

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

ALGORYTMY DWUSTAWNEJ REGULACJI TEMPERATURY POWIERZCHNI WALCA STALOWEGO Z ZASTOSOWANIEM RUCHOMYCH WZBUDNIKÓW

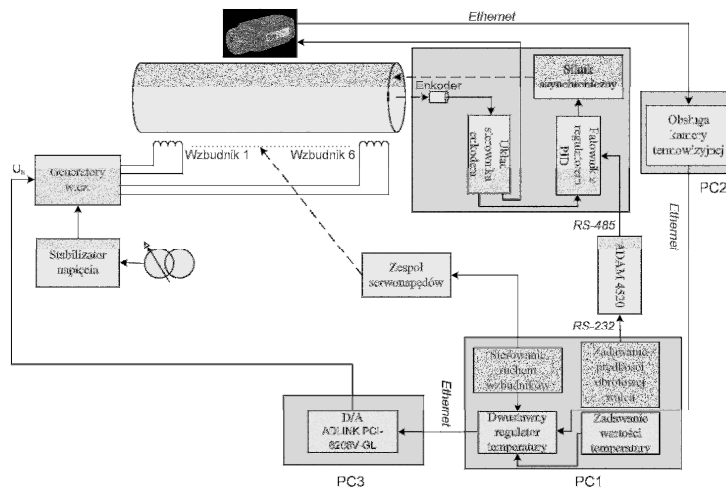
W artykule przedstawiono metodę realizacji i wyniki regulacji dwustawnej temperatury powierzchni obracającego się walca stalowego, nagrzewanego indukcyjnie ruchomymi wzbudnikami. Szczególny nacisk położono na zapewnienie równomierności rozkładu temperatury wzdłuż tworzącej walca podczas doprowadzania obiektu do zadanej wartości temperatury.

WPROWADZENIE

W wielu współczesnych procesach technologicznych stosowane są urządzenia grzejne, będące obiektami o wielu wejściach i wielu wyjściach [1,2,3]. Przykładem takiego urządzenia może być nagrzewany indukcyjnie obracający się walec stalowy, stosowany w wielu gałęziach przemysłu, m.in. w papiernictwie, przemyśle tekstylnym czy gumowym. Nagrzewanie tego typu ma wiele zalet; do najważniejszych można zaliczyć dużą szybkość i wysoką sprawność nagrzewania. W celu uzyskania wysokiej równomierności rozkładu temperatury powierzchni nagrzewanego obiektu stosowany jest zazwyczaj zespół wielu nieruchomych wzbudników. Alternatywą, umożliwiającą zredukowanie liczby wzbudników, a zarazem pozwalającą na uzyskanie dowolnego zadanego profilu rozkładu temperatury powierzchni nagrzewanego obiektu, jest zastosowanie układu ruchomych wzbudników. Schemat blokowy stanowiska badawczego, w którym zastosowano ostatnie ze wspomnianych rozwiązań, jest przedstawiony na rysunku 1.

Na stanowisku tym walec stalowy o długości 1,2 m nagrzewany jest przy zastosowaniu sześciu ruchomych wzbudników, które są zasilane przez zespół sześciu generatorów w.cz. Temperatura powierzchni nagrzewanego obiektu jest

mierzona przy użyciu kamery termowizyjnej [4]. Za przemieszczanie wzbudników odpowiada zespół sześciu serwonapędów, sterowanych z komputera PC1, który dodatkowo steruje mocą grzejną [5] dostarczaną do nagrzewanego walca oraz przeprowadza akwizycję danych pomiarowych.

