

Wybrane własności współczesnych przetworników ciśnienia

Streszczenie. W artykule w części pierwszej, przedstawiono zasadę działania wybranych współczesnych przetworników ciśnienia. W drugiej części przedstawiono negatywne aspekty wpływu przyspieszenia statycznego oraz dynamicznego, na dokładność pomiaru ciśnienia wszystkich metod przetwarzania ciśnienia. Przedstawiono porównawczo wyniki oddziaływania statycznego przyspieszenia podanego w notach katalogowych z rzeczywistymi wybranymi kilku czujników. W ostatniej części natomiast, zamieszczono wyniki badań oddziaływania dynamicznego.

Abstract. In the article in the first part, there is presented the principle of operation of selected modern pressure transducers. In the second part, there are presented negative aspects of the impact of static and dynamic acceleration, on the pressure measurement accuracy of all pressure processing methods. The paper presents comparatively results of the impact of static acceleration given in datasheets to the results of real selected multiple sensors. However in the last part, there are shown the results of the dynamic interaction. (**Selected properties of modern pressure transducers**).

Słowa kluczowe: Przetwornik ciśnienia, piezorezystywny przetwornik ciśnienia, przyspieszenie statyczne, przyspieszenie dynamiczne.

Keywords: Pressure Transducer, piezoresistive pressure transducer, static acceleration, dynamic acceleration.

1. Wstęp

Ciśnienie jako parametr fizyczny jest wielkością bardzo często podlegającą pomiarom, w badaniach, w lotnictwie, w motoryzacji czy w pomiarach przemysłowych. Można zaryzykować stwierdzenie, że jest wielkością mierzoną częściej, niż wiele innych. Poprzez pomiar ciśnienia pośrednio mierzone są, inne wielkości fizyczne jak; prędkość przepływu płynu, strumień objętości, czy masy, rozkład obciążeń mechanicznych czyli sił parcia napływającego płynu na określoną bryłę, prędkość wznoszenia, prędkość lotu, wysokość lotu itd. w zależności od układu i obiektu. Wszystkie obecnie stosowane metody przetwarzania ciśnienia sprowadzają się do tego samego zjawiska, czyli pomiaru deformacji struktury sprężystej, spowodowanej różnicą ciśnień. W artykule autorzy chcą przedstawić w wielkim skrócie istotę przetwarzania wybranych przetworników ciśnienia, oraz najważniejsze cechy tych przetworników, skupiając się na jednej, mało znanej, mianowicie wrażliwości czujników na przyspieszenie. Z doświadczenia autorów wynika, że zagadnienie wpływu przyspieszenia na dokładność pomiarową czujników ciśnień, wśród eksperymentatorów jest mało znane. Najlepszym dowodem na potwierdzenie tej tezy jest fakt, że tylko nieliczne firmy produkujące przetworniki podają ten parametr w swoich notach. Po za tym brak jest publikacji i badań w tym zakresie. Na dzień dzisiejszy z wielu metod przetwarzania na uwagę zasługują przedstawione poniżej.

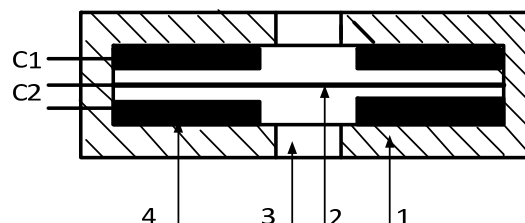
1.1 Przetwornik pojemnościowy, przedstawiony na rysunku 1, zasada przetwarzania polega na zmianie pojemności pomiędzy elementem sprężystym (2) podlegającym deformacji na wskutek sił parcia pochodzących od różnicy ciśnień, a powierzchnią stałą (4) Wykorzystuje się tu znaną zależność opisującą pojemność kondensatora

$$(1) \quad C = \varepsilon \frac{S}{d}$$

gdzie ε – przenikalność środowiska; S – powierzchnia aktywna; d – odległość pomiędzy okładzinami czyli pomiędzy elementem sprężystym, a powierzchnią stałą.

Zmienną odwzorowującą jest tutaj odległość „ d ”. Elektrody ruchomej (membrany) w stosunku do zewnętrznych elektrod stałych, tworząc układ różnicowy do pracy mostkowej. W przetwornikach tej grupy w celu uzyskania dużej czułości, czyli zdolności pomiaru małych ciśnień rzędu kilku kPa w zakresie stosuje się duże

powierzchnie membran. Są to wymiary nawet kilku centymetrowe w odniesieniu do średnicy. To skutkuje zwiększoną objętością komór pomiarowych, a tym samym większą inercją przetwornika.



