

**Janusz ŻELEZIK**

POLITECHNIKA ŚLĄSKA – INSTYTUT AUTOMATYKI

## Dwustopniowa procedura kompensacji błędów temperaturowych czujników ciśnienia z wykorzystaniem procesora MAX1452

Dr inż. Janusz ŻELEZIK

Jest adiunktem Zakładu Systemów Pomiarowych w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Jego zainteresowania naukowe i dydaktyczne związane są z szeroko pojętym miernictwem przemysłowym i komputerowymi systemami pomiarowymi. Wiele wykonanych prac i publikacji dotyczy pomiarów ciśnienia i budowy systemów pomiarowych do automatycznej kalibracji i kompensacji przetworników pomiarowych.



e-mail: janusz.zelezik@polsl.pl

### Streszczenie

MAX1452 jest analogowym procesorem do kondycjonowania sygnału z czujników piezorezystancyjnych w tym do kompensacji temperatury. Służą temu celowi 4 przetworniki cyfrowo-analogowe sterowane cyfrowo, które korygują czułość i zero w funkcji temperatury. W sytuacji, gdy błędy temperaturowe są początkowo duże i nieliniowe, to najlepsze rezultaty daje stosowanie dwuetapowej procedury doświadczalnej kompensacji: najpierw kompensacja składowych quasiliniowych błędów, a dalsza poprawa za pomocą tzw. kompensacji schodkowej. Ze względu na szumy pomiarowe celem jest, aby eksperyment do identyfikacji potrzebnych modeli obejmował pewien nadmiar pomiarów w stosunku do liczby wyznaczanych współczynników. W artykule pokazano przykładowe wyniki kompensacji temperaturowej czujnika ciśnienia o zakresie 100 kPa.

**Słowa kluczowe:** czujniki ciśnienia, kondycjonowanie sygnałów, kompensacja temperaturowa, kalibracja.

### Two-stage procedure of the temperature compensation for the pressure sensors with using the processor MAX1452

#### Abstract

MAX1452 is an analog processor for conditioning of the piezoresistive sensor signal and for the temperature compensation. To this purpose applied four digitally controlled analog to digital converters DAC, which sensitivity and offset are correcting as the function of the temperature. In the situation, when temperature errors are at first big and non-linear therefore applying the two-stage experimental procedure is giving the best results of compensation: in the first stage compensation for linear components of errors, but the more further improvement behind the help of the multislope compensation. On account of measuring noises it is intentional so that identification experiment of the models needed for the compensation contains certain excess of measurements in relation to the number calculated coefficients. In the article results of the temperature compensation were shown for the pressure sensor with the span of 100 kPa.

**Keywords:** pressure sensors, signal conditioning, calibration, temperature compensation.

### 1. Wstęp

W większości produkowanych przetworników ciśnienia wykorzystywane są czujniki piezorezystancyjne. Dla zapewnienia wysokich dokładności pomiaru ważne jest właściwe kondycjonowanie sygnału pomiarowego z czujnika ciśnienia, a w tym kompensacja dodatkowych błędów temperaturowych. W klasycznych przetwornikach ciśnienia kompensację

realizowano za pomocą dobieranych, dodatkowych elementów analogowych [3], np. rezystorów stałych, termistorów itp.

Obecnie można wyróżnić dwie podstawowe koncepcje budowy bloków pomiarowych przetworników inteligentnych, odnoszące się do sposobu przetwarzania sygnałów pomiarowych z czujników. Pierwsza polega na tym, że przetwarzanie sygnałów jest zrealizowane na drodze analogowej, jednak współczynniki przetwarzania toru analogowego są sterowane cyfrowo. W szczególności układ mikroprocesorowy steruje w funkcji temperatury wzmocnieniem i przesunięciem zera w torze analogowym, przez co uzyskuje się odpowiednio kompensację temperaturowego błędu zera i zakresu.

