

Henryk URZĘDNICZOK, Jan ZAKRZEWSKI

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT METROLOGII I AUTOMATYKI ELEKTROTECHNICZNEJ

Korekcja charakterystyk dynamicznych mikroelektronicznych czujników ciśnienia

Dr inż. Henryk URZĘDNICZOK

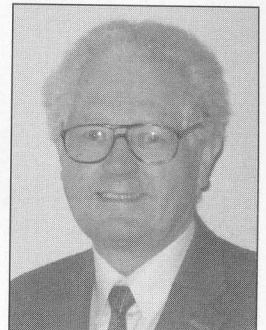
Ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej, specjalność Automatyka i Metrologia. W roku 1990 uzyskał stopień doktora. Zajmuje się zagadnieniami pomiarów wielkości nieelektrycznych, dynamiką przetworników pomiarowych, przetwornikami wieloparametrowymi oraz systemami pomiarowymi.



hurzodn@polsl.gliwice.pl

Prof. Jan ZAKRZEWSKI

Zajmuje się badaniem i konstrukcją czujników i przetworników do pomiaru wielkości mechanicznych i fizyko-chemicznych. Szczególnym obiektem jego zainteresowań są właściwości dynamiczne czujników i struktur pomiarowych. Autor podręcznika „Czujniki i Przetworniki Pomiarowe” Wyd. Pol. Śl. 2004.



janzak@polsl.gliwice.pl

Streszczenie

Konwencjonalne, względnie tanie, mikroelektroniczne czujniki ciśnienia konstruowane są głównie z przeznaczeniem do pomiarów statycznych. Charakterystyki częstotliwościowe takich czujników nie są płaskie, wykazują szczyty rezonansowe. W artykule przedstawiono możliwości korekcji dynamicznej, pozwalającej na kilkukrotne rozszerzenie zakresu częstotliwości w którym charakterystyka częstotliwościowa wypadkowa jest płaska. Podano wyniki badań dla kilku typów czujników.

Abstract

Common use microelectronic pressure sensors are normally not destined for measurement of dynamic pressures. Their frequency response is not flat and very often has a resonance due to acoustic properties of the sensor. The paper presents the possibility of frequency response correction leading to the extension of the flat part of the response up the resonant frequency. Some practical results for three different microelectronic sensors are given.

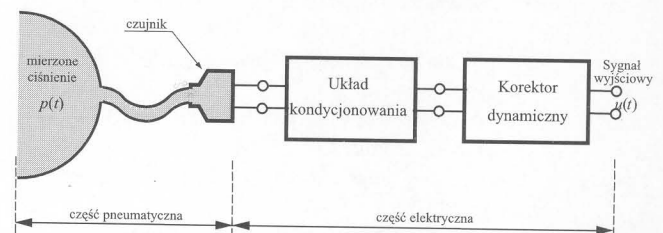
Słowa kluczowe: czujniki ciśnienia, korekcja dynamiczna, charakterystyka częstotliwościowa, model dynamiczny

Keywords: pressure sensor, dynamic correction, frequency response, dynamic model

1. Wprowadzenie

Na poprawność pomiarów ciśnień zmiennych w czasie mają wpływ dwa zasadnicze czynniki: sposób doprowadzenia ciśnienia mierzonego do czujnika oraz właściwości dynamiczne samego czujnika. Pierwszy z tych czynników jest przedmiotem analiz zawartych w wielu publikacjach [1,2,3,4]. Uwzględniając formułowane w nich wnioski, konstruktor systemu pomiarowego może zadbać o minimalizację błędów dynamicznych mających swe źródło w tej części pomiarowego. Na właściwości dynamiczne czujnika konstruktor nie ma praktycznie wpływu. Może jedynie poszukiwać czujnika o pożądanym właściwościach, jednakże w przypadku czujników mikroelektronicznych oferowanych na rynku wybór jest niewielki. Konwencjonalne, względnie tanie czujniki ciśnienia, konstruowane są głównie z przeznaczeniem do pomiarów statycznych. Stwierdzenie takie wynika z analizy typowych konstrukcji, a także z badań właściwości dynamicznych wybranych czujników [5, 6]. Nieliczne firmy (Endevco, Kulite) oferują czujniki specjalne, których konstrukcja zapewnia bardzo dobre właściwości dynamiczne, jednakże ceny są wówczas zwykle kilkadziesiąt razy wyższe, co w wielu przypadkach wyklucza ich stosowanie.

Istnieje możliwość poprawy właściwości dynamicznych czujników konwencjonalnych poprzez zastosowanie korekcji dynamicznej w układzie przetwarzania elektrycznego sygnału wyjściowego z czujnika, w sposób schematycznie pokazany na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat toru pomiaru ciśnienia z zastosowaniem korektora dynamicznego

Fig. 1. Pressure measuring chain with the dynamic corrector

Korekcja dynamiczna, w zależności od potrzeby, może dotyczyć zarówno właściwości dynamicznych samego czujnika ciśnienia, jak również całej części pneumatycznej toru pomiarowego, tj. z uwzględnieniem przewodów doprowadzających ciśnienie do czujnika. W niniejszym opracowaniu omawiane są wyniki badań dotyczących korekcji samego czujnika, którego konstrukcja w ramach określonego typu jest powtarzalna. Konstrukcja części doprowadzającej jest z reguły unikalna, toteż opracowanie odpowiedniego korektora jest możliwe dopiero po uzyskaniu informacji o właściwościach dynamicznych części pneumatycznej.

2. Model dynamiczny mikroelektronicznego czujnika ciśnienia

Mikroelektroniczne czujniki ciśnienia to czujniki piezorezystancyjne lub pojemnościowe wykonane technologią MEMS, w mniejszym lub większym stopniu zintegrowane z elementami zewnętrznymi służącymi do adjustacji zera i zakresu oraz do kompensacji temperaturowej. Typowym rozwiązaniem konstrukcyjnym takich czujników jest umieszczenie struktur krzemowych czujników na podstawie ze szkła typu Pyrex i zamknięcie ich w obudowie metalowej lub plastikowej. Czujniki takie budowane są jako czujniki ciśnienia bezwzględnego (rys. 2a) lub względnego (rys. 2b).



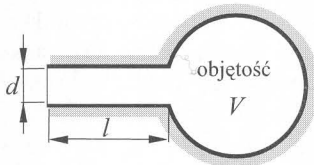
Rys. 2. Budowa krzemowych czujników ciśnienia bezwzględnego (a) i względnego lub różnicowego (b)

Fig. 2. Structure of the gauge (a) and reference or differential (b) pressure sensors

Umieszczenie struktury krzemowej wewnątrz obudowy tworzy wnękę, do której ciśnienie doprowadzane jest za pomocą króćca zazwyczaj o średnicy wewnętrznej niewielkiej w stosunku do wymiarów obudowy. Konstrukcja taka tworzy rezonator (wnękę) Helmholtza [7], którego częstotliwość własna i tłumienie określone są jej kształtem i wymiarami. Parametry te można wyznaczyć rachunkowo dla uproszczonego modelu pokazanego na rys. 3, w oparciu o następujące zależności [7]:

$$f_n = \frac{ad}{4\sqrt{\pi}(l + \pi d/2)\sqrt{V}} \quad \text{i} \quad \xi = \frac{32\mu\sqrt{Vl/\pi E\rho}}{d^3} \quad (2)$$

gdzie d , l , i V są pokazane na rysunku 3, a pozostałe parametry charakteryzują gaz (a jest prędkością fali akustycznej, μ jest lepkością, E jest modułem ścisłości, ρ jest gęstością). W praktyce kształt wnęki jest bardziej skomplikowany, co sprawia, że częstotliwość własna i tłumienie są trudne do wyznaczenia analitycznego i należy ją wyznaczać pomiarowo. Różnice pomiędzy wartościami parametrów obliczonych, a zmierzonych są na ogół znaczne [7].



