

Piotr Urbanek\*, Andrzej Frączyk\*, Jacek Kucharski\*

## **Kształtowanie profilu pola temperatury nagrzewanego indukcyjnie wsadu za pomocą ruchu wzbudnika**

### **1. Wprowadzenie**

Nagrzewanie indukcyjne różnego typu wsadów metalowych posiada wiele zalet, z których najważniejsze to duża szybkość i wysoka sprawność nagrzewania. Jednak w układach ogrzewających ciała będące w ruchu istnieje konieczność generowania pola elektromagnetycznego o dominującej składowej natężenia pola magnetycznego prostopadłej do powierzchni wsadu. Zapewniająca to konstrukcja wzbudnika powoduje jednak znaczne nierównomierności rozkładu mocy generowanej we wsadzie, a co za tym idzie – nierównomierny rozkład temperatury wsadu. Przykładowy model numeryczny układu wzbudnik-wsad w nagrzewaniu wirującego walca stalowego przedstawiono na rysunku 1a, a występujący w tym przypadku rozkład mocy we wsadzie na rysunku 1b.

Nierównomierny rozkład mocy oznacza w konsekwencji nierównomierny rozkład temperatury pod wzbudnikiem. Sytuację tę pogarsza fakt, że w praktycznych zastosowaniach nagrzewania indukcyjnego obracających się walców stalowych wykorzystywanych np. w przemyśle papierniczym, gumowym czy tekstylnym konieczne jest rozmieszczanie wzdłuż tworzącej walca wielu sekcji wzbudników. Ilustruje to rysunek 2. W wielu technologiach taka nierównomierność rozkładu temperatury wzdłuż tworzącej walca jest niedopuszczalna, a stosowanie różnego rodzaju wielowymiarowych układów sterowania nie daje możliwości pełnej eliminacji tych niekorzystnych zjawisk [1, 2]. Wydaje się więc zasadne w takich przypadkach wprowadzenie wzbudników o zmiennym położeniu względem tworzącej walca.

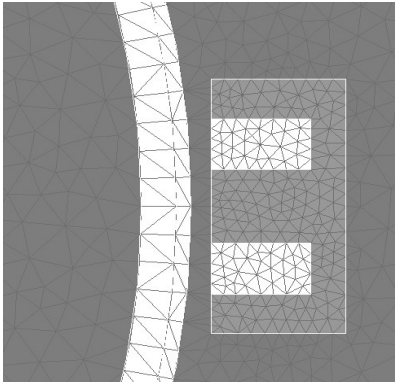
W artykule przedstawiono analizę wpływu ruchu wzbudnika na jakość nagrzewania w tego typu układach. Przedstawiono korzyści oraz ograniczenia metody. Realizacja tego celu wymagała budowy modelu numerycznego układu grzejnego uwzględniającego możliwość generowania mocy w dowolnym miejscu na powierzchni wsadu. Model jest użyteczny do rozwiązania problemu odwrotnego polegającego na wyznaczeniu gęstości

---

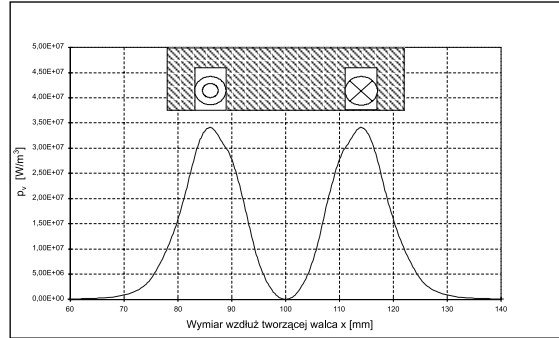
\* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka

rozkładu mocy we wsadzie zapewniającego zadany profil temperatury. W dalszej kolejności model ten może stać się podstawą syntezy układu sterowania ruchem wzbudnika i generowanej przez niego mocy grzejnej.

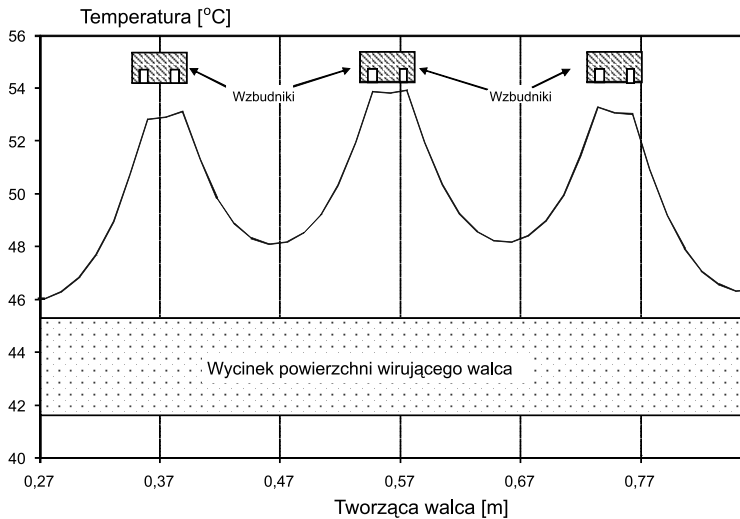
a)



b)



**Rys. 1.** Model numeryczny nagrzewania indukcyjnego walca stalowego (a), rozkład obliczonej mocy objętościowej na powierzchni walca pod wzbudnikiem (b)



