

# Kształtowanie pasma przenoszenia anemometru stałotemperaturowego

PAWEŁ LIGEZA

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

## Streszczenie

Typowym układem pracy anemometru z grzonym 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 ciepłych włókna pomiarowego, a więc pośrednio mierzonej prędkości przepływu. Anemometr stałotemperaturowy umożliwia pomiar szybkozmiennych fluktuacji prędkości przepływu, jednak pasmo przenoszenia jest funkcją prędkości przepływu. W przepływach, w których prędkość średnia nie zmienia się znacząco nie stanowi to istotnej wady metody pomiarowej. Jednak w przepływach, w których prędkość średnia zmienia się w szerokim zakresie może to stanowić źródło błędów dynamicznych. W pracy omówiono problem oraz przedstawiono metody kształtowania pasma przenoszenia anemometru stałotemperaturowego. Opracowany model matematyczny anemometru stałotemperaturowego oraz przeprowadzone badania modelowe pozwalają na analizę metod kształtowania pasma anemometru stałotemperaturowego.

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

## 1. Wprowadzenie

Pomimo ciągłego rozwoju optycznych technik pomiaru przepływów anemometr z grzonym włóknem w dalszym ciągu pozostaje doskonałym narzędziem badawczym w metrologii przepływów. Umożliwia on 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 ponaddźwiękowych. Ponadto anemometr z grzonym włóknem posiada stosunkowo prostą konstrukcję i niską cenę.

Typowym układem pracy anemometru z grzonym 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 ciepłych włókna pomiarowego, a więc pośrednio mierzonej prędkości przepływu. Układ stałotemperaturowy umożliwia pomiar szybkozmiennych fluktuacji prędkości przepływu, jednak pasmo przenoszenia jest funkcją prędkości przepływu. W przepływach, w których prędkość średnia nie zmienia się znacząco nie stanowi to istotnej wady metody pomiarowej. Jednak w przepływach, w których prędkość średnia zmienia się w szerokim zakresie może to stanowić źródło błędów dynamicznych.

Pomiary przepływów szybkozmiennych wymagają dokonania regulacji właściwości dynamicznych anemometru stałotemperaturowego, mającej na celu kształtowanie pasma przenoszenia anemometru. Kształtowanie pasma przenoszenia może być zrealizowane w następujących trybach:

- manualna regulacja pasma przenoszenia anemometru,
- automatyczna regulacja pasma przenoszenia anemometru,
- regulacja adaptacyjna anemometru.

Regulację manualną przeprowadza się w taki sposób, aby dla największej mierzonej prędkości uzyskać możliwie szerokie pasmo przenoszenia przy stabilnej pracy anemometru. Jest ona prowadzona najczęściej na podstawie testu z wymuszeniem elektrycznym w postaci fali prostokątnej doprowadzonej do układu stałotemperaturowego. Kształt i parametry odpowiedzi układu pozwala na ocenę pasma przenoszenia.

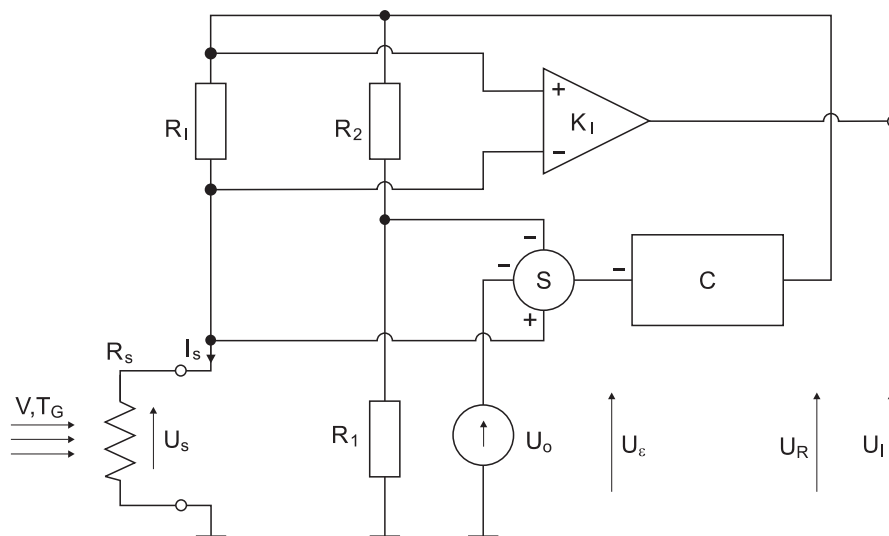
W termooanemometrycznych komputerowych systemach pomiarowych regulacja pasma przenoszenia może być dokonywana automatycznie. System pomiarowy na podstawie analizy sygnału mierzonego dobiera nastawy układu stałotemperaturowego optymalnie do warunków pomiarowych.

