

**Mateusz KASPROWIAK, Marcin JASIEWICZ, Bartosz POWAŁKA, Arkadiusz PARUS**  
ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY W SZCZECINIE, INSTYTUT TECHNOLOGII MECHANICZNEJ  
70-310 Szczecin, Al. Piastów 17

## Badania doświadczalne czujnika MEMS przy wykorzystaniu wibrometru laserowego

**Mgr inż. Mateusz KASPROWIAK**

Ukończył studia drugiego stopnia na kierunku Automatyka i Robotyka na wydziale Elektrycznym na Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie w 2012 roku. W danym roku rozpoczął również studia doktoranckie na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki na kierunku Budowa i Eksploatacja Maszyn. Jego zainteresowania naukowe to drgania występujące w trakcie obróbki skrawaniem oraz ich nadzorowanie i tłumienie.



**Dr hab. inż. Bartosz POWAŁKA**

Ukończył studia wyższe na Wydziale Mechanicznym Politechniki Szczecińskiej w roku 1994. W roku 1998 obronił doktorat na swojej macierzystej Uczelni, który poruszał zagadnienia dynamiki obrabiarek. Zainteresowania dynamiką obrabiarek kontynuował po obronie doktoratu. Ich zwieńczeniem był stopień doktora habilitowanego uzyskany na Politechnice Szczecińskiej w roku 2007. Obecnie w zakresie jego zainteresowań znajdują się również zagadnienia związane z przemysłowymi zastosowaniami technik wizyjnych.



**Mgr inż. Marcin JASIEWICZ**

Ukończył studia wyższe na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie w roku 2012. Od tego samego roku jest doktorantem na kierunku Budowa i Eksploatacja Maszyn. Jego zainteresowania obejmują zagadnienia związane z dynamiką obróbki skrawaniem.



**Dr hab. inż. Arkadiusz PARUS**

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Szczecińskiej w 2000r. Stopień naukowy doktora nauk technicznych w zakresie automatyki i robotyki uzyskał w roku 2007, a stopień doktora habilitowanego w 2013. Zainteresowania naukowe koncentrują się wokół problemu tłumienia szkodliwych drgań występujących w trakcie obróbki skrawaniem. Prace badawcze dotyczą aktywnych eliminatorów drgań dołączanych do przedmiotu obrabianego oraz systemu aktywnego mocowania przedmiotu na stole obrabiarki.



e-mail: [arkadiusz.parus@zut.edu.pl](mailto:arkadiusz.parus@zut.edu.pl)

### Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę doświadczalnych badań dynamicznych mikroukładów elektromechanicznych (MEMS) na przykładzie czujnika ciśnienia. Zaprezentowano stanowisko badawcze wykorzystujące wibrometr laserowy. W związku z trudnościami wymuszania dynamicznego MEMS zaproponowano metodę wzbudzania układu za pomocą przetwornika piezoelektrycznego a następnie porównano i omówiono wyniki badań uzyskanych przy zastosowaniu różnych sygnałów wymuszających.

**Słowa kluczowe:** badania doświadczalne, czujnik ciśnienia MEMS, wibrometr laserowy.

### Experimental testing of MEMS pressure sensor using laser vibrometer

#### Abstract

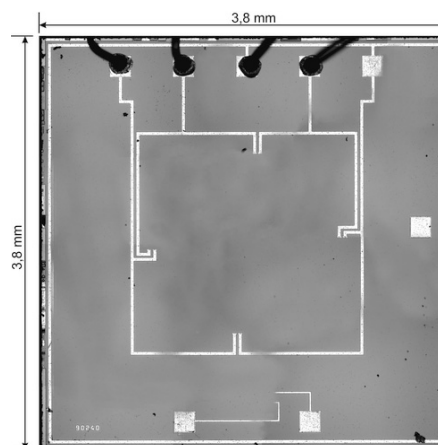
The growth of technological capabilities in the field of manufacturing and machining of microelectromechanical systems (MEMS) results in the trend toward devices miniaturization. In many applications it is necessary to carry out experiments of MEMS (e.g. dynamic parameters identification), which in conjunction with miniature dimensions, turns out difficult [1]. Problematic is both a dynamic excitation of such structures vibrations recording. The paper presents the process and results of dynamic testing of MEMS structure using laser vibrometer. Section 2 presents test object, the pressure sensor, which was chosen due to the presence of a flexible diaphragm having a distinct form of vibration. In Section 3 the test stand, consisting of laser vibrometer, microscope, a PC with dedicated Polytec software and Signal Generator is described [3]. Due to impossibility of application of standard dynamic excitation (e.g. impact test or shaker) the piezoelectric transducer was proposed as an alternative [6]. The software enables generating both deterministic signals (e.g. Sine wave, Sweep, Square) as well as non-deterministic (Pseudo Random, Random Burst) by a signal generator coupled to the power supply. Section 4 includes the course of research and in Section 5 the comparison of test results for all applied excitation signals is presented. The summary and conclusions can be found in Section 6.