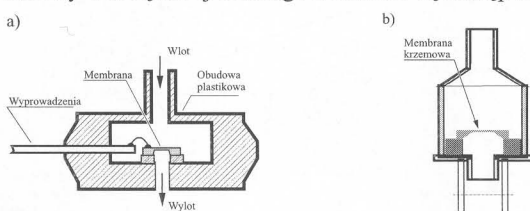
Rys. 3. Rezonator Helmholtza
Fig. 3. The Helmholtz resonator

Należy zwrócić uwagę, że w konstrukcji czujnika różnicowego (rys. 2b) występują dwie komory, wlotowa i wylotowa. Każdej z nich odpowiada inna częstotliwość własna i tłumienie rezonatora Helmholtza. Ponadto również sama struktura krzemowa, a także elementy obudowy są elementami mechanicznymi wykazującymi zjawisko rezonansu. W rezultacie czujnik ciśnienia stanowi skomplikowaną strukturę mechaniczną, charakteryzującą się znaczną liczbą rezonansów, przy czym, jak pokazują badania [5, 7], często uwidacznia się jeden dominujący rezonans.

Charakterystyka częstotliwościowa czujnika, wykorzystywana w analizie właściwości dynamicznych, jest efektem nakładania się wszystkich składowych rezonansowych występujących w czujniku. Analitycznie wyznaczenie tej charakterystyki jest w praktyce niemożliwe. W tej sytuacji jedyną podstawę do projektowania korektora dynamicznego mogą stanowić wyniki pomiarów charakterystyk częstotliwościowych czujnika. Opracowano wiele różnych metod pomiarowego wyznaczania takich charakterystyk, różniących się osiąganym zakresem osiąganych częstotliwości oraz ciśnień. Szczególnie proste w realizacji, lecz umożliwiające badania jedynie czujników o małych zakresach (rzędu kilku kPa), są metody opisane w pracach [8, 9].

3. Charakterystyki częstotliwościowe badanych czujników

Przedmiotem badań były konwencjonalne czujniki ciśnienia o małych zakresach, produkcji firm Vigotor (typ PS-005), Motorola (MPX10GP) oraz Fujikura (FM302). Na rys. 4. przedstawiono szkice budowy dwóch pierwszych czujników. Bliższe dane odnośnie budowy wewnętrznej trzeciego z nich nie są dostępne.

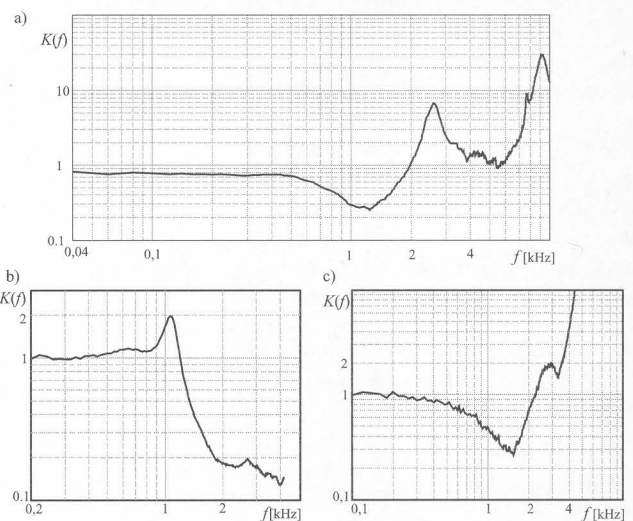


Rys. 4. Budowa badanych czujników firmy Motorola (a) i firmy Vigotor (b)
Fig. 4. Structure of the investigated sensors made by Motorola (a) and Vigotor (b)

Charakterystyki częstotliwościowe badanych czujników wyznaczano pomiarowo różnymi metodami, opisanymi szerzej w pracy [9]. Wyniki pomiarów poszczególnych czujników, uzyskane tymi metodami, były zbliżone. Jako czujników wzorcowych użyto dwóch czujników piezorezystancyjnych. Jeden to czujnik firmy Kulite typ XT-190M o zakresie 35 kPa i podanej przez producenta częstotliwości granicznej 60 kHz. Drugi to czujnik firmy Endevco (dawniej Bruel Kjar) typu 8507C-1 o zakresie 7 kPa i częstotliwości granicznej 55 kHz.

Na rysunku 6 pokazano charakterystyki wszystkich badanych czujników. Badania czujnika PS-005 przeprowadzono w najszerszym zakresie częstotliwości, do 10 kHz. Widoczne są dwa szczyty rezonansowe, wynikające z rezonansu Helmholtza dla komory wlotowej (ok. 2650 Hz) oraz dla komory wylotowej (ok. 9100 Hz). Dla czujnika MPX10GP badania prowadzono w węższym zakresie częstotliwości – na charakterystyce występuje tylko jeden szczyt rezonansowy, przy częstotliwości ok. 1100 Hz. W przypadku czujnika FM302 ewentualny szczyt rezonansowy może występować dla częstotliwości wyższych, natomiast częstotliwości poniżej 1,5 kHz czujnik wykazuje charakter inercyjny.

Zgodnie z oczekiwaniami, wynikającymi z uwag zamieszczonych w punkcie 2, kształty charakterystyk są bardziej złożone niż wynikałoby to z uproszczonego modelu Helmholtza.



Rys. 5. Charakterystyki częstotliwościowe badanych czujników: PS-005 (a), MPX10GP (b) oraz FM302 (c)

Fig. 5. Frequency response of investigated sensors: PS-005 type (a), MPX10GD type (b) and FM302 type (c)

4. Metody korekcji dynamicznej

Celem korekcji dynamicznej jest rozszerzenie pasma częstotliwości w ramach którego działanie czujnika można uznać za poprawne. Pasma to jest ograniczone pierwszym rezonansem akustycznym czujnika. Z analizy przedstawionej w punkcie 2 wynika, iż konstrukcyjnym sposobem rozszerzenia pasma jest zwiększenie częstotliwości tego rezonansu i zmniejszenie tłumienia poprzez zmniejszenie długości wlotu i objętości komory czujnika. Sformułowana powyżej zasada konstrukcyjna jest realizowana w czujnikach specjalnie zaprojektowanych do pomiarów dynamicznych. W czujnikach tych przewód doprowadzający nie występuje w ogóle, a komora ma objętość zredukowaną do konstrukcyjnego minimum. Ponadto przewód wentylacyjny (wylot) jest cienki i często bardzo długi (kilkakrotnie dłuższy od długości czujnika) w celu zwiększenia tłumienia.

W czujnikach konwencjonalnych, które były przedmiotem badań, użytkownik ma zazwyczaj ograniczone możliwości ingerencji w konstrukcję czujnika, a podane wyżej zasady poprawy właściwości dynamicznych mogą być zastosowane w bardzo ograniczonym zakresie.

Odmianym sposobem korekcji jest zastosowanie korektora włączonego łańcuchowo w torze przetwarzania sygnału wyjściowego czujnika, tak jak zobrazowano na rys. 2. W oparciu o znajomość modelu dynamicznego czujnika, np. w postaci transmitancji częstotliwościowej, transmitancję korektora można wyznaczyć z zależności:

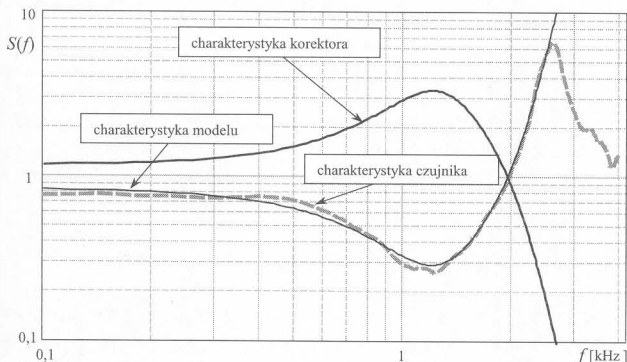
$$K_k(j\omega) = K_z(j\omega) [K_c(j\omega)]^{-1} \quad (2)$$

gdzie $K_z(j\omega)$ jest pożądaną transmitancją zastępczą (wypadkową) całego układu, a $K_c(j\omega)$ i $K_k(j\omega)$ są odpowiednio transmitancjami czujnika i korektora.

Jak wynika z zależności (2) matematyczne wyznaczenie transmitancji korektora jest proste, wystarczająca jest znajomość transmitancji czujnika, a właściwie jego modelu dynamicznego oraz określenie wymaganej transmitancji zastępczej całego toru pomiarowego. W praktyce jednak występują dwie podstawowe trudności: wyznaczenie adekwatnego modelu dynamicznego czujnika oraz praktyczna realizacja korektora.

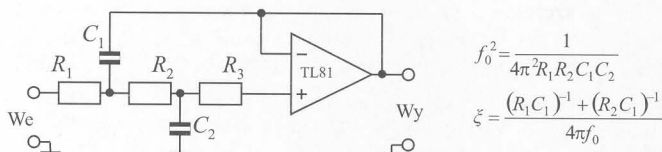
Identyfikację modelu dynamicznego czujnika można przeprowadzić bazując na wynikach pomiarów charakterystyk częstotliwościowych, wyznaczając model uproszczony, nie w pełni adekwatny. Skuteczność korekcji wynika z kompromisu pomiędzy adekwatnością modelu czujnika w możliwie szerokim zakresie częstotliwości, a prostotą realizacji odpowiadającego mu układu korektora.

Zakładając płaską charakterystykę częstotliwościową toru pomiarowego należy zastosować układ korekcyjny o charakterystyce częstotliwościowej odwrotnej w stosunku do charakterystyki czujnika (patrz zał. (2)). Ze względu na rezonansowy charakter czujnika korektor powinien być filtrem środkowo zaporowym o częstotliwości zaporowej zgodnej z częstotliwością rezonansową czujnika. Precyzyjne odwzorowanie charakterystyki czujnika w zakresie częstotliwości powyżej rezonansu (np. do ok. 6kHz na rys. 5a) wymagałoby jednak modelu wysokiego rzędu. Prowadzi to do trudności w praktycznej realizacji. Zrezygnowano z poszukiwania takich filtrów i ograniczono identyfikację dynamiczną modelu czujnika do części początkowej charakterystyki, aż do pierwszego szczytu rezonansowego. Transmitancję korektora wyznaczano jako odwrotność transmitancji modelu czujnika w tym zakresie częstotliwości. Postępowanie to ilustruje rys. 6.



Rys. 6. Charakterystyki czujnika PS-005, jego modelu 4-go stopnia i korektora.
Fig. 6. Frequency response of the PS-005 type sensor and its 4 order model

Korektor budowano przez łańcuchowe połączenie ogni, z których każde stanowiło element drugiego rzędu. Liczbę ogni oraz współczynniki dla każdego z nich dobierano tak, aby uzyskać jak najlepszą zgodność odwrotnej charakterystyki częstotliwościowej korektora z charakterystyką czujnika, a przez to największą skuteczność korekcji. Praktycznie każde z ogni budowano w postaci układu elektrycznego o schemacie pokazanym na rys. 7. Na rysunku tym podano również zależności pomiędzy parametrami pojedynczego ogniwa, a wartościami elementów w układzie, z których można wyznaczyć wartości poszczególnych elementów.



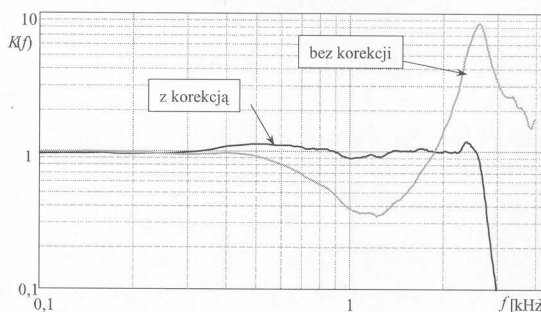
Rys. 7. Schemat pojedynczego ogniwa korektora i zależność jego parametrów od wartości elementów.