Możliwe jest także wprowadzenia do układu stałotemperaturowego regulatora adaptacyjnego działającego w taki sposób, aby uzyskać możliwie stałe pasmo przenoszenia anemometru w funkcji prędkości przepływu. Jest to realizowane poprzez zastosowanie drugiej pętli sprzężenia zwrotnego. W pętli tej sygnał wyjściowy z anemometru steruje parametrami regulatora tak, aby zarówno dla małych jak i dla dużych prędkości pasmo przenoszenia było zbliżone. Rozwiązanie to jest przedmiotem zgłoszenia patentowego [1]. Opracowany model matematyczny anemometru stałotemperaturowego oraz przeprowadzone badania modelowe opisane w dalszej części pracy pozwalają na analizę metod kształtowania pasma anemometru stałotemperaturowego.

## 2. Anemometr stałotemperaturowy jako układ automatycznej regulacji

Stałotemperaturowy układ zasilania czujnika anemometrycznego wymusza przepływ przez włókno czujnika prądu elektrycznego o takiej wartości, aby jego rezystancja, a więc także temperatura była utrzymywana, niezależnie od zewnętrznych warunków odbierania ciepła, na stałej, zadanej wartości. Umożliwia on także pomiar wielkości elektrycznych związanych z zasilaniem czujnika stanowiących sygnały wyjściowe z układu. Sygnałem takim jest najczęściej napięcie proporcjonalne do prądu czujnika lub napięcia na czujniku. W układzie stałotemperaturowym prąd czujnika rośnie ze wzrostem prędkości bez ograniczeń asymptotycznych. Czułość układu pomiarowego maleje ze wzrostem prędkości, nie zmierza jednak asymptotycznie do zera. Najczęściej stosowanym układem stałotemperaturowego zasilania czujnika termooanemometrycznego jest klasyczny układ mostkowy. Alternatywnym rozwiązaniem jest opracowany przez autora bezmostkowy układ stałotemperaturowy z czteropunktowym zasilaniem czujnika pomiarowego [2]. Rozwinięciem tego układu jest sterowany układ stałotemperaturowy, w którym wartość rezystancji czujnika jest zadawana zewnętrznym sygnałem cyfrowym [3].

Klasyczny tor pomiarowy anemometru stałotemperaturowego pracującego w układzie mostkowym przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Anemometr stałotemperaturowy w układzie mostkowym

Anemometr stałotemperaturowy zawiera mostkowy układ komparacji rezystancji oraz regulator pracujący w pętli sprzężenia zwrotnego i stanowi układ automatycznej regulacji. Elementem pomiarowym jest czujnik anemometryczny z grzanym włóknom  $R_s$  umieszczony w badanym przepływie medium o prę-

kości  $V$  i temperaturze  $T_G$ . Czujnik ten wraz z elementami  $R_1$ ,  $R_2$  i  $R_I$  tworzą mostek rezystancyjny. Sygnał z przekątnej mostka poprzez sumator S steruje za pomocą napięcia błędu  $U_\varepsilon$  pracą regulatora C. Zadaniem regulatora jest wytwarzanie takiego napięcia  $U_R$  zasilającego mostek, aby poprzez nagrzanie czujnika  $R_S$  utrzymywać mostek możliwie blisko stanu równowagi. Dodatkowym elementem w układzie jest źródło napięcia niezrównoważenia  $U_0$ . Element ten umożliwia start układu w chwili załączenia oraz wpływa na parametry statyczne i dynamiczne układu.