**Keywords:** experimental tests, MEMS pressure sensor, laser vibrometer.

### 1. Wstęp

Wraz ze wzrostem możliwości technologicznych w dziedzinie wytwarzania i obróbki mikroukładów elektromechanicznych (MEMS), obserwowana jest wyraźna tendencja do miniaturyzacji urządzeń [1]. Zmniejszenie gabarytów daje możliwości nowych zastosowań znanych układów, powala na projektowanie całkowicie nowych konstrukcji, a także wiąże się ze zmniejszonym zapotrzebowaniem na energię. W wielu zastosowaniach zachodzi konieczność przeprowadzania badań doświadczalnych MEMS (np. identyfikacja parametrów dynamicznych), co w związku z miniaturowymi wymiarami okazuje się trudne w realizacji [1]. Problematyczne jest zarówno wymuszenie dynamiczne takich struktur jak i samo rejestrowanie drgań (brak możliwości zastosowania konwencjonalnych czujników).

W artykule przedstawiono przebieg i uzyskane wyniki badań dynamicznych czujnika ciśnienia MEMS przy wykorzystaniu wibrometru laserowego.



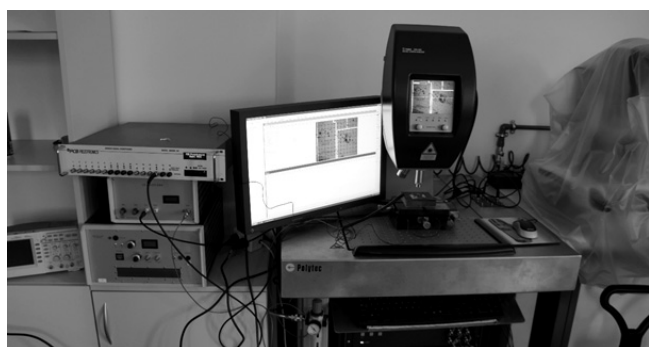
Rys. 1. Badany czujnik ciśnienia  
Fig. 1. Examined pressure sensor

## 2. Przedmiot badania

Przedmiotem badań był czujnik ciśnienia MEMS, przedstawiony na rys. 1. Tego typu czujniki znajdują szerokie zastosowanie, głównie w motoryzacji i medycynie [2]. Do pomiaru wykorzystywane jest zjawisko piezorezystywności – w wyniku naprężeń w cienkiej krzemowej membranie spowodowanych różnicą ciśnień, zmienia się napięcie elektryczne w układzie pomiarowym działającym na zasadzie mostka Wheatstone'a [2]. Na wybór czujnika jako przedmiotu badania zdecydowano się, ze względu na obecność podatnej membrany, w której spodziewano się zidentyfikować wyraźne postacie drgań.

## 3. Stanowisko pomiarowe

W celu przeprowadzenia badania, wykorzystano mikroskop pomiarowy firmy Polytec (MSA-500 Micro System Analyzer)[3] przedstawiony na rys. 2.



Rys. 2. Stanowisko pomiarowe  
Fig. 2. Measuring stand

Mikroskop z wibrometrem laserowym przeznaczony jest do badania powierzchni oraz topografii mikroukładów takich jak np. układy MEMS [4]. Zestaw pomiarowy składa się z wibrometru laserowego, wykorzystującego efekt Dopplera, mikroskopu, komputera klasy PC wraz z dedykowanym oprogramowaniem Polytec oraz generatora sygnałów. Głowica laserowa pozwala na dokonywanie bezkontaktowych pomiarów drgań powierzchni w czasie rzeczywistym do częstotliwości sięgającej 24 MHz i amplitudach przemieszczeń rzędu kilku pikometrów [5, 7]. Wyniki mogą zostać przedstawione w postaci widm przemieszczeń dla wszystkich punktów siatki pomiarowej. Oprogramowanie Polytec Scanning Vibrometer 8.7 pozwala również na wygenerowanie trójwymiarowej wizualizacji postaci drgań dla zidentyfikowanych częstotliwości rezonansowych układu [4].

