

**Dariusz BUCHCZIK, Adam RYBA**  
POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT AUTOMATYKI,  
ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice

## Wzorcowanie akcelerometrów z wykorzystaniem losowych przebiegów pobudzających

Dr inż. Dariusz BUCHCZIK

Absolwent Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w 2005r. Pracuje jako adiunkt w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej. Swoje zainteresowania naukowe koncentruje wokół odpornych procedur estymacji z wykorzystaniem metody najmniejszej mediany kwadratów. Interesuje się również problematyką systemów diagnostyki wibracyjnej maszyn oraz wzorcowaniem czujników przyspieszenia.

e-mail: [dariusz.buchczik@polsl.pl](mailto:dariusz.buchczik@polsl.pl)



Mgr inż. Adam RYBA

Ukończył studia na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej na specjalności automatyka. Studiował również na Technische Universiteit Eindhoven w Holandii. Interesuje się zagadnieniami identyfikacji procesów, sterowaniem procesami, cyfrowym przetwarzaniem sygnałów i programowaniem systemów sterowania.

e-mail: [adamryba@plusnet.pl](mailto:adamryba@plusnet.pl)



### Streszczenie

W pracy została omówiona metoda wzorcowania akcelerometrów z wykorzystaniem losowych przebiegów pobudzających. Zaproponowano również procedurę szacowania niepewności wyznaczonych charakterystyk. Najważniejszą zaletą metody jest bardzo krótki czas trwania eksperymentu pomiarowego. Oszacowane niepewności wzorcowania sięgają kilkunastu procent. Metoda może być stosowana, gdy konieczne jest szybkie sprawdzenie charakterystyk czujnika, a niepewność wyników ma znaczenie drugorzędne.

**Słowa kluczowe:** wzorcowanie, niepewność, akcelerometry.

### Calibration of accelerometers using random excitation

#### Abstract

A method for accelerometer calibration with the use of random excitation is presented in this paper. Amplitude and phase characteristics are determined based on the evaluation of power spectral density and cross power spectral density of input and output signals. A random signal with characteristics of white noise is used in calibration. Evaluation of the uncertainty of the results is determined when taking into consideration components type A and B. Vibration calibration with the use of an electromagnetic vibration exciter, as shown in Fig. 1, was applied in the investigations. The measuring system is very similar to the measurement system used in back-to-back comparison method. The DAQ board allows signal generation and measurement at a certain sampling rate for further processing in the frequency domain. The method was verified on a single-axis piezoelectric sensor type PCB 338B35 and a biaxial capacitive accelerometer based on the ADXL 202. The frequency characteristics of the sensors determined are shown in Figs. 2-5. The most important advantage of the method is the very short duration of the measuring experiment. The relative expanded uncertainties of the calibration procedure reach several percent and are far greater compared to the values mentioned in the standard ISO 16063-21. The method can be used in situations in which it is necessary to quickly check the sensor characteristics, for example in the field for periodic maintenance of sensors mounted on the object.

**Keywords:** calibration, uncertainty, accelerometers.

### 1. Wstęp

Metoda wzorcowania akcelerometrów wykorzystująca różne przebiegi pobudzające nie jest unormowana. W przeciwieństwie do metody porównania ze wzorcem, gdzie wykorzystuje się wartości skuteczne sygnałów z akcelerometrów, metoda ta opiera się na analizie w dziedzinie częstotliwości sygnału wyjściowego z akcelerometru wzorcowego oraz sygnału wyjściowego akcelerometru badanego. Charakterystyki częstotliwościowe badanych akcelerometrów wyznacza się na podstawie oceny wzajemnej gęstości mocy pomiędzy sygnałami z akcelerometru wzorcowego

i badanego oraz oceny gęstości widmowej mocy sygnału z akcelerometru wzorcowego [1].

### 2. Procedura wzorcowania

Najnowsza norma ISO 16063-21 opisująca metodę porównania ze wzorcem nie opisuje dokładnie procedury wzorcowania sygnałami innymi niż sygnał sinusoidalny. Jedynie wspomina o możliwości wzorcowania sygnałem losowym oraz sygnałem wielosinusoidalnym bez dokładnego opisu tej procedury.