Jeżeli w stanie ustalonym regulator sprowadza napięcie błędu  $U_\varepsilon$  do zera wówczas spełniona jest zależność:

$$U_R \left( \frac{R_S}{R_S + R_I} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) - U_0 = 0 \quad (1)$$

Przyjmując, że napięcie niezrównoważenia  $U_0$  jest bliskie zera układ taki utrzymuje rezystancję, a co za tym idzie temperaturę czujnika na stałym, zadanym poziomie zgodnie z zależnością:

$$R_S = R_I \frac{R_1}{R_2} \quad (2)$$

Sygnałem wyjściowym z układu stałotemperaturowego w przedstawionym rozwiązaniu jest napięcie:

$$U_I = K_I R_I I_S \quad (3)$$

proporcjonalne do prądu czujnika  $I_S$ . Wykorzystano tu wzmacniacz różnicowy  $K_I$  wzmacniający napięcie na rezystorze  $R_I$ .

### 3. Dynamiczny model anemometru stałotemperaturowego

W celu przeprowadzenia badań modelowych opracowano dynamiczny model matematyczny anemometru stałotemperaturowego. Ponieważ w badaniach modelowych parametry przepływu i układu mogą zmieniać się w szerokim zakresie, autor proponuje model nieliniowy w dziedzinie czasu. Model matematyczny układu pomiarowego z rysunku 1 opracowano w oparciu o równania opisujące jego elementy składowe. Wyróżniono trzy składniki determinujące model układu: czujnik z grzaniem włóknem, układ komparacji rezystancji oraz regulator. Oznaczenia przyjęto zgodnie z przedstawionymi na rysunku 1.

Do opisu czujnika anemometrycznego z grzaniem włóknem przyjęto równanie w postaci zaproponowanej w pracy [4]:

$$I_S^2 R_S = I_L^2 (R_S - R_{SG}) \left[ 1 + \left( \frac{V}{V_L} \right)^n \right] + I_L^2 \tau_L \frac{dR_S}{dt} \quad (4)$$

gdzie:

- $I_L, V_L, \tau_L, n$  – parametry modelu,
- $R_{SG}$  – rezystancja czujnika w temperaturze medium,
- $t$  – czas.

Jest to zunifikowana postać modelu matematycznego czujnika z grzaniem włóknem o parametrach zdefiniowanych odmiennie niż w dotychczasowej literaturze anemometrycznej [5]. Parametry te bezpośrednio opisują podstawowe właściwości metrologiczne czujnika, mają jednoznaczny wymiar i prostą interpretację fizyczną.

Parametr  $I_L$  ma wymiar prądu, a jego wartość jest hipotetycznym prądem czujnika przy którym, dla zerowej prędkości, współczynnik nagrzania czujnika:

$$\eta = \frac{R_S}{R_{SG}} \quad (5)$$

dąży do nieskończoności. Dla prądu czujnika  $I_S = I_L / \sqrt{2}$ , dla zerowej prędkości, współczynnik nagrzania  $\eta = 2$ .

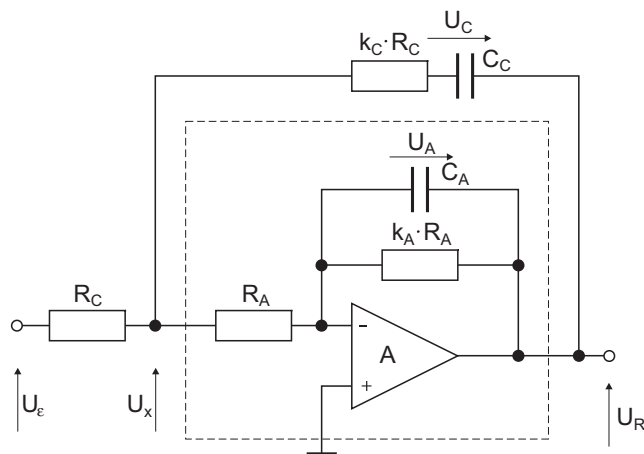
Parametr  $V_L$  ma wymiar prędkości, wymiar ten nie zależy od wartości wykładnika  $n$ . Przy prędkości  $V = V_L$  dla zachowania zadanego współczynnika nagrzania prąd czujnika jest  $\sqrt{2}$  razy większy w porównaniu z prądem dla  $V = 0$ .

Właściwości dynamiczne czujnika opisuje parametr  $\tau_L$ . Dla zerowej prędkości przepływu i stałego prądu czujnika o wartości  $I_S = I_L$  rezystancja czujnika narasta liniowo, a w czasie  $\tau_L$  podwaja swoją wartość.