Fig. 7. Single corrector chain and its parameter dependence on the element values

5. Wyniki korekcji dynamicznej

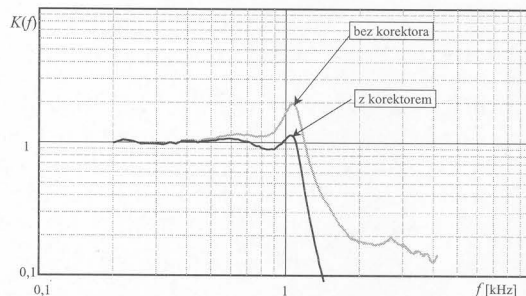
Zwiększanie rzędu korektora nie zawsze prowadzi do istotnego zwiększenia skuteczności korekcji. Wynika to ze złożoności zjawisk kształtujących charakterystykę częstotliwościową czujnika. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów pozwalają stwierdzić, że skuteczną korekcję można uzyskać stosując korektory czwartego rzędu, złożone z dwóch ogni opisanych wyżej.

Na kolejnych rysunkach pokazano charakterystyki badanych czujników i charakterystyki uzyskane po zastosowaniu korektorów czwartego rzędu o optymalnych współczynnikach w zakresie częstotliwości do pierwszego rezonansu.



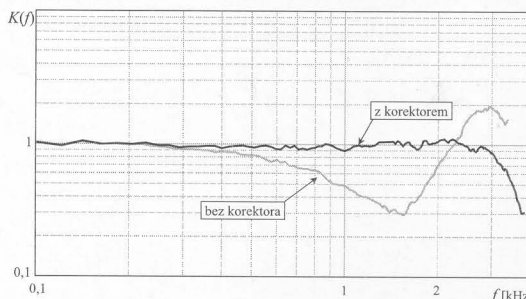
Rys. 8. Unormowane charakterystyki częstotliwościowe czujnika PS-005 bez i z korektorem.

Fig. 8. Normalised frequency response of PS-005 type sensor before and after correction



Rys. 9. Unormowane charakterystyki częstotliwościowe czujnika MPX10GP

Fig. 9. Normalised frequency response of MPX10GP type sensor before and after correction



Rys. 10. Unormowane charakterystyki częstotliwościowe czujnika FM302

Fig. 10. Normalised frequency response of FM302 type sensor before and after correction

Największe, ok. 9-krotne, rozszerzenie pasma częstotliwościowego uzyskano dla czujnika FM302. Dla czujnika PS-005 szerokość pasma wzrosła ok. 4-krotnie, a dla czujnika MPX10GP tylko 1,5-krotnie. Widoczne na wykresach na rys. 10 nierównomierność charakterystyk po korekcji wynikają nie tylko z nieidealnego dopasowania korektora. Mają one częściowo charakter stochastyczny co jest spowodowane stosunkowo małą precyzją pomiarowego wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych.

6. Podsumowanie

Przedstawione wyniki pozwalają na stwierdzenie, że zastosowanie stosunkowo prostego korektora dynamicznego pozwala na istotne rozszerzenie pasma częstotliwościowego konwencjonalnych piezorezystancyjnych czujników ciśnienia. Skuteczność tej metody nie jest jednakowa dla różnych typów czujników. Stosując korektory 4-go stopnia, o współczynnikach dobranych optymalnie dla każdego z czujników, w najlepszym przypadku uzyskano ok. 9 krotne zwiększenie częstotliwości granicznej, a w najgorszym ok. 1,5 krotne. Zastosowanie korektorów wyższych rzędów pozwoliłoby zwiększyć skuteczność korekcji, pociągając jednak za sobą większą złożoność układu korektora. W niektórych przypadkach dobranie korektora optymalnego może prowadzić do niestabilności układu realizowanego praktycznie.

Dobranie właściwych parametrów korektora jest możliwe jedynie w oparciu o znajomość charakterystyki częstotliwościowej czujnika. Stanowi to istotną trudność, ponieważ producenci na ogół nie umieszczają takich charakterystyk w materiałach katalogowych, toteż konieczne jest pomiarowe ich wyznaczenie. Opracowano łatwe w realizacji, a przy tym wystarczająco precyzyjne metody wyznaczania tych charakterystyk dla czujników o małych zakresach. Metody te opisano w pracy [9].