Rys.1. Schemat rozwiązania pojemnościowego przetwornika ciśnienia; gdzie: 1-obudowa, 2-element sprężysty (membrana), 3-otwór doprowadzenia ciśnienia, 4-elektroda stała, C1 i C2 wyprowadzenia elektrod kondensatorów pomiarowych [1]

Takie rozwiązanie powoduje duże ograniczenie pomiaru składowych dynamicznych, co w wielu z zastosowaniach wyklucza je. W takim wykonaniu nadaje się do pomiaru gazów ponieważ medium mierzone znajduje się pomiędzy okładzinami pomiarowymi.

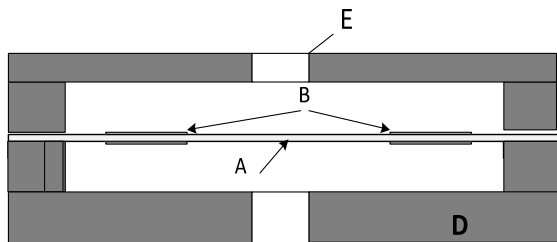
1.2 Przetworniki tensometryczne ciśnienia [2] stanowią dużą grupę obecnie stosowanych. Wykorzystują zjawisko tensometryczne z zastosowaniem tensometrów foliowych. Zjawisko to polega na zmianie rezystancji przewodnika wykonanego w postaci tensometru foliowego i naklejonego na elemencie sprężystym w tym przypadku membranie. Z obowiązującym uogólnionym równaniem tensometrii dla jednego tensometru

$$(2) \quad \frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon$$

gdzie: $\Delta R/R$ - względna zmiana rezystancji tensometru aktywnego; k - stała tensometru; ε - odkształcenia tensometru.

Poziom odkształceń ε (który warunkuje czułość danego przetwornika) zależy od wielkości ciśnienia oraz parametrów membrany sprężystej. Niewątpliwą cechą ujemną tej grupy przetworników jest to, że dla pomiarów małych wielkości ciśnienia wymagana jest stosunkowo duża powierzchnia membrany, a tym samym duża objętość komór pomiarowych podobnie jak w przypadku przetworników pojemnościowych. Powiększona objętość powoduje ograniczenie pasma pomiarowego dla składowych dynamicznych, a w zagadnieniach np.

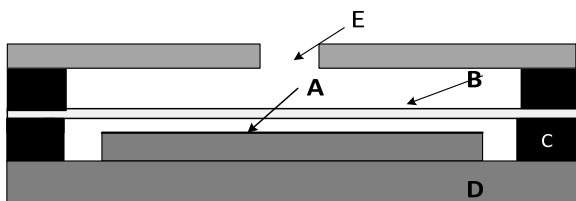
lotniczych stanowi to ogromny minus w zastosowaniach. Współczynnik przeciążalności w tej grupie wynosi 25 do 50 %. Przetworniki w wersji tensometrycznej stosuje się raczej do konstrukcji czujników dużych i bardzo dużych ciśnień.



Rys.2. Przykładowy schemat konstrukcji tensometrycznego przetwornika ciśnienia, gdzie: A-membrana, B-tensometry, D-obudowa, E –doprowadzenie ciśnienia,

1.3 Przetworniki ciśnienia w technologii MEMS [1] [3]

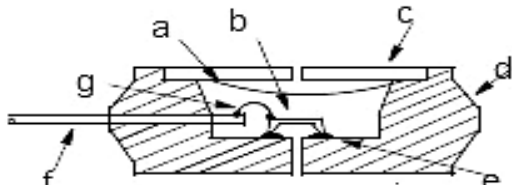
Obecnie od kilku lat bardzo intensywnie rozwijany dział metrologii w zakresie przetworników. Technologia ta bazuje na strukturach krzemowych wykonanych w skali mikro w istocie nazywanej popularnie MEMS. Niewątpliwą zaletą tej grupy są bardzo małe gabaryty, wysoka przeciążalność co najmniej 10 krotna wartości zakresu, wysoka liniowość i przystępna cena. Przetworniki ciśnienia w technologii MEMS najczęściej wykonywane są jako piezorezystywne, bądź pojemnościowej. Na rysunku 3 przedstawiono schematycznie konstrukcję wersji pojemnościowej (rzadziej stosowanej). Zasada przetwarzania w istocie jest dokładnie taka sama jak w wersji klasycznej, przedstawionej powyżej. Użyte materiały na konstrukcję zasadniczo inne, materiałem podstawowym jest tutaj krzem.



