

ANDRZEJ FRĄCZYK, PIOTR URBANEK, JACEK KUCHARSKI

Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki
Politechniki Łódzkiej

WYKORZYSTANIE TECHNIK INFORMATYCZNYCH W INDUKCYJNYM NAGRZEWANIU OBRACAJĄCEGO SIĘ WALCA STALOWEGO

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

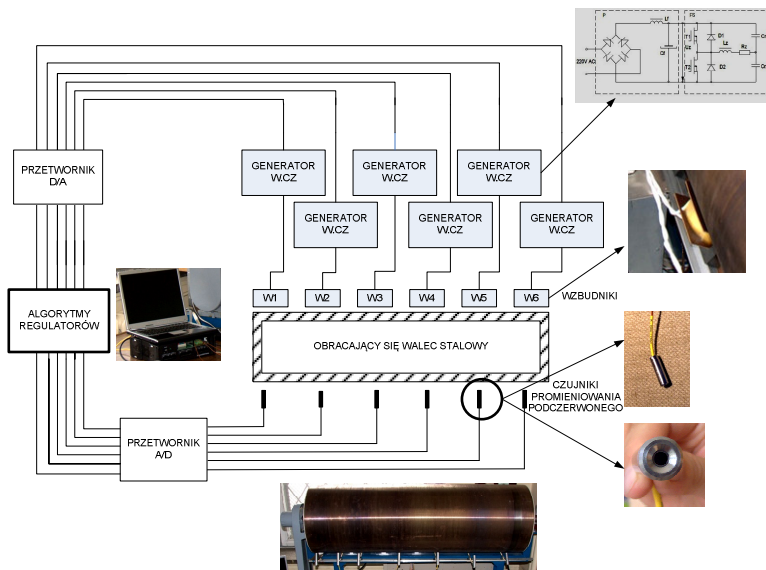
Maszynopis dostarczono: 1. 10. 2010

W artykule przedstawiono prototypowe, wyposażone w automatyczny system pomiaru i regulacji temperatury, stanowisko nagrzewania indukcyjnego obracającego się walca stalowego. Opisano wybrane aspekty pomiaru temperatury jego powierzchni: metodę eliminacji wahań emisyjności powierzchni walca i korekcji jego niskiej wartości oraz automatyczny system stabilizacji mocy dostarczanej do walca. W celu zastosowania precyzyjnej regulacji temperatury powierzchni walca wyznaczono szereg modeli oddających jego właściwości dynamiczne: model numeryczny oraz model w przestrzeni stanów wchodzące między innymi w skład systemu regulacji optymalnej temperatury powierzchni walca. Zaproponowano algorytmy poruszania się jednego lub kilku wzbudników oraz ich wpływ na zmniejszenie różnic temperatury wzdłuż tworzącej walca. Przedstawiono plany modernizacji automatycznego systemu pomiaru i regulacji temperatury powierzchni walca.

1. STANOWISKO NAGRZEWANIA INDUKCYJNEGO OBRACAJĄCEGO SIĘ WALCA STALOWEGO

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. Realizacja tak postawionych celów wymaga wykorzystania w układzie nagrzewania komputerowego systemu pomiarowo-sterującego.

W Katedrze 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 [4,5]. Schemat blokowy półprzemysłowego układu pomiaru i regulacji temperatury przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat blokowy wielosekcyjnego, zamkniętego układu regulacji temperatury powierzchni wirującego walca

Obecnie każda sekcja zamkniętego układu regulacji temperatury składa się z bezstykowego czujnika temperatury, zaimplementowanego regulatora cyfrowego [2,3] podającego standardowy sygnał sterujący (0-10V) do generatora tyrystorowego w.cz., który poprzez wzbudnik wytwarzający pole elektromagnetyczne indukuje tuż pod powierzchnią walca prądy wirowe zwiększające jego temperaturę. W układach tego typu, w zależności od długości walca, liczba sekcji grzejnych może wynosić od kilku do kilkunastu. Testowany układ laboratoryjny składa się z sześciu sekcji.

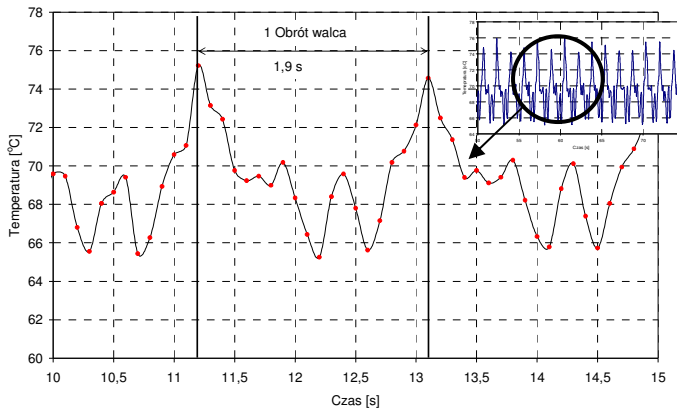
Ważnym elementem układu badawczego jest oparty na łączu Ethernet 10/100 układ gromadzenia danych o nazwie firmowej DaqLab/2000™ posiadający 16-bitowe przetworniki A/C i C/A. Układ ten próbkuje sygnały pomiarowe z częstotliwością do 200kHz, posiada 8 kanałów analogowych kanałów wejściowych, oraz 4 kanały wyjściowe. Do pomiarów temperatury moduł ten wyposażony został w kartę rozszerzającą do termoelementów typu DBK-81 oraz kartę z 7 analogowymi wyjściami napięciowymi DBK-2.

2. WYBRANE ASPEKTY POMIARU TEMPERATURY WALCA I GENEROWANIA MOCY GRZEJNEJ

2.1. Charakterystyka sygnału temperaturowego mierzonego przez bezstykowe czujniki pirometryczne

Sygnał temperaturowy pochodzi z bezstykowych czujników promieniowania podczerwonego, które są tzw. czujnikami radiacyjnymi (mierzącymi pełne widmo promieniowania cieplnego). Na wyjściu czujnika generowany jest sygnał elektryczny zgodny z charakterystyką wybranego typu termoelementu (np. typu K). Jest bardzo użyteczna cecha z punktu widzenia komputerowych systemów zbierania i przetwarzania danych pomiarowych.

Wadą takich czujników jest możliwość stosowania ich do pomiaru temperatury ciał o emisyjności ϵ zbliżonych do ciał szarych ($\epsilon \approx 0,85$). W przypadku walców, których powierzchnia jest często wysokopółkuliwa ($\epsilon \leq 0,3$) powoduje to znaczne zaniżenie mierzonej temperatury. Dodatkowo, jeżeli na skutek procesu technologicznego, powierzchnia walca wzdłuż jego obwodu ulega częściowemu zabrudzeniu, powoduje to lokalne zmiany emisyjności jego powierzchni. Powstaje wtedy zjawisko niekorzystne z punktu widzenia regulacji temperatury - występowania dużych (o amplitudzie nawet do kilkunastu stopni Celsjusza) wahań wskazywanej temperatury. Ilustruje to rysunek 2.



Rys. 2. Pomiar temperatury wirującego walca bezstykowym czunikiem promieniowania podczerwonego

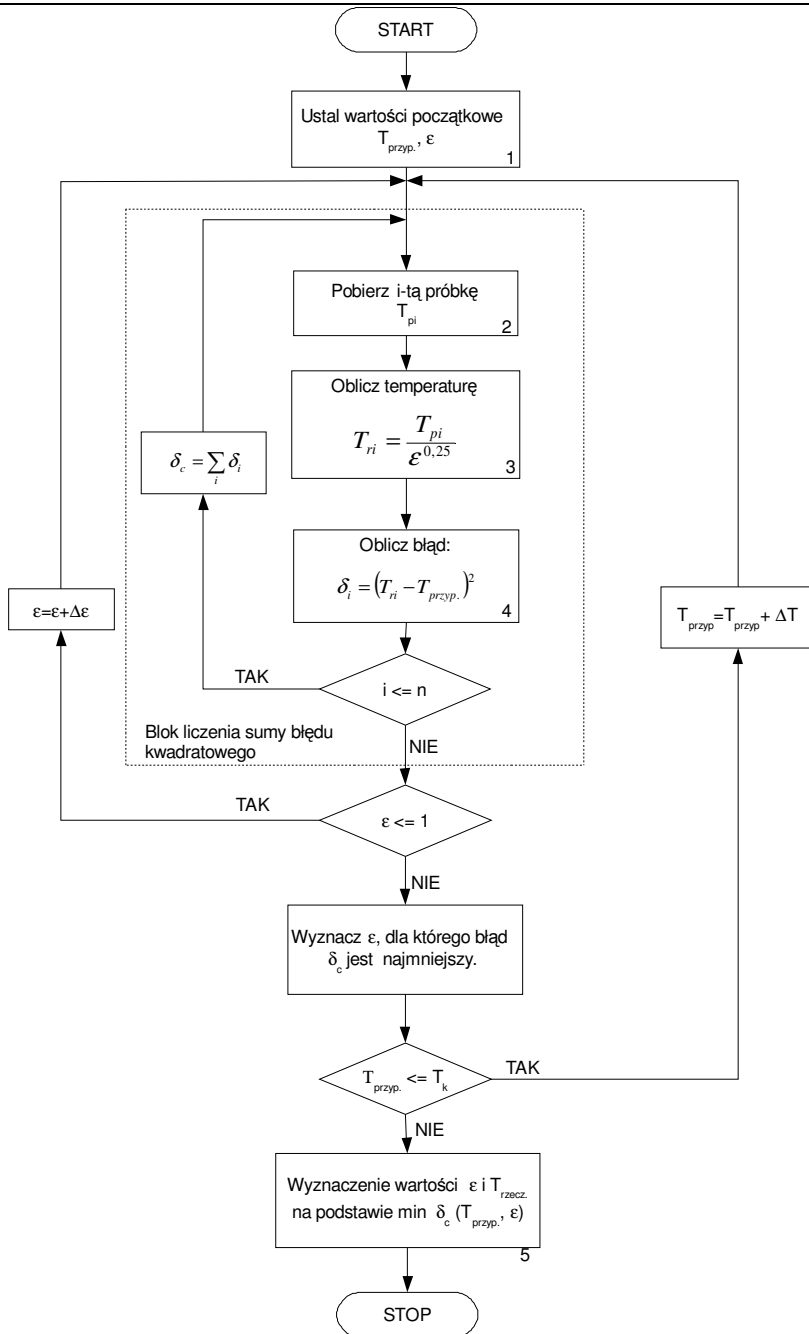
2.2. Algorytm korekcji zmienności współczynnika emisyjności

Niekorzystne zjawiska towarzyszące pomiarom temperatury walca czunikiem bezstykowym można zredukować poprzez zastosowanie algorytmu numerycznego, którego zadaniem jest określenie wartości i zmian emisyjności badanego ciała, a w rezultacie wyznaczenia jego temperatury rzeczywistej. Celem algorytmu jest:

- określenie wartości oraz zmian emisyjności wzdłuż obwodu powierzchni wirującego walca na podstawie znajomości temperatury wskazywanej przez czuniki;
- wyznaczenie na tej podstawie rzeczywistej temperatury badanej powierzchni.

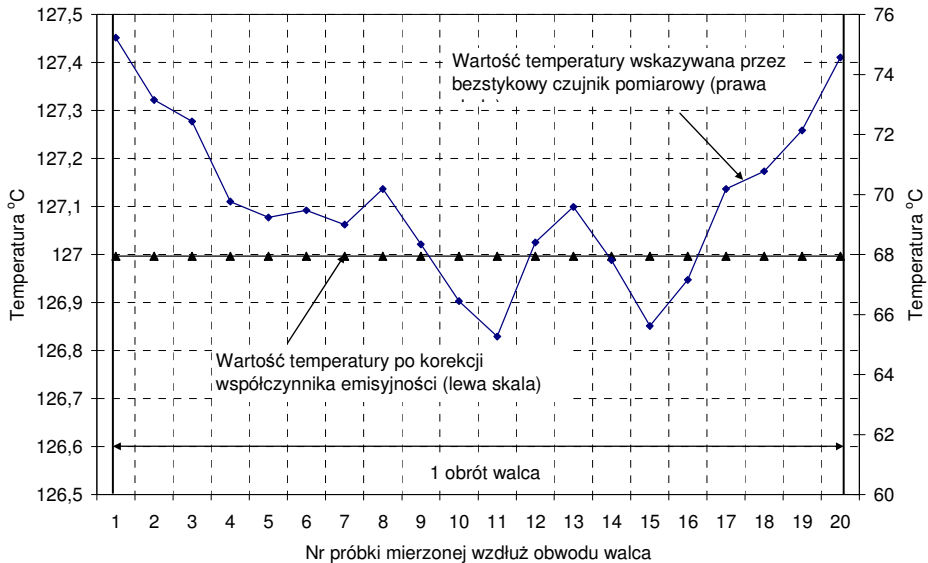
Schemat blokowy algorytmu spełniającego wymienione wyżej kryteria pokazany jest na rysunku 3. Algorytm wymaga podania zakresu przypuszczalnych wartości poszukiwanych temperatur początkowej i końcowej ($T_{przyp.}$, T_k) oraz zakresu możliwych wartości współczynnika emisyjności ϵ . Proponowany algorytm pozwala znacznie zredukować zakłócenia pochodzące od zmiany emisyjności powierzchni badanego ciała, jednak wymaga się, aby jego szybkość działania umożliwiała korekcję emisyjności w czasie rzeczywistym.

Działanie algorytmu można przedstawić wykorzystując zarejestrowany, składający się z 20 próbek, przebieg sygnału pomiarowego z rzeczywistego obiektu (rys. 2).



Rys. 3. Sieć działań algorytmu wyznaczania temperatury rzeczywistej powierzchni wirującego walca

W ten sposób wyznaczono wartości emisyjności w każdej mierzonej próbce na powierzchni walca. Wyniki korekcji przedstawia rysunek 4.

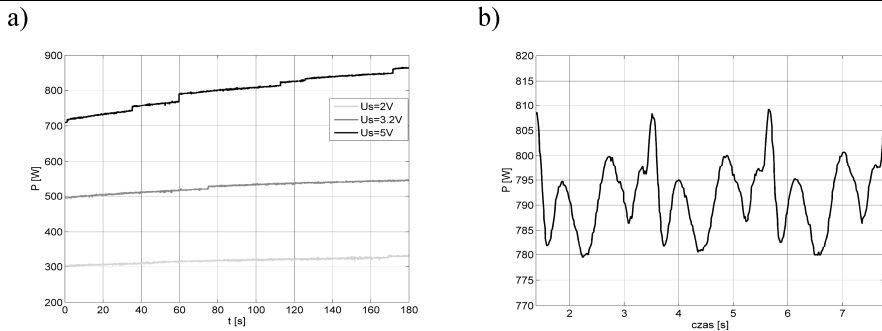


Rys. 4. Porównanie sygnałów z bezstykowego czujnika temperatury przed i po korekcji współczynnika emisyjności wirującego walca

Opracowany algorytm realizuje dwuetapową procedurę optymalizacyjną znajdując rozkład emisyjności wzdłuż obwodu walca, co pozwala wyznaczyć jego rzeczywistą temperaturę. Efektywność metody potwierdzono wykorzystując sygnał pochodzący z rzeczywistego obiektu.

