

**JACEK KUCHARSKI, ANDRZEJ FRĄCZYK, PIOTR URBANEK**  
**Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej**

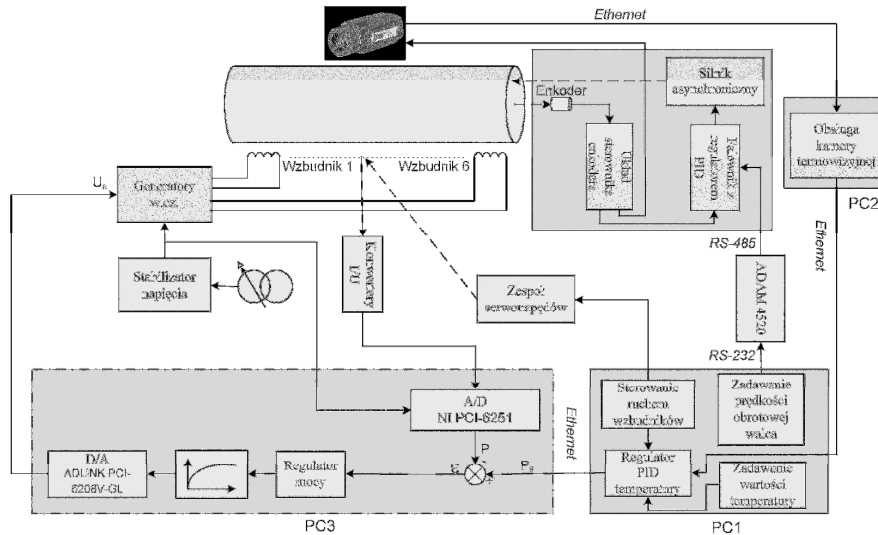
## **REGULACJA PI TEMPERATURY W UKŁADZIE NAGRZEWANIA INDUKCYJNEGO Z RUCHOMYMI WZBUDNIKAMI**

*W artykule przedstawiono możliwość regulacji PI temperatury powierzchni nagrzewanego indukcyjnie ruchomymi wzbudnikami obracającego się walca stalowego. Na bazie doświadczeń symulacyjnych wykonanych z użyciem modelu numerycznego obiektu dokonano identyfikacji jego właściwości dynamicznych, syntezy układu regulacji oraz regulacji temperatury powierzchni.*

### **WPROWADZENIE**

Wśród wielu obszarów zastosowań nagrzewania indukcyjnego ważne miejsce zajmuje nagrzewanie wsadów będących w ruchu, gdzie szczególnym przypadkiem jest nagrzewanie obracającego się walca stalowego. Wiele zalet tego typu nagrzewania sprawia, że jest ono chętnie wykorzystywane między innymi w przemyśle papierniczym czy tekstylnym. Jednocześnie, wysokie wymagania technologiczne dotyczące rozkładu temperatury na powierzchni walca powodują konieczność stosowania kilku wzbudników wzdłuż tworzącej walca, a także wyposażania układu w precyzyjne mechanizmy pomiaru i regulacji temperatury. Zastosowanie precyzyjnych metod regulacji temperatury wymaga dokładnej znajomości parametrów dynamicznych obiektu regulacji. W Instytucie Informatyki Stosowanej PŁ prowadzone są prace nad rozwojem półprzemysłowego stanowiska do nagrzewania indukcyjnego walca stalowego [1]. Badania te związane są z doбором właściwych algorytmów regulacyjnych [2,3], procedur przetwarzania sygnałów mierzonych i generowania mocy czynnej na powierzchni walca [4]. W ostatnim czasie stanowisko to zostało wyposażone w kamerę termowizyjną, umożliwiającą uzyskanie znacznie bogatszej informacji o badanym obiekcie niż stosowane dotychczas czujniki IR. Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy stanowiska badawczego, umożliwiającego identyfikację para-

metrów dynamicznych i regulację temperatury nagrzewanego indukcyjnie obracającego się walca stalowego. Na stanowisku tym, walec stalowy o długości 1,2 m nagrzewany jest przy zastosowaniu sześciu ruchomych wzbudników zasilanych przez zespół sześciu generatorów w.cz. Żądana wartość mocy dostarczanej do układu uzyskiwana jest poprzez zastosowanie dodatkowego regulatora pomocniczego zrealizowanego w postaci komputera PC wyposażonego w karty przetworników D/A i A/D. Temperatura powierzchni nagrzewanego obiektu jest mierzona przy użyciu kamery termowizyjnej. W celu umożliwienia dokonywania pomiarów temperatury ściśle określonych obszarów obiektu, do kamery dostarczany jest z enkodera, umieszczonego na osi obracającego się walca, sygnał synchronizujący. Zadawaniem wartości mocy grzewczej oraz akwizycją danych zajmuje się komputer PC1.