Rys.3. Schemat przetwornika pojemnościowego MEMS; gdzie: A- okładzina stała, B-płyta krzemowa jako element sprężysty, C – łącznik, D –sztywna obudowa, E- doprowadzenie ciśnienia

1.3.1 Piezorezystywny przetwornik ciśnienia

Obecnie rynek przetworników ciśnienia został zdominowany przez wersje piezorezystywne. Zjawisko to podobne jest do tensometrycznego, ale w odniesieniu do membran krzemowych. Zasadnicza różnica pomiędzy tensometrycznym to taka, że tensometr jest naklejony na materiał badany czyli membranę metalową, a w przypadku piezorezystywnych tensometr wykonany jest w monolitycznej strukturze krzemu drogą dyfuzji.



Rys.4. Przekrój przetwornika piezorezystywnego; gdzie: a-żel zabezpieczający, b-struktura (membrana krzemowa) pomiarowa, c-metalowa część obudowy, d-obudowa, e-mocowanie struktury pomiarowej, g-wyprowadzenia, f-wyjście sygnałowe [3],[4].

Lokalnie wykonane rezystory w krzemie są pod względem własności mechanicznych i termicznych takie same jak pozostała część membrany. Natomiast pod

względem elektrycznym zasadniczo inne. Czułość zjawiska zmiany rezystancji struktury krzemowej w porównaniu do klasycznego tensometru, od odkształcenia jest około 100 krotnie wyższa. Ta zasadnicza relacja powoduje, że przetworniki piezorezystywne są wielokrotnie mniejsze gabarytowo od pozostałych. Eliminuje to w ten sposób wady poprzedników, bardzo mała objętość komór pomiarowych, (średnice struktury pomiarowej wyrażane są w pojedynczych milimetrach (1-2)). Skutkuje to tym, że pasmo pomiarowe składowych pulsacyjnych jest dużo wyższe i odtwarzane z mniejszym uśrednieniem. Charakteryzują się bardzo dużym współczynnikiem przeciążalności. W przypadku przetwornika wersji milivoltowej, sygnał wyjściowy jest na poziomie niskim w istocie mV. Przetwornik w tej wersji to mostek tensometrów półprzewodnikowych w postaci membrany, ze względu na dużą przeciążalność można eksploatować go poza zakresowo. Dla przykładu MPX2010D dedykowany zakres to 10 kPa, można nim dokonywać pomiarów do 20 czy 30 kPa bez ryzyka uszkodzenia. Z badań wynika, że w obszarze poza zakresowym przy kilkukrotnym przekroczeniu zakresu charakterystyka przetwarzania nie zmienia się. W przypadku przetwornika z wyjściem voltowym pomiar poza zakresowy jest niemożliwy. Ograniczeniem jest tutaj wzmacniacz który znajduje się w przetworniku.

2. Wpływ przyspieszenia statycznego na dokładność pomiarową czujników ciśnienia.

We wszystkich rodzajach czujników przetworzenie ciśnienia uzyskuje się przez pomiar deformacji elementu sprężystego. Ponieważ element sprężysty posiada określoną masę z dodatkową masą żelową separującą musi reagować zgodnie z II zasadą dynamiki Newtona na przyspieszenie, w tym także grawitacyjne. To znaczy, że odkształcenie elementu sprężystego to wypadkowa siły parcia od różnicy ciśnień mierzonych oraz siły pochodzącej od przyspieszenia. Skutek jest taki, że jeżeli w trakcie pomiaru ciśnienia zostanie zmieniona pozycja (położenie) manometru, czy czujnika, to wskazanie może się zmienić znacząco. Sytuacja jest jeszcze bardziej złożona jeżeli pomiar dokonywany jest na obiektach będących w ruchu.

Tabela 1. Zestawienie, dla kilku typów i firm wpływu przyspieszenia statycznego katalogowego i rzeczywistego[4],[5],[6],[7],[8],[9].

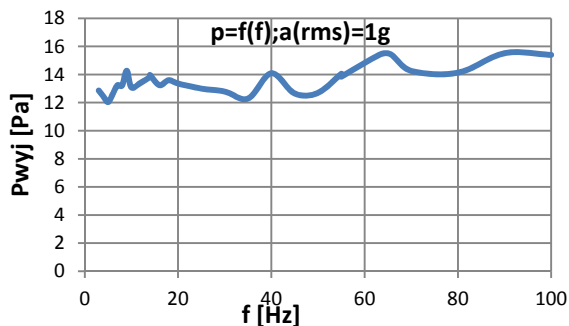
Typ przetwornika	Wpływ katalogowy Pa/1g	Wpływ rzeczywisty Pa/1g
Aplisen PR50 zakres 1kPa	Brak danych	8
Aplisen PR50 zakres 1,5 kPa	Brak danych	6
Aplisen PR50 zakres 3kPa	Brak danych	5
Aplisen PR50 zakres 10 kPa	Brak danych	12
Freescale MPX 2010 zakres 10 kPa	Brak danych	13
Freescale MPX 5010 zakres 10 kPa	Brak danych	13
Endevco 8507-1 zakres 6,8 kPa	1,5	2
Sensortechncis HCLA02X5 zakres 250 Pa	2	0,3
Sensortechncis HCLA012X5 zakres 1,25 kPa	4	0,4
Sensortechncis HCLA 0075 zakres 7,5kPa	19	0,2
PAN PRC10 Indukcyjny, 1kPa	Brak danych	40

Szczególne przypadki to pomiary w samolotach, czy samochodach, gdzie zmienność przyspieszenia działającego na czujnik to suma ziemskiego i

dynamicznego pochodzącego od ruchu danego pojazdu, czy obiektu. Wielkość ta jest wielkością stałą z uwagi na niezmienną masę elementów pomiarowych czujnika, jest proporcjonalna do wielkości przyspieszenia. Dlatego udział procentowy tego zafałszowania sygnału pomiarowego dotyczy głównie grupy czujników małych ciśnień rzędu kilku do kilkadziesiątu tysięcy Pa. Na podstawie przeprowadzonych badań nad tym zjawiskiem czujników różnych firm, głównie czujników najnowszej generacji piezorezystywnych, można zauważyć duże zróżnicowanie tego parametru pomiędzy firmami. Pociągającym jest fakt, że u niektórych producentów istnieje duża powtarzalność tego wpływu w określonych grupach czujników. Wydawało by się, że problem jest prosty i oczywisty, ale chyba nie zupełnie. Najlepszym dowodem na to jest fakt że w notach katalogowych czujników ciśnienia w większości przypadków brak jest danych na ten temat. W tabeli numer 1 przedstawiono zależności wpływu podawanego przez producentów i uzyskanych z badań wybranych kilku firm. Można zauważyć, że przetwornik indukcyjny ma największy wpływ co wynika ze stosunkowo dużej powierzchni, a tym samym masy elementu sprężystego pomiarowego. W grupie przetworników najnowszej technologii piezorezystywnych, problem ten także występuje, u różnych producentów bardzo różnie. Fakt ten skutkuje, brakiem możliwości zastosowania określonych czujników w obiektach przemieszczających się szczególnie w przypadku pomiarów małych ciśnień. To bardzo niekorzystne zjawisko w wielu zastosowaniach może w efekcie doprowadzić do tragedii. Jednym z takich sytuacji są pomiary parametrów lotu obiektów latających, czyli pomiaru prędkości, prędkości wznoszenia, prędkości opadania. Parametry te są odwzorowane poprzez pomiar ciśnień. Na podstawie tych zmierzonych parametrów operator steruje obiektem. Zły pomiar skutkuje złym sterowaniem. Charakterystyka wrażliwości czujników jest kierunkowa, czyli największa występuje dla składowej prostopadłej do struktury czujnika.