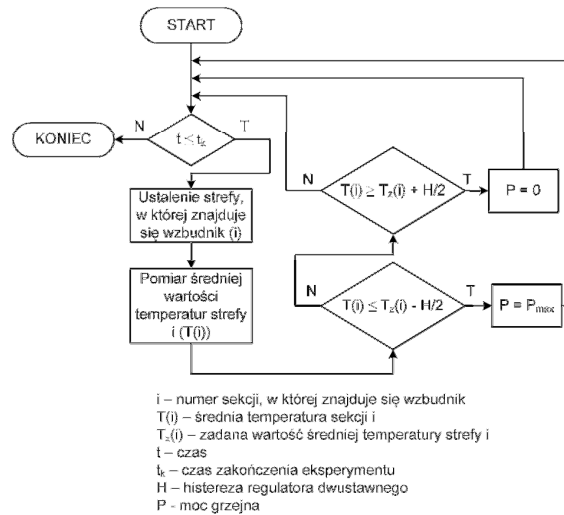


Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

Jedną z najprostszych, a równocześnie bardzo często stosowanych metod regulacji temperatury, jest metoda regulacji dwustawnej. W artykule przedstawiono możliwość jej zastosowania do nagrzewania indukcyjnego obracającego się walca stalowego za pomocą ruchomych wzbudników.

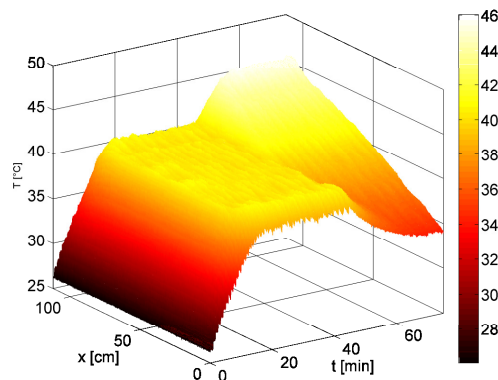
1. DWUSTAWNA REGULACJA TEMPERATURY JEDNYM RUCHOMYM WZBUDNIKIEM

W celu zastosowania regulacji dwustawnej do nagrzewania indukcyjnego obracającego się walca stalowego zdecydowano się na dyskretyzację przestrzenną nagrzewanego obszaru – podzielono obszar walca na 10 stref o równej długości. Przyjęto, iż poruszający się wzbudnik nagrzewa tę strefę walca, nad którą znajduje się większa jego część. Algorytm regulacji przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Algorytm regulacji dwustawnej realizowanej ruchomym wzbudnikiem

Przydatność algorytmu z rysunku 2 została zweryfikowana w eksperymencie polegającym na 45-cio minutowej regulacji stałowartościowej temperatury na poziom 40°C , a następnie trwającej 30 minut próbie uzyskania liniowo zmiennego ($35^{\circ}\text{C} \div 45^{\circ}\text{C}$) rozkładu temperatury wzdłuż tworzącej walca. Uzyskane wyniki przedstawia rysunek 3.

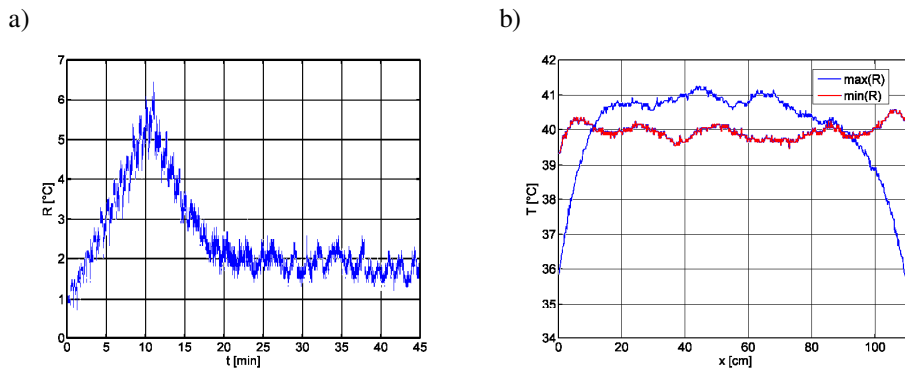


Rys. 3. Wyniki regulacji dwustawnej realizowanej ruchomym wzbudnikiem

W celu oceny jakości regulacji zdefiniowano wskaźnik R , wyrażony zależnością (1):

$$R(t) = \max(T(t)) - \min(T(t)) \quad (1)$$

Przebieg tego wskaźnika w czasie oraz rozkłady temperatur powierzchni walca dla chwil czasowych, w których R posiada największą (z całego czasu trwania eksperymentu regulacji stałowartościowej) oraz najmniejszą wartość (po osiągnięciu stanu quasi-ustalonego) są przedstawione na rysunku 4.