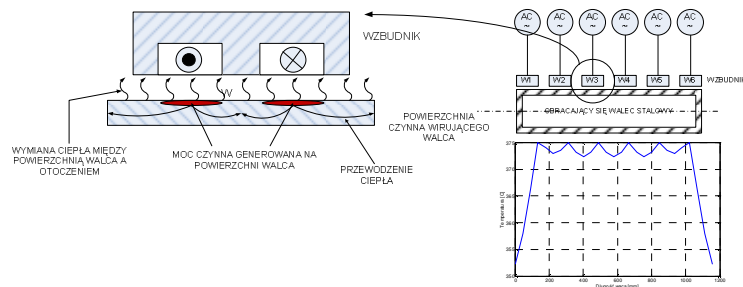
Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska badawczego

Ponieważ doświadczenia przeprowadzane na rzeczywistym obiekcie są bardzo czasochłonne, zazwyczaj w celach badawczych stosuje się ich modele. Dlatego przed zastosowaniem regulatora PI do regulacji temperatury obiektu rzeczywistego, został najpierw przebadany w tym zakresie jego model numeryczny.

## 1. MODEL NUMERYCZNY NAGRZEWANEGO INDUKCYJNIE WALCA STALOWEGO

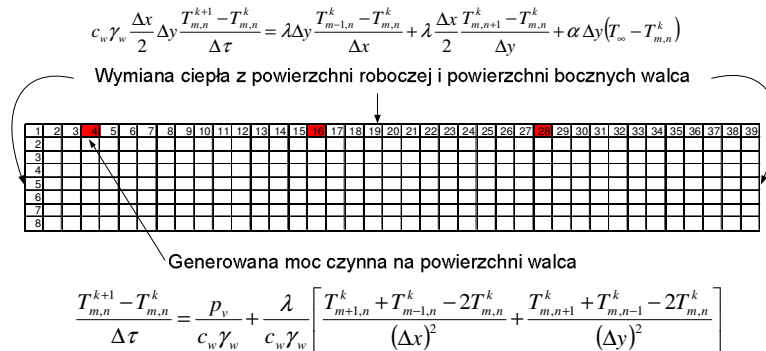
Dla potrzeb badań symulacyjnych własności dynamicznych układu ruchome wzbudniki-wirujący walec oraz badań nad wpływem ruchu wzbudników na

równomierność rozkładu temperatury wzdłuż tworzącej walca opracowano model numeryczny zjawisk fizycznych zachodzących w analizowanym układzie. Idea nagrzewania indukcyjnego obracającego się walca stalowego została schematycznie przedstawiona na rysunku 2.



Rys. 2. Idea nagrzewania indukcyjnego obracającego się walca stalowego

Każdy ze wzбудników generuje na powierzchni walca moc czynną zamianą na energię cieplną. Pomiędzy powierzchnią roboczą walca oraz powierzchniami czołowymi a otoczeniem występuje wymiana ciepła głównie przez konwekcję.



Rys. 3. Schemat modelu numerycznego obracającego się walca stalowego. Oznaczenia symboli:  $\alpha$  – współczynnik konwekcji [W/(m<sup>2</sup>K)],  $c_w$  – ciepło właściwe materiału walca,  $\gamma_w$  – gęstość materiału walca [kg/m<sup>3</sup>],  $T_{m,n}^k$  – temperatura w węźle m,n w k-tym kroku iteracyjnym,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  – odległości pomiędzy węzłami obliczeniowymi,  $\Delta \tau$  – interwał czasu nagrzewania

Model numeryczny powinien odzwierciedlać wymienione wyżej cechy układu pozostając użytecznym, to znaczy zapewniając dostatecznie szybkie i dokładne obliczenia. W tym celu wykorzystano metodę różnic skończonych, symulującą jedynie zjawiska cieplne zachodzące w badanym układzie, z pomi-

nięciem zjawisk elektromagnetycznych. Schemat połowy modelu numerycznego jest przedstawiony na rysunku 3.

## 2. SYMULACYJNA IDENTYFIKACJA WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNYCH WALCA

Symulacja nagrzewania walca ruchomym walcem polegała na zmianie pozycji wzbudnika w każdym kroku czasowym. Zmiana prędkości przesuwu wzbudnika realizowana była poprzez odpowiednią zmianę wartości kroku czasowego symulacji. Po dokonaniu doboru parametrów modelu numerycznego oraz kroku czasu symulacji przeprowadzono eksperyment identyfikacji skokowej parametrów modelu numerycznego. Traktując odpowiedź modelu numerycznego jako odpowiedź obiektu rzeczywistego, do wyznaczenia parametrów odpowiadającego mu modelu użyto członu inercyjnego pierwszego rzędu z opóźnieniem, o transmitancji wyrażonej zależnością (1):

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-s \cdot L}}{1 + s \cdot N} \quad (1)$$

gdzie:  $K$  – wzmacnienie,  $N$  – stała czasowa inercji,  $L$  – opóźnienie.

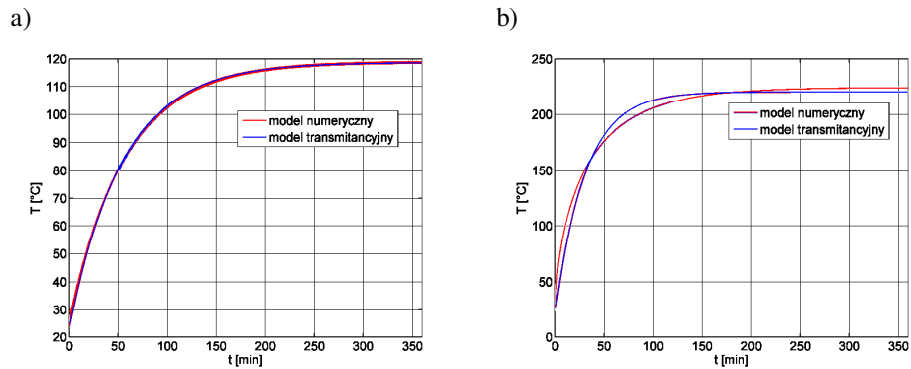
W obliczeniach wykorzystano toolbox-a Matlab-a „Optimization Toolbox” firmy MathWorks. Jako minimalizowaną funkcję celu przyjęto wskaźnik jakości zdefiniowany równaniem:

$$E = \sum_{i=0}^n \left( \frac{y_i - y_{mi}}{y_i} \right)^2 \cdot 100\% \quad (2)$$

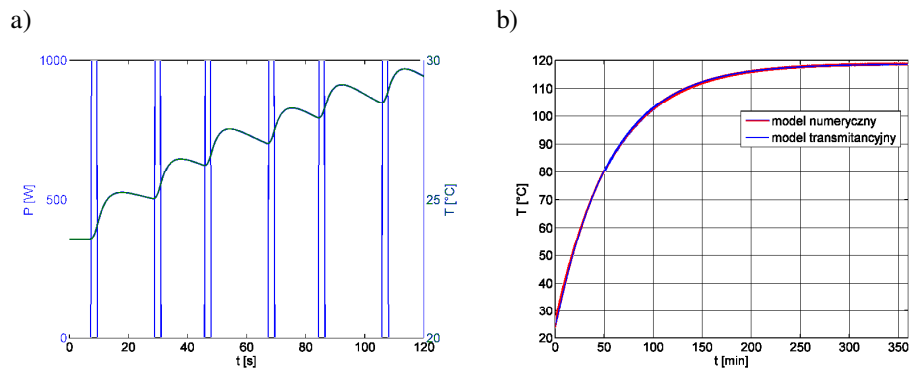
gdzie:  $y_i$  – odpowiedź obiektu w kroku pomiarowym  $i$ ,  $y_{mi}$  – odpowiedź modelu w kroku pomiarowym  $i$ ,  $n$  – liczba kroków pomiarowych.

Ze względu na ruch wzbudnika, dość problematyczny okazał się wybór mocy, jaka powinna być zastosowana w symulacji modelu transmitancyjnego. Dlatego postanowiono wyznaczyć trzy warianty jego parametrów. Pierwszy z nich bazował na traktowaniu jako sygnału wejściowego modelu transmitancyjnego skoku o wartości mocy równej mocy użytej do symulacji nagrzewania modelu numerycznego. Uzyskane charakterystyki czasowe modelu transmitancyjnego przedstawia rysunek 4a. Drugi wariant modelu transmitancyjnego bazował na przyjęciu wymuszenia o przebiegu przedstawionym na rysunku 5a.

Przebiegi czasowe modelu transmitancyjnego dla tego wariantu zostały przedstawione na rysunku 5b. Trzeci wariant parametrów modelu dotyczył przypadku nieruchomego wzбудnika. Uzyskane charakterystyki czasowe przedstawia rysunek 4b. Wyznaczone w poszczególnych przypadkach parametry modelu zebrano w tabeli 1.



Rys. 4. Charakterystyki czasowe modelu numerycznego i transmitancyjnego dla pierwszego (a) i trzeciego (b) wariantu wymuszenia



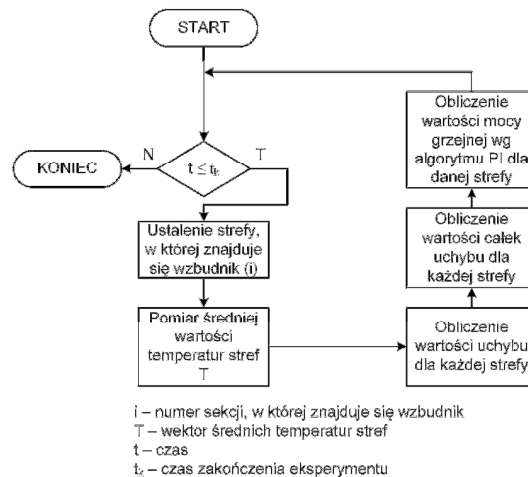
Rys. 5. Przebieg wymuszenia oraz odpowiedzi dla drugiego wariantu modelu transmitancyjnego

Tabela 1. Wartości parametrów trzech wariantów modelu transmitancyjnego

Nr wariantu	K [°C/W]	N [s]	L [s]
1	0.0951	3320	0
2	0.9154	3318	0
3	0.1968	1849	0

### 3. SYMULACJA REGULACJI PI MODELU NUMERYCZNEGO

Symulacja regulacja PI temperatury modelu bazowała na jego dyskretyzacji przestrzennej, polegającej na podziale jego powierzchni na 10 stref o równej długości. Przyjęto, iż poruszający się wzbudnik nagrzewa tę strefę walca, nad którą znajduje się większa jego część. Zastosowany algorytm przedstawia rysunek 6. Na podstawie uzyskanych parametrów wszystkich wariantów modelu transmitancyjnego dokonano doboru nastaw regulatora PI przy zastosowaniu ogólnie znanych zaleceń [5]. Ze względu na fakt, iż w układzie występują dodatkowe opóźnienia wynikające z ruchu wzbudnika, wartość opóźnienia modelu transmitancyjnego zwiększono o czas przebywania wzbudnika poza strefą (czyli o 0.9 czasu przejazdu wzbudnika wzdłuż walca). Otrzymane wartości nastaw regulatora zostały zawiera tabela 2.



