

doi:10.15199/48.2016.03.15

## Algorytmy ruchu wzbudników w indukcyjnym nagrzewaniu powierzchni walcowej

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wybrane problemy związane z nagrzewaniem indukcyjnym obracającego się walca, z wykorzystaniem ruchomych wzbudników. Zaproponowano dwa algorytmy ruchu wzbudników i przeanalizowano ich cechy charakterystyczne. Prostsze z rozwiązań polega na systematycznym ruchu wzbudników wzdłuż tworzącej walca, przypominającym ruch windy, a w bardziej zaawansowanym podejściu algorytm wyszukuje miejsca na powierzchni walca, których temperatura najbardziej odbiega od wartości zadanej i tam kierowane są wzbudniki. Oba rozwiązania zostały przeanalizowane z wykorzystaniem formalnego opisu, symulacji komputerowych oraz na drodze eksperymentalnej.

**Abstract.** In the paper some problems of induction heating of a rotating cylinder using moving inductors have been presented. Two algorithms applied for inductors' movement control were proposed and their features were discussed. The simple approach assumes a systematic movement of inductors, resembling lift movement, while the more advanced one searches these places of cylindrical surface whose temperature differs significantly from the reference value. Both solutions were analyzed using formal description, computer simulations and experimental set-up. (*Inductors' Movement Algorithms for Induction Heating of Cylindrical Surface*).

**Słowa kluczowe:** algorytmy ruchu, nagrzewanie indukcyjne, obracający się walec.

**Keywords:** movement algorithm, induction heating, rotating cylinder.

### Wstęp

Nagrzewanie indukcyjne jest jedną z najbardziej efektywnych i ekologicznych metod nagrzewania wykorzystywanych w procesach przemysłowych. Wśród wielu zastosowań tej metody coraz ważniejsze miejsce zajmuje produkcja papieru, gdzie zyski z wykorzystania nagrzewania indukcyjnego mogą być znaczące. Dodatkową zaletą takiego podejścia jest możliwość realizacji regulacji temperatury z wysoką, nieosiągalną innymi metodami dokładnością, co istotnie wpływa na jakość produktu końcowego.

W Instytucie Informatyki Stosowanej PŁ od lat trwają prace nad rozwojem metod nagrzewania oraz regulacji temperatury obracającego się walca stalowego, stanowiącego kluczowy element typowej maszyny papierniczej [1, 2, 3]. Jednym z zaproponowanych rozwiązań jest nagrzewanie obracającej się powierzchni walcowej wzbudnikami poruszającymi się wzdłuż jej tworzącej. Pozwala to na dość swobodne kształtowanie rozkładu mocy generowanej w płaszczu walca, a przez to na precyzyjne kształtowanie pola temperatury na jego powierzchni. Współistnienie w takim układzie dwóch rodzajów ruchu: obrotowego walca oraz liniowego wzbudników, otwiera szereg możliwości realizacji generowania zadanego rozkładu mocy grzejnej w walcu.

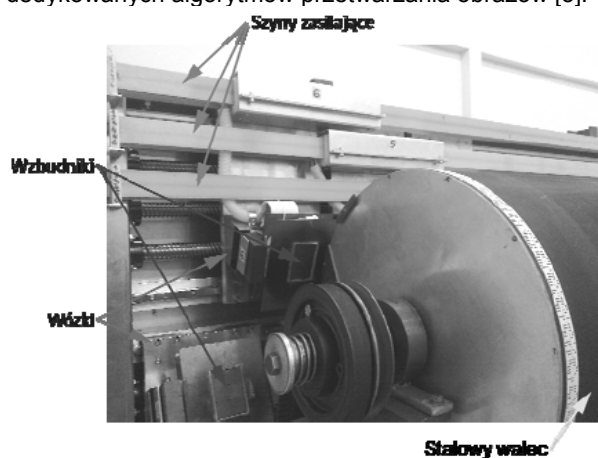
W niniejszym artykule zaprezentowano dwa algorytmy ruchu wzbudników w takim układzie:

- algorytm systematyczny, w którym ruch wzbudników wzdłuż tworzącej walca przypomina cykliczny ruch windy;
- algorytm o charakterze nadążnym, w którym ruch wzbudników realizowany jest tak, aby śledzić te miejsca na powierzchni walca, w których temperatura najbardziej odbiega od wartości zadanej.