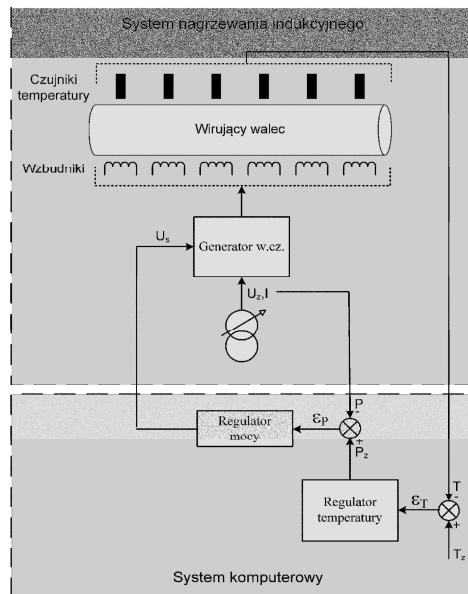
2.3. Niestacjonarność układu generowania mocy dostarczanej do walca

Dokładność wartości mocy grzejnej dostarczanej do rozważanego układu nagrzewania ma niewątpliwą wpływ na uzyskiwaną jakość regulacji temperatury. Niestety, szereg niekorzystnych czynników takich jak niestacjonarność cieplna elementów układu (w tym rozszerzalność termiczna walca) czy zmienność parametrów układu wzbudnik – wsad sprawia, że rzeczywista moc grzejna dostarczana do wsadu w trakcie procesu technologicznego ulega niekontrolowanym zmianom. Takie niekorzystne zjawiska ujawniają się szczególnie wyraźnie np. przy próbie wygenerowania stałej mocy w pewnym okresie czasu (rys. 5a), a także jako efekt obrotu walca (rys. 5b).



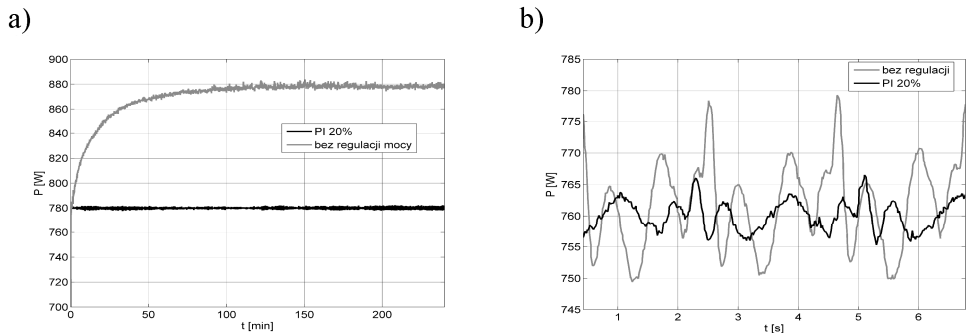
Rys. 5. Niestacjonarność procesu generowania mocy grzewczej: a) zależność mocy od czasu przy stałym napięciu sterującym; b) zależność mocy od fazy obrotu walca (~ 30 obr/min). U_s – napięcie sterujące mocą dostarczaną przez generatory

W celu uzyskania wysokiej jakości regulacji temperatury powierzchni walca niezbędna staje się więc kompensacja tych zmian. Ze względu na wieloczynnikowy charakter przyczyn zmienności mocy generowanej wygodną drogą realizacji tego zadania jest wyposażenie komputerowego układu pomiarowo-sterującego w dodatkową pętlę sprzężenia zwrotnego stabilizującą wartość mocy, przedstawioną na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat blokowy wielokanałowego komputerowego systemu pomiarowo-sterującego współpracującego z układem nagrzewania indukcyjnego wirującego walca

Jako regulator mocy zastosowano algorytm PI, dobrany przy zastosowaniu klasycznych metod syntezy układu regulacji [6]. Na rys. 7a porównano przebiegi mocy wytwarzanej przez generator w.cz. w przypadku braku regulacji mocy przy stałym sygnale sterującym $U_s=5.5$ V odpowiadającym mocy generatora równej 780 W oraz w przypadku stabilizacji mocy na poziomie $P_z=780$ W. Przedstawione wyniki dowodzą skuteczności działania układu regulacji mocy, który kompensuje wolnozmienną niestacjonarność układu generatora (rys. 7a), sięgającą w dłuższym okresie nawet 100 W. Z kolei dynamiczne zmiany mocy wynikające z ruchu obrotowego walca są także znacząco zredukowane, co szczegółowo ilustruje rys. 7b a także jest zauważalne na rys. 7a.

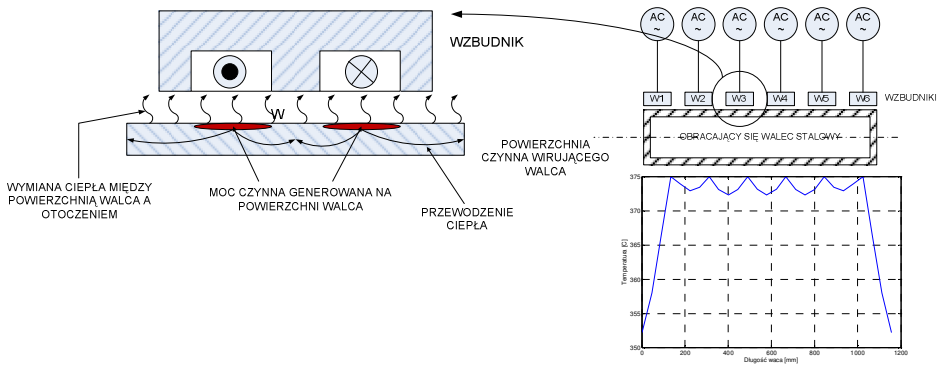


Rys. 7. Efektywność działania układu stabilizacji mocy: a) kompensacja wolnozmiennego dryftu mocy; b) redukcja dynamicznych zmian mocy

3. MODELOWANIE WŁASNOŚCI DYNAMICZNYCH ORAZ REGULACJA TEMPERATURY WALCA

3.1. Model numeryczny

Dla potrzeb badań symulacyjnych własności dynamicznych układu 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 8. Każdy ze wzbudników generuje na powierzchni walca moc czynną zamienianą na energię cieplną. Pomiedzy powierzchnią roboczą walca oraz powierzchniami czołowymi a otoczeniem występuje wymiana ciepła głównie poprzez konwekcję. Model numeryczny powinien odzwierciedlać wymienione wyżej cechy układu zachowując przy tym cechę użyteczności, to znaczy dostatecznej szybkości i dokładności obliczeń. W tym celu wykorzystano metodę różnic skończonych, symulującą jedynie zjawiska cieplne zachodzące w badanym układzie.



