

Zygmunt BIERNACKI, Lech BOROWIK, Piotr RAKUS

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA, INSTYTUT KOMPATYBILNOŚCI ELEKTROMAGNETYCZNEJ I PODSTAW TELEKOMUNIKACJI,
Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa

Mikroprocesorowy anemometr z zanikającym sygnałem ultradźwiękowym

Prof. dr hab. inż. Zygmunt BIERNACKI

W 1969 r. uzyskał stopień dr n.t. z metrologii elektrycznej, a w 1990r. dr hab. n.t. w Państwowym Uniwersytecie Elektrotechnicznym w Sankt Petersburgu w zakresie Systemów pomiarowo-informacyjnych. W 1998r. uzyskał tytuł naukowy profesora n.t. z dyscypliny Elektrotechnika i spec. Metrologia elektryczna. Jest autorem lub współautorem ponad 270 publikacji i kilkunastu patentów. Jego obszar działalności n-b to Metrologia Elektryczna i Elektroniczna w zakresie pomiarów elektrycznych wielkości nieelektrycznych w szczególności termooanemometria.



Dr Piotr RAKUS

Jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej na stanowisku adiunkta. Od 1996 roku pracuje w Zakładzie Metrologii na Politechnice Częstochowskiej. Jest autorem lub współautorem ponad 20 publikacji z zakresu Metrologii Elektrycznej. Jego zainteresowania naukowe skupiają się na wykorzystaniu ultradźwięków małej mocy w nieinwazyjnych technikach pomiarowych.



e-mail: rakus@el.pcz.czest.pl

Dr hab. inż. Lech BOROWIK

Jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej na stanowisku profesora nadzwyczajnego. W jego dorobku naukowym jest ponad 60 publikacji naukowych zamieszczonych w czasopiśmie krajowych i zagranicznych oraz prezentowanych na konferencjach naukowych, środowiskowych, krajowych i międzynarodowych. W kręgu jego zainteresowań są diagnostyka urządzeń elektrycznych oraz pomiary wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi i elektronicznymi.



e-mail: borowik@el.pcz.czest.pl

Keywords: measurement of flow velocity, ultrasonic transducers, anemometer, flow.

1. Wprowadzenie

W pomiarach prędkości przepływów powszechnie wykorzystywany jest pomiar różnicy czasu przelotu pojedynczego znacznika ultradźwiękowego pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem. Czas ten zależy od rodzaju medium, kierunku i prędkości przepływu. Zmierzona różnica czasu niesie informację o prędkości danego przepływu. Wykorzystanie pojedynczych impulsów ultradźwiękowych narzuca konieczność stosowania dość krótkich impulsów o stromym zboczu co szczególnie dla gazów, przy stosunkowo niskich częstotliwościach fal ultradźwiękowych, nie jest proste w realizacji i niesie za sobą istotne źródła błędów. Zwiększanie częstotliwości sygnałów celem osiągnięcia krótkiego stromego impulsu powoduje w gazach zwiększenie jego tłumienia. Gazy, w porównaniu z cieczami, mają małą impedancję akustyczną (dla powietrza jest ona ok. 3400 razy mniejsza niż dla wody), natomiast współczynnik absorpcji jest o wiele większy niż dla cieczy (dla powietrza ok. 1600 razy większy niż dla wody) [2].

Ze względu na zależność współczynnika absorpcji od kwadratu częstotliwości fali ultradźwiękowej, stosowane są częstotliwości od kilkudziesięciu do kilkuset kHz [5]. Mniejsze częstotliwości sygnałów, niż w przypadku przepływomierzy ultradźwiękowych dla cieczy, mogą stwarzać problemy w dokładnej detekcji czasów przelotu impulsu ultradźwiękowego mimo, że prędkość fali w gazach jest kilka razy mniejsza niż w cieczach. Nakładają też ograniczenia związane z odległościami pomiędzy czujnikami pomiarowymi – z jednej strony nie mogą one być zbyt blisko siebie ze względu na długość fali ultradźwiękowej (w praktyce od kilku mm do ok. 1,6 cm - w powietrzu), z drugiej strony – usytuowanie ich zbyt daleko od siebie znacznie osłabi amplitudę odbieranego sygnału ze względu na duży współczynnik absorpcji [4, 6].

Prezentowana metoda wykorzystuje różnice w pomiarach częstotliwości cykli nadawania i odbioru fali ultradźwiękowej do określenia prędkości przepływającego medium.

2. Istota pomiaru

W prezentowanym rozwiązaniu elementy nadawcze i odbiorcze sprzężone są ze sobą w taki sposób, że generacja fali ultradźwiękowej trwa dotąd aż czoło sygnału dotrze do odbiornika. Wówczas następuje przełączenie układu – nadajnik zostaje zablokowany na czas trwania pobudzenia odbiornika wcześniej wygenerowaną falą. Czas trwania takiego cyklu (okres T_x) można określić jako sumę czasów nadawania i odbioru oraz pewnej wartości t_z wynikłej ze zwłoki działania układów elektronicznych:

$$T_x = t_n + t_o + t_z \quad (1)$$

gdzie:

t_n - czas nadawania,

Streszczenie

W artykule zaprezentowano anemometr ultradźwiękowy, którego działanie polega na pomiarze częstotliwości cyklu „nadawanie-odbior” sygnału pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem zgodnie lub przeciwnie do kierunku przepływu. Informacja o przepływie dla takiego rozwiązania, zawarta jest w różnicy częstotliwości powtarzania się tych cykli w zależności od prędkości i kierunku przepływu. Algorytm pomiarowy realizowany jest w układzie wykonanym w oparciu o mikroprocesor AT89C2051. Zastosowanie mikroprocesora do jednoczesnego sterowania nadajnikiem i odbiornikiem ułatwia synchronizację sygnałów co ma wpływ na poprawienie dokładności pomiarów. Zaproponowane rozwiązanie może być stosowane zarówno do pomiaru prędkości przepływu mediów gazowych jak i cieczy o zróżnicowanym składzie chemicznym czy stężeniu dzięki możliwości uniezależnienia wyniku od prędkości dźwięku, która jest charakterystyczna dla danego ośrodka w określonych warunkach. Przedstawiono również wybrane wyniki pomiarów prędkości przepływu powietrza przy użyciu takiego anemometru dla ustalonej prędkości mierzonej anemometrem kontrolnym w osi tunelu.

Słowa kluczowe: pomiary prędkości przepływów, przetworniki ultradźwiękowe, anemometr, przepływ.

Microprocessor-based anemometer with fading ultrasonic signal

Abstract

The paper presents an ultrasonic anemometer whose principle of working is based on measurements of the frequency of "transmission – reception" cycles of an ultrasonic signal between the transmitter and receiver with or against the flow direction. Information about the flow velocity is contained in the frequency of these cycles which depends on the value of velocity and its direction. The measuring system uses a simple microprocessor AT89C2051 which controls the work of a transmitter and receiver set. The chosen results of measurements of the air velocity with this anemometer are presented. The suggested solution can be applied to measurements of the flow speed of gas as well as liquid of all kinds of chemical composition or concentration thanks to the possibility of obtaining results independent of the sound speed characteristic for the given medium under determined conditions. There are also given the measurement results of the air flow speed taken with this anemometer for the established speed measured with the testing anemometer in the tunnel axis.

t_0 - czas odbioru,
 t_z - czas zwłoki zadziałania układów wykonawczych.

Przy określonej stałej prędkości przepływu cykl ten będzie powtarzany ze stałą częstotliwością f określonej dla nieruchomego medium:

$$f = \frac{1}{T_x} \quad (2)$$

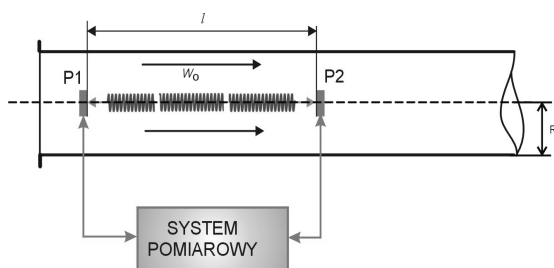
odpowiednio większą lub mniejszą (w zależności od kierunku i wartości prędkości przepływu) od częstotliwości f_0 określonej dla nieruchomego medium.

$$f_0 = \frac{1}{T_{x0}} \quad (3)$$

Dla nieruchomego medium i głowic pomiarowych rozmieszczonych równolegle do osi rurociągu (jak na rys. 1.) częstotliwość cykli f_0 jest stała i zależy od prędkości rozchodzenia się dźwięku c oraz drogi l jaką pokonać musi fala pomiędzy czujnikami a także od właściwości układu nadawczo odbiorczego:

$$f_0 = A \frac{c}{l} \quad (4)$$

A - bezwymiarowy współczynnik konstrukcyjny wyznaczony doświadczalnie.



