

Mariusz WNEKPOLITECHNIKA ŚLĄSKA, KATEDRA METALURGII,
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice**Wykorzystanie ekwiwalentnej stałej czasowej w pomiarach szybkozmiennych temperatur w regeneratorze zintegrowanym z palnikiem gazowym**

Dr inż. Mariusz WNEK

Stypendysta Marie Curie Fellowship. Doktorat w 2005. Do roku 2009 adiunkt w Katedrze Energetyki Procesowej a obecnie w Katedrze Metalurgii. Obszar zainteresowań: metrologia przemysłowa i komputerowa, teoria sterowania, automatyka procesów przemysłowych i robotyka, nowoczesne elementy nastawcze, regeneratory ciepła, konstrukcje niskoemisyjnych urządzeń do spalania paliw, modelowanie w CFD, programowanie i wizualizacja procesów w LabVIEW.



e-mail: mariusz.wnek@polsl.pl

Streszczenie

Przedstawiono wyniki badań modelowania matematycznego dynamiki termoelektrycznych czujników płaszczowych. Omówiono wpływ parametrów konstrukcyjnych termoelementu na pomiar temperatury oraz dogodny model - łatwy do wykorzystania podczas pomiaru szybkozmiennych temperatury czynnika w celu korekty dynamicznego błędu przetwarzania. Zaprezentowano wykorzystanie ekwiwalentnej stałej czasowej przy doborze średnicy czujnika termoelektrycznego do pomiaru szybkozmiennych temperatur.

Słowa kluczowe: pomiar szybkozmiennych temperatur, czujniki termometryczne, regenerator, ekwiwalentna stała czasowa, palnik gazowy.

Use of equivalent time-constant for measurement of rapidly changing temperatures in the regenerator integrated with gas burner**Abstract**

Temperature is the one of the most important parameters which has to be controlled in industrial processes because of technology. The measurement problem of rapidly changing temperature of hot and cold fluids flowing alternately through the regenerator at short intervals is presented in the paper. The metallurgical, high temperature heating furnace with regenerative burners [1, 2, 4, 5, 6, 7] has been used as an example of the measurement problem appearance (Fig. 1). Periodicity of the system operation (Fig. 2) characterized by the interval shorter than 30 s is quite significant due to the dynamical converting error of sensors. The measurement and mathematical modelling results of dynamics of thermoelectric sensors are presented (Fig. 3). The influence of thermocouple construction parameters on temperature measurement is discussed. A convenient model for correcting the error of dynamic processing is described. This model is easy to use for rapidly changing medium temperature. The method presented for approximation of dynamic properties of thermometric sensors by inertia of the first order with the equivalent time-constant τ_E is of great practical importance (Fig. 5). This method provides an easy way to assess the impact of construction and thermophysical parameters of the sensor materials and the heat transfer coefficient, from fluid to a thermocouple, on the thermocouple dynamic properties. The use of the equivalent time-constant during the thermocouple diameter selection for measurement of rapidly changing temperature is presented. When minimizing the error of dynamic sensor processing.

Keywords: rapidly changing temperature measurement, thermometric sensors, regenerator, equivalent time-constant, gas burner.

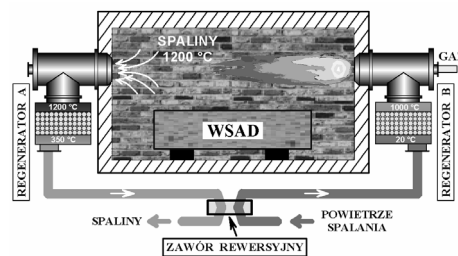
1. Wstęp

Obecnie w nowoczesnych piecach grzewczych stosuje się do opalania system wielopalnikowy, do którego dostarcza się podgrzane powietrze. Najefektywniejsze systemy grzania powietrza

