

Badania modelowe zależności pasma przenoszenia anemometru stałotemperaturowego od współczynnika nagrzania włókna oraz wartości średniej prędkości przepływu

PAWEŁ LIGĘZA

Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków

Streszczenie

Pomimo ciągłego rozwoju optycznych technik pomiaru przepływów metoda termooanemometryczna w dalszym ciągu pozostaje doskonałym narzędziem badawczym w metrologii przepływów turbulentnych. Anemometr stałotemperaturowy umożliwia pomiar szybkozmiennych fluktuacji prędkości przepływu, jednak pasmo przenoszenia jest funkcją parametrów układu, oraz współczynnika nagrzania włókna i prędkości przepływu. Dobór parametrów układu stałotemperaturowego umożliwia kształtowanie i optymalizację pasma przenoszenia anemometru. W pracy przedstawiono wyniki badań symulacjach zależność pasma przenoszenia anemometru w zależności od współczynnika nagrzania i prędkości przepływu. Artykuł stanowi drugą część cyklu poświęconego tematyce pomiarów termooanemometrycznych w przepływach szybkozmiennych.

Słowa kluczowe: anemometr stałotemperaturowy, model matematyczny, symulacja komputerowa, pasmo przenoszenia

1. Wprowadzenie

Ze zjawiskiem turbulencji mamy do czynienia w przypadku większości przepływów obserwowanych zarówno w naturze jak i występujących w zagadnieniach związanych z działalnością człowieka. Przepływ turbulentny można zdefiniować jako ruch płynu o charakterze nieuporządkowanym, przy czym opisujące go wielkości fizyczne mają losowy charakter zarówno w czasie, jak i w przestrzeni. Immanentną cechą przepływu turbulentnego jest występowanie w nim wirów o szerokim zakresie skali czasowej i przestrzennej. Istnienie tych wirów sprzyja intensyfikacji zjawisk przenoszenia ciepła, masy i pędu w przepływie. Zjawisko to odgrywa istotną rolę w wielu zagadnieniach naukowych i technicznych, i z tego względu jest przedmiotem badań. Ze względu na złożoność zachodzących zjawisk badania turbulencji wymagają zarówno analizy teoretycznej prowadzonej w oparciu o progresywnie rozwijane modele matematyczne, jak i badań eksperymentalnych, prowadzonych za pomocą specjalizowanych narzędzi pomiarowych [1].

Wymagania stawiane tym narzędziom wynikają w dużej mierze z właściwości przepływów turbulentnych. Ze względu na zmienność wielkości fizycznych w czasie wymagane jest szerokie pasmo przenoszenia, pozwalające na obserwację obecnych w przepływie struktur o rozległym spektrum częstotliwości. Zjawiska turbulენტne charakteryzuje ponadto zawsze przestrzenny charakter, zatem narzędzie badawcze powinno umożliwiać pomiar wszystkich składowych przestrzennych badanej wielkości. Losowy charakter przepływu wymusza prowadzenie badań w wielu punktach przestrzeni, natomiast możliwość obserwacji struktur o małej skali przestrzennej implikuje punktowy charakter pomiaru. Zatem rozmiary aktywnego elementu pomiarowego powinny być na tyle małe, aby w obszarze czujnika mierzone wielkości fizyczne mogły być uważane za jednorodne. Ponadto istotnym jest, aby narzędzie badawcze posiadało szeroki zakres pomiarowy umożliwiający pomiar amplitud zarówno przepływu średniego jak i wirów o najmniejszej skali. Związane z tym jest także wymaganie minimalizacji szumów własnych narzędzia badawczego. Ogólnym warunkiem stawianym narzędziom pomiarowym jest oczywiście znikoma inwazyjność pomiaru, a więc konstrukcja nie

zaburzająca badanego zjawiska w sposób istotny. Tak więc narzędzia badawcze przeznaczone do pomiaru przepływów turbulentnych powinny spełniać następujące wymagania:

- szerokie pasmo przenoszenia,
- pomiar składowych przestrzennych,
- pomiar o charakterze punktowym,
- możliwość pomiaru w wielu punktach przestrzeni,
- szeroki zakres pomiarowy,
- niskie szумы własne,
- znikoma inwazyjność pomiaru.

Pomimo ciągłego rozwoju optycznych technik pomiaru przepływów metoda termooanemometryczna w dalszym ciągu pozostaje doskonałym narzędziem badawczym w metrologii przepływów turbulentnych. Metoda ta polega na pomiarze wielkości fizycznych opisujących przepływ pośrednio, poprzez pomiar strat cieplnych miniaturowego nagrzanego elementu. Termooanemometr umożliwia pomiary przepływów szybkozmiennych w szerokim zakresie prędkości, przy dobrym stosunku sygnału do szumu. Pasma przenoszenia sięga setek kiloherców, a zakres mierzonych prędkości od ułamków metra na sekundę do prędkości ponaddzwiękowych. Metoda umożliwia pomiar składowych przestrzennych oraz prowadzenie pomiarów wielopunktowych, natomiast inwazyjność metody jest znikoma [2,3].

Typowym układem pracy anemometru z grzanym włóknem jest układ stałotemperaturowy. Jest to elektroniczny układ automatycznej regulacji, który utrzymuje średnią temperaturę włókna czujnika na stałym, zadanym poziomie. Układ stałotemperaturowy zawiera układ komparacji rezystancji oraz regulator pracujący w pętli sprzężenia zwrotnego. W takim układzie prąd czujnika jest funkcją strat cieplnych włókna pomiarowego, a więc pośrednio mierzonej prędkości przepływu. Klasyczny termooanemometr stałotemperaturowy umożliwia pomiar szybkozmiennych fluktuacji prędkości przepływu, jednak jego pasmo przenoszenia jest funkcją prędkości przepływu. W przepływach, w których prędkość średnia nie zmienia się znacząco nie stanowi to istotnej wady tej metody pomiarowej. Jednak w przepływach, w których prędkość średnia zmienia się w szerokim zakresie może to stanowić źródło znaczących błędów dynamicznych. Ligęza [4-7] zaproponował koncepcję wprowadzenia do układu stałotemperaturowego regulatora adaptacyjnego działającego tak, aby uzyskać stałe pasmo przenoszenia anemometru w funkcji prędkości przepływu. Poprzez wprowadzenie drugiej pętli sprzężenia zwrotnego sygnał wyjściowy z anemometru steruje parametrami regulatora w taki sposób, aby w szerokim zakresie prędkości przepływu pasmo przenoszenia przyrządu było możliwie stałe. Zastosowanie tej metody w pomiarach przepływów turbulentnych pozwala na minimalizację dynamicznych błędów pomiarowych.