Rys. 1. Schemat toru pomiarowego
 Fig. 1. Scheme of the measuring chain

natomiast dla poruszającego się medium częstotliwość powtórzeń opisuje zależność:

$$f = A \frac{c \pm w_0}{l} \quad (5)$$

gdzie:

w_0 - składowa prędkości równoległa do prostej przechodzącej przez środki czujników ultradźwiękowych.

Prędkość medium można wyrazić jedną z dwóch zależności, a mianowicie :

$$w_0 = \frac{c|(f - f_0)|}{f_0} \quad (6)$$

lub, gdy znana jest odległość l między czujnikami pomiarowymi a nie znana jest wartość prędkości dźwięku w danym ośrodku:

$$w_0 = \frac{l|(f - f_0)|}{A} \quad (7)$$

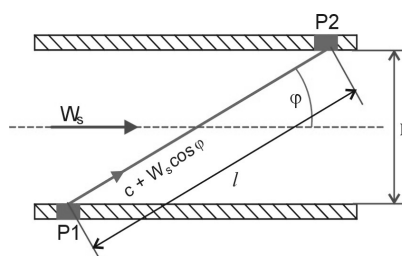
gdzie:

c - prędkość dźwięku w danym ośrodku,
 l - odległość między czujnikami pomiarowymi,
 f_0 - częstotliwość impulsów dla nieruchomego medium,
 f - częstotliwość impulsów dla medium o prędkości w_0 ,
 A - bezwymiarowy współczynnik konstrukcyjny.

W każdej z w/w zależności konieczne jest określenie częstotliwości f_0 dla nieruchomego medium, która to bezpośrednio zależy od prędkości rozchodzenia się dźwięku w danym ośrodku, odległości pomiędzy czujnikami, usytuowania w stosunku do ruchu strugi oraz właściwości samego układu elektronicznego.

Podane zależności (6) i (7) obowiązują dla usytuowania głowic pomiarowych w taki sposób, że droga akustyczna jest równoległa do kierunku ruchu strugi medium (rys. 1).

Możliwe jest rozmieszczenie głowic pomiarowych w sposób przy którym droga akustyczna tworzy z osią rurociągu pewien kąt (rys. 2). Wymaga to uwzględnienia faktu, że prędkość rozchodzenia się fali akustycznej zmienia się (zmniejszy lub zwiększy) o składową wektora prędkości medium.



Rys. 2. Rozmieszczenie głowic w ściankach tunelu
 Fig. 2. Arrangement of heads in the tunnel walls

Wtedy zależności (6) i (7) przyjmą odpowiednio postać:

$$w_s = \frac{c|(f - f_0)|}{f_0 \cos \varphi} \quad (8)$$

lub:

$$w_s = \frac{l|(f - f_0)|}{A \cos \varphi} \quad (9)$$

korzystając z zależności

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - \sin^2(\varphi)} \quad \text{oraz} \quad \sin \varphi = \frac{D}{l}$$

można wtedy zapisać:

$$w_s = \frac{c|(f - f_0)|}{f_0 \sqrt{1 - \left(\frac{D}{l}\right)^2}} \quad (10)$$

oraz

$$w_s = \frac{l|(f - f_0)|}{A \sqrt{1 - \left(\frac{D}{l}\right)^2}} \quad (11)$$

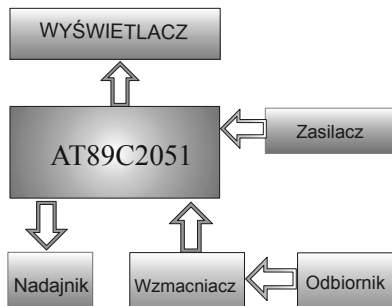
Należy zauważyć, że przy usytuowaniu głowic jak na rys. 2. mierzona jest prędkość średnia przepływu wzdłuż drogi akustycznej po całej średnicy rurociągu, natomiast przy rozmieszczeniu głowic pomiarowych równoległe do osi rurociągu otrzymujemy wynik pomiaru prędkości przepływu jedynie w określonej odległości od ścianki czy osi tunelu.

3. Wykorzystanie mikroprocesorowego układu pomiarowego

W pomiarach wykorzystano mikroprocesorowy układ pomiarowy zbudowany w oparciu o mikrokontroler AT89C2051P. Usprawniło to znacząco pomiary oraz stworzyło możliwości stosowania różnych algorytmów pomiarowych poprzez modyfikacje programu mikrokontrolera.