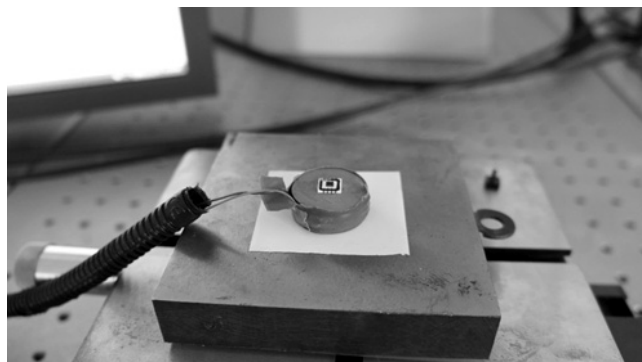
Zważywszy na małe wymiary, a także bardzo delikatną strukturę badanego obiektu pojawiają się trudności w zastosowaniu klasycznych metod wymuszeń drgań np. za pomocą młotka modalnego czy wzbudnika. Z tego względu jako element wymuszający zdecydowano się zastosować piezosiłownik [6]. Wykorzystano piezosiłownik PiezoJena Pst 1000/25, zasilany napięciem sięgającym 1000 V, o średnicy 25 mm, umożliwiający generowanie przemieszczeń rzędu 6 mikrometrów [8].

Oprogramowanie umożliwia zadawanie sygnałów wymuszających zarówno deterministycznych (np. przebieg sinusoidalny o stałej i zmiennej częstotliwości, przebieg prostokątny) jak i niedeterministycznych (np. Pseudo Random, Burst Random) [4] przez generator sygnałów sprzęgnięty z układem zasilającym piezosiłownik. W tym celu zastosowano zasilacz LE 200-070 EBW umożliwiający podanie na wyjściu maksymalnego napięcia 200 V o częstotliwości sięgającej 40 kHz [9].

## 4. Przebieg badań

W celu przeprowadzenia analizy drgań, czujnik ciśnienia zamocowano do piezosiłownika za pomocą kleju adhezyjnego (stoso-

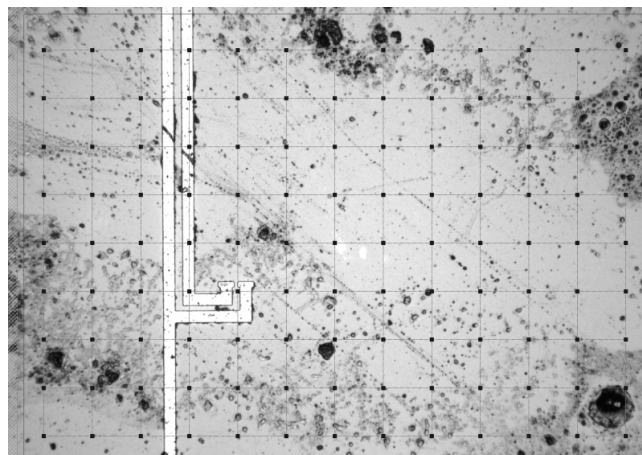
wanego np. do montażu czujników drgań). W celu zachowania bezpieczeństwa ze względu na wysokie napięcie piezosiłownik został odizolowany od podłoża za pomocą izolatora (rys. 3).



Rys. 3. Mocowanie czujnika  
Fig. 3. Sensor mounting

Przed przystąpieniem do dokonania pomiarów konieczne było ustawienie takich parametrów jak: szerokość pasma, częstotliwość próbkowania oraz czas próbkowania. Pomiar wymagał również skalibrowania sygnału referencyjnego i ustawienia wyzwalacza („trigger”).

Następnym krokiem było ustalenie wielkości siatki pomiarowej oraz określenie gęstości punktów pomiarowych. W przeprowadzonych badaniach zastosowano siatkę o szerokości 13 punktów oraz długości 9 punktów, co dało łącznie 117 punktów pomiarowych (rys. 4).