Pomiary przepływów szybkozmiennych i turbulentnych wymagają dokonania regulacji właściwości dynamicznych anemometru stałotemperaturowego, mającej na celu kształtowanie pasma przenoszenia anemometru. Regulację anemometru stałotemperaturowego przeprowadza się najczęściej w taki sposób, aby dla największej mierzonej prędkości uzyskać możliwie szerokie pasmo przenoszenia, przy zapewnieniu płaskiej charakterystyki częstotliwościowej oraz stabilnej pracy anemometru. Regulacja anemometru jest prowadzona standardowo na podstawie testu z wymuszeniem elektrycznym w postaci fali prostokątnej doprowadzonej do układu stałotemperaturowego. Problem regulacji anemometru stałotemperaturowego omówiono w poprzedniej pracy cyklu [8]. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań modelowych zależności pasma przenoszenia anemometru stałotemperaturowego od współczynnika nagrzania włókna oraz wartości średniej prędkości przepływu dla typowego czujnika termooanemometrycznego stosowanego w pomiarach laboratoryjnych.

2. Badania modelowe pasma przenoszenia anemometru stałotemperaturowego

Celem badań modelowych jest wyznaczenie pasma przenoszenia anemometru stałotemperaturowego w zależności od współczynnika nagrzania włókna i wartości średniej prędkości przepływu. Badania przeprowadzono metodą wielokrotnego rozwiązywania układu równań stanowiącego model anemometru [8]. Proces taki jest symulacją pracy układu. Wykorzystano tu środowisko MATLAB. Do rozwiązywania układu równań różniczkowych zastosowano metodę Rungego-Kutty piątego rzędu. Przebieg symulacji polegał na wyznaczeniu stanu ustalonego dla danego zbioru parametrów, a następnie wyznaczeniu odpowiedzi układu

dla zadanego wymuszenia. Jako wymuszenie stosowano skokową funkcję napięcia niezrównoważenia układu stałotemperaturowego. Badano przebieg prądu czujnika przy skokowym wzroście napięcia niezrównoważenia do zadanej wartości, a następnie przy spadku do wartości początkowej. Zgodnie z danymi literaturowymi [3] na podstawie takiego testu napięciowego można wyznaczyć pasmo przenoszenia f_U anemometru zgodnie z zależnością:

$$f_U = \frac{1}{1.3 \tau_U} \quad (1)$$

gdzie:

τ_U – jest czasem ustalania się odpowiedzi anemometru mierzonym od początku wymuszenia do spadku odpowiedzi do wartości 3% amplitudy skoku.

Literatura [3] zaleca taką regulację anemometru, aby uzyskać przeregulowanie odpowiedzi układu na poziomie 15% amplitudy skoku. Pozwala to na uzyskanie optymalnego pasma przenoszenia anemometru. Pasma przenoszenia w oparciu o (1) wyznaczane jest metodą pośrednią, łatwą do zastosowania w rzeczywistym przyrządzie pomiarowym. Aby uzyskać referencyjne wartości pasma przenoszenia dla tej metody, wyznaczano również w badaniach modelowych pasmo przenoszenia anemometru zgodnie z definicją. W tym celu przeprowadzono badania symulacyjne przy zastosowaniu sinusoidalnej funkcji zmiany prędkości V w czasie w postaci:

$$V = V_M + \Delta V \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

gdzie:

V_M – prędkość średnia,
 ΔV – amplituda wymuszenia
 f – częstotliwość wymuszenia,
 t – czas.

Na podstawie modelu anemometru stałotemperaturowego [8] wyznaczano amplitudę i przesunięcie fazowe prędkości mierzonej v względem wymuszenia V dla różnych częstotliwości f . Jako parametr określający pasmo przenoszenia anemometru przyjęto częstotliwość graniczną f_V , dla której amplituda odpowiedzi układu spada o 3 dB względem wymuszenia. Ten definicyjny sposób wyznaczania pasma przenoszenia anemometru jest praktycznie niemożliwy do przeprowadzenia w rzeczywistym przyrządzie pomiarowym, ze względu na trudności z uzyskaniem wzorcowego sygnału testującego (2). Dlatego istotnym zagadnieniem jest porównanie obu metod w oparciu o badania symulacyjne.

Do obliczeń podobnie jak w pracy [8] przyjęto parametry czujnika i układu zbliżone do stosowanych w układach rzeczywistych. Dla czujnika przyjęto typowe parametry czujnika z włóknem wolframowym o średnicy 5 mikrometrów. Parametry te zebrano w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry czujnika anemometrycznego

R_{SG}	T_G	α_G	I_L	V_L	τ_L	n
[W]	[K]	[1/K]	[A]	[m/s]	[s]	
5	293	3.33×10^{-3}	59.2×10^{-3}	3.06	1.14×10^{-3}	0.5

Natomiast parametry układu przedstawiono w tabeli 2, przy czym dla wzmacniacza operacyjnego regulatora przyjęto parametry wzmacniacza operacyjnego OP27. Wzmacniacz ten jest często stosowany w rzeczywistych układach anemometru stałotemperaturowego.