Rys. 6. Algorytm regulacji PI przy zastosowaniu ruchomego wzbudnika

Tabela 2. Nastawy regulatora PI dla trzech wariantów modelu transmitancyjnego

Nr wariantu	$K_p$ [W/°C]	$T_i$ [s]
1	1662	62.37
2	173	62.37
3	895	62.37

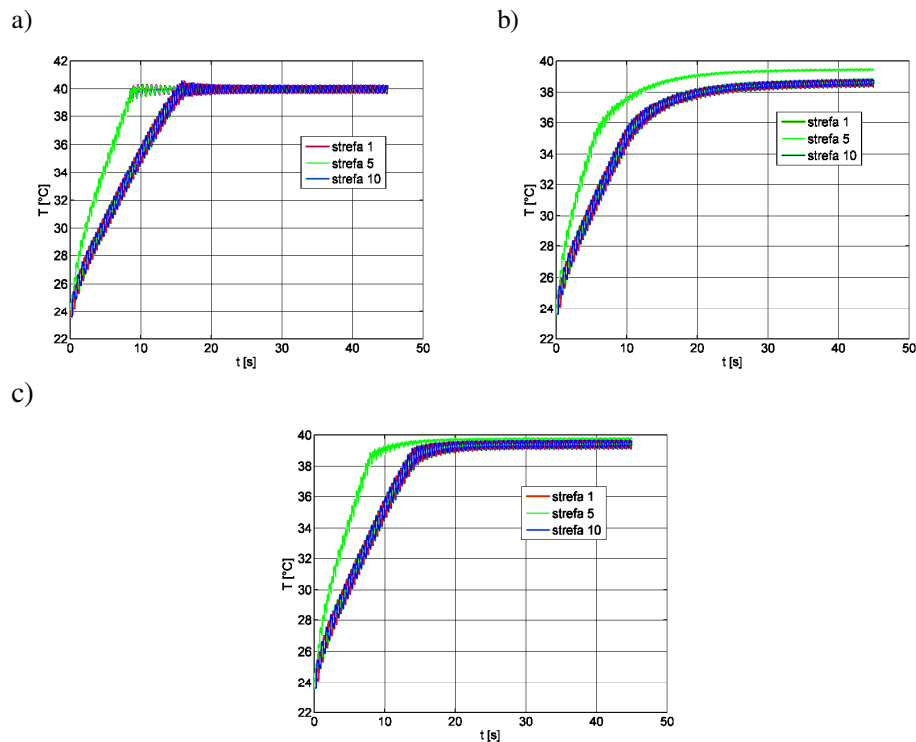
Otrzymane przebiegi symulacji regulacji stałowartościowej na poziom 40°C dla trzech wariantów nastaw regulatora PI przedstawia rysunek 7. Porównanie

jakości regulacji uzyskanej dla trzech wariantów nastaw regulatora PI bazowało na wskaźniku jakości regulacji (3) oraz statycznym uchybie regulacji.

$$I_1 = \sum_{k=1}^n \sum_{x=1}^m |T_{k,x} - T_z| \quad (3)$$

gdzie:  $k$  – krok czasowy,  $n$  – liczba kroków czasowych,  $x$  – współrzędna punktu modelu walca,  $m$  – liczba punktów modelu walca,  $T_z$  – zadana wartość temperatury,  $T$  – temperatura powierzchni walca.

Otrzymane wartości przyjętego wskaźnika jakości regulacji oraz uchybu statycznego znajdują się w tabeli 3.



Rys. 7. Symulacja regulacji PI dla trzech wariantów nastaw regulatora:  
a) pierwszy wariant, b) drugi wariant, c) trzeci wariant

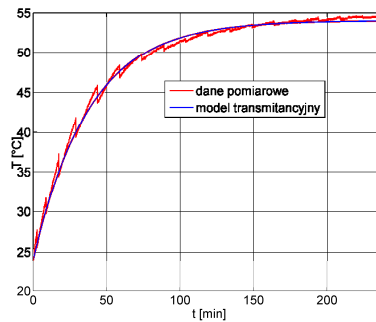
Tabela 3. Wartości przyjętego wskaźnika jakości regulacji oraz uchybu statycznego

Nr wariantu	$I_1$ [°C]	$\epsilon$ [°C]
1	1.81e6	-0.34
2	2.24e6	0.77
3	1.99e6	0.37

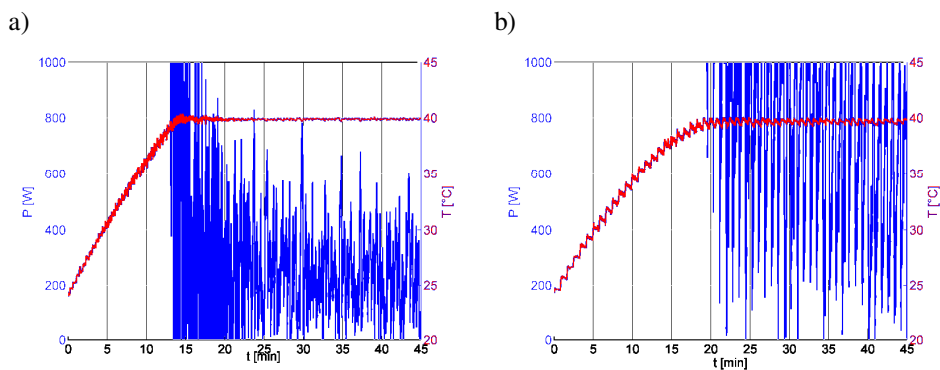
Z analizy danych zawartych w tabeli 3 wynika, iż najlepszą jakość uzyskuje się przy zastosowaniu regulatora, którego nastawy bazują na pierwszym wariancie modelu transmitancyjnego.

#### 4. REGULACJA PI TEMPERATURY POWIERZCHNI OBRACAJĄCEGO SIĘ WALCA STALOWEGO NAGRZEWANEGO INDUKCYJNIE RUCHOMYM WZBUDNIKIEM

Opierając się na wynikach uzyskanych na drodze symulacyjnej, dokonano opisaną wcześniej metodą identyfikacji właściwości dynamicznych obracającego się walca. Przebiegi czasowe temperatury obiektu oraz jego modelu transmitancyjnego przedstawia rysunek 8.



Rys. 8. Charakterystyki czasowe walca oraz jego modelu transmitancyjnego

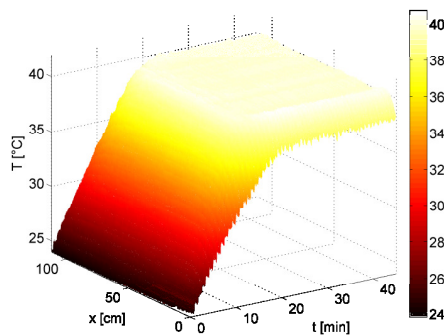


Rys. 9. Przebiegi czasowe temperatury oraz mocy regulacji temperatury dla strefy środkowej (a) oraz bocznej (b) walca

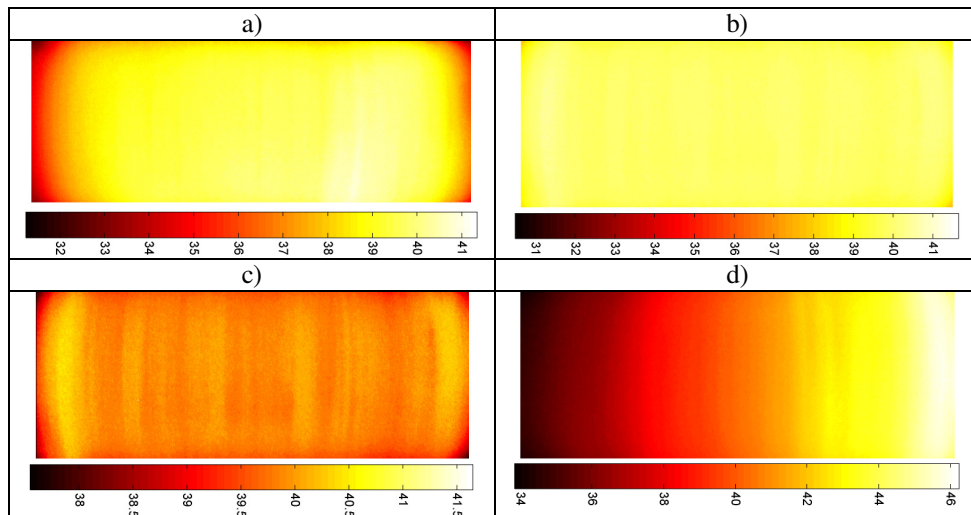


Uzyskane parametry modelu transmitancyjnego wynoszą:  $K = 0.043^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ,  $N = 2283$  s,  $L = 0$  s. Bazując na tych parametrach i przyjmując jako czas opóźnienia średni czas przebywania wzbudnika poza strefą, dokonano doboru nastaw regulatora PI, które wynoszą:  $K_r = 2147$   $\text{W}/^{\circ}\text{C}$ ,  $T_i = 73.5$  s.