Według drugiej koncepcji przetwarzanie w torze analogowym jest ograniczone do minimum. Sygnały z czujników – jedynie wzmocnione do wymaganego poziomu i odpowiednio odfiltrowane – są bezpośrednio próbkowane i przetwarzane na postać cyfrową (A/C). Dalsza obróbka sygnału – a w tym kompensacja błędów – odbywa się na drodze cyfrowej w układzie mikroprocesorowym.

Ze względu na rozrzut technologiczny parametrów samych sensorów ciśnienia, kompensacja musi być wykonana doświadczalnie i indywidualnie dla każdego czujnika. W przetwornikach klasycznych należało dobrać odpowiednie elementy elektroniczne, które następnie musiały być fizycznie zrealizowane w układzie pomiarowym. Natomiast w rozwiązaniach z procesorami trzeba na podstawie zaplanowanego eksperymentu wyznaczyć współczynniki odpowiednich modeli przetwarzania, zaś sama realizacja polega na wpisaniu tych współczynników do pamięci EEPROM przetwornika. Korzyścią jest zwiększenie dokładności przetworników, ale również możliwość pełnej automatyzacji całej procedury kompensacji, kalibracji oraz sprawdzania na jednym stanowisku testującym i to jednocześnie dla pewnej partii przetworników.

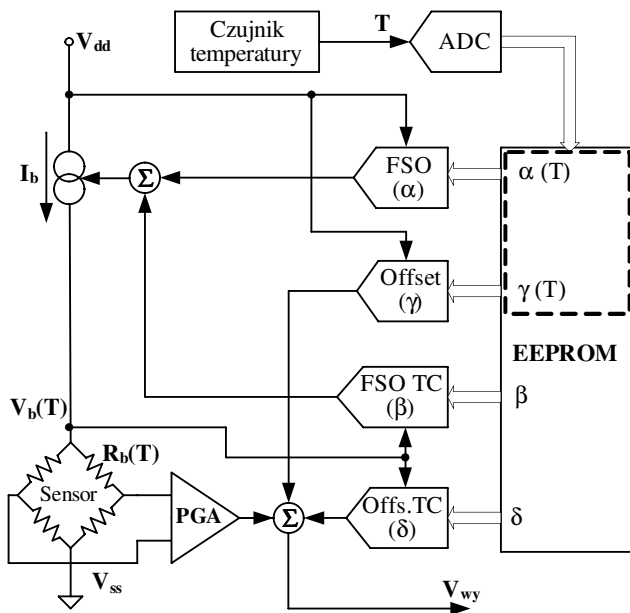
Przykładem procesora analogowego jest MAX1452 firmy Maxim-Dallas. Artykuł jest poświęcony wyborowi właściwej procedury kompensacji, która musi być kompromisem między możliwą do osiągnięcia wysoką dokładnością, a kosztem pomiarów wymaganych do kompensacji.

### 2. MAX1452 i dwie metody kompensacji

MAX1452 jest wysoko zintegrowanym procesorem, zoptymalizowanym dla kondycjonowania sygnałów z piezorezystancyjnych czujników ciśnienia. Układ zapewnia:

- prądowe zasilanie czujnika;
- korektę napięcia niezrównoważeni (Offset);
- wzmocnienie sygnału i dostrojenie zakresu wyjściowego (FSO);
- kompensację temperaturowych błędów zera i czułości.

Na rys. 1 pokazano schematycznie, jak realizowana jest kompensacja błędów dodatkowych. Korektę temperaturowego błędu zakresu (czułości) uzyskuje się przez dostrajanie prądu zasilania mostka czujnika w funkcji temperatury, zaś kompensację błędu temperaturowego zera poprzez przesuwanie zera wzmacniacza programowanego PGA. Sygnały analogowe do korekcji są wypracowywane w dwóch parach 16-bitowych przetworników cyfrowo-analogowych (DAC), których wejścia cyfrowe są sterowane przez odpowiednie współczynniki, wyznaczone w ramach procedury kompensacyjnej i pamiętane w wewnętrznym EEPROM-ie procesora.