Rys. 8. Idea nagrzewania indukcyjnego obracającego się walca stalowego

W modelu tym zakłada się, że wzbudniki umieszczone nad powierzchnią walca generują moc czynną na jego powierzchni a także przyjęto następujące założenia upraszczające:

- prądy wirowe generowane na powierzchni walca zostały zastąpione punktowymi źródłami ciepła o mocy czynnej obliczonej we wcześniejszych symulacjach komputerowych popartych badaniami empirycznymi;
- z uwagi na to, że w trakcie ciągłej pracy temperatura powierzchni walca wynosi od 70 do 300°C i jej wahania nie przekraczają kilkunastu stopni Celsjusza można założyć stałość elektrycznych i cieplnych parametrów materiałowych modelu, przyjmując wartości średnie dla rozważanego przedziału temperatur;
- do badań przyjęto dwuwymiarowy cieplny model numeryczny, zakładając, że na skutek ruchu obrotowego walca moc generowana pod każdym z wzbudników zostaje „rozmyta” wzdłuż jego obwodu. Zatem najistotniejsze z punktu widzenia dynamiki cieplnej obiektu stają się wymiary wzdłuż tworzącej walca oraz wzdłuż grubości jego części roboczej (tzw. płaszcz).

W pozostałych aspektach struktura i dynamika modelu odpowiadają parametrom rzeczywistego obiektu opisanego w rozdziale 1. W warstwie powierzchniowej znajdują się źródła mocy czynnej, których liczbę można dostosować do rodzaju wykonywanego eksperymentu (od 1 do 78).

Weryfikacja doświadczalna przeprowadzona na rzeczywistym obiekcie potwierdziła przydatność powyższego modelu numerycznego do badań nad dynamiką obiektu oraz wpływem ruchu wzbudników na rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca. Schemat połowy modelu numerycznego jest przedstawiony na rysunku 9.

$$c_w \gamma_w \frac{\Delta x}{2} \Delta y \frac{T_{m,n}^{k+1} - T_{m,n}^k}{\Delta \tau} = \lambda \Delta y \frac{T_{m-1,n}^k - T_{m,n}^k}{\Delta x} + \lambda \frac{\Delta x}{2} \frac{T_{m,n+1}^k - T_{m,n}^k}{\Delta y} + \alpha \Delta y (T_\infty - T_{m,n}^k)$$

Wymiana ciepła z powierzchni roboczej i powierzchni bocznych walca

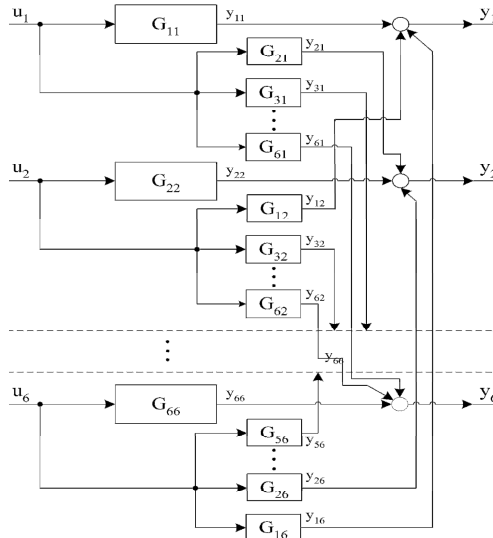
Generowana moc czynna na powierzchni walca

$$\frac{T_{m,n}^{k+1} - T_{m,n}^k}{\Delta \tau} = \frac{p_v}{c_w \gamma_w} + \frac{\lambda}{c_w \gamma_w} \left[\frac{T_{m+1,n}^k + T_{m-1,n}^k - 2T_{m,n}^k}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1}^k + T_{m,n-1}^k - 2T_{m,n}^k}{(\Delta y)^2} \right]$$

Rys. 9. Schemat modelu numerycznego obracającego się walca stalowego użyty do obliczeń określających warunki zasilania walca w celu zapewnienia równomierności rozkładu temperatury na jego powierzchni. Dla lepszej czytelności pokazano połowę długości walca. Oznaczenia symboli użytych we wzorach: α – współczynnik konwekcji [W/(m²K)]. c_w – ciepło właściwe materiału walca, γ_w – gęstość materiału walca [kg/m³], $T_{m,n}^k$ – temperatura w węźle m,n w k-tym kroku iteracyjnym, Δx , Δy – odległości pomiędzy węzłami obliczeniowymi, $\Delta \tau$ – interwał czasu nagrzewania

3.2. Model w przestrzeni stanów i optymalna regulacja temperatury

W celu umożliwienia badań nad możliwościami zastosowania do regulacji temperatury obracającego się walca precyzyjnych algorytmów sterowania takich, jak np. algorytm regulacji optymalnej, minimalizującej przyjęte wskaźniki jakości regulacji, konieczne jest opracowanie modelu analizowanego obiektu w przestrzeni stanu. Bazę jego opracowania może stanowić model transmitancyjny przedstawiony na rysunku 10. W przypadku rozważanego obiektu jego model transmitancyjny jest modelem klasy MIMO o 6-ciu wejściach i 6-ciu wyjściach oraz sprzężeniach występujących pomiędzy poszczególnymi wejściami a wejściami.



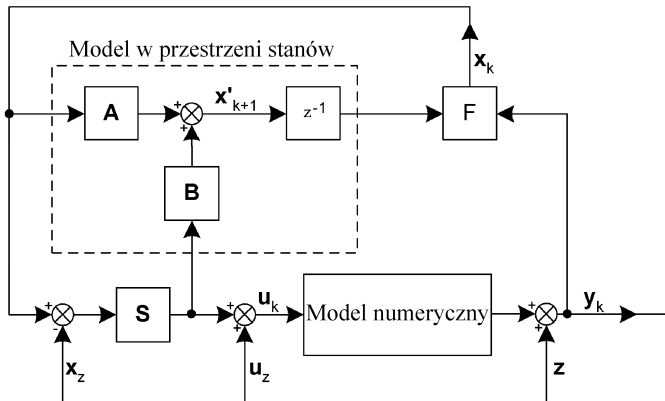
Rys. 10. Schemat blokowy modelu transmitancyjnego indukcyjnie nagrzewanego walca stalowego: u_i – sygnał wejściowy i -tej strefy grzejnej (moc grzejna i -tego wzbudnika), y_i – sygnał wyjściowy i -tej strefy grzejnej (wartość temperatury mierzona przez i -ty czujnik temperatury), G_{ij} – sprzężenie występujące pomiędzy i -tą a j -tą strefą

Bazując na modelu transmitancyjnym, można wyznaczyć model w przestrzeni stanów opisany układem równań 1:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 y_1(k+1) = \left(1 - \frac{\Delta}{N_{11}}\right) \cdot y_1(k) + \left(\frac{\Delta}{N_{11}} - \frac{\Delta}{N_{12}}\right) \cdot y_{12}(k) + \dots \\
 \quad + \left(\frac{\Delta}{N_{11}} - \frac{\Delta}{N_{16}}\right) \cdot y_{16}(k) + \frac{K_{11} \cdot \Delta}{N_{11}} \cdot u_1(k) + \dots + \frac{K_{16} \cdot \Delta}{N_{16}} \cdot u_6(k) \\
 \vdots \\
 y_6(k+1) = \left(1 - \frac{\Delta}{N_{66}}\right) \cdot y_6(k) + \left(\frac{\Delta}{N_{66}} - \frac{\Delta}{N_{61}}\right) \cdot y_{61}(k) + \dots \\
 \quad + \left(\frac{\Delta}{N_{66}} - \frac{\Delta}{N_{65}}\right) \cdot y_{65}(k) + \frac{K_{61} \cdot \Delta}{N_{61}} \cdot u_1(k) + \dots + \frac{K_{66} \cdot \Delta}{N_{66}} \cdot u_6(k) \\
 y_{12}(k+1) = \left(1 - \frac{\Delta}{N_{12}}\right) \cdot y_{12}(k) + \frac{K_{12}}{N_{12}} \cdot u_2(k) \\
 \vdots \\
 y_{65}(k+1) = \left(1 - \frac{\Delta}{N_{65}}\right) \cdot y_{65}(k) + \frac{K_{65}}{N_{65}} \cdot u_5(k)
 \end{array} \right. \quad (1)$$

