

**Sergiusz ŁUCZAK**

POLITECHNIKA WARSZAWSKA, INSTYTUT MIKROMECHANIKI I FOTONIKI  
ul. Boboli 8, 02-525 Warszawa

## Doświadczalne wyznaczanie wybranych parametrów akcelerometrów MEMS – wyniki prac badawczych

Dr inż. **Sergiusz ŁUCZAK**

Ukończył studia magisterskie na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej w 1997 r., gdzie uzyskał również stopień doktora nauk technicznych w 2003 r. Obecnie pracuje jako adiunkt w Zakładzie Konstrukcji Urządzeń Precyzyjnych Instytutu Mikromechaniki i Fotoniki PW. Przedmiotem jego zainteresowań jest mechatronika, mechanika precyzyjna oraz technika mikrosystemów. Swoje prace badawcze realizuje m.in. w zakresie pomiarów odchylenia od pionu, zwłaszcza przy wykorzystaniu akcelerometrów MEMS.



e-mail: s\_luczak@mchtr.pw.edu.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono problem doświadczalnego wyznaczania najważniejszych parametrów metrologicznych akcelerometrów MEMS. Szczegółowo omówiono zagadnienie justowania akcelerometrów względem stanowiska badawczego. Wskazano na niewyjustowanie akcelerometru jako najistotniejsze źródło błędów wskazań tych przyrządów. Podano wartości niektórych parametrów metrologicznych dla przykładowych akcelerometrów. Odniesiono się do podobnych prac prowadzonych przez różne ośrodki badawcze na świecie.

**Słowa kluczowe:** akcelerometr MEMS, czułość poprzeczna, histereza, błędy wyjustowania, nieprostokątność osi czułości.

### Experimental determination of selected parameters of MEMS accelerometers – results of experimental studies

#### Abstract

The paper addresses the issue of determining metrological parameters of MEMS accelerometers in an experimental way. Methodology of performing such studies as well as the related test rig are presented by the author in [1]. Short discussion on similar works carried out by others, reported e.g. in [2-4], [8-10], [14-15], is included. Much attention is paid to the problem of aligning the accelerometer in the test rig. The obtained results proved that misalignment is a factor affecting the sensor accuracy most significantly. That can be clearly observed by comparing the courses in Figs. 2 and 3, where the misalignment almost directly increased the error of sensor indications. Such errors as cross-axis (or transverse) sensitivity, perpendicularity of the sensitive axes and hysteresis are briefly addressed in Sections 4-6. Yet even though magnitudes of these errors are not significant in the case of dual-axis accelerometers that have been tested, it may turn out that it is not so in the case of triaxial accelerometers. It is shown that owing to compensation of systematic errors (such as the cross-axis sensitivity or misalignment) or even elimination of various kinds of errors (e.g. misalignment, errors resulting from the accepted way of calibration) an improvement in sensor performance may be achieved. At the end, some parameters as estimators of the accuracy of MEMS accelerometers are proposed.

**Keywords:** MEMS accelerometer, misalignment, cross-axis sensitivity, perpendicularity of the sensitive axes, hysteresis.

### 1. Wstęp

Zagadnienia dotyczące stanowiska do badań doświadczalnych akcelerometrów MEMS oraz metodyki wzorcowania akcelerometrów autor przedstawił w artykule [1] pt. „Doświadczalne wyznaczanie wybranych parametrów akcelerometrów MEMS – metodyka badań doświadczalnych”. Przy wykorzystaniu stanowiska badawczego oraz zastosowaniu wybranych metod wzorcowania akcelerometrów MEMS przedstawionych we wspomnianym artykule zrealizowano badania opisane w niniejszej pracy. Dotyczą one następujących zagadnień:

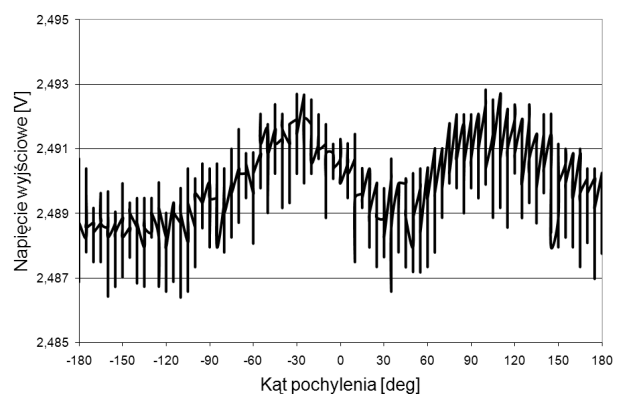
- justowanie akcelerometrów względem stanowiska badawczego,
- błędy wynikające z niedokładnego wyjustowania akcelerometrów względem stanowiska badawczego,
- histereza akcelerometrów MEMS,
- nieprostokątność osi akcelerometrów MEMS,
- czułość poprzeczna akcelerometrów MEMS,
- estymatory niedokładności wskazań akcelerometrów.

### 2. Justowanie akcelerometrów

Bardzo istotną kwestią dotyczącą procesu wzorcowania jest wcześniejsze wyjustowanie badanego akcelerometru, tzn. ustawienie jego osi czułości prostopadle do osi obrotu, wokół której ma być on przemieszczany kątowno [2-4]. W przypadku niespełnienia tego wymagania, wystąpią błędy o nieliniowym charakterze [4].

Wstępnego wyjustowania akcelerometru dokonać można jedynie pobieżnie, gdyż sam błąd orientacji jego krzemowej struktury względem obudowy wynosi ok. 1° [5-7]. Natomiast aby dokładnie go wyjustować trzeba kilkakrotnie przeprowadzić wstępny proces wzorcowania. Samo wzorcowanie pozwala nie tylko wyznaczyć odpowiednie składowe stałe i wzmocnienia sygnałów wyjściowych dla wzorcowanych osi, ale także oszacować niewyjustowanie osi czułości, wokół której (w przybliżeniu) obracany jest badany akcelerometr.

W pierwszej części prezentowanych rozważań [1], przedstawiono przykładowe przebiegi sygnałów akcelerometru trójosiowego (rys. 4) podczas wzorcowania jego osi czułości  $x$  i  $z$ . Pozornie stały sygnał na osi  $y$  w rzeczywistości istotnie się zmienia, jak to przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przebieg sygnału niewyjustowanego akcelerometru trójosiowego dla osi  $y$   
Fig. 1. Values of the output signal in  $y$ -axis of a misaligned triaxial accelerometer

Wzorcowanie zrealizowano w następujący sposób: położenie kątowne zmieniano co 5°, a w każdym z nich wykonywana była seria 30 pomiarów. Tak więc pionowe linie na rys. 1 stanowią rozrzut wyników w danym punkcie pomiarowym.

Jak widać z powyższego rysunku, sygnał wyjściowy zawiera zarówno składową przypadkową (rozrzut wyników dla jednego położenia) jak i systematyczną (zmiana średniej wartości wskazań dla kolejnych położenia kątownych). Składowa systematyczna jest miarą wyjustowania akcelerometru względem stanowiska badawczego. W idealnym przypadku byłaby ona równa 0. Na jej wartość mają wpływ następujące czynniki:

- nierównoległość osi czułości akcelerometru do osi jego fizycznego obrotu (osi obrotu blatu stolika),
- zjawisko czułości poprzecznej (pionowej i poziomej),

- bicie osiowe samego stanowiska badawczego (blatu stolika),
- nieprostokątność osi obrotu stanowiska badawczego (wpływ pośredni).

Pierwszy czynnik, najbardziej istotny, można wyeliminować (lub znacznie ograniczyć). Drugi można kompensować przy zastosowaniu odpowiedniego empirycznego modelu matematycznego, jak np. w [8]. Pozostałe dwa czynniki związane są z wykorzystywaniem stanowiskiem badawczym i najtrudniej je wyeliminować.

Justowanie danej osi czułości akcelerometru polega na zmianie jego orientacji kątowej względem osi obrotu stanowiska badawczego i przeprowadzeniu ponownego procesu wstępnego wzorcowania. Jeśli dla tego nowego położenia uzyska się mniejszą zmienność sygnału przypisanego do justowanej osi czułości, oznacza to, że udało się zmniejszyć niewyjustowanie czujnika. Jeśli uzyskano efekt odwrotny, oznacza to, że akcelerometr został obrócony w odwrotnym kierunku. Należy dokonywać kolejnych zmian orientacji kątowej akcelerometru, aż do osiągnięcia minimalnej zmienności obserwowanego sygnału. Dla każdej osi czułości justowanie należy przeprowadzić w dwóch etapach: najpierw obracając akcelerometr wokół jednej osi prostopadłej do danej osi czułości, a następnie wokół drugiej osi prostopadłej do poprzednich dwóch.

W celu uproszczenia procesu justowania korzystne jest wykorzystanie odpowiedniego uchwytu na czujnik, umożliwiającego zmianianie jego orientacji kątowej w płynny i kontrolowany sposób (np. za pomocą elementu gwintowego) w małym zakresie kątowym rzędu kilku stopni, z dokładnością nie gorszą niż 0,1 stopnia.

Istnieje możliwość dokładnego wyjustowania tylko akcelerometrów jednoosiowych. W przypadku wersji dwu-, trzy- i wieloosiowych wyjustowanie jednej osi czułości uniemożliwia wyjustowanie drugiej (co najmniej wokół jednej z dwóch osi). Rozważmy przykład akcelerometru trójosiowego, odwołując się do rys. 3 przedstawionego w [1].

W pierwszym kroku justujemy oś  $x$  akcelerometru. Najpierw obracamy go wokół osi  $z_0$  (uzyskując minimalną zmienność sygnału na osi  $x$ ), a następnie, wokół osi  $y_0$  (uzyskując jeszcze mniejszą zmienność tego sygnału).

W drugim kroku justujemy oś  $y$  akcelerometru. Obracamy go wokół osi  $x_0$ . Najłatwiej zrobić to obracając blat stolika 2 (rys. 2 przedstawiony w [1]) wraz z akcelerometrem (uzyskując minimalną zmienność sygnału składowej przyspieszenia w osi  $y$ ). W tym przypadku nie mamy już możliwości wyjustowania osi  $y$  akcelerometru wokół osi  $z_0$ , ponieważ spowodowałoby to niewyjustowanie osi  $x$  (ewentualnym kompromisem może być rozłożenie niewyjustowania po równo pomiędzy osie  $x$  oraz  $y$ ). Z tych samych powodów nie da się również wyjustować trzeciej osi czułości akcelerometru.

Podczas realizacji opisywanych badań doświadczalnych zaobserwowano, że istnieje niewielka różnica, rzędu ok.  $0,04^\circ$ , przy justowaniu osi  $y$  na zasadzie obrotu stolika o kąt  $c_y$  wyznaczony z (2) oraz obrotu o kąt dający minimalną zmienność sygnału na osi  $y$ .

Gdybyśmy jednak dysponowali np. dwoma akcelerometrami dwuosiowymi, a nie jednym trójosiowym, to oś czułości  $z$  można by było wyjustować poprzez jej obrót kolejno wokół osi  $y_0$  o kąt  $c_{z\alpha}$  wyznaczony z (3), a następnie wokół osi  $x_0$  o kąt  $c_{z\gamma}$  wyznaczony na podstawie (4).

Podczas wzorcowania napięcie wyjściowe dla poszczególnych osi czułości wyrażają następujące zależności [1]:

$$U_x = a_x + b_x \sin(\alpha + c_x), \quad (1)$$

$$U_y = a_y + b_y \sin(\gamma + c_y), \quad (2)$$

$$U_z = a_{z\alpha} + b_{z\alpha} \cos(\alpha + c_{z\alpha}), \quad (3)$$

$$U_z = a_{z\gamma} + b_{z\gamma} \cos(\gamma + c_{z\gamma}), \quad (4)$$

gdzie:

$a_x, a_y, a_z$  – składowe stałe sygnału wyjściowego dla osi  $x, y, z$ ,

$b_x, b_y, b_z$  – amplitudy sygnału wyjściowego dla osi  $x, y, z$ ,

$c_x, c_y, c_z$  – przesunięcia fazowe sygnału wyjściowego dla osi  $x, y, z$ ,

$\alpha, \gamma$  – kąty odchylenia od pionu (pochylenia i przechyleń) zadawane za pomocą stanowiska badawczego.