Oba algorytmy zostały opisane formalnie, ich cechy przeanalizowano symulacyjnie, a weryfikację eksperymentalną przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym zbudowanym w IIS PŁ (rys.1).

Głównym elementem stanowiska jest stalowy walec wprawiany w ruch obrotowy za pomocą zespołu napędowego, umożliwiającego płynną regulację prędkości obrotowej w zakresie do 600 rpm. Nad powierzchnią walca umieszczono zestaw sześciu wzbudników zamocowanych na wózkach poruszanych za pomocą napędów śrubowych wyposażonych w serwomechanizmy. Wzbudniki zostały podzielone na dwie grupy operujące wzdłuż różnych linii

tworzących walca. W układzie zastosowano unikalną, bezprzewodową metodę przekazywania energii elektrycznej z generatorów w.cz. do wzbudników poprzez zestaw szyn zasilających sprzężonych elektro-magnetycznie ze wzbudnikami [4]. Takie rozwiązanie zapewni odpowiednią trwałość elementów w warunkach długotrwałej pracy urządzenia. Wszystkie elementy układu sterowane są komputerowo, a regulacja temperatury powierzchni walca odbywa się z wykorzystaniem kamery termowizyjnej i dedykowanych algorytmów przetwarzania obrazów [5].



Rys.1. Rys. 1. Fragment stanowiska laboratoryjnego nagrzewania indukcyjnego obracającego się walca stalowego za pomocą zestawu ruchomych wzbudników

### Algorytm systematyczny

W celu realizacji systematycznego algorytmu ruchu wzbudników walec został podzielony na trzy strefy o równych długościach, z których każda jest nagrzewana dwoma wzbudnikami należącymi do różnych grup wzbudników. Przed rozpoczęciem eksperymentu wzbudniki pierwszej grupy są ustawiane na początkach stref, natomiast drugiej grupy na końcach stref. W momencie rozpoczęcia nagrzewania wzbudniki są przemieszczane według algorytmu „windy” w obrębie stref, do których zostały przypisane.

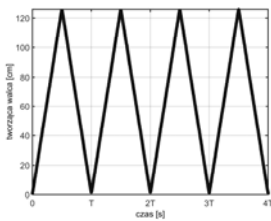
W przypadku nagrzewania powierzchni walca jednym ruchomym wzbudnikiem zgodnie z systematycznym algorytmem „windy”, wzbudnik jest przemieszczany cyklicznie wzdłuż tworzącej walca o długości  $l_c$  ruchem

jednostajnym z prędkością  $v$ , startując z pozycji 0. Zadane wartości położenia wzbudnika  $X_r$  (rys. 7) w funkcji czasu można wyrazić zależnością:

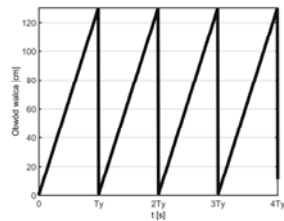
$$(1) \quad X_r(t) = \begin{cases} l_c \text{ dla } t \in \left(0, \frac{l_c}{v}\right) + 2k \cdot \frac{l_c}{v} \wedge k \in \mathbb{N} \\ 0 \text{ dla } t \in \left(\frac{l_c}{v}, \frac{2 \cdot l_c}{v}\right) + 2k \cdot \frac{l_c}{v} \wedge k \in \mathbb{N} \end{cases}$$

Ruch wzbudnika przemieszczanego według algorytmu windy względem wirującej powierzchni walca można traktować jako złożenie ruchu po trajektorii trójkąta wzdłuż tworzącej walca (rys. 2a) z ruchem po trajektorii piły wzdłuż obwodu walca (rys. 2b).

a) Trajektorja X



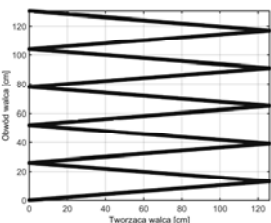
b) Trajektorja Y



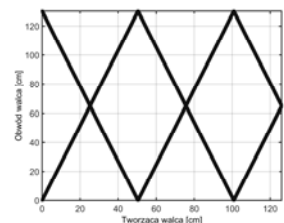
Rys.2. Elementy składowe ruchu wzbudnika poruszanego algorytmem „windy” względem unieruchomionej i rozwiniętej powierzchni walca

Poruszanie wzbudników przy zastosowaniu algorytmu „windy” niesie niebezpieczeństwo wystąpienia na powierzchni walca punktów nieosiągalnych dla wzbudników, dla których nie ma możliwości generowania mocy grzejnej, a więc i skutecznej regulacji temperatury. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe trajektorie ruchu wzbudników, uzyskane dla wybranych stosunków okresów obu ruchów składowych.

a)  $T_y/T_x=5$



b)  $T_x/T_y=5$



Rys.3. Elementy składowe ruchu wzbudnika poruszanego algorytmem „windy” względem unieruchomionej i rozwiniętej powierzchni walca

Rysunek 4 przedstawia udział procentowy nieosiągalnych dla wzbudnika punktów powierzchni walca w funkcji stosunku okresów ruchów składowych. Analizując go można stwierdzić, iż prawdopodobieństwo wystąpienia niedogranych fragmentów powierzchni wirującego walca w czasie nagrzewania wzbudnikiem poruszanym według algorytmu „windy” zwiększa się wraz ze zbliżaniem się stosunku okresów ruchów składowych do 1. Ponadto można zauważyć, iż występują pewne graniczne wartości zarówno stosunku  $T_x/T_y$  jak i  $T_y/T_x$ , po przekroczeniu których nie występują punkty nieosiągalne.

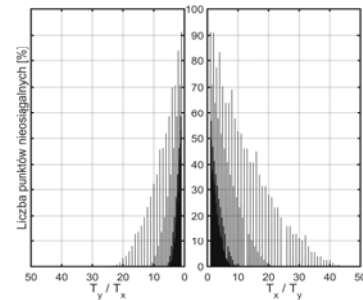
W przypadku kiedy okres obrotu walca ( $T_y$ ) jest większy od okresu ruchu wzbudnika wzdłuż tworzącej walca ( $T_x$ ) wartość graniczna  $T_y/T_x$  wynosi:

$$(2) \quad T_y > T_x \text{ gr} = \frac{Ob}{S_{wzb}}$$

natomiast dla  $T_y < T_x$ :

$$(3) \quad T_x < T_y \text{ gr} = \frac{2 \cdot l}{l_{wzb}}$$

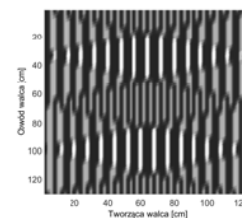
gdzie:  $Ob$  - obwód walca,  $S_{wzb}$  - szerokość wzbudnika,  $l$  - długość walca,  $l_{wzb}$  - długość wzbudnika.



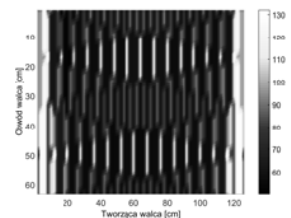
Rys.4. Udział procentowy punktów powierzchni walca nieosiągalnych dla wzbudnika poruszanego według algorytmu „windy”