Podstawowym podzespołem funkcjonalnym układu pomiarowego jest mikrokontroler AT89C2051. Jest on taktowany sygnałem o częstotliwości 24 MHz, a cykl rozkazowy trwa 500 ns. Zapewnia to stosunkowo dokładne odmierzanie odcinków czasu o wartości 12,5 μ s, czyli 1/2 okresu generowanego sygnału 40 kHz, wprowadzanego do badanego przepływu [3, 7].

Sygnał o tej częstotliwości pojawia się na wyjściu procesora i jest kierowany na bazę tranzystora, spełniającego w układzie rolę klucza. Jego zadaniem jest wysterowanie nadajnika ultradźwiękowego typu T40T, który charakteryzuje się pojemnością własną 2,4 nF i z rezystorem tworzy układ RC o stałej czasowej około 1 μ s, a zatem przy częstotliwości rezonansowej (40 kHz) jest pewnie załączany. Na tym etapie kończy się tor nadajnika.



Rys. 3. Schemat mikroprocesorowego układu pomiarowego
Fig. 3. Block diagram of the microprocessor-based measuring system

Sygnał o charakterze echa pada na odbiornik T40R. Powstały tam sygnał jest kierowany do pierwszego wzmacniacza, który dla częstotliwości 40 kHz ma wzmocnienie około 20 V/V. Następnie sygnał ten trafia do kolejnego wzmacniacza, gdzie jest wzmacniany około 50 razy. W rezultacie, na wyjściu z odbiornika wzmocniony jest o około +60 dB i taki podawany jest do układu formującego. Dalej sygnał kierowany jest do mikrokontrolera, który steruje również pracą wyświetlacza wyświetlacza LCD (1x16 znaków alfanumerycznych). Do wyświetlacza także kierowane są wyniki obliczeń mikrokontrolera. Całe urządzenie zasilane jest dwoma napięciami: +5V - część cyfrowa i +10 do 20V - część analogowa. Mikrokontroler jest resetowany po włączeniu zasilania przez układ RC o stałej czasowej 10 ms.

Do pamięci mikroprocesora wprowadzono program realizujący pomiar prędkości medium opisaną metodą, polegającą na pomiarze częstotliwości repetycji cykli nadawania i odbioru fali ultradźwiękowej.

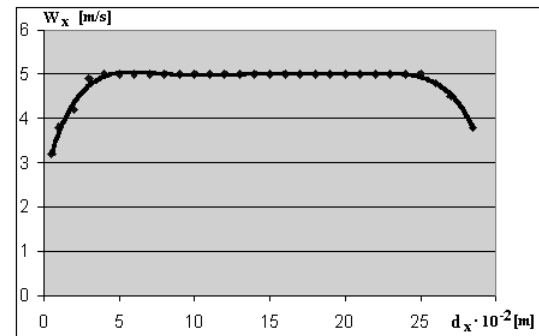
4. Wyniki badań i pomiarów

Ponieważ pomiary wykonywano dla ruchu fali ultradźwiękowej tylko w jednym kierunku należało najpierw wyznaczyć prędkość dźwięku c w danym medium. Poprzez odpowiednią procedurę w programie czynność ta jest realizowana w pierwszej kolejności przy uruchomieniu programu – mierzony jest czas przejścia znacznika na znanej odległości l pomiędzy czujnikami przy prędkości przepływu $w=0$ i na tej podstawie układ wyznacza prędkość c , która dalej traktowana jest jako stała dla danej serii pomiarowej.

W celu przeprowadzenia pomiarów na stanowisku badawczym rozmieszczano czujniki pomiarowe zarówno w osi tunelu jak i w jego ściankach tak jednak aby nie powodowały zaburzeń przepływu. Poniżej przedstawiono istotne parametry podczas pomiarów dla prezentowanych przykładowych wyników:

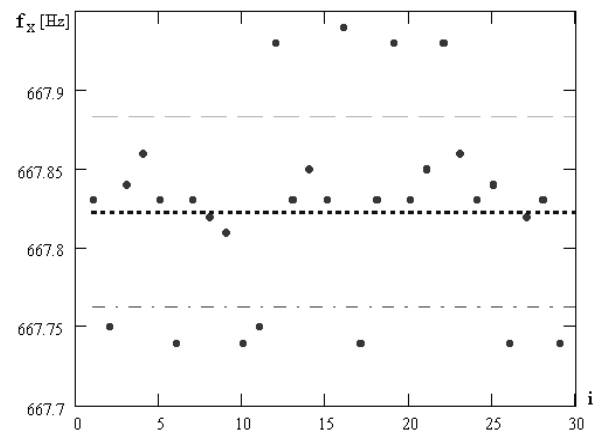
- temperatura medium: 24°C,
- częstotliwość pracy nadajnika 40 kHz,
- odległość pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem: 1 m,
- częstotliwość pracy mikroprocesora 24 MHz,
- średnica tunelu areodynamicznego 0,29 m,
- prędkość kontrolowana anemometrem ANT2000 w osi tunelu.