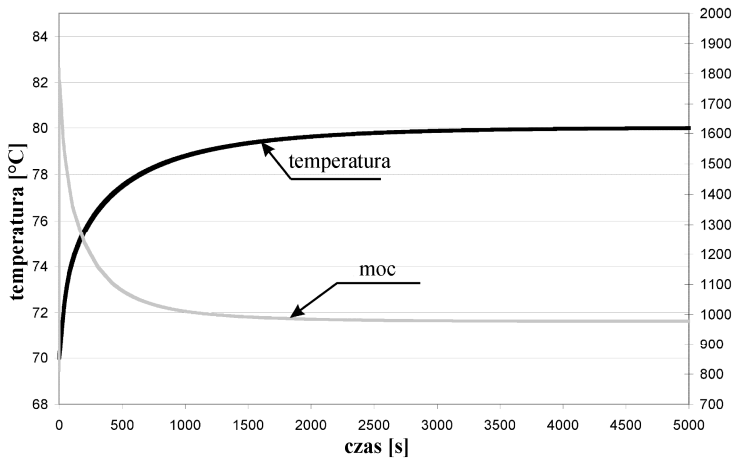
gdzie: y_i – sygnał wyjściowy i -tej strefy grzejnej, u_i – sygnał wejściowy i -tej strefy grzejnej, Δ – okres próbkowania, K_{ij} oraz N_{ij} – odpowiednio wzmocnienia

oraz stałe czasowe inercji bloków z rys. 10. Opóźnienia występujące w układzie można zamodelować poprzez zastosowanie pomocniczych wektorów p , „transportujących” wartości wymuszeń przez wymaganą liczbę kroków symulacji. Wykorzystując model obiektu regulacji w przestrzeni stanów dokonano syntezy układu regulacji optymalnej przedstawionego na rysunku 11 [2].



Rys. 11. Schemat blokowy układu regulacji optymalnej temperatury walca

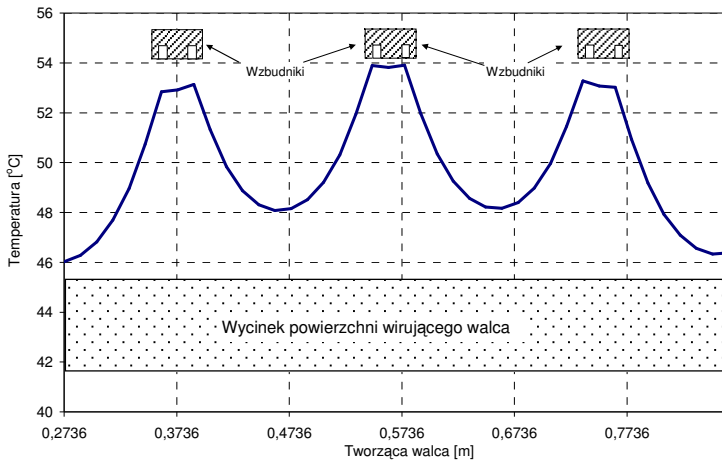
Uzyskane wyniki symulacji regulacji temperatury przedstawia rysunek 12.



Rys. 12. Optymalna regulacja temperatury wirującego walca

4. REDUKCJA NIERÓWNOMIERNOŚCI ROZKŁADU TEMPERATURY WZDŁUŻ TWORZĄCEJ WALCA POPRZEZ ZASTOSOWANIE RUCHOMYCH WZBUDNIKÓW

Wyniki wcześniejszych prac świadczą o nierównomierności rozkładu temperatury wzdłuż tworzącej walca spowodowanej wydzielaniem się mocy grzewczej jedynie w obszarach położonych pod wzbudnikami (rys. 13). Zmniejszenie tej nierównomierności możliwe jest poprzez znaczące zwiększenie liczby wzbudników umieszczonych nad powierzchnią walca. Ponieważ takie rozwiązanie jest mało praktyczne, zaproponowano zastosowanie wzbudników o zmiennym położeniu względem tworzącej walca. Cykliczna zmiana położenia wzbudnika daje efekt dostarczania mocy czynnej generowanej na powierzchni walca wzdłuż całej jego długości, co powinno przynieść skutek znacznego zmniejszenia nierównomierności temperatury wzdłuż jego tworzącej.



Rys. 13. Przykładowy rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca pomiędzy sekcjami stacjonarnych wzbudników ogrzewających wirujący walec

Jako kryterium oceny nierównomierności temperatury wzdłuż tworzącej walca przyjęto różnicę pomiędzy największą i najmniejszą wartością temperatury wzdłuż tworzącej walca w stanie cieplnie quasi-ustalonym:

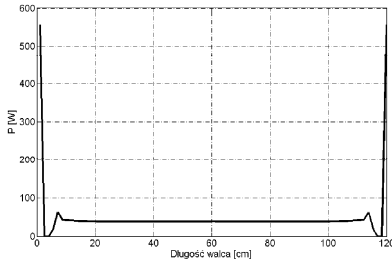
$$R = \max(T_{i,k}) - \min(T_{i,k}) \quad (2)$$

gdzie: i – numer elementu w modelu numerycznym, k – czas próbkowania.

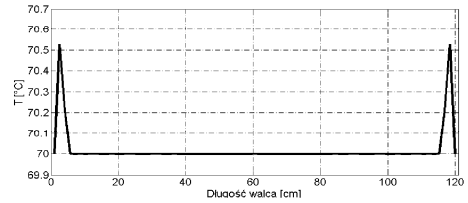
Wartość współczynnika R stanowi parametr w procesie optymalizacji rozkładu mocy dostarczanej do walca ze względu na równomierność rozkładu

temperatury. Wynik obliczeń rozkładu mocy oraz wynikający z niego rozkład temperatury przedstawiono na rysunku 14.

a)



b)



Rys. 14. Obliczony rozkład mocy czynnej zasilającej wałek zapewniający najkorzystniejszy rozkład temperatury na jego powierzchni (a). Rozkład temperatury na powierzchni walca zasilanego obliczoną mocą idealną (b)

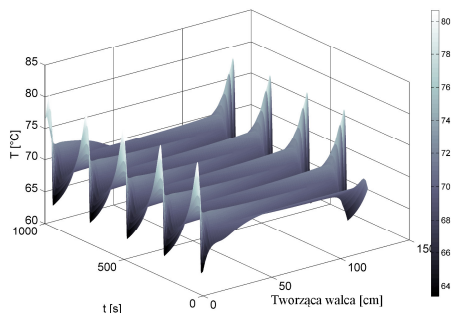
Z rysunku 14 wynika, że wymuszenie na powierzchni walca rozkładu mocy przedstawionej na rysunku 14a daje nierównomierność rozkładu temperatury na poziomie $R=0,5^{\circ}\text{C}$ wzdłuż tworzącej walca.