W związku z powyższym, chcąc nie dopuścić do występowania na powierzchni walca punktów nieosiągalnych, należy tak dobrać stosunek  $T_x/T_y$  lub  $T_y/T_x$  aby układ pracował poza wartościami granicznymi (2), (3). W praktyce, ze względu na dość duże dysproporcje pomiędzy okresami  $T_x$  i  $T_y$  oraz dość znaczne gabaryty wzbudników problem możliwości wystąpienia punktów nieosiągalnych nie jest aż tak istotny. Dużo bardziej uciążliwe jest występowanie dysproporcji w częstoci pojawiania się wzbudnika nad poszczególnymi obszarami walca. Zjawisko to zostało przeanalizowane z wykorzystaniem modelu numerycznego nagrzewania indukcyjnego powierzchni walcowej [6], a przykładowe wyniki przedstawiono na rys. 5. Rysunek 5a przedstawia wykres obrazujący rozkład liczby pojawiania się wzbudnika nad powierzchnią walca. Dotyczy on przypadku walca obracającego się z prędkością obrotową 37 rpm ( $r = 20$  cm,  $v_o = 80$  cm/s), nagrzewanego jednym wzbudnikiem poruszanym według algorytmu „windy” z prędkością 5 cm/s. Porównując go z rys. 5b, przedstawiającym sumaryczną moc dostarczaną w czasie regulacji temperatury powierzchni walca, można zauważyć, iż dysproporcje w częstoci pojawiania się wzbudnika mają bezpośredni wpływ na wartości mocy grzejnej dostarczanej do poszczególnych obszarów walca.

a) Częstoci „odwiedziny”



b) Skumulowana moc ( $v=5$ cm/s), regulacja stałwartościowa 70°C



Rys.5. Rozkład liczby pojawiania się wzbudnika nad powierzchnią walca (a) oraz skumulowania moc w czasie regulacji stałwartościowej temperatury (b)

## Algorytm nadążny

Podstawową wadą opisanego powyżej algorytmu „windy” jest pomijanie rozkładu temperatury powierzchni walca przy wyznaczaniu wartości wektora  $X_r$ , co może pogarszać jakość regulacji temperatury. W celu wyeliminowania tego niekorzystnego zjawiska opracowano algorytm o charakterze nadążnym, uwzględniający rozkład temperatury powierzchni walca w danej chwili sterowania i „śledzący” miejsca, w których temperatura istotnie odbiega od wartości zadanej. Algorytm taki dla jednego wzbudnika można opisać równaniami:

$$\begin{aligned} T_r(x, y, t) &= \bar{T}_r(x, y, t) : x \in \langle x - 1/2; x + 1/2 \rangle \dots \\ &\dots \wedge y \in \langle y - w/2; y + w/2 \rangle \\ T(x, y, t) &= \bar{T}(x, y, t) : x \in \langle x - 1/2; x + 1/2 \rangle \dots \\ &\dots \wedge y \in \langle y - w/2; y + w/2 \rangle \\ e(x, y, t) &= T_r(x, y, t) - T(x, y, t) \\ X_r(t) &= \arg \max_x e(x, y, t) \end{aligned}$$