Zadaniem mostkowego układu komparacji rezystancji jest porównanie rezystancji czujnika z wartością zadaną i wytworzenie sygnału błędu. Układ ten opisuje równanie przedstawiające zależność napięcia błędu  $U_\varepsilon$  z węzła sumacyjnego  $S$  od napięcia zasilającego mostek. Zgodnie z rysunkiem 2 układ komparacji rezystancji opisuje zależność:

$$U_\varepsilon = U_R \left( \frac{R_S}{R_S + R_I} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) - U_0 \quad (6)$$

Opis matematyczny regulatora wymaga określenia jego typu. W układzie można zastosować różnorodne typy regulatorów: regulator proporcjonalny  $P$ , regulator proporcjonalno-całkujący PI oraz proporcjonalno-całkująco-różniczkujący PID, a także rozbudowane regulatory realizujące złożone algorytmy. Do analizy układu autor przyjął strukturę regulatora PI zbudowanego na pojedynczym wzmacniaczu operacyjnym, przy czym uwzględniono rzeczywiste właściwości wzmacniacza operacyjnego. Układ taki jest stosowany przez autora w praktycznych realizacjach anemometrów stałotemperaturowych. Schemat zastępczy regulatora przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat zastępczy rzeczywistego regulatora proporcjonalno-całkującego PI

Linia przerywaną wyróżniono schemat zastępczy wzmacniacza operacyjnego. Dla wzmacniacza operacyjnego przyjęto model inercyjny pierwszego rzędu uwzględniający skończoną rezystancję wejściową, ograniczone wzmocnienie i inercję. Dla rozpatrywanych zagadnień model ten stanowi dobre przybliżenie rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego. Wzmacniacz wraz z zewnętrznymi elementami  $R$  i  $C$  realizuje funkcję regulatora proporcjonalno-całkującego. Oznaczając stałą czasową modelu inercyjnego wzmacniacza operacyjnego:

$$\tau_A = k_A R_A C_A \quad (7)$$

oraz stałą czasową integratora:

$$\tau_C = k_C R_C C_C \quad (8)$$

regulator przedstawiony na rysunku 3 opisuje układ równań:

$$\frac{dU_C}{dt} = \frac{(-k_C R_C - k_C R_A) U_C + (k_C R_C + k_C R_A) U_R - k_C R_A U_\varepsilon}{\tau_C (k_C R_C + k_C R_A + R_A)} \quad (9)$$

$$\frac{dU_R}{dt} = \frac{k_A R_A U_C - (k_A R_A + k_C R_C + k_C R_A + R_A) U_R - k_A k_C R_A U_\varepsilon}{\tau_A (k_C R_C + k_C R_A + R_A)} \quad (10)$$

Jako zmienne stanu do opisu anemometru stałotemperaturowego przyjęto napięcia  $U_R$  i  $U_C$  oraz rezystancję czujnika  $R_S$ . Uwzględniając równanie opisujące czujnik (4), równanie układu komparacji rezystancji (6) oraz równania regulatora (9), (10) otrzymujemy układ równań opisujący anemometr stałotemperaturowy w postaci:

$$\frac{dU_C}{dt} = \frac{(-k_C R_C - k_C R_A) U_C + \left( k_C R_C + k_C R_A - k_C R_A \left( \frac{R_S}{R_S + R_I} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \right) U_R + k_C R_A U_0}{\tau_C (k_C R_C + k_C R_A + R_A)} \quad (11)$$

$$\frac{dU_R}{dt} = \frac{k_A R_A U_C - \left( k_A R_A + k_C R_C + k_C R_A + R_A - k_A k_C R_A \left( \frac{R_S}{R_S + R_I} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \right) U_R + k_A k_C R_A U_0}{\tau_A (k_C R_C + k_C R_A + R_A)} \quad (12)$$

$$\frac{dR_S}{dt} = \frac{\frac{U_R^2 R_S}{I_L^2 (R_S + R_I)^2} - (R_S - R_{SG}) \left[ 1 + \left( \frac{V}{V_L} \right)^n \right]}{\tau_L} \quad (13)$$

Jako równanie wyjścia przyjmiemy zależność prędkości  $v$  mierzonej przez anemometr od zmiennych stanu:

$$v = V_L \left( \frac{U_R^2 R_S}{I_L^2 (R_S + R_I)^2 (R_S - R_{SG})} - 1 \right)^{\frac{1}{n}} \quad (14)$$

Powyższe równania wraz z warunkami początkowymi dla zmiennych stanu stanowią model matematyczny anemometru stałotemperaturowego i pozwalają na przeprowadzenie jego badań modelowych.

#### 4. Badania modelowe pasma przenoszenia anemometru stałotemperaturowego

Celem badań modelowych jest wyznaczenie pasma przenoszenia anemometru stałotemperaturowego oraz badanie zależności pasma przenoszenia od wartości średniej prędkości przepływu. Badania przeprowadzono metodą wielokrotnego rozwiązywania układu równań stanowiącego model anemometru. 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 sinusoidalną funkcję zmiany prędkości w czasie w postaci:

$$V = V_M + \Delta V \sin(2\pi ft) \quad (15)$$

gdzie:

- $V_M$  – prędkość średnia,
- $\Delta V$  – amplituda wymuszenia.

Wyznaczano amplitudę i przesunięcie fazowe prędkości mierzonej  $v$  względem wymuszenia  $V$  dla różnych częstotliwości  $f$ . Jako parametr określający pasmo przenoszenia anemometru przyjęto częstotliwość graniczną  $f_C$ , dla której amplituda odpowiedzi układu spada o 3 dB względem wymuszenia. Następnie wyznaczano zależność pasma przenoszenia układu od prędkości średniej  $V_M$ .

Do obliczeń przyjęto parametry czujnika i układu zbliżone do stosowanych w układach rzeczywistych. Dla czujnika przyjęto typowe parametry czujnika z włóknem wolframowym o średnicy 3 mikrometrów. Parametry te zebrano w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry czujnika anemometrycznego

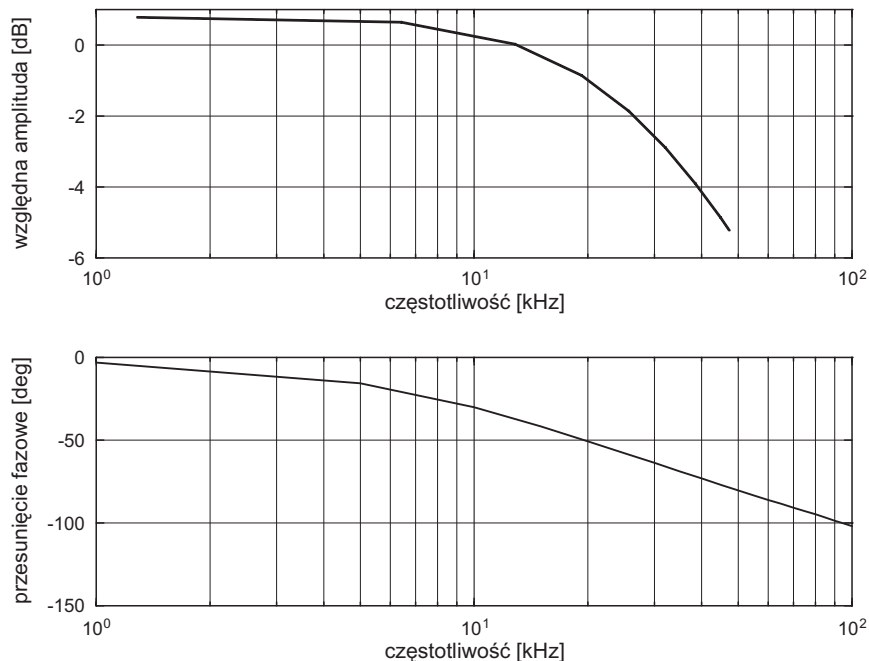
| $R_{SG}$     | $T_G$ | $\alpha_G$            | $I_L$               | $V_L$ | $\tau_L$              | $n$ |
|--------------|-------|-----------------------|---------------------|-------|-----------------------|-----|
| [ $\Omega$ ] | [K]   | [1/K]                 | [A]                 | [m/s] | [s]                   |     |
| 5            | 293   | $3.33 \times 10^{-3}$ | $45 \times 10^{-3}$ | 4     | $0.25 \times 10^{-3}$ | 0.5 |