Dopiero teraz, po wyjustowaniu akcelerometru można przejść do procesu zasadniczego wzorcowania jego sygnałów wyjściowych dla poszczególnych osi czułości, jak to opisano w pkt. 3 artykułu [1].

Proces justowania jest jednak dosyć czasochłonny i w niektórych przypadkach musi być co jakiś czas powtarzany. W związku z tym, korzystnym może okazać się zastosowanie alternatywnych metod. Wyszczególnić można tu następujące opcje:

- wykorzystanie rachunku macierzowego uwzględniającego macierz błędów położenia kątowego dla każdej osi czułości (po dwa kąty na jedną oś, wyznaczone przy wzorcowaniu), jak to zaproponowano w [9],

- założenie, że osie czułości tworzą układ ukośnokątny (estymatory kątów pomiędzy poszczególnymi osiami wyznaczone są na podstawie danych zebranych podczas wzorcowania akcelerometru), jak to zaproponowano w [10]. Dzięki temu możliwa jest poprawa parametrów metrologicznych akcelerometrów (trój- oraz dwuosiowych), których osi czułości nie da się wyjustować względem siebie.

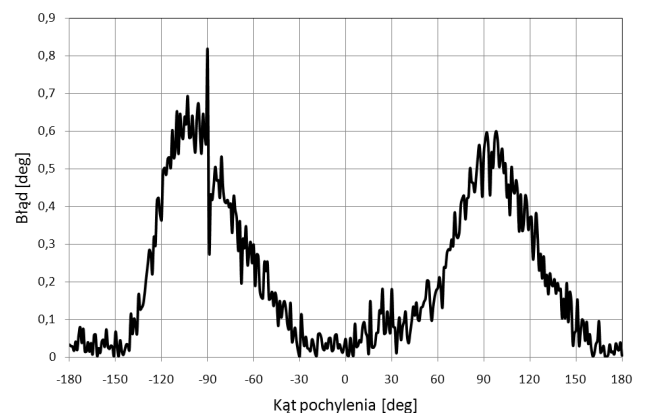
Korzyści wynikające z takiego podejścia są następujące:

- eliminacja konieczności żmudnego justowania czujnika przed procesem wzorcowania jego wskazań, a także podczas jego montażu w urządzeniu docelowym,
- możliwość uwzględnienia nieprostokątności osi akcelerometrów wieloosiowych (przede wszystkim trójosiowych).

Trudno jednak z góry określić jak duży błąd wprowadza takie podejście. W celu oszacowania tego niezbędne byłoby przeprowadzenie wzorcowania układu wyjustowanego oraz niewyjustowanego.

### 3. Błędy wyjustowania akcelerometrów

Ponieważ nie jest możliwe idealne wyjustowanie akcelerometru, błędy kątowej orientacji akcelerometru względem stanowiska badawczego (a także urządzenia, w którym akcelerometr ma być docelowo zainstalowany) będą miały wpływ na dokładność jego wskazań. W celu określenia tego wpływu przeprowadzone zostały 2 procesy wzorcowania. W pierwszym wzorcowaniu zrealizowanym przez obrót akcelerometru wokół osi  $y_0$ , oś czułości  $x$  była wyjustowana z dokładnością do  $c_x=0,005^\circ$ , natomiast oś czułości  $z$  była niewyjustowana o wartość  $c_{z\alpha}=0,414^\circ$ .