Rys. 1. Uproszczony schemat funkcjonalny procesora MAX1452 do kompensacji temperaturowej czujników piezorezystancyjnych  
Fig. 1. Basic functional diagram of the MAX1452 processor for temperature compensation of piezoresistive sensors

Są dwie możliwości otrzymania sygnału kompensującego zależnego od temperatury na wyjściu przetwornika DAC:

- napięcie referencyjne jest funkcją temperatury (bloki oznaczone FSO\_TC i Offs.TC). W omawianym procesorze napięcie to pochodzi z przekątnej zasilania mostka  $V_b$  - ponieważ czujnik jest zasilany prądowo, a rezystancja mostka rośnie z temperaturą. Doświadczalnie dobrane, stałe współczynniki  $\beta$  oraz  $\delta$ , podane jako wejścia cyfrowe DAC pozwalają uzyskać odpowiednie - proporcjonalne do napięcia referencyjnego  $V_b$  (a nie do temperatury) - sygnały kompensujące czułość i zero. Stąd nazwa kompensacji quasilineowej. Muszą być oczywiście dobrane także stałe współczynniki  $\alpha$  i  $\gamma$  w pozostałych dwóch blokach DAC, które w tym przypadku generują sygnały stałe.
- napięcie referencyjne jest stałe ( $V_{dd}$ ), natomiast wejścia cyfrowe zmieniają się z temperaturą (DAC oznaczone FSO i Offset). W procesorze MAX1452 sygnał z wewnętrznego czujnika temperatury - skwantowany w 8 bitowym przetworniku ADC - steruje wyborem odpowiednich współczynników  $\alpha(T)$  i  $\gamma(T)$ , wcześniej dobranych i zapisanych w EEPROM-ie. Wypracowane sygnały kompensujące są w tym przypadku schodkowymi funkcjami temperatury, stąd nazwa - kompensacja schodkowa.

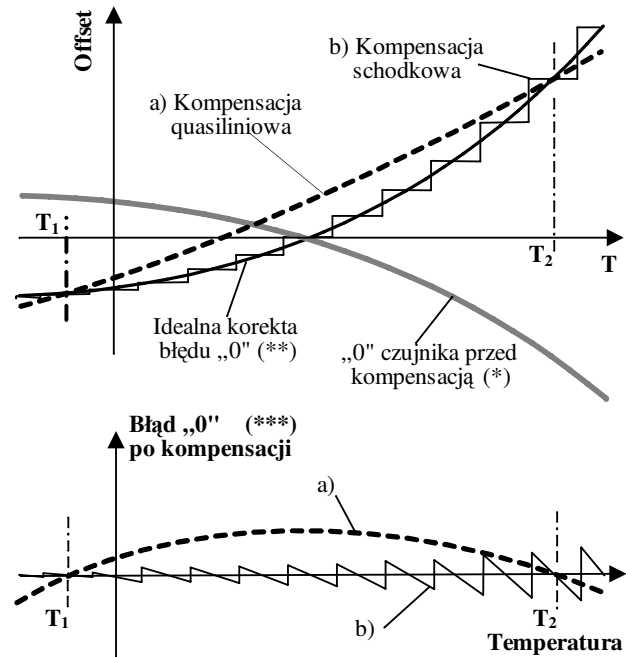
Na rys. 2 zilustrowano obie metody kompensacji w odniesieniu do składowej błędu zera, dla zakresu jest podobnie.

Grubą, szarą linią zaznaczono błąd „0” czujnika przed kompensacją. Symetryczna względem osi X linia ciągła pokazuje pożądaną korekcję. Przy kompensacji quasilineowej sygnał kompensacyjny proporcjonalny do  $V_b$  dopasowuje się w dwóch temperaturach  $T_1$  i  $T_2$ , dobierając stałe współczynniki  $\gamma$  i  $\delta$ . Ze względu na dużą nieliniowość błędu zera od temperatury i to różną od nieliniowości  $V_b$  w rezultacie takiej kompensacji pozostanie nieskorygowana składowa nieliniowa błędu temperaturowego.

Natomiast z podanej zasady kompensacji schodkowej wynika, że napięcie korekcyjne może być dopasowane do nieliniowości błędu, ale jest to sygnał przedziałami stały, w zakresie każdego kwantu przetwornika temperatury ADC. W rezultacie otrzymuje się piłokształtny błąd resztowy po kompensacji. Maksymalna wartość tego błędu zależy od:

- wielkości kwantu przetwornika ADC - wynosi ok.  $1,45^\circ\text{C}$  i nie można go w procesorze zmienić;
- maksymalnej wartości współczynnika nachylenia składowej

(zera lub zakresu) błędu dodatkowego czujnika względem temperatury w  $[\% / ^\circ\text{C}]$ , a ten może sięgać nawet  $0,3\% / ^\circ\text{C}$ . Przeważnie - jak pokazano na rys. 2 - błąd jest większy dla wyższych temperatur.



Rys. 2. Ilustracja dwóch metod kompensacji błędu temperaturowego „0” czujnika.  
Fig. 2. Illustration of two methods of the sensor temperature compensation: errors (\*) before and (\*\*\*) after compensation; (\*\*) ideal offset correction; a) quasilinear compensation, b) multislope compensation

Dodatkowe ograniczenie dokładności przy kompensacji schodkowej wynika z tego, że napięcie korekcyjne dobiera się doświadczalnie tylko w kilku punktach temperatury, a w pozostałych - ze względu na czasochłonność i koszty - metodą aproksymacji.

Analiza wymienionych błędów - które należą do błędów metody - wskazuje, że żadna z powyższych metod kompensacji stosowana oddzielnie może nie być wystarczająco dokładna, szczególnie w przypadku wysokich wymagań dokładnościowych dla przetworników inteligentnych. Dodatkowym źródłem niepewności są jeszcze pomiary potrzebne przy kompensacji. Oszacowano i potwierdzono doświadczalnie, że metody quasilineowa i schodkowa stosowane oddzielnie pozwalają ograniczyć błędy temperaturowe do około  $0,3 - 0,4\%$  i to dla niewielkiego zakresu temperatur  $0 - 50^\circ\text{C}$ . Przy większym zakresie temperatury błędy będą większe.

W związku z tym zaproponowano dwustopniową procedurę kompensacji: w pierwszej kolejności korekcja quasilineowej składowej błędu, a następnie dokładna kompensacja schodkowa.

### 3. Algorytm kompensacji quasilineowej

Przed rozpoczęciem zasadniczej kompensacji temperatury należy wykonać procedurę tzw. prekalibracji, to jest wstępnego doboru zasilania mostka oraz zgrubnego doboru wzmocnienia PGA i przesunięcia zera.

#### 3.1. Kompensacja temperaturowa zakresu

Czułość (zakres) całego zespołu czujnik - procesor jest wprost proporcjonalna do napięcia  $V_b$  zasilania mostka pomiarowego. Mierząc w danej temperaturze  $T_j$  napięcie  $V_{b,j}$  i zakres całego układu jako:

$$Z_j = V_{wy,j}(p = 100\%) - V_{wy,j}(p = 0\%); (j = 1,2) \quad (1)$$

można obliczyć wymagane do korekcji napięcie zasilania mostka:

$$V_{bwj} = \frac{(\text{zadane } Z) \cdot V_{bj}}{Z_j}; \quad (j = 1,2) \quad (2)$$

Quasiliniową kompensację zakresu realizuje się przez dostrojenie  $V_b$  w dwóch temperaturach przez dobór dwóch stałych współczynników  $\alpha$  i  $\beta$ . Napięcie zasilania mostka jest bowiem sumą dwóch składowych, pochodzących z odpowiednich przetworników DAC, co można zapisać:

$$V_b = \alpha \cdot A(T) + \beta \cdot V_b \cdot B(T) + G(T) \quad (3)$$

Występujące w modelu współczynniki  $A$ ,  $B$  i  $G$  zależą od indywidualnych parametrów czujnika oraz procesora i są funkcją temperatury. Aby skorzystać z modelu należy wyznaczyć te wielkości w dwóch temperaturach  $T_1$  i  $T_2$ . W [2] zaproponowano rozwiązanie deterministyczne. W każdej temperaturze należy zmierzyć  $V_b$  dla trzech różnych kombinacji nastaw  $\alpha$  i  $\beta$ , po czym rozwiązać układ trzech równań o postaci (3), względem  $A$ ,  $B$  i  $G$ .