Otrzymane przebiegi temperatury i mocy grzejnej regulacji stałowartościowej temperatury na poziom  $40^{\circ}\text{C}$  strefy centralnej oraz bocznej walca przedstawia rysunek 9.



Rys. 10. Przebieg temperatury powierzchni walca



Rys. 11. Rozkład temperatury powierzchni walca w wybranych chwilach czasowych: a) nagrzewanie walca, b) stan quasi-ustalony, c) stan quasi-ustalony z dostosowaną skalą temperatur, d) stan quasi-ustalony dla regulacji, w której wartość zadana temperatury ma liniowo zmienny (w zakresie  $35^{\circ}\text{C} \div 45^{\circ}\text{C}$ ) profil wzdłuż tworzącej walca

Analizując rysunek 9 można zauważyć, iż w przypadku strefy centralnej walca przebieg sygnału mocy (nie uwzględniając wpływu zakłóceń) świadczy o poprawnym dobraniu parametrów regulatora. Natomiast w przypadku strefy bocznej można zauważyć znaczne wahania mocy grzejnej, świadczące o zbyt dużej wartości wzmocnienia regulatora. Ponadto należy zwrócić uwagę na wartości średnie mocy – dla sekcji środkowej jest ona znacznie niższa niż dla sekcji bocznej. Wynika to z odmiennych warunków wymiany ciepła w strefach centralnych i bocznych, a co za tym idzie istotnie różnych parametrów dynamicznych tych stref.

Przebieg temperatury regulacji stałowartościowej temperatury całej powierzchni walca na poziom 40°C przedstawia rysunek 10, natomiast rozkład temperatury jego powierzchni rysunek 11.

## **5. WNIOSKI**

Przeprowadzone badania wykazały poprawność opracowanego modelu numerycznego do symulacji nagrzewania indukcyjnego obracającego się walca stalowego. Ponadto świadczą o możliwości stosowania w nagrzewaniu ruchomymi wzbudnikami klasycznych algorytmów regulacji, takich jakim jest np. algorytm PI. Dodatkowo udokumentowały, iż dzięki zastosowaniu ruchomych wzbudników, możliwe jest uzyskanie dość dowolnego rozkładu temperatury powierzchni obracającego się walca.

## **PODZIĘKOWANIA**

Badania zrealizowano w ramach projektu badawczego N N519 579838 Narodowego Centrum Nauki.

## **LITERATURA**

- [1] **Urbanek P., Kucharski J., Frączyk A.:** Methods of determination of dynamic properties of induction heated multi input – multi output systems. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 11, ss. 180-183, 2008.
- [2] **Frączyk A., Urbanek P., Kucharski J.:** Modelling and optimal temperature control of in-duction heated rotating steel cylinder. 13th IEEE IFAC International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Szczecin, ss. 351-355, 2007.
- [3] **Urbanek P., Kucharski J.:** The induction heated rotating steel cylinder as a control plant. 51st Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Technische Universität Ilmenau, 2006.

- 
- [4] **Urbanek P., Frączyk A., Kucharski J.:** Algorytmy eliminacji wpływu zmian emisyjności powierzchni w bezstykowych pomiarach temperatury wirującego walca stalowego. Konferencja Przetwarzanie i analiza sygnałów w systemach wizji i sterowania. Automatyka, tom 12/3, ss. 841-851, 2008.
- [5] **Michalski L., Sadowski J., Kuźmiński K.:** Regulacja temperatury urządzeń elektrotermicznych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1981.

## **PI TEMPERATURE CONTROL IN INDUCTION HEATING WITH MOVING INDUCTORS**

### **Summary**

In the paper the possibility of PI control of surface temperature of induction heated rotating steel cylinder with moving inductors has been presented. The controller design procedure was supported by simulations using numeric model of the heated cylinder. The dynamic properties of the plant were determined and the controller was tuned and verified by experiment.

Keywords: PI temperature control, induction heating, moving inductors.