Zgodnie z normą ISO 16063-21 sugerowana rozszerzona niepewność względna kalibracji nie powinna być większa od 2% dla zakresu częstotliwości od 0,4 Hz do 1000 Hz, 4% dla zakresu od 1 kHz do 2 kHz lub 6% dla zakresu od 2 kHz do 10 kHz.

Kalibracja metodą porównania ze wzorcem polega na wykorzystaniu sygnału z akcelerometru wzorcowego  $u(i)$  oraz z akcelerometru badanego  $y(i)$ . Sygnały są próbkowane z okresem  $T_p$  i mają długość  $N$  próbek. Kolejno sygnały zostają podzielone na  $L$  odcinków, każdy o długości  $N_p$  próbek, w celu przeprowadzenia w toku dalszych obliczeń operacji uśredniania (wygładzania po zbiorze realizacji).

Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościową oraz fazowo-częstotliwościową dla każdego z  $L$  odcinków oblicza się odpowiednio z zależności:

$$H_n(\Omega'm') = \frac{\hat{S}_{wy}^{Np}(j\Omega'm')}{\hat{S}_{uu}^{Np}(j\Omega'm')} Q_r, \quad (1)$$

$$\varphi_n(\Omega'm') = \arg \left[ \frac{\hat{S}_{wy}^{Np}(j\Omega'm')}{\hat{S}_{uu}^{Np}(j\Omega'm')} Q_r \right] + \varphi_r, \quad (2)$$

gdzie:  $\hat{S}_{wy}^{Np}(j\Omega'm')$  - ocena wzajemnej gęstości widmowej mocy pomiędzy sygnałami z akcelerometru wzorcowego i badanego,  $\hat{S}_{uu}^{Np}(j\Omega'm')$  - ocena gęstości widmowej mocy sygnału z akcelerometru wzorcowego,  $Q_r$ ,  $\varphi_r$  - odpowiednio czułość znamionowa i przesunięcie fazowe akcelerometru wzorcowego.

Ostatecznie oblicza się uśrednioną charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową oraz fazowo-częstotliwościową:

$$\overline{H(\Omega'm')} = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L H_n(j\Omega'm'), \quad (3)$$

$$\overline{\varphi(\Omega'm')} = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L \varphi_n(j\Omega'm'). \quad (4)$$

Sygnal losowy wykorzystywany przy wzorcowaniu jest sygnałem o charakterystyce białego szumu. Szum biały charakteryzuje się płaskim widmem mocy w całym zakresie częstotliwości  $(0, +\infty)$ . W praktyce uzyskanie takiego sygnału nie jest możliwe, gdyż oznaczałoby to nieskończoną moc sygnału. Możliwy do uzyskania biały szum cechuje się płaskim widmem mocy do pewnej częstotliwości, powyżej której moc maleje.

Przebieg  $x(i)$  jest sygnałem losowym o rozkładzie normalnym i wariancji  $\sigma^2$ . Ocena gęstości widmowej mocy białego szumu wyraża się zależnością:

$$S_{xx}^N(\Omega m) = T_p \sigma^2 \quad (5)$$

### 3. Szacowanie niepewności

Szacowanie niepewności typu A polega na obliczeniu niepewności drogą analizy statystycznej serii pomiarów. Najlepszym oszacowaniem wartości oczekiwanej mierzonej wielkości jest wartość średnia z serii pomiarów. W przypadku oszacowania niepewności typu A dla punktów charakterystyki amplitudowej możemy wyznaczyć niepewność w przypadku wygładzania charakterystyki na podstawie  $L$  punktów (liczba odcinków) dla danej częstotliwości względnej  $\Omega' m'$ . Wartość poprawną punktu charakterystyki amplitudowej oblicza się ze wzoru (3).