4.1. Nagrzewanie walca za pomocą ruchomego wzbudnika

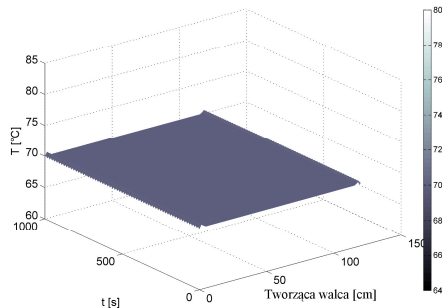
Do rozważań przyjęto, że ruch wzbudnika wzdłuż tworzącej walca odbywa się cyklicznie oraz że moc czynna dostarczana jest do wzbudnika w sposób nieprzerwany. Praktyczna realizacja zasilania mocą grzejną, której rozkład został określony w poprzednim punkcie nie jest możliwa z uwagi na znacznie większe od punktowego źródła ciepła rozmiary rzeczywistych wzbudników. Można jednak uzyskać efekt „rozmycia” mocy grzejnej poprzez odpowiedni ruchu wzbudnika wzdłuż tworzącej walca.

Przykładowe zmiany temperatury powierzchni walca w czasie występujące w przypadku nagrzewania jednym ruchomym wzbudnikiem przedstawiono na rysunku 15.

a)

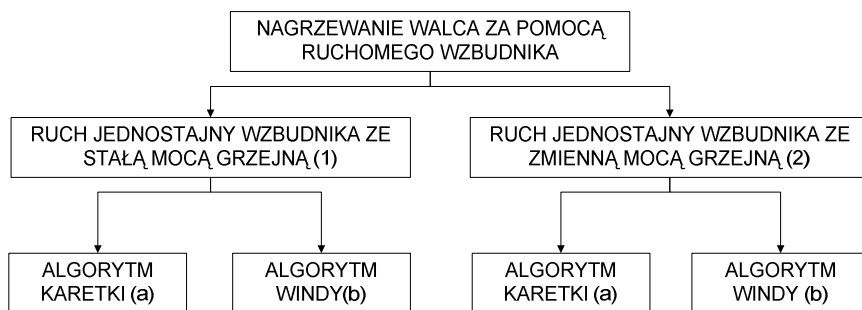


b)



Rys. 15. Zmiany temperatury powierzchni walca nagrzewanych jednym ruchomym wzbudnikiem przesuwanym według algorytmu „windy” z prędkościami: a – 1cm/s, b – 15cm/s

Na rysunku 16 przedstawiono fragment przyjętej klasyfikacji metod poruszania wzbudnika i jego zasilania wykorzystywanych w niniejszym artykule.



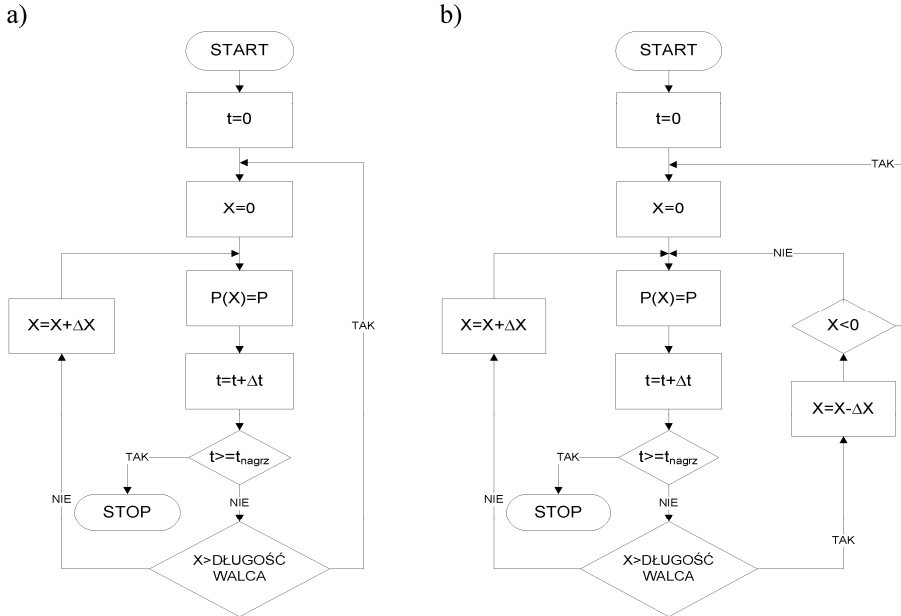
Rys. 16. Warianty nagrzewania walca za pomocą ruchomego wzbudnika

Chcąc ocenić w możliwie ogólny sposób wpływ wprowadzenia ruchomego wzbudnika na jakość nagrzewania w badaniach ograniczono się do dwóch rodzajów ruchu o charakterze uporządkowanym i cyklicznym, tj. tzw. algorytmu „karetki” i algorytmu „windy”. Sieci działań ilustrujące praktyczną realizację obu tych algorytmów przedstawiono na rysunku 17.

W przypadku nagrzewania walca metodami 2a i 2b (rysunek 16) w sieci działań na rysunkach 17a i 17b zmienia się jedynie sposób dostarczania mocy, który zależy od położenia X wzbudnika na powierzchni walca. Wynika on z rozkładu mocy czynnej na powierzchni walca przedstawionej na rysunku 14a. Zatem w tym przypadku blok dostarczania mocy będzie zawierał wyrażenie:

$$P(X) = P_{\text{var}}(X) \quad (3)$$

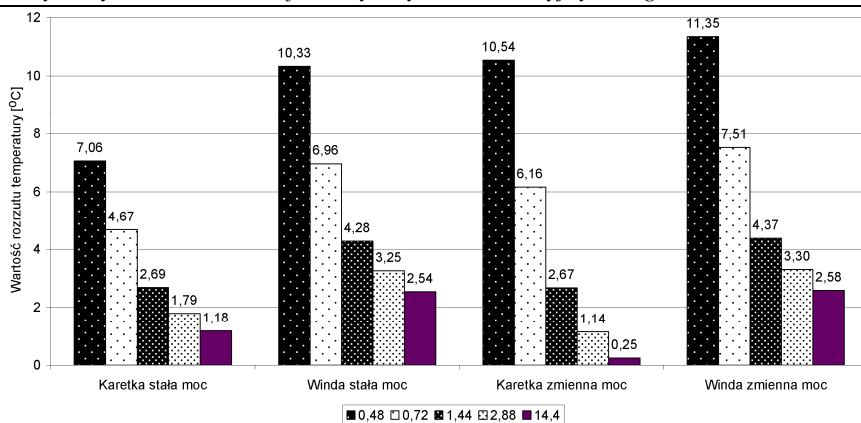
gdzie: $P_{\text{var}}(X)$ jest wartością mocy czynnej wyznaczonej dla każdego elementu X przedstawioną na rysunku 14a.