3. Wpływ przyspieszenia dynamicznego na dokładność pomiarową czujników ciśnienia.

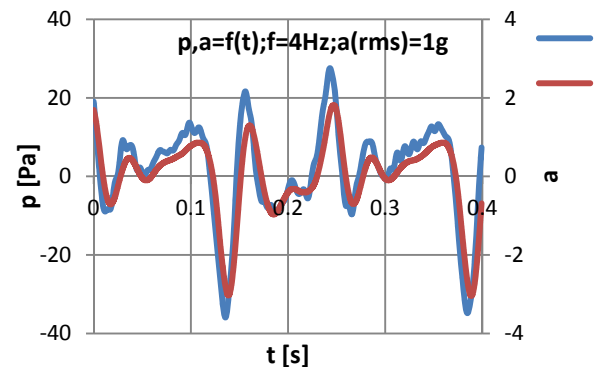
Powyżej przedstawiono wpływ przyspieszenia statycznego, czyli grawitacyjnego na poziom sygnału z czujników ciśnienia podanych w Paskalach. Wynika z niej, że sygnał z czujnika pochodzący od przyspieszenia jest relacją proporcjonalną. W tej części podane zostaną wyniki badań wpływu przyspieszenia dynamicznego, czyli będącego w ruchu jednego z popularnych czujników MPX2010D. W tym przypadku poddano je wibracjom o regulowanym poziomie amplitudy i częstotliwości wibracji.



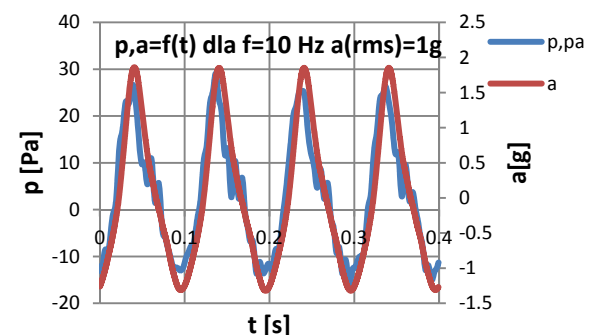
Rys.5. Wykres zależności sygnału wyjściowego (RMS) w Paskalach dla wymuszenia harmonicznego do 100 Hz, dla czujnika MPX2010D [9]

Na rysunku 5 przedstawiono zależność wartości skutecznej sygnału uzyskanego na wyjściu czujnika MPX2010D przy wymuszeniu harmonicznym (drganiami) od

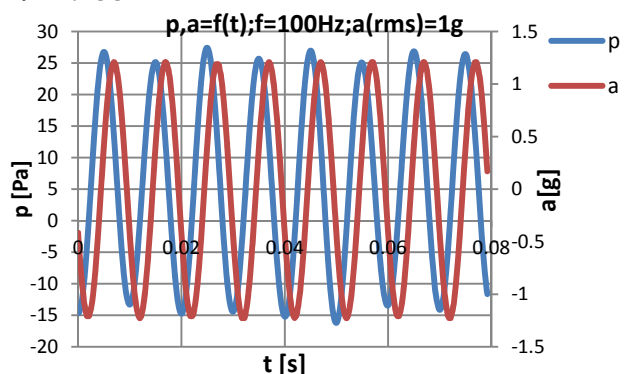
częstotliwości wymuszenia przy zachowanym stałym przyspieszeniu równym $a=1g$. Badany czujnik, to czujnik ciśnienia różnicowego o zakresie pomiarowym 10kPa. W zakresie zmian wymuszenia od 0 do 40 Hz poziom na wyjściu jest stały i wynosi około 13Pa/1g podanej wartości skutecznej(RMS). Czyli odpowiada wpływowi przyspieszenia statycznego. Powyżej wartości 50 Hz wykazuje tendencje wzrostowe. Ta sytuacja komplikuje proces aproksymacyjny czujnika w przypadku korekcji wpływu drgań. Na rysunku 6 przedstawiono zależność wartości chwilowych sygnału wyjściowego z czujnika bez obecności ciśnienia przy wymuszeniu sygnałem poliharmonicznym. Kształt sygnału wyjściowego pokrywa się z sygnałem z czujnika przyspieszenia mierzącego wymuszenie.



Rys.6. Wykres $p=f(t)$, zależności wartości chwilowych dla wymuszenia poliharmonicznego o niskiej częstotliwości i przyspieszeniu $a=1g$ [9].