Trzeba jednak zauważyć, że pomiary wykonywane w ramach tego zadania są obciążone niepewnościami. Duży wpływ mają tu choćby zakłócenia  $V_b$  w czasie eksperymentu, związane z wahaniami temperatury komory klimatycznej podczas regulacji trójpołożeniowej. Ponadto stwierdzono, że rozwiązywany układ trzech równań jest w praktyce słabo uwarunkowany.

Proponuje się więc podejście stochastyczne tzn. pewien nadmiar pomiarów, pozwalający na częściową filtrację szumów i dokładniejsze wyznaczenie współczynników modelu metodą regresji. W tym przypadku plan eksperymentu identyfikacyjnego obejmuje wykonanie w danej temperaturze  $T_j$  szeregu - podobnych jak poprzednio -  $n$  pomiarów napięcia zasilania mostka przy różnych nastawach DAC  $\alpha$  i  $\beta$ :

$$(\alpha_{ji}, \beta_{ji}) \Rightarrow V_{bji}; \quad (i = 1..n), (n > 3) \quad (4)$$

Oznaczając odpowiednio macierz informacyjną  $X_j$ :

$$X_j = [\alpha_{ji} \quad \beta_{ji} \cdot V_{bji} \quad 1]; \quad (i = 1..n) \quad (5)$$

i wektor wyjść  $y_j$ :

$$y_j = [V_{bji}]; \quad (i = 1..n) \quad (6)$$

to wektor estymatorów współczynników w temperaturze  $T_j$ :

$$w_j = [A_j \quad B_j \quad G_j]^T \quad (7)$$

wyznacza się metodą najmniejszych kwadratów według wzoru:

$$w_j = (X_j^T \cdot X_j)^{-1} \cdot X_j^T \cdot y_j \quad (8)$$

Zaproponowana metoda wymaga formalnie większej liczby pomiarów, ale są to wyłącznie pomiary napięć, bez zmiany temperatury i ciśnienia, co nie wydłuża w istotny sposób czasu eksperymentu szczególnie w przypadku automatyzacji pomiarów.

W końcu potrzebne do kompensacji stałe nastawy  $\alpha$  i  $\beta$  przetworników DAC wylicza się po rozwiązaniu układu 2 równań o postaci (3) zapisanych dla dwóch temperatur, czyli ze wzoru:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \cdot V_{bw1} \\ A_2 & B_2 \cdot V_{bw2} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} V_{bw1} - G_1 \\ V_{bw2} - G_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

### 3.2. Kompensacja temperaturowa zera

Kompensacja temperaturowego błędu zera polega na przesunięciu zera wzmacniacza PGA. Realizują to dwa przetworniki DAC: Offs.TC i Offset. Napięcie zerowe układu przy sygnale wyjściowym z czujnika  $V_{s0}$ , odpowiadającym ciśnieniu  $p=0\%$ , opisuje zgodnie z rys. 1 model liniowy

$$V_{wy0} = V_{s0} \cdot PGA + \gamma \cdot V_{dd} + \delta \cdot V_{bw} \quad (10)$$

lub zapisany w bardziej zwartej postaci wzór:

$$V_{wy0} = \gamma \cdot C(T) + \delta \cdot D(T) + H(T) \quad (11)$$

Współczynniki  $C$ ,  $D$  i  $H$  zależą od parametrów procesora i czujnika. Ponieważ istnieje interakcja z czułością układu, poprzez jawnie występujące w równaniu (10) napięcie  $V_b$ , to zakłada się, że wielkość ta została wcześniej dobrana ( $V_{bw}$ ) pod kątem kompensacji zakresu.

