmy przykładowo aparaturę pomiarową zawierającą całkujący przetwornik A/C, którego funkcję przetwarzania zazwyczaj przyjmuje się jako liniową. Nieliniowość jego charakterystyki może wynikać z faktu uwzględnienia rzeczywistych właściwości elementów użytych do jego budowy oraz możliwości zmian wartości ich parametrów [6].

Dla idealnego przetwornika całkującego zachodzi przetwarzanie napięcia mierzonego  $U_x$  na czas  $T_x$  według zależności [6, 7]:

$$T_x = T_{int} \frac{U_x}{U_R} \quad (18)$$

gdzie:  $T_{\text{int}}$  – jest czasem integracji, a  $U_R$  – napięciem referencyjnym przetwornika.

Nawiązując do oznaczeń z rys.1 przyjmijmy, że wielkości wyjściowej aparatury z odpowiada  $T_x/T_{\text{int}}$ , a wielkości wejściowej  $y$  odpowiada  $U_x/U_R$ . Stąd unormowana czułość aparatury dla warunków idealnych wynosi:

$$S_{Ai} = \frac{z}{y} = \frac{T_x}{T_{\text{int}}} \cdot \frac{U_x}{U_R} \quad (19)$$

Przy uwzględnieniu rzeczywistych właściwości kondensatora całkującego (stratność) funkcja przetwarzania napięcia mierzonego  $U_x$  na czas  $T_x$  ma postać [6]:

$$T_x = T_{\text{int}} \frac{1}{k} \ln \left[ 1 + \frac{U_x}{U_R} (1 - e^{-k}) \right], \quad (20)$$

gdzie stała  $k$  zależy od wartości parametrów  $C$  i  $R_C$  kondensatora całkującego oraz czasu integracji  $T_{\text{int}}$ :

$$k = \frac{T_{\text{int}}}{R_C C} \quad (21)$$

Rozwijając kolejno funkcję logarytmu oraz funkcję wykładniczą  $e^{-k}$  w (20) w szereg Taylora otrzymujemy [6]:

$$\frac{T_x}{U_x} = \frac{T_{\text{int}}}{U_R} \cdot \left( 1 - \frac{k}{2!} + \frac{k^2}{3!} - \dots \right) - \frac{1}{2} \cdot k \cdot \frac{T_{\text{int}}}{U_R} \cdot \frac{U_x}{U_R} \cdot \left( 1 - \frac{k}{2!} + \frac{k^2}{3!} - \dots \right)^2 + \frac{1}{3} \cdot k^2 \cdot \frac{T_{\text{int}}}{U_R} \cdot \left( \frac{U_x}{U_R} \right)^2 \cdot \left( 1 - \frac{k}{2!} + \frac{k^2}{3!} - \dots \right)^3 - \dots \quad (22)$$

a uwzględniając (18) i (19) unormowaną rzeczywistą czułość aparatury możemy wyrazić w postaci:

$$S_A \left( \frac{U_x}{U_R} \right) = \frac{T_x}{U_x} = \frac{T_{\text{int}}}{U_R} \cdot \left( 1 - \frac{k}{2!} + \frac{k^2}{3!} - \dots \right) - \frac{1}{2} \cdot k \cdot \frac{U_x}{U_R} \cdot \left( 1 - \frac{k}{2!} + \frac{k^2}{3!} - \dots \right)^2 + \frac{1}{3} \cdot k^2 \cdot \left( \frac{U_x}{U_R} \right)^2 \cdot \left( 1 - \frac{k}{2!} + \frac{k^2}{3!} - \dots \right)^3 - \dots \quad (23)$$

Jeżeli  $R_C \rightarrow +\infty$  to zgodnie z (21)  $k \rightarrow 0$  i  $S_A \rightarrow S_{Ai}$  (19). Dla skończonej wartości  $R_C$  kondensatora funkcja przetwarzania aparatury jest opisana zależnością (23) i ma postać funkcji nieliniowej względem  $U_x$ , gdzie pierwszy składnik wyrażenia opisuje rzeczywiste nachylenie charakterystyki przetwarzania (porównaj z (19)), a pozostałe składniki opisują nieliniowość generowaną w przetworniku przez nieidealną pojemność. Błąd czułości można skorygować poprzez zastosowanie kalibracji  $(n+1)$  – punktowej, zadając  $(n+1)$  znanych, wzorcowych wartości napięcia  $U_1$  do  $U_{n+1}$  oraz interpolując charakterystykę przetwarzania przetwornika funkcjami liniowymi w  $n$  przedziałach zgodnie z (17) (przyjęcie w tym przykładzie interpolacji za pomocą funkcji przedziałami liniowych nie wyklucza zastosowania innych funkcji interpolujących, np. wielomianu stopnia  $n$  – w tym celu należy zastosować algorytm opisany w [2]).