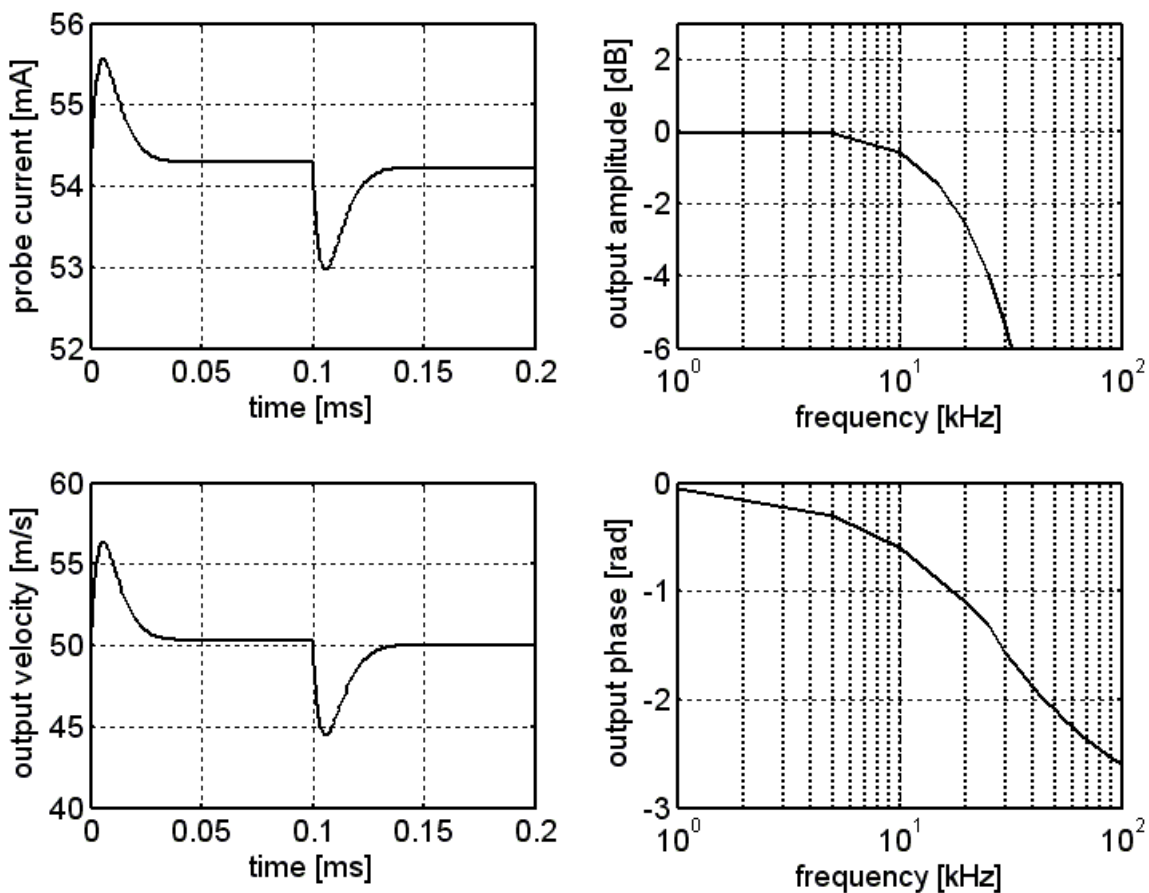
Tab. 2. Parametry układu elektronicznego

R_1	R_2	η	U_0	R_A	k_A	τ_A	R_C
[W]	[W]		[V]	[W]		[s]	[W]
10	100	1.8 (1.1-2.2)	1×10^{-6}	1×10^6	1×10^6	10×10^{-3}	100

W pierwszej fazie badań [8] przeprowadzono optymalną regulację anemometru przy współczynniku nagrzania $\eta = 1.8$ i prędkości $V = 50$ m/s. Parametry regulatora k_C , τ_C dobierano optymalnie tak, aby uzyskać przeregulowanie odpowiedzi układu na skok napięcia niezrównoważenia na poziomie 15% amplitudy skoku. Odpowiada to uzyskaniu optymalnego pasma przenoszenia anemometru przy zadanych warunkach pracy. Optymalne parametry regulatora dla badanego układu dobrane w procesie regulacji wynoszą $k_C = 300$, $\tau_C = 150 \times 10^{-6}$ s. W dalszych symulacjach badano zależność pasma przenoszenia anemometru dla tych parametrów w zależności od współczynnika nagrzania i prędkości przepływu.

Rysunek 1 obrazuje odpowiedź anemometru dla dobranych parametrów regulatora, przy obniżonym współczynniku nagrzania $\eta = 1.2$ i prędkości $V = 50$ m/s. Widoczne jest znaczne wydłużenie czasu ustalania się odpowiedzi skokowej, brak przeregulowania, a pasmo przenoszenia wynosi ok. 20 kHz.

