

Henryk URZĘDNICZOK, Jan ZAKRZEWSKI
Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej

METODY BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNYCH PIEZOREZYSTANCYJNYCH CZUJNIKÓW CIŚNIENIA O MAŁYCH ZAKRESACH

Streszczenie. Konwencjonalne, względnie tanie, mikroelektroniczne czujniki ciśnienia nie wykazują na ogół dobrych właściwości dynamicznych. Analiza możliwości stosowania takich czujników w pomiarach dynamicznych wymaga znajomości ich charakterystyk częstotliwościowych. Istnieje zatem potrzeba opracowania prostych metod wyznaczenia takich charakterystyk.

W artykule opisano cztery metody wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych mikroelektronicznych czujników ciśnienia o niskich zakresach. Dwie z nich bazują na generacji akustycznego sygnału harmonicznego. Są to metoda fali stojącej i metoda fali bieżącej. Dwie pozostałe oparte są na analizie przebiegów czasowych odpowiedzi czujnika na skokową zmianę ciśnienia i impuls ciśnienia. Opisano przykłady praktycznej realizacji takich metod, uzyskane wyniki, a także przedyskutowano ich zalety i wady.

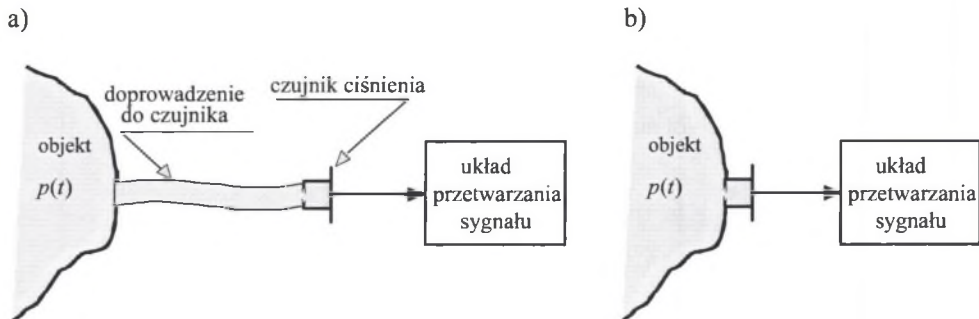
METHODS FOR DYNAMIC PROPERTIES INVESTIGATION OF THE LOW RANGE PIEZORESISTIVE PRESSURE SENSORS

Summary. The principles and practical realization of four methods for measurement of microelectronic pressure sensor frequency response are presented. Two of them, the standing wave and moving wave method, are based on harmonic pressure signal generation, and the other two (the step and the pulse method) are based on time response analysis. The results of examination are presented and properties, advantages and disadvantages of all methods are discussed.

1. WPROWADZENIE

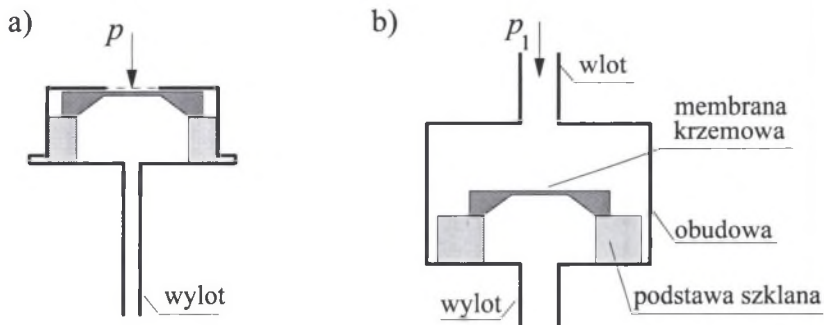
Produkowane współcześnie mikroelektroniczne czujniki ciśnienia znajdują coraz szersze zastosowanie nie tylko w laboratoriach badawczych czy systemach technicznych, ale także w sprzęcie medycznym, a nawet w sprzęcie powszechnego użytku. W wielu przypadkach zachodzi potrzeba pomiaru ciśnień zmiennych w czasie, a to pociąga za sobą potrzebę poznania właściwości dynamicznych torów pomiaru ciśnienia złożonych z czujnika pomiarowego, ukła-

du pneumatycznego doprowadzającego ciśnienie do czujnika, a także układu elektrycznego przetwarzającego sygnał wyjściowy z czujnika (rys. 1a).



Rys. 1. Tor pomiaru ciśnienia
Fig. 1. Pressure measuring chain

Doprowadzenie ciśnienia odbywa się zwykle za pomocą systemu rur, a ich długość, średnica i ukształtowanie przestrzenne mają wpływ na możliwości pomiarów ciśnień szybkozmiennych, czyli na właściwości dynamiczne układu pomiarowego. Często jest to wpływ dominujący, zwłaszcza przy pomiarze ciśnienia gazów. Ścisłościwość gazu powoduje, iż w rurociągu doprowadzającym powstają zjawiska falowe uzależnione od geometrii rurociągu i całkowicie zmieniające kształt przebiegu czasowego ciśnienia na wyjściu rurociągu w stosunku do przebiegu ciśnienia na wejściu rurociągu, co prowadzi do zniekształceń przebiegu ciśnienia [1, 2, 3, 4].



Rys. 2. Dynamicznie optymalna (a) i konwencjonalna (b) konstrukcja czujników ciśnienia
Fig. 2. The dynamically optimal (a) and the conventional (b) structure of pressure sensors

Aby uniknąć omówionych wyżej zjawisk, czujnik powinien być umieszczony bezpośrednio w miejscu pomiaru (rys. 1b). Wówczas o właściwościach dynamicznych decydować będą właściwości czujnika. Poprzez odpowiednią konstrukcję czujnika, pokazaną schematycznie na rys. 2a, można zapewnić bezpośrednie oddziaływanie fali ciśnieniowej na element czuły czujnika (piezoelektryczny, pojemnościowy lub piezorezystancyjny). Pozwala to na uzyskanie bardzo dobrych właściwości dynamicznych, uzależnionych praktycznie jedynie od częstotli-

wości własnej elementu czułego. Takie czujniki produkują tylko nieliczne firmy (Kulite, Endevco), głównie dla celów badawczych. Ich cena jest przeciętnie 50 razy wyższa od ceny czujników konwencjonalnych.

Typowe, produkowane masowo czujniki o membranie krzemowej mają konstrukcję odmienną, pokazaną schematycznie na rysunku 2b. Taka konstrukcja nie zapewnia dobrych właściwości dynamicznych. Wlot oraz komora, w której umieszczona jest struktura krzemowa, tworzą rezonator Helmholtza [5, 6, 7], decydujący o właściwościach dynamicznych całego czujnika. Ze względu na skomplikowany kształt komory, nieidealną sztywność jej ścianek i szereg innych czynników, charakterystyki częstotliwościowe czujnika obliczone na podstawie modelu Helmholtza mają znaczenie jedynie jakościowe. Producenci najczęściej ich nie podają w materiałach katalogowych.

Z punktu widzenia projektanta systemu pomiarowego, znajomość właściwości dynamicznych (np. wyrażonych poprzez charakterystyki częstotliwościowe) pozwala na rozważenie możliwości zastosowania czujników konwencjonalnych zamiast specjalistycznych, co ma istotny wymiar ekonomiczny. Ponadto istnieje możliwość zastosowania odpowiednio dobrego korektora dynamicznego, rozszerzającego pasmo częstotliwościowe [8]. Zagadnienia te są szczególnie istotne w przypadkach, gdy wymagany jest jednoczesny pomiar ciśnienia dynamicznego w wielu punktach stanowiska pomiarowego (badania rozkładu ciśnień) lub tam, gdzie wymagana jest niska cena urządzenia pomiarowego (np. indywidualne respiratory dla astmatyków). W tej sytuacji poszukiwania efektywnych i jednocześnie prostych w realizacji metod badania właściwości dynamicznych czujników ciśnienia nabierają szczególnego znaczenia.

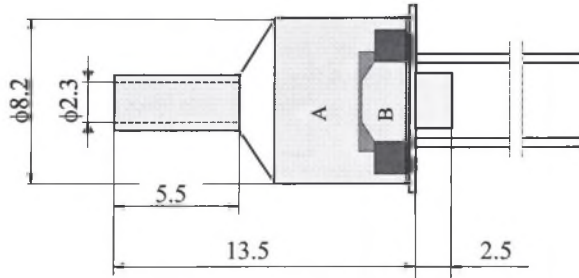
2. METODY GENERACJI CIŚNIEŃ ZMIENNYCH W CZASIE

Badanie właściwości dynamicznych przetworników pomiarowych polega na wyznaczeniu ich odpowiedzi na sygnał testowy zmienny w czasie. Generacja sygnału testowego o znanych właściwościach (przebiegu, widmie, parametrach stochastycznych) nie jest na ogół prosta w przypadku wielkości nieelektrycznych. W literaturze opisywane są bardzo różne metody generacji zmiennego ciśnienia, odpowiednie dla różnego typu czujników, o różnych zakresach, dla różnych mediów [9, 10, 11, 12, 13]. Metody te w zależności od uzyskanego kształtu przebiegu sygnału testowego można podzielić na dwie grupy: z sygnałem aperiodycznym (impulsowym, skokowym) oraz z sygnałem periodycznym. Wśród metod z sygnałem aperiodycznym opisywane są następujące: „shock tube”, metoda szybkiego otwarcia zaworu lub metoda wirującego zaworu, metoda „eksplozji”, metoda „spadającego młota” i inne. Metody te przeznaczone są do badań czujników o wysokich zakresach, ponieważ pozwalają na uzyskanie znacznych amplitud zmienności ciśnienia (nawet do 800 MPa), przy różnych czasach narastania sygnału. Często też są one kłopotliwe w realizacji. Prosta metoda generacji ciśnienia zmiennego w czasie zaproponowano w pracy [14], jednakże podawany przez autorów zakres częstotliwości jest stosunkowo mały – do 700 Hz.

W niniejszej pracy podano wyniki badania różnych metod generacji sygnałów ciśnienia zmiennych w czasie. Założono, że podstawowe znaczenie ma uzyskanie sygnałów pozwalających wyznaczyć charakterystyki częstotliwościowe badanych czujników w maksymalnie szerokim paśmie, przy amplitudach umożliwiających badanie czujników o małych zakresach (rzędu kilku kPa).

Opracowane metody to:

- metody z sygnałem periodycznym o zmiennej częstotliwości - metoda fali stojącej i metoda fali bieżącej,
- metody z sygnałem aperiodycznym (skokowym i impulsowym) – metoda ujemnego skoku ciśnienia i metoda akustyczna.



Rys. 3. Rysunek konstrukcyjny czujnika badanego

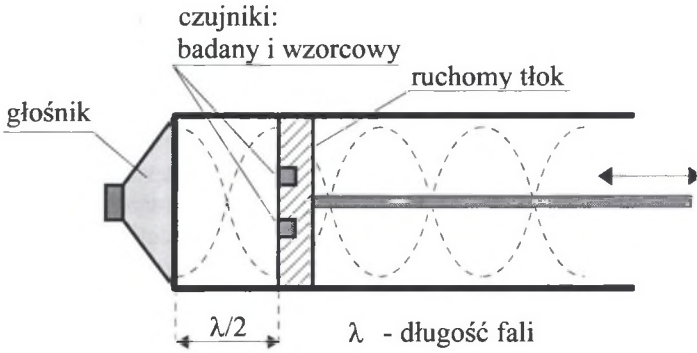
Fig. 3. Structure of the sensor under test

Dla porównania wymienionych metod jako czujnik badany stosowano konwencjonalny czujnik piezo-rezystancyjny, o budowie zbliżonej do pokazanej na rys. 2b, a jako czujnik wzorcowy czujnik o budowie jak na rys. 2a. Były to odpowiednio, pokazany na rys. 3 czujnik badany typu PS-005-33-D, o zakresie 5 kPa, produkcji firmy Vigor oraz czujniki wzorcowe typu XT-190M firmy Kulite, o zakresie 35 kPa i częstotliwości rezonansowej 160 kHz lub czujnik typu 8507C-1 firmy Endevco, o zakresie 7 kPa i częstotliwości 50 kHz. Należy zaznaczyć, że celem badań przedstawionych w niniejszej pracy nie jest wyznaczenie właściwości dynamicznych czujnika badanego, lecz raczej porównanie właściwości samych metod.

2.1. Metoda fali stojącej

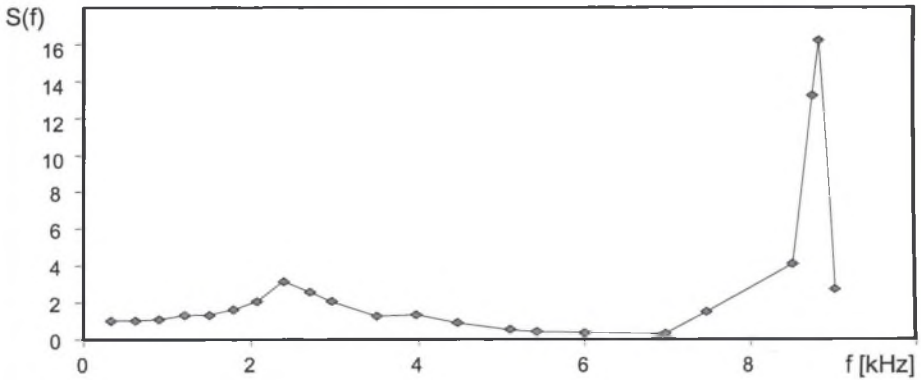
Metoda ta opisana dokładniej w pracy [15], polega na doprowadzeniu do czujnika sygnału akustycznego w postaci przebiegu sinusoidalnego o określonej częstotliwości i zmierzeniu wyjściowego sygnału elektrycznego z czujnika. Sygnał akustyczny wytwarzany jest w postaci płaskiej fali stojącej, powstającej w rurze o długości zmiennej, dobieranej jako wielokrotność połowy długości fali o zadanej częstotliwości (rys.4).

Pomiar charakterystyki czujnika wykonywany jest punkt po punkcie dla kolejnych częstotliwości, po każdorazowym dostrojeniu długości rury do strzałki fali stojącej. Źródłem zmiennego ciśnienia jest głośnik dynamiczny wytwarzający sygnał akustyczny. Ze względu na to, że charakterystyka częstotliwościowa głośnika nie jest równomierna, konieczne jest stosowanie czujnika wzorcowego, umieszczonego w takich samych warunkach ciśnienia akustycznego, co czujnik badany. Zakres częstotliwościowy tej metody jest ograniczony do ok. 10 kHz, z uwagi na to, iż przy wyższych częstotliwościach długość fali staje się porównywalna ze średnicą głośnika i uzyskanie fali stojącej w pobliżu głośnika staje się trudne, a ponadto powstająca fala nie jest płaska.

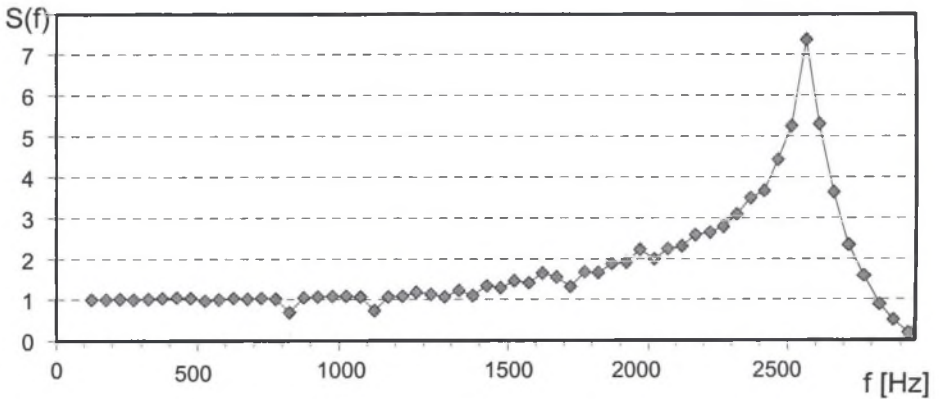


Rys. 4. Sposób generowania fali stojącej
Fig. 4. The method of standing wave generation

a)



b)



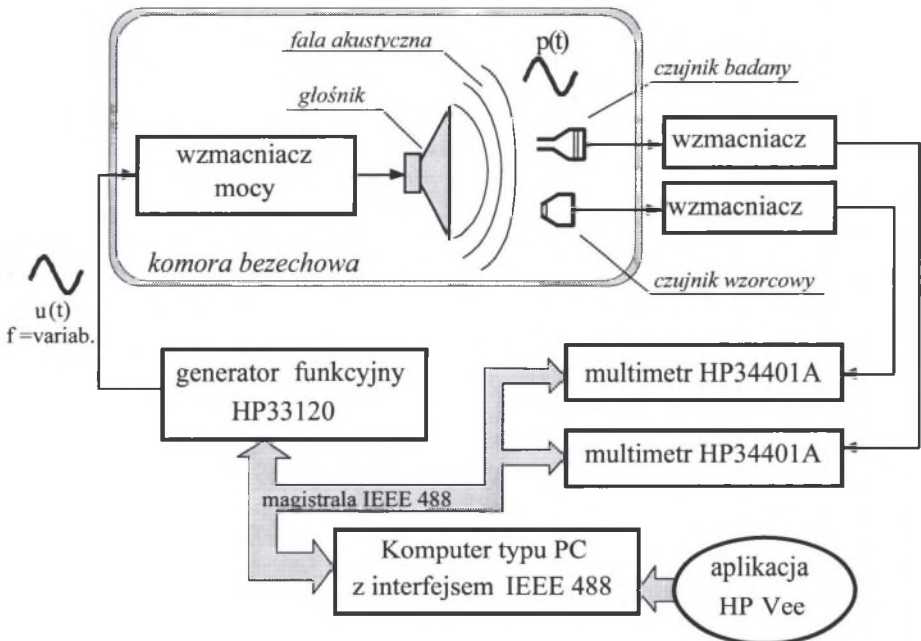
Rys. 5. Charakterystyki częstotliwościowe czujnika badanego uzyskane metodą fali stojącej przy małej (a) i dużej (b) rozdzielczości zmian częstotliwości
Fig. 5. Frequency response curves of sensor obtained by standing wave method for low (a) and high (b) resolution of frequency adjustment

Metoda ta jest pracochłonna, szczególnie jeżeli pożądanym jest uzyskanie dużej rozdzielczości charakterystyki, wymaga specjalnego wyposażenia i jest hałaśliwa. Realizacja pomiarów w systemie automatycznym jest trudna, ponieważ należy sterować nie tylko częstotliwością generowanego sygnału, ale także położeniem tłoka, ze względu na konieczność dostrojenia do strzałki fali stojącej. Jediną zaletą tej metody jest możliwość uzyskania relatywnie wysokich amplitud sygnału akustycznego. W podanym zakresie częstotliwości wyniki uzyskane tą metodą mogą stanowić odniesienie do oceny innych, dogodniejszych metod badawczych.

Na rys. 5 przedstawiono przykładowe charakterystyki częstotliwościowe czujnika badanego uzyskane metodą fali stojącej. Widoczne są dwa piki rezonansowe: przy częstotliwości ok. 2,6 kHz i ok. 8,8 kHz, spowodowane rezonansem Helmholtza dla dwóch komór (wlotowej i wylotowej) czujnika badanego – patrz rys. 2a. Porównanie wykresów przedstawionych na tym rysunku wyraźnie wskazuje na konieczność zapewnienia dużej rozdzielczości nastawianych częstotliwości, co powoduje bardzo istotne zwiększenie pracochłonności metody.

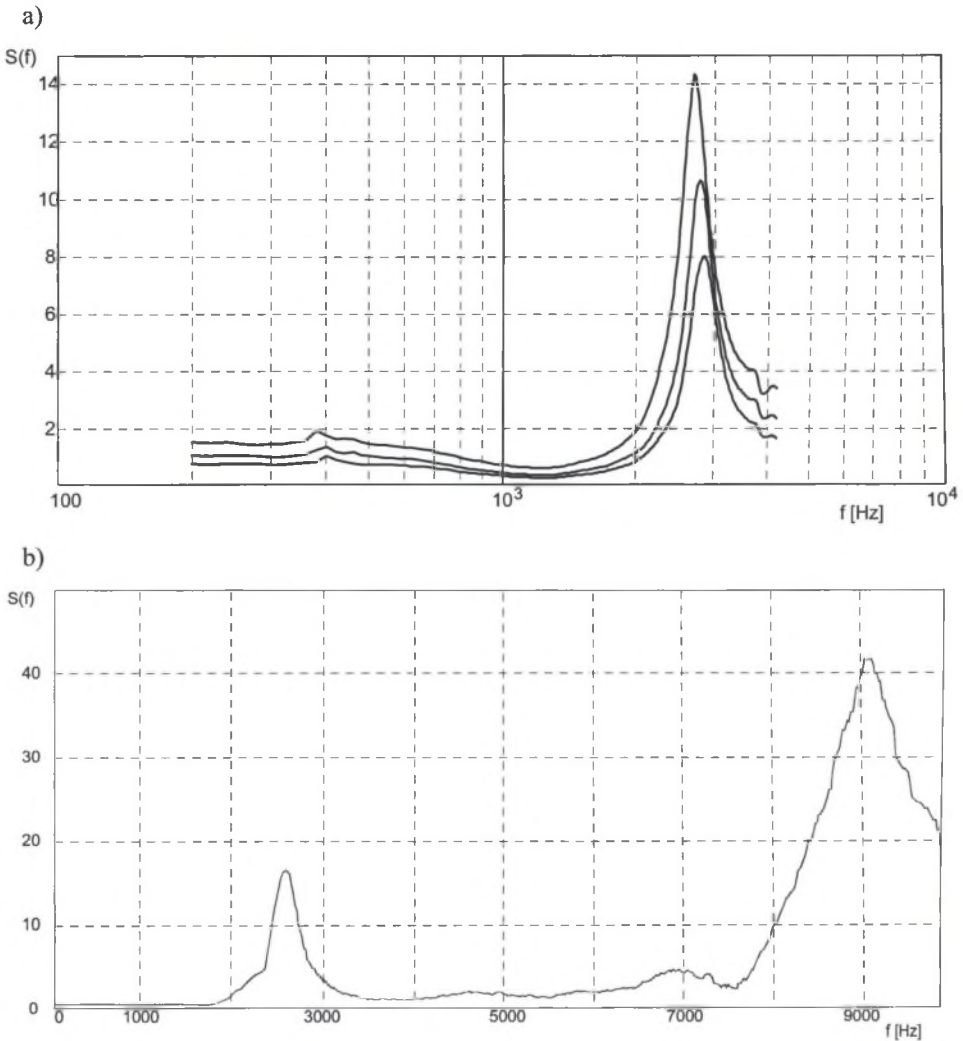
2.2. Metoda fali bieżącej

Metoda ta polega na umieszczeniu czujnika badanego w niewielkiej odległości (około 50 mm) od membrany głośnika elektrodynamicznego zasilanego prądem przemiennym o zmieniającej się częstotliwości.



Rys. 6. Automatyczny system pomiarowy do realizacji metody fali bieżącej
Fig. 6. Measuring system for realisation of the moving wave method

Głośnik wraz z czujnikiem badanym znajduje się w komorze bezechowej, tj. zamkniętej przestrzeni o ścianach wyłumionych materiałem pochłaniającym energię akustyczną. Ponieważ w komorze nie powstają fale stojące, uzyskiwany poziom sygnału jest znacznie mniejszy, szczególnie w zakresie wyższych częstotliwości – jest to wadą tej metody. Metoda ta pozwala jednak na łatwą automatyzację pomiarów, ze względu na to, iż nie zachodzi konieczność dopasowania odległości pomiędzy czujnikiem i głośnikiem do częstotliwości sygnału akustycznego. Schemat zastosowanego automatycznego systemu pomiarowego przedstawiono na rys. 6.



Rys. 7. Charakterystyki częstotliwościowe uzyskane metodą fali bieżącej
Fig. 7. Frequency response curves obtained by the use of moving wave method

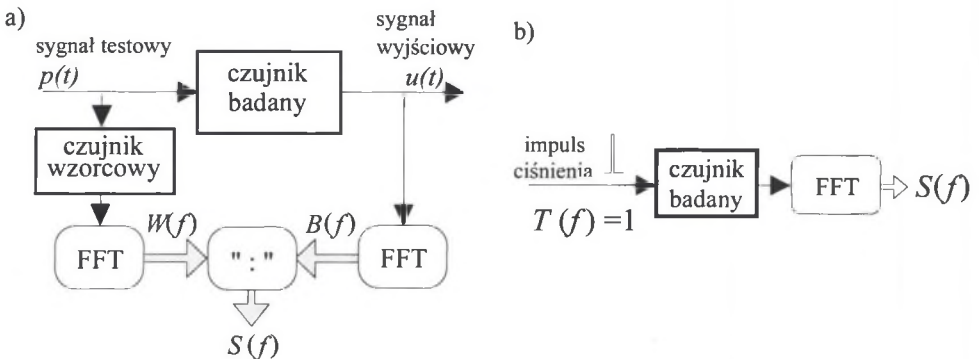
Czas realizacji pomiarów zależy od zakresu częstotliwości i rozdzielczości charakterystyki. Metoda jest mniej hałaśliwa, ze względu na izolację akustyczną wprowadzaną przez zastosowanie komory. Możliwa jest również realizacja tej metody bez stosowania komory, w otwartej przestrzeni, jednakże zapewnienie jednakowego sygnału akustycznego docierającego do obu czujników jest trudne, ze względu na możliwość występowania odbić fali akustycznej.

Program sterujący systemem pomiarowym, napisany jako aplikacja HPVee, umożliwia zadawanie kroku zmian częstotliwości, amplitudy sygnału zasilającego głośnik oraz sporządzanie charakterystyki częstotliwościowej czujnika uzyskiwanej jako stosunek wartości skutecznych odpowiedzi badanego czujnika do odpowiedzi czujnika wzorcowego.

Przykładowe charakterystyki wyznaczone metodą fali bieżącej dla kilku egzemplarzy czujnika badanego pokazano na rysunku 7a oraz dla jednego z nich w szerszym zakresie częstotliwości na rysunku 7b.

2.3. Metoda skoku ciśnienia

Metoda ta należy do grupy metod z aperiodycznym sygnałem wejściowym. Zasada wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych czujnika badanego zilustrowana jest na rys. 8 [16]. Jeżeli sygnał testowy jest dowolnym przebiegiem aperiodycznym (w tym również skokowym), konieczne jest zastosowanie czujnika wzorcowego, ponieważ widmo sygnału testowego nie jest płaskie (rys. 8a).



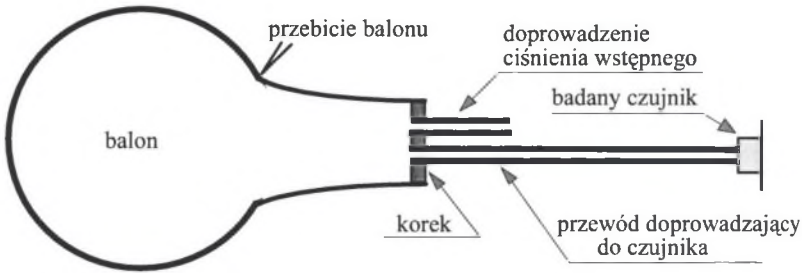
Rys. 8. Wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych przy wykorzystaniu dowolnego aperiodycznego przebiegu ciśnienia wejściowego (a) i przy impulsowej zmianie ciśnienia (b)

Fig. 8. Methods of frequency response determination based on an arbitrary shaped aperiodic pressure input signal (a) and pulse signal (b)

W trakcie prowadzenia badań skok ciśnienia był uzyskiwany wskutek pęknięcia balonu napompowanego do określonego ciśnienia. Bezpośrednie umieszczenie czujników na ściankach balonu nie jest możliwe, konieczne jest stosowanie rurek doprowadzających ciśnienie, tak jak to pokazano na rys. 9 [15].

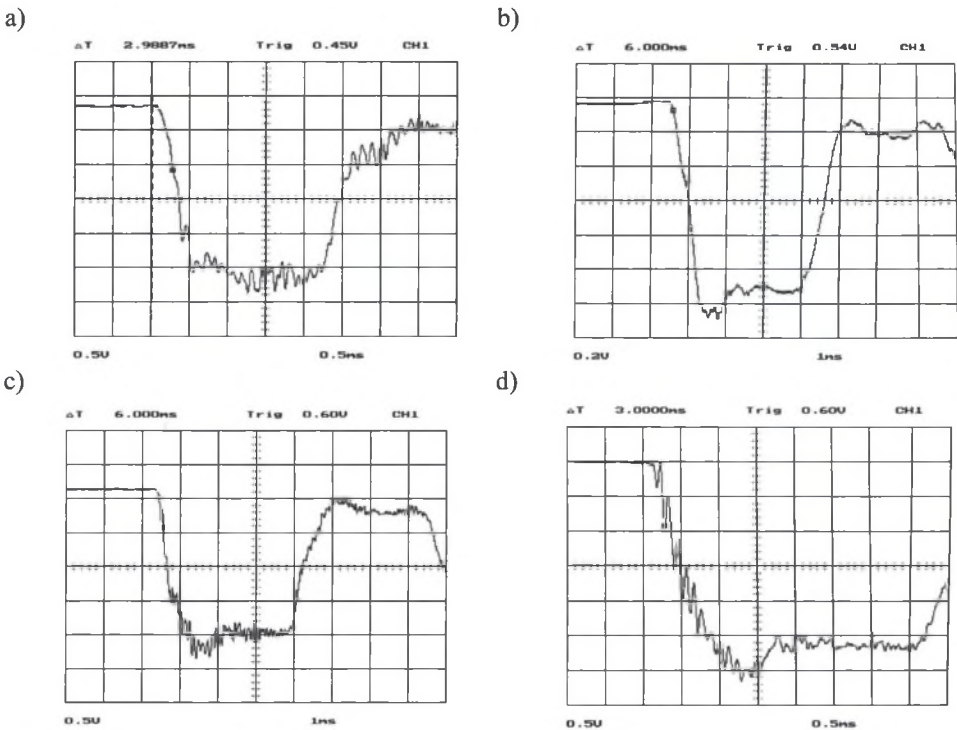
Ponieważ propagacja zmian ciśnienia w przewodzie doprowadzającym do czujnika ma charakter falowy, należy zastosować rurkę o odpowiedniej długości, tak aby fala odbita od końca rurki umieszczonego w korku i powracająca do czujnika pojawiała się na jego wejściu

po zaniku odpowiedzi czujnika na skok. Jedynie odpowiedź czujnika na pierwszy przebieg skokowy jest brana pod uwagę w celu określenia charakterystyki częstotliwościowej.



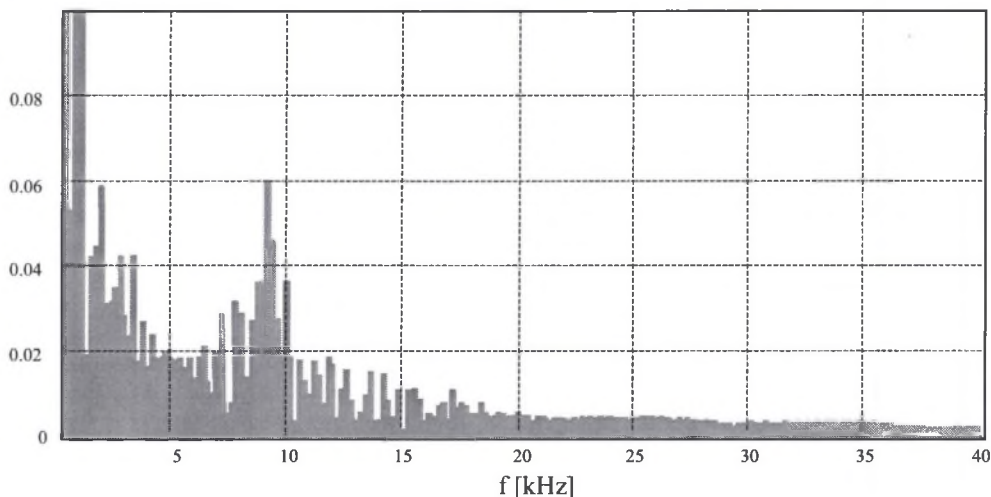
Rys. 9. Sposób generacji ujemnego skoku ciśnienia
Fig. 9. Method of down step pressure generation

Na rys. 10 przedstawiono wykresy kilku charakterystycznych przebiegów odpowiedzi czujnika, uzyskane przy dwóch różnych długościach przewodu doprowadzającego: 348 mm (przebieg 10a) oraz 586 mm (przebiegi 10b,c,d).



Rys. 10. Przykładowe przebiegi czasowe odpowiedzi skokowej czujnika badanego
Fig. 10. Examples of transient step responses of the sensor

Poszczególne przebiegi różnią się pomiędzy sobą. Widoczna niepowtarzalność przebiegów czasowych jest źródłem trudności w precyzyjnym określeniu charakterystyk częstotliwościowych. Analiza widmowa (rys. 11) pozwoliła na wykrycie składowej o częstotliwości ok. 9 kHz, odpowiadającej częstotliwości rezonansu Helmholtza dla komory wylotowej.



Rys. 11. Widmo amplitudowe typowego przebiegu odpowiedzi skokowej czujnika badanego
Fig. 11. Frequency spectrum of typical transient step response of the sensor

Widoczna na poprzednich charakterystykach częstotliwość Helmholtza dla komory wlotowej, równa ok. 2,8 kHz, nie jest w tym przypadku widoczna. Wynika to ze znacznego przedłużenia króćca wlotowego przez przewód doprowadzający, co powoduje obniżenie tej częstotliwości. Ponadto model w postaci rezonatora Helmholtza jest poprawny tylko wtedy, gdy objętość króćca jest pomijalnie mała w stosunku do objętości wnęki [5, 7], co w tym przypadku nie zachodzi.

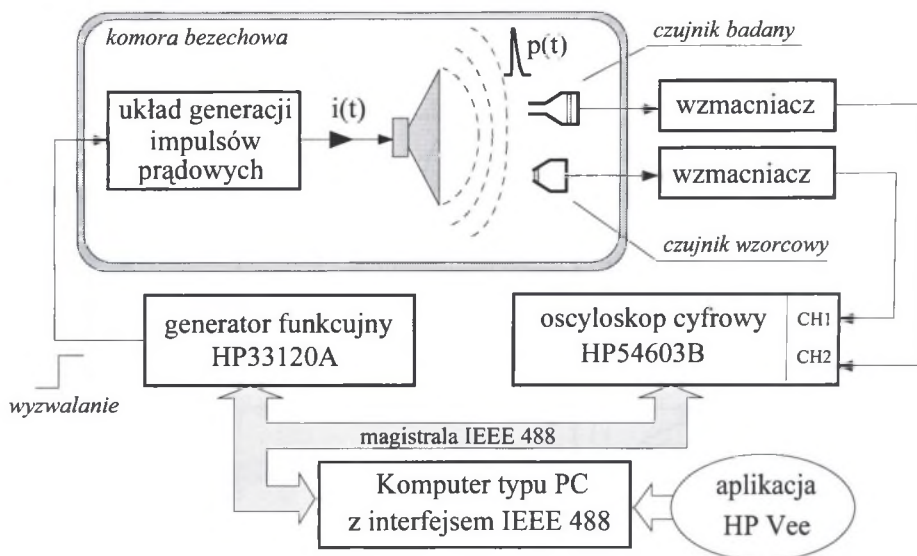
Metoda ujemnego skoku ciśnienia, jako jedyna z badanych metod, pozwala uzyskać amplitudy zmian ciśnienia równej zakresowi czujnika badanego – jest to niewątpliwie jej zaletą. Jest to jednak metoda kłopotliwa w realizacji, a powtarzalność uzyskanych przebiegów jest mała.

2.4. Metoda akustyczna

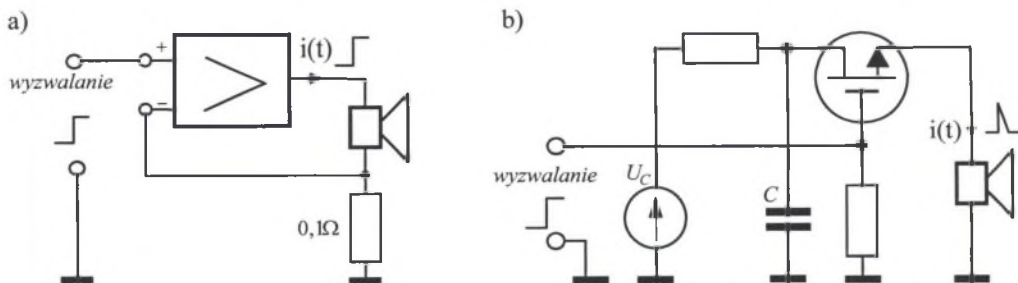
Wykorzystanie metody odpowiedzi impulsowej do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych pozwala uniknąć konieczności stosowania czujnika wzorcowego oraz uprościć konieczne obliczenia (rys. 8b). Zastosowanie tej metody do badania czujników ciśnienia warunkowane jest możliwością wygenerowania impulsowej zmiany ciśnienia. Badania przeprowadzono dla dwóch akustycznych źródeł impulsowego sygnału ciśnienia: głośnika elektrodynamicznego i przetwornika piezoelektrycznego.

Metoda impulsowa z głośnikiem elektrodynamicznym (opisana dokładnie w pracy [17]).

Schemat stanowiska pomiarowego służącego do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych czujników ciśnienia metodą impulsową, przy zastosowaniu głośnika, pokazano na rys. 12. Źródłem sygnału akustycznego jest głośnik umieszczony w otwartej przestrzeni lub w komorze bezchewej, sterowany prądem o zmiennej wartości. Stosowano zasilanie głośnika prądem zmienianym skokowo lub impulsowo, uzyskiwanym z układów pokazanych na rys. 13. W zbudowanym stanowisku zastosowano czujnik wzorcowy w celu zweryfikowania tezy o impulsowym charakterze generowanego ciśnienia.

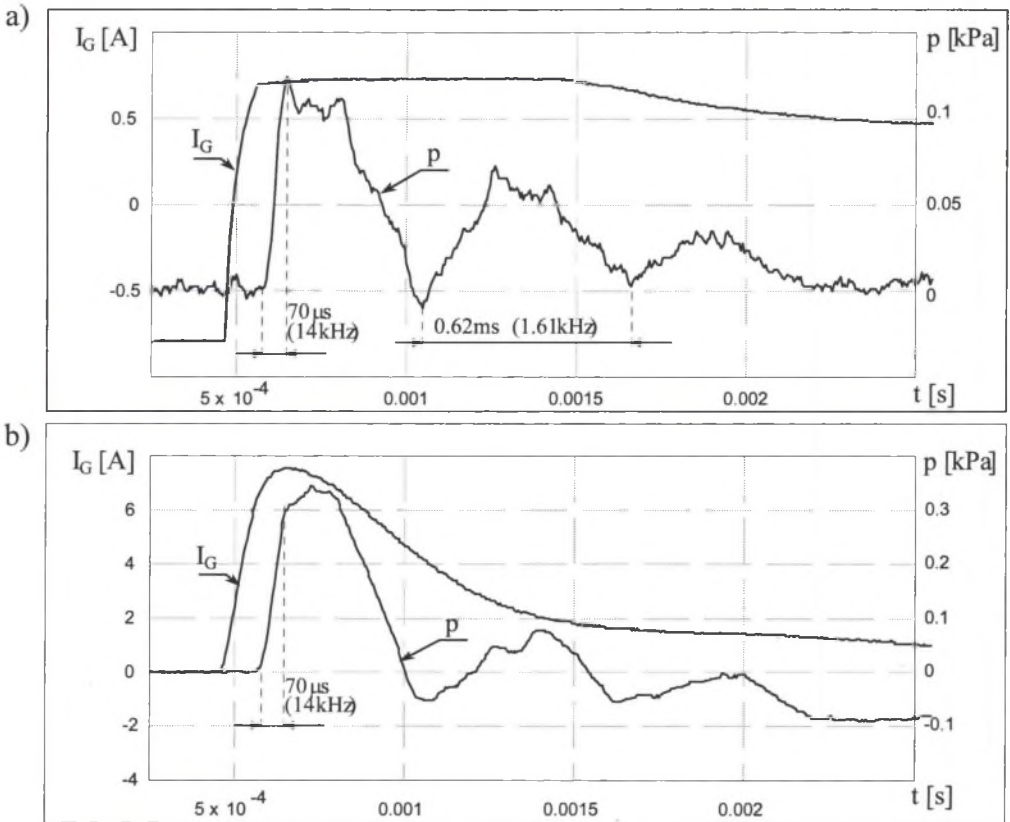


Rys. 12. System pomiarowy do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych czujników ciśnienia metodą impulsową
Fig. 12. Measuring system for determination of pressure sensor frequency response by the use of a pulse method



Rys. 13. Generator prądu głośnika zmiennego skokowo (a) i impulsowo (b)
Fig. 13. Step (a) and a pulse (b) shaped loudspeaker current generator

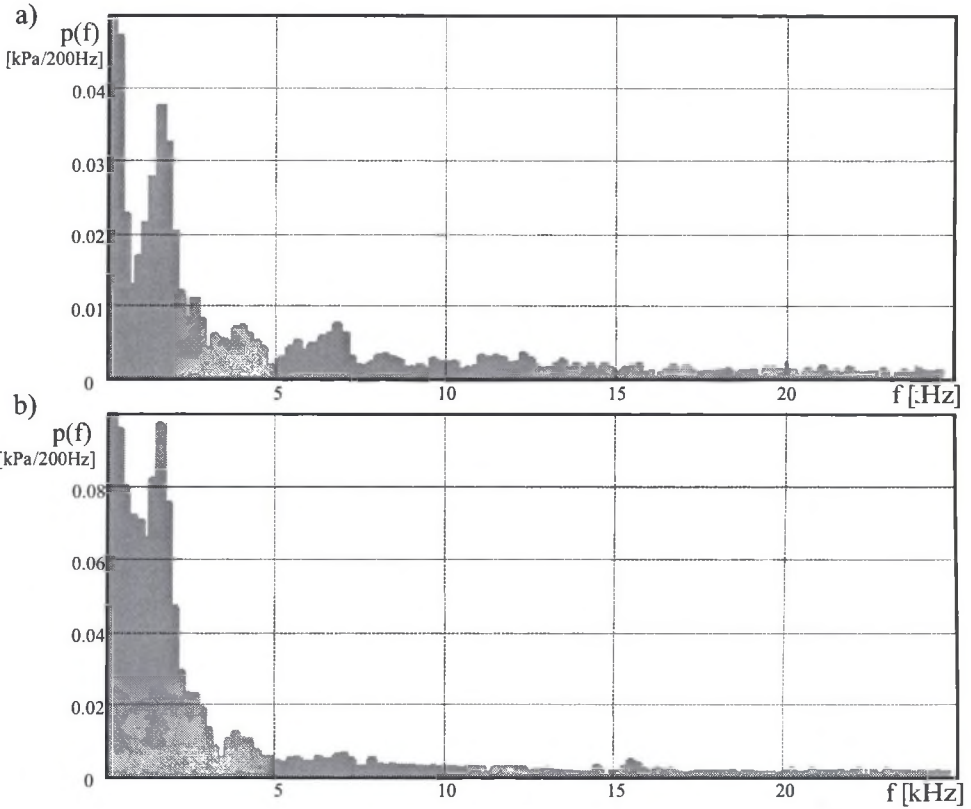
Ruch membrany głośnika powoduje powstanie zmiany ciśnienia rozchodzącej się w przestrzeni w postaci fali akustycznej. Czoło tej fali porusza się z prędkością dźwięku, docierając do wlotu czujnika umieszczonego w niewielkiej odległości. Po przejściu czoła fali ciśnienie na wlocie czujnika maleje do zera, co oznacza, że do czujnika doprowadzony został impuls ciśnienia. Czas trwania i kształt tego impulsu są trudne do obliczenia. Przebiegi prądów zasilania głośnika i odpowiadające im przebiegi ciśnienia zarejestrowane za pomocą czujnika wzorcowego pokazano na rys. 14.



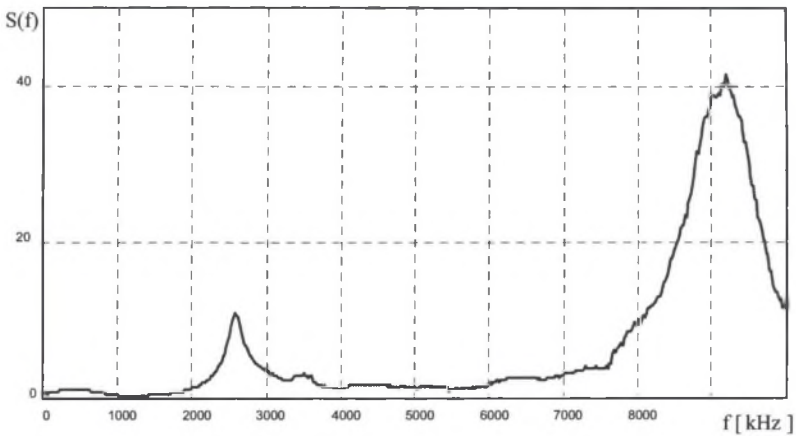
Rys. 14. Przebiegi impulsów ciśnienia dla skokowej (a) i impulsowej (b) zmiany prądu głośnika

Fig. 14. Pressure time response for a step (a) and a pulse (b) shape of the loudspeaker current

Na rysunku 15 pokazano widma częstotliwościowe uzyskiwanych sygnałów ciśnienia. Zakres użytecznych częstotliwości jest w obu przypadkach rzędu 10 kHz, przy czym dla skokowej zmiany prądu amplituda zmian ciśnienia jest mniejsza, lecz widmo sygnału jest bardziej równomiernie. Ponieważ jednak widma impulsów ciśnienia nie są płaskie w odpowiednio szerokim zakresie częstotliwości, to nie jest możliwe wyznaczenie charakterystyk częstotliwościowych czujnika badanego bez stosowania czujnika wzorcowego.



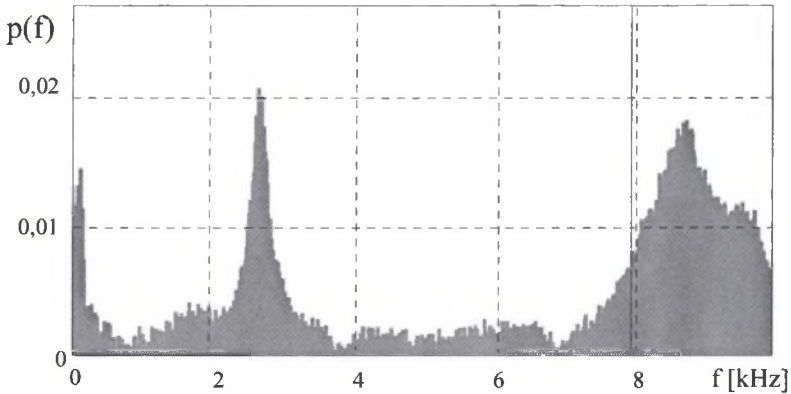
Rys. 15. Widma impulsów ciśnienia dla skokowej (a) i impulsowej (b) zmiany prądu
 Fig. 15. Frequency spectra of the pressure pulse for a step (a) and a pulse (b) form of the loudspeaker current



Rys. 16. Charakterystyka częstotliwościowa czujnika badanego wyznaczona metodą impulsową
 Fig. 16. Frequency response of the sensor under test determined by the pulse method

Ponadto, ze względu na stosunkowo małe amplitudy składowych widma dla częstotliwości powyżej 4 kHz, konieczne jest wielokrotne powtarzanie pomiaru i uśrednianie uzyskanych charakterystyk. Jest to łatwe do zrealizowania w automatycznym systemie pomiarowym.

Charakterystykę częstotliwościową czujnika badanego wyznaczano sposób zilustrowany na rys. 8a. Rezultat uzyskany przez uśrednienie dla ok. 400 powtórzeń pokazano na rys. 16.



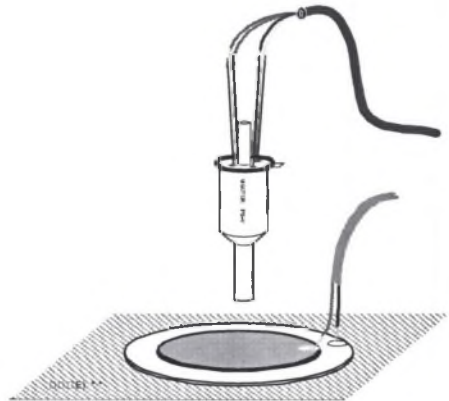
Rys. 17. Widmo odpowiedzi czujnika badanego na impuls ciśnienia
Fig. 17. Frequency spectrum of pressure pulse response of the sensor

Jeżeli celem badań jest jedynie wyznaczenie charakterystycznych częstotliwości rezonansowych czujnika badanego, to nie jest wymagane stosowanie czujnika wzorcowego ani uśredniania. Wniosek ten wynika z analizy pokazanego na rys. 17 widma pojedynczego sygnału czujnika badanego, na którym częstotliwości rezonansowe czujnika są wyraźnie widoczne.

Metoda impulsowa z generatorem piezoelektrycznym (opisana w pracy [18])

Impuls akustyczny wywoływany jest w tym przypadku przez doprowadzenie impulsu napięciowego do przetwornika piezoelektrycznego. Jako przetworniki piezoelektryczne zostały wykorzystane płytki izolacyjne pokryte jednostronnie ceramicznym materiałem piezoelektrycznym. Płytki takie używane są w głośnikach piezoelektrycznych. W badaniach używano płytek o średnicach 35 mm i 20 mm i grubościach warstwy piezoelektrycznej odpowiednio 0,3 mm i 0,2 mm.

Układ pomiarowy miał strukturę podobną do pokazanej na rys. 12, z tą różnicą, że sygnał wyjściowy czujnika badanego doprowadzony był do analizatora widmowego. Również w tym przypadku stosowano uśrednianie widma.



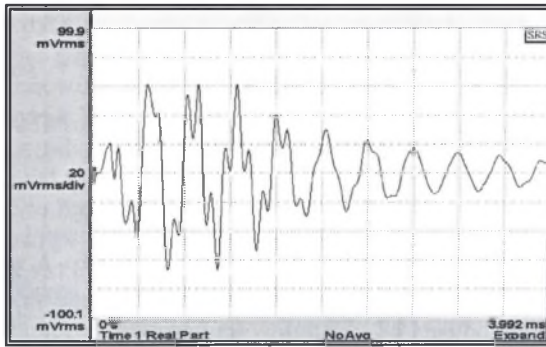
Rys. 18. Optymalne usytuowanie czujnika względem płytki piezoelektrycznej
Fig. 18. The optimal position of the sensor with respect to the piezoelectric element

Istotny dla uzyskiwanych wyników okazał się sposób zamocowania przetwornika piezoelektrycznego i usytuowanie czujnika badanego. W wyniku wielu prób stwierdzono, iż optymalną konfiguracją jest umieszczenie przetwornika na sztywnym podłożu i zamocowanie badanego czujnika bezpośrednio nad nim (rys. 18). Uzyskuje się wówczas zarówno dobrą powtarzalność, jak i największy sygnał wyjściowy.

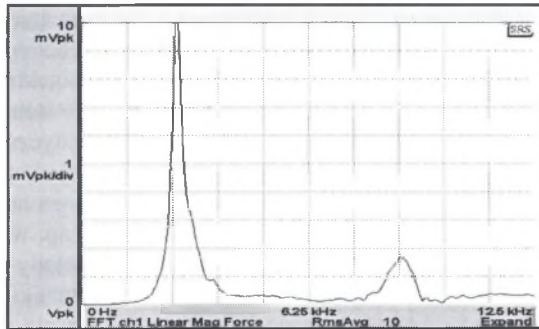
Na rysunku 19 przedstawiono przykładowy sygnał odpowiedzi czujnika badanego na impuls ciśnienia wygenerowany za pomocą przetwornika piezoelektrycznego i uśrednione widmo tego sygnału.

Istotną wadą tej metody jest wysoka częstotliwość rezonansowa przetworników piezoelektrycznych, zbliżona na ogół do częstotliwości Helmholtza czujników badanych.

a)



b)



Rys. 19. Przebieg czasowy odpowiedzi impulsowej czujnika (a) i jego widmo amplitudowe (b) przy wymuszeniu impulsu ciśnienia za pomocą przetwornika piezoelektrycznego
 Fig. 19. Time response of pressure sensor (a) and its averaged spectrum (b) in the case of the pressure pulse generated by a piezoelectric element

3. PODSUMOWANIE

Wyniki badań opisanych wyżej metod wyznaczania właściwości dynamicznych krzemowych czujników pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- 1° Każda z przedstawionych metod pozwala na wyodrębnienie charakterystycznych dla czujnika częstotliwości rezonansowych; wartości tych częstotliwości wyznaczone przy zastosowaniu poszczególnych metod są bardzo zbliżone, różnice mieszczą się w przedziale niepewności. Znaczne zróżnicowanie zakresu zmiennych ciśnień uzyskiwanych poszczególnymi metodami nie wpływa na uzyskane wyniki.
Metody te nie są jednakowo dogodne do praktycznej realizacji.
- 2° Najefektywniejszą z przeanalizowanych metod okazała się metoda częstotliwościowa. Jest ona jednak efektywna jedynie wówczas, gdy zastosuje się do jej realizacji wystarczająco zaawansowane oprzyrządowanie sprzętowe i programowe. Szczególnie kłopotliwa w realizacji i pracochłonna jest metoda z falą stojącą, ponieważ automatyzacja pomiarów jest tu niezwykle trudna. Metoda częstotliwościowa pozwala stosunkowo precyzyjnie wyznaczyć częstotliwości rezonansowe czujnika badanego w szerokim zakresie częstotliwości ok. 100...150 Hz do 10 kHz. W przypadku odmiany z falą stojącą ograniczeniem od strony częstotliwości niskich jest długość rury, a od strony częstotliwości wysokich możliwość uzyskania fali stojącej i dostrojenia się do strzałki tej fali. W wersji z falą bieżącą takich ograniczeń nie ma. Amplitudy uzyskiwanych ciśnień zależą od mocy zastosowanego głośnika i można je określić jako średnie, stosunkowo większe przy fali stojącej.
- 3° Najprostszą i wystarczająco efektywną metodą doświadczalnego oszacowania częstotliwości rezonansowej czujnika jest metoda impulsu akustycznego wytworzonego przez impulsowe zasilenie napięciowe przetwornika piezoelektrycznego. Przy stosowaniu tej metody należy jedynie zadbać, aby częstotliwość rezonansowa samego przetwornika (podawana przez producenta) była odległa od częstotliwości badanego czujnika. Metoda z wykorzystaniem przetwornika piezoelektrycznego nie jest wystarczająco precyzyjna do wyznaczenia przebiegu całej charakterystyki częstotliwościowej czujnika.
- 4° Bardzo korzystne właściwości ma metoda impulsowa z zastosowaniem głośnika elektrodynamicznego – umożliwia wyznaczenie charakterystyk czujnika badanego w zakresie od ok. 100 Hz do 10 kHz, przy wyższym niż dla przetwornika piezoelektrycznego poziomie ciśnień. Są to jednak ciśnienia znacznie mniejsze niż przy metodach częstotliwościowych, dlatego konieczne jest stosowanie uśredniania, choć charakterystyczne częstotliwości rezonansowe czujnika ujawniają się już w widmie odpowiedzi na pojedynczy impuls.
- 5° Jeżeli celem badań jest wyznaczenie nie tylko częstotliwości rezonansowych, ale dokładnego przebiegu charakterystyk częstotliwościowych czujnika (np. w celu zaprojektowania odpowiedniego układu korekcyjnego), to wszystkie opisane metody wymagają zastosowania czujnika wzorcowego jako czujnika odniesienia. W przypadku metod impulsowych wynika to z faktu, że widmo generowanego impulsu ciśnienia nie jest płaskie, natomiast w przypadku metod częstotliwościowych, z nierównomierności charakterystyk stosowanych głośników.