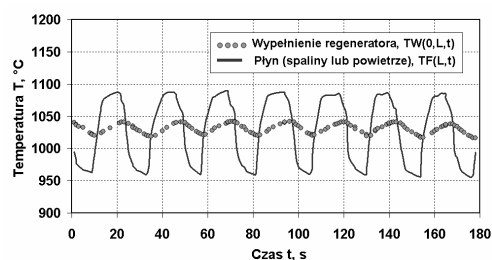
wykorzystują do tego celu regeneratory. Najnowocześniejsze systemy posiadają palniki, z którym każdy wyposażony jest w indywidualny regenerator [1, 2]. Jednym z rozwiązań jest podłączenie regeneratorów do palników a te z kolei połączone są w pary (rys. 1) i w takim układzie działają okresowo. Gdy jeden z nich spala paliwo, drugi w tym czasie zasysa spaliny, które przepływają przez regenerator powodując jego nagrzewanie. Po pewnym czasie, zwanym czasem dmuchu lub rewersji, działanie palników zmienia się. Palnik spalający paliwo zaczyna zasysać spaliny z komory pieca a palnik ssący do tej pory, zaczyna spalać paliwo. Powietrze, dostarczane do procesu spalania, przepływa przez jego regenerator i podgrzewa się. Działanie regeneratora charakteryzuje tzw. czas okresu regeneratora τ_{or} . Czas ten zdefiniowany jest jako suma czasu trwania fazy grzania τ_h i czasu fazy chłodzenia τ_c wypełnienia, przy czym na ogół $\tau_h = \tau_c$.

W nowoczesnych systemach palników regeneracyjnych występuje problem pomiaru temperatury zmieniającej się periodycznie z małym okresem dmuchu. Taki też problem wystąpił w trakcie badań [3] oraz podczas obecnego projektu badawczego. W ramach aktualnie prowadzonych badań nad prototypem kompaktowego regeneratora ciepła, będącego integralną częścią palnika, zakłada się skracanie czasu rewersji poniżej 10 s, podczas gdy, w obecnie stosowanych rozwiązaniach w przemyśle światowym, wartość tego czasu mieści się w zakresie 30 – 90 s [1, 2, 4, 5, 6]. W niewielu tylko przypadkach jest to wartość mniejsza od 30 s [7].

Na rys. 2 pokazano przykładowe przebiegi zmierzonej temperatury spalin, powietrza i wypełnienia regeneratora dla czasu dmuchu spalin-powietrze $\tau_h = \tau_c = 12$ s.



Rys. 1. Schemat pieca grzewczego z palnikami regeneracyjnymi połączonymi w pary
Fig. 1. Scheme of heating furnace with regenerative burners connected in pairs



Rys. 2. Charakterystyka regeneratora w stanie pseudoustalonym dla okresu $\tau_{or} = 2 \times 12$
Fig. 2. Regenerator characteristics in semi-steady state for period $\tau_{or} = 2 \times 12$

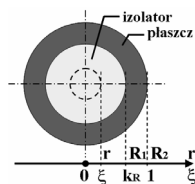
Czujniki termometryczne mają charakterystykę filtra dolno-przepustowego dla periodycznych zmian temperatury mierzonej [8, 9, 10]. Mierzona temperatura płynów jest mniejsza od wartości rzeczywistych. Aby tłumienie amplitudy temperatury mierzonej było minimalne należy do pomiaru dobrać czujnik tak, aby jego graniczna częstotliwość przetwarzania była większa od częstości

zmian temperatury mierzonej. W doborze czujnika dotyczącym wytypowania jego średnicy zastosowano sposób wykorzystujący ekwiwalentną stałą czasową [8, 9].

2. Właściwości dynamiczne czujników termometrycznych

Powszechnymi w termometrii są termoelektryczne czujniki płaszczone, których konstrukcję opracowano dla potrzeb inżynierii jądrowej ponad 60 lat temu. Są to czujniki małogabarytowe o średnicach płaszcza od 0,25 do 8 mm, w których przestrzeń między termoelektrodami a płaszczem wypełniona jest izolatorem wykonanym najczęściej z tlenku glinu (rys. 3) [10].

Do wyznaczenia właściwości dynamicznych zastosowano w pracach [8, 9] metodę analityczną, traktując czujnik jako nieskończenie długi walec dwuwarstwowy z symetrycznym polem temperaturowym. Model matematyczny czujnika opisano układem dwóch równań Fouriera-Kirchhoffa dla izolatora i płaszcza z odpowiednimi warunkami brzegowymi trzeciego i czwartego rodzaju oraz z zerowym warunkiem początkowym.