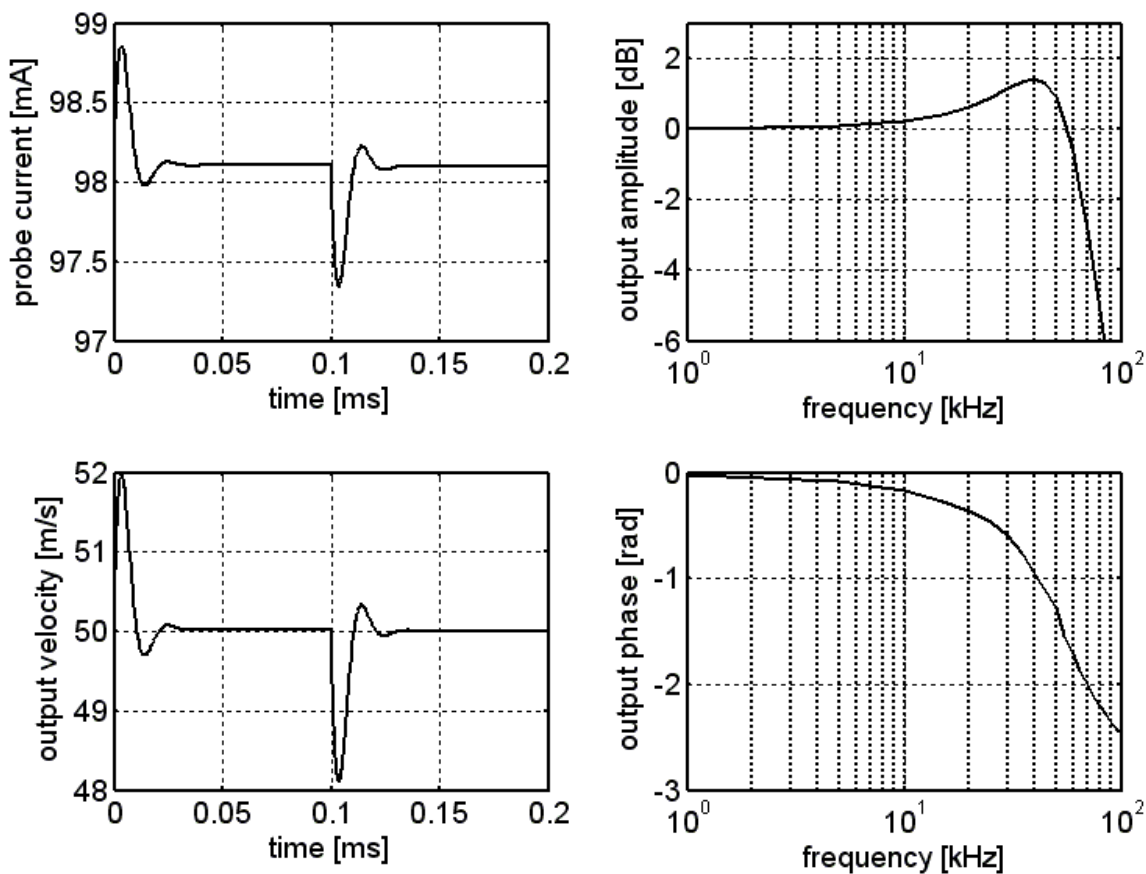
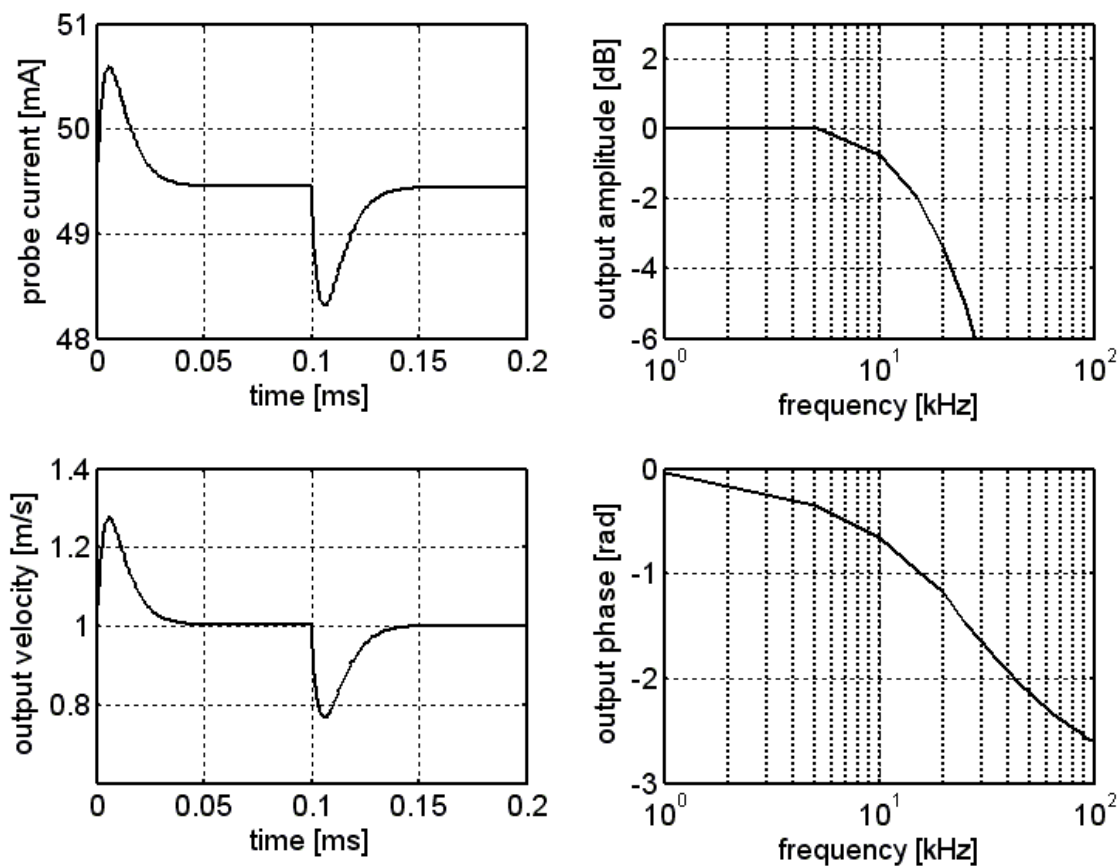
Rysunek 2 przedstawia odpowiedź anemometru dla dobranych parametrów regulatora, przy zwiększonym współczynniku nagrzania $\eta = 2.2$ i prędkości $V = 50$ m/s. Widoczne jest skrócenie czasu ustalania się odpowiedzi skokowej i zwiększenie przeregulowania, a pasmo przenoszenia wynosi ok. 70 kHz, przy zwiększonym wzmocnieniu wyższych częstotliwości.

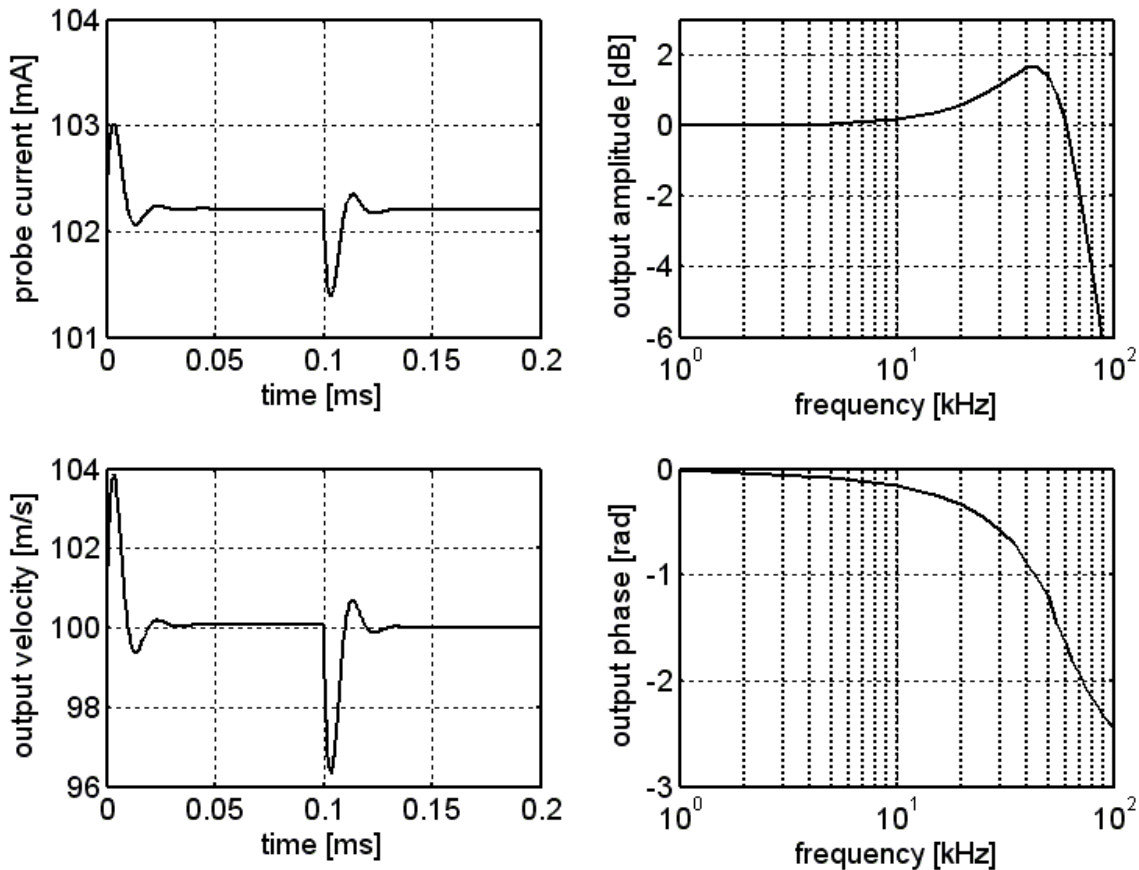


Rys. 1. Odpowiedź anemometru, współczynnik nagrzania $\eta = 1.2$, prędkość $V = 50$ m/s

Rysunek 3 obrazuje odpowiedź anemometru dla dobranych parametrów regulatora, przy współczynniku nagrzania $\eta = 1.8$ i zmniejszonej prędkości $V = 1$ m/s. Podobnie jak przy obniżeniu współczynnika nagrzania, widoczne jest znaczne wydłużenie czasu ustalania się odpowiedzi skokowej i brak przeregulowania, a pasmo przenoszenia wynosi ok. 19 kHz.

Na rysunku 4 przedstawiono odpowiedź anemometru dla dobranych parametrów regulatora, współczynnika nagrzania $\eta = 1.8$ i zwiększonej prędkości $V = 100$ m/s. Widoczne jest skrócenie czasu ustalania się odpowiedzi skokowej i zwiększenie przeregulowania, a pasmo przenoszenia wynosi ok. 80 kHz, przy zwiększonym wzmocnieniu wyższych częstotliwości.

Rys. 2. Odpowiedź anemometru, współczynnik nagrzania $\eta = 2.2$, prędkość $V = 50$ m/sRys. 3. Odpowiedź anemometru, współczynnik nagrzania $\eta = 1.8$, prędkość $V = 1$ m/s



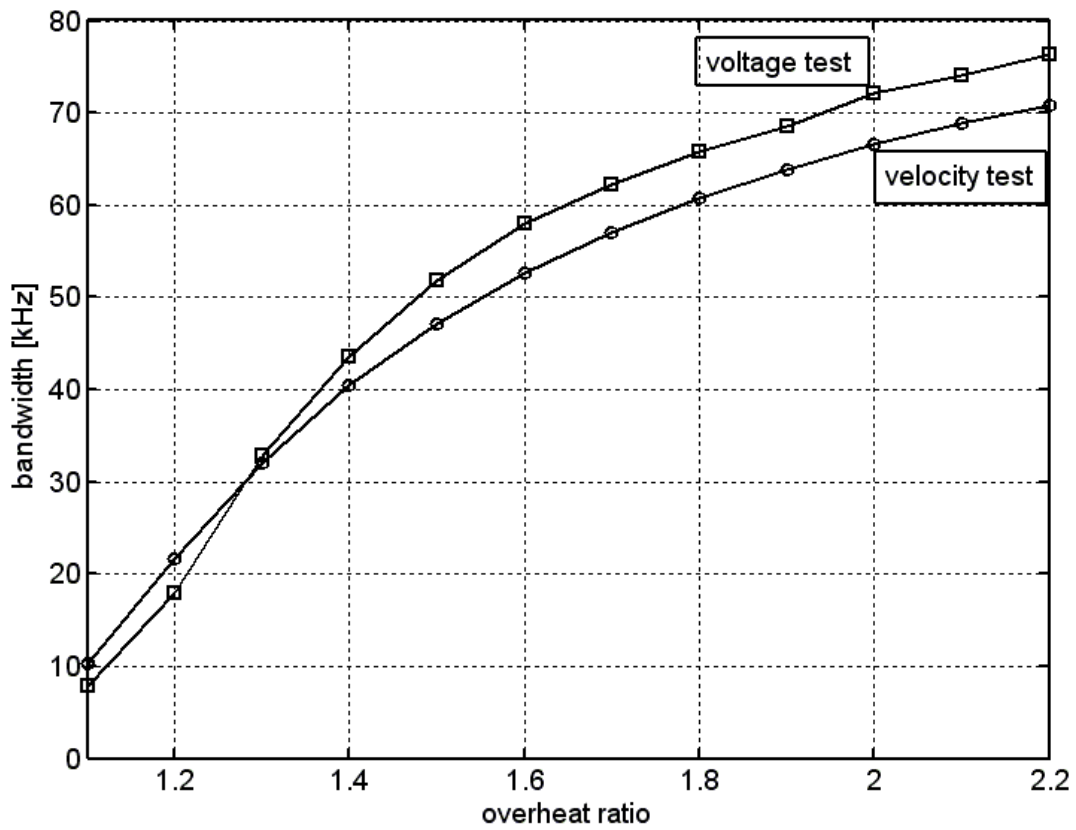
Rys. 4. Odpowiedź anemometru, współczynnik nagrzania $\eta = 1.8$, prędkość $V = 100$ m/s