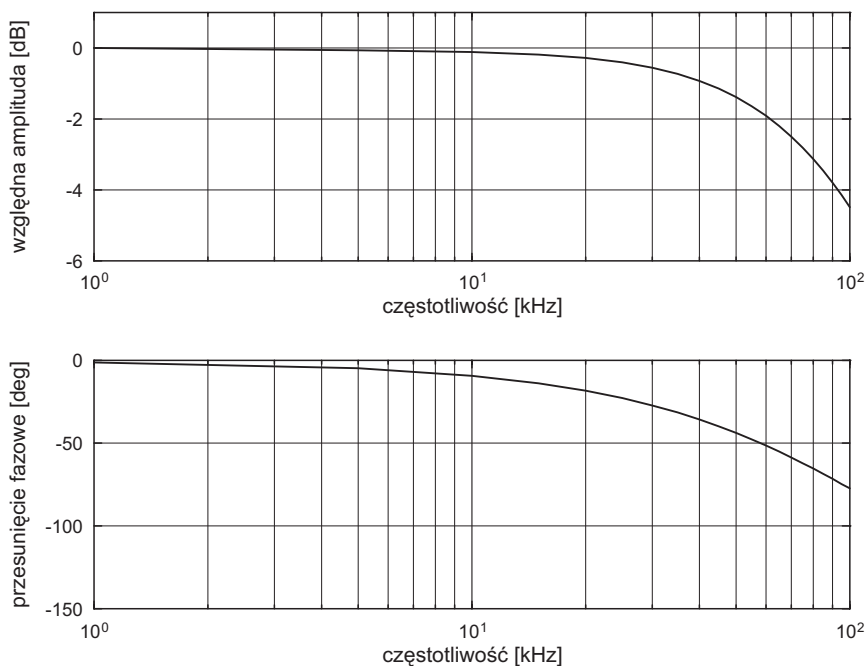
Natomiast parametry układu przedstawiono w tabeli 2, przy czym dla wzmacniacza operacyjnego regulatora przyjęto parametry wzmacniacza operacyjnego OP27. Wzmacniacz ten jest często stosowany w rzeczywistych układach anemometru stałotemperaturowego.

Tab. 2. Parametry układu elektronicznego

| $R_1$        | $R_2$        | $\eta$ | $U_0$              | $R_A$           | $k_A$           | $\tau_A$            | $R_C$        |
|--------------|--------------|--------|--------------------|-----------------|-----------------|---------------------|--------------|
| [ $\Omega$ ] | [ $\Omega$ ] |        | [V]                | [ $\Omega$ ]    |                 | [s]                 | [ $\Omega$ ] |
| 10           | 100          | 2      | $1 \times 10^{-6}$ | $1 \times 10^6$ | $1 \times 10^6$ | $10 \times 10^{-3}$ | 100          |

W pierwszej fazie badań przeprowadzono symulacje dla anemometru z regulatorem o stałych parametrach. Odpowiada to metodzie manualnego oraz automatycznego kształtowania pasma przenoszenia. Dla anemometru stałotemperaturowego z regulatorem o stałych parametrach parametry regulatora  $k_C$ ,  $\tau_C$  dobrano optymalnie tak, aby dla maksymalnej założonej prędkości  $V_{MAX} = 50$  m/s uzyskać możliwie szerokie pasmo przenoszenia. Optymalne parametry dla badanego układu wynoszą  $k_C = 65$ ,  $\tau_C = 150 \times 10^{-6}$  s. Zależność amplitudy i przesunięcia fazowego odpowiedzi układu w funkcji częstotliwości dla minimalnej założonej prędkości  $V_{MIN} = 1$  m/s przedstawia rysunek 3, a dla prędkości  $V_{MAX} = 50$  m/s rysunek 4. W trybie manualnego lub automatycznego kształtowania pasma przenoszenia w opisanych warunkach pasmo przenoszenia rośnie ze wzrostem prędkości średniej. Dla maksymalnej prędkości pasmo przenoszenia osiąga 400% pasma przy prędkości minimalnej. W przepływach, w których prędkość średnia zmienia się w szerokim zakresie stanowi to źródło błędów dynamicznych.