Rys. 3. Przekrój poprzeczny termoelektrycznego czujnika płaszczonego
Fig. 3. Cross-section of the shell thermoelectric sensor

Stosując do układu równań Fouriera-Kirchhoffa całkową transformację Laplace'a L otrzymano rozwiązanie problemu w postaci operatorowej:

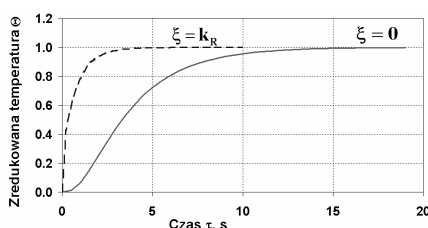
$$G(\xi, s) = \frac{\prod_{j=1}^m (\tau_{bj} s + 1)}{\prod_{i=1}^n (\tau_{ai} s + 1)} \Bigg|_{m, n \rightarrow \infty}, \quad (1)$$

gdzie: τ_{ai} , τ_{bj} – stałe czasowe mianownika i licznika transmitancji czujnika w sekundach, $G(\xi, s) = \frac{\Theta(\xi, s)}{\mathcal{A}(s)}$ – transmitancja operatorowa czujnika, $\Theta(\xi, s) = \frac{T(\xi, s)}{T_k(s)}$ – transformata zredukowanej

temp. spoiny, $\mathcal{A}(s) = \frac{T_{pl}(s)}{T_k(s)}$ – transformata zredukowanej temp. płynu, T – temperatura spoiny pomiarowej, °C, T_k – temperatura końcowa, °C, T_{pl} – temperatura płynu, °C, $\xi = \frac{r}{R_2}$ – zredukowany

promień walca, s – parametr całkowej transformacji Laplace'a, R_1 , R_2 – promienie izolatora i płaszcza, m.

Dla termoelementu typu K firmy Heraeus, w którym płaszczone wykonane z inconelu, a izolator z Al_2O_3 , pokazano na rys. 4 przebiegi czasowych charakterystyk odpowiedzi skokowych dla liczby Biota $Bi = 0,8$, co odpowiada współczynnikowi wnikania ciepła między mierzonym płynem a czujnikiem $\alpha = 3790 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.



Rys. 4. Czasowe charakterystyki termoelektrycznego czujnika płaszczonego dla sygnału skokowego i $\alpha = 3790 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Fig. 4. Impulse response of the shell thermoelectric sensor for $\alpha = 3790 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Pojawienie się stałych czasowych licznika $\tau_{bj} > 0$, w operatorowej transmitancji czujnika (1), skutkuje zaistnieniem członów mających charakter różniczkujący, które kompensują inercję, co powoduje poprawę właściwości dynamicznych czujnika. Ten przypadek jest typowy dla termoelementów płaszczonego, w których spoina pomiarowa nie jest położona centralnie ($\xi = 0$), lecz jest galwanicznie połączona z płaszczem ($\xi = k_R = R_1/R_2$), co zaprezentowano na rys. 4.

Stale czasowe τ_{ai} oraz τ_{bj} stanowią nieograniczone ciągi liczbowe szybko malejące do zera. Stąd więc w praktyce stosuje się aproksymację, polegającą na ograniczeniu liczby stałych czasowych, a więc rzędu transmitancji (1), maksymalnie do trzeciego $n \leq 3$, przy czym $m \leq n$. Stosowne sposoby [10, 11, 12] wyboru rzędu transmitancji wynikają najczęściej z obliczeń matematycznych.

3. Ekwiwalentna stała czasowa czujnika

Jednym ze sposobów aproksymacji charakterystyki rzeczywistej jest opis właściwości dynamicznych czujnika transmitancją elementu inercyjnego I rzędu z tzw. ekwiwalentną stałą czasową τ_E [8, 9], którą zdefiniowano jako zwykły moment pierwszego rzędu charakterystyki skokowej $\Theta(\tau, \xi) \in [0, 1]$, dla $\mathcal{A}(\tau) = 1(\tau)$ [12]:

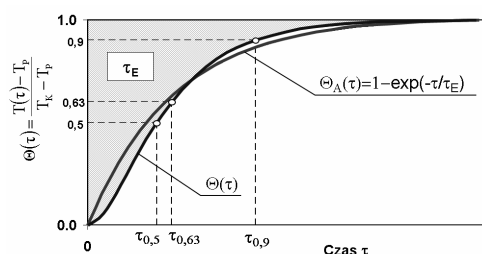
$$\tau_E = \int_0^{\infty} \tau \frac{\partial \Theta(\tau, \xi)}{\partial \tau} d\tau. \quad (2)$$

Z równania definicyjnego (2), przez zastosowanie całkowej transformacji L, uzyskano dwie równoważne, proste formuły do obliczania τ_E , przydatne w badaniach eksperymentalnych (3) oraz analitycznych (4):

$$\tau_E = \int_0^{\infty} [1 - \Theta(\tau, \xi)] d\tau, \quad (3)$$

$$\tau_E = -\lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{1}{G(s, \xi)} \frac{\partial G(s, \xi)}{\partial s} \right], \quad (4)$$

Z (3) wynika, że ekwiwalentna stała czasowa jest miarą pola powierzchni zawartej między asymptotą poziomą a charakterystyką czujnika dla sygnału skokowego (rys. 5). Jest więc proporcjonalna do przyrostu energii wewnętrznej czujnika w jego stanie nieustalonym. Stosowanie zatem stałej τ_E do aproksymacji właściwości dynamicznych czujnika zapewnia niezmiennosc przyrostu energii wewnętrznej w jego uproszczonym modelu dynamicznym.



