

**Sergiusz ŁUCZAK**

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

## Doświadczalne wyznaczanie wybranych parametrów akcelerometrów MEMS – metody badań doświadczalnych

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](mailto:s_luczak@mchtr.pw.edu.pl)



### Streszczenie

W artykule przedstawiono problem doświadczalnego wyznaczania wartości najważniejszych parametrów metrologicznych akcelerometrów MEMS (Microelektromechanical Systems). Zaprezentowano odpowiednie stanowisko badawcze. Omówiono różne metody wzorcowania akcelerometrów. Zaproponowano dwie oryginalne procedury wzorcowania i podano odpowiadające im wartości niektórych parametrów metrologicznych uzyskanych dla przykładowego akcelerometru MEMS.

**Słowa kluczowe:** akcelerometr MEMS, badania doświadczalne, pomiary, wzorcowanie.

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

#### Abstract

In the cases when metrological parameters of a sensor are of high importance, it is necessary to subject it to appropriate experimental studies. Generally, such a situation may take place when: significant metrological parameters of a sensor are not provided or may be overestimated in the related catalogs; a sensor must be calibrated by the user; an improvement of the sensor performance is striven for; significance of interactions between a sensor parameter and some disturbance must be verified; results of aging of a sensor, its durability or stability must be determined. Such cases are reported in [1-4]. While performing experiments described in the paper, two crucial issues were: an appropriate test rig presented in Section 2, and a methodology of performing the experiments discussed in the paper and in [8]. In Section 3 various ways of calibrating MEMS accelerometers are presented, with reference to related works of others, reported in [11-14], and their advantages and disadvantages are briefly discussed. Two original procedures of calibration are proposed. In the summary, the results obtained while calibrating the tested accelerometer according to three different methods are compared, and then a scope of application of each method is indicated. Further results of the considered experiments are reported by the author in the paper constituting a second part of the presented considerations, 'Experimental determination of selected parameters of MEMS accelerometers – results of the experimental studies'.

**Keywords:** MEMS accelerometer, experimental studies, measurements, calibration.

### 1. Wstęp

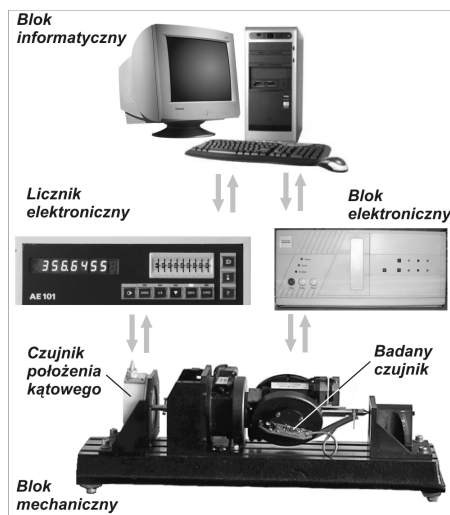
W wielu zastosowaniach bardzo istotną kwestią stanowią parametry metrologiczne danych akcelerometrów, pośród których przyrządy typu MEMS stają się coraz bardziej rozpowszechnione, głównie za sprawą niskiej ceny oraz miniaturowych wymiarów. W celu wyznaczenia wartości wspomnianych parametrów konieczne jest czasami przeprowadzenie odpowiednich badań doświadczalnych. Konieczność taka zachodzi najczęściej, gdy:

- wartości istotnych parametrów metrologicznych nie są podane (np. sensory prototypowe, jak w [1]; niepełna informacja w odnośnych katalogach) lub mogą być zawyżone (np. z powodu dużego rozrzutu w procesie technologicznym – charakterystycznego dla większości akcelerometrów MEMS, przedstawionych np. w [2-3]),
- sensor musi zostać wywzorcowany przez samego użytkownika – co jest również charakterystyczne dla akcelerometrów MEMS,
- zabiega się o poprawę parametrów sensora (np. poprzez kompensację błędów systematycznych, takich jak czułość poprzeczna lub błędy kątowej orientacji osi czułości sensora), jak w przypadku akcelerometru przedstawionego w [4],
- trzeba określić istotność interakcji pomiędzy jakimś parametrem a danym rodzajem zakłóceń,
- trzeba określić skutki starzenia się sensora,
- trzeba zweryfikować, czy w wyniku podjętych działań udało się polepszyć parametry metrologiczne sensora,
- trzeba określić trwałość sensora lub stabilność jego działania w danych warunkach pracy.