W praktyce nagrzewanie walca pojedynczym wzbudnikiem z wykorzystaniem algorytmu śledzącego nie jest efektywne, stąd należy je realizować przy użyciu zestawu wielu wzbudników grzejnych zorganizowanych w sekcje. Wzbudniki każdej sekcji wykonują wówczas ruch wzdłuż tworzącej walca, a każda sekcja umieszczona jest w innym położeniu kątowym walca. Przykład algorytmu sterowania (a dokładnie algorytm wyznaczania wartości zadanej  $X_r(t)$ ) dwoma zespołami wzbudników, z których każdy zespół liczy po trzy wzbudniki, przedstawiono na rysunku 6.

```

Xr1(1:3) = zeros(1,3);
Xr2(1:3) = zeros(1,3);

%---Wyznaczenie posortowanego wektora uchybu temperatury ---
e = Tr - T;
ex = max(e, [], 1); %zrzutowanie wartości uchybu na oś x
[ex_s, ind] = sort(ex, 'descend');

%-----Wyznaczenie pozycji wzbudników pierwszej grupy -----
Xr1(1:3) = ind(1);
k = 2; i = 2;
while i <= 3
    if min(abs(ind(k)-Xr1)) > li
        Xr1(i) = ind(k);
        k = k + 1; i = i + 1;
    else
        k = k + 1;
    end
end
Xr1 = sort(Xr1);

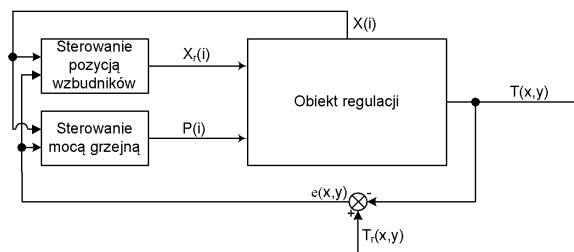
%-----Wyznaczenie pozycji wzbudników drugiej grupy -----
k = 1; i = 1;
while i <= 3
    if Xr2(1) == 0;
        if min(abs(ind(k)-Xr1)) > lbi
            Xr2(1:3) = ind(k);
            k = k + 1; i = i + 1;
        else
            k = k + 1;
        end
    else
        if min(abs(ind(k)-Xr1)) > lbi && min(abs(ind(k)-
Xr2)) > li
            Xr2(i) = ind(k);
            k = k + 1; i = i + 1;
        else
            k = k + 1;
        end
    end
end
Xr2 = sort(Xr2);
Xr = [Xr1 Xr2];

```

Rys.6. Przykład algorytmu sterowania pozycjami wzbudników (dwie grupy po trzy wzbudniki każda) bazującego na polu temperatury

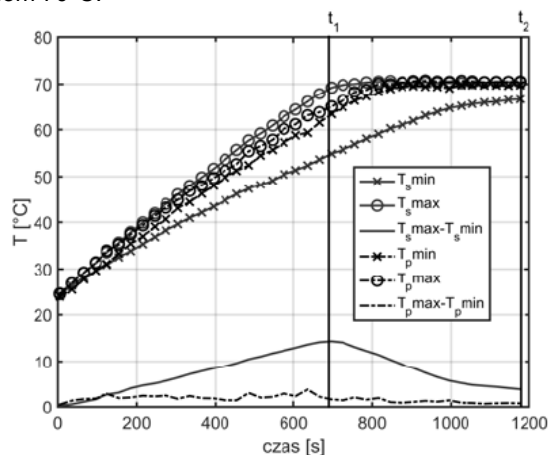
## Regulacja temperatury powierzchni walca z zastosowaniem algorytmów ruchu wzbudników

W celu praktycznej weryfikacji przedstawionych we wcześniejszych rozdziałach algorytmów sterowania pozycjami wzbudników, algorytmy te zostały zaimplementowane w ramach stanowiska badawczego (rys. 1). Żądane pole mocy grzewczej jest uzyskiwane poprzez zastosowanie złożenia sterowania pozycjami wzbudników ze sterowaniem mocą grzewczą, co ilustruje schemat blokowy przedstawiony na rys. 7.



Rys.7. Schemat blokowy dwuobwodowego układu regulacji temperatury

Na rysunku 8 przedstawiono przebiegi uśrednionej wzdłuż obwodu walca temperatury jego powierzchni (maksymalnej, minimalnej oraz ich różnicy) w czasie trwającego 20 minut eksperymentu regulacji stałowartościowej temperatury powierzchni walca na poziom 70°C.

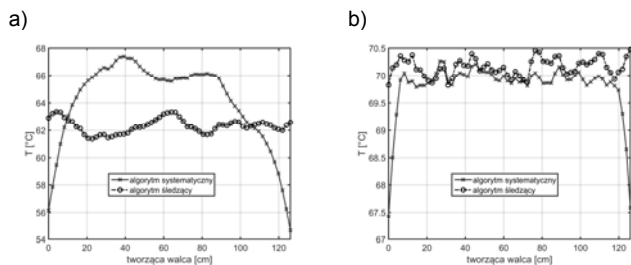


Rys.8. Przebiegi temperatur (uśrednionych wzdłuż obwodu walca) powierzchni walca w czasie nagrzewania (indeksy  $s$  oraz  $p$  oznaczają zastosowanie odpowiednio algorytmu systematycznego pozycjonowania wzbudników oraz algorytmu śledzącego)

Analizując rysunek nr 8 można zauważyć, iż zastosowanie algorytmu śledzącego do pozycjonowania wzbudników powoduje znacznie bardziej równomierne nagrzewanie powierzchni walca. Przy jego użyciu różnica pomiędzy maksymalną a minimalną wartością temperatury powierzchni nie przekracza w czasie trwania całego eksperymentu 3°C, natomiast w przypadku zastosowania algorytmu systematycznego osiąga ok. 14°C. Dodatkowo można zaobserwować, iż różnica ta dla przypadku zastosowania algorytmu systematycznego początkowo wzrasta z upływem czasu, osiągając wartość maksymalną dla czasu  $t_1$  (wynoszącego w przeprowadzonym eksperymentcie ok. 11 minut), a następnie maleje. Wynika to z faktu, iż w początkowej fazie eksperymentu ( $t < t_1$ ) układ sterowania mocą grzewczą, ze względu na dodatnią wartość uchybu temperatury, nie ogranicza wartości mocy grzewczej, nagrzewając całą powierzchnię walca maksymalną dostępną mocą. W czasie  $t > t_1$  część punktów powierzchni

walca osiąga zadaną wartość temperatury, w związku z czym układ sterowania mocą grzejną nagrzewa wówczas tylko obszary powierzchni walca o temperaturach niższych od zadanej wartości temperatury, co powoduje zmniejszanie różnicy pomiędzy maksymalną a minimalną wartością temperatury powierzchni walca.

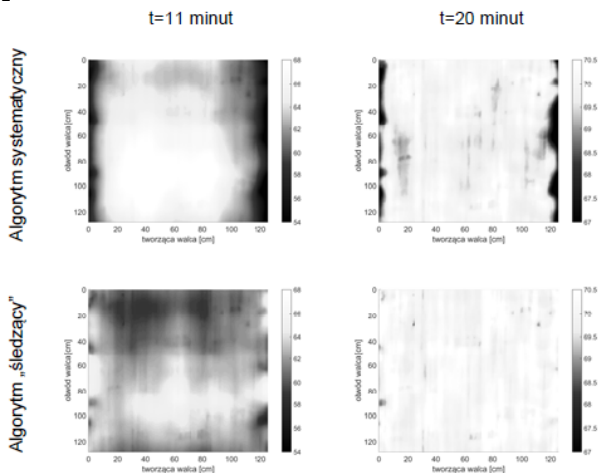
Rysunek 9 prezentuje rozkład temperatury powierzchni walca wzdłuż jego tworzącej dla chwil czasowych  $t_1$  (maksimum różnicy pomiędzy maksymalną a minimalną wartością temperatury powierzchni walca) oraz  $t_2$  (koniec eksperymentu).



Rys.9. Rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca uzyskany : a) – w 11 minucie nagrzewania, b) – w 20 minucie nagrzewania

Wykresy przedstawione na rysunku 9 potwierdzają dużo większą równomierność temperatury powierzchni walca w przypadku pozycjonowania wzbudników przy użyciu algorytmu śledzącego. Ponadto można zauważyć, iż w przypadku użycia algorytmu systematycznego punktami o najniższych wartościach temperatury są obszary brzegowe walca. Wynika to z faktu, iż wartość współczynnika konwekcji dla tych punktów jest zdecydowanie większa niż dla pozostałych punktów powierzchni.

Na rysunku 10 przedstawiono obrazy termowizyjne rozwiniętej powierzchni walca dla chwil czasowych  $t_1$  oraz  $t_2$ .



