

**JACEK KUCHARSKI, DOMINIK SANKOWSKI**

Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki  
Politechniki Łódzkiej

## **KOMPUTEROWE METODY IDENTYFIKACJI OBIEKTÓW ELEKTROTERMICZNYCH**

Recenzent: **dr hab. inż. Marek Orzyłowski**

Maszynopis dostarczono: 1. 10. 2010

*W artykule przedstawiono zakres badań prowadzonych w Katedrze Informatyki Stosowanej w obszarze metod i algorytmów identyfikacji obiektów cieplnych. Omówiono historię i główne kierunki tych badań oraz dotychczasowe osiągnięcia. Wskazano również aktualne trendy rozwojowe w tej dziedzinie, w tym wykorzystywanie nowoczesnych technik informatycznych. Zaprezentowano także wybrane metody komputerowej identyfikacji rezystancyjnych pieców komorowych, pozwalające na uwzględnienie rozłożonego charakteru parametrów tego typu obiektów elektrotermicznych.*

### **1. BADANIA W ZAKRESIE IDENTYFIKACJI OBIEKTÓW ELEKTROTERMICZNYCH PROWADZONE W KATEDRZE INFORMATYKI STOSOWANEJ – GENEZA I FAZY ROZWOJU**

Intensywny rozwój i coraz szersza dostępność komputerowych systemów gromadzenia i przetwarzania danych, jaki miał miejsce w Polsce od lat osiemdziesiątych XX wieku sprawił, że w wielu dziedzinach zintensyfikowano prace nad wykorzystaniem tego typu infrastruktury dla potrzeb usprawnienia różnych procesów technologicznych. Dotyczyło to także jednego z ważnych obszarów wielu gałęzi przemysłu – procesów cieplnych wykorzystujących obiekty i technologie elektrotermiczne.

Szereg prac w zakresie nowoczesnych metod identyfikacji obiektów elektrotermicznych prowadzonych było najpierw w Katedrze Elektrotermii PŁ, a od roku 1995 w Katedrze Informatyki Stosowanej. Prace te dotyczyły w szczególności komputerowych metod identyfikacji dedykowanych dla systemów sterowania obiektami elektrotermicznymi i regulacji temperatury w warunkach wysokich wymagań technologicznych. Oprócz zastosowań w przemyśle metalurgicznym czy ceramicznym, tego typu precyzyjne metody regulacji temperatury wykorzystywane były między innymi przy produkcji półprzewodników realizowanej w Przemysłowym Instytucie Elektroniki w Warszawie, z którym zespół prof. D. Sankowskiego ściśle współpracował.

Ważnym nurtem tych badań były prace nad wykorzystaniem w procesie identyfikacji sygnałów testowych o szczególnych własnościach widmowych. Należą do nich pseudolosowe ciągi binarne (ang. Pseudo Random Binary Sequences - PRBS) oraz wieloczęstotliwościowe sygnały binarne (ang. Multifrequency Binary Signals – MBS) [1]. Opracowano rodzinę efektywnych metod umożliwiających wyznaczenie własności dynamicznych obiektów elektrotermicznych, przy czym specyficzne cechy ww. sygnałów testowych pozwalają na przeprowadzenie eksperymentu identyfikacyjnego w stosunkowo krótkim czasie przy nieznacznym zakłóceniu procesu technologicznego. Szereg rozwiązań w tym zakresie powstało w ramach współpracy z ośrodkami zagranicznymi: między innymi z uniwersytetem Strathclyde w Glasgow oraz z University of Warwick w Coventry. Owocem tych prac były liczne publikacje naukowe, w tym między innymi rozdział w książce wydanej przez Prentice Hall [2] i wiele innych [3,4,5,6]. Ważnym osiągnięciem zespołu była też realizacja rozpraw doktorskich, w których twórczo rozwinięto powyższe metody, stosując identyfikację z wykorzystaniem sygnałów MBS realizowaną w trybie *on-line* w strukturze adaptacyjnego regulatora temperatury [7] oraz dodatkowo w trybie *in-situ* dla potrzeb wyznaczania własności dynamicznych czujników temperatury w miejscu ich zainstalowania [8]. Ponadto opracowany adaptacyjny regulator temperatury stał się przedmiotem patentu [9]. Warto zauważyć, że rozprawy habilitacyjne pracowników Katedry [10,11] dotyczą w dużej mierze powyższej tematyki.

Aktualne prace prowadzone w Katedrze Informatyki Stosowanej w zakresie komputerowych metod identyfikacji i modelowania obiektów elektrotermicznych dotyczą między innymi ciepłych obiektów wielowymiarowych [12], sterowania optymalnego temperatury [13] oraz wykorzystania w tych zagadnieniach metod inteligencji obliczeniowej [14,15]. W dalszej części artykułu przedstawiono przykładowe metody identyfikacji rezystancyjnych pieców komorowych bazujące na analizie sygnałów dyskretnych przetwarzanych w komputerowym systemie pomiarowo-sterującym. W szczególności zaprezentowano metody umożliwiające uwzględnienie wpływu rozłożonych parametrów rzeczywistych

urządzeń na ich właściwości dynamiczne, z zachowaniem prostej struktury modelu.

## 2. PIEC KOMOROWY JAKO OBIEKT DYNAMICZNY – WYBRANE ASPEKTY

Złożony charakter obiektów cieplnych, takich jak rezystancyjne piece komorowe oraz rosnące wymagania technologiczne sprawiają, że komputerowe techniki identyfikacyjne mogą się w znacznym stopniu przyczynić do poprawy jakości procesów cieplnych, np. umożliwiając podejmowanie właściwych decyzji sterujących. Opis formalny takich obiektów, będących w istocie nieliniowymi układami o parametrach rozłożonych, wymaga stosowania nieliniowych równań różniczkowych cząstkowych (np.[16]), co w praktyce sprowadza się często do opisu przenikania ciepła przez zastępczą, płaską warstwę izolacyjną [17], w jednowymiarowym układzie przestrzennym:

$$\frac{d\vartheta(t,x)}{dt} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 \vartheta(t,x)}{\partial x^2} \quad (1)$$

gdzie:  $\vartheta$  - temperatura,  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c$ : przewodność cieplna właściwa, gęstość i ciepło właściwe materiału izolacyjnego.

W projektowaniu układów regulacji temperatury obiektów elektrotermicznych częściej wykorzystuje się uniwersalne modele parametryczne, wśród których ważną pozycję zajmuje model inercyjny I-go rzędu z czasem opóźnienia, wyrażony transmitancją:

$$G(s) = \frac{\vartheta(s)}{P(s)} = \frac{K}{1+sN} e^{-sL} \quad (2)$$

gdzie:  $\vartheta(s)$ ,  $P(s)$  – transformaty temperatury i mocy grzejnej,  $K$ ,  $N$ ,  $L$  – wzmacnienie, stała czasowa i opóźnienie obiektu.

Model (2) uznany jest za rozsądny kompromis pomiędzy złożonością i adekwatnością opisu [17], jednak często wskazuje się na rozbieżności rzeczywistych przebiegów temperatury w porównaniu z przebiegami wynikającymi z tego modelu [18,19]. Wykorzystanie komputerowych technik obliczeniowych otwiera możliwość dokładniejszego modelowania własności obiektów za pomocą prostych strukturalnie modeli parametrycznych typu (2). Cechą wspólną takich metod jest wykorzystywanie dyskretnych postaci sygnałów pomiarowych jak i sterujących, tj. operowanie na ciągach zbiorów liczb postaci:  $\{t_i, \vartheta_i, P_i\}$   $i=1,2,3\dots$ , gdzie  $i$  – numer chwili czasowej  $t_i=i\Delta$ ,

$\Delta$  – okres próbkowania komputerowego systemu pomiarowo sterującego. Takie dane liczbowe stanowią cenne źródło informacji o stanie obiektu, przez co mogą być efektywnie wykorzystane w komputerowych procedurach identyfikacyjnych.

### 3. WYBRANE METODY IDENTYFIKACJI REZYSTANCYJNYCH PIECÓW KOMOROWYCH

#### 3.1. Lokalna aproksymacja modelem inercyjnym I-go rzędu

Stosunkowo ogólnym sposobem bieżącej oceny wartości parametrów dynamicznych obiektu elektrotermicznego jest aproksymacja fragmentów jego odpowiedzi zgodnie z równaniem (2) (przy  $L=0$ ), wyrażonym w sposób dyskretny jako:

$$\vartheta_k^{(m)} = w_k \theta \quad (3)$$

gdzie:  $k=0,1,\dots$  - numer kroku czasowego,  $\theta = \left[ \frac{K\Delta}{N+\Delta}, \frac{N}{N+\Delta} \right]^T$  - wektor parametrów modelu,  $w_k = [P_k, \vartheta_{k-1}]$  - wektor wejściowy modelu.

Dysponując zbiorem par wartości  $\{\vartheta_i, P_i\}_r$ ,  $i=r \dots r+n$ , można wyznaczyć wektor parametrów modelu  $\theta_r$  zapewniający najlepsze odwzorowanie modelem (3) rzeczywistych sygnałów w  $r$ -tym przedziale czasu. Przyjmując następujące oznaczenia:

$$Y_r = \begin{bmatrix} \vartheta_{r+1} \\ \vartheta_{r+2} \\ \vdots \\ \vartheta_{r+n} \end{bmatrix}; \quad W_r = \begin{bmatrix} P_{r+1} & \vartheta_r \\ P_{r+2} & \vartheta_{r+1} \\ \vdots & \vdots \\ P_{r+m} & \vartheta_{r+n-1} \end{bmatrix}; \quad E_r = \begin{bmatrix} e_r \\ e_{r+1} \\ \vdots \\ e_{r+n-1} \end{bmatrix}; \quad e_i = \vartheta_i - \vartheta_i^{(m)}$$

zadanie to można rozwiązać jako problem optymalizacji w sensie najmniejszej sumy kwadratów błędów:

$$\theta_r = \arg \min_{\theta} (E_r^T E_r) = (W_r^T W_r)^{-1} W_r^T Y_r \quad (4)$$

Obliczenia w równaniu (4) łatwo wykonać (również w trybie *on-line*) wykorzystując współczesne pakiety obliczeniowe (np. MATLAB), uzyskując zastępcze wartości wzmocnienia  $K_r$  i stałej czasowej  $N_r$  obiektu w  $r$ -tym

przedziale czasowym, które przy odpowiednio małej wartości parametru  $n$  można traktować jako chwilowe wartości parametrów dynamicznych obiektu.

### 3.2. Algorytm trzech punktów

Inną metodą wyznaczania chwilowych wartości parametrów modelu (2) jest algorytm bazujący na trzech wybranych punktach odpowiedzi skokowej obiektu. Odpowiedź modelu (2) (przy  $L=0$ ) na wymuszenie skokowe  $\Delta P$  opisana jest równaniem:

$$\vartheta(t) = K \cdot \Delta P (1 - e^{-t/N}) \quad (5)$$

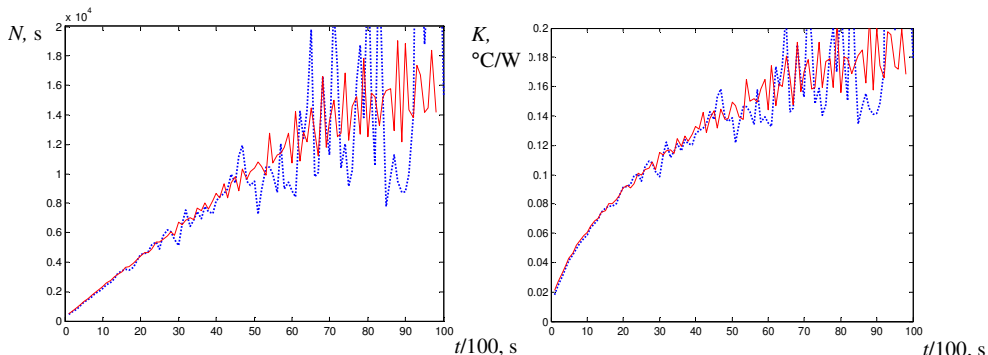
Wybierając trzy równoodległe punkty z dyskretnej reprezentacji odpowiedzi skokowej obiektu takie, że:  $\vartheta_{i-n} = \vartheta(t_i - n\Delta)$ ,  $\vartheta_i = \vartheta(t_i)$ ,  $\vartheta_{i+n} = \vartheta(t_i + n\Delta)$  można na podstawie (5) zapisać dwa równania postaci:

$$\begin{aligned} \vartheta_{i+n} - \vartheta_i &= K \cdot \Delta P e^{-t_i/N} (1 - e^{-n\Delta/N}) \\ \vartheta_{i-n} - \vartheta_i &= K \cdot \Delta P e^{-t_i/N} (1 - e^{n\Delta/N}) \end{aligned} \quad (6)$$

Rozwiązując układ równań (6) można wyznaczyć chwilową wartość stałej czasowej  $N_i$  i wzmacnienia  $K_i$  w  $i$ -tym kroku próbkowania jako:

$$N_i = \frac{n\Delta}{\ln \frac{\vartheta_i - \vartheta_{i-n}}{\vartheta_{i+n} - \vartheta_i}} \quad (7a)$$

$$K_i = \frac{1}{\Delta P} \left( \vartheta_i + N_i \left. \frac{d\vartheta}{dt} \right|_{t=t_i} \right) \quad (7b)$$

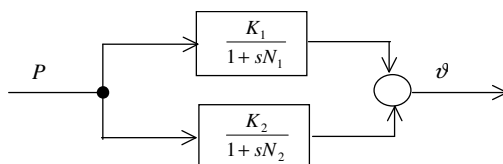


Rys. 1. Chwilowe wartości stałej czasowej  $N$  i wzmacnienia  $K$  modelu (2) w trakcie odpowiedzi skokowej obiektu (lokalna aproksymacja – l. przerywana, algorytm trzech punktów – l. ciągła)

Dla ilustracji obu powyższych metod przeprowadzono obliczenia wykorzystując odpowiedź skokową uzyskaną z modelu (1) (grubość ściany 10 cm,  $\lambda=1$  W/mK,  $\rho c=2,3 \cdot 10^6$  J/m<sup>3</sup>K) z dodanym niewielkim sygnałem losowym reprezentującym naturalne zakłócenia pomiarowe. Uzyskane na podstawie (4) oraz (7a) i (7b) chwilowe wartości parametrów dynamicznych  $N$  i  $K$  przedstawiono na rysunku 1. Warto zauważyć, że stała czasowa pieca zmienia się wraz ze zmianą stopnia nasycenia cieplnego wymurowania, a uwzględnienie tych zmian w modelu daje szansę dokładniejszego odwzorowania rzeczywistych przebiegów. Jednak wobec znacznej zmienności stałej czasowej istnieje potrzeba zachowania rozsądnego kompromisu pomiędzy złożonością opisu a jego użytecznością.

### 3.3. Modelowanie pieca dwoma członami inercyjnymi

Uwzględnienie dominujących wartości parametrów dynamicznych obiektu w różnych fazach procesu technologicznego pozwala ograniczyć jego opis np. do dwóch członów inercyjnych (rys.2) o niezmiennych stałych czasowych  $N_1$  i  $N_2$  ( $N_1 > N_2$ ), odpowiadających dwóm skrajnym stanom nasycenia cieplnego obiektu [3].



Rys. 2. Schemat blokowy dwuinercyjnego modelu obiektu elektrotermicznego

Identyfikacja modelu przedstawionego na rys. 2 na podstawie odpowiedzi skokowej obiektu cieplnego polega na znalezieniu parametrów równania:

$$\vartheta(t) = K \cdot \Delta P (1 - K_1 e^{-t/N_1} - K_2 e^{-t/N_2}) \quad (8)$$

w którym  $K_1 + K_2 = 1$ . Dla  $t \gg 5N_2$  zależność (8) można przybliżyć jako:

$$\vartheta(t) \approx K \cdot \Delta P (1 - K_1 e^{-t/N_1}) \quad (9)$$

Przyjmując, że znana jest wartość  $K$  (np. na podstawie charakterystyki statycznej obiektu) oraz dysponując ciągiem próbek odpowiedzi skokowej w postaci par  $\{t_i, \vartheta_i\}$  można utworzyć ciąg różnic  $\Delta \vartheta_i = K \cdot \Delta P - \vartheta_i$ . Z kolei ciąg ten dla  $t \gg 5N_2$  można na podstawie (9) przybliżyć zależnością:

$$\Delta \vartheta_i = K \cdot \Delta P \cdot K_1 e^{-t_i/N_1} \quad (10)$$

Biorąc dwie dowolne pary liczb z końcowego odcinka odpowiedzi skokowej (tj dla  $t \gg 5N_2$ ):  $\{t_k, \Delta\vartheta_k\}$  i  $\{t_{k+n}, \Delta\vartheta_{k+n}\}$  na podstawie (10) można wykazać, że:

$$N_1 = n \cdot \Delta \cdot \left( \ln \frac{\Delta\vartheta_k}{\Delta\vartheta_{k+n}} \right)^{-1} \quad (11)$$