Zwykle niezbędne w takich sytuacjach jest wykorzystanie odpowiedniego stanowiska badawczego, a także opracowanie poprawnej metodyki prowadzenia prac doświadczalnych.

### 2. Stanowisko badawcze

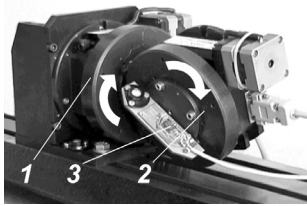
W badaniach akcelerometrów MEMS o małym zakresie pomiarowym (nie większym niż kilka  $g$ ), jako źródło przyspieszenia wykorzystywać można przyspieszenie ziemskie ( $g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$ ), które jest jednym z najbardziej stabilnych źródeł odniesienia [5]. Pozorną zmianę wartości tego przyspieszenia można uzyskiwać poprzez zmianę orientacji kątowej badanego akcelerometru względem pionu [6]. Tę właśnie zasadę wykorzystano przy budowie skomputeryzowanego stanowiska badawczego, przedstawionego na rys. 1, wykorzystanego w zaprezentowanych poniżej pracach badawczych. Stanowisko zostało opisane szczegółowo w [7], natomiast metodyka prowadzenia prac eksperymentalnych w [8].



Rys. 1. Skomputeryzowane stanowisko badawcze  
Fig. 1. Computer controlled test rig

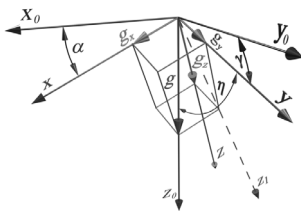
Blok informatyczny stanowiska, poza standardowym systemem komputerowym typu PC, składa się z 16-bitowej karty akwizycji danych Advantech PCI 1716. Blok elektroniczny zawiera w sobie 2 sterowniki silników skokowych (mogące wykonywać serię od 1 do 500 skoków) oraz przetworniki czujników położenia startowego stolików obrotowych.

Najważniejsze elementy bloku mechanicznego stanowią dwa stoliki obrotowe przedstawione na rys. 2: 1 – stolik o poziomej osi obrotu, 2 – stolik o pochylanej osi obrotu. Ich osie obrotu są do siebie prostopadłe, napędzane są one silnikami skokowymi i są sztywno ze sobą połączone (korpus stolika 2 zamocowany jest do obrotowego blatu stolika 1 – rys. 2). Stolik 1 jest dodatkowo sprzęgnięty za pomocą precyzyjnego sprzęgła z inkrementalnym czujnikiem położenia kąтового (widocznym po lewej stronie zespołu stolików – rys. 1), o dokładności 1 sekundy kątowej. Dzięki temu zadawanie położenia kąowego badanego czujnika przyspieszenia 3 za pomocą stolika 1 może odbywać się z błędem rzędu  $0,0006^\circ$ , a nie  $0,02^\circ$  jak ma to miejsce w przypadku wykorzystania samego stolika 2, co wynika z wartości jego odchyłki kinematycznej [7]. Badany czujnik przyspieszenia 3 przymocowany jest do blatu stolika 2.



Rys. 2. Zespół stolików obrotowych  
Fig. 2. Unit with rotary tables

Działanie stanowiska polega na zadawaniu położenia kąowego badanego przyspieszeniomierza (poprzez obrót blatów stolików) wokół dwóch prostopadłych osi (zadawanie kąta pochylenia  $\alpha$  i kąta przechylenia  $\gamma$  [9] – rys. 3), a następnie odczytanie jego wskazań, przy użyciu karty akwizycji danych. Z rys. 3 wynika, że oś obrotu stolika 1 pokrywa się z osią  $y_0$ , natomiast oś obrotu stolika 2 pokrywa się z osią  $x$  (w szczególnym przypadku, gdy  $\gamma = 0^\circ$ , ta oś obrotu pokrywa się z osią  $x_0$ ). Różnica pomiędzy wartością kątaadanego za pomocą stanowiska badawczego oraz obliczonego na podstawie wskazań badanego czujnika jest miarą jego błędum[10].



Rys. 3. Kinematyka stanowiska badawczego  
Fig. 3. Kinematics of the test rig

### 3. Wzorcowanie akcelerometrów

Jak już wspomniano, często zdarza się, że wzorcowanie akcelerometrów MEMS (zwłaszcza w ich tańszych wersjach z analogowym sygnałem wyjściowym) musi zostać zrealizowane przez użytkownika (lub producenta urządzenia, w którym mają one zostać zastosowane). Z jednej strony jest to niedogodne, ponieważ zwiększa koszty związane z zastosowaniem akcelerometrów MEMS, z drugiej jednak strony daje możliwość zmniejszenia błędów ich wskazań. Jeśli ten drugi aspekt nie jest istotny, może się okazać, że korzystniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie

droższego akcelerometru z cyfrowym sygnałem wyjściowym rozbudowanego o dodatkowe układy korygujące (np. inteligentne akcelerometry serii ADIS wiodącej firmy Analog Devices), wykorzystujące m.in. parametry akcelerometru wyznaczone podczas fabrycznego wzorcowania.

W przypadkach dotyczących pierwszego aspektu, wzorcowanie akcelerometrów MEMS o małym zakresie pomiarowym można w praktyczny sposób zrealizować wykorzystując następujące metody:

- obrót wokół osi poziomej, jak w [1], [11],
- wykorzystanie ekstremalnych wskazań czujnika w położeniach pionowych (górną/dół), jak w [11], [12],
- wykorzystanie przyspieszenia odśrodkowego w ruchu obrotowym,
- wykorzystanie mechanizmu o znanej kinematyce,
- wykorzystanie siłownika o znanej charakterystyce,
- wykorzystanie siłownika sprzężonego z czujnikiem (przyspieszenia, prędkości, położenia), jak w [12], [13],
- wzorcowanie bez wykorzystania stanowiska badawczego, jak w [14].

Każda z powyższych metod wymaga uprzedniego wyjustowania akcelerometru względem osi obrotu stanowiska i ma swoje zalety oraz wady, a są to:

Ad a) zalety: bardzo stabilne źródło odniesienia; mała wrażliwość na błędy orientacji kątowej; możliwość oszacowania dokładności czujnika (metody porównawcze, statystyczne); wady: konieczna duża liczba pomiarów; występowanie zjawiska czułości poprzecznej; pracochłonna i trudna realizacja; wrażliwość na błędy wyjustowania,

Ad b) zalety: bardzo stabilne źródło odniesienia; brak występowania zjawiska czułości poprzecznej; mała wrażliwość na błędy orientacji kątowej i wyjustowania w pozycjach pomiarowych; bardzo prosta realizacja; wady: konieczność założenia liniowości charakterystyki czujnika; nadaje się tylko do czujników o zakresie pomiarowym  $\geq 1g$ ,

Ad c) zalety: występowanie zjawiska czułości poprzecznej poziomej; możliwość dokładnego zadawania prędkości obrotowej (a tym samym stałego przyspieszenia); wady: trudne określenie promienia trajektorii ruchu (nieznane położenie środka masy sejsmicznej akcelerometru – można je określić doświadczalnie stosując wstępne wzorcowanie wg metody b, a następnie wg metody c zadając odpowiednią prędkość kątową); kłopoty z doprowadzeniem przewodów do akcelerometru; występowanie zjawiska czułości poprzecznej pionowej,

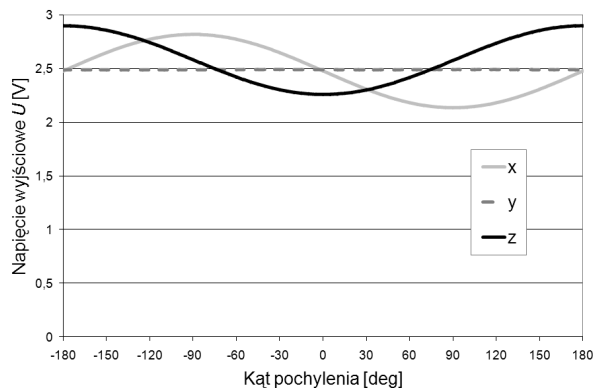
Ad d) zalety: możliwość eliminacji zjawiska czułości poprzecznej (mechanizm o ruchu prostoliniowym); wady: zadawanie zmiennej wartości przyspieszenia (problem przy niestabilnych charakterystykach amplitudowo-fazowych badanego akcelerometru); kosztowna realizacja praktyczna; występowanie luzów i tarcia (zjawiska wprowadzające duże błędy); występowanie błędów kinematycznych mechanizmu,

Ad e) zalety: możliwość eliminacji zjawiska czułości poprzecznej; prosta realizacja; wady: zadawanie zmiennej wartości przyspieszenia; wysoki koszt siłownika,

Ad f) zalety: możliwość eliminacji zjawiska czułości poprzecznej; prosta realizacja; wady: zadawanie zmiennej wartości przyspieszenia; wysoki koszt systemu.

Ad g) zalety: bardzo prosta realizacja; nie jest wymagane dodatkowe oprzyrządowanie; możliwość wzorcowania podczas użytkowania akcelerometru; wady: możliwość wzorcowania tylko w określonych warunkach, zazwyczaj wprowadza duże niedokładności.

W przypadku wykorzystania przedstawionego stanowiska badawczego w grę wchodzi zastosowanie pierwszych dwóch metod. Rozważmy wzorcowanie osi czułości trójosiowego akcelerometru MEMS według metody a). Uzyskane przebiegi sygnałów wyjściowych w takim przypadku przedstawiono na rys. 4. Odpowiadają one zadawaniu kąta pochylenia  $\alpha$  za pomocą stolika 1, przy  $\gamma = 0^\circ$  (rys. 3).



Rys. 4. Przebiegi sygnałów trójosiowego akcelerometru przy wzorcowaniu składowych przyspieszenia w osi  $x$  oraz  $z$   
 Fig. 4. Courses of the signals of a tri-axial accelerometer while calibrating its component accelerations in  $x$ - and  $z$ -axis

Sygnały napięciowe składowych przyspieszenia działających w poszczególnych osiach wyrażają następujące zależności [11]:

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

$$U_y \approx a_y, \quad (2)$$

$$U_z = a_z + b_z \cos(\alpha + c_z), \quad (3)$$

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  $x, y, z$ ,
- $\alpha$  – kąt odchylenia od pionu (pochyleń) zadawany za pomocą stolika obrotowego  $l$ .

W celu wyznaczenia brakującej amplitudy (wzmocnienia) sygnału składowej przyspieszenia w osi  $y$ , nieodzownym jest przeprowadzenie drugiego procesu wzorcowania, polegającego na zadawaniu kąta przechyleń  $\gamma$  za pomocą stolika 2, przy  $\alpha = 0^\circ$  (rys. 3). Przebiegi sygnałów wyjściowych uzyskane w takim przypadku odpowiadają przebiegom przy pierwszym wzorcowaniu, z tą różnicą, że przebieg sygnału składowej przyspieszenia w osi  $y$  wygląda jak przebieg sygnału składowej przyspieszenia w osi  $x$  z rys. 4 i na odwrót. Przebieg sygnału składowej przyspieszenia w osi  $z$  pozostaje w przybliżeniu taki sam. Sygnały napięciowe składowych przyspieszenia działających w poszczególnych osiach wyrażają wtedy następujące zależności:

$$U_y = a_y + b_y \sin(\gamma + c_y), \quad (4)$$

$$U_x \approx a_x, \quad (5)$$

$$U_z = a_z + b_z \cos(\gamma + c_z), \quad (6)$$

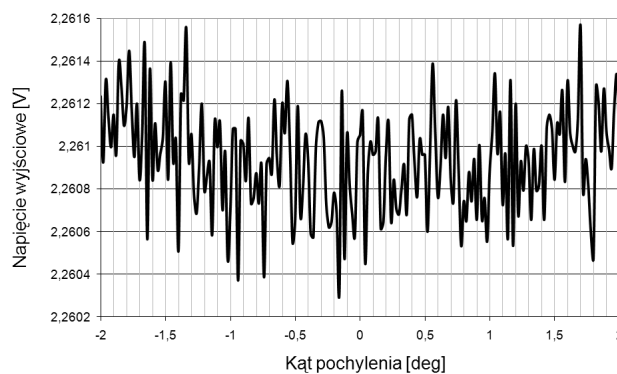
gdzie:

- $\gamma$  – kąt odchylenia od pionu (przechyleń) zadawany za pomocą stolika obrotowego 2.

Wartości parametrów  $a, b, c$  dla każdej składowej wyznacza się za pomocą oprogramowania statystycznego (np. Statgraphics), wykorzystując regresję nieliniową zapisaną w postaci (1), (3), (4) i (6). Parametry  $a_z$  oraz  $b_z$  wyznaczone dla (3) oraz (6) mogą się nieznacznie różnić co do wartości. Przy większej różnicy należy wybrać wartości większe, natomiast przy nieznacznej różnicy warto obliczyć odpowiednie wartości średnie. Przesunięcia fazowe  $c$  można zlikwidować poprzez obrót stolików o kąty odpowia-

dające ich wartościom (ustalając w ten sposób nowe położenia zerowe) lub dokładniejsze wyjustowanie akcelerometru względem osi obrotu stanowiska.

Przy wykorzystaniu do wzorcowania metody b) dla każdej osi akcelerometru trzeba znaleźć pozycje kątowe odpowiadające ekstremalnym wskazaniom. Będą to pozycje:  $\alpha = -90^\circ$  i  $90^\circ$  przy dowolnym  $\gamma$  dla osi  $x$ ;  $\gamma = -90^\circ$  i  $90^\circ$  przy  $\alpha = 0^\circ$  dla osi  $y$ ;  $\alpha = 0^\circ$  i  $180^\circ$  przy  $\gamma = 0^\circ$  oraz  $\gamma = 0^\circ$  i  $180^\circ$  przy  $\alpha = 0^\circ$  dla osi  $z$ . W obszarze tych pozycji należy zadać wiele położen kątowych badanego czujnika, ale w małym zakresie kątowym, jak np. na rys. 5, gdzie położenie kątowe zmieniano w zakresie  $\pm 2^\circ$  przy skoku  $0,02^\circ$  i w każdym z położen dokonywano 30-krotnego odczytu wskazań akcelerometru (na wykresie pokazano średnie wartości wskazań dla każdego położenia kątowego).



Rys. 5. Minimalne wartości sygnału wyjściowego akcelerometru dla składowej przyspieszenia w osi  $z$   
 Fig. 5. Minimal values of the output signal of the component acceleration in  $z$ -axis

Jak widać z rys. 5, przyjmowanie wartości minimalnej napięcia, jak to zaproponowano np. w [11-12], jest dosyć niejednoznaczne i spowodowałoby zwiększenie niedokładności mierzonych przyspieszeń, przeliczanych docelowo na podstawie wskazań akcelerometrów oraz wyznaczonych parametrów  $a$  i  $b$ . Korzystniej jest zastosować te same zależności, co w przypadku wzorcowania wg metody a), tzn. (1) i (3) lub (4) i (6) – nazwijmy to metodą  $b_1$ ), bądź też wyznaczyć wartość średnią w obrębie mniejszego zakresu (np.  $\pm 0,5^\circ$ ) – nazwijmy to metodą  $b_2$ ), a parametry  $a$  i  $b$  wyznaczyć z prostych zależności przedstawionych w [11-12].

Dla odpowiednio przestrzennie skonfigurowanych dwóch akcelerometrów dwuosiowych ADXL 202 E [2], działających jako akcelerometr trójosiowy, wyznaczono wartości składowych stałych oraz amplitud dla poszczególnych osi przy wzorcowaniu wg metody a),  $b_1$ ) oraz  $b_2$ ). Wyniki przedstawiono w poniższej tabeli (dla metody  $b_1$ ) wartości parametrów  $a$  i  $b$  wyznaczono jako średnie wartości dla położenia górnego i dolnego).

Tab. 1. Parametry  $a$  i  $b$  dla metod a),  $b_1$ ) oraz  $b_2$ )  
 Tab. 1. Parameters  $a$  and  $b$  for method a),  $b_1$ ) and  $b_2$ )

| Parametr | Metoda a)<br>[V] | Metoda $b_1$ )<br>[V] | Metoda $b_2$ )<br>[V] |
|----------|------------------|-----------------------|-----------------------|
| $a_x$    | 2,336950         | 2,339                 | 2,336978              |
| $b_x$    | -0,343280        | -0,342                | -0,343293             |
| $a_y$    | 2,490740         | 2,491                 | 2,490490              |
| $b_y$    | 0,341615         | 0,341                 | 0,341435              |
| $a_z$    | 2,578830         | 2,581                 | 2,578066              |
| $b_z$    | -0,317411        | -0,318                | -0,317208             |

Stosowanie metody g), nie wymagającej użycia stanowiska badawczego, możliwe jest na kilka sposobów. Jedno z podejść zaproponowano w [14], gdzie zaprezentowano oryginalną procedurę

wzorcowania akcelerometru trójosiowego. Bazuje ona na wykorzystaniu następującej zależności:

$$\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \approx g, \quad (7)$$

która jest prawdziwa w przypadku, gdy akcelerometr pracuje w warunkach statycznych lub quasi-stycznych (tzn. nie działają na niego żadne stałe przyspieszenia poza grawitacyjnym). Wprowadzenie znaku przybliżenia zamiast równości wynika z występujących tu niepewności pomiarowych oraz ewentualnych błędów filtrowania dolnoprzepustowego.

Jednak błąd wprowadzany przez powyższą metodę autorzy oszacowali na ok. 3% [14], co nawet w przypadku akcelerometru MEMS jest wartością istotnie zwiększającą jego niedokładność.

Jako tego typu metodę wzorcowania można również uznać wykorzystanie funkcji „self test” (posiada ją wiele akcelerometrów MEMS, np. [2-3]). Polega ona na wygenerowaniu w obwodach akcelerometru siły elektrostatycznej symulującej działanie przyspieszenia zewnętrznego. Przy odpowiedniej orientacji kątowej akcelerometru względem pionu (także tylko w warunkach statycznych lub quasi-stycznych), możliwy jest odczyt sygnału wyjściowego odpowiadającego symulowanej wartości przyspieszenia. Jednakże pojawia się tu pytanie, na ile stabilne są skutki działania takiej siły testowej. Odpowiedź na to pytanie można uzyskać jedynie drogą doświadczalną.

Możliwe jest również stosowanie rozważanej metody w przypadku zastosowania akcelerometru w urządzeniu docelowym, monitorowanym w taki sposób, że w niektórych chwilach pojawia się precyzyjna informacja o wartości i kierunku działania przyspieszenia zewnętrznego oddziaływującego na akcelerometr oraz o orientacji kątowej akcelerometru względem pionu. Wówczas, na podstawie takiej informacji w danej chwili wyznaczyć można parametry  $a$  i  $b$  dla poszczególnych osi czułości akcelerometru.

#### 4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono stanowisko badawcze oraz różne metody umożliwiające przeprowadzenie procesu wzorcowania akcelerometrów MEMS. Wykazano, że prowadzenie prac eksperymentalnych w przemyślny sposób może zaowocować poprawą parametrów metrologicznych wykorzystywanego akcelerometru. Uzyskać to można dzięki eliminacji błędów wynikających z przyjętej metody wzorcowania czujnika.

Na podstawie danych zawartych w Tab. 1 widać, że zastosowane metody dają wyniki różniące się w zakresie poniżej 1% (metody  $a$  i  $b_1$ ): 0,52%; metody  $a$  i  $b_2$ ): 0,06%). Jest to spowodowane przede wszystkim występowaniem zjawiska czułości poprzecznej akcelerometru. Wartości parametrów  $a$  i  $b$  uzyskane metodą  $b_1$  i  $b_2$  uznać należy za bardziej wiarygodne, ponieważ nie są obciążone wspomnianym zjawiskiem, przy czym metoda  $b_2$  okazała się znacznie dokładniejsza.

Należy jednak pamiętać, że przy braku uwzględnienia zjawiska czułości poprzecznej lepiej jest korzystać z parametrów  $a$  i  $b$

wyznaczonych wg metody  $a$ ), chyba że korzystamy z ograniczonego zakresu wskazań akcelerometrów, w którym zjawisko czułości poprzecznej nie ma istotnego znaczenia. W wypadku pomiaru odchylenia od pionu (za który uznano przeprowadzone procesy wzorcowania, gdzie wspomniane zjawisko występowało) maksymalne błędy pomiarowe wyniosły ok. 0,4° dla metody  $a$ ), ok. 0,7° dla metody  $b_1$ ) oraz ok. 0,5° dla metody  $b_2$ ). Tak więc widać, że nawet niewielka różnica w wartości parametrów napięciowych akcelerometru (poniżej 1%) skutkuje znacznym wzrostem błędów jego wskazań (ponad 70%) w przeliczeniu na kąt odchylenia od pionu.

Dalsze wyniki zrealizowanych prac badawczych autor przedstawił w artykule stanowiącym drugą część podjętej tematyki, pt. „Doświadczalne wyznaczanie wybranych parametrów akcelerometrów MEMS – wyniki prac badawczych”.

#### 5. Literatura

- [1] Bütefisch S., Schoft A., Büttgenbach S.: Three-Axes Monolithic Silicon Low-g Accelerometer, *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 9, no. 4, 2000, s. 551-556.
- [2] Low Cost  $\pm 2g$  Dual Axis Accelerometer with Duty Cycle Output, ADXL 202E, Analog Devices Inc., Norwood, MA, USA, 2000.
- [3] Low Cost  $\pm 1.2g$  Dual Axis Accelerometer, ADXL 213, Analog Devices Inc., Norwood, MA, USA, 2004.
- [4] AX301 Three-Axis Accelerometer Module, Preliminary Specifications, Sentra Technology Corporation, Berkeley, CA, USA, 2003.
- [5] Model 900 Biaxial Clinometer Data Sheet, Applied Geomechanics, Santa Cruz, CA, USA, 1995.
- [6] Wilson J.: *Sensor Technology Handbook*, Newnes, 2005, s. 398-399.
- [7] Łuczak S.: Dual-Axis Test Rig for MEMS Tilt Sensors. *Metrology and Measurement Systems*, artykuł w procesie recenzji.
- [8] Łuczak S.: Experimental Studies of Miniature Tilt Sensors, *Elektronika*, no. 8-9/2004, 2004, s. 215-218.
- [9] Popowski S.: Wyznaczanie kąta pochyleń i przechyleń w tanich systemach nawigacji lądowej, *J. Aeronautica Integra*, no. 1/2008 (3), 2008, s. 93-97.
- [10] Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik. Główny Urząd Miar, Warszawa, 1999, s. 112-113.
- [11] Low g Accelerometer Non-Linearity Measurement, #AN-00MX-014. Application Note n/r 5/12/03, MEMSIC Inc., North Andover, MA, USA, 2005.
- [12] Ang W. T., Khosla P. K. and Riviere C. N.: Nonlinear regression model of a low-g MEMS accelerometer, *IEEE Sensors Journal*, vol. 7, 2007, s. 81-88.
- [13] 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.
- [14] Lötters J. C., Schipper J., Veltink P. H., Olthuis W., Bergveld P.: Procedure for in-use calibration of triaxial accelerometers in medical applications, *Sensors & Actuators*, vol. A 68, 1998, s. 221-228.

otrzymano / received: 13.04.2011

przyjęto do druku / accepted: 03.10.2011

artykuł recenzowany

## INFORMACJE

## Sprostowanie

W numerze 09/2011 zostało omyłkowo wydrukowane zdjęcie innej osoby zamiast zdjęcia prof. dr hab. Wojciecha Moczulskiego.