Rys. 4. Przebieg czasowy wskaźnika $R(t)$ (a) oraz rozkłady temperatury powierzchni walca (b)

Analizując rysunek 4 można zauważyć znaczną nierównomierność rozkładu temperatury występującą podczas doprowadzania temperatury powierzchni walca do wartości zadanej. W związku z tym, w celu zwiększenia równomierności rozkładu temperatury w czasie nagrzewania walca zmodyfikowano algorytm z rysunku 1 (regulacja temperatury z jego zastosowaniem jest opisana w rozdziale 2). Równocześnie, w celu umożliwienia porównania ze sobą jakości uzyskiwanej regulacji temperatury, zdecydowano się posługiwać maksymalną (z całego czasu trwania eksperymentu) i minimalną (po osiągnięciu stanu quasi-ustalonego) wartością wskaźnika $R(t)$ oraz zdefiniowano dodatkowe wskaźniki jakości regulacji, wyrażone zależnościami (2) i (3):

$$I_1 = \sum_{k=1}^n \sum_{x=1}^m |T_{k,x} - T_z| \quad (2)$$

$$I_2 = \sum_{k=p}^n \sum_{x=1}^m |T_{k,x} - \text{mean}(T_{p \div n, 1 \div x})| \quad (3)$$

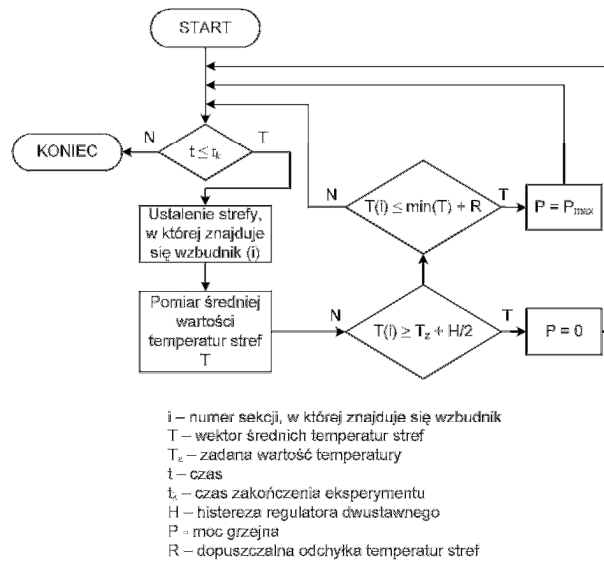
gdzie: k – krok czasowy, n – liczba kroków czasowych, x – współrzędna punktu powierzchni walca, m – liczba punktów walca, T_z – zadana wartość temperatury,

T – temperatura powierzchni walca, p – krok czasowy osiągnięcia stanu quasi-ustalonego regulacji.

Dla opisywanego w niniejszym rozdziale wariantu regulacji temperatury przyjęte wskaźniki jakości wynoszą: $R_{\min} = 1.2^{\circ}\text{C}$, $R_{\max} = 6.5^{\circ}\text{C}$, $I_1 = 1.709e7^{\circ}\text{C}$ oraz $I_2 = 1.029e6^{\circ}\text{C}$.