Rys. 17. Sieć działań algorytmów ruchu wzbudnika zasilanego stałą mocą nad powierzchnią walca, a) algorytm „karetki”, b) algorytm windy. X – odległość wzdłuż tworzącej walca

Wykorzystując opisany w punkcie 4.1 model numeryczny przeprowadzono szereg symulacji procesu nagrzewania indukcyjnego wirującego walca wprowadzając efekt ruchu wzbudnika poprzez odpowiednie aktywowanie źródeł ciepła w powierzchniowych elementach modelu. Zrealizowano oba przedstawione w diagramie na rysunku 17 algorytmy ruchu, uwzględniając dodatkowo różne wartości prędkości przemieszczania się wzbudnika. Symulacją objęto pełny cykl rozgrzewania walca od stanu zimnego, a szczegółowej analizie poddano rozkład temperatury w stanie ustalonym. Zbiorcze wyniki obliczeń pokazane są na rysunku 18.

Przedstawione wyniki wskazują, że możliwe jest uzyskanie zadanego „ciągłego” rozkładu mocy wzdłuż tworzącej walca poprzez nagrzewanie walca pojedynczym ruchomym wzbudnikiem. Co prawda w badaniach ograniczono się do rozkładu mocy zapewniającego równomierny rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca, nie mniej jednak ogólność przeprowadzonych rozważań pozwala sądzić, że wniosek taki jest słuszny dla dowolnego zadanego profilu temperatury i związanej z nim mocy.



Rys. 18. Wartość rozrzutu temperatury na powierzchni wirującego walca w zależności od wariantu nagrzewania oraz prędkości wzbudnika wyrażonej w cm/s

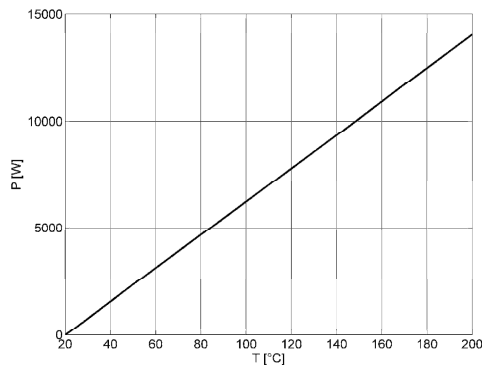
Wartości liczbowe wskazują, że dokładność realizacji zadanego rozkładu mocy zależy w naturalny sposób od szybkości poruszania się wzbudnika, a także od specyfiki jego ruchu i sposobu zasilania. W zakresie przeprowadzonych symulacji widać, że najkorzystniejsze efekty uzyskuje się stosując ruch wzbudnika zgodny z algorytmem „karetki”, przy zasilaniu mocą wynikającą z jej optymalnego rozkładu (rys.14a.). Znajduje to swoje intuicyjne potwierdzenie w charakterze ruchu „karetki”, w którym zapewnione jest cykliczne, równomierne „odświeżanie” generowania mocy grzejnej w poszczególnych punktach walca (na tym tle nieco gorzej prezentuje się algorytm „windy”, co także ma swoje intuicyjne uzasadnienie). Przy odpowiednio wysokiej prędkości ruchu dokładność odwzorowania zadanego rozkładu temperatury jest w tym wypadku wyższa ($R=0,25^{\circ}\text{C}$) od tej uzyskiwanej przy równomiernym, hipotetycznym rozkładzie mocy generowanym przez 78 wzbudników ($R=1,1^{\circ}\text{C}$). Z kolei duża zgodność wartości rozrzutu w tym hipotetycznym przypadku i w przypadku zasilania stałą mocą wzbudnika poruszającego się ruchem „karetki” ($R=1,18^{\circ}\text{C}$) potwierdza poprawność przeprowadzonych symulacji. Ponadto we wszystkich analizowanych przypadkach uzyskiwana jakość nagrzewania jest bardzo wysoka w porównaniu z nagrzewaniem walca nieruchomymi wzbudnikami (rys.13) biorąc pod uwagę fakt, że w każdym z nich w procesie nagrzewania wykorzystywany jest tylko jeden wzbudnik.

4.2. Nagrzewanie walca za pomocą wielu ruchomych wzbudników

Jak wspomniano wcześniej, w przypadku nagrzewania walca jednym wzbudnikiem w celu uzyskania równomiernego rozkładu temperatury na odpowiednio wysokim poziomie należy zastosować wzbudnik o wystar-

czającej mocy (co implikuje jego dość znaczne gabaryty oraz masę) poruszany z dość znaczną prędkością. W praktyce może być to trudne lub niemożliwe do zrealizowania. Rozwiązanie tego problemu może stanowić zastosowanie kilku ruchomych wzbudników. Parametrami, których wpływ na równomierność rozkładu temperatury należy przeanalizować są: liczba wzbudników, maksymalna moc pojedynczego wzbudnika, prędkość wzbudnika oraz, w przypadku stosowania więcej niż dwóch wzbudników, długości stref walca, które są nagrzewane przez poszczególne wzbudniki.

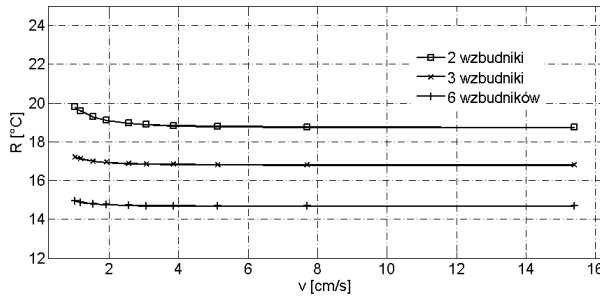
Zwiększenie liczby wzbudników umożliwia zmniejszenie wartości mocy, jaką musi dostarczyć pojedynczy wzbudnik oraz zmniejszenie prędkości, z jaką wzbudniki są przesuwane. Na rysunku 19 przedstawiono zależność sumarycznej mocy, jaka musi zostać dostarczona przez wzbudniki do walca, od wartości równomiernego poziomu temperatury, jaki chcemy uzyskać na jego powierzchni.



Rys. 19. Zależność wymaganej sumarycznej mocy dostarczanej do obiektu od poziomu temperatury jego powierzchni

Rysunek 19 pozwala na wyznaczenie minimalnej liczby wzbudników oraz ich mocy umożliwiających uzyskanie na powierzchni walca równomiernego rozkładu temperatury na wymaganym poziomie.

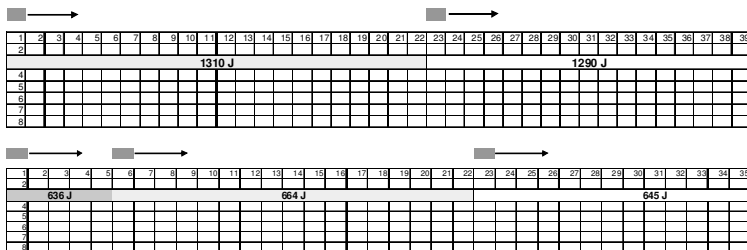
Kolejnym parametrem mającym istotny wpływ na równomierność rozkładu temperatury na powierzchni walca jest prędkość wzbudnika. Na rysunku 20 przedstawiono zależność współczynnika R od prędkości dla różnej liczby wzbudników, dysponujących nieograniczoną mocą grzejącą.