Rys. 5. Charakterystyka termoelementu płaszczonego dla sygnału skokowego: $\Theta(\tau)$ - charakterystyka rzeczywista, $\Theta_A(\tau)$ - charakterystyka aproksymująca, $T(\tau)$ - temp. spoiny pomiarowej; T_p , T_k - temp. początkowa i końcowa spoiny pomiarowej, przy czym $T_p = 0$

Fig. 5. Impulse response of the shell thermoelectric sensor: $\Theta(\tau)$ - operating characteristics, $\Theta_A(\tau)$ - approximating characteristics, $T(\tau)$ - measuring junction temperature; T_p , T_k - initial and final temperature of measuring junction, where $T_p = 0$

Zależność (4) jest bardzo wygodna w badaniach analitycznych, gdy model dynamiki czujnika podany jest w postaci transmitancji operatorowej. Przy obliczaniu τ_E nie ma wówczas potrzeby stoso-

wania odwrotnej transformacji L^{-1} , co znacznie upraszcza rachunek. Stosując zależność (4) do transmitancji (1) otrzymano:

$$\tau_E(\alpha, D) = C_\alpha \frac{D}{\alpha} + C_\lambda D^2, \quad (5)$$

a współczynniki C_α w $J/(m^3K)$ i C_λ w s/m^2 są zdefiniowane:

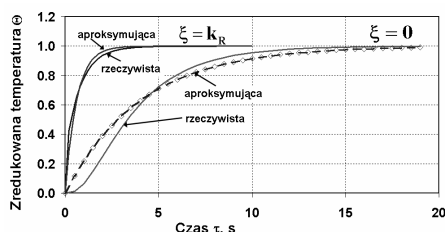
$$C_\alpha = \frac{\lambda_2}{4a_2} \left[1 - k_R^2 \left(1 - \frac{k_\lambda}{k_a^2} \right) \right], \quad (6)$$

$$C_\lambda = \frac{1}{16a_2} \left[\frac{k_R^2 - \xi^2}{k_a^2} + 1 - k_R^2 \left(1 - \frac{k_\lambda}{k_R^2} \right) \ln k_R \right], \quad (7)$$

gdzie: λ_2 - współczynnik przewodzenia ciepła płaszczu, $W/(mK)$; a_1, a_2 - dyfuzyjności cieplne izolatora oraz płaszczu, m^2/s ,

$k_a = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}$ - parametr.

W równaniu (5) występują dwa człony. Pierwszy określa wpływ warunków wymiany ciepła między czujnikiem i płynem mierzonym poprzez współczynnik wnikania ciepła α , a drugi wpływ oporu przewodzenia ciepła w czujniku na ekwiwalentną stałą czasową poprzez współczynnik przewodzenia ciepła λ . W literaturze dominują modele uwzględniające tylko człon pierwszy. Jest to podejście błędne, gdyż w każdym płaszczowym czujniku termometrycznym typu stykowego występuje przewodzenie ciepła. Na rys. 6 porównano przebiegi dokładnych charakterystyk, dla sygnału skokowego, otrzymanych z pomiarów dla termoelementu typu K, w którym płaszcz wykonany jest z inconelu, a izolator z Al_2O_3 oraz $Bi=0,783$, $R_2=3,1$ mm, $\lambda_2=15$ $W/(mK)$, $a_2=3,85 \cdot 10^{-6}$ m^2/s , $k_a=0,292$, $k_R=R_1/R_2=0,73$ i $k_\lambda=\lambda_1/\lambda_2=0,00164$ z charakterystykami aproksymującymi z ekwiwalentną stałą czasową $\tau_E=0,6$ s dla $\xi=k_R$ oraz $\tau_E=4,0$ s dla $\xi=0$.