Rys.10. Rozkłady temperatury powierzchni walca

Ich analiza również potwierdza znacznie większą równomierność wartości temperatur powierzchni walca w przypadku pozycjonowania wzbudników przy zastosowaniu algorytmu śledzącego. Zauważalne różnice temperatur wzdłuż obwodu walca dla chwili czasowej  $t_1$  („dolne” obszary walca mają wyższą temperaturę od „górných”) wynikają najprawdopodobniej z niesymetrii walca i są

likwidowane przez układ regulacji temperatury w stanie quasi-ustalonym.

## Podsumowanie

Rosnące zainteresowanie nagrzewaniem indukcyjnym w przemyśle papierniczym rodzi potrzebę opracowania coraz bardziej zaawansowanych metod regulacji temperatury walców suszących w maszynach papierniczych. Jednym z ciekawych rozwiązań w tym zakresie jest nagrzewanie powierzchni walca za pomocą zestawu ruchomych wzbudników, przemieszczanych wzdłuż tworzącej walca. W artykule przedstawiono dwa algorytmy ruchu wzbudników w takim układzie, analizując ich cechy charakterystyczne. Najprostszym jak się wydaje rozwiązaniem jest ruch o charakterze systematycznym, w którym wzbudniki cyklicznie „przemiatają” powierzchnię walca, generując w jego płaszczu moc grzejną wynikającą z potrzeb regulacji temperatury. Niestety, w takim podejściu istnieje ryzyko pominięcia fragmentów powierzchni walca lub nierównomiernego jej nagrzewania, co wynika ze złożenia liniowych ruchów wzbudnika z obrotowym ruchem walca. Nieco bardziej złożonym rozwiązaniem jest zastosowanie algorytmu o charakterze nadążnym, który powoduje przemieszczanie wzbudników w miejsca o temperaturze najbardziej odbiegającej o zadanej. Tego typu algorytm „Śledzący” wymaga bogatszej informacji o bieżącym rozkładzie temperatury powierzchni walca jednak zapewnia wyższą jakość regulacji temperatury zarówno w stanach statycznych jak i dynamicznych. Zaprezentowane algorytmy zostały przeanalizowane na drodze symulacyjnej oraz poddane weryfikacji eksperymentalnej z wykorzystaniem półprzemysłowego stanowiska badawczego dostępnego w Instytucie Informatyki Stosowanej PŁ.

**Autorzy:** dr inż. Andrzej Frączyk, Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: [andrzej.fracyk@p.lodz.pl](mailto:andrzej.fracyk@p.lodz.pl); dr hab. inż. Jacek Kucharski, Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: [jacek.kucharski@p.lodz.pl](mailto:jacek.kucharski@p.lodz.pl); dr inż. Piotr Urbanek, Instytut Informatyki Stosowanej, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: [piotr.urbanek@p.lodz.pl](mailto:piotr.urbanek@p.lodz.pl).

## LITERATURA

- [1] Kucharski J., Urbanek P., Frączyk A., Jaworski T., Computer-based measurement and control system for induction heating of rotating steel cylinder, *Advances in informatics and control engineering*, Lodz, 2013, 133-174
- [2] Frączyk A., On-off control algorithms for temperature control of steel cylinder with moving inductors, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 2b, 327-330
- [3] Kucharski J., Zgraja J., Urbanek P., Frączyk A., 3D modeling of electromagnetic-thermal phenomena in induction heated rotating steel cylinder, *Automatyka*, T.15 (2011), z.3, 403-411
- [4] Kobos W., Kucharski J., Wireless power supply of mobile inductors for inductive heating of a rotating cylinder, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 2b, 299-302
- [5] Kucharski J., Jaworski T., Frączyk A., Urbanek P., Infra-red thermovision in surface temperature control system, *Computer vision in robotics and industrial applications*, Singapore, 2014, 411-435
- [6] Frączyk A., Kucharski J., Urbanek P., Uproszczony model numeryczny nagrzewanego indukcyjnie obracającego się walca stalowego. Konferencja naukowo-techniczna „Modelowanie i sterowanie procesów elektrotechnicznych”, Kielce 2014, 17-26