

# Zastosowanie technologii MEMS w nowoczesnym sterowniku pralki do kontroli drgań bębna

Grzegorz Pittner, Dominik Rybarczyk, Piotr Owczarek  
Politechnika Poznańska

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia możliwość zastosowania technologii MEMS przy pomiarach wibracji bębna maszyny wirującej przez jej sterownik na przykładzie klasycznej pralki. W artykule przedstawiono pokrótce samą technologię MEMS pod kątem pomiarów akcelerometrycznych oraz omówiono zjawisko powstawania siły niewyrównoważenia wirującego bębna pralki, którą to akcelerometr ma zmierzyć. W drugiej części artykułu przedstawiono wyniki porównania pomiarów drgań wirującego bębna za pomocą sensora MEMS oraz klasycznego piezoelektrycznego akcelerometru pomiarowego. Wyniki badań udowadniają tezę o potencjalnej możliwości zastosowania technologii MEMS w gałęzi przemysłu jaką są konstrukcje urządzeń AGD – w szczególności pralek.

**Słowa kluczowe:** pomiary drgań, pralki, MEMS

## 1. Wprowadzenie

Jedną z ostatnich faz procesu prania jest operacja wirowania polegająca na rozpędzeniu bębna pralki wraz z wsadem do prędkości rzędu 1000-1200 obr/min w celu odsączenia wody z materiału za pomocą siły odśrodkowej. Skuteczność tego procesu jest wprost proporcjonalna do prędkości obrotowej bębna. Ponieważ środek masy wsadu bębna nie pokrywa się z osią jego obrotu powstaje sinusoidalnie zmienna siła niewyrównoważenia mająca spory wpływ na działanie układu mechanicznego. Siła niewyrównoważenia powoduje przemieszczanie się bębna wewnątrz ramy pralki co skutkuje hałasem, zużyciem się elementów, a w skrajnych przypadkach kolizją bębna z obudową lub przemieszczaniem się pralki po pomieszczeniu [2].

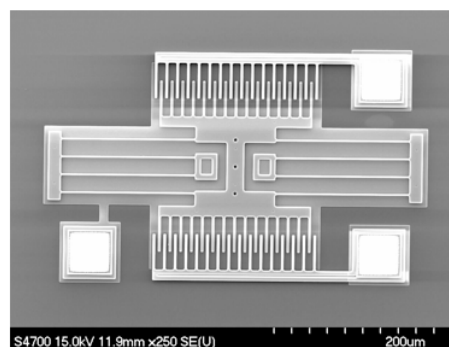
Producenci pralek zabezpieczają konstrukcję przed tym szkodliwym zjawiskiem poprzez dociążenie bębna cementowymi odważnikami oraz obniżeniem dopuszczalnej ładowności, co skutkuje pogorszeniem parametrów handlowych urządzenia takich jak masa całkowita oraz dopuszczalna masa odwirowywanego wsadu. W sytuacjach skrajnych, gdy niewyrównoważenie jest zbyt duże, sterownik pralki obniża prędkość wirowania, co znacząco wpływa na powstawanie siły odśrodkowej działającej na wsad, a więc obniża skuteczność procesu wirowania – wsad prania po zakończeniu procesu zawiera wówczas więcej wody.

Istnieje wiele nowoczesnych rozwiązań kompensacji niewyrównoważenia wirującego bębna, które można podzielić na metody aktywne [6, 7, 8] polegające na dodaniu do układu energii w taki sposób aby stłumić powstające

wibracje oraz metody semi-aktywne [3, 4, 5] polegające na kontrolowaniu za pomocą biernych elementów tłumiących, tak aby dostosować ich charakterystykę tłumienia do aktualnych parametrów układu. Poważną wadą większości proponowanych rozwiązań jest konieczność pomiaru przyspieszeń bębna w celu dostosowania bądź to energii balansującej bądź charakterystyki elementów tłumiących. W konstrukcjach wirówek przemysłowych i wirujących maszyn technologicznych koszt klasycznego sensora akcelerometrycznego opartego na masie sejsmicznej połączonej z piezoelementem stanowi z reguły zaledwie drobny ułamek sumarycznego kosztu całego urządzenia. Jednak niektóre gałęzie przemysłu, jak na przykład przemysł AGD, są bardziej podatne na koszty elementów. W przypadku klasycznej konstrukcji pralki koszt prostego akcelerometru niezbędnego do praktycznej implementacji aktywnych bądź semi-aktywnych metod kompensacji drgań wynosić może nawet ponad 1/3 ceny całego urządzenia, co w praktyce eliminuje możliwość aplikacji na rynku wielu rozwiązań. Alternatywą może okazać się zastosowanie akcelerometrów opartych o technologię MEMS, które mimo opisanych wyżej wad nadają się do prostych odczytów, a ich cena potrafi być nawet 20-krotnie niższa niż klasycznych akcelerometrów piezoelektrycznych.

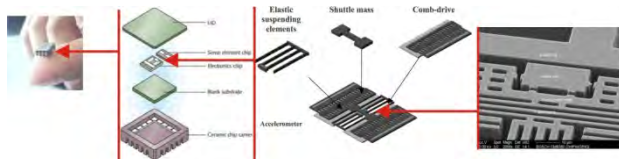
## 2. Czujniki oparte na technologii MEMS

Technologia MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) opiera się na koncepcji zintegrowanych układów elektro-mechanicznych, których co najmniej jeden wymiar szczególnie znajduje się w skali mikro (0,1–100  $\mu\text{m}$ ). Całość struktury wytrawiona jest metodą fotolitografii podobną do wykorzystywanej przy wytwarzaniu przyrządów półprzewodnikowych i układów scalonych. W technologii tej można wykonać szereg różnego rodzaju sensorów w tym między innymi akcelerometrów.



**Rys. 1.** Przykład układu wykonanego w technologii MEMS  
**Fig. 1.** A sample of MEMS technology device

Konstrukcja akcelerometru wykonanego w technologii MEMS bazuje na masie bezwładnej zawieszona na sprężystych belkach. Centralna ruchoma belka tworzy wraz z nieruchomymi belkami strukturę grzebieniową, która jest wychylana z położenia równowagi przez zewnętrzne siły bezwładności. Ruchoma belka jest jednocześnie ruchomą okładką w strukturze kondensatora różnicowego, który utworzony jest przez odpowiednie połączenia elektryczne belek struktury grzebieniowej. Przy pojemnościowym odczycie sygnału masa bezwładna pełni rolę centralnej elektrody w układzie kondensatora różnicowego. Struktura taka zapewnia dużą liniowość pomiaru, a ponadto możliwość pracy w układzie elektromechanicznego sprzężenia zwrotnego przywracającego położenie równowagi masy sejsmicznej odchylanej siłą bezwładności.



Rys.2. Budowa akcelerometru opartego o technologię MEMS

Fig. 2. MEMS accelerometer construction

Akcelerometry MEMS mogą stanowić alternatywę dla klasycznych akcelerometrów piezoelektrycznych z masą sejsmiczną. W porównaniu z nimi charakteryzują się one znacznie gorszą rozdzielczością pomiarową, niskimi częstotliwościami pracy oraz znacznie gorszą powtarzalnością czułości w obrębie populacji serii produkcyjnej. Jako zalety można wymienić przede wszystkim cenę, która potrafi wynosić nawet 1/20 ceny zwykłego akcelerometru piezoelektrycznego, zaś problematykę słabej powtarzalności czułości można rozwiązać poprzez indywidualne kalibrowanie każdego sensora z osobna. Cechy te pozwalają na zaaplikowanie akcelerometrów MEMS w tych aplikacjach, w których nie jest wymagana duża rozdzielczość pomiarowa, a sygnał mierzony charakteryzuje się stosunkowo niską częstotliwością, w granicach od 0 do ok. 1 kHz, natomiast ze względu na cenę, możliwość realizacji pomiaru klasycznymi sensorami drgań w produkcji masowej jest nie do przyjęcia [9, 10, 11, 12].

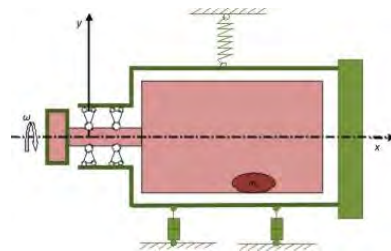
### 3. Powstawanie drgań bębna

Konstrukcję bębna pralki można podzielić na masy wirujące, masy niewirujące oraz na zawieszenie w postaci tłumików i sprężyn. Masa wsadu wprawiona w ruch powoduje powstanie siły, która oddziałuje na zawieszanie w sposób pulsacyjny.

Zmienne wyszczególnione na rys. 3:

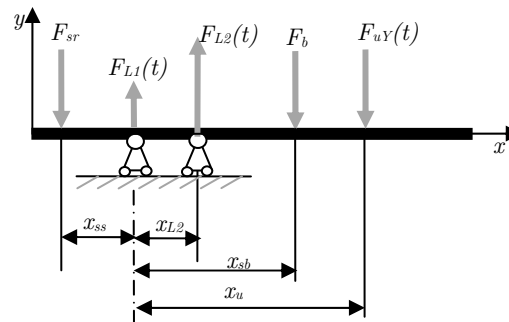
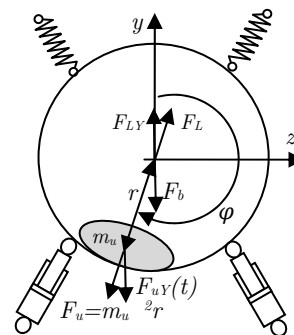
- $m_u$  – masa niewyrównoważenia (wsad pralki),
- $r$  – średnica bębna,
- $F_{sr}$  – siła ciężkości rotora silnika,
- $F_b$  – siła ciężkości wirującej części bębna pralki,
- $F_u$  – siła niewyrównoważenia wsadu,
- $F_{uy}(t)$  – składowa  $oy$  siła niewyrównoważenia wsadu,
- $F_L$  – uogólniona siła reakcji łożysk,
- $F_{Ly}$  – składowa  $oy$  uogólnionej siły reakcji łożysk,

$F_{Ly}(t)$  – siła reakcji łożyska nr 1 składowa  $oy$ ,  
 $F_{L2y}(t)$  – siła reakcji łożyska nr 2 składowa  $oy$ ,  
 $t$  – czas.



Rys. 3. Schemat uproszczony bębna pralki z rozróżnieniem mas wirujących (kolor czerwony) oraz niewirujących (kolor zielony)

Fig. 3. Simplified washing machine drum scheme with distinguished rotating masses (red color) and non rotating masses (green color)



Rys. 4. Reprezentacja układu mas wirujących w postaci belki prostej

Fig. 4. Non rotating masses representation as a simple beam

Poszczególne współrzędne środka ciężkości masy niewyrównoważenia można opisać wzorami:

$$\begin{cases} x_u(t) = x_u = const \\ y_u(t) = -r \cos(\omega t + \varphi) \\ z_u(t) = r \sin(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (1)$$

Zakładając, że masa niewyrównoważenia zaczyna ruch zawsze z najniższej części bębna, możemy przyjąć jako warunek początkowy ruchu kąt przesunięcia fazowego  $\varphi = 0$ .

Prędkość masy niewyrównowazenia opisują równania:

$$\begin{cases} \dot{x}_u(t) = 0 \\ \dot{y}_u(t) = \omega r \sin(\omega t) \\ \dot{z}_u(t) = \omega r \cos(\omega t) \end{cases} \quad (2)$$

Przyspieszenie masy niewyrównowazenia opisują równania:

$$\begin{cases} \ddot{x}_u(t) = 0 \\ \ddot{y}_u(t) = \omega^2 r \cos(\omega t) \\ \ddot{z}_u(t) = -\omega^2 r \sin(\omega t) \end{cases} \quad (3)$$

Siła w osi *oy* dla masy niewyrównowazenia z I zasady dynamiki Newtona wynosi:

$$F_{uy} = m_u \cdot \ddot{y}_u \quad (4)$$

$$F_{uy}(t) = m_u \cdot (-\omega^2 r \sin(\omega t)) \quad (5)$$

Siła ciężkości bębna o masie  $m_b$  wynosi:

$$F_b = m_b \cdot g \quad (6)$$

Siła ciężkości rotora o masie  $m_{sr}$  wynosi:

$$F_{sr} = m_{sr} \cdot g \quad (7)$$

Aby wyznaczyć równanie reakcji podpór (łożysk) zakładamy, że suma sił oraz suma reakcji działających na belkę jest równa zero.

$$-F_b - F_{sr} - F_{uy}(t) + F_{L1}(t) + F_{L2}(t) = 0 \quad (8)$$

$$F_{uy}(t) \cdot x_u + F_b \cdot x_{sb} - F_{L2}(t) \cdot x_{L2} - F_{sr} \cdot x_{ss} = 0 \quad (9)$$

$$\text{Z (9) wynika, że: } F_{L2}(t) = \frac{F_{uy}(t) \cdot x_u + F_b \cdot x_{sb} - F_{sr} \cdot x_{ss}}{x_{L2}} \quad (10)$$

Podstawiając (10) do równania (8) otrzymujemy:

$$F_{L1}(t) = F_b + F_{sr} + F_{uy}(t) - \frac{F_{uy}(t) \cdot x_u + F_b \cdot x_{sb} - F_{sr} \cdot x_{ss}}{x_{L2}} \quad (11)$$

$$F_{L1}(t) = F_b + F_{sr} + \frac{F_{uy}(t) \cdot x_{L2}}{x_{L2}} - \frac{F_{uy}(t) \cdot x_u + F_b \cdot x_{sb} - F_{sr} \cdot x_{ss}}{x_{L2}} \quad (12)$$

$$F_{L1}(t) = F_b + F_{sr} - \frac{F_{uy}(t) \cdot (x_u - x_{L2}) + F_b \cdot x_{sb} - F_{sr} \cdot x_{ss}}{x_{L2}} \quad (13)$$

Podstawiając do (10) równania (5) otrzymujemy siłę reakcji oddziałującą na drugi rząd łożyska:

$$F_{L2}(t) = \frac{m_u \cdot (-\omega^2 r \sin(\omega t)) \cdot x_u + F_b \cdot x_{sb} - F_{sr} \cdot x_{ss}}{x_{L2}} \quad (14)$$

Natomiast podstawiając do (13) równanie (5) otrzymujemy siłę reakcji oddziałującą na pierwszy rząd łożyska:

$$F_{L1}(t) = F_b + F_{sr} - \frac{m_u \cdot (-\omega^2 r \sin(\omega t)) \cdot (x_u - x_{L2}) + F_b \cdot x_{sb} - F_{sr} \cdot x_{ss}}{x_{L2}} \quad (15)$$

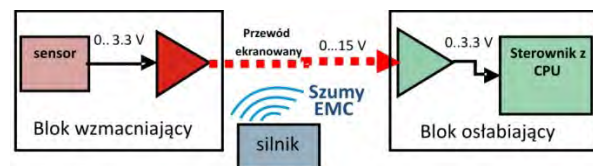
#### 4. Zastosowanie technologii MEMS w sterowniku pralki

Ze wzorów (14) i (15) wynika, że siły niewyrównowazenia powstające w bębnie pralki posiadają w swoim widmie

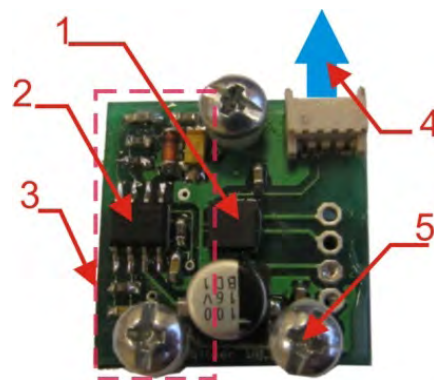
tylko jedną składową główną o częstotliwości  $f = \omega/2\pi$ . Ponieważ w skrajnym przypadku prędkość wirowania pralki nie przekracza 1400 obr/min. można założyć, że częstotliwość działającej na łożyska siły  $F_{L1}$  oraz  $F_{L2}$  nie przekroczy 24 Hz co w połączeniu z faktem, że dokładność pomiaru wymagana w wielu metodach kompensacji drgań nie jest zbyt wysoka [7, 8] pozwala na stosowanie akcelerometrów MEMS. Należy jednak zaznaczyć iż akcelerometry te wymagają indywidualnej kalibracji przed montażem.

Kolejnym problemem technicznym jest fakt iż zakres napięć sygnału wyjściowego tego typu sensorów wynosi 0...3,3 V lub 0...5 V. Przy zakresie pomiarowym sensora  $\pm 3G$  oznacza to rozdzielczość pomiarową na poziomie ok  $0,056 \text{ V}/\frac{m}{s^2}$  dla 0...3,3 V oraz  $0,085 \text{ V}/\frac{m}{s^2}$  dla 0...5 V.

Odległość od punktu pomiarowego na bębnie do sterownika pralki może wynosić do 2 m. Tak duży dystans transmisji analogowej oraz spore szumy elektromagnetyczne generowane przez umiejscowiony nieopodal silnik elektryczny implikują konieczność kondycjonowania sygnału pomiarowego. Poziom 0,15 V wydaje się optymalny, gdyż w praktyce jest to najwyższe napięcie bezpieczne dostępne w sterowniku pralki niewymagające żadnych dodatkowych modyfikacji elektrycznych. Z wyżej wymienionych przyczyn blok wzmacniaczy musi przepuszczać pasmo jedynie w zakresie od 0 do ok. 30 Hz [9, 10, 11, 12].



Rys. 5. Układ kondycjonujący sygnał pomiarowy  
Fig. 5. Measurement signal conditioning scheme

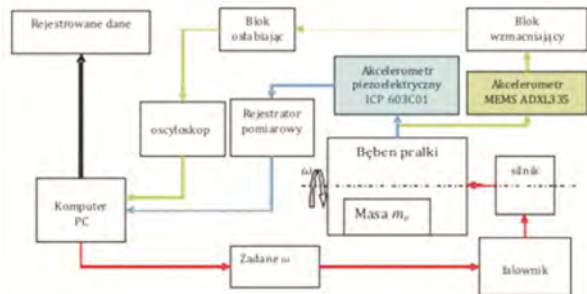


Rys. 6. Skonstruowany przez autorów układ pomiarowy 1 – akcelerometr MEMS ADXL335, 2 – wzmacniacz różnicowy AD628, 3 – blok kondycjonujący sygnał do poziomu 0...15 V, 4 – przewód ekranowany do bloku osłabiającego, 5 – połączenie śrubowe M3 mocujące układ pomiarowy do badanego obiektu

Fig. 6. Designed by authors measurement system 1 – accelerometer MEMS ADXL335, 2 – differential amplifier AD628, 3 – conditioning block to 0...15 V voltage level, 4 – ground shielded wire, 5 – M3 screw fixing to the measured object

## 5. Stanowisko pomiarowe

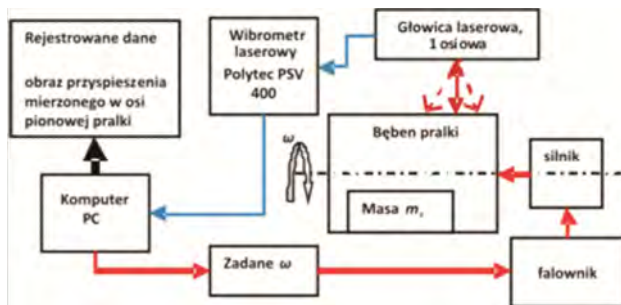
Punktem centralnym stanowiska pomiarowego były dwa sensory akcelerometryczne: sensor piezoelektryczny (symbol ICP603C01) oraz sensor MEMS (ADXL335) wraz z elektroniką kondycjonującą. Celem pomiarów było wykazanie różnic w zmierzonych sygnałach by móc na ich podstawie wnioskować o możliwym zastosowaniu technologii MEMS w badanym obszarze.



Rys. 7. Schemat stanowiska pomiarowego do badań porównujących

Fig. 7. Measurement stand diagram for comparing research

W celu wyznaczenia optymalnego punktu pomiarowego dokonano obrazowania wibracji górnej powierzchni bębna pralki w poszukiwaniu charakterystycznego punktu, w którym amplituda przyspieszeń drgań będzie możliwie jak największa w całym zakresie pracy urządzenia to jest od 0 do 30 Hz. Badania wykonano dla prędkości wirowania silnika od 600 do 1200 obr./min z krokiem co 200 obr./min oraz dla mas ciężarków stosowanych jako niewyważenie 0, 100, 200, 300 i 400 g. Wybrany punkt zaznaczono na rys. 9.



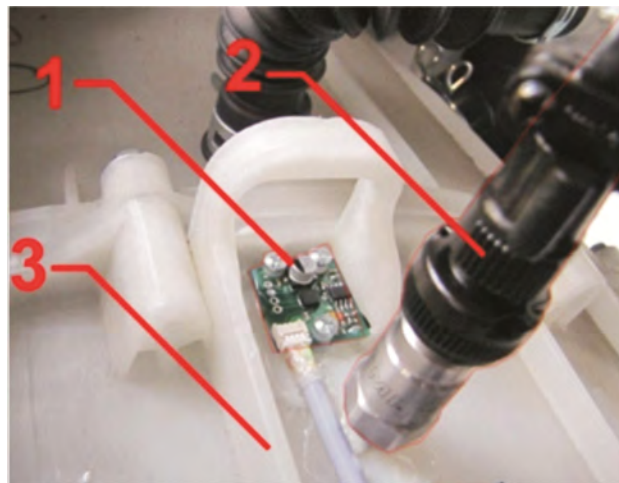
Rys. 8. Schemat stanowiska pomiarowego do obrazowania wibracji

Fig. 8. Measurement stand diagram for vibration's visualization



Rys. 9. Badany bęben pralki oraz przykładowa klatka z obrazu wibracyjnego wraz z zaznaczonym wybranym punktem pomiarowym do badań porównujących

Fig. 9. Measured drum and example snap frame of vibration visualization with marked chosen point for comparing research

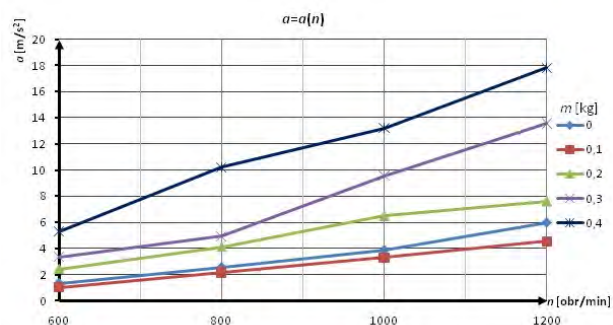


Rys. 10. Umiejscowienie sensorów na bębnie pralki, 1 – układ pomiarowy oparty o sensor ADXL335, 2 – czujnik ICP603C01, 3 – bęben pralki

Fig. 10. Sensors location on the drum surface. 1 – ADXL335 board, 2 – ICP603C01 sensor, 3 – drum surface

## 6. Wyniki pomiarów

Autorzy zmierzili sygnały z obu sensorów dla mas niewyrównoważenia 100, 200, 300 i 400 g, umiejscowionych punktowo w formie ciężarka magnetycznego na wewnętrznej płaszczyźnie wirującej bębna. Pomiaru wykonano przy prędkości wirowania 600, 800, 1000 oraz 1200 obr./min. Sygnały z obu sensorów zostały zarejestrowane na komputerze PC.

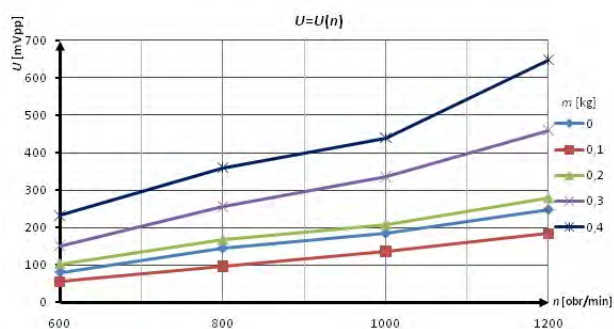


Rys. 11. Przyspieszenie powierzchni bębna zmierzone przez akcelerometr ICP603C01 w funkcji prędkości obrotowej silnika dla różnych mas niewyważenia

Fig. 11. Drum surface acceleration measured by ICP603C01 sensor for various mass and drum rotary speed

Jak wynika z (15) siła niewyrównoważenia rośnie wraz ze wzrostem masy oraz prędkości obrotowej, co odzwierciedlają krzywe na rys. 11. Fakt, iż średnia RMS przyspieszeń zmierzonych na powierzchni bębna drgań jest mniejsza dla obciążenia 0,1 kg niż gdy brak dodatkowego obciążenia (0 kg) autorzy tłumaczą wpływem charakterystyki zawieszenia tłumik-sprężyna na wibracje górnej powierzchni bębna, które to przy pewnym wstępnym obciążeniu amortyzuje skuteczniej niż bez żadnego obciążenia.

Jednocześnie odczytywano wskazania napięciowe z sensora MEMS ADXL335.

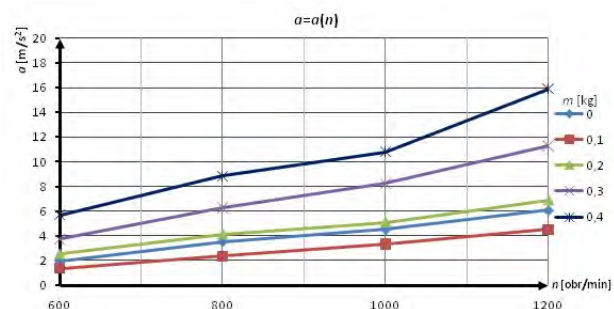


**Rys. 12.** Napięcie zmierzone na wyjściu układu pomiarowego opartego o technologię MEMS mierzone na powierzchni bębna w funkcji prędkości obrotowej silnika dla różnych mas niewyważenia

**Fig. 12.** Voltage signal from MEMS sensor measured for various mass and drum rotary speed

Producent akcelerometrów definiuje nieliniowość pomiaru na poziomie  $+0,3\%$  w pełnej skali pomiarowej  $+3G$  [10]. Można więc w uproszczeniu przyjąć pomiar jako liniowy, co pozwala na kalibrację sensora przy użyciu dwóch próbek pomiarowych o znanych wartościach napięcia i przyspieszenia. Sensor ADXL335 został indywidualnie skalibrowany na podstawie składowej stałej pochodzącej od stałego przyspieszenia grawitacyjnego, przy założeniu, że przyspieszenie to wynosi  $9,81 \text{ m/s}^2$  przy płaskim ułożeniu w pozycji roboczej oraz  $-9,81 \text{ m/s}^2$  przy ułożeniu płaskim w pozycji odwróconej, o  $180^\circ$  w dowolnej osi prostopadłej do osi pomiaru ustalono, że czułość użytego w badaniach egzemplarzu sensora wynosi  $240,57 \text{ mV/G}$ . Producent określa [10] zakres czułości dla populacji sensorów między 270, a  $330 \text{ mV/G}$ , co oznacza, że badany czujnik był gorszy niż deklaruje producent. Fakt ten można tłumaczyć wpływem toru pomiarowego zawierającego dwa wzmacniacze różnicowe, nieprzewidzianą przez producenta długość przewodów oraz niedokładność samego odczytu jak i uproszczeniem założenia, że stała grawitacji wynosi dokładnie  $9.81 \text{ m/s}^2$ .

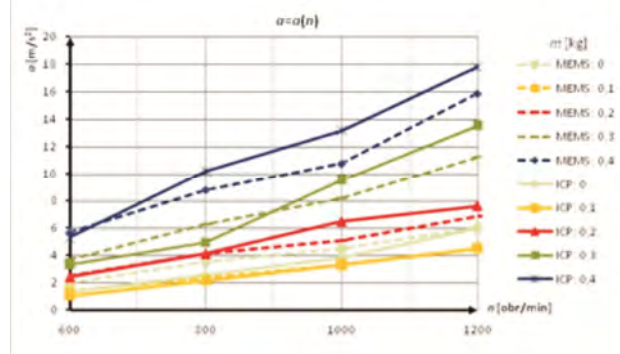
W wyniku tak przyjętej czułości na podstawie zmierzonych napięć obliczono przyspieszenie.



**Rys. 13.** Przyspieszenie przeliczone na podstawie napięcia zmierzonego przez układ pomiarowy oparty o technologię MEMS w funkcji prędkości obrotowej silnika dla różnych mas niewyważenia

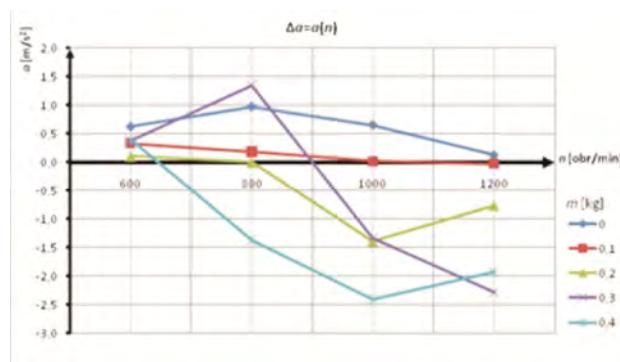
**Fig. 13.** Acceleration calculated based on measured voltage signal measured for various mass and drum rotary speed

Następnie przyrównano do siebie na wykresie wyniki obu pomiarów. W efekcie zestawienia wykazano, że sensor MEMS wykazuje ogólnie tendencję do zaniżania wyników pomiaru przyspieszenia. Odchylenie wskazań sensora MEMS od wskazań sensora piezo-elektrycznego różnie wraz ze wzrostem samej wartości pomiaru, co może świadczyć o znacznie większej nieliniowości pomiaru sensorem MEMS niż definiuje producent w nocie katalogowej [9, 10].



**Rys. 14.** Zestawienie przyspieszenia zmierzonego przez sensor ICP603C01 oraz układ oparty o sensor MEMS ADXL335

**Fig. 14.** ICP603C01 and MEMS ADXL335 sensors measurement comparison



**Rys. 15.** Wykres błędu pomiarowego (różnica wskazań) w funkcji prędkości obrotowej silnika dla różnych mas niewyważenia

**Fig. 15.** Measurements differential error for various mass and drum rotary speed

Różnica w zmierzonych sygnałach powiększa się zarówno wraz ze wzrostem masy jak i prędkości obrotowej. Wynika to najprawdopodobniej z nieliniowości samego toru pomiarowego wzmacniającego sygnał z sensora MEMS oraz z faktu, iż mimo dołożenia wszelkich starań, oba badane sensory nie mierzą przyspieszenia drgań bębna idealnie w tym samym punkcie i czasie, co wynika z fizycznych uwarunkowań montowania dwóch sensorów na tym samym obiekcie w tym samym momencie.

## 7. Wnioski

Maksymalny zmierzony błąd sensora MEMS w stosunku do sensora wzorcowego wynosi ok.  $2,5 \text{ m/s}^2$ . Jeżeli założyć

zakres pomiaru od 0 do 20 m/s<sup>2</sup> daje to niedokładność pomiarową na poziomie 12,5 % FSO. Nie jest to duża dokładność pomiaru, jednak wystarczająca do prostego wnioskowania przez sterownik pralki o stanie niewyważenia bębna. Biorąc pod uwagę stosunek kosztów jednostkowych sensora ICP603C01, będącego akcelerometrem o średniej jakości i średniej cenie rynkowej, oraz sensora ADXL335 wykonanego w technologii MEMS, wraz z elektroniką kondycjonującą sygnał, wynoszącym około 900 % na korzyść technologii MEMS można wnioskować, iż sensory te doskonale nadają się do aplikacji pomiarowych OEM w przemyśle AGD, który to jest wyjątkowo czuły kosztowo.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w latach 2010-2012 w ramach projektu rozwojowego pt.: „Inteligentne sterowniki pralek”.

## Bibliografia

1. Hee-Tea Lim, Weui-Bong Jeong, Keun Joo Kim: *Dynamic Modeling and Analysis of Drum-type Washing Machine*, „International Journal of Precision Engineering and Manufacturing”, vol. 11, no. 3, June 2010, 407-417.
2. D.C. Conrad, W. Soedel: *On the problem of oscillatory walk of automatic washing machines*, „Journal of Sound and Vibration”, 1995, 188(3), 301-314.
3. S.Bae, J.M.Lee, Y.J.Kang, J.S.Kang, J. R. Yun, Dynamic analysis of an automatic washing machine with a hydraulic balancer, „Journal of Sound and Vibration”, vol. 257, issue 1, 2002, 3-18.
4. Michael J. Chrzana, J. David Carlson: *MR Fluid Sponge Devices and Their Use in Vibration Control of Washing Machines*, Lord Corporation, Materials Division 2001.
5. C. Spelta, F. Previdi, M. Savaresi, G. Fraternali, N. Gaudiano: *Control of magnetorheological dampers for vibration reduction in a washing machine*, „Mechatronics”, 19, 2009, 410-421.
6. E. Papadopoulos, I. Papadimitriou: *Modeling, Design and Control of a Portable Washing Machine during the Spinning Cycle* [w] *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Systems (AIM 2001)*, 8-11 July 2001.
7. L. Benassi, S.J. Elliott, P. Gardonio: *Active vibration isolation using an inertial actuator with local force feedback control*, „Journal of Sound and Vibration”, 276, 2004, 157-179.
8. Aage Skullestad, *Improved instrument accuracy using active vibration damping*, „Mechatronics”, 13, 2003, 451-464.
9. [www.analog.com/en/mems-sensors/products/index.html](http://www.analog.com/en/mems-sensors/products/index.html).
10. ADXL335: Small, Low Power, 3-Axis ±3 g Accelerometer, Rev. 0, Norwood 2009.
11. Wen H.Ko: *Trends and frontiers of MEMS*, ELSEVIER, „Sensors and Actuators A”, 136, 2007,
12. A. Albarbar, A. BadriK. K. Sinha, A. Starr: *Performance evaluation of MEMS accelerometers*, „Measurement Elsevier”, 42, 2009, 790-795. ■

## MEMS Technology Application In Modern Washing Machine Driver for Drum Vibration Control

**Abstract:** Paper introduce possibilities of MEMS technology application for measurement of the rotating drum vibration in washing machine construction. The MEMS technology has been shortly presented and focused on its acceleration measurement aspects. Also generation of the unbalance force in washing machine drum has been considered. In the second part of the paper the results of the experimental comparison of the classic piezoelectric and MEMS sensors has been presented and discussed.

**Keywords:** vibration measurement, washing machine, MEMS

### mgr inż. Grzegorz Pittner

Asystent w Zakładzie Urządzeń Mechatronicznych Politechniki Poznańskiej

e-mail: [grzegorz.pittner@put.poznan.pl](mailto:grzegorz.pittner@put.poznan.pl)



### mgr inż. Dominik Rybarczyk

Asystent w Zakładzie Urządzeń Mechatronicznych Politechniki Poznańskiej

e-mail: [dominik.rybarczyk@put.poznan.pl](mailto:dominik.rybarczyk@put.poznan.pl)



### mgr inż. Piotr Owczarek

Doktorant w Zakładzie Urządzeń Mechatronicznych Politechniki Poznańskiej

e-mail: [piotr.owczarek@doctorate.put.poznan.pl](mailto:piotr.owczarek@doctorate.put.poznan.pl)