Przeprowadzone badania symulacyjne pozwoliły na wykonanie wykresów zależności pasma przenoszenia anemometru o ustalonych, dobranych parametrach regulatora, w zależności od współczynnika nagrzania i średniej prędkości przepływu.

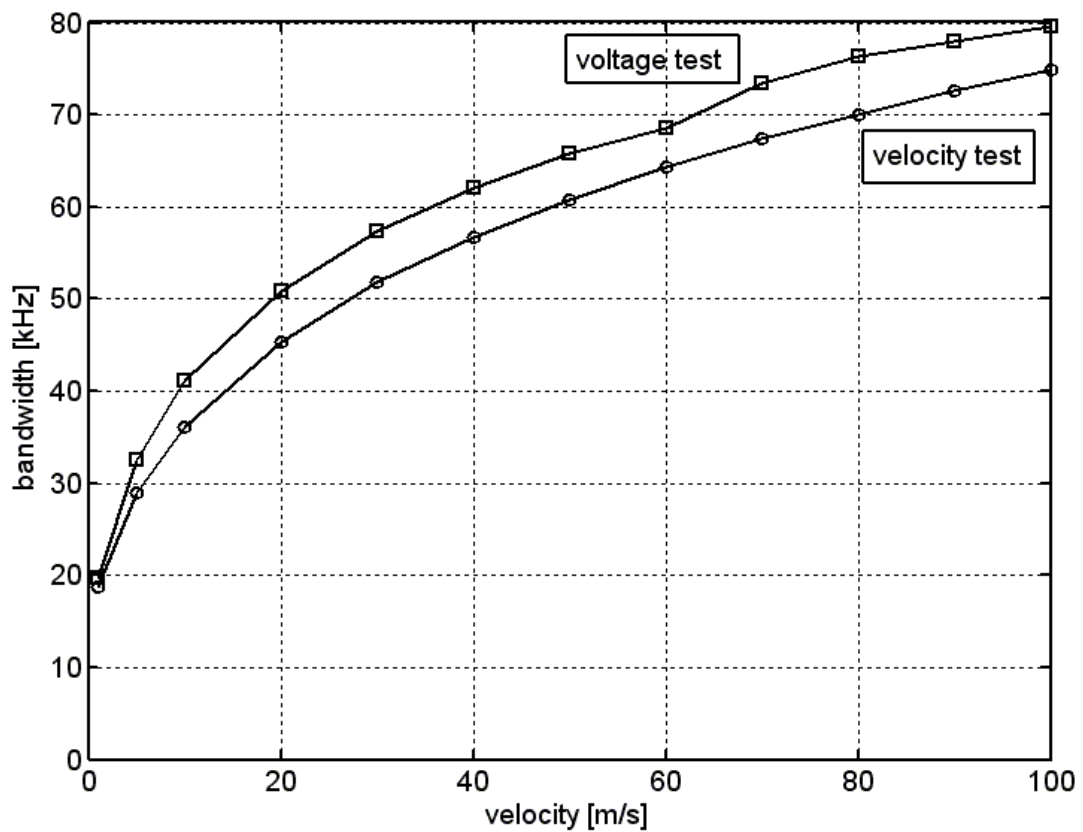
Rysunek 5 przedstawia pasmo przenoszenia anemometru wyznaczone na podstawie skokowego testu napięciowego (kwadraty) oraz na podstawie sinusoidalnego testu prędkościowego (kółka), w zależności od współczynnika nagrzania włókna. Charakter przebiegu obu krzywych jest zbliżony. W zakresie współczynników nagrzania powyżej $\eta = 1.3$ pasmo przenoszenia wyznaczone z testu napięciowego jest ok. 8% większe od wyznaczonego drugą metodą. Ze wzrostem współczynnika nagrzania w zadanym zakresie pasmo przenoszenia zwiększa się około siedmiokrotnie.

Rysunek 6 obrazuje pasmo przenoszenia anemometru wyznaczone na podstawie skokowego testu napięciowego (kwadraty) oraz na podstawie sinusoidalnego testu prędkościowego (kółka), w zależności od średniej prędkości przepływu. I w tym przypadku charakter przebiegu obu krzywych jest zbliżony. W całym zakresie zmienności średniej prędkości pasmo przenoszenia wyznaczone z testu napięciowego jest również ok. 8% większe od wyznaczonego metodą sinusoidalnego testu prędkościowego. Ze wzrostem średniej prędkości w zadanym zakresie pasmo przenoszenia zwiększa się około czterokrotnie.