Rys. 6. Porównanie charakterystyk skokowych i aproksymujących czujnika płaszczowego dla $\alpha=3790$ $W/(m^2K)$ i $\xi=0$ oraz $\xi=1$

Fig. 6. Comparison of impulse and approximating characteristics of the shell thermoelectric sensor for $\alpha=3790$ $W/(m^2K)$ and $\xi=0$ and $\xi=1$

4. Praktyczne wykorzystanie ekwiwalentnej stałej czasowej

Analityczne obliczenie współczynników C_α i C_λ z równań (6) i (7) dla dysponowanego czujnika może nastroić trudności, które wynikają z częstej nieznaności parametrów: ξ , a_1 i λ_1 .

W procesie wytwarzania termoelementów ξ może się zmieniać w przedziale od 0 do k_R . Natomiast parametry termofizyczne izolatora zależą od stopnia ubicia sproszkowanego tlenku glinu lub magnezu, który może być zmienny. Stąd więc do wyznaczenia równania (5) pomocna jest metoda eksperymentalna. Dla jednego czujnika ($D = idem$) wyznacza się dwie charakterystyki skokowe przy dwóch różnych współczynnikach wnikania ciepła $\alpha_1 \gg \alpha_2$, z których na podstawie zależności (3) wyznacza się wartości ekwiwalentnych stałych czasowych $\tau_E(\alpha_1)$ i $\tau_E(\alpha_2)$. Podstawiając wartości: ekwiwalentnych stałych czasowych oraz współczynników wnikania ciepła do równania (5) otrzymuje się

$$\tau_{E=idem}(\alpha) = \frac{\tau_E(\alpha_2) - \tau_E(\alpha_1) \left(\frac{\alpha_2}{\alpha} - 1 \right)}{1 - \frac{\alpha_2}{\alpha_1}} - \tau_E(\alpha_2). \quad (8)$$

Wartości stałych czasowych $\tau_E(\alpha_i)$, dla $i = 1, 2$ można również wyznaczyć, z dobrą dla celów inżynierskich dokładnością [8], na podstawie charakterystycznych czasów odpowiedzi skokowej τ_Θ ($\Theta = 0,5$ i $0,9$), jak na rys.5. Oszacowany błąd maksymalny aproksymacji charakterystyki rzeczywistej (dla sygnału skokowego) w stanie ustalonym przyjmowanym po czasie 3τ od zaistnienia wymuszenia wynosi ok. 3% dla czujników płaszczowych o średnicach w przedziale 0,5-8 mm ze spoiną pomiarową odizolowaną galwanicznie od płaszczu, a po czasie 4τ błąd przyjętej aproksymacji nie przekracza 2%.

Czasy charakterystyczne $\tau_{0,5}$ i $\tau_{0,9}$ podawane są w katalogach producentów czujników termometrycznych najczęściej dla dwóch różnych współczynników wnikania ciepła (badania w wodzie - α_1 i w powietrzu - α_2). Sposób obliczenia τ_E jest zależny od stosunku czasów charakterystycznych $\beta = \tau_{0,9}/\tau_{0,5}$ dla $\alpha = idem$ [9]:

- dla $\beta = 3,322$ (czujnik ma właściwości elementu o inercji pierwszego rzędu)

$$\tau_E = 1,443 \tau_{0,5}, \quad (9)$$

- dla $\beta < 3,322$ (czujnik ma właściwości elementu o inercji wyższego rzędu)

$$\tau_E \cong (0,809 + 0,191\beta) \tau_{0,5}, \quad (10)$$

- dla $\beta > 3,322$ (czujnik ma właściwości elementu proporcjonalno-różniczkującego z inercją)

$$\tau_E \cong 0,311(\beta - 1) \exp\left(\frac{1,609}{\beta - 1}\right) \tau_{0,5}. \quad (11)$$

Przy doborze średnicy czujnika termometrycznego do pomiaru temperatury zmieniającej się periodycznie obowiązuje zasada [11], aby graniczna częstotliwość przetwarzania czujnika ω_{gr} nie była mniejsza od częstotliwości zmian temperatury mierzonej

$$\omega_{gr} = \frac{1}{\tau_E} \geq \omega. \quad (12)$$

Po uwzględnieniu (5) zależność (12) przyjmie postać

$$C_\alpha \frac{D}{\alpha} + C_\lambda D^2 \leq \frac{1}{\omega}, \quad (13)$$

gdzie współczynniki C_α w $J/(m^3K)$ i C_λ w s/m^2 są zdefiniowane:

$$C_\alpha = \frac{\tau_E(\alpha_1) - \tau_E(\alpha_2)}{D \left(\frac{1}{\alpha_1} - \frac{1}{\alpha_2} \right)}, \quad (14)$$

$$C_\lambda = \frac{1}{D^2} \frac{\tau_E - \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}{1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}. \quad (15)$$