Odchylenie standardowe pojedynczego wyniku dla danej częstotliwości względnej  $\Omega' m'$ :

$$\sigma_{H(\Omega' m')} = \sqrt{\frac{1}{L-1} \sum_{n=1}^L [H_n(\Omega' m') - \overline{H_n(\Omega' m')}]^2} \quad (6)$$

Niepewność standardowa typu A dla danej częstotliwości względnej jest równa:

$$u_A = \sigma_{H(\Omega' m')} = \frac{\sigma_{H(\Omega' m')}}{\sqrt{L}} \quad (7)$$

Względna niepewność standardowa typu A dla danej częstotliwości względnej wynosi:

$$u_A^o = \frac{\sigma_{H(\Omega' m')}}{H(\Omega' m')} \quad (8)$$

Ostatecznym wynikiem jest zbiór wartości niepewności typu A składający się z niepewności wygładzonych czułości dla wszystkich względnych częstotliwości.

Ocena niepewności typu B dotyczy obliczania niepewności sposobami innymi niż analiza serii obserwacji. Niepewność standardową typu B określa się na drodze analizy opartej na wszystkich dostępnych informacjach (dane urządzeń, wyniki wzorcowania itp.). Uwzględniając wartości błędów granicznych  $\Delta_{gi}$  wszystkich przyrządów znajdujących się na stanowisku pomiarowym, całkowita niepewność  $u_B$  stanowiska obliczana jest z zależności:

$$u_B = \frac{\sqrt{\sum_i \Delta_{gi}^2}}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

Względna niepewność standardowa typu B wynosi:

$$u_B^o = \frac{\sqrt{\sum_i \delta_{gi}^2}}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

Złożona niepewność standardowa uwzględniająca niepewność typu A oraz B jest wyznaczana z zależności:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (11)$$

Niepewność rozszerzona jest iloczynem współczynnika rozszerzenia  $k_\alpha$  oraz standardowej niepewności złożonej:

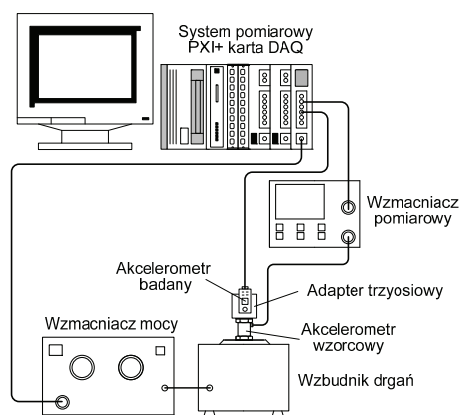
$$U = k_\alpha u_C \quad (12)$$

Współczynnik rozszerzenia  $k_\alpha$  jest wyznaczany na podstawie dominującej niepewności. W przypadku niewielkiej serii pomiarów, gdy liczba odcinków do uśredniania  $L < 10$  współczynnik rozszerzenia jest wyznaczany z rozkładu t-Studenta dla poziomu ufności 95% i stopnia swobody  $\nu = L - 1$ . W przypadku większej liczby odcinków do uśredniania  $L \geq 10$  współczynnik rozszerzenia wyznaczany jest na podstawie rozkładu normalnego, dla poziomu ufności 95%  $k_\alpha = 2$ .

### 4. Stanowisko badawcze

Do badań wykorzystano stanowisko laboratoryjne do badania akcelerometrów metodą porównawczą z wykorzystaniem elektromagnetycznego wzbudnika drgań, którego schemat pokazano na rys. 1. System pomiarowy jest podobny do systemu pomiarowego używanego w metodzie porównania ze wzorcem [2, 3]. W tym przypadku zamiast woltomierza, który mierzy napięcia skuteczne sygnałów wyjściowych z akcelerometrów, jest zastosowana karta DAQ, która umożliwi pomiar przebiegów z określoną częstotliwością próbkowania w celu dalszego przetwarzania w dziedzinie częstotliwości.

Stanowisko jest wyposażone w akcelerometr wzorcowy typu BK 8305S, wzmacniacz pomiarowy BK 2525 i wzbudnik drgań BK 4809. System pomiarowy PXI firmy National Instruments wyposażony w kartę DAQ serii M typu PXI 6251, wykorzystywany jest do generowania i pomiarów przebiegów oraz wykonywania obliczeń. System PXI jest wyposażony w system operacyjny Windows XP, środowisko programistyczne LabVIEW do obsługi kart PXI oraz pakiet Microsoft Office do przygotowywania raportów. Dostęp do sieci ułatwia przekazywanie danych.



Rys. 1. Schemat stanowiska laboratoryjnego do wzorcowania akcelerometrów  
Fig. 1. Diagram of the measurement system for accelerometer calibration

Całkowita względna niepewność standardowa typu B stanowiska wynosi  $u_B^o = 2,2\%$ . Głównym źródłem niepewności typu B jest błąd wzmocnienia sygnału przez wzmacniacz pomiarowy BK 2525.

Złożony proces przetwarzania danych pomiarowych wymagał opracowania odpowiedniej aplikacji. Został wykonany uniwersalny program w środowisku LabView, którego celem jest wykonywanie procedury wzorcowania, pomiaru oraz zapisu danych pomiarowych, a także zobrazowanie otrzymanych przebiegów oraz rezultatów.

Struktura programu jest podzielona na kilka odrębnych części:

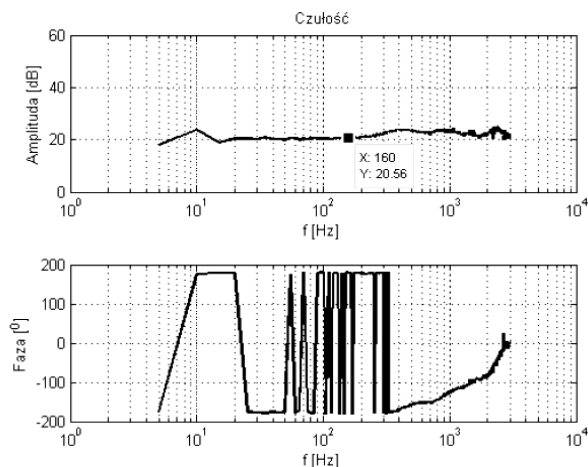
1. Konfiguracja sprzętowa, ustawienie punktu pracy wzmacniacza mocy,
2. Identyfikacja gęstości widmowej mocy sygnału z akcelerometru wzorcowego,
3. Konfiguracja sygnałów pobudzających używanych w procedurze wzorcowania,
4. Podgląd otrzymanych charakterystyk,
5. Zapis otrzymanych danych do pliku.

Program został napisany zgodnie z modelem aplikacji producent - konsument. Całość aplikacji składa się z kilku podprogramów (subVI) realizujących wybrane zadania, między innymi generację sygnałów pobudzających, wyznaczenie amplitudy sygnału na podstawie modelu odwrotnej charakterystyki statycznej w celu wygenerowaniażądanego przyśpieszenia, zapis danych pomiarowych do pliku tekstowego czy też konfigurację aparatury pomiarowej.

## 5. Wyniki badań

Badania procedury wzorcowania akcelerometrów losowym przebiegiem pobudzającym wykonano z wykorzystaniem dwóch akcelerometrów. Pierwszy z nich to czujnik piezoelektryczny jednoosiowy PCB 338B35, natomiast drugi to czujnik skonstruowany w Instytucie Elektroniki Politechniki Śląskiej z wykorzystaniem dwuosiowego akcelerometru pojemnościowego ADXL 202. Budowa czujnika z akcelerometrem ADXL 202 jest zoptymalizowana pod kątem zastosowania do pomiarów stosunkowo niewielkich przyspieszeń w zakresie niskich częstotliwości. Konstrukcję czujników i ich przeznaczenie do pomiarów biomechanicznych opisano w [3, 5].

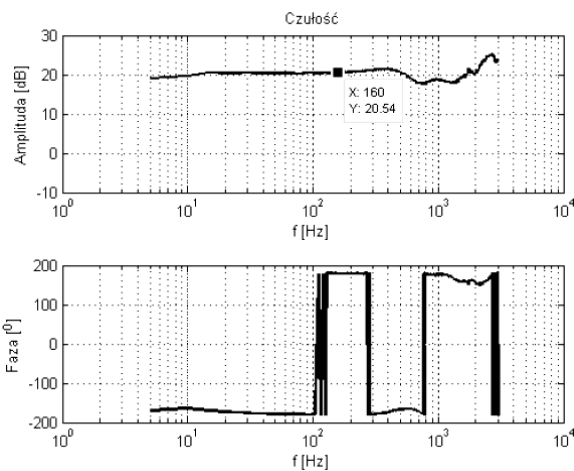
W pierwszej fazie badań został wykorzystany akcelerometr piezoelektryczny PCB 338B35. Generowanym sygnałem pobudzającym był sygnał losowy o wartości skutecznej 2,5 V. Zarejestrowano 12000 próbek przy częstotliwości próbkowania 6 kHz. Charakterystyki uśredniono na podstawie  $L = 10$  odcinków po 1200 próbek. Wyznaczone charakterystyki czułości przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Charakterystyka częstotliwościowa czułości akcelerometru piezoelektrycznego PCB 338B35 wyznaczona w pierwszym etapie badań  
Fig. 2. Frequency characteristics of the PCB 338B35 piezoelectric accelerometer determined in the first stage of the research

Dla częstotliwości referencyjnej 160 Hz odczytano czułość akcelerometru  $10,67 \text{ mV s}^2/\text{m}$ . Względna niepewność rozszerzona dla tej częstotliwości wynosi  $4,6\%$  ( $\pm 0,49 \text{ mV s}^2/\text{m}$ ). Maksymalna wartość czułości w przedziale częstotliwości od 1 Hz do 2000 Hz wynosi  $16,6 \text{ mV s}^2/\text{m}$  (56%) dla częstotliwości 1080 Hz.

Badania zostały powtórzone w celu weryfikacji otrzymanych wcześniej wyników. Zmniejszono tym razem wartość skuteczną szumu pobudzającego pięciokrotnie do 0,5 V. Uzyskane charakterystyki umieszczono na rys. 3.

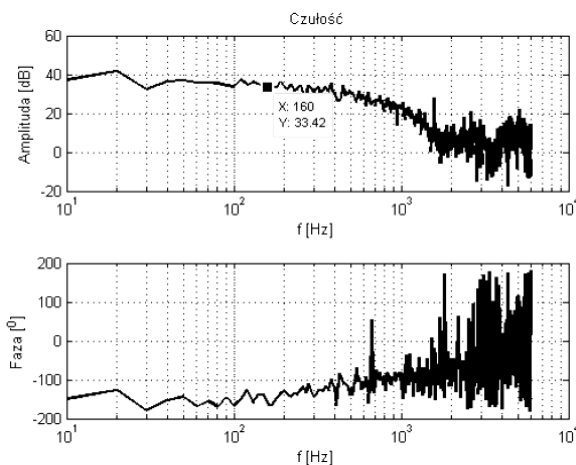


Rys. 3. Charakterystyka częstotliwościowa czułości akcelerometru piezoelektrycznego PCB 338B35 wyznaczona w drugim etapie badań  
Fig. 3. Frequency characteristics of the PCB 338B35 piezoelectric accelerometer determined in the second stage of the research

Dla drugiego pobudzenia uzyskano czułość  $10,64 \text{ mV s}^2/\text{m}$  ze względną niepewnością rozszerzoną  $4,5\%$  ( $\pm 0,48 \text{ mV s}^2/\text{m}$ ) dla częstotliwości referencyjnej 160 Hz. Maksymalne odchylenie od wartości znamionowej w zakresie od 1 Hz do 2000 Hz znajduje się dla częstotliwości 675 Hz, gdzie czułość akcelerometru wynosi  $7,66 \text{ mV s}^2/\text{m}$ , co stanowi błąd względny 28%.