Rys.7. Wykres $p=f(t)$, zależności wymuszenia „a” o częstotliwości 10 Hz i przyspieszeniu 1 g, oraz odpowiedzi czujnika krzywa „p” [9]



Rys.8. Wykres $p=f(t)$, zależności wymuszenia „a” od częstotliwości 100 Hz i przyspieszeniu 1 g, oraz odpowiedzi czujnika krzywa „p” [9]

Rysunek numer 7 przedstawia odpowiedź czujnika na wymuszenie harmoniczne dla 10 Hz, podobnie i rysunek 8, ale dla 100Hz. Dla częstotliwości niższych wymuszenia

zauważa się dodatkowe oscylacje sygnału wyjściowego z czujnika, spowodowane prawdopodobnie obecną masą żelową jako separatora. Na wykresach zauważa się, że wzrostem częstotliwości przesunięcie fazowe pomiędzy odpowiedzią „p”, a wymuszeniem „a”. Przesunięcie to wynika z czasu przetwarzania wzorcowego czujnika drgań, a jest to czujnik pojemnościowy z rodziny MEMS-ów. Na wszystkich przedstawionych wykresach z badań krzywa odpowiedzi czujnika ciśnienia, czyli niebieska „p” powinna być linią prostą poziomą, przecinającą oś Y w zerze. Naturalnie taka sytuacja miałaby miejsce dla przetwornika idealnego, rzeczywistość jest taka jaką widać na wykresach.

Wnioski

Zaobserwowane i przebadane niekorzystne zjawisko wrażliwości czujników ciśnienia na przyspieszenie i generowany sygnał wyjściowy, jako składowa dodatkowa dodawana bądź odejmowana od wartości pochodzącej od mierzonego ciśnienia, może bardzo zafałszowywać pomiar.

Sygnał wyjściowy z przetwornika ciśnienia jest złożeniem dwóch sygnałów. Pierwszy zasadniczy pochodzi od sił deformacyjnych membrany skutkiem różnicy ciśnień, a drugi sił bezwładnościowych, czyli od przyspieszenia. Badania wykazują, że zjawisko to dotyczy głównie przetworników o niższych zakresach pomiarowych do kilkudziesięciu kPa. Wielkość tego sygnału zależy także od producenta, czyli od konstrukcji. Przedstawione wybrane elementy badań przeprowadzone dla wymuszeń 1 g dowodzą, iż nie są to wartości pomijalnie małe. Dla przykładu zmienność o 1g powoduje wzrost sygnału w wartości międzyszczytowej o 40 Pa co w przypadku pomiaru prędkości na przykład lotu samolotu odpowiada 30km/h. Będzie wartością zmienną w zależności od realizowanej trajektorii lotu, a także co bardzo ważne od zmienności przyspieszenia. Poziom sygnału wyjściowego

ma charakter proporcjonalny do poziomu przyspieszenia czyli, dla 10 g sygnał błędu wzrośnie 10 krotnie. Wiedza ta jest o tyle istotna, że w przypadku pomiarów ciśnienia w obiektach zmieniających swoje położenie, prędkość, bądź drgających wada ta może powodować, że pomiary ciśnienia będą znacznie odbiegały od rzeczywistości. Zagadnienie jest o tyle problematyczne, że większość producentów czujników nie podaje w notach katalogowych tej informacji. Jednym słowem przed zastosowaniem określonego czujnika na danym obiekcie należy go przebadać pod względem wrażliwości na przyspieszenia.

Autorzy: dr inż. Zygmunt Szczerba, Politechnika Rzeszowska Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, ul. Powstańców Warszawy 12, 35-965 Rzeszów, E-mail: Zyqszcze@prz.edu.pl;
Mgr inż. Piotr Szczerba Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, ul. Powstańców Warszawy 12, 35-965 Rzeszów, E-mail: psz@prz.edu.pl

LITERATURA

- [1] Wilson Jon S.: "Sensor Technology Handbook" Elsevier 2005
- [2] Robert H. Bishop "The mechatronics handbook" The University of Texas at Austin. Austin, Texas 2002
- [3] Bao M.H. „Micro Mechanical Transducers” Handbook of sensors and actuators Elsevier 2000
- [4] Noty katalogowe firmy „Motorola” 2005.
- [5] Noty katalogowe firmy „Freescale” rev 13, 10/2008.
- [6] Noty katalogowe firmy „sensorechnics” e/11628 2011..
- [7] Noty katalogowe firmy „Aplisen” 2010.
- [8] Noty katalogowe firmy „Endevco” 2008.
- [9] Szczerba Z., Szczerba P. „Niepublikowane materiały z badań własnych czujników ciśnienia”
- [10] August R, Maudie T, Miller T, Thomson E. "Acceleration sensitivity of micromachined pressure sensors" Micromachined Devices Components V, 46, 1999. doi:10.1117/12.360508