5. Wnioski

Przedstawiona w pracy metoda aproksymacji właściwości dynamicznych płaszczowych czujników termometrycznych inercją pierwszego rzędu z ekwiwalentną stałą czasową ma duże znaczenie praktyczne – jest prosta i szybka a oszacowany błąd maksy-

malny aproksymacji charakterystyki rzeczywistej po czasie 3τ wynosi ok. 3%, a po czasie 4τ nie przekracza 2% dla czujników płaszczowych o średnicach w przedziale 0,5-8 mm ze spoiną pomiarową odizolowaną galwanicznie od płaszcza. W badaniach analitycznych, zaprezentowana metoda, pozwala w prosty sposób ocenić wpływ parametrów konstrukcyjnych i termofizycznych materiałów czujnika oraz współczynnika wnikania ciepła, od płynu do termoelementu, na jego właściwości dynamiczne. Zależność (13) określa prosty sposób doboru średnicy czujnika do pomiarów szybkozmiennej temperatury, który wykorzystano w prowadzonych obecnie badaniach prototypu regeneratora do palników dla metalurgicznych pieców wysokotemperaturowych, minimalizując dynamiczny błąd przetwarzania czujników.

Uwaga końcowa: w pracy wykorzystano wyniki badań projektu N R07 0006 06 (2009-2011) wspierane przez NCBR.

6. Literatura

- [1] Weber R., Verlaan A.L., Orsino S., Lallemand N.: On emerging furnace design methodology that provides substantial energy savings and drastic reduction in CO₂, CO and NOX emission. The 2-nd Int. Seminar on High Temperature Combustion. Stockholm, Sweden, 2000.
- [2] Milani A., Wüning J.G.: Flamless Technology for High Temperature Furnaces. Challenges In Reheating Furnaces, 28-29 October 2002. London, UK, 2002.
- [3] Wnęk M.: Badania regeneratora ciepła zintegrowanego z palnikiem gazowym dla wysokotemperaturowych pieców grzewczych. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Katowice, 2005.
- [4] Shibata H., Shimizu Y., Yamagami S.: Development of a self-regenerative burner for non-ferrous metal melting pot furnaces. 23rd World Gas Conference, Amsterdam 2006.
- [5] Manatura K., Tangtrakul M.: A Study of Specific Energy Consumption in Reheating Furnace Using Regenerative Burners Combined with Recuperator. Silpakorn U Science & Tech J Vol.4(2), 2010.
- [6] Jöhr T., Domagala J.: Regenerativ-Brennersysteme für Chargenöfen in der Stahlindustrie. Gaswärme International, 58, 2008.
- [7] Kühn F.: Positive Energiebilanz und niedrige CO₂-Emissionswerte durch innovative Drehherdofentechnologie. Gaswärme International, 58, 2008.
- [8] Puszer A.: Właściwości dynamiczne termoelektrycznych czujników płaszczowych. Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja 12, 1991.
- [9] Puszer A.: Sposób obliczania charakterystycznych czasów odpowiedzi skokowej termoelementów płaszczowych. Pomiary Automatyka Kontrola 7-8, 1989.
- [10] Michalski L., Eckersdorf K.: Pomiary temperatur. WNT, W-wa, 1986.
- [11] Hofmann D.: Dynamische Temperaturmessung. VEB Verlag Technik, Berlin 1976.
- [12] Puszer A.: Zastępcza stała czasowa procesów dyfuzyjnych w walcu o skończonej wysokości. Zesz. Nauk. Pol. Śl., Energetyka 80, 1989.

otrzymano / received: 24.07.2011

przyjęto do druku / accepted: 02.04.2012

artykuł recenzowany / revised paper

INFORMACJE

Regionalne Seminary / Szkolenia dla Służb Utrzymania Ruchu

www.energoelektronika.pl
WORTAL BRANŻOWY

18.04.2012 – Katowice
16.05.2012 – Olsztyn
20.06.2012 – Kielce
03.10.2012 – Szczecin
24.10.2012 – Katowice
05.12.2012 – Poznań

Jeżeli jesteś zainteresowany uczestnictwem w Seminarium, zaprezentowaniem produktu lub nowego rozwiązania napisz do nas: marketing@energoelektronika.pl
 Energoelektronika.pl tel. (+48) 22 70 35 291

Ilość miejsc ograniczona

Partnerzy: