

Piotr Urbanek*, Jacek Kucharski*, Aleksander Olczyk**

Algorytm identyfikacji własności dynamicznych czujników temperatury metodą korekcji dwutorowej

1. Wprowadzenie

Pomiary chwilowej temperatury gazu w warunkach przepływu nieustalonego wymagają zastosowania czujników temperatury o wystarczająco dobrych własnościach dynamicznych. Dotychczas, z uwagi na własności dynamiczne czujników temperatury, obszar pomiarów zmiennych w czasie temperatur był ograniczony do częstotliwości nie przekraczających kilku – kilkunastu Hz.

Główną barierą w osiągnięciu wyższych częstotliwości granicznych przetworników temperatury są ograniczone możliwości miniaturyzacji elementu pomiarowego (spoiny pomiarowej w przypadku termoelementu). Z analiz wpływu średnicy spoiny na wartości stałych czasowych czujnika [1, 2] wynika, iż w przypadku termoelementów wykonanych z najcieńszych z dostępnych na rynku nieizolowanych drutów termoelektrycznych (o średnicy $0,01 \pm 0,02$ mm) możliwe jest – w zależności od technologii wykonania spoiny – uzyskanie częstotliwości granicznych zaledwie na poziomie kilkunastu Hz. Takie własności dynamiczne są daleko niewystarczające w wielu zastosowaniach, np. w badaniach przepływu pulsacyjnego w przewodach zasilających turbosprężarek, w których częstotliwości wymuszenia sięgają 200 Hz.

Istnieje kilka metod poszerzenia obszaru pracy przetwornika temperatury. Jedną z nich jest szeregowa korekcja własności dynamicznych czujników temperatury [1, 3]. Pozwala ona na wykorzystanie do pomiarów wielkości szybkozmiennych czujników o gorszych, ale znanych własnościach dynamicznych. Wymaga ona jednak zastosowania uprzedniej identyfikacji modelu czujnika oraz wyznaczenia wartości jego stałej czasowej. Identyfikacji tej dokonuje się zwykle eksperymentalnie, wykorzystując jeden ze standardowych typów wymuszeń, np. wymuszenie skokowe, sinusoidalne lub wieloczęstotliwościowe [4].

Dokładność metody zależna jest od znajomości struktury przetwornika (postaci równania jego charakterystyki dynamicznej) oraz poprawności przeprowadzonego ekspery-

* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka w Łodzi

** Instytut Maszyn Przepływowych, Politechnika Łódzka w Łodzi

mentu identyfikacji, w tym możliwości poprawnego generowania sygnałów testowych w rzeczywistych warunkach pracy czujnika. Niestety ten ostatni element jest trudny do spełnienia ze względu na możliwości i specyfikę zjawisk zachodzących w rozpatrywanym układzie turbosprężarki [1]. W efekcie proces korekcji oparty na niepewnych danych z identyfikacji może dawać wyniki znacznie odbiegające od rzeczywistych, co przy braku wiarygodnej metody weryfikacji rezultatów korekcji nie pozwala na uznanie tej metody za wiarygodną. Dlatego też – aby uniknąć ww. problemów związanych z przeprowadzaniem w rozważanym układzie typowych procedur identyfikacji – zaproponowano wykorzystanie metody korekcji dwutorowej w komputerowym systemie pomiarowym, pozwalającej na rezygnację z jawnego przeprowadzania eksperymentów identyfikacji.

2. Istota korekcji dynamicznej

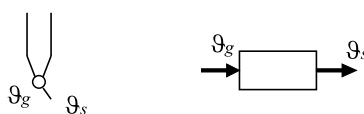
Uproszczony opis dynamiczny wymiany ciepła spoiny miniaturowego termoelementu nieosłoniętego, przedstawionego na rysunku 1, z otoczeniem, wyrażony w postaci równania różniczkowego

$$\tau \frac{d\vartheta_s}{dt} + \vartheta_s = k\vartheta_g \quad (1)$$

wskazuje, że termoelement o tego typu konstrukcji może być reprezentowany przez transmitancję operatorową członu inercyjnego pierwszego rzędu [3]:

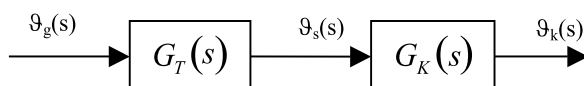
$$G_T(s) = \frac{\vartheta_s(s)}{\vartheta_g(s)} = \frac{k}{1 + s\tau} \quad (2)$$

gdzie: k , τ – parametry obiektu I rzędu (wzmocnienie statyczne i stała czasowa).



Rys. 1. Schemat przetwarzania sygnału temperatury na spoinie termoelementu
(ϑ_g – temperatura gazu, ϑ_s – temperatura spoiny)

Ogólna zasada korekcji własności dynamicznych czujnika temperatury o transmitancji $G_T(s)$ polega na wprowadzeniu do toru pomiarowego dodatkowego członu dynamicznego zwanego korektorem (rys. 2), o tak dobranej transmitancji $G_K(s)$, aby zastępcze (wynikowe) własności dynamiczne toru były korzystniejsze od własności samego czujnika [3, 5].



Rys. 2. Schemat blokowy układu czujnik–korektor

W idealnym przypadku żąda się, aby zastępcza transmitancja układu czujnik–korektor miała charakter statyczny, tj

$$G_{TK}(s) = \frac{\vartheta_K(s)}{\vartheta_g(s)} = G_T(s) \cdot G_K(s) = K_{TK} \quad (3)$$

a w szczególności, aby układ ten wiernie odtwarzał mierzony sygnał, tj. $K_{TK} = 1$.

Wobec przyjętej do rozważań transmitancji (2) transmitancja korektora – zgodnie z (3) – powinna mieć zatem postać

$$G_K(s) = K_K (1 + s\tau_K) \quad (4)$$

przy czym warunkiem prawidłowej korekcji jest zależność $\tau_k = \tau$, a $K_{TK} = kK_K$.

Obecnie tego typu korektory realizuje się w formie cyfrowej w postaci odpowiedniego algorytmu. Należy jednak pamiętać, że każdy korektor rzeczywisty jest obciążony pewną inercyjnością, co ostatecznie prowadzi do jego transmitancji postaci

$$G_K(s) = K_K \frac{1 + s\tau}{1 + s \frac{\tau}{k_k}} \quad (5)$$

gdzie k_k – współczynnik korekcji ($k_k > 1$).

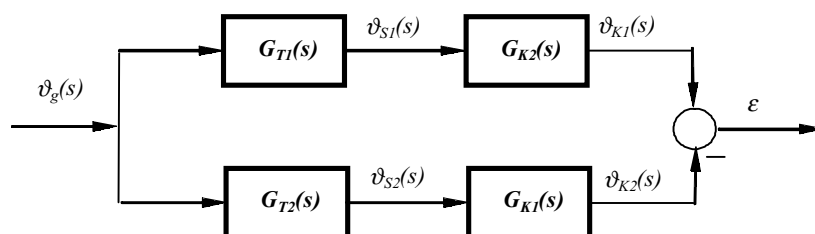
Istnienie członu inercyjnego w strukturze korektora wynika przede wszystkim z potrzeby spełnienia warunku fizycznej realizowalności układu, ale także redukuje wysoko-częstotliwościowe zakłócenia wzmacniane w sposób nieunikniony przez korektor. Właściwy dobór współczynnika korekcji k_k jest więc wynikiem kompromisu pomiędzy skutecznością eliminacji błędu dynamicznego a intensywnością zakłóceń występujących w sygnale wyjściowym ϑ_K układu czujnik – korektor.

3. Metoda korekcji dwutorowej

Przedstawiona w rozdziale 2 istota korekcji własności dynamicznych czujników jest skuteczna pod warunkiem dobrej znajomości ich rzeczywistych parametrów dynamicznych. Często w praktyce poprawne przeprowadzenie eksperymentalnej identyfikacji czujnika temperatury jest utrudnione ze względu na niemożność wygenerowania sygnału wy-