Przedziałami liniowa funkcja interpolująca  $\varphi(U_x/U_R)$ , przy uwzględnieniu (16) i (17) oraz przy przyjęciu definicji wejścia  $y$  i wyjścia  $z$  (rys.1) aparatury pomiarowej

$$y = \frac{U_x}{U_R} \quad z = \frac{T_x}{T_{\text{int}}} = S_A \left( \frac{U_x}{U_R} \right) \cdot \frac{U_x}{U_R} \quad (24)$$

będzie wyrażona w  $i$ -tym przedziale zależnością:

$$\varphi_i \left( \frac{U_x}{U_R} \right) = p_i \cdot \frac{U_x}{U_R} + q_i \quad i = 1, \dots, n \quad (25)$$

$$p_i = \frac{1}{h} \cdot \left( S_A \left( \frac{U_i}{U_R} \right) \cdot \frac{U_i}{U_R} - S_A \left( \frac{U_{i-1}}{U_R} \right) \cdot \frac{U_{i-1}}{U_R} \right) \quad (26)$$

$$q_i = \frac{1}{h} \cdot \left( S_A \left( \frac{U_{i-1}}{U_R} \right) \cdot \frac{U_{i-1}}{U_R} \cdot \frac{U_i}{U_R} - S_A \left( \frac{U_i}{U_R} \right) \cdot \frac{U_i}{U_R} \cdot \frac{U_{i-1}}{U_R} \right) \quad i = 1, \dots, n$$

gdzie:  $U_i$  i  $U_{i-1}$  oznaczają wartości napięć wzorcowych (rys. 2) stosowanych w procesie autokalibracji, które równocześnie wyznaczają węzły interpolacji.

## 6. Eksperyment symulacyjny

Dla układu całkującego przetwornika A/C, którego działanie dla rzeczywistych warunków pracy zamodelowano równaniami (18) – (23), przeprowadzono badania symulacyjne umożliwiające zaimplementowanie procedury autokalibracji dla przedziałami liniowych funkcji interpolujących (24) – (26). Celem eksperymentu było zaprezentowanie i porównanie skutków zastosowania procedury autokalibracji dla różnej liczby  $n$  przedziałów interpolacji, w szczególności pokazanie pozytywnych skutków zastosowania więcej niż jednego przedziału interpolacji. Nie komplikuje to specjalnie układu elektronicznego przetwornika, zwiększa tylko liczbę napięć wzorcowych i liczbę niezbędnych pomiarów w procesie auto – kalibracji.

Symulację przeprowadzono w środowisku Matlab & Simulink dla następujących (wynikających z praktycznej realizacji przetwornika) wartości parametrów modelu przetwornika [6]:

$$\begin{aligned} R_C &= 10^8 \Omega \\ C &= 150 \text{ nF} \\ T_{\text{int}} &= 40 \text{ ms} \end{aligned}$$

Podczas eksperymentu ograniczono się do uwzględnienia wpływu zmiany upływności kondensatora całkującego (spadek rezystancji  $R_C$  od wartości idealnej  $R_C \rightarrow +\infty$  do wartości skończonej) i pokazania efektów zastosowania procedury auto – kalibracji w procesie eliminacji błędów spowodowanych upływnością. Błąd interpolacji charakterystyki przetwornika zdefiniowano następująco:

$$\Delta = S_A \left( \frac{U_x}{U_R} \right) \cdot \frac{U_x}{U_R} - \varphi \left( \frac{U_x}{U_R} \right) \quad (27)$$

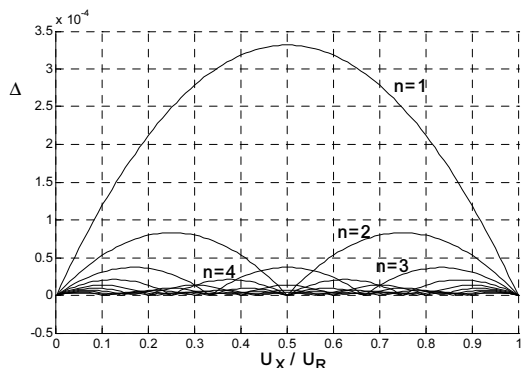
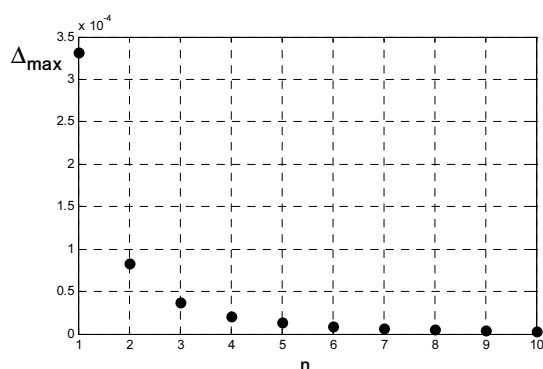
Na rys.3 przedstawiono przebiegi błędu  $\Delta$  w funkcji względnej wartości napięcia mierzonego  $U_x$  odniesionego do napięcia referencyjnego przetwornika  $U_R$  dla różnej liczby  $n$  przedziałów interpolacji. W symulacji przyjęto stałą wartość szerokości przedziałów interpolacji  $h$  określanej na podstawie (11) i (12) przy uwzględnieniu unormowania wielkości  $y$  i  $z$  (24), tzn. zachodzi wówczas:

$$\alpha = 0, \quad \beta = 1, \quad h = \frac{1}{n} \quad n = 1, 2, \dots \quad (28)$$

Kryterium jakości interpolacji charakterystyk przetwarzania przyjęto w postaci:

$$\Delta_{\text{max}} = \max |\Delta|. \quad (29)$$

Na podstawie przedstawionych wykresów można dobrać optymalną liczbę przedziałów  $n$ , dla której zastosowana procedura autokalibracji zapewni osiągnięcie błędu pomiaru nie większego niż założony błąd maksymalny  $\Delta_{\text{max}}$ .