2. DWUSTAWNA REGULACJA TEMPERATURY JEDNYM RUCHOMYM WZBUDNIKIEM Z ZASTOSOWANIEM ALGORYTMU REGULACJI ZWIĘKSZAJĄCEGO RÓWNOMIERNOŚĆ TEMPERATURY PODCZAS NAGRZEWANIA

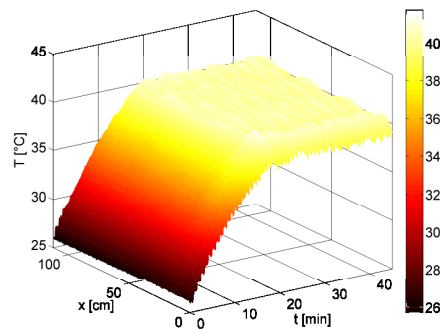
Występującą podczas nagrzewania walca nierównomierność temperatury jego powierzchni zdecydowano się zmniejszyć poprzez zastosowanie algorytmu, przedstawionego na rysunku 5.



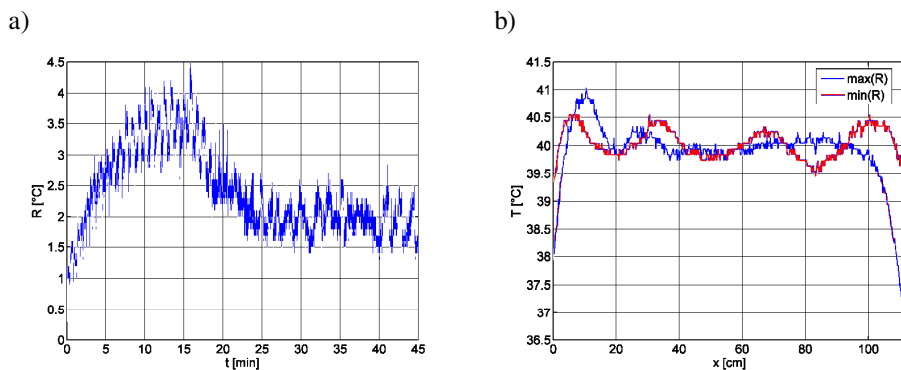
Rys. 5. Zmodyfikowany algorytm regulacji temperatury

Poprawność algorytmu z rysunku 5 została zweryfikowana doświadczalnie, w eksperymencie stałowartościowej regulacji temperatury. Otrzymane wyniki pomiarów przedstawia rysunek 6. Analogicznie jak we wcześniej analizowanym wariantcie regulacji temperatury, wyznaczono przebieg czasowy wskaźnika jako-

ści R (rys. 7a) oraz obliczono wartości przyjętych wskaźników jakości regulacji temperatury (2) i (3). Otrzymane rozkłady temperatury powierzchni walca dla chwil czasowych, w których wskaźnik R przyjmuje największą i najmniejszą wartość, przedstawiono na rysunku 7b. Wartości analizowanych wskaźników jakości regulacji dla tego wariantu wynoszą: $R_{\min} = 1.2^\circ\text{C}$, $R_{\max} = 4.5^\circ\text{C}$, $I_1 = 2.032e7^\circ\text{C}$ oraz $I_2 = 1.029e6^\circ\text{C}$.



Rys. 6. Wyniki regulacji dwustawnej otrzymanej przy użyciu algorytmu z rys. 5



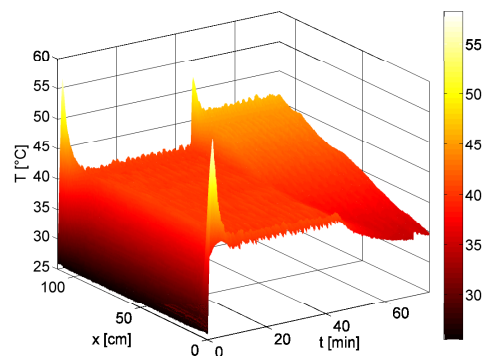
Rys. 7. Przebieg czasowy wskaźnika $R(t)$ (a) oraz rozkłady temperatury powierzchni walca (b)

Analizując rysunki 4 i 7, można zauważyć zmniejszenie nierównomierności temperatury walca podczas jego nagrzewania. Występującą przy zastosowaniu algorytmu z rysunku 5 nierównomierność temperatury można zmniejszyć poprzez zwiększenie liczby stref, na które podzielony jest walec. Ponadto należy zauważyć, że strefy krańcowe obejmują boczne obszary walca, które charakteryzują się większą, niż obszary centralne, wartością współczynnika konwekcji.

Dodatkowo porównując rysunki 3 i 6 widać, iż zastosowanie algorytmu z rysunku 5 zwiększa czas dojścia temperatury obiektu do wartości zadanej. Wynika to z faktu, iż obszary boczne walca wymagają dostarczenia większej ilości energii niż obszary centralne na osiągnięcie tego samego poziomu temperatury, a zastosowany algorytm regulacji podczas nagrzewania walca redukuje ilość energii dostarczanej do jego części centralnej, nie pozwalając na wystąpienie zbyt dużej nierównomierności temperatury.

3. DWUSTAWNA REGULACJA TEMPERATURY JEDNYM RUCHOMYM WZBUDNIKIEM ORAZ DWOMA NIERUCHOMYMI WZBUDNIKAMI POMOCNICZYMI

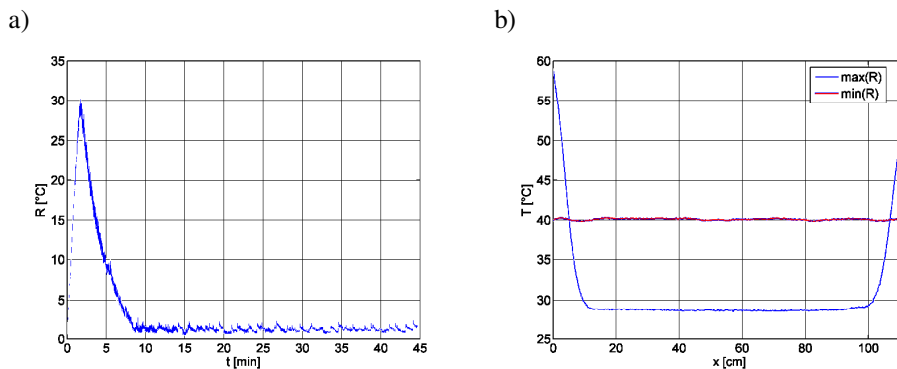
Analiza przedstawionych powyżej wariantów regulacji temperatury wskazuje, iż wartym rozważenia wydaje się zastosowanie dodatkowych wzbudników, nagrzewających wyłącznie obszary boczne walca. Dlatego przeanalizowano wariant regulacji temperatury walca, realizowanej za pomocą jednego ruchomego wzbudnika, nagrzewającego część centralną walca (strefy 2÷9) oraz dwóch nieruchomych wzbudników, kontrolujących temperaturę stref bocznych. Uzyskane wyniki przedstawia rysunek 8.



Rys. 8. Wyniki regulacji dwustawnej otrzymanej przy zastosowaniu trzech wzbudników

Analogicznie jak we wcześniej analizowanych wariantach regulacji, wyznaczono przebieg czasowy wskaźnika jakości R (rys. 9a) oraz obliczono wartości przyjętych wskaźników jakości regulacji temperatury. Otrzymane rozkłady temperatury powierzchni walca dla chwil czasowych, w których wskaźnik R przy-

muje największą i najmniejszą wartość, przedstawiono na rysunku 9b. Wartości analizowanych wskaźników jakości regulacji dla tego wariantu regulacji temperatury wynoszą: $R_{\min} = 0.5^{\circ}\text{C}$, $R_{\max} = 30.6^{\circ}\text{C}$, $I_1 = 1.34e7^{\circ}\text{C}$ oraz $I_2 = 9.655e5^{\circ}\text{C}$. Analizując rysunki 8 i 9 oraz wartości wskaźników jakości regulacji, można zauważyć znaczne przekroczenia wartości zadanej temperatury obszarów bocznych walca. Wynika to z faktu, iż nieruchome wzbudniki doprowadzając średnią temperaturę stref bocznych walca do wartości zadanej, realizują to kosztem równomierności rozkładu temperatury. W związku z powyższym postanowiono dla wariantu regulacji trzema wzbudnikami zastosować algorytm z rysunku 5.



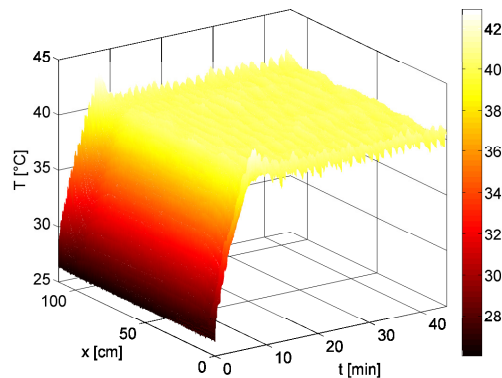
Rys. 9. Przebieg czasowy wskaźnika $R(t)$ (a) oraz rozkłady temperatury powierzchni walca (b)

4. DWUSTAWNA REGULACJA TEMPERATURY JEDNYM RUCHOMYM WZBUDNIKIEM ORAZ DWOMA NIERUCHOMYMI WZBUDNIKAMI POMOCNICZYMI Z ZASTOSOWANIEM ALGORYTMU ZWIĘKSZAJĄCEGO RÓWNOMIERNOŚĆ TEMPERATURY PODCZAS NAGRZEWANIA

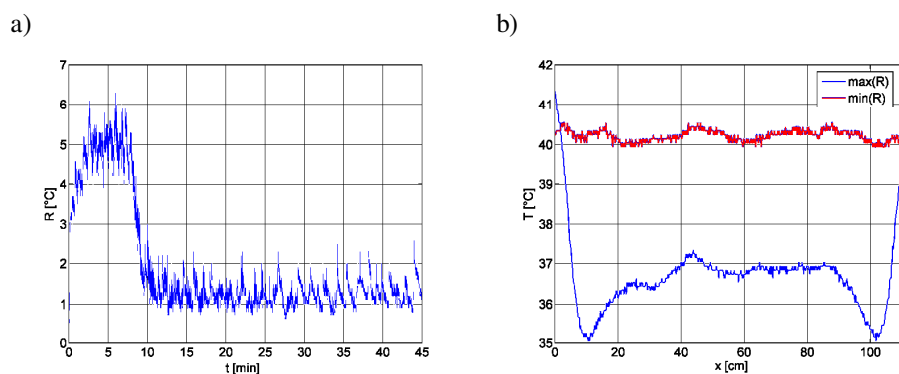
W przedstawionym w niniejszym rozdziale wariantcie regulacji temperatury powierzchni walca zastosowano jeden ruchomy wzbudnik nagrzewający strefy $2 \div 9$ walca oraz dwa nieruchome wzbudniki kontrolujące temperaturę stref bocznych. Regulacja mocy realizowana była przy zastosowaniu algorytmu z rysunku 5, dla każdego wzbudnika niezależnie.

Uzyskane wyniki regulacji stałowartościowej temperatury przedstawia rysunek 10. Podobnie jak we wcześniej analizowanych wariantach regulacji temperatury, wyznaczono przebieg czasowy wskaźnika jakości R (rys. 11a) oraz

obliczono wartości przyjętych wskaźników jakości regulacji temperatury. Otrzyma-
 ne rozkłady temperatury powierzchni walca dla chwil czasowych, w których wskaź-
 nik R przyjmuje największą i najmniejszą wartość, przedstawiono na rysunku 11b.
 Wartości analizowanych wskaźników jakości regulacji dla tego wariantu wynoszą:
 $R_{\min} = 0.5^{\circ}\text{C}$, $R_{\max} = 6.3^{\circ}\text{C}$, $I_1 = 1.202e7^{\circ}\text{C}$ oraz $I_2 = 8.577e5^{\circ}\text{C}$. Porównanie rysun-
 ków 8 i 10 pokazuje, iż zastosowanie algorytmu z rysunku 5 znacznie poprawia
 równomierność temperatury podczas nagrzewania obiektu. Ponadto należy zauwa-
 żyć, iż maksymalna wartość wskaźnika R w głównej mierze wynika z faktu, iż
 regulowana jest wartość średniej temperatury stref bocznych, a ze względu na
 stałowe zakończenie boków walca, nagrzewają się one szybciej niż część cen-
 tralna walca.



Rys. 10. Wyniki regulacji dwustawnej otrzymanej przy zastosowaniu trzech
 wzбудników i algorytmu z rysunku 5

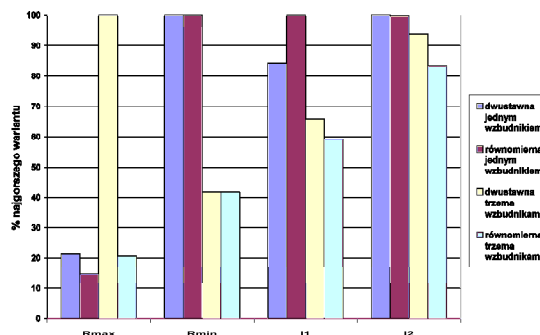


Rys. 11. Przebieg czasowy wskaźnika $R(t)$ (a) oraz rozkłady temperatury
 powierzchni walca (b)

5. WNIOSKI

W celu porównania ze sobą przeanalizowanych wariantów regulacji temperatury powierzchni walca, zestawiono względne wartości obliczonych wskaźników jakości regulacji, przedstawione na rysunku 12.

Z analizy rysunku 12 wynika, iż każdy z prezentowanych wariantów regulacji ma swoje zalety i wady. Najmniej wad posiada wariant regulacji z zastosowaniem trzech wzbudników zasilanych mocą regulowaną według algorytmu z rysunku 5. Zwiększając nieznacznie (w stosunku do wariantu z jednym wzbudnikiem zasilanym mocą regulowaną algorytmem z rysunku 5) maksymalną wartość rozrzutu w czasie nagrzewu, uzyskujemy znaczne zmniejszenie rozrzutu w stanie quasi-ustalonym oraz poprawę pozostałych wskaźników jakości regulacji.



Rys. 12. Względne wartości analizowanych wskaźników jakości regulacji

PODZIĘKOWANIA

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

LITERATURA

- [1] 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, 351-355, Polska, Szczecin, 2007.
- [2] Urbanek P., Kucharski J., Frączyk A.: Methods of determination of dynamic properties of induction heated multi input – multi output systems. Electrical Review, vol. 84, no 11, ss. 180-183, 2008.

-
- [3] **Frączyk A., Urbanek P., Kucharski J.:** Computer-based system for non-contact temperature measurement of high-glittering induction-heated rotating steel cylinder. MESTECH' May 21-24, ss. 46-48, Polyana, Ukraine, 2008.
 - [4] **Kucharski J., Frączyk A., Urbanek P.:** Using infrared camera for dynamic properties identification of induction heated rotating steel cylinder. Seminarium Przetwarzanie i analiza sygnałów w systemach wizji i sterowania, Słok, czerwiec 2012.
 - [5] **Frączyk A., Kucharski J., Urbanek P.:** Komputerowy system stabilizacji mocy grzejnej w układzie nagrzewania indukcyjnego obracającego się walca. Przegląd Elektrotechniczny, 2011.

ON-OFF CONTROL ALGORITHMS FOR TEMPERATURE CONTROL OF STEEL CYLINDER WITH MOVING INDUCTORS

Summary

In the paper the implementation and results of on–off temperature control of the rotating steel cylinder heated by induction using moving inductors have been presented. The main focus was drawn to the uniformity of temperature distribution on cylinder surface in various phases of the heating process.

Keywords: on-off control algorithms, induction heating, moving inductors.