Rys. 20. Wartość współczynnika R w zależności od liczby wzbudników dysponujących ograniczoną mocą oraz ich prędkości liniowej nad powierzchnią walca

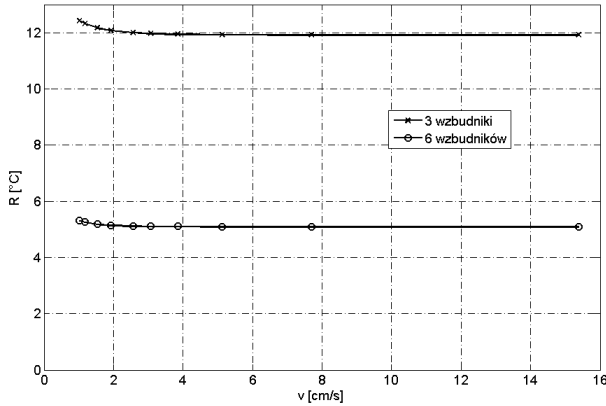
Z rysunku 20 widać, że wartość współczynnika R, w przyjętym zakresie analizowanych prędkości wzbudników, zależy głównie od liczby poruszających się źródeł ciepła. W badaniach ograniczono moc czynną źródeł ciepła do 1500 watów. Jest to wariant możliwy do praktycznej realizacji.

Kolejnym parametrem mającym wpływ na równomierność rozkładu temperatury jest, w przypadku zastosowania więcej niż dwóch wzbudników, długość poszczególnych stref wzbudnika. W wariantach tym wykonano obliczenia zapotrzebowania na energię poszczególnych stref walca. Długości stref zależą od intensywności wymiany ciepła z powierzchni roboczych i bocznych obracającego się walca. Sprawdzone dwie możliwości zasilania walca: trzema i sześcioma wzbudnikami. Obliczone wartości zapotrzebowania na energię cieplną oraz długości stref poruszania się wzbudników przedstawia rysunek 21.



Rys. 21. Długości stref poruszania się 3 i 6 wzbudników zależne od zapotrzebowania na energię cieplną. Rysunek przedstawia model połowy długości walca

Zależność wartości współczynnika R od liczby wzbudników oraz ich prędkości przedstawia rysunek 22.



Rys. 22. Zależność wartości współczynnika R od liczby wzbudników oraz ich prędkości nad powierzchnią walca

Z obliczeń wynika, że w przypadku właściwego określenia długości poszczególnych stref, nierównomierność rozkładu temperatury wzdłuż tworzącej walca zależy głównie od liczby wzbudników. Godnym uwagi jest jednak fakt znacznego zmniejszenia nierównomierności rozkładu temperatury w porównaniu z przypadkiem, kiedy długości poszczególnych stref walca były jednakowe (rys. 20), widoczny zwłaszcza dla przypadku nagrzewania sześcioma wzbudnikami.

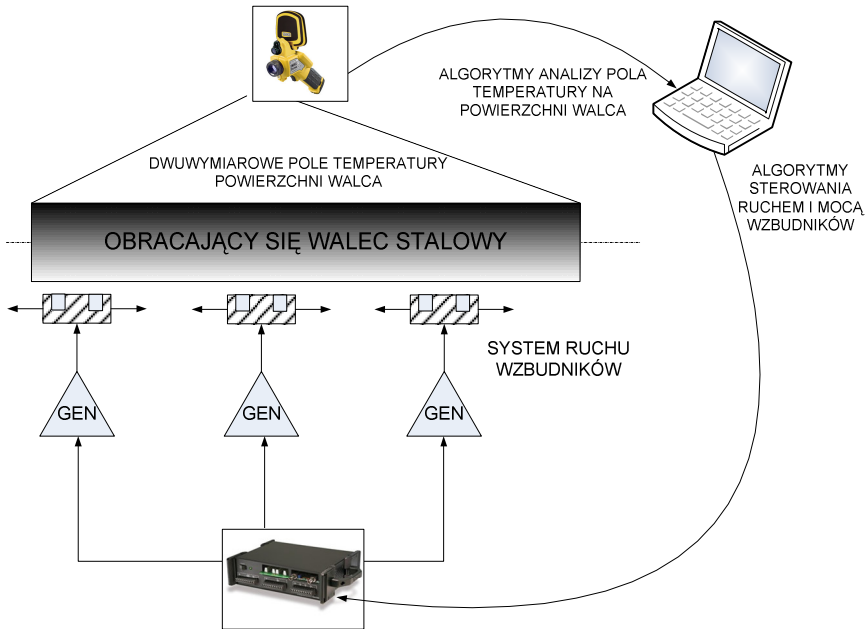
5. PLANY BADAWCZE

Zrealizowane dotychczas prace badawcze i zaprezentowane powyżej wyniki oraz zebrane doświadczenia pozwoliły sformułować nowe kierunki badań, zmierzających do uzyskania jeszcze wyższej jakości działania układu nagrzewania indukcyjnego wirującego walca. Główną ideą dalszych prac jest zrealizowanie układu regulacji temperatury wykorzystującego bogatszą informację o aktualnej temperaturze powierzchni walca (pole temperatury) i jednocześnie mającego możliwość wpływania nie tylko na moc wzbudników, ale także na ich położenie wzdłuż tworzącej walca. Planowana rozbudowa i rozwój układu obejmuje między innymi:

- zastąpienie punktowych czujników temperatury kamerą termowizyjną pozwalającą uzyskać pełny, dwuwymiarowy obraz pola temperatury na powierzchni walca;
- budowę sterowanego komputerowo systemu pozycjonowania wzbudników nad powierzchnią walca;

- opracowanie algorytmów pozwalających na przetwarzanie i analizę obrazu pola temperatury oraz sterowanie ruchem wzbudników i ich mocą na podstawie informacji obrazowej uzyskanej z kamery termowizyjnej. W algorytmach tych wykorzystane zostaną metody inteligencji obliczeniowej (logika rozmyta, sztuczne sieci neuronowe), jako wygodne narzędzie przetwarzania informacji o charakterze nieprecyzyjnym.

Na rysunku 23 przedstawiono schematycznie układ nagrzewania walca z uwzględnieniem planowanych nowych elementów.



Rys. 23. Projektowany system sterowania dwuwymiarowym polem temperatury na powierzchni wirującego walca

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, 2008, str. 180-183.
- [2] **Frączyk A., Urbanek P., Kucharski J.:** Modelling and optimal temperature control of induction heated rotating steel cylinder. *13th IEEE IFAC International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*, Szczecin, 2007, pp. 351-355.

- [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, Słok, 18-20 czerwca 2008, str. 841-852.
- [5] **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, Słok, 18-20 czerwca 2008.
- [6] **Michalski L, Kuźmiński, K. Sadowski J.:** Regulacja temperatury urządzeń elektrotermicznych. WNT, 1981.

WYKORZYSTANIE TECHNIK INFORMATYCZNYCH W INDUKCYJNYM NAGRZEWANIU OBRACAJĄCEGO SIĘ WALCA STALOWEGO

Abstract

The paper presents the prototype stand of induction heating of a rotating steel cylinder, equipped with automatic system for temperature measurement and control. Chosen aspects of its temperature surface measurement have been described. Based on the optimization methods the elimination of fluctuations and low value of cylinder surface emissivity have been proposed. The paper presents also the automatic system stabilizing the power delivered to the cylinder, eliminating its nonstationarity. In order to identify dynamic properties of the cylinder-inductors system, several mathematical models describing its reaction to typical excitation signals have been proposed.

The most important of them are: the numerical model and the state space model which are included in the optimal temperature control system of cylinder surface. The analysis of non-uniformity of temperature distribution along the cylinder axis for fixed inductors - cylinder position have been presented. Algorithms for moving one or more inductors and their influence on reducing the temperature differences along a cylinder have been described. The future plans on modernization of the automated system for measurement and control of the surface temperature of the cylinder have also been presented.

Politechnika Łódzka
Katedra Informatyki Stosowanej