muszącego o ściśle zadanym kształcie (np. sygnału skokowego, sinusoidalnego lub wieloczęstotliwościowego). Ponadto w rzeczywistych warunkach prowadzenia pomiaru parametry dynamiczne czujnika mogą ulegać zmianom w trakcie pomiarów, np. na skutek zmian warunków wymiany ciepła pomiędzy czujnikiem a otoczeniem, co dodatkowo pogarsza skuteczność metody. Taka sytuacja występuje w przypadku pomiarów temperatury w maszynach przepływowych, w których ośrodkiem pomiaru temperatury jest przepływająca pulsacyjnie gaz. W tym zakresie zastosowań istnieje więc potrzeba poszukiwania innych rozwiązań zmniejszających błąd dynamiczny pomiarów, a jedną z możliwości jest realizowanie korekcji w tzw. układzie dwutorowym. Metoda ta i jej źródła opisywane są m. in. w [3], a w ostatnich latach jest ona rozwijana między innymi w pracach [6, 7].

W metodzie tej wyznaczenie szybkozmiennego sygnału temperatury polega na jednoczesnym pomiarze tego sygnału dwoma różnymi czujnikami, których własności dynamiczne nie są znane a priori co do wartości, a jedynie zakłada się znajomość struktury modelu tych czujników. Jednocześnie przeprowadzana jest dwutorowo korekcja własności dynamicznych obu czujników (rys. 3).



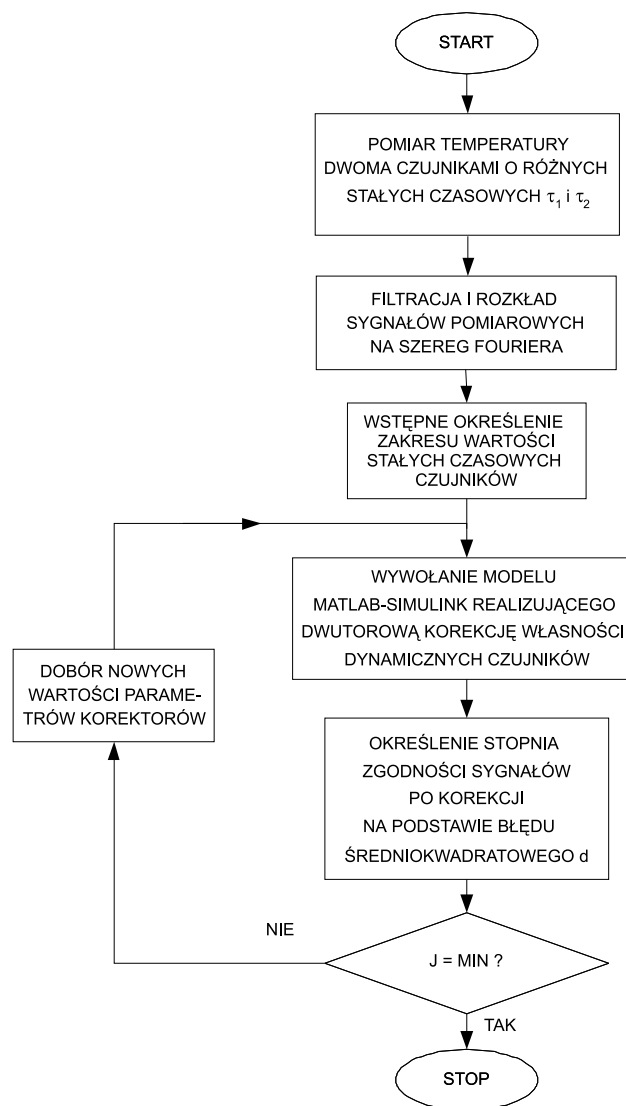
Rys. 3. Pomiar temperatury z dwutorową korekcją własności dynamicznych czujników

Dysponując sygnałami z dwóch różnych czujników temperatury, można wyznaczyć poszukiwany (rzeczywisty) sygnał temperatury, dobierając dla każdego z torów pomiarowych korektor o strukturze wynikającej z modelu czujnika i o takich parametrach, aby zminimalizować różnicę sygnałów uzyskanych w obu torach po korekcji (rys. 3). Przyjmując, że rzeczywista temperatura mierzona jest dwoma czujnikami o transmitancjach G_{T1} , i G_{T2} zgodnych z (2) i stałych czasowych odpowiednio τ_1 i τ_2 , to odpowiadające im struktury korektorów G_{K1} , G_{K2} można przedstawić w postaci (5).

Warunek korekcji w układzie (rys. 3) jest spełniony wtedy, gdy sygnał różnicowy ϵ reprezentujący błąd korekcji wynosi zero. W rzeczywistości dąży się do minimalizacji tego sygnału np. poprzez minimalizację błędu średniokwadratowego postaci

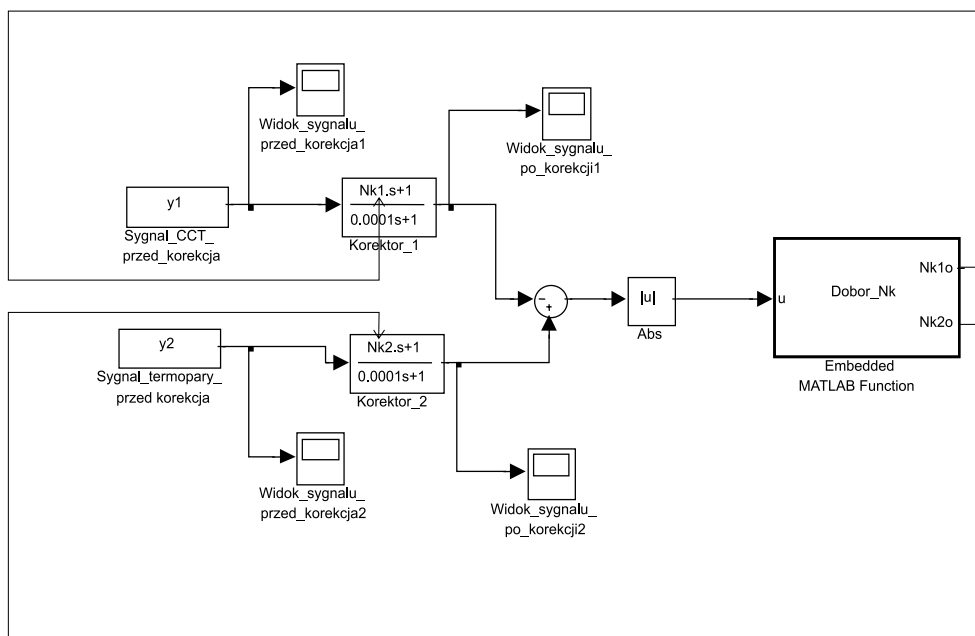
$$J = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\vartheta_{K1} - \vartheta_{K2})^2 \quad (6)$$

gdzie: ϑ_{K1} i ϑ_{K2} są sygnałami wyjściowymi torów pomiarowych z czujnikami o stałych czasowych odpowiednio τ_1 i τ_2 .



Rys. 4. Schemat algorytmu korekcji dwutorowej

Szczegółowy algorytm opisanego procesu korekcji zilustrowano na rysunku 4. Algorytm ten może być efektywnie zrealizowany z wykorzystaniem komputerowego systemu pomiarowego umożliwiającego zarówno zbieranie informacji wyjściowej z czujników, cyfrowe przetwarzanie uzyskanych sygnałów oraz prowadzenie obliczeń prowadzących do optymalizacji parametrów układu. Wygodnym narzędziem dla tych potrzeb jest pakiet MATLAB-Simulink (rys. 5).



Rys. 5. Korekcja dwutorowa zrealizowana w środowisku MATLAB-Simulink

4. Weryfikacja eksperymentalna

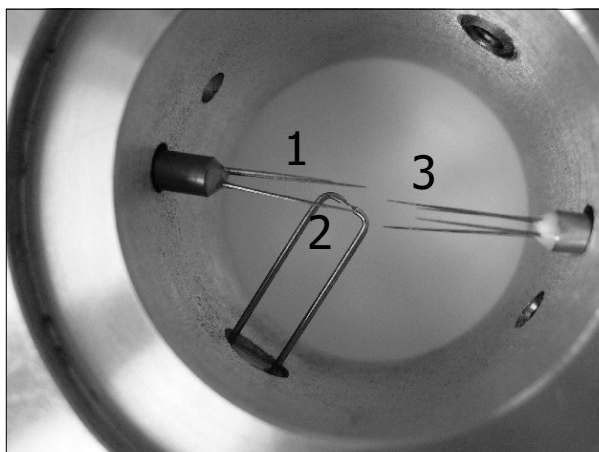
Omówiona metoda pomiaru temperatury wymaga dostarczenia dwóch równoległych sygnałów z czujników o różnej inercyjności. W praktyce można ten warunek spełnić stosując czujniki o istotnie różniących się wymiarach geometrycznych. W prezentowanych badaniach, w układzie pomiarowym, opisanym szczegółowo w pracy [8], wykorzystano następujące czujniki temperatury:

- termometr stałoprądowy CCT wykonany z drutu wolframowego o średnicy $\varnothing 0,005$ mm (rys. 6 – czujnik nr 1);
- termoelement typu E wykonany w postaci sondy z odsłoniętą spoiną pomiarową, wykonanej z drutu o średnicy $\varnothing 0,05$ mm (rys. 6 – czujnik nr 2), przy czym średnica spoiny wynosiła ok. 0,15 mm.

Obydwa czujniki zostały umieszczone w kanale przepływowym w odcinku prostego przewodu o przekroju kołowym o średnicy wewnętrznej $\varnothing 42$ (rys. 6). Sondy pomiarowe umieszczono w pobliżu osi kanału, aby uniknąć wpływu zjawisk w warstwie przyściennej i tak usytuowano względem siebie, aby zapewnić jak najbardziej zbliżone warunki przepływu. Na rysunku 6 widoczna jest jeszcze sonda CCT (oznaczona numerem 3), wykonana z cieńszego włókna ($3 \mu\text{m}$), wykorzystywana w celach kontrolnych.

Jako źródło przepływu pulsacyjnego w kanale wykorzystano generator pulsacji w postaci wirującej przepustnicy [8] umieszczonej w rurociągu zasilającym stanowisko. Wy-

drażony wirnik generatora osadzony bezpośrednio na wale silnika elektrycznego zasilanego poprzez falownik, obracając się z zadaną częstotliwością, cyklicznie otwiera i zamyka światło rurociągu generując przepływ pulsacyjny (okresowo zmienny).



Rys. 6. Widok fragmentu kanału przepływowego z zainstalowanymi sondami:
1 – sonda CCT 5 μm , 2 – termoelement, 3 – dodatkowa sonda dwuwłóknowa

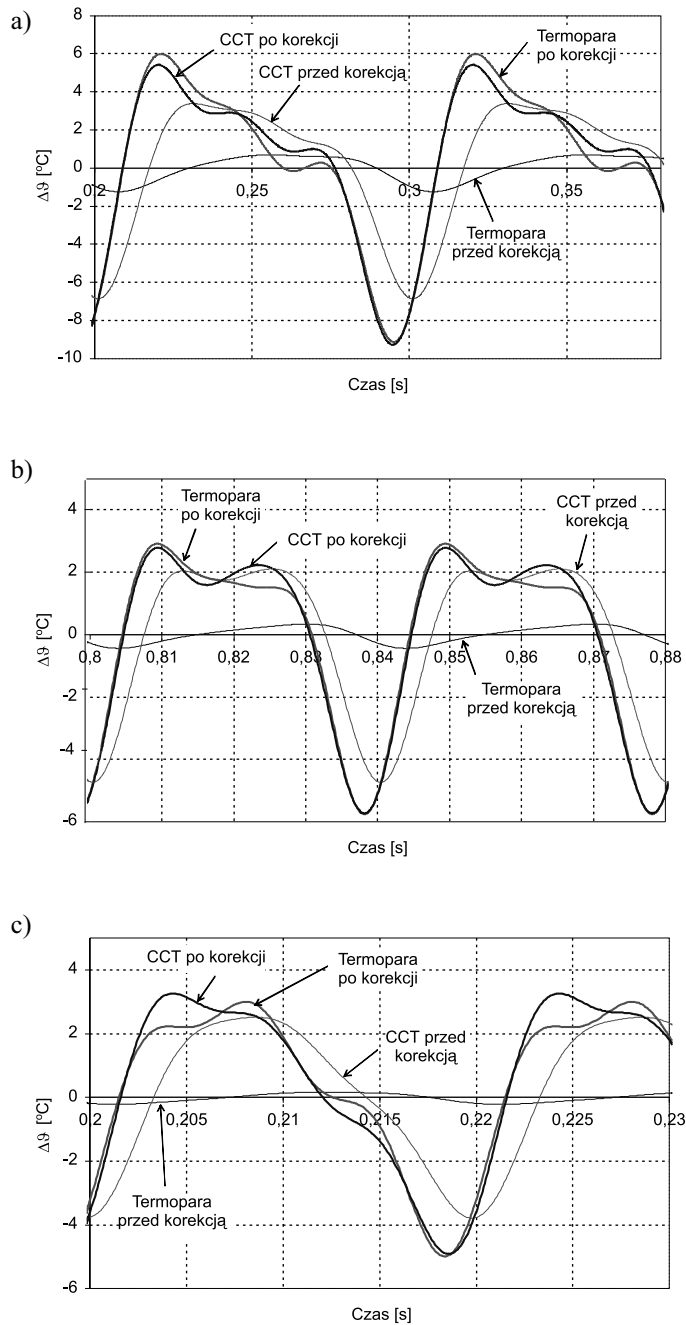
Rejestrację sygnałów z przetworników prowadzono wykorzystując komputerowy system pomiarowy wyposażony w kartę pomiarową Advantech PCL 818 HG o rozdzielczości 12 bitów. Współpracując z kartą oprogramowanie, pracując w czasie rzeczywistym, zapewniało wielokanałowy pomiar sygnałów z częstotliwością próbkowania 1 kHz.

Na tej podstawie, wykorzystując układ korekcji dynamicznej czujników temperatury, którego idea została przedstawiona w rozdziale 3, wyznaczono stałe czasowe termoelementu oraz termometru CCT, zakładając, że w każdym przypadku dynamika obu przyrządów jest reprezentowana przez człon inercyjny I rzędu. Skuteczność korekcji przeanalizowano wyznaczając względny błąd średniokwadratowy ilustrujący stopień zgodności sygnałów po korekcji wyrażony zależnością

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\vartheta_{CCT}^* - \vartheta_{Tp}^*)^2}{\sum_{i=1}^n \vartheta_{CCT}^{*2}}} \cdot 100\% \sqrt{b^2 - 4ac} \quad (7)$$

gdzie:

- ϑ_{CCT}^* – sygnał z CCT po korekcji,
- ϑ_{Tp}^* – sygnał z termoelementu po korekcji,
- n – liczba próbek w 1 okresie sygnału.



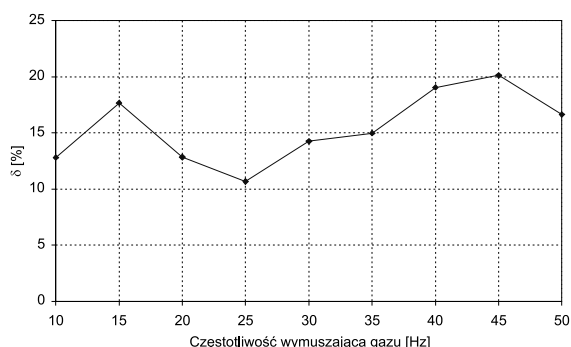
Rys. 7. Przebiegi sygnałów z termoelementu i termometru CCT przed i po korekcji dla częstotliwości wymuszających gazu 10 Hz (a), 25 Hz (b), 50 Hz (c)

Eksperymenty wyznaczania własności dynamicznych czujnika CCT oraz termoelementu T_p metodą korekcji dwutorowej przeprowadzono dla przepływającego przez kanał gazu o przepływie zmieniającym się z częstotliwością od 10 do 50 Hz.

Na rysunkach 7a–c przedstawiono wybrane rejestracje pomiaru temperatury przepływającego gazu dokonane sondą CCT i termoelementem T_p . Widoczne jest na nich zjawisko zmniejszania się wraz ze wzrostem częstotliwości przepływającego gazu amplitudy temperatury mierzonej zarówno przez sondę CCT, jak i termoelement T_p , oraz wzrostu przesunięcia fazowego obydwu sygnałów. Wyznaczenie na podstawie metody korekcji dwutorowej stałych czasowych badanych czujników (które są jednocześnie parametrami korektorów) pozwala na wyznaczenie najbardziej zbliżonego do rzeczywistego sygnału zmian temperatury w kanale pomiarowym.

Na rysunku 8 przedstawiono wartość względnego błędu średniokwadratowego (7) ilustrującego stopień zgodności sygnałów z sondy CCT i termoelementu T_p po korekcji dla różnych częstotliwości pulsacji gazu w kanale.

Jak widać, wartości błędów korekcji w całym przedziale zmienności częstotliwości wymuszenia gazu nie przekraczają 20%, co dowodzi skuteczności przedstawionej metody korekcji dwutorowej i wskazuje na istotne rozszerzenie zakresu pomiarowego układu.



Rys. 8. Względny błąd kwadratowy w funkcji częstotliwości wymuszenia

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono metodę pomiaru temperatur szybkozmiennych pulsacyjnego przepływu gazu miniaturowymi przetwornikami temperatury poprzez dwutorowy pomiar i korekcję ich własności dynamicznych. Wskazano na problemy związane z realizacją w omawianym układzie typowych procedur procesów identyfikacji i w tym kontekście zaproponowano wykorzystanie metody korekcji dwutorowej, nie wymagającej przeprowadzania procesu identyfikacji własności dynamicznych stosowanego czujnika.

Omówiono podstawy teoretyczne metody, przedstawiono algorytm jej realizacji oraz sposób implementacji w komputerowym systemie pomiarowym z wykorzystaniem środowiska MATLAB-Simulink.

Zaprezentowano wyniki takiej korekcji przeprowadzonej na rzeczywistych sygnałach pochodzących z dwóch równoległych torów pomiarowych przy wykorzystaniu termometru stałoprądowego CCT (z włóknem wolframowym $\varnothing = 0,005$ mm) oraz miniaturowego termoelementu typu E ($\varnothing_{spoiny} = 0,15$ mm). Wykazano, iż stopień zgodności sygnałów z tych przetworników po korekcji jest wysoki, przy czym skuteczność metody potwierdzono do częstości wymuszenia 50 Hz, co jest wartością wyraźnie wyższą niż w przypadku innych metod.

Literatura

- [1] Olczyk A., Kucharski J., Urbanek P.: *Investigation of Thermocouple Sensor Dynamics under Conditions of Pulsating Flow of Gases*. 2nd International Conference on Advanced Measurement Techniques and Sensory Systems for Automotive Applications, Ancona, Italy, 13–14 September 2001
- [2] Olczyk A.: *Modelowanie własności dynamicznych przetworników niestacjonarnej temperatury gazu*. XV Sympozjum „Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych”, Krynica, 18–22.09.2005, 71–80
- [3] Michalski L., Eckersdorf K., Kucharski J.: *Termometria – przyrządy i metody*. Łódź, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej 1998
- [4] Sankowski D., Meghee J., Henderson I., Kucharski J., Urbanek P.: *Application of multifrequency binary signals for identification of electric resistance furnace*. Rozdz. 8 [w:] *Perturbation signals for system identification*, Cambridge, U.K., Prentice Hall, University Press 1993
- [5] Hagel R., Zakrzewski J.: *Pomiary dynamiczne*. Warszawa, WNT 1984
- [6] Nabielec J., Nalepa J.: *Ocena skuteczności trzech algorytmów korekcji dynamicznej pomiaru metodą „w ciemno” dla obiektu pierwszego rzędu – badania symulacyjne*. Krajowy Kongres Metrologii KKM 2001, Warszawa, TI, 247–250
- [7] Nabielec J., Zatorski A.: *Korekcja błędu dynamicznego niestacjonarnego systemu pomiarowego I-rzędu metodą „w ciemno” dla wybranego przypadku okresowego*. XV Symp. „Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych”, Krynica 2005, 53–60
- [8] Olczyk A., Kucharski J., Urbanek P.: *Wyznaczanie chwilowej temperatury gazu w przepływie nieustalonym za pomocą dwóch równoległych torów pomiarowych*. XVI Sympozjum „Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych”, Krynica 2006