Zgodnie z wcześniejszymi założeniami wzmocnienia  $K_1$  i  $K_2$  oblicza się jako:

$$K_1 = \frac{\Delta\vartheta_k}{K \cdot \Delta P} e^{t_k/N_1}; \quad K_2 = 1 - K_1.$$

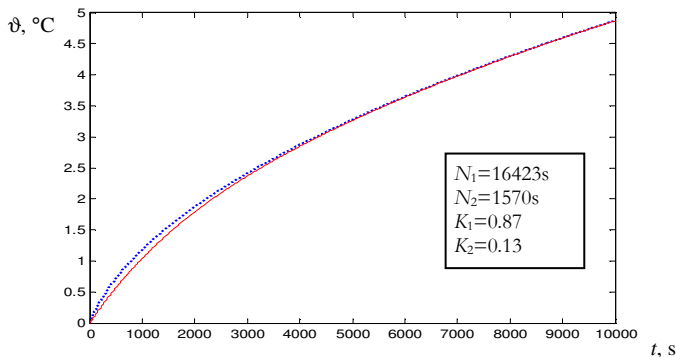
W celu wyznaczenia ostatniego z parametrów równania (8) – mniejszej („szybkiej”) stałej czasowej  $N_2$  należy utworzyć ciąg różnic drugiego rzędu postaci:  $\Delta_2\vartheta_i = \Delta\vartheta_i - K \cdot \Delta P \cdot K_1 e^{-t_i/N_1}$ , który dla  $t \gg 5N_2$  podobnie jak poprzednio na podstawie (9) przybliża się zależnością:

$$\Delta_2\vartheta_i = K \cdot \Delta P \cdot K_2 e^{-t_i/N_2} \quad (12)$$

Zależność (12) zapisana dla dwóch wartości różnicy  $\Delta_2\vartheta_i$ :  $\{t_k, \Delta_2\vartheta_k\}$  i  $\{t_{k+n}, \Delta_2\vartheta_{k+n}\}$  pozwala uzyskać wyrażenie określające stałą czasową  $N_2$ :

$$N_2 = n \cdot \Delta \cdot \left( \ln \frac{\Delta_2\vartheta_k}{\Delta_2\vartheta_{k+n}} \right)^{-1} \quad (13)$$

Dla odpowiedzi skokowej modelu (1) wyznaczono parametry modelu z rysunku 2 i porównano odpowiedzi skokowe obu modeli (rys.3).



Rys. 3. Odpowiedź skokowa modelu (1) (l. przerywana) i modelu dwuinercyjnego (l. ciągła)

#### 4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono problematykę identyfikacji własności dynamicznych obiektów elektrotermicznych, która jest jednym z obszarów działalności naukowej Katedry Informatyki Stosowanej od początku jej istnienia. Zaprezentowano główne nurty tej aktywności, również w kontekście historycznym oraz wskazano aktualne prace i trendy rozwojowe w tej dziedzinie. Jako przykład omówiono opracowane metody identyfikacji rezystancyjnych pieców przeznaczone do wykorzystania w komputerowych systemach pomiarowo-sterujących. Algorytmy wyznaczania chwilowych wartości parametrów członu inercyjnego I-go rzędu umożliwiają śledzenie zmian dynamiki obiektu w jego różnych fazach cieplnych. Rysunek 1 pokazuje, że obie przedstawione metody umożliwiają uzyskanie podobnych wyników, przy czym algorytm trzech punktów jest bardziej odporny na wpływ zakłóceń pomiarowych. Z kolei algorytm identyfikacji dominujących stałych czasowych ujętych w formie modelu dwuinercyjnego daje możliwość dokładniejszego odwzorowania dynamiki obiektu, przy zachowaniu stosunkowo prostej struktury modelu.