Dla prędkości 5 m/s zmierzonej w osi tunelu wyznaczono anemometrem konwekcyjnym ANT2000 profil prędkości i przedstawiono go na rys. 4.

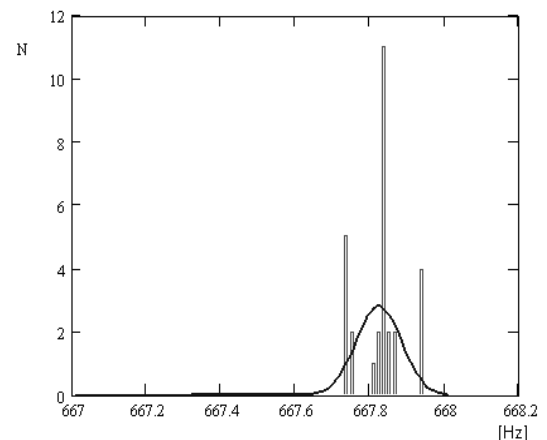


Rys. 4. Profil prędkości dla $w_{\max} = 5$ m/s zmierzonej w osi tunelu
Fig. 4. The speed profile for $w_{\max} = 5$ m/s measured in the tunnel axis

Dla czujników rozmieszczonych w osi tunelu przykładowe wyniki pomiaru prędkości zaprezentowano na rys. 5 i 6 (gdzie i – numer pomiaru).

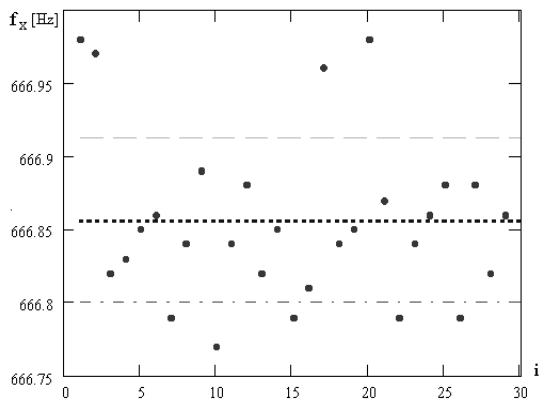


Rys. 5. Wartość f_x dla $w_{\max} = 5$ m/s w osi tunelu
Fig. 5. Values f_x for $w_{\max} = 5$ m/s in the tunnel axis

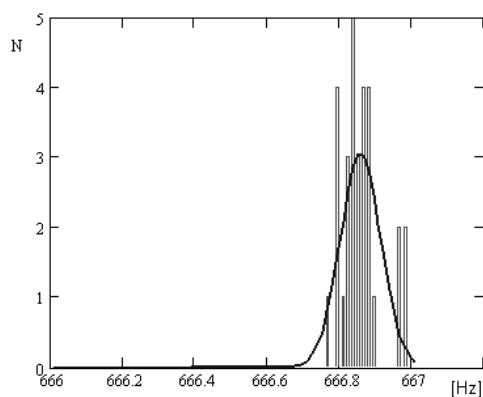


Rys. 6. Krzywa rozkładu normalnego i histogram dla $w_{\max} = 5$ m/s
Fig. 6. Normal probability distribution and histogram for $w_{\max} = 5$ m/s

Dla czujników rozmieszczonych w przeciwległych ściankach tunelu wyniki przykładowej serii pomiarowej prezentowane są na rys. 7 i 8.