Rys. 3. Przebiegi błędu  $\Delta$  zgodnie z (27)Fig. 3. Dependence of the error  $\Delta$  according to (27)Rys. 4. Przebieg błędu maksymalnego  $\Delta_{\max}$  zgodnie z (29)Fig. 4. Dependence of the limit error  $\Delta_{\max}$  (29) on the number of calibration points

## 7. Podsumowanie

Na etapie produkcji aparatury można dobrać elementy elektroniczne w taki sposób, aby wyeliminować błędy nieliniowości, jednakże w trakcie jej eksploatacji, szczególnie w cyklu długoterminowym i przy istotnym wpływie wielkości zakłócających,

należy się liczyć z możliwością zmian parametrów funkcji przetwarzania i pojawieniem się błędów nieliniowości. Stąd zastosowanie wielopunktowej autokalibracji, zgodnie z rys. 2, umożliwi wykrywanie i automatyczne korygowanie błędów tego typu.

Rozważmy jeszcze przypadek często stosowanych czujników z wyjściem stosunkowym, w których wielkość nieelektryczna jest przetwarzana na stosunek napięcia wyjściowego do zasilającego. Procedura wyznaczania wielkości nieelektrycznej  $x$  wymaga wówczas przeprowadzenia dwóch pomiarów: napięcia wyjściowego i zasilającego czujnik oraz wyznaczenia ich stosunku. W takim przypadku wyeliminowany zostanie błąd nachylenia charakterystyki przetwarzania (obydwa napięcia są mierzone z tym samym błędem), ale nie skompensowana zostanie składowa błędu nieliniowości (zależna od wartości mierzonych napięć – (22)). Zastosowanie procedury autokalibracji wyeliminuje obydwie składowe błędy.

## 8. Literatura

- [1] W. Gawędzki: Self-Calibration Methods in Measurement Channels for Linear and Non-Linear Conversion Functions Case. IEEE IMTC 2006 – Sorrento, Italy 2006.
- [2] Gawędzki W., Algorytm autokalibracji torów pomiarowych poprzez wielomianową interpolację funkcji przetwarzania. Pomiary, Automatyka. Kontrola nr 10Bis, str. 196-199 2006.
- [3] Voltage Measurement Accuracy, Self-Calibration, and Ratiometric Measurements. Campbell Scientific, 2001 Inc. Logan, Utah (<http://www.campbellsci.ca/CampbellScientific/Download/VoltAccy.pdf>).
- [4] K. Badźmirowski, H. Karkowska, Z. Karkowski: Cyfrowe Systemy pomiarowe; WNT Warszawa 1979.
- [5] Z. Fortuna, B. Macukow, J. Wąskowski, Metody numeryczne; WNT Warszawa 2001.
- [6] W. Gawędzki, J. Jurkiewicz: Self-Diagnostics of Double-Integration A/D Converter Accuracy Related to Integrating Capacitor Leakage. Materiały VI Międzynarodowego Sympozjum Metrologów MSM'98 Rzeszów 1998.
- [7] Z. Kulka, A. Libura, M. Nadachowski: Przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe. WKiŁ Warszawa 1987.

Artykuł recenzowany

## INFORMACJE

### Studia Podyplomowe

Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej w Gliwicach, Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki ogłasza nabór na Dwusemestralne Zaoczne Studia Podyplomowe

### Organizacja i Akredytacja Laboratoriów

Studia prowadzone są na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach, w systemie zaocznym w każdą sobotę lub w co drugi weekend (do wyboru) przez dwa semestry. Zajęcia prowadzone są przez nauczycieli akademickich ze stopniem co najmniej doktora oraz przez zaproszonych Gości o uznanym dorobku i autorytecie. Studia obejmują 200 godzin dydaktycznych. Rozpoczęcie Studiów nastąpi po skompletowaniu odpowiedniej liczby kandydatów na dany rodzaj studiów.

#### Organizator studiów:

Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej, 44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, tel. 032 237 12 41, fax: 032 237 20 34, e-mail: [re2@polsl.pl](mailto:re2@polsl.pl) lub [agnieszka.skorkowska@polsl.pl](mailto:agnieszka.skorkowska@polsl.pl), <http://imeia.elekt.polsl.pl>

#### Kierownik studiów:

Prof. dr hab. inż. Tadeusz SKUBIS