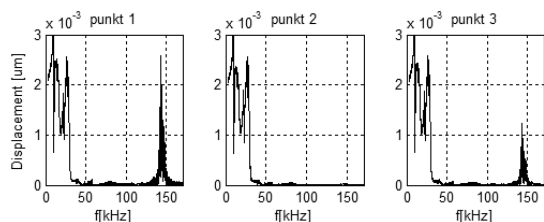
Rys. 4. Siatka pomiarowa  
Fig. 4. Measuring grid

Zakres pomiarowy siatki wynikający ze stopnia powiększenia obiektywu wynosi 1,28×1,14 mm co nie pozwala na ujęcie całego czujnika (wymiary 3,8×3,8 mm) dlatego też zdecydowano się na centralne ustawienie głowicy pomiarowej nad membraną, której postacie drgań były przedmiotem analizy.

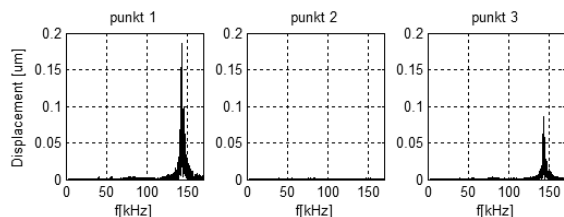
Pomiarów dokonano dla różnych sygnałów wymuszających oraz dla różnych parametrów danych sygnałów.

## 5. Wyniki pomiarów

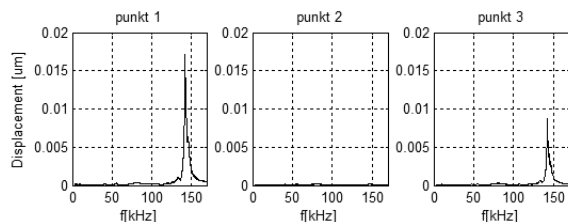
Poniżej przedstawiono wyniki badań przeprowadzanych dla różnych sygnałów wymuszających. Dla każdego pomiaru wybrano zarejestrowane widma przemieszczeń w trzech punktach siatki: punkt centralny (1), skrajny (2) oraz znajdujący się w połowie odległości pomiędzy nimi (3).



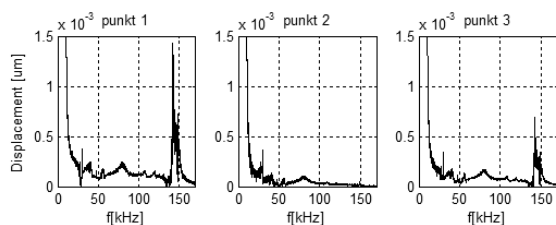
Rys. 4. Sygnał wymuszający - Burst Chirp 0,5 V, zakres 1Hz do 30 kHz  
Fig. 4. Excitation signal - Burst Chirp 0,5 V, range 1Hz to 30 kHz



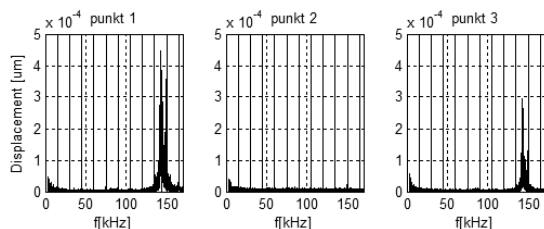
Rys. 5. Sygnał wymuszający - Burst Random, 1 V  
Fig. 5. Excitation signal - Burst Random, 1 V



Rys. 6. Sygnał wymuszający - Pseudo Random, 0,1 V  
Fig. 6. Excitation signal - Pseudo Random, 0,1 V



Rys. 7. Sygnał wymuszający - Sweep, 1 V, zakres 1 Hz do 30 kHz  
Fig. 7. Excitation signal - Sweep, 1 V, range 1 Hz to 30 kHz

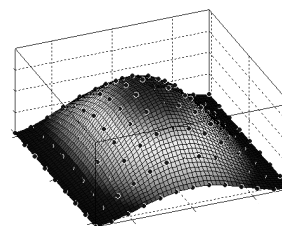


Rys. 8. Sygnał wymuszający - Square, 0,5 V, 15 kHz  
Fig. 8. Excitation signal - Square, 0,5 V, 15 kHz

Na podstawie powyższych wyników w rozpatrywanym zakresie częstotliwości stwierdzić można występowanie jednej, wyraźnej postaci drgań przy częstotliwości około 143 kHz o ekstremum w punkcie centralnym membrany, co przedstawiono na rys. 9.

Ograniczenia oprogramowania oraz układu zasilającego (możliwość wysterowania sygnału wymuszającego w zakresie do 40 kHz), sprawiają, że badany obiekt jest wzbudzany poza obszarem częstotliwości rezonansowej (około 143 kHz). Analizując wyniki badań można stwierdzić, że udział niektórych sygnałów wymuszających jest widoczny na widmach przemieszczeń, co utrudnia

jednoznaczne zidentyfikowanie postaci obiektu badanego. Wpływ ten jest szczególnie zauważalny dla sygnałów typu Burst Chirp (w zakresie zadanego wymuszenia), typu Sweep (w całym zakresie częstotliwości) i typu Square (wyraźne harmoniczne częstotliwości wymuszającej). Lepsze rezultaty uzyskano dla wymuszeń sygnałami losowymi. W obu przypadkach na charakterystyce widmowej jednoznacznie można wskazać obszar rezonansowy, przy czym dla sygnału typu Pseudo Random przebieg ten jest zaszumiony w mniejszym stopniu niż dla Burst Random, co pozwala jednoznacznie zidentyfikować częstotliwość własną badanego obiektu.



Rys. 9. Wizualizacja zidentyfikowanej postaci drgań membrany  
Fig. 9. Visualization of identified membrane mode shape

## 6. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano przebieg badania czujnika ciśnienia MEMS z wykorzystaniem wibrometru laserowego Polytec. W związku z niewielkimi wymiarami badanego obiektu zdecydowano się na zastosowanie piezosiłownika jako źródła wymuszenia. Badania przeprowadzono przy różnych konfiguracjach sygnału wymuszającego. Najlepsze rezultaty uzyskano dla niedeterministycznych sygnałów losowych, przy których wpływ samego wymuszenia ma zdecydowanie mniejszy udział na widmie przemieszczeń punktów pomiarowych membrany, umożliwiając tym samym identyfikację postaci drgań. Biorąc pod uwagę udział szumów w sygnale najlepsze wyniki uzyskano wykorzystując pseudolosowe wymuszenie, gdzie najdokładniej określona może zostać częstotliwość rezonansowa.

*Niniejsza praca została sfinansowana przez Narodowe Centrum Nauki w ramach grantu N N503 319039.*

## 7. Literatura

- [1] Łuczak S.: Doświadczalne wyznaczanie wybranych parametrów akcelerometrów MEMS – metodyka badań doświadczalnych. PAK, vol. 57, s. 1321-1324, 2011.
- [2] Malif N., Williams K.: Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering. Artech House, ISBN: 1-58053-590-9, s. 89-94, 2004.
- [3] Rembe Ch., Kant R., Muller R. S.: Optical Measurement Methods to Study Dynamic Behavior in MEMS. Microsystems Engineering: Metrology and Inspection, SPIE: 4400, 2001.
- [4] Materiały informacyjne firmy Polytec GmbH: MSA-500 Entry Data sheet.
- [5] Waszczuk-Młyńska A., Radkowski S.: Drgania płyty, model analityczny i jego weryfikacja za pomocą wibrometru laserowego. Zeszyty naukowe instytutu pojazdów, 4(95)/2013, s. 169-176, 2013.
- [6] Kolpekwar A., Blanton R. D.: Development of MEMS Testing Methodology. International Test Conference, ISBN: 0-7803-4209-7/97, s. 923-931, Washington, 1997.
- [7] Materiały informacyjne firmy Polytec GmbH: MSA-500 Micro System Analyzer Brochure.
- [8] Materiały informacyjne firmy Piezosystem Jena GmbH: Piezocomposite – stack type actuators series Pst.
- [9] Materiały informacyjne firmy PiezoMechanik GmbH: Main catalogue: Electronic supplies for piezomechanics – technical data.

otrzymano / received: 14.09.2014

przyjęto do druku / accepted: 03.11.2014

artykuł recenzowany / revised paper