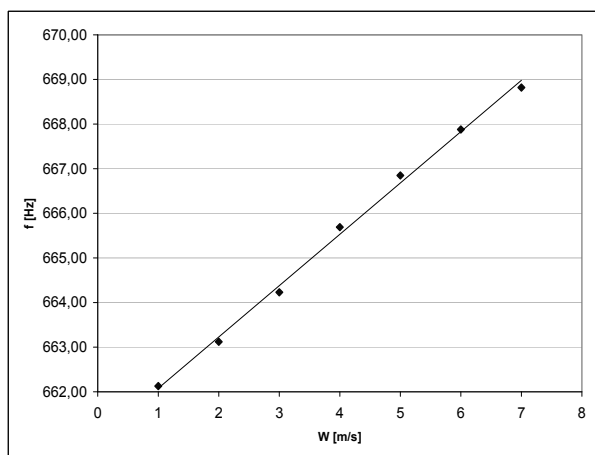
Rys. 7. Wartość f_x dla $w_{\max} = 5$ m/s w osi tunelu
 Fig. 7. Values f_x for $w_{\max} = 5$ m/s in the tunnel axis



Rys. 8. Krzywa rozkładu normalnego i histogram dla dla $w_{\max} = 5$ m/s
 Fig. 8. Normal probability distribution and histogram for $w_{\max} = 5$ m/s

Jak można zauważyć, rozrzut wyników w tym przypadku jest nieco inny niż poprzednio. Spowodowane było to zapewne odmiennym rozmieszczeniem głowic pomiarowych, które dla pierwszego przypadku zaburzały w pewnym stopniu strugę przepływu mimo swych stosunkowo niewielkich rozmiarów.

Na poniższym rysunku przedstawiono wartości średnie częstotliwości cykli nadawczo-odbiorczych badanego anemometru, w funkcji wartości prędkości mierzonej w osi tunelu anemometrem kontrolnym.



Rys. 9. Wartości średnie częstotliwości cykli w funkcji prędkości medium
 Fig. 9. Average values of the cycle frequency vs. medium velocity

5. Wnioski

- Zbliżona do liniowej charakterystyka przetwarzania $f_x(w)$ potwierdza przydatność pomiaru częstotliwości repetycji cykli nadawczo-odbiorczych do pomiaru prędkości przepływu.
- Zastosowanie wspólnego rezonatora dla układu nadawczego i odbiorczego umożliwia prawidłowe zsynchronizowanie obydwu układów i uzyskanie wyników o większej dokładności.
- Rozrzut w pomiarach był powodowany poprzez zakłócenie przepływu powodowane przez same czujniki oraz pulsację prędkości wywołaną przez wentylator wymuszający przepływ a także błąd kwantyzacji w pomiarze czasu przelotu fali ultradźwiękowej.
- Wykorzystany mikroprocesorowy układ pomiarowy jest dokładniejszy od wykonanego wcześniej przez autorów układu analogowego realizującego pomiar prędkości przepływu w oparciu o tą samą zasadę i okazał się mniej podatny na zakłócenia szczególnie te, które mogą występować w torze odbiornika.
- Wykorzystanie mikroprocesora umożliwia stosunkowo łatwą modyfikację programową układu dla zmiennych warunków pomiarowych bez konieczności przebudowy układu elektronicznego.
- Jak wynika z rezultatów przy rozmieszczeniu czujników w osi tunelu i nadawaniu fali zgodnie z kierunkiem przepływu wartości zmierzonych częstotliwości, przy tej samej prędkości przepływu, są nieco wyższe niż w przypadku rozmieszczenia ich w ściankach tunelu.

6. Literatura

- [1] Wojciechowski J.: „Sygnały i systemy”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1995.
- [2] Waluś S.: „Przepływomierze ultradźwiękowe – metodyka stosowania”. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
- [3] Kalisz J.: „Podstawy Elektroniki cyfrowej”. WKiŁ, Warszawa 1998.
- [4] Biernacki Z.: „Sensory i systemy termooanemometryczne”, WKiŁ, Warszawa 1997.
- [5] Weinbaum H.: „Ultrasonic gas flow measurement method and apparatus”. Flow Measurement and Instrumentation, Volume 7, Issues 3-4, September-December 1996.
- [6] Śliwiński A.: „Ultradźwięki i ich zastosowania”. WNT, Warszawa 1993.
- [7] Rusek M., Pasierbiński J.: „Elementy i układy elektroniczne”. WNT, Warszawa 1997.
- [8] Rakus P., Z. Biernacki: „Tor pomiarowy zmodyfikowanego układu anemometru ultradźwiękowego”. Materiały XXXV MKM, Kraków 2003 r., ss. 105-110. Katedra Metrologii pod patronatem KM i AN PAN.
- [9] Rakus P.: „Generacja i przetwarzanie sygnałów ultradźwiękowych przetwornikami piezoelektrycznymi dla zastosowań w anemometrii”. Materiały XXXIV MKM i Joint IMEKO TC-1, Wrocław 2002 r.

otrzymano / received: 13.10.2009
 przyjęto do druku / accepted: 01.09.2010

artykuł recenzowany