#### LITERATURA

- [1] **Sankowski D.** (1989): Wykorzystanie Wieloczęstotliwościowych Sygnałów Binarnych (MBS) do identyfikacji on-line rezystancyjnych urządzeń grzejnych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej*, Nr 569, Łódź.
- [2] **Sankowski D., McGhee J., Henderson I., Kucharski J., Urbanek P.** (1993): Application of multifrequency binary signals for identification of electric resistance furnace. Chapt.8 of the book *Perturbation signals for system identification*, ed. Godfrey, K., Prentice Hall, University Press, Cambridge, UK.
- [3] **Łobodziński W., Sankowski D., Kucharski J.** (1995): Start-up identification of electric resistance furnaces. *Elektrowärme International*, 53/1995.
- [4] **Sankowski D., Michalski L., Eckersdorf K., Kucharski J.** (1995): The use of MBS test signals for determination of thermocouple sensor dynamics. *IEEE Instrumentation/ Measurement Technology Conf.*, Waltham, USA, 619-623.
- [5] **Sankowski D., Kucharski J., Łobodziński W.** (1997): Autotuning temperature control using identification by multifrequency sequences. *IEE Proc.-Control Theory and Appl.*, **144** (3), 233-240
- [6] **Kucharski J., Łobodziński W., Sankowski D.** (2008): Komputerowe metody identyfikacji obiektów elektrotermicznych. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2008, rocznik 84, nr 7, s. 73-76.
- [7] **Kucharski J.** (1993): *Adaptacyjna regulacja temperatury wybranych urządzeń elektrotermicznych*. Praca doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź.



- [8] **Jackowska-Strumiłło L.** (1994): *Identyfikacja własności dynamicznych rezystancyjnych czujników temperatury za pomocą Wieloczęstotliwościowych Sygnałów Binarnych*. Praca doktorska. Politechnika Łódzka, Łódź.
- [9] **Sankowski D., Łobodziński W., Kucharski J.** (1998): *Elektroniczny układ regulacji temperatury*. Patent P – 3031941.
- [10] **Kucharski J.** (2003): *Wykorzystanie logiki rozmytej i informacji niedoskonałych w pomiarach i regulacji temperatury rezystancyjnych urządzeń elektrotermicznych*. Rozprawa habilitacyjna, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej Nr 923, Rozprawy Naukowe z. 324, Łódź 2003.
- [11] **Jackowska-Strumiłło L.** (2009): *Modelowanie i korekcja wybranych systemów nieliniowych z zastosowaniem metod analitycznych i aproksymatorów neuronowych*. Rozprawa habilitacyjna, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Nr 1043, Rozprawy Naukowe, z. 380, Łódź 2009.
- [12] **Urbanek P., Kucharski J., Frączyk A.** (2008): Methods of determination of dynamic properties of induction heated multi input - multi output system. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2008, rocznik 84, nr 11, s. 180-183.
- [13] **Frączyk A., Kucharski J., Urbanek P.** (2008): *Optymalna regulacja temperatury wirujących stalowych walców nagrzewanych indukcyjnie*. XII Conference Computer Applications in Electrical Engineering. Poznań 2008.
- [14] **Jackowska-Strumiłło L.** (2004): *ANN based modelling and correction in dynamic temperature measurements*, w Rutkowski, L., Siekman, J., Tadeusiewicz R., Zadeh, L., (Eds) *Artificial Intelligence and Soft Computing – ICAISC 2004*, Springer – Verlag, Berlin Heidelberg, ss. 1124-1129.
- [15] **Kucharski J.** (2008): Fuzzy modelling of chosen electroheat systems. *Przegląd Elektrotechniczny* 2008, rocznik 84, nr 11, s. 189-192.
- [16] **Jakob M.** (1958): *Heat transfer*. John Wiley & Sons, NY.
- [17] **Michalski L., Kuźmiński K., Sadowski J.** (1981): *Regulacja temperatury urządzeń elektrotermicznych*. WNT, Warszawa.
- [18] **Łobodziński W.** (1987): Wybrane zagadnienia estymacji parametrów uproszczonego modelu matematycznego pieców oporowych komorowych jako obiektów regulacji temperatury. *Prace PIE*, Cz1. z.103/ 1987; cz. 2 z.106 /1988, Warszawa.
- [19] **Orzyłowski M., Łobodziński W., Sankowski D.** (2001): Identyfikacja obiektów cieplnych metodami czasowymi i częstotliwościowymi dla celów regulacji. *Pomiary Automatyka Kontrola* Cz.1: 3/2001, ss.12-14; cz. 2: 4/2001, ss.14-17.

# **COMPUTER-BASED IDENTIFICATION OF ELECTROHEAT PLANTS**

## **Summary**

In the paper identification and modeling of electroheat plants as one of research area of Computer Engineering Department have been presented. Historical review as well as current trends and goals of the field have been discussed. Exemplary new techniques of identification of chamber electric furnaces have been proposed. The methods focus on distributed parameters on real plants.

Politechnika Łódzka  
Katedra Informatyki Stosowanej