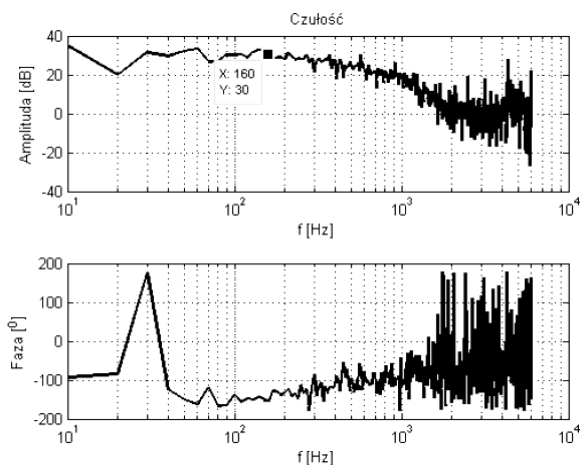
Wartość czułości deklarowanej przez producenta mieści się w zakresach niepewności otrzymanych rezultatów. Najmniejsze odchylenie od czułości znamionowej w zakresie od 1 Hz do 2000 Hz otrzymano dla pobudzenia o wartości skutecznej 0,5 V. Różni się ono jednak znacząco od wartości podanej przez producenta, czyli 5%.

Kolejno uzyskano charakterystyki czujnika z akcelerometrem pojemnościowym ADXL 202. W tym przypadku częstotliwość próbkowania wynosiła 12 kHz, a liczba próbek 24000. Charakterystyki, które zamieszczono na rys. 4, uśredniono na podstawie  $L = 20$  odcinków po 1200 próbek. Generowany sygnał losowy charakteryzował się wartością skuteczną równą 0,5 V.



Rys. 4. Charakterystyka częstotliwościowa czułości czujnika z akcelerometrem pojemnościowym ADXL 202 wyznaczona w pierwszym etapie badań  
Fig. 4. Frequency characteristics of the sensor based on ADXL 202 capacitive accelerometer determined in the first stage of the research

Dla częstotliwości odniesienia uzyskano czułość  $46,88 \text{ mV s}^2/\text{m}$  ze względną niepewnością rozszerzoną  $41,42\%$ , co odpowiada  $\pm 19,42 \text{ mV s}^2/\text{m}$ . Wartość czułości znacznie odbiega od deklarowanej przez producenta. Procedura więc została powtórzona dla większej wartości skutecznej sygnału pobudzającego, która wyniosła 1 V.



Rys. 5. Charakterystyka częstotliwościowa czułości czujnika z akcelerometrem pojemnościowym ADXL 202 wyznaczona w drugim etapie badań

Fig. 5. Frequency characteristics of the sensor based on ADXL 202 capacitive accelerometer determined in the second stage of the research

Otrzymane wyniki, przedstawione na rys. 5, uległy znacznej poprawie w porównaniu do uzyskanych poprzednio. Czułość znamionowa wynosi  $31,63 \text{ mV s}^2/\text{m}$ , natomiast względna niepewność rozszerzona wynosi  $31,46\%$  dla częstotliwości odniesienia  $160 \text{ Hz}$ , co odpowiada  $\pm 9,95 \text{ mV s}^2/\text{m}$ . Zakres częstotliwości czujnika z akcelerometrem pojemnościowym ADXL 202 zawiera się w przedziale od  $0 \text{ Hz}$  do  $200 \text{ Hz}$ , co wynika z zastosowanego w układzie filtra dolnoprzepustowego. Przy pobudzeniu drugim sygnałem dla częstotliwości odniesienia  $160 \text{ Hz}$  uzyskano czułość o wartości bardzo zbliżonej do deklarowanej przez producenta.

## 6. Wnioski

Wyniki przeprowadzonych badań pokazują, że metoda wzorcowania z wykorzystaniem losowych przebiegów pobudzających może być z powodzeniem stosowana do kalibracji akcelerometrów zarówno piezoelektrycznych, jak i półprzewodnikowych. Przedstawiona procedura wzorcowania umożliwia wyznaczenie czułości znamionowej dla danej częstotliwości referencyjnej, charakterystyk

amplitudowo-częstotliwościowych i fazowo-częstotliwościowych oraz oszacowanie niepewności uzyskanych wyników.

Najważniejszą zaletą metody bazującej na pobudzeniu przebiegiem losowym, w porównaniu do klasycznej metody opartej na pobudzeniu sinusoidalnym, jest bardzo krótki czas trwania eksperymentu pomiarowego. Zazwyczaj nie przekracza on kilku sekund. Wartości niepewności dla częstotliwości referencyjnej otrzymane w trakcie procedury wzorcowania są jednak zdecydowanie większe niż opisuje norma, sięgają kilkunastu procent. Metoda może być stosowana w przypadku gdy konieczne jest szybkie sprawdzenie charakterystyk czujnika, na przykład w warunkach polowych przy okresowej konserwacji czujników zamontowanych na obiekcie.

Istotnym czynnikiem wpływającym na wyniki wzorcowania są liczba odcinków uśredniających charakterystykę oraz liczba rejestrowanych próbek. Dalsze prace nad optymalnym doбором tych parametrów mogą doprowadzić do zmniejszenia niepewności uzyskiwanych wyników i poprawy wyznaczanych charakterystyk.

## 7. Literatura

- [1] Wang F. Q., Guo Y. Z., Xu X. Z.: Influence of different excitation methods on vibration calibration. ISA Transactions, 1995.
- [2] ISO 16063-21: Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Vibration calibration by comparison to a reference transducer. 2003.
- [3] Buchezik D., Wyżgolik R., Pietraszek S.: Comparative study of acceleration transducers for biomedical applications. Proceedings of SPIE, vol. 6348, ss. 63480U-1- 63480U-10, 2006.
- [4] Buchezik D., Wyżgolik R., Rusok J.: Stanowisko do kalibracji czujników drgań w zakresie niskich częstotliwości. Przegląd Elektrotechniczny, nr 12, ss. 293-296, 2008.
- [5] Wyżgolik R., Buchezik D., Pietraszek S.: Low-frequency acceleration transducers for biomedical applications - the construction and the calibration. XXII Eurosensors, Dresden, Conference proceedings, ss. 417-420, 2008.

otrzymano / received: 04.05.2014

przyjęto do druku / accepted: 01.07.2014

artykuł recenzowany / revised paper

## INFORMACJE

### Procedura recenzowania artykułu w miesięczniku PAK

1. Wszystkie artykuły naukowe zgłoszone do publikacji w miesięczniku PAK podlegają procedurze recenzowania.
2. Artykuł recenzowany jest przez dwóch niezależnych Recenzentów.
3. Recenzentami są samodzielni pracownicy nauki lub pracownicy ze stopniem naukowym doktora, kompetentni w danym zakresie merytorycznym, spoza ośrodka, z którego jest autor/-rzy.
4. Recenzentów wskazuje redaktor naczelny lub redaktorzy tematyczni.
5. Artykuł w języku innym niż język polski jest recenzowany conajmniej przez jednego recenzenta z instytucji zagranicznej innej niż narodowość autora publikacji.
6. Okres oczekiwania na recenzje wynosi 1 miesiąc.
7. Dla autorów poszczególnych artykułów recenzenci są anonimowi.
8. Recenzent przygotowuje recenzje na formularzu recenzji (2012-formularz-recenzji.doc) opracowanym przez redakcję.
9. Recenzja jest w formie pisemnej i kończy się jednoznacznym wnioskiem co do dopuszczenia artykułu do publikacji lub jego odrzucenia.
10. Nazwiska recenzentów poszczególnych artykułów nie są ujawniane. Pełna lista recenzentów zostaje opublikowana w ostatnim numerze miesięcznika PAK w danym roku oraz na stronie internetowej ([www.pak.info.pl](http://www.pak.info.pl)).
11. Recenzje przechowywane są w redakcji PAK w Gliwicach przez okres 5 lat.

Tadeusz SKUBIS  
Redaktor naczelny Wydawnictwa PAK