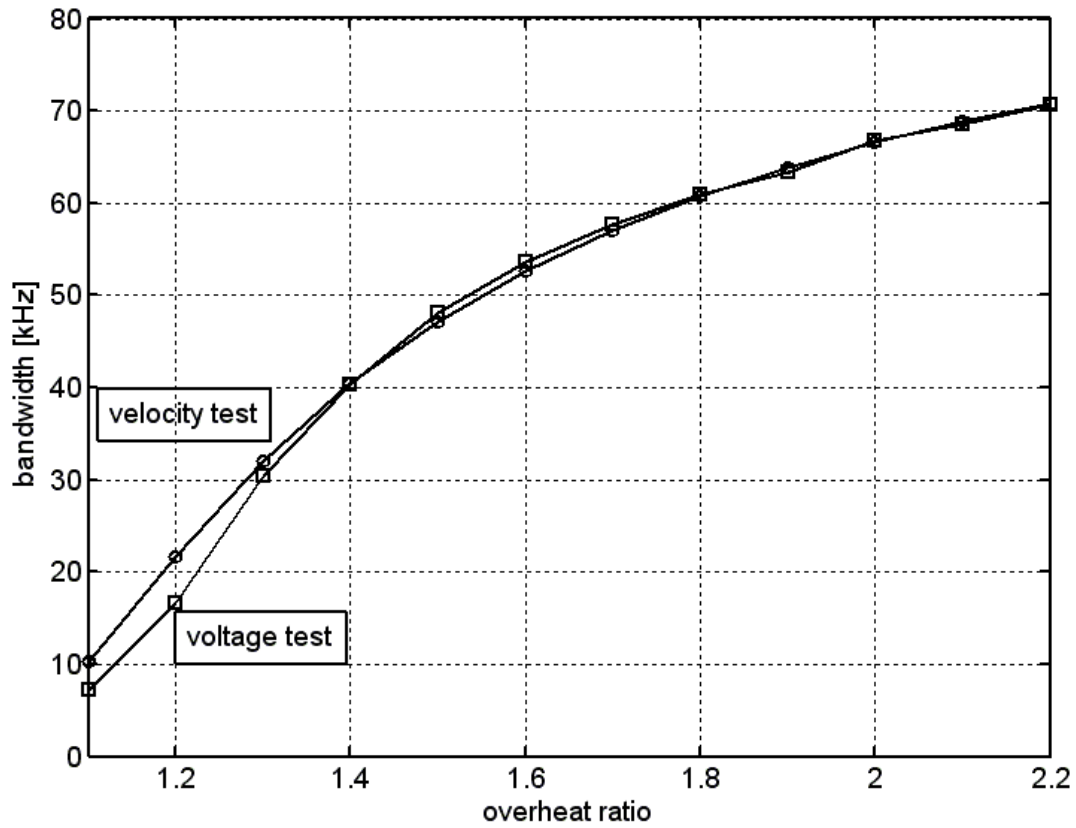
Ponieważ w przeprowadzonych badaniach pośrednia – napięciowa metoda wyznaczania pasma przenoszenia anemometru wykazuje tendencję do zawyżania wyników w porównaniu do metody definicyjnej, dokonano próby korekty współczynnika w równaniu (1). Zamiast wartości 1.3 przyjęto wartość 1.4, a więc o ok. 8% większą. Uzyskane wyniki przedstawiono odpowiednio na rysunkach 7 i 8. Dla obu wykresów po dokonanej korekcie współczynnika równania (1) uzyskano bardzo zbliżone wyniki dla pasma przenoszenia anemometru wyznaczonego na podstawie skokowego testu napięciowego (kwadraty) oraz na podstawie sinusoidalnego testu prędkościowego (kółka).



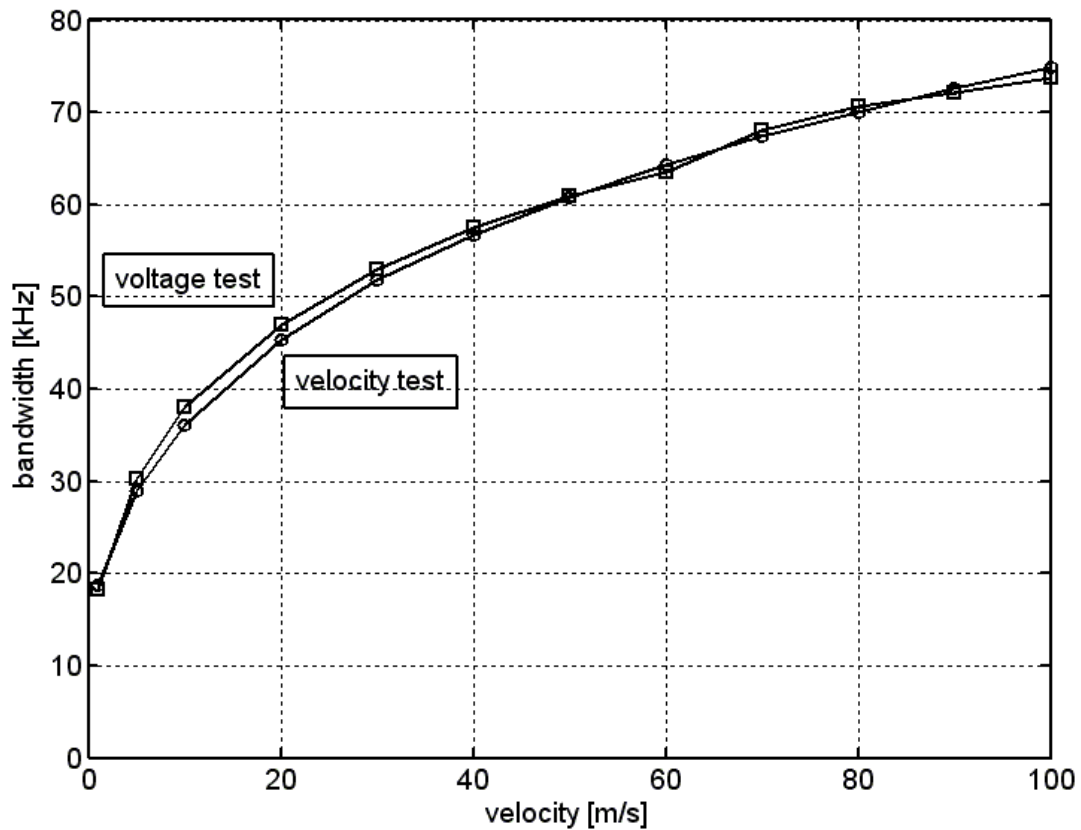
Rys. 5. Zależność pasma przenoszenia anemometru od współczynnika nagrzania włókna