Rys. 2. Błąd wyznaczenia kąta pochyleń  
Fig. 2. Error of determining the pitch angle

Na rys. 2 przedstawiono przebieg błędów wskazań akcelerometru  $e$  danego wzorem:

$$e = \left| \alpha - \arctan \left( \frac{m_x}{\sqrt{m_y^2 + m_z^2}} \right) \right|, \quad (5)$$

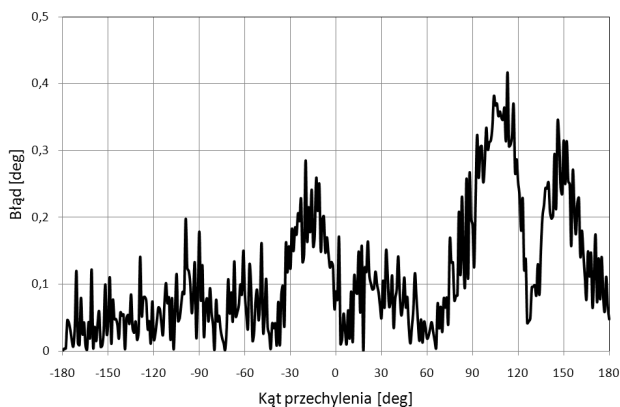
gdzie [11]:

$$m_{x,z} = \frac{U_{x,z} - a_{x,z}}{b_{x,z}}, \quad (6)$$

$U_x, U_y, U_z$  – napięcie wyjściowe dla osi  $x, y, z$  w kolejnych położeniach kątowych.

W drugim wzorcowaniu, zrealizowanym przez obrót akcelerometru wokół osi  $x_0$ , oś czułości  $y$  była wyjustowana z dokładnością do  $c_y=0,023^\circ$ , natomiast oś czułości  $z$  była niewyjustowana o wartość  $c_z=0,027^\circ$ . Na rys. 3 przedstawiono przebieg błędów wskazań akcelerometru  $e$  dany wzorem:

$$e = \left| \gamma - \arctan \left( \frac{m_y}{\sqrt{m_x^2 + m_z^2}} \right) \right|. \quad (7)$$



Rys. 3. Błąd wyznaczenia kąta przechylenia  
Fig. 3. Error of determining the roll angle

Wykresy przedstawione na rys. 2 i 3 wyraźnie ukazują, jak ważnym zagadnieniem jest wyjustowanie akcelerometru.

#### 4. Histereza akcelerometrów

W przypadku potrzeby badania tak subtelnych zjawisk jak histereza elementów sprężystych niezbędne jest dysponowanie odpowiednio czułym sprzętem pomiarowym. Standardowe stanowisko badawcze wspomniane na wstępie artykułu nie nadaje się do takich celów z uwagi na własną histerezę, która w rzeczywistości jest zazwyczaj znacznie większa niż histereza akcelerometrów MEMS. Bywa, że ten fakt jest przeoczany i niektórzy badacze, np. autorzy [8], podają błędnie zawyżone wartości histerezy.

Najlepszym rozwiązaniem jest tu znaczne uproszczenie mechanicznej struktury stanowiska badawczego. W przypadku stanowiska zaprezentowanego przez autora w [1], korzystniej jest zamocować badany akcelerometr bezpośrednio na wałku inkrementalnego czujnika położenia kąowego, natomiast stolik obrotowy wykorzystać jedynie jako napęd (co jest pomocne w wypadku prowadzenia dużej liczby pomiarów, które można w ten sposób zautomatyzować).

Wstępne prace badawcze zrealizowane przez autora wykazały, że w przypadku kilku dwuosiowych akcelerometrów MEMS błąd histerezy nie miał istotnego znaczenia. Planowana jest jednak kontynuacja tego typu prac, przede wszystkim w odniesieniu do akcelerometrów trójosiowych.

#### 5. Nieprostokątność osi czułości

Wysokie dokładności znamienne dla technologii stosowanych w mikrosystemach (MEMS) sugerowałyby, że nieprostokątność osi czułości akcelerometru nie będzie przybierać dużych wartości. Nie dotyczy to oczywiście błędów wyjustowania całej struktury krzemowej względem obudowy, ponieważ te powstają nie w samym procesie produkcyjnym, ale podczas zamykania urządzenia w obudowę. Jednakże wartość nieprostokątności podawana w katalogach jest relatywnie duża, np.  $0,1^\circ$  [6-7], w odniesieniu do niedokładności, jakie można uzyskać przy wykorzystaniu akcelerometrów MEMS w pomiarach odchylenia od pionu, np.  $0,3^\circ$  [12].

W starszych katalogach podawano wartość nieprostokątności znacznie mniejszą, np.  $0,01^\circ$  [5]. O ile można przyjąć, że maksymalna nieprostokątność osi czujnika trójosiowego, np. [7], może być duża (jako, że większość technologii mikrosystemów, np. powierzchniowa, jest tak naprawdę dwuwymiarowa [13]), to trudno jest zrozumieć, dlaczego nowsze czujniki dwuosiowe cechują się gorszą wartością tego parametru niż ich poprzednie modele, np. odpowiednio [5] i [6].

Podobnie jak w przypadku czułości poprzecznej należałoby określić wartość nieprostokątności dla każdej osi czułości akcelerometru, a przynajmniej oddzielnie dla osi poziomych ( $x$  i  $y$ ) i dla osi pionowej ( $z$ ) cechującej się zazwyczaj innego rodzaju zawieszeniem sprężystym masy sejsmicznej niż w przypadku osi poziomych.

Z badań przeprowadzonych przez autora wynika, że rozważana maksymalna wartość dla akcelerometrów dwuosiowych wynosiła ok.  $0,12^\circ$  dla ADXL 202 oraz  $0,2^\circ$  dla ADXL 322. Jednak została ona wyznaczona mało precyzyjnie (zwiększyły ją zapewne błędy wyjustowania akcelerometrów oraz błędy stolików obrotowych), na podstawie różnicy pomiędzy przesunięciami fazowymi  $c$  wyznaczonymi odpowiednio z zależności (1) i (3) oraz (2) i (4). A zatem należy przyjąć, że w rzeczywistości powyższe wartości są znacznie mniejsze.

#### 6. Czułość poprzeczna akcelerometrów

Pomimo, że zjawisko czułości poprzecznej występujące w akcelerometrach ma często systematyczny charakter, nie da się do końca wyeliminować jego skutków [14]. Możliwe jest natomiast skompensowanie jego wpływu w znaczący sposób, zwłaszcza gdy dysponujemy akcelerometrem trójosiowym.

Wstępne prace doświadczalne autora [12] jak i innych badaczy [15] wykazały, że zjawisko czułości poprzecznej w niektórych akcelerometrach MEMS nie jest aż tak niekorzystne, jak to wynika z danych katalogowych, np. [5-7]. W ewidentny sposób wartość tego parametru została tam zawyżona, co być może wynika z faktu, że zakres pomiarowy odnośnych akcelerometrów przekracza  $1g$  (przy założeniu, że czułość poprzeczna bardziej uwidacznia się przy większych wartościach działających przyspieszeń), bądź też jest to związane z dużym rozrzutem parametrów metrologicznych w obrębie wyprodukowanej partii czujników, co potwierdzają dane w [5-7]. Warto tu zwrócić uwagę, że katalogi zazwyczaj nie rozróżniają pomiędzy czułością poprzeczną poziomą i pionową, a jest to zasadnicza różnica z punktu widzenia konstrukcji zawieszenia masy sejsmicznej danego akcelerometru. W niektórych pracach uwzględnia się tę różnicę, np. w [8], dzięki czemu możliwa jest większa poprawa parametrów badanego akcelerometru.

We wspomnianych katalogach brak też zróżnicowania pomiędzy czułością poprzeczną dla poszczególnych osi, co może być bardzo istotne w przypadku akcelerometrów trójosiowych, jak np. [7], które w ostatnim czasie zaczęły dominować na rynku sensorów MEMS, wypierając niestety czujniki dwu- i jednoosiowe. W najbliższym czasie autor planuje rozpocząć badania czułości poprzecznej, zwłaszcza akcelerometrów trójosiowych, ponieważ w ich przypadku spodziewany jest największy wpływ tego zjawiska, przede wszystkim w odniesieniu do pionowej osi czułości (osi  $z$ ).

## 7. Estymatory niedokładności wskazań akcelerometrów

Jako jeden z estymatorów niedokładności wskazań akcelerometrów zaproponowano różnicę między wartością zaobserwowaną a prognozowaną [16], czyli wartość bezwzględną różnicy pomiędzy położeniem kątowym zadany za pomocą stanowiska badawczego a położeniem kątowym obliczonym na podstawie wskazań akcelerometru – równania (5) i (7) zobrazowane na rys. 2 i 3. Wykorzystano w nich funkcję arcus tangens, zapewniającą liniową zależność pomiędzy wskazaniami akcelerometru a jego kątem odchylenia od pionu [11].

Równie interesujące możliwości daje wykorzystanie odpowiedniej analizy statystycznej, którą i tak trzeba przeprowadzić po procesie wzorcowania celem wyznaczenia parametrów  $a$  i  $b$  dla każdej osi czułości – równania (1)-(4). Stosowane w tym celu metody regresji nieliniowej umożliwiają wyznaczenie odpowiednich przedziałów predykcji (dających oszacowanie błędu w przypadku pojedynczej obserwacji) oraz przedziałów ufności (dotyczących średniej z wielu obserwacji). Korzystne jest również posłużenie się modelem kalibracji o tym samym równaniu, co regresja nieliniowa. Jeśli to możliwe, warto zastąpić regresję nieliniową liniowymi, poprzez proste podstawienie za zmienną niezależną wartości funkcji sinus lub cosinus danego kąta zamiast samej wartości tego kąta (niestety, konieczne jest wtedy wyeliminowanie z modelu regresji przesunięć fazowych  $c$ ).

## 8. Podsumowanie

W artykule szczegółowo omówiono zagadnienie justowania akcelerometrów typu MEMS. Wskazano też na parametry metrologiczne, które w istotny sposób determinują niedokładność tych przyrządów. Wykazano, że prowadzenie odpowiednich prac eksperymentalnych może zaowocować zmniejszeniem niedokładności wskazań akcelerometrów. Uzyskać to można dzięki kompensacji błędów o charakterze systematycznym (jak np. czułość poprzeczna lub błąd wyjustowania) lub eliminacji różnego rodzaju błędów (np. błędy wyjustowania, błędy wynikające z przyjętej metody wzorcowania czujnika).

Uzyskane wyniki wskazują, że najbardziej istotny wpływ na dokładność realizowanych pomiarów mają błędy wyjustowania osi czułości akcelerometru. Różnica pomiędzy przebiegiem błędu na rys. 2 oraz rys. 3 wskazuje, że wartość niewyjustowania przekłada się w przybliżeniu bezpośrednio na błąd odchylenia od pionu przy wykorzystywaniu pełnego zakresu kąтового.

Choć wartości takich błędów jak: czułość poprzeczna, histereza, nieprostokątność osi czułości, są mało istotne dla badanych akcelerometrów dwuosiowych, może się okazać, że w przypadku akcelerometrów trójosiowych ogrywają one znaczącą rolę.

W artykule nie podjęto kwestii takich błędów jak: dryfy termiczne i czasowe, czy zmienne charakterystyki amplitudowo-fazowe. Są one bardzo istotnym źródłem błędów wskazań akcelerometrów MEMS, zostały jednak dość dobrze opisane nawet

w katalogach firmowych, np. [5-7]. Istnieje także wiele sposobów znacznego ograniczenia ich wpływu, co np. autor opisał w [17].

## 9. Literatura

- [1] Łuczak S.: Doświadczalne wyznaczanie wybranych parametrów akcelerometrów MEMS – metodyka badań doświadczalnych. *Pomiary Automatyka Kontrola*, bieżący numer.
- [2] Chen H., Bao M., Zhu H., Shen S.: A piezoresistive accelerometer with a novel vertical beam structure. *Sensors & Actuators*, vol. A 63, 1997, s. 19-25.
- [3] Knapp G., You H., Holzhausen G.: On the use of electronic tilt sensors as angle encoders for synchrotron applications. *Review of Scientific Instruments*, Vol. 66, No 2, Pt. 2, 1995, s. 1712-1714.
- [4] Low g Accelerometer Non-Linearity Measurement, #AN-00MX-014. Application Note n/r 5/12/03, MEMSIC Inc., North Andover, MA, USA, 2005.
- [5] Low Cost  $\pm 2g$  Dual Axis Accelerometer with Duty Cycle Output, ADXL 202E, Analog Devices Inc., Norwood, MA, USA, 2000.
- [6] Precision  $\pm 1.7g$  Single/Dual Axis Accelerometer ADXL 103/ADXL 203, Analog Devices Inc., Norwood, MA, USA, 2005.
- [7] Small, Low Power, 3-Axis  $\pm 2g$  Accelerometer ADXL 327, Analog Devices Inc., Norwood, MA, USA, 2009.
- [8] Ang W., Khosla P., Riviere C.: Nonlinear regression model of a low-g MEMS accelerometer. *IEEE Sensors Journal*, vol. 7, pp. 81–88, 2007.
- [9] Parsa K., Lasky T. A., Ravani B.: Design and Implementation of a Mechatronic, All-Accelerometer Inertial Measurement Unit, *IEEE/ASME Trans. Mechatr.*, vol. 12, no. 6, 2007, s. 640-650.
- [10] Qian J., Fang B., Yang W., Luan X., Nan H.: Accurate Tilt Sensing with Linear Model. *IEEE Sensors Journal*, *IEEE Sensors J.*, vol. 11, no. 10, 2011, s. 2301-2309.
- [11] Łuczak S.: Pomiary odchylenia od pionu przy użyciu akcelerometrów MEMS. *Pomiary, Automatyka, Robotyka*, nr 7-8/2008, Warszawa 2008, s. 14-16.
- [12] Łuczak S., Oleksiuk W., Bodnicki M.: Sensing Tilt with MEMS Accelerometers, *IEEE Sensors J.*, vol. 6, no. 6, 2006, s. 1669-1675.
- [13] Kaajakari V.: *Practical MEMS*, Small Gear Publishing, Las Vegas, NV, USA 2009.
- [14] Kibrick R., Robinson L., Cowley D.: An evaluation of precision tilt-sensors for measuring telescope position. *Proc. Telescope Contr. Syst., SPIE Symposium on OE/Aerosp. Sensing and Dual Use Photon.*, Orlando, FL, USA, 1995, s. 364-376.
- [15] Acar C., Shkel A.: Experimental evaluation and comparative analysis of commercial variable-capacitance MEMS accelerometers, *J. Micromech. and Microeng.*, vol. 13, no. 5, 2003, s. 634-645.
- [16] Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik. Główny Urząd Miar, Warszawa, 1999, s. 112-113.
- [17] Łuczak S.: On Improving Performance of MEMS Accelerometers in Tilt Sensing, *Machine Dynamics Problems*, vol. 30, no. 4, 2006, s. 37-47.

otrzymano / received: 13.04.2011

przyjęto do druku / accepted: 03.10.2011

artykuł recenzowany

## INFORMACJE

### Wersja elektroniczna miesięcznika PAK Pomiary Automatyka Kontrola – Measurement Automation and Monitoring

Artykuły opublikowane w PAK po roku 1989 są dostępne w wersji elektronicznej m.in. w bazie artykułów PAK ([www.pak.info.pl](http://www.pak.info.pl)), w folderze „Archiwum numerów miesięcznika PAK”:

- pełne teksty artykułów starszych niż 3 lata oraz streszczenia artykułów najnowszych można pobrać bezpłatnie,
- pełne teksty artykułów najnowszych można otrzymać za opłatą (5 PLN +1,15 PLN VAT).