Literatura:

- [1] Cieplucha J., Horodko L., Kazimierski Z.: „Reconstructing of the Oscillating Pressure signals”. *Proc. of the XVI IMEKO World Congress*, vol. III, Vienna, 2000.
- [2] J. Horodko L.: „Analiza oscylacyjnego przepływu w pneumatycznych liniach sygnałowych”. *Mat. Konf. MWK'97* str. 245-249.
- [3] Cieplucha J. Horodko L.: „Pomiary nieustalonego 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 mechanic at high frequencies”. *Eur. Respir. Rev.*, 1991, 1, Rev. 3, pp. 146-150.
- [5] Urzędniczok H., Zakrzewski J.: „Experimental verification of pressure sensors dynamic models”. *Proc. of 4-th Int. Conference „Measurement 2003”*, pp. 487 – 490, Smolenice, 2003.
- [6] Zakrzewski J., Wróbel K.: „Dynamic calibration of low range silicon pressure sensors”. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 52, Feb. 2003, pp 493-496.
- [7] Figliola R. S., Beasley D. E.: „Theory and design for mechanical measurements”. p. 352, *John Wiley & Sons*, New York, 1991.
- [8] Urzędniczok H., Zakrzewski J.: „Pressure pulse generating system for dynamic calibration of silicon low range pressure sensors”. *Proc. of XVII IMEKO World Congress*, Dubrovnik, 2003.
- [9] Urzędniczok H., Zakrzewski J.: „Badania właściwości dynamicznych piezorezystancyjnych czujników ciśnienia”. (w przygotowaniu do druku w ZN Politechniki Śląskiej)

Title: Dynamic correction of conventional microelectronic pressure sensors

Artykuł recenzowany

Z żałobnej karty – wspomnienia osobiste

Polska metrologia poniosła ogromną stratę. Zmarł w pełni sił twórczych jeden z najwybitniejszych jej przedstawicieli średniego pokolenia, profesor Uniwersytetu Zielonogórskiego Jerzy Bolikowski, współtwórca tej Uczelni i rozwoju zielonogórskiego metrologicznego ośrodka naukowo-przemysłowego, liczącego się nie tylko w Polsce. Był człowiekiem o wybitnych cechach osobowych, bezkonfliktowy, pogodny, o specyficznym poczuciu humoru, powszechnie lubiany, znany i szanowany nie tylko na swojej Uczelni.

Piszącemu te słowa jest szczególnie ciężko pogodzić się z tą stratą, gdyż ze Zmarłym przyjaźnił się od młodych lat, zachęcił do studiowania specjalności: miernictwo elektryczne i w kilku pierwszych latach Jego pracy w Katedrze Miernictwa Elektrycznego wprowadzał w arkana techniki pomiarowej przy modernizacji telesmierzy hallotronowych. Jerzy też poszedł podobnym śladem, j opuszczając po dziesięciu latach z własnej inicjatywy dotychczas-

we miejsce pracy o nieprzychylniej podówezas dla dalszego rozwoju atmosferze środowiskowej i politycznej. Jego wybitne osiągnięcia naukowe i istotny wkład w tworzenie niemal od podstaw nowego ośrodka akademickiego potwierdziły słuszność tej decyzji. Dorobek zawodowy jest też znaczący i będzie się liczył przez długie jeszcze lata. Pomimo, że dane mu było o wiele zakrótkie życie, jest ono ze wszech miar spełnione, a dokońca wystarczyło by na parę życiorysów. **Politechnika Warszawska może być dumna z takiego wychowanka, zaś Uczelnia zielonogórska straciła jednego z najwybitniejszych swoich profesorów i organizatorów.**

Profesor Jerzy Bolikowski pozostanie w naszych sercach na zawsze.

Cześć Jego Pamięci
Zygmunt Warszawa