LITERATURA

1. Cieplucha J., Horodko L., Kazimierski Z.: *Reconstructing of the Oscillating Pressure signals*. Proc. of the XVI IMEKO World Congress, Vienna 2000, vol.III.
2. J. Horodko L.: *Analiza oscylacyjnego przepływu w pneumatycznych liniach sygnałowych*. Mat. Konf. MWK'97, s. 245-249.
3. Cieplucha J. Horodko L.: *Pomiary niestabilnego ciśnienia strugi gazu*. Mat. Kraj. Kongresu Metrologii, Gdańsk 1998.

4. Farre R., Peslin R., Navajas D., Gallina C., Suki B.: *Analysis of the dynamic characteristic of pressure transducers for studying respiratory mechanics at high frequencies*. Eur. Respir. Rev., 1991, 1, Rev. 3, s. 146-150.
5. Figliola R. S., Beasley D. E.: *Theory and design for mechanical measurements*. John Wiley & Sons, New York, 1991, s. 352.
6. *Piezoresistive Pressure Transducers. Instruction Manual*. Wyd. Endevco, IM8500 revision B, 1997.
7. Urzędniczek H., Zakrzewski J.: *Experimental verification of pressure sensors dynamic models*. Proc. of 4-th Int. Conference "Measurement 2003". Smolenice 2003. s. 487 – 490.
8. Urzędniczek H., Zakrzewski J.: *Korekcja właściwości dynamicznych piezoelektrycznych czujników ciśnienia*. Pomiary Automatyka Kontrola, nr 6, 2004 s. 27-31.
9. Bean V. E.: *Dynamic pressure metrology*. Metrologia, 1993/94, vol. 30, pp-737-741.
10. Lally J., Cumiskey D.: *Dynamic Pressure Calibration*. Sensors Online, April 2003, www.sensorsmag.com/articles/0403/15/pf_main.shtml
11. Schwappe J. L., Eichberger L. C., Muster D. F., Michaels E. L., Paskusz G. F.: *Methods for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers*. National Bureau of Standards, Monograph 67, December 1963.
12. Kobata T., Ooiwa A.: *Method of evaluating frequency characteristics of pressure transducers using newly developed dynamic pressure generator*. Sensors and Actuators A 2000, vol. 79, s. 97-101, 122-127.
13. Glass I. I., Martin W., Patterson G. N.: *A Theoretical and Experimental Study of the Shock Tube*. UTIA Report No. 2, Institute of Aerophysics, University of Toronto, November 1953.
14. Lokar t., Smercnik A., Bajcsi I.: *Generating dynamic pressure with loudspeakers*. Proc. of XVI IMEKO Congress, Vienna 2000.
15. Zakrzewski J., Wróbel K.: *Dynamic calibration of low range silicon pressure sensors*. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol.52. Feb.2003, s. 493-496.
16. Hagel R., Zakrzewski J.: *Miernictwo dynamiczne*. WNT, Warszawa 1984.
17. Urzędniczek H., Zakrzewski J.: *Pressure pulse generating system for dynamic calibration of silicon low range pressure sensors*. Proc. of XVII IMEKO World Congress, Dubrovnik 2003.
18. Załoga J.: *Stanowisko do badania właściwości dynamicznych manometrów piezorezystancyjnych*. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, spec. Automatyka i Metrologia. 2002, promotor prof. J. Zakrzewski.

Abstract

The paper describes and evaluates few methods for measurement of microelectronic pressure sensor frequency response. The frequency response presents the sensor opportunity for measurement of dynamically changing pressure. Some kinds of sensors with a membrane directly exposed to the measured pressure are built especially for that purpose (Fig. 2a). However, conventional and cheap microelectronic sensors are built in another manner (Fig.2b). Their housing and inlet pipe form an acoustic Helmholtz resonator with the frequency determined by the sensor dimensions. The frequency of that resonator dominates in the frequency response of the sensor.

Four methods of frequency response measurement were examined: standing wave method, moving wave method, down step method and single pulse method.

The standing wave method (Fig.4) gives the most repeatable results because of the well-specified measuring conditions. For each frequency supplied to the loudspeaker the piston position has to be adjusted in order to obtain a standing wave in the tube. The procedure is time consuming, difficult to be automatized and noisy. Because of the very sharp sensor resonance, the measurement has to be performed with a high resolution that means a lot of fre-

quency points checked point after point. The effect of too low-resolution procedure is presented in Fig.5a with respect to the results obtained by the proper resolution presented in Fig.5b.

The moving wave method was realized by inserting both the loudspeaker and the sensor in a chamber covered inside by the acoustic wave damping material. The loudspeaker was supplied by the harmonic signal with the frequency controlled by the measuring system (Fig.6). The same system took of the output signals from the sensor under test and from the reference sensor. The acquisition and processing of the signals were performed automatically by the system according to the HP Vee application. The method is much more convenient because of its fully programmable mode of operation. It needs, however, more complicated instruments and equipment. The resulting frequency response depends on the position of the sensor with respect to the loudspeaker and therefore the results should be related to the reference sensor.

The down step pressure signal was realized by the puncture of the balloon (Fig. 9). The time response was measured by the oscilloscope (Fig. 10). In order to avoid the influence of the acoustic oscillations in an inlet pipe, its lengths should be carefully chosen. Repeatability of the results is rather poor. Some important dynamic properties of the sensor are sometimes lost using that method. Its greatest advantage is the opportunity to achieve a great value of the pressure, near to the highest range of the sensor under test.

The pulse method was realized with two different acoustic pulse sources: the loudspeaker and the piezoelectric plate. By the use of the loudspeaker an acoustic pulse may be achieved either by a pulse formed supply current or by the step formed supply current. The first manner allows achieving much greater values of the current pulse magnitude and therefore also greater values of the acoustic pulse (Fig. 14). The realization of the method was automated in a similar way as for the moving wave method. (Fig. 12).

The use of a piezoelectric plate as a source of a pulse acoustic signal is the simplest method because of the simplicity of the voltage pulses generating circuit. It was stated that the most repeatable results are obtained when the plate is placed on the stiff plane and the sensor is situated just above the plate (Fig.18). The problem, which may occur by application of that method, is related to the own frequency of the piezoelectric plate overlapping the resonant frequency of the sensor.

The user of the sensor is mostly interested in the value of the resonant frequency, which determines the possibility of dynamic measurements realized by that sensor. All the methods described in the paper give almost the same results of the resonant frequencies. The determination of the frequency response characteristics, and especially of the damping factors, is more complicated. The standing wave method seems to be the most recommended for that purpose. The restriction mentioned above related to the step and pulse methods should be taken into account while evaluation of those methods.

Wpłynęło do Redakcji dnia 4 maja 2004 r.

Recenzent: Dr hab. inż. Roman Janiczek, prof. Pol. Częstochowskiej