Rys. 6. Zależność pasma przenoszenia anemometru od średniej prędkości przepływu



Rys. 7. Zależność pasma przenoszenia anemometru od współczynnika nagrzania włókna po korekcy współczynnika dla testu napięciowego



Rys. 8. Zależność pasma przenoszenia anemometru od średniej prędkości przepływu po korekcy współczynnika dla testu napięciowego

3. Podsumowanie

W pracy opisano metodykę prowadzenia badań symulacyjnych, pozwalających na analizę procesu wyznaczania i kształtowania pasma przenoszenia. Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych, których celem jest ocena jakości procesu regulacji anemometru na podstawie testu ze skokowym wymuszeniem elektrycznym, oraz wyznaczenie pasma przenoszenia anemometru stałotemperaturowego w zależności od współczynnika nagrzania włókna i wartości średniej prędkości przepływu. W pierwszej fazie badań przeprowadzono optymalną regulację anemometru przy przyjętym współczynniku nagrzania i zadanej prędkości przepływu. Dla ustalonych optymalnych parametrów regulatora wyznaczono zależność pasma przenoszenia anemometru od współczynnika nagrzania i średniej prędkości przepływu. Do wyznaczenia pasm przenoszenia zastosowano dwie metody, stosowaną w pomiarach rzeczywistych metodę skoku napięcia niezrównoważenia oraz definicyjną metodę wymuszenia sinusoidalnego zmian prędkości przepływu o zadanej amplitudzie i częstotliwości. Przeprowadzone badania symulacyjne wykazały, że ze wzrostem współczynnika nagrzania w zadanym zakresie pasmo przenoszenia zwiększa się około siedmiokrotnie. Ze wzrostem średniej prędkości w zadanym zakresie pasmo przenoszenia zwiększa się około czterokrotnie.

Stwierdzono także, że charakter przebiegu pasma przenoszenia wyznaczonego obiema metodami jest zbliżony, jednak pasmo przenoszenia wyznaczone z testu napięciowego jest ok. 8% większe od wyznaczonego metodą definicyjną. Ponieważ w przeprowadzonych badaniach pośrednia, napięciowa metoda wyznaczania pasma przenoszenia anemometru wykazuje tendencję do zawyżania wyników w porównaniu do metody definicyjnej, dokonano próby korekty współczynnika w równaniu metody testu napięciowego. Zamiast wartości 1.3 przyjęto wartość 1.4, a więc o ok. 8% większą. Po dokonanej korekcie uzyskano bardzo zbliżone wyniki dla pasma przenoszenia anemometru wyznaczonego na podstawie skokowego testu napięciowego oraz na podstawie sinusoidalnego testu prędkościowego. Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych można stwierdzić, że metoda testu napięciowego stosowana w rzeczywistych przyrządach pomiarowych pozwala na kształtowanie, optymalizację i pomiar pasma przenoszenia anemometru stałotemperaturowego. Należy jednak rozważyć korektę współczynnika równania metody w stosunku do wartości podawanej w literaturze.

Praca została wykonana w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie w 2017 roku, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- [1] Elsner J. W.: *Turbulencja przepływów*. PWN, Warszawa, 1987.
- [2] Bruun H. H.: *Hot-wire Anemometry. Principles and Signal Analysis*. University Press, Oxford, 1995.
- [3] Freymuth P.: *Frequency response and electronic testing for constant-temperature hot-wire anemometers*. J. Phys. E: Sci. Instrum. 1977; 10: 705-710.
- [4] Ligęza P.: *Constant-bandwidth constant-temperature hot-wire anemometer*. Review of Scientific Instruments, vol. 78, 2007.
- [5] Ligęza P.: *Construction and experimental testing of the constant-bandwidth constant-temperature anemometer*. Review of Scientific Instruments, vol. 79, 2008.
- [6] Ligęza P.: *An investigation of a constant-bandwidth hot-wire anemometer*. Flow Measurement and Instrumentation, vol. 20, 2009.
- [7] Ligęza P.: *Sposób kształtowania pasma przenoszenia anemometru stałotemperaturowego z kompensacją częstotliwości oraz anemometr z kompensacją częstotliwości*. Zgłoszenie patentowe PL 208852, 2006.
- [8] Ligęza P.: *Modelowanie procesu regulacji anemometru stałotemperaturowego do pomiarów w przepływach szybkozmiennych*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, 19, 1, 2017.

Model tests of frequency bandwidth dependence on overheat ratio and average flow velocity in constant-temperature anemometer

Abstract

Despite the continuous development of flow measurement optical techniques, the hot-wire anemometric method continues to be an excellent research tool in turbulent flow metrology. A typical system for supply a hot-wire flow velocity sensor is a constant-temperature system. It is an electronic automatic control system, that maintains an average temperature of the wire at a constant, preset level. The constant-temperature system consists of a resistance bridge and a regulator working in the feedback loop. In such an arrangement, the current of the sensor is a function of the heat loss from wire to flow, and therefore, indirectly, the function of the measured flow velocity. The constant-temperature anemometer enables the measurement of fast fluctuations in flow, but the frequency bandwidth of the anemometer is a function of the overheat ratio and the flow velocity. The choice of system parameters allows to optimize the frequency bandwidth of the anemometer. Presented computer model simulations of the constant-temperature anemometer and research methodology allows analysis of the process of determination of the frequency bandwidth of the anemometer. This article is the second part of a series dedicated to the topic of hot-wire anemometric measurements in fast changing flows.

Keywords: hot-wire anemometry, mathematical model, computer simulation, frequency bandwidth