

Magdalena JAREMKIEWICZ¹, Tomasz SOBOTA¹, Dawid TALER²

¹ POLITECHNIKA KRAKOWSKA, INSTYTUT APARATURY PRZEMYSŁOWEJ I ENERGETYKI

² AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA MASZYN I URZĄDZEŃ ENERGETYCZNYCH

Pomiar nieustalanej temperatury czynnika w maszynach i urządzeniach energetycznych

Mgr inż. Magdalena JAREMKIEWICZ

Jest asystentką naukowo-dydaktyczną w Instytucie Aparatury Przemysłowej i Energetyki na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej. W latach 2006-2007 była zatrudniona w biurze projektowym na stanowisku asystent projektanta. Zajmuje się pomiarami szybkozmiennych temperatur przy zastosowaniu metod odwrotnych.



e-mail: mjaremkiewicz@pk.edu.pl

Dr inż. Tomasz SOBOTA

Jest adiunktem w Katedrze Maszyn i Urządzeń Energetycznych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej. Zajmuje się wymianą ciepła, technologiami i maszynami energetycznymi oraz pomiarami cieplnymi. Jest autorem około 50 artykułów i referatów.



e-mail: tsobota@mech.pk.edu.pl

Dr inż. Dawid TALER

Jest adiunktem w Katedrze Maszyn i Urządzeń Energetycznych Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Jest autorem dwóch książek z zakresu pomiarów przeplywowo-ciepłnych oraz jednej poświęconej identyfikacji wymiany ciepła w wymiennikach. Zajmuje się obliczeniami i badaniami maszyn i urządzeń energetycznych. Jest autorem ponad 60 publikacji w czasopismach krajowych i zagranicznych.



e-mail: taler@imr.agh.edu.pl

Streszczenie

W stanie ustalonym, gdy temperatura jest stała oraz nie występuje zjawisko tłumienia i opóźnienia zmian temperatury czynnika przez termometr, pomiary temperatury mogą być dokonane z dużą dokładnością. Jednakże podczas rozruchu, gdy temperatura czynnika ulega gwałtownym zmianom, występują znaczne różnice pomiędzy temperaturą rzeczywistą a zmierzoną z uwagi na bezwładność masywnej osłony termoelementu. W niniejszej pracy zostały przedstawione dwa sposoby określania nieustalanej temperatury czynnika bazujące na przybliżeniu termoelementu za pomocą modelu inercyjnego I i II rzędu. Temperatura czynnika została określona na podstawie pomiarów dokonanych przez dwa termoelementy o różnych średnicach zanurzonych nagle we wrzącej wodzie.

Słowa kluczowe: termoelementy płaszczowe, termometry przemysłowe, dynamika termometrów, stałe czasowe, model pierwszego i drugiego rzędu.

Measurements of transient fluid temperature in installations of power plants

Abstract

Most books on temperature measurements concentrate on measurements of the fluid temperature under steady conditions. Estimation of the temperature measurement dynamic error is based only the thermometer unit-step response. Little attention is paid to measurements of the transient fluid temperature, despite the great practical significance of the problem. Under steady-state conditions, when the fluid temperature is constant and there is no damping as well as the time lag, temperature measurements can be made with high accuracy. However, when the fluid temperature changes rapidly, as during start-up, there occur quite significant differences between the true and measured temperature due to the time required for transferring heat to a thermocouple placed inside the heavy thermometer pocket. In this paper there are presented two methods for determining the changing in time temperature of the flowing fluid based on temperature waveforms indicated by a thermometer. In the first one the thermometer model is assumed to be first-order inertial and in the other one – second-order inertial. Local polynomial approximation based on 9 points was used for approximation of the temperature changes. It enables determining the first and second derivative from the function representing the thermometer temperature with high accuracy. Experimental investigations

of an industrial thermometer at the step increase in the fluid temperature were performed. Fig. 3 shows the comparison of results when using both methods. The least square method was used to determine the time constants τ_1 and τ_2 in Eq. (15), and the time constant τ in Eq. (16). Both methods for measuring the fluid transient temperature presented can be used for on-line determining any fluid temperature changes as a function of time. The first method in which the thermometer is modelled with an ordinary, first-order, differential equation is appropriate for thermometers having very small time constants. In such cases the thermometer indication delay is small in reference to the fluid temperature changes. In case of industrial thermometers designed to measure temperature of fluids being under high pressure there is a significant time delay of the thermometer indication in reference to the fluid temperature actual changes. For such thermometers the second order thermometer model, allowing for modelling the signal delay, is more suitable. The techniques proposed in the paper can also be used when the time constants are a function of the fluid velocity.

Keywords: sheath thermocouples, industrial thermometers, thermometer dynamics, time constants, model of the first and second order.

1. Wprowadzenie

Pomiar nieustalanej temperatury pary lub spalin w elektrowniach ciepłych jest bardzo trudny. Masywne obudowy termometrów oraz niskie współczynniki wnikania ciepła sprawiają, że temperatura wskazywana przez termometr znacznie różni się od rzeczywistej temperatury czynnika [1-8].

Zagadnienie korekcji charakterystyk dynamicznych czujników termometrycznych przedstawiono w książkach [9, 10].

Problem dynamicznego błędu pomiaru temperatury pary przegrzanej jest szczególnie ważny w regulatorach (schładzaczach wtłokowych) temperatury pary przegrzanej. Z uwagi na dużą bezwładność termometru prawidłowy pomiar nieustalanej temperatury czynnika, a tym samym układ regulacji temperatury pary przegrzanej, jest daleki od doskonałości.

W pracy opracowano dwa sposoby wyznaczania zmiennej w czasie temperatury przepływającego czynnika na podstawie przebiegu czasowego temperatury wskazywanego przez termometr.

W pierwszym sposobie termometr traktowany jest jako obiekt inercyjny pierwszego rzędu, a w drugim jako obiekt inercyjny drugiego rzędu. Do aproksymacji przebiegu temperatury czynnika zastosowano lokalną aproksymację wielomianową bazującą na 9 punktach. Zapewnia to dużą dokładność określenia pierwszej i drugiej pochodnej z funkcji reprezentującej zmiany temperatury termometru w czasie.

Przeprowadzono badania eksperymentalne termometru przemysłowego przy skokowej zmianie temperatury czynnika. Porównano przebiegi temperatury czynnika wyznaczone za pomocą obydwu zaproponowanych sposobów przy skokowej zmianie temperatury czynnika.

2. Modele matematyczne termometrów

Najczęściej termometr modelowany jest jako element o skupionej pojemności cieplnej, to jest przy założeniu, że temperatura termometru jest jedynie funkcją czasu z pominięciem różnic temperatury występujących wewnątrz termometru. Zmiany temperatury termometru w czasie $T(t)$ opisane są równaniem różniczkowym zwyczajnym pierwszego rzędu (model termometru I-go rzędu)

$$\tau \frac{dT}{dt} + T = T_{cz}, \quad (1)$$

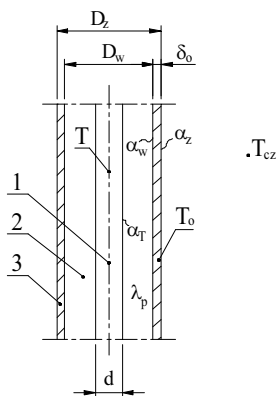
gdzie:

$T_{cz}(t)$ – temperatura czynnika,
 $\tau = mc/(\alpha A)$ – stała czasowa termometru.

W przypadku termometru o złożonej budowie do pomiaru temperatury czynnika o wysokim ciśnieniu dokładność modelu pierwszego rzędu (1) jest niewystarczająca.

3. Czujnik o budowie złożonej

Pomiędzy obudową zewnętrzną a czujnikiem temperatury może występować szczelina powietrzna (rys. 1), której pojemność ciepła $c\rho$ zostanie pominięta z uwagi na jej małą wartość.



Rys. 1. Przekrój czujnika temperatury z osłoną
 Fig. 1. Longitudinal section of a sheath thermocouple placed inside the protection shield

Przy analizie wymiany ciepła między obudową a termoelementem pominięta zostanie również wymiana ciepła przez promieniowanie. Wprowadzając współczynnik przenikania ciepła k_w odniesiony do wewnętrznej powierzchni obudowy

$$\frac{1}{k_w} = \frac{1}{\alpha_w} + \frac{(1 + D_w/d)(D_w - d)}{4\lambda_p} + \frac{D_w}{d} \cdot \frac{1}{\alpha_T}, \quad (2)$$

gdzie:

α_T, α_w – oznaczają odpowiednio współczynnik wnikania ciepła na zewnętrznej powierzchni termoelementu i wewnętrznej powierzchni obudowy, $W/(m^2 \cdot K)$,
 d, D_w – odpowiednio średnica zewnętrzna termoelementu i wewnętrzna obudowy, m,
 λ_p – współczynnik przewodzenia ciepła szczeliny powietrznej, $W/(m \cdot K)$.

Bilans ciepła dla czujnika temperatury usytuowanego wewnątrz obudowy ma postać

$$A\rho c \frac{dT}{dt} = P_w k_w (T_o - T), \quad (3)$$

gdzie:

A – pole powierzchni przekroju poprzecznego termoelementu, m^2 ,
 ρ – średnia gęstość termoelementu, kg/m^3 ,
 c – średnie ciepło właściwe termoelementu, $J/(kg \cdot K)$,
 P_w – obwód wewnętrznej powierzchni obudowy, m.

Wprowadzając współczynnik przenikania ciepła k_z dla obudowy odniesiony do jej powierzchni zewnętrznej:

$$\frac{1}{k_z} = \frac{D_w}{D_z} \cdot \frac{1}{\alpha_z} + \frac{1 + D_w/D_z}{2} \cdot \frac{\delta_o}{\lambda_o}, \quad (4)$$

gdzie:

D_z – średnica zewnętrzna obudowy, m,
 δ_o – grubość obudowy, m,
 λ_o – współczynnik przewodzenia ciepła obudowy, $W/(m \cdot K)$

równanie bilansu ciepła ma postać:

$$A_o \rho_o c_o \frac{dT_o}{dt} = P_z k_z (T_{cz} - T_o) - P_w k_w (T_o - T) \quad (5)$$

Po wyznaczeniu z równania (3) temperatury T_o

$$T_o = \frac{A\rho c}{P_w k_w} \frac{dT}{dt} + T \quad (6)$$

i podstawieniu do równania (5) otrzymuje się po przekształceniach

$$\frac{(A_o \rho_o c_o)(A\rho c)}{(P_w k_w)(P_z k_z)} \frac{d^2 T}{dt^2} + \frac{A_o \rho_o c_o}{P_z k_z} \left[1 + \frac{(P_z k_z)(A\rho c)}{(P_w k_w)(A_o \rho_o c_o)} + \frac{A\rho c}{A_o \rho_o c_o} \right] \frac{dT}{dt} + T = T_{cz} \quad (7)$$

Po przyjęciu w równaniu (7) oznaczeń

$$a_2 = \frac{(A_o \rho_o c_o)(A\rho c)}{(P_w k_w)(P_z k_z)},$$

$$a_1 = \frac{A_o \rho_o c_o}{P_z k_z} \left[1 + \frac{(P_z k_z)(A\rho c)}{(P_w k_w)(A_o \rho_o c_o)} + \frac{A\rho c}{A_o \rho_o c_o} \right],$$

$$a_0 = 1,$$

$$b_0 = 1,$$

otrzymuje się następujące równanie różniczkowe

$$a_2 \frac{d^2 T}{dt^2} + a_1 \frac{dT}{dt} + T = T_{cz}. \quad (8)$$

Warunki początkowe mają postać

$$T(0) = T_o = 0, \quad \left. \frac{dT(t)}{dt} \right|_{t=0} = v_T = 0. \quad (9)$$

Zagadnienie początkowe (8-9) rozwiązane zostało przy użyciu transformacji Laplace'a. Transmittancja operatorowa $G(s)$ ma następującą postać

$$G(s) = \frac{\bar{T}(s)}{\bar{T}_{cz}(s)} = \frac{1}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}, \quad (10)$$

gdzie:

s – zmienna zespolona,

$\bar{T}(s)$ i $\bar{T}_{cz}(s)$ – odpowiednio transformata Laplace'a temperatury czujnika termometru i czynnika.

Stałe czasowe τ_1 i τ_2 są określone wzorem

$$\tau_{1,2} = \frac{2a_2}{a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_2}}. \quad (11)$$

Równanie różniczkowe (8) można zapisać w postaci

$$\tau_1 \tau_2 \frac{d^2 T}{dt^2} + (\tau_1 + \tau_2) \frac{dT}{dt} + T = T_{cz}. \quad (12)$$

Dla skokowego wzrostu temperatury czynnika od 0°C do stałej wartości T_{cz} transformata Laplace'a temperatury czynnika ma postać $\bar{T}_{cz}(s) = \frac{T_{cz}}{s}$, a wzór na transmitancję upraszcza się do postaci

$$\frac{\bar{T}(s)}{T_{cz}} = \frac{1}{s(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}. \quad (13)$$

Po zapisaniu wzoru (12) w formie

$$\frac{\bar{T}(s)}{T_{cz}} = \frac{1}{s} + \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} \cdot \frac{1}{\left(s + \frac{1}{\tau_1}\right)} - \frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \cdot \frac{1}{\left(s + \frac{1}{\tau_2}\right)} \quad (14)$$

łatwo wyznaczyć temperaturę termometru w funkcji czasu

$$u(t) = \frac{T(t)}{T_{cz}} = 1 + \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) - \frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right). \quad (15)$$

W przypadku modelu pierwszego rzędu odpowiedź termometru na skok jednostkowy określona jest wzorem

$$u(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (16)$$

Temperaturę czynnika możemy wyznaczyć na podstawie zmierzonych przebiegów temperatury termometru $T(t)$ i znanych stałych czasowych τ_1 i τ_2 .

Temperaturę czynnika zmienną w czasie $T_{cz}(t)$ można wyznaczyć ze wzoru (1) lub ze wzoru (12) po uprzednim wyznaczeniu odpowiednio stałej czasowej τ lub stałych czasowych τ_1 i τ_2 . Przebieg temperatury $T(t)$, pierwszą i drugą pochodną po czasie z funkcji $T(t)$ można wygładzić za pomocą wzorów [3]:

$$T(t) = \frac{1}{693} \cdot [-63f(t-4 \cdot \Delta t) + 42f(t-3 \cdot \Delta t) + 117f(t-2 \cdot \Delta t) + 162f(t-\Delta t) + 177f(t) + 162f(t+\Delta t) + 117f(t+2 \cdot \Delta t) + 42f(t+3 \cdot \Delta t) - 63f(t+4 \cdot \Delta t)], \quad (17)$$

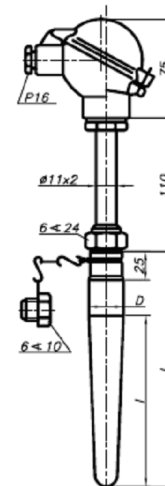
$$T'(t) = \frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{1188 \cdot \Delta t} \cdot [86f(t-4 \cdot \Delta t) - 142f(t-3 \cdot \Delta t) - 193f(t-2 \cdot \Delta t) - 126f(t-\Delta t) + 126f(t+\Delta t) + 193f(t+2 \cdot \Delta t) + 142f(t+3 \cdot \Delta t) - 86f(t+4 \cdot \Delta t)], \quad (18)$$

$$T''(t) = \frac{d^2 T(t)}{dt^2} = \frac{1}{462 \cdot (\Delta t)^2} \cdot [28f(t-4 \cdot \Delta t) + 7f(t-3 \cdot \Delta t) - 8f(t-2 \cdot \Delta t) - 17f(t-\Delta t) - 20f(t) - 17f(t+\Delta t) - 8f(t+2 \cdot \Delta t) + 7f(t+3 \cdot \Delta t) + 28f(t+4 \cdot \Delta t)], \quad (19)$$

aby przynajmniej częściowo wyeliminować wpływ przypadkowych błędów pomiaru temperatury termometru $T(t)$ na wyznaczaną temperaturę czynnika $T_{cz}(t)$. Symbol $f(t)$ we wzorach (17-19) oznacza temperaturę wskazywaną przez termometr, a Δt - krok czasowy.

4. Wyznaczanie temperatury czynnika na podstawie przebiegów temperatury termometru

Przeprowadzone zostały pomiary temperatury wody przy wymuszeniu skokowym za pomocą termoelementu płaszczykowego o średnicy 1,5 mm oraz termometru przemysłowego. Oba zastosowane czujniki temperatury są typu K (NiCr-NiAl). Termoelement płaszczykowy i termometr przemysłowy (rys. 2) o temperaturze otoczenia zanurzone zostały nagle we wrzącej wodzie.

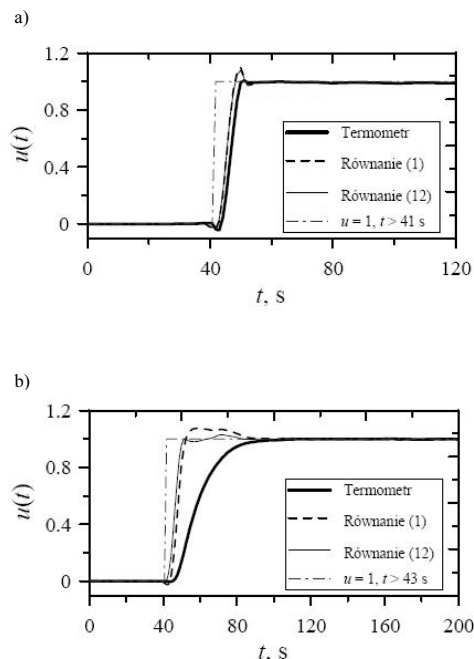


Rys. 2. Schemat czujnika temperatury i jego wymiary: $D = 18$ mm, $l = 65$ mm, $L = 140$ mm

Fig. 2. Industrial thermometer; $D = 18$ mm, $l = 65$ mm, $L = 140$ mm

Temperatura termometru rejestrowana była za pomocą układu akwizycji danych typu UPM 100 (klasa dokładności 0,1) firmy Hottinger-Baldwin Messtechnik. Zmierzony przebieg temperatury przybliżony został za pomocą funkcji (15) i (16). Stała czasowa τ we wzorze (16) oraz stałe czasowe τ_1 i τ_2 w funkcji (15) wyznaczone zostały za pomocą programu TableCurve 2D. Dla termoelementu płaszczykowego stałe czasowe wynoszą: $\tau = 1,53$ s, $\tau_1 = 0,52$ s, i $\tau_2 = 0,99$ s, natomiast dla termometru przemysłowego: $\tau = 14,07$ s, $\tau_1 = 3,00$ s i $\tau_2 = 10,90$ s.

Następnie wyznaczono przebiegi temperatury czynnika (rys. 3) wykorzystując równanie (1) w przypadku modelu pierwszego rzędu oraz równanie (12) w przypadku modelu drugiego rzędu. Krok czasowy Δt dla obu termoelementów wynosił 1,162 s.



Rys. 3. Zmiany temperatury termometru i temperatury czynnika wyznaczonej z równania I-go rzędu (1) oraz równania II-go rzędu (12):

a) termoelement płaszczowy; b) termometr przemysłowy
 Fig. 3. Sensor and water temperature determined when using the model of first (Eq. (1)) and second (Eq. (12)) order: a) sheath thermocouple; b) industrial thermometer

Z analizy wyników przedstawionych na rysunku 3 widać, że model drugiego rzędu daje dokładniejsze wyniki.

5. Wnioski

Obydwa przedstawione w pracy sposoby wyznaczania nieustalanej temperatury czynnika nadają się do zastosowań w trybie on-line dla dowolnych zmian temperatury czynnika w funkcji czasu, w niezmiennych warunkach wymiany ciepła oraz dobrej powtarzalności pomiarów. Po wyznaczeniu stałych czasowych termometrów w funkcji prędkości i temperatury przepływającego czynnika, zaproponowane sposoby można również zastosować przy zmiennej prędkości i temperaturze przepływającego czynnika, gdy stałe czasowe zmieniają się w czasie pomiaru.

Pierwszy sposób, w którym termometr modelowany jest za pomocą równania różniczkowego zwyczajnego pierwszego rzędu,

jest odpowiedni dla termometrów o bardzo małej bezwładności. W takich przypadkach opóźnienie wskazań termometru w stosunku do zmian temperatury czynnika jest niewielkie. W przypadku termometrów przemysłowych, przeznaczonych do pomiaru temperatury czynników o wysokim ciśnieniu, występuje duże opóźnienie czasowe wskazań termometru w stosunku do rzeczywistych zmian temperatury czynnika. Dla takich termometrów bardziej odpowiedni jest model drugiego rzędu umożliwiający modelowanie opóźnienia sygnału. Dużą stabilność i dokładność wyznaczania rzeczywistej temperatury czynnika na podstawie czasowych przebiegów temperatury wskazywanej przez termometr uzyskuje się dzięki zastosowaniu dziewięcio-punktowego filtra cyfrowego.

Porównano przebiegi temperatury czynnika wyznaczone za pomocą obydwu metod. Stwierdzono, że inercyjny model termometru drugiego rzędu zapewnia lepsze wyniki, szczególnie w przypadku termometrów przemysłowych o dużej bezwładności.

6. Literatura

- [1] L. Michalski, K. Eckersdorf, J. McGhee: Temperature Measurement. Wiley, Chichester, 1991.
- [2] S. Wiśniewski: Pomiary temperatury w badaniach silników i urządzeń cieplnych. WNT, Warszawa 1983.
- [3] J. Taler: Teoria i praktyka identyfikacji procesów przepływu ciepła. Zakład Narodowy imienia Ossolińskich, Wrocław 1995.
- [4] Z. Kabza, K. Kostyrko, S. Zator, A. Łobzowski, W. Szkolnikowski: Regulacja mikroklimatu pomieszczenia. Agenda Wydawnicza Pomiaru Automatyka Kontrola, Warszawa 2005.
- [5] D. J. Little et al.: Instrumentation, Controls & Testing. Modern Power Station Practice. Pergamon Press, Oxford 1991.
- [6] P. R. N. Childs: Practical Temperature Measurement. Butterworth-Heinemann, Oxford 2001.
- [7] P. C. Chau: Process control, A First Course with MATLAB. Cambridge University Press, Cambridge 2002.
- [8] O. A. Герашенко, А. Н. Гордов, В. И. Лях, Б. И. Стаднык, Н. А. Ярышев: Температурные измерения. Наукова Думка, Киев 1984.
- [9] W. Minkina, S. Gryś: Korekcja charakterystyk dynamicznych czujników termometrycznych – metody, układy, algorytmy. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.
- [10] W. Minkina, S. Chudzik: Pomiary parametrów cieplnych materiałów termoizolacyjnych – przyrządy i metody. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

**Zapraszamy do publikacji reklam
w miesięczniku naukowo-technicznym PAK**

**Redakcja czasopisma
POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, pok. 30b,
tel./fax: 032 237 19 45,
e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl**