

Paweł JAMRÓZ, Jerzy NABIELEC

INSTYTUT MECHANIKI GÓRÓTWORU POLSKIEJ AKADEMII NAUK, UL. REYMONTA 27, 30-059 KRAKÓW
KATEDRA METROLOGII, AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, AL. A. MICKIEWICZA 30, 30-059 KRAKÓW

Modele matematyczne czujników do pomiaru zmiennej temperatury gazu przy okresowo zmiennej prędkości

Absolwent wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. W 2005 roku złożył i obronił pracę magisterską z zakresu korekcyj dynamicznej przetworników w katedrze Metrologii. Obecnie zatrudniony na stanowisku asystenta w Pracowni Metrologii Przepływów Instytutu Mechaniki Górniczo-Hutniczej Akademii Nauk. Zainteresowania naukowe związane z tematami identyfikacji, modelowania i badań symulacyjnych systemów pomiarowych.



e-mail: jamrozpawel@poczta.onet.pl

Ukończył studia w 1978 roku na Wydziale Elektrotechniki Automatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Pracę doktorską obronił w 1989 r. na tym samym wydziale. Obecnie pracuje jako adiunkt w Katedrze Metrologii na tym samym wydziale. Od 1990 r. kierował czterema Projektami Badawczymi finansowanymi przez KBN oraz MNiI dotyczącymi zagadnień pomiaru wielkości szybko zmieniających się w czasie.



e-mail: jena@uci.agh.edu.pl

Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono badania symulacyjne mające na celu oszacowanie wpływu zmiennej prędkości medium na właściwości dynamiczne czujników do pomiaru temperatury. Zbadano zależność modelu współczynnika wymiany ciepła od chwilowej prędkości gazu dla wybranych określeń liczby Nusselta. Oceniono przydatność uzyskanych modeli matematycznych w procesie korekcyj błędów dynamicznych metodą „w ciemno”.

Słowa kluczowe: współczynnik wymiany ciepła, zmienna prędkość.

Mathematical models of the sensors for transient temperature measurement in case of periodic gas flow

Abstract

The paper presents simulation study of the influence of variable-speed medium flow on the dynamic properties of temperature sensors. The dependence of the model of heat transfer coefficient on gas velocity has been investigated for selected definitions of Nusselt number. The developed mathematical models has been assessed in terms of their suitability for dynamic errors correction using the "blind" method.

Keywords: heat transfer coefficient, variable-speed.

1. Wstęp

Dynamika przetworników temperatury bez osłony, opisywana jest za pomocą równania różniczkowego I-go rzędu. Współczynnik przy pochodnej tego równania zależy od trudno mierzalnych parametrów fizycznych przetwornika oraz opływającego go medium. Wartości tych parametrów oraz ich zmiany w czasie są bardzo trudne, a często niemożliwe do wyznaczenia, jednak precyzyjne oszacowania ich wartości istotnie wpływa na dokładność pomiaru zmiennej w czasie temperatury. Na bazie doświadczeń i eksperymentów powstają więc różne modele matematyczne dynamiki czujników, ale tylko dla stałego przepływu gazu. Na ich podstawie z większą lub mniejszą dokładnością można określić chwilową wartość mierzonej temperatury.

Celem niniejszej pracy jest zweryfikowanie, metodami symulacyjnymi, prezentowanych w literaturze modeli dynamiki przetworników temperatury. Weryfikacja dotyczy możliwości ich wykorzystania w korekcyj błędów dynamicznych pomiaru temperatury, w przypadku okresowo zmieniającej się zarówno temperatury jak i prędkości przepływu gazu.

Procedurę korekcyj można przeprowadzić w sposób klasyczny, po uprzednim oszacowaniu wartości współczynników modelu dynamiki czujnika, albo zastosować metodę „w ciemno”.

2. Klasyczny model termometru termoelektrycznego oraz rezystancyjnego

Istotnym problemem przy pomiarach wielkości charakteryzujących przepływ gazu jest wyznaczenie chwilowej temperatury przepływającego medium. Zmniejszanie rozmiarów czujnika temperatury niesie z sobą poprawę jego właściwości dynamicznych, ale zarazem powoduje spadek mechanicznej wytrzymałości, a w konsekwencji jego szybkie zniszczenie. Stosowanie czujników masywniejszych – o zwiększonej wytrzymałości mechanicznej skutkuje jednak pogorszeniem właściwości dynamicznych takiego przetwornika.

Model matematyczny dynamiki wymiany ciepła czujnika termoelektrycznego lub rezystancyjnego z przepływającym gazem może być przedstawiony za pomocą równania różniczkowego I-go rzędu:

$$\Theta \cdot \frac{dT(t)}{dt} + T(t) = T_a(t), \quad T(t_0) \quad (1)$$

gdzie:

$T(t)$ – temperatura czujnika temperatury,

$T(t_0)$ – warunek początkowy,

$T_a(t)$ – temperatura medium opływającego czujnik,

Θ – współczynnik dynamiki czujnika, stała czasowa.

Równanie to stanowi opis dynamiki jednorodnego czujnika pomiarowego, bez płaszcza osłonowego omywanego strugą gazu.

W procesie korekcyj dynamicznej dąży się do jak najdokładniejszego wyznaczenia parametru odpowiadającego za czas ustalenia się pomiaru tj. stałej czasowej Θ , a następnie skorygowania błędu dynamicznego wprowadzanego przez inercyjny czujnik. Pojęcie stałej czasowej Θ można stosować dla zagadnień stacjonarnych, gdy stała jest prędkość gazu, a zatem Θ niezmienna w czasie. Współczynnik Θ można wyrazić wzorem (2) na podstawie równania bilansu ciepła dla czujnika temperatury [6]:

$$\Theta = \frac{\rho \cdot c \cdot V}{\alpha \cdot A} \quad (2)$$

gdzie: ρ – gęstość materiału czujnika,

c – ciepło właściwe materiału czujnika,

V – objętość czujnika (dla termopary objętość kuli o średnicy d , dla termometru rezystancyjnego objętość walca o średnicy d i jednostkowej długości),

α – współczynnik przyjmowania ciepła,

A – powierzchnia wymiany ciepła.

3. Eksperymentalne modele czujników temperatury rozszerzone dla warunków zmiennego przepływu

Zmienna prędkość $v(t)$ przepływającego medium wokół badanego czujnika istotnie wpływa na wartość stałej czasowej Θ . W trakcie pracy czujnika przy zmiennej prędkości gazu można zakładać również występowanie zmian parametrów fizycznych gazu. Wpływ zmian ciśnienia oraz temperatury medium opływającego czujnik na wartość Θ jest pomijalny [6].

Wprowadzenie zmiennych warunków przepływu powoduje, że współczynnik dynamiki w (1) nie będzie już reprezentowany przez stałą wartość Θ , lecz przez funkcję czasu $\tau(t)$. Zmiana warunków pomiaru oraz kształtu czujnika powoduje, że wartość $\tau(t)$ będzie się zmieniać według zależności opisujących dynamikę przetworników temperatury odpowiednio dla czujnika o kształcie kuli (termopara) (3a) i walca (termometr rezystancyjny) (3b).

$$\tau(t) = \frac{\rho \cdot c \cdot d^2}{6 \cdot Nu(t) \cdot \lambda} \quad (3a), \quad \tau(t) = \frac{\rho \cdot c \cdot d^2}{4 \cdot Nu(t) \cdot \lambda} \quad (3b)$$

gdzie: λ – współczynnik przewodzenia ciepła dla gazu,

$Nu(t)$ – liczba Nuselta, zależna od prędkości gazu

Tabele 1 i 2 przedstawiają liczbę Nuselta w funkcji liczb kryterialnych Reynoldsa i Prandtla (4) [1] [2] [3]:

$$Re(t) = \frac{\rho_a \cdot v(t) \cdot d}{\mu} \quad Pr = \frac{c_a \cdot \mu}{\lambda} \quad (4)$$

c_a – ciepło właściwe gazu dla danego ciśnienia,

μ – lepkość dynamiczna gazu,

ρ_a – gęstość medium opływającego czujnik,

$v(t)$ – zmienna w czasie prędkość gazu.

Tab. 1. Modele liczby Nu dla opływu kuli

Tab. 1. Models of Nu number for the flow past a sphere

Autor równania	Przedział stosowności	Postać liczby Nu
Ranz – Marshall	$Re \leq 2 \cdot 10^5$	$2+0.6 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{0.33}$
Hsu	$Re \leq 2 \cdot 10^5$	$0.921 \cdot (Re \cdot Pr)^{0.5}$
Sideman	$Re \leq 2 \cdot 10^5$	$1.13 \cdot (Re \cdot Pr)^{0.5}$
Whitaker	$Re \leq 8 \cdot 10^4$	$2+(0.4 \cdot Re^{0.5} \cdot 0.06 \cdot Re^{0.67}) \cdot Pr^{0.4}$
Kacnelson i Timofiejewa	$1 \leq Re \leq 3 \cdot 10^5$	$2+0,03 \cdot Re^{0.54} \cdot Pr^{0.33} + 0,35 \cdot Re^{0.58} \cdot Pr^{0.356}$

Tab. 2. Liczba Nu dla prostopadłego opływu walca

Tab.2. The Nu number for the perpendicular flow past a cylinder

Autor równania	Przedział stosowności	Postać liczby Nu
King	$0.055 < Re < 55$	$0.318+0.69 \cdot Re^{0.5}$
Kramers	$0.01 < Re < 10^4$	$0.039+0.51 \cdot Re^{0.5}$
McAdams	$0.1 < Re < 10^3$	$0.32+0.43 \cdot Re^{0.52}$
Van Der Hegge Zijnen	$0.01 < Re < 10^4$	$0.35+0.5 \cdot Re^{0.5} + 0.001 \cdot Re$
Zukauskas	$1 < Re < 10^3$	$(0.43+0.5 \cdot Re^{0.5}) Pr^{0.38}$

4. Współczynnik dynamiki $\tau(t)$ dla sinusoidalnych zmian prędkości przepływu

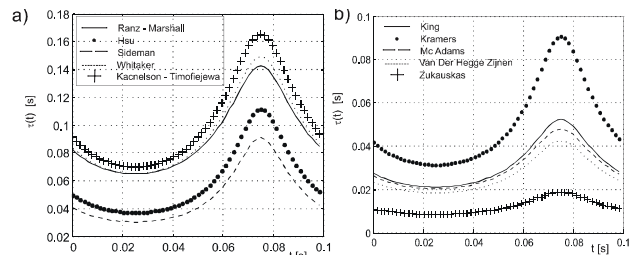
W tabeli 3 przedstawiono przyjęte do badań modelowych wartości parametrów określające standardową termoparę typu S (PtRh10) oraz termorezystor Pt100 oraz parametry powietrza dla warunków normalnych [4].

Tab. 3. Parametry termopary typu S, PT100 oraz właściwości fizyczne powietrza
Tab.3. Parameters of type PT100, S thermocouple and physical properties of air

	PtRh10	Pt100		ρ_a	1.29	kg/m^3
ρ	19800	21450	kg/m^3	λ	0.0273	mK
c	146.5	130	J/kgK	μ	$189.93 \cdot 10^{-6}$	kg/ms
d	$2 \cdot 10^{-4}$	$0.5 \cdot 10^{-4}$	m	c_a	1005	J/kgK

Zmiany prędkości okresowo przepływającego powietrza zasymulowano jako sinusoidę o częstotliwości 10 Hz, amplitudzie $A_v=20$ m/s i składowej stałej 25 m/s. Rysunek 1 przedstawia przebiegi $\tau(t)$ wyznaczone dla modeli liczby Nuselta przedstawionych w tabelach 1 i 2.

Z uwagi na nieliniową zależność $\tau(t)$ od $v(t)$ może wystąpić efekt powielania częstotliwości. Zmienny w czasie $\tau(t)$, podążając za chwilowymi zmianami prędkości, będzie więc zawierać dodatkowe harmoniczne, które nie występują w $v(t)$. Te harmoniczne będą występowały w odpowiedzi czujnika $T(t)$.



Rys. 1 Przykładowy przebieg $\tau(t)$ dla różnych modeli liczby Nuselta dla a) kuli b) walca

Fig.1. Graph of the dynamic parameter $\tau(t)$ for various models of Nusselt number for a) a sphere, b) a cylinder

Niezależnie od przyjętego sposobu określenia liczby Nu , kształt zmian współczynnika $\tau(t)$ pozostaje taki sam, natomiast posiada różne ekstrema dla tego samego kształtu prędkości. Wyniki analizy widmowej (tab.4) potwierdziły istnienie kolejnych harmonicznych w $\tau(t)$ dla prędkości zadanej w postaci sinusoidy. Amplitudy kolejnych harmonicznych w zależności od przyjętej postaci liczby Nuselta przyjmują różne wartości. Zmniejszają się one wraz ze wzrostem numeru harmonicznej. Dla 8 harmonicznej i wyższych, wartości te utrzymują się na stałym poziomie bliskim zero. Największy wpływ na postać przebiegu sygnału $\tau(t)$ oraz ostateczny wynik pomiaru mają początkowe harmoniczne, których amplitudy są największe, tj. zerowa, pierwsza, druga.

Tab. 4. Amplitudy kolejnych prążków analizy widmowej $\tau(t)$ dla sinusoidalnego przepływu

Tab.4. Amplitudes of consecutive lines from spectral analysis $\tau(t)$ for sinusoidal flow

Model liczby Nu	Numer harmonicznej							
	0	1	2	3	4	5	6	7
Ranz - Marshall	0.0913	0.0342	0.0106	0.0038	0.0015	0.0006	0.0002	0.0001
Hsu	0.0599	0.0310	0.0118	0.0049	0.0022	0.0010	0.0004	0.0002
Sideman	0.0488	0.0253	0.0096	0.0040	0.0018	0.0008	0.0004	0.0002
Whitaker	0.0939	0.0372	0.0115	0.0041	0.0016	0.0006	0.0003	0.0001
Kacnelson i Timofiejewa	0.1025	0.0422	0.0130	0.0046	0.0017	0.0007	0.0003	0.0001
King	0.0314	0.0135	0.0046	0.0017	0.0007	0.0003	0.0001	0.0001
Kramers	0.0497	0.0249	0.0093	0.0038	0.0016	0.0007	0.0003	0.0002
Zukauskas	0.0120	0.0045	0.0014	0.0005	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000
V.D. Hegge Zijnen	0.0264	0.0105	0.0034	0.0012	0.0005	0.0002	0.0001	0.0000
McAdams	0.0296	0.0121	0.0039	0.0014	0.0006	0.0002	0.0001	0.0000

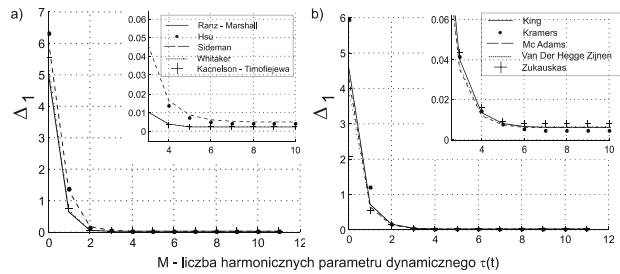
5. Odpowiedź czujnika dla sinusoidalnych prędkości przepływu i temperatury

Przeprowadzono badania dynamiki modeli czujników w zależności od przyjętej formuły określającej liczbę Nuselta dla sinusoidalnego wymuszenia temperaturowego o amplitudzie $A_T=30^\circ\text{C}$, częstotliwości 10 Hz i składowej stałej wynoszącej 40°C . Parametry fizyczne czujników oraz prędkość gazu przyjęto jak w rozdz. 4. Wyniki uzyskano próbując sygnały w chwilach t_i ($i=1, \dots, N=1024$) w jednym okresie sygnału. W pierwszej fazie eksperymentu wyliczono odpowiedzi modelu $T(t_i)$ na wymuszenia temperaturowe dla pełnego modelu współczynnika $\tau(t_i)$, wyliczanego na podstawie (3a) lub (3b) oraz tabel 1 i 2 dla zadanego przebiegu $v(t_i)$. Następnie wyznaczono odpowiedź

$T_M(t_i)$ dla tego samego wymuszenia temperaturowego, z uwzględnieniem uproszczonego modelu współczynnika $\tau(t_i)$ zawierającego ograniczoną liczbę jego harmonicznych (od zera do wartości M). Do oceny odległości pomiędzy $T(t_i)$ oraz $T_M(t_i)$ przyjęto trzy kryteria (5) stosowane dla oceny błędów dynamicznych. Do rozwiązania równania różniczkowego zastosowano procedurę *ode45* pakietu MATLAB bazującą na metodzie Rungego – Kuty. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunkach 2,3,4 odpowiednio dla kuli a) oraz walca b).

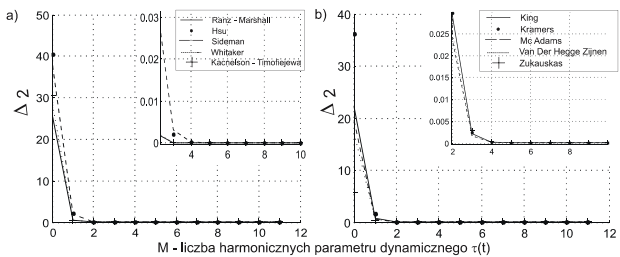
$$\Delta_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |T(t_i) - T_M(t_i)|, \quad \Delta_2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (T(t_i) - T_M(t_i))^2$$

$$\Delta_3 = \max_i |T(t_i) - T_M(t_i)|, \quad M=0,1,2,\dots,10 \quad (5)$$



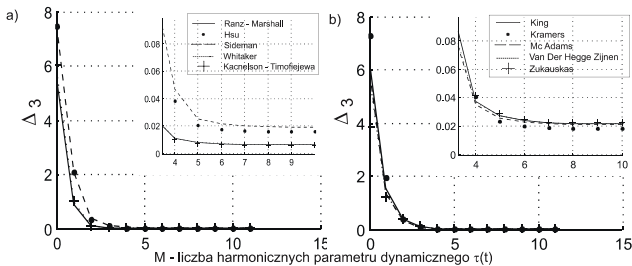
Rys. 2. Kryterium Δ_1 w zależności od liczby harmonicznych $\tau(t)$ dla różnych modeli liczby Nu

Fig. 2. Criterion Δ_1 vs. the number of harmonics $\tau(t)$ for various models of Nu number



Rys. 3. Kryterium Δ_2 w zależności od liczby harmonicznych $\tau(t)$ dla różnych modeli liczby Nu

Fig. 3. Criterion Δ_2 vs. the number of harmonics $\tau(t)$ for various models of Nu number



Rys. 4. Kryterium Δ_3 w zależności od liczby harmonicznych $\tau(t)$ dla różnych modeli liczby Nu

Fig. 4. Criterion Δ_3 vs. the number of harmonics $\tau(t)$ for various models of Nu number

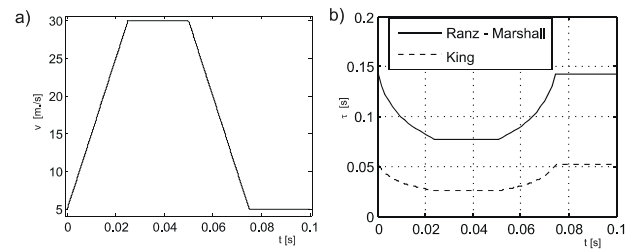
Wraz ze wzrostem zawartości liczby harmonicznych w uproszczonym modelu $\tau(t)$ wartości kryteriów (5) malały. Dla wszystkich przebadanych modeli znaczące zmniejszenie Δ_1 do wartości mniejszej niż $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ (przy średniej wartości mierzonego sygnału $40 \text{ }^\circ\text{C}$) następuje już dla liczby $M=2$. Wraz z dalszym wzrostem zawartości harmonicznych odtwarzających sygnał zmian dynamiki, już dla liczby harmonicznych $M=3$ (Ranz-Marshall, Whitaker, Kacnelson-Timofiejewa) oraz $M=4$ (dla pozostałych modeli), wartości zastosowanych kryteriów ustalają się na niskim poziomie, co pozwala wnioskować, że wyższe harmoniczne współczynnika $\tau(t)$ nie będą posiadać znaczącego wpływu na przebieg czasowy odpowiedzi analizowanych czujników. Wraz ze wzrostem liczby harmonicznych od $M=4$ wartość kryterium Δ_1 zmienia się w zakresie $0.0023 \text{ }^\circ\text{C} \div 0.0093 \text{ }^\circ\text{C}$ w zależności od przyjętego modelu $\tau(t)$ zgodnie z tabelą 1.

Na szczególnie podkreślenie zasługuje zgodność kształtu zależności kryteriów od liczby harmonicznych $\tau(t)$, dla różnych

postaci liczby Nusselta opisujących dynamikę modelu termometru rezystancyjnego. Dla modelu dynamiki termopary, w zależności od przyjętej formuły dla liczby Nu , kryteria nieznacznie odbiegają od siebie wartościami, przy zachowaniu wspólnego trendu.

6. Trapezoidalny przebieg prędkości

Sinusoidalne zmiany prędkości gazu są rzadko spotykane w rzeczywistości. Dlatego rozważono przypadek, w którym przebieg prędkości gazu w czasie ma kształt okresowego trapezu, przedstawionego na rys. 5a, przybliżającego prędkość wypływu spalin z cylindra silnika. Ma on bardzo bogate spektrum harmoniczne, a poprzez dobór kąta nachylenia zbocz trapezu można uzyskać zarówno sygnał prostokątny, jak i trójkątny. Odpowiadające tej prędkości przebiegi $\tau(t)$ dla określeń z liczby Nu według Ranza – Marshalla oraz Kinga przedstawia rysunek 5b.



Rys. 5. a) przebieg prędkości $v(t)$ b) przebiegi parametru dynamicznego $\tau(t)$

Tab. 5. Amplitudy kolejnych harmonicznych $v(t)$ oraz $\tau(t)$ dla dwóch modeli liczb Nu

	Wartości amplitud kolejnych harmonicznych							
	0	1	2	3	4	5	6	7
$v(t)$	17.4633	14.2990	0.0000	1.6083	0.0000	0.5649	0.0000	0.2990
$\tau(t)$ Ranz Marshall	0.1050	0.0369	0.0079	0.0033	0.0033	0.0025	0.0003	0.0013
$\tau(t)$ King	0.0364	0.0151	0.0038	0.0008	0.0013	0.0012	0.0004	0.0003

Analiza widmowa parametru dynamicznego $\tau(t)$ (tabela 5) dla przypadku trapezoidalnej zmiany prędkości, wykazała większy udział wyższych harmonicznych w $\tau(t)$ w porównaniu do przypadku kiedy to zmiany prędkości były sinusoidalne.

W celu określenia wpływu harmonicznych $\tau(t)$ na odpowiedź modelu czujnika, podobnie jak w rozdz. 5, zostały obliczone kryteria (5) oceny odległości sygnału odpowiedzi z ograniczoną zawartością liczby harmonicznych parametru dynamicznego $\tau(t)$ od odpowiedzi obiektu zawierającej pełny model współczynnika $\tau(t)$. Otrzymane wyniki prezentowane są w tabeli 6.

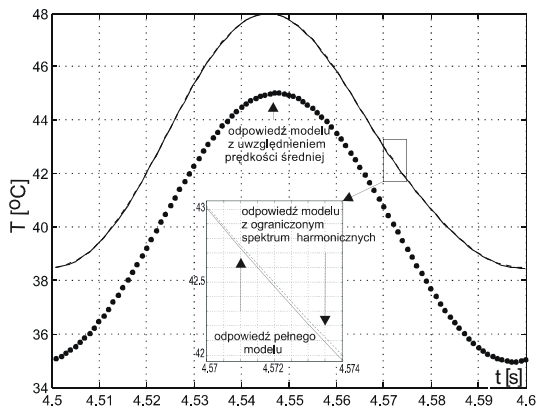
Tab. 6. Wpływ liczby harmonicznych $\tau(t)$ na średnią wartość dopasowania odpowiedzi modeli czujników temperatury dla różnych postaci liczby Nu

Model liczby Nu	Kryterium	Wartość kryterium w zależności od zawartości harmonicznych $\tau(t)$							
		$M=0$	$M=1$	$M=2$	$M=3$	$M=4$	$M=5$	$M=6$	$M=7$
Ranz - Marshall	Δ_1	2.909	0.293	0.027	0.027	0.019	0.014	0.013	0.013
		King	1.809	0.479	0.055	0.052	0.049	0.025	0.018
Ranz - Marshall	Δ_2	8.6023	0.110	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.0002
		King	4.624	0.328	0.006	0.006	0.004	0.001	0.001
Ranz - Marshall	Δ_3	3.565	0.573	0.083	0.075	0.055	0.030	0.027	0.026
		King	3.929	1.146	0.209	0.182	0.156	0.069	0.063

Wraz ze wzrostem zawartości harmonicznych w aproksymowanym współczynniku $\tau(t)$ odnotowano spadek wartości poszczególnych kryteriów. Dla $M \geq 5$ wartość Δ_1

utrzymuje się na poziomie $0.012\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ranz-Marshall) i $0.018\text{ }^{\circ}\text{C}$ (King). Uzyskane rezultaty odbiegają nieznacznie od wyników osiągniętych dla sinusoidalnego przebiegu prędkości. Każdy przypadek (różne przebiegi prędkości, modele liczby Nu , parametry fizyczne,...) muszą być rozpatrywane oddzielnie.

Związek współczynnika $\tau(t)$ z chwilową prędkością przepływającego medium $v(t)$, nasuwa intuicyjny sposób analizy dynamiki czujnika. Zamiast chwilowych wartości $v(t)$, można wykorzystać średnią wartość prędkości. Na rysunku 6 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych takiego uproszczonego modelu dynamiki czujnika dla trapezoidalnego przepływu i dla przykładowego modelu $\tau(t)$ według (3a). Liczbę Nu wyliczano zgodnie z propozycją Ranza –Marshalla. Odpowiedzi uzyskane dla pełnego modelu dynamiki oraz modelu ograniczonego do 5-ciu harmonicznych pokrywają się. Przebieg dla modelu z uśrednioną prędkością (17.5 [m/s]) istotnie różni się od poprzednich. W odpowiedzi modelu przetwornika temperatury z uwzględnieniem średniej wartości prędkości przepływającego medium, występują duże błędy dynamiczne, w stosunku do odpowiedzi modelu czujnika, gdy uwzględniano chwilową wartość prędkości. Pominięcie zjawiska mnożenia harmonicznych współczynnika $\tau(t)$ i pochodnej harmonicznych sygnału $T(t)$ powoduje istotne zaburzenie parametrów statycznych toru pomiarowego. Wartość kryterium Δ_I dla tego przypadku, przy średniej wartości sygnału mierzonego $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, wynosi $2.91\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z uwagi na nieliniowość przyjętych modeli dynamiki czujnika wartość średnia przebiegu $\tau(t)$, reprezentowana przez zerową harmoniczną nie wynika wprost z wartości średniej prędkości.



Rys. 6. Odpowiedzi modelu czujnika na wymuszenie temperaturowe z uwzględnieniem chwilowej i średniej wartości prędkości przepływu
Fig.6. Graph of the temperature sensor response for instantaneous and averaged gas velocity

7. Modele matematyczne czujników stosowane w metodzie korekcji „w ciemno”

Metoda korekcji „w ciemno” daje szansę uniknięcia wpływu warunków pomiaru na parametry dynamiczne czujnika. Zakłada ona, że pomiar tej samej zmiennej w czasie wielkości realizowany jest równocześnie przez dwa tory, o różnych właściwościach dynamicznych [5]. W trakcie pomiaru dokonywana jest równoczesna identyfikacja współczynników przyjętego matematycznego modelu dynamiki czujnika. Ta autoidentyfikacja prowadzona jest przy wykorzystaniu tylko i wyłącznie mierzonego sygnału. W metodzie korekcji dynamicznej „w ciemno”, dla okresowych zmian temperatury oraz prędkości, przyjęto model matematyczny współczynnika dynamiki obu czujników w postaci skończonych szeregów harmonicznych [5]. Wykazano, że procedury autoidentyfikacji umożliwiają wyznaczenie amplitud i faz tych harmonicznych do 7 harmonicznej z bardzo dużą dokładnością (w badanych konkretnych przypadkach liczbowych). Algorytm pomiarowo-korekcyjny umożliwia też oszacowanie liczby harmonicznych M niezbędnych do przybliżenia współczynnika dynamiki $\tau(t)$.

Badane modele eksperymentalne (3a) i (3b), dla okresowych prędkości medium, w efekcie też prowadzą do modelu $\tau(t)$ w postaci skończonego szeregu obejmującego kilka początkowych harmonicznych. Zasadne zatem jest stwierdzenie, że struktura modelu matematycznego stosowanego w korekcji dynamicznej „w ciemno” odpowiada postaciom modeli dynamiki uzyskanym na drodze eksperymentalnej dla zmiennego przepływu.

8. Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań symulacyjnych można stwierdzić, że każdy z przebadanych eksperymentalnych modeli dynamiki przetworników temperatury daje się przedstawić w postaci skończonego szeregu Fouriera. Przeprowadzone przykładowe badania wskazują, że przybliżenie współczynnika dynamiki $\tau(t)$ sześcioma początkowymi harmonicznymi jest wystarczające do uzyskania akceptowalnej dokładności pomiaru, niezależnie od przyjętej postaci liczby Nusselta. Wartości współczynników szeregu zależą jednak od wyniku pomiaru prędkości oraz formuły określającej Nu .

W odróżnieniu od innych metod, korekcja „w ciemno” nie wymaga wcześniejszych analiz i pomiarów parametrów, określających geometrię oraz właściwości fizycznych czujnika, jak i medium poruszającego się ze zmienną prędkością. Eliminuje skutki nieuniknionych nieregularności wykonania czujnika. Należy podkreślić, że metoda korekcji „w ciemno” nie wymaga pomiaru prędkości medium i dlatego nie ma konieczności wcześniejszego wyboru modelu określającego liczbę Nusselta. Wartości współczynników szeregu harmonicznego modelu $\tau(t)$, są przedmiotem autoidentyfikacji [5]. System pomiarowy ma możliwość autokalibracji w miejscu swoich warunków pracy.

Wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych, dotyczących modeli eksperymentalnych potwierdzają, że założenia odnośnie struktury modelu matematycznego współczynnika dynamiki stosowanego w metodzie korekcji „w ciemno”, były poprawne.

Przeprowadzone badania wykonano tylko dla określonych przypadków wymuszenia temperaturowego, przebiegu prędkości oraz konkretnych modeli czujników temperatury. Wykorzystanie metody korekcji w innych przypadkach wymagać będzie każdorazowo przeprowadzenia symulacji i obliczeń, mających na celu ilościowe sprawdzenie jakości pracy procedur korekcyjnych dla przewidywanych zakresów zmian parametrów systemu i warunków jego pracy. Narzędzia programowe do realizacji takich badań zostały opracowane.

9. Literatura

- [1] Andrews G. E., Bradley D., Hundy G.F. : Hot wire anemometers calibration for measurements of small gas velocities. International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 15, Pergamon Press 1972, str. 1765-1786.
- [2] Goldstein R.J., Sanitjai S.: Forced convection heat transfer from a circular cylinder in cross flow to air and liquids. International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004) str.4795–4805.
- [3] Stavros M. B., Argyropoulos A.:Development of a heat transfer dimensionless correlation for spheres immersed in a wide range of Prandtl number fluids. International Journal of Heat and Mass Transfer Volume: 48, Issue: 21-22, October, 2005, str. 4333-4341.
- [4] Michalski L. Eckersdorf K. Kucharski J.: Termometria - przyrządy i metody. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1998.
- [5] Nabelek J.: A „Blind” Correction of dynamic error of a nonstationary first order transducer for the periodic case – Simulation Investigation. Proc. XVIII IMEKO Congress Metrology for Suitable Development, Sept., 17-22, 2006, Rio de Janeiro, Brazil. Wydanie CD.
- [6] Olczyk A.: Modelowanie właściwości dynamicznych przetworników niestacjonarnej temperatury gazu. Materiały XV Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych Krynica 2005, str. 71-80.

Artykuł powstał w ramach Projektu Badawczego MNiI 1346/T10/2004/27.

Artykuł recenzowany