Rys. 3. Charakterystyki amplitudowo-fazowe anemometru z regulatorem stałym,  $V = 1$  m/s

Rys. 4. Charakterystyki amplitudowo-fazowe anemometru z regulatorem stałym,  $V = 50$  m/s

Następnie przeprowadzono badania anemometru z regulatorem adaptacyjnym. Dla regulacji adaptacyjnej przyjęto stałą wartość  $\tau_C$ , natomiast wzmacnienie regulatora opisane funkcją:

$$k_C = \frac{k_{C0}}{1 + \beta \frac{U_R - U_{R0}}{U_{R0}}} \quad (16)$$

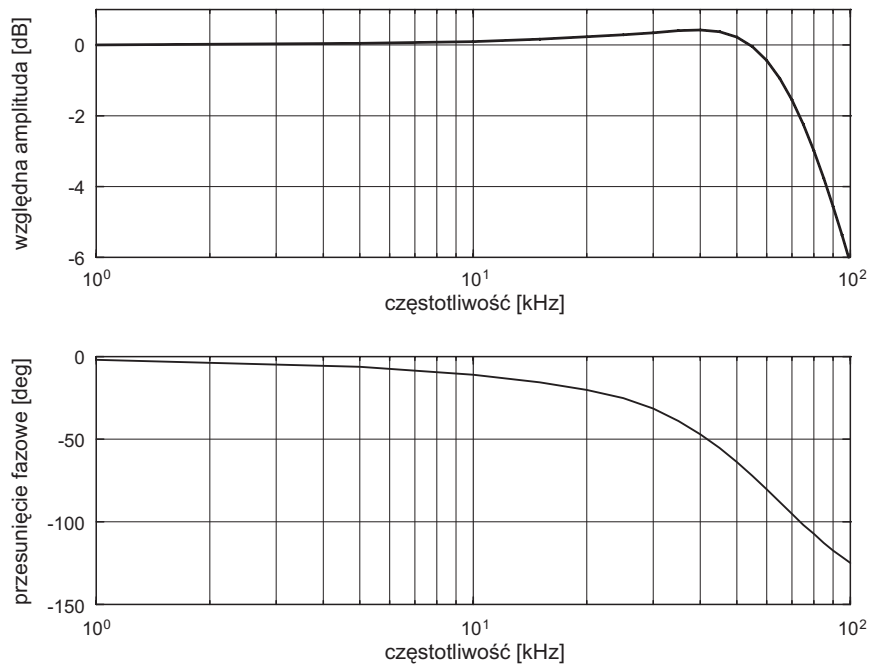
gdzie:

- $k_{C0}$  – optymalne wzmacnienie dla minimalnej przyjętej prędkości  $V_{\text{MIN}}$ ,
- $U_{R0}$  – napięcie wyjściowe regulatora dla minimalnej przyjętej prędkości  $V_{\text{MIN}}$ ,
- $\beta$  – współczynnik korekcyjny dobierany doświadczalnie.

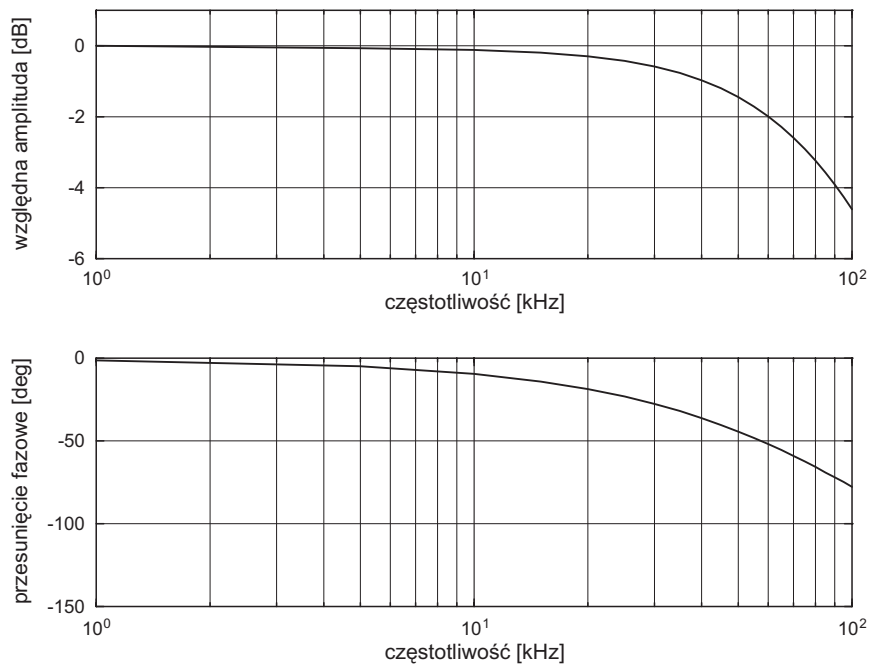
Dla badanego układu optymalne rezultatu uzyskano dla  $k_{C0} = 200$ ,  $\beta = 2.7$  i  $U_{R0} = 0.7688$  V. Na kolejnych rysunkach przedstawiono charakterystyki anemometru stałotemperaturowego z regulatorem adaptacyjnym. Zależność amplitudy i przesunięcia fazowego odpowiedzi układu w funkcji częstotliwości dla minimalnej założonej prędkości  $V_{\text{MIN}}$  przedstawia rysunek 5, a dla prędkości  $V_{\text{MAX}}$  rysunek 6. Uzyskano w przybliżeniu stałe pasmo przenoszenia w funkcji prędkości średniej. W przyjętym zakresie prędkości fluktuacje pasma przenoszenia nie przekraczają 1.5%.

## 5. Podsumowanie

Opracowany model matematyczny anemometru stałotemperaturowego oraz program dynamicznej symulacji pracy układu pozwalają na badania pasma przenoszenia i analizę metod kształtowania pasma przenoszenia anemometru stałotemperaturowego. Przeprowadzone badania wstępne wykazały, że przy zastosowaniu regulatora o stałych parametrach dobranych optymalnie w trybie manualnym lub automatycznym pasmo przenoszenia silnie zależy od prędkości przepływu. Regulacja manualna lub automatyczna przeprowadzana jest w taki sposób, aby dla największej mierzonej prędkości uzyskać możliwie szerokie pasmo przenoszenia przy stabilnej pracy anemometru. Przy takiej regulacji pasmo przenoszenia anemometru dla małych prędkości jest mniejsze. Natomiast przy większych prędkościach sygnał jest przeregulowany, mogą wystąpić oscylacje własne zakłócające pomiar, a także niestabilność pracy powodująca przepalenie włókna czujnika.



Rys. 5. Charakterystyki amplitudowo-fazowe anemometru z regulatorem adaptacyjnym,  $V = 1$  m/s



Rys. 6. Charakterystyki amplitudowo-fazowe anemometru z regulatorem adaptacyjnym,  $V = 50$  m/s

Zastosowanie regulatora adaptacyjnego w anemometrze stałotemperaturowym pozwala na znaczne ograniczenie wpływu prędkości średniej na pasmo przenoszenia anemometru. Przy odpowiednio dobrej strukturze i parametrach regulatora adaptacyjnego możliwe jest uzyskanie szerokiego i stałego pasma przenoszenia w funkcji prędkości przepływu. Pozwala to na minimalizację błędów dynamicznych pomiaru w przepływach, w których prędkość średnia zmienia się w szerokim zakresie.



## 6. Literatura

- [1] P. Ligeza, *Sposób kształtowania pasma przenoszenia anemometru stałotemperaturowego z kompensacją częstotliwości oraz anemometr stałotemperaturowy z kompensacją częstotliwości*, zgłoszenie patentowe, 2006
- [2] P. Ligeza, *Four-point non-bridge constant-temperature anemometer circuit*, Experiments in Fluids, vol. 29, 5, 2000
- [3] P. Ligeza, *A four-point constant-current/temperature controlled circuit for anemometric applications*, Review of Scientific Instruments, vol. 71, 1, 2000
- [4] P. Ligeza, *On unique parameters and unified formal form of hot-wire anemometric sensor model*, Review of Scientific Instruments, vol. 76, 1, 2005
- [5] H. H. Bruun, *Hot-wire Anemometry. Principles and Signal Analysis*, (University Press, Oxford, 1995)

### Frequency bandwidth forming in constant temperature anemometer

#### Abstract

A typical set-up for a hot-wire anemometer sensor operation is the constant-temperature (CT) system, involving automatic control of current supplying the sensor so that the temperature of hot element should remain on a fixed, preset level. The CT system incorporates a comparator circuit and a controller operating in a feedback loop. In such configuration the sensor current becomes the function of thermal losses from the sensor wire, and, indirectly, of the flow velocity to be measured. A CTA (constant-temperature anemometer) enables the measurements of fast-changing velocity fluctuations, though the transmission band will still be the function of flow velocity. This is a minor drawback when the average flow velocity does not significantly change, though might lead to dynamic errors when flow velocity varies over a considerable range. The developed mathematical model of a CTA and model testing data allow an analyze of the methods of frequency bandwidth forming in constant temperature anemometer.

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

Recenzent: Prof. dr hab. inż. *Stanisław Gumuła*, AGH