W quasiliniowej kompensacji zera należy dobrać stałe nastawy  $\gamma$  i  $\delta$  przetworników DAC tak, aby w dwóch temperaturach zapewnić zadaną wartość wyjścia  $V_{wy0}$  (11). Zaproponowano podobną jak dla zakresu procedurę identyfikacji modelu (11) metodą regresji, a to w celu ograniczenia wpływu zakłóceń pomiarowych. Trzeba dodać, że pomiary potrzebne do kompensacji „0” mogą, a nawet powinny być wykonane w tych samych temperaturach, co dla kompensacji zakresu, aby zapobiec konieczności przestrajaniu temperatury komory klimatycznej. Jedynym wymaganiem jest wcześniejszy dobór napięcia zasilania mostka  $V_{bw}$  przed pomiarami dla kompensacji zera.

## 4. Algorytm kompensacji schodkowej

Jak już wspomniano, zasada kompensacji schodkowej jest pojęciowo bardziej prosta niż quasiliniowa. W pewnej liczbie punktów temperaturowych dostraja się doświadczalnie tylko dwa przetworniki DAC: FSO i Offset, odpowiednio dla usunięcia błędu czułości oraz zera i to ze względu na interakcję właśnie w podanej kolejności. W naszym przypadku kompensację schodkową należy traktować jako ulepszanie kompensacji quasiliniowej, dlatego wcześniej dobrane nastawy  $\beta$  oraz  $\delta$  przetworników FSO\_TC i Offs.TC powinny zostać zachowane i stałe. Według interpretacji z rys. 2 dopasowuje się na tym etapie funkcję schodkową nie do całego błędu temperaturowego, ale do błędu resztkowego po kompensacji quasiliniowej, oznaczonego na wykresie linią przerywaną i opisaną symbolem a).

Przy kompensacji schodkowej nie wymaga się znajomości żadnych modeli, jak to było wymagane poprzednio, a proces dostrajania można wykonać iteracyjnie, obserwując pomiarowo skutek wprowadzanych zmian nastaw DAC. Szybkość poszukiwania optymalnego punktu można przyspieszyć stosując przy wyborze kolejnej iteracji interpolację liniową, bądź kwadratową na podstawie poprzednich iteracji. Warto zauważyć, że pomiary wykonywane na tym etapie są obciążone mniejszymi zakłóceniami związanymi z wahaniami temperatury komory klimatycznej, bo przetwornik pomiarowy ma już zdecydowanie mniejsze błędy temperaturowe.

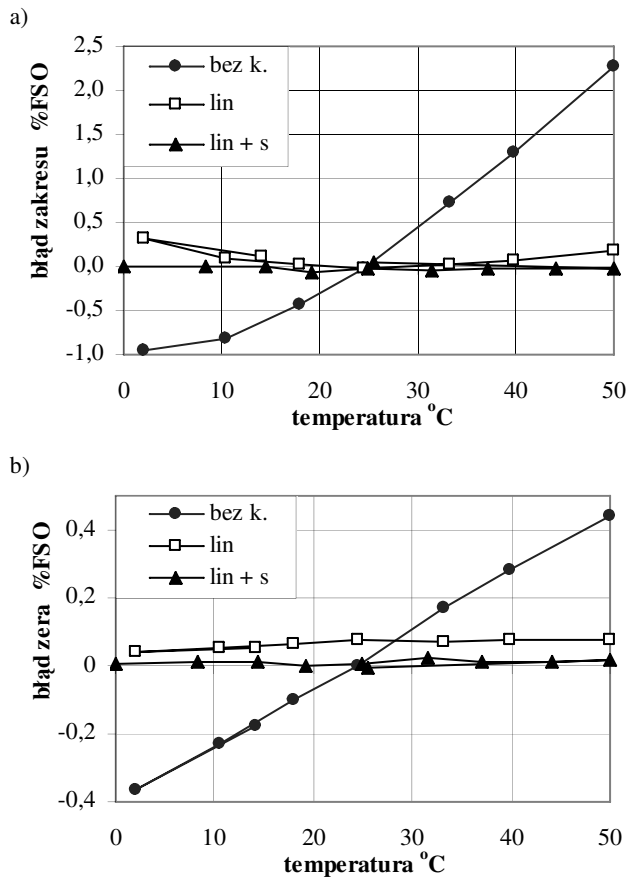
Oczywiście, że opisane wyżej dostrajanie dwóch DAC nie jest wykonywane dla każdej temperatury, a ściślej nie dla każdego stanu przetwornika ADC mierzącego temperaturę, lecz - ze względów czasowych - tylko w kilku wybranych punktach temperatury. Odpowiednie tablice współczynników dla wszystkich stanów przetwornika ADC wylicza się dalej przez aproksymację i interpolację. Aby uniknąć ekstrapolacji współczynników, to przedział ich wyznaczania powinien pokrywać się z zadanym przedziałem temperatury pracy układu.

## 5. Badania eksperymentalne

Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki dwustopniowej kompensacji, jakie otrzymano dla piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia typu PS-11-100 o zakresie nadciśnienia 100 kPa i zakresie sygnału wyjściowego 98,2 mV. Założono docelowy zakres napięcia dla przetwornika z procesorem MAX1452 jako 0,5 - 5,5 V oraz zakres kompensacji temperatury 0 - 50 °C. Na rys. 3 pokazano zbiorcze wykresy błędów temperaturowych zakresu i zera dla trzech stanów, to jest dla czujnika bez i po kolejnych etapach kompensacji.



W I etapie zrealizowano kompensację quasiliniową, przy czym potrzebne do tego pomiary wykonano w temperaturach 13,8 i 38,4 °C. Jak opisano w pkt. 4 do regresyjnego wyznaczenia trzech współczynników zarówno modelu (3) jak i (11) wykorzystano po 6 punktów pomiarowych ( $n=6$ ). Na tej podstawie wyznaczono stałe nastawy przetworników DAC.



Rys. 3. Błędy temperaturowe: a) zakresu; b) zera; bez.k. – dla czujnika bez kompensacji; lin – po kompensacji quasiliniowej; lin+s – po 2 etapach kompensacji.

Fig. 3. Temperature errors: a) of the span; b) of the offset; bez.k. – for sensor before compensation; lin – after quasilinear compensation; lin+s – after 2 steps compensation.

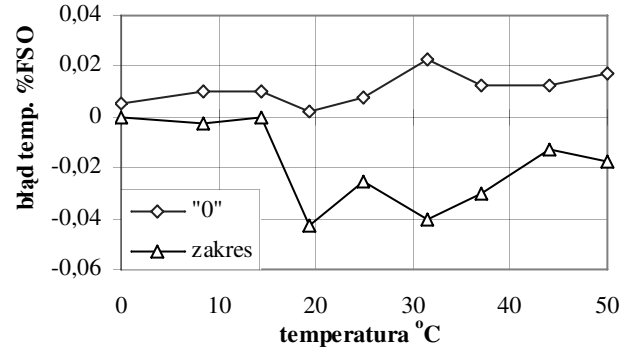
W II etapie wykonano kompensację schodkową z tym, że nastawy  $\alpha$  i  $\gamma$  przetworników FSO i Offset odpowiednio dla kompensacji zakresu i zera zostały dobrane bezpośrednio (pomiarowo) w następujących temperaturach:

2,0; 10,5; 14,1; 17,8; 24,5; 33,2; 39,8; 50,0 °C

Zależności tych współczynników  $\alpha(T)$  i  $\gamma(T)$  od temperatury aproksymowano wielomianami trzeciego rzędu i wyznaczone funkcje pozwoliły z kolei na obliczenie pełnych tablic współczynników kompensacyjnych w innych temperaturach z przedziału 0 – 50 °C. Bliższa analiza pokazała, że zależności  $\alpha(T)$  i  $\gamma(T)$  są bardzo regularne, stąd bez istotnego ograniczenia dokładności możliwe jest zmniejszenie liczby punktów temperaturowych doświadczalnego doboru współczynników korekcyjnych np. do pięciu i zastosowanie aproksymacji wielomianowej 2 rzędu. Pewien nadmiar punktów i aproksymacja zamiast bezpośredniej interpolacji są korzystne ze względu na wygładzanie błędów.

Po zapisaniu współczynników procesor MAX1452 przełączono w tryb normalnej pracy i wykonano procedurę sprawdzenia efektów kompensacji. Z wykresów na rys. 3 wynika, że już etap kompensacji quasiliniowej daje zdecydowane ograniczenie błędów i może być wystarczający przy mniejszych wymaganiach dokładnościowych dla przetworników ciśnienia. Szczególnie dla błędu zakresu widać, że po I etapie pozostaje głównie nieliniowa składowa błędów temperaturowego. W obu przypadkach - błędów

zakresu i zera - po kompensacji quasiliniowej obserwuje się, że błąd resztowy to nie tylko składowa nieliniowa, ale także sygnalizowana wcześniej składowa związana z niepewnością pomiarów kalibracyjnych. Poprawę daje dopiero II etap kompensacji. Ponieważ w skali wykresów na rys. 3 błędy końcowe są prawie niezauważalne, dlatego pokazano je w powiększeniu na rys. 4. Jak widać osiągnięto zmniejszenie błędów temperaturowych do poziomu poniżej 0,05 % zakresu.



Rys. 4. Końcowe wyniki kompensacji błędów temperaturowych.  
Fig. 4. Final result temperature compensation of the span (zakres) and offset ("0")

## 6. Podsumowanie

Dwustopniowa procedura kompensacji za pomocą procesora analogowego jest bardzo efektywna. Pozwala ograniczyć dodatkowe błędy temperaturowe do poziomu błędów podstawowych czujnika, które zależą jedynie od technologii sensorów. Algorytm kompensacji jest sformalizowany i może być zaimplementowany na stanowisku skomputeryzowanym.

Potrzeba stosowania procedur wielostopniowych w celu dokładnej kompensacji temperaturowej nie dotyczy tylko procesora MAX1452 lecz jest problemem ogólniejszym. W [1] mówi się o 100-krotnym ograniczeniu błędów temperaturowych innymi metodami, ale osiągnięto to także etapowo.

Nie jest uzasadniony powszechnie utarty pogląd o przewadze rozwiązań cyfrowych w torze przetwarzania sygnału pomiarowego z czujnika. Nawet przy bezpośrednim przejściu na sygnały cyfrowe (A/C) i dalszym przetwarzaniu na drodze cyfrowej wymagane jest przeważnie przed konwersją A/C pewne kondycjonowanie sygnału analogowego. Procesor analogowy pozwala na prostą realizację kondycjonowania analogowego, a zarazem zapewnia analogową kompensację błędów czujnika i to równie dokładną, jak na drodze cyfrowej.

W większości przetworników inteligentnych nadal wykorzystywany jest także sygnał analogowy 4 – 20 mA. Przy stosowaniu procesora analogowego nie ma potrzeby konwersji A/C i C/A w torze przetwarzania, co eliminuje szumy kwantyzacji.

## 7. Literatura

- [1] Brown R., High precision silicon piezoresistive SMART pressure sensor, Journal of Physics: Conference Series 15 (2005) 19–26, Sensors & their Applications XIII.
- [2] Sensor Temperature Compensation Using the Four DAC Signal Conditioning Architecture, -Maxim Integrated Products, USA. Application Note Dec 27, 2002.
- [3] Żelezik J., Temperature compensation of the pressure sensors as the solution of the optimalization task, Proceedings SPIE 1995, vol. 2634 s. 76-80.
- [4] Żelezik J., Model matematyczny piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia dla potrzeb przetwornika inteligentnego, COE'98, Jurata, maj 1998, ISBN 83-87138-20-7 t. 1, s. 345-348.
- [5] Żelezik J., Kompensacja błędów pomiaru w klasycznych i inteligentnych przetwornikach ciśnienia, MKM'99, Białystok, wrzesień 1999, ISBN 83-86272-98-8, s. 461-468.