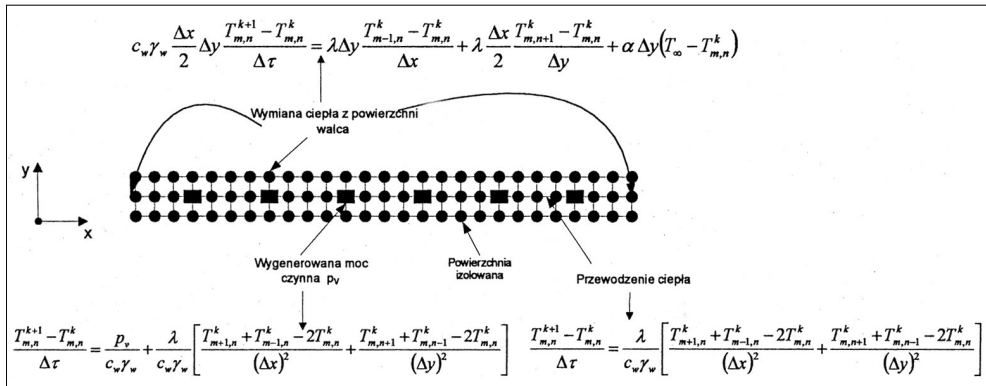
**Rys. 2.** Rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca przy nagrzewaniu wieloma sekcjami wzbudników

## 2. Model numeryczny układu grzejnego

Do badań wykorzystano, bazujący na idei różnic skończonych, numeryczny model nagrzewania indukcyjnego obracającego się walca stalowego [3]. W modelu tym zakłada się,

że wzbudniki umieszczone nad powierzchnią walca generują moc grzejącą tuż pod jego powierzchnią. Jest to przybliżenie istotnej cechy nagrzewania indukcyjnego, w którym poprzeczna fala elektromagnetyczna wnika w strukturę walca, wytwarzając tuż pod jego powierzchnią (na tzw. głębokości wnikania) prądy wirowe będące źródłami ciepła.

Model numeryczny uwzględnia ponadto inne ważne cechy procesu nagrzewania wirującego walca, takie jak przewodzenie ciepła wewnątrz materiału (model o stałych rozłożonych) oraz intensywną wymianę ciepła z powierzchni górnej i powierzchni bocznych do otoczenia. Model ten wraz z równaniami opisującymi generowanie i wymianę ciepła przedstawiony jest na rysunku 3.



**Rys. 3.** Schemat modelu numerycznego obracającego się walca stalowego użyty do obliczeń określających warunki zasilania walca w celu zapewnienia równomierności rozkładu temperatury na jego powierzchni. Oznaczenia symboli użytych we wzorach:  $\alpha$  – współczynnik konwekcji [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ],  $c_w$  – ciepło właściwe materiału walca,  $\gamma_w$  – gęstość materiału walca [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $T_{m,n}^k$  – temperatura w węźle  $m,n$  w  $k$ -tym kroku iteracyjnym,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  – odległości pomiędzy węzłami obliczeniowymi,  $\Delta \tau$  – interwał czasu nagrzewania.

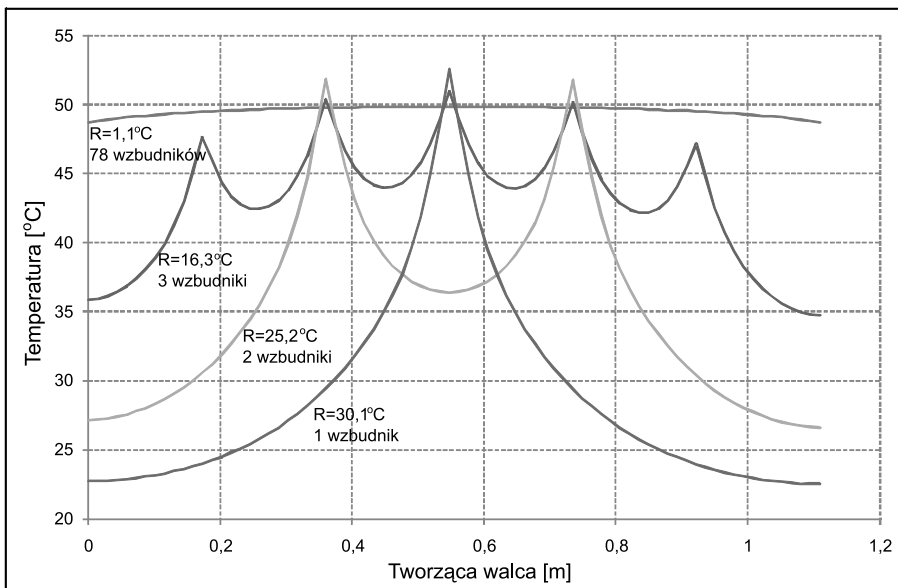
Struktura i dynamika modelu odpowiadają parametrom rzeczywistego obiektu wykorzystywanego do badań [2] i zawiera 624 elementy (78 wzdłuż tworzącej walca, 8 wzdłuż grubości płaszcza walca). W warstwie tuż pod powierzchnią znajdują się źródła mocy czynnej, z możliwością dostosowywania ich liczby do potrzeb wynikających z rodzaju eksperymentu (od 78 do 1).

### 3. Rozkład mocy generowanej pod powierzchnią walca zapewniający równomierny rozkład temperatury wzdłuż jego tworzącej

Jak łatwo przewidzieć, istnieje naturalna zależność pomiędzy liczbą wzbudników ogrzewających walec ustawionych wzdłuż jego tworzącej a równomiernością uzyskiwane-

go profilu temperatury. W celu ilościowego przeanalizowania tej zależności przyjęto jako kryterium oceny rozrzut temperatury na długości walca zdefiniowany jako różnica pomiędzy największą i najmniejszą wartością temperatury wzdłuż tworzącej walca w stanie cieplnie ustalonym. Wybór takiego kryterium spowodowany jest łatwością przyszłej weryfikacji doświadczalnej obliczeń na rzeczywistym obiekcie.

Na rysunku 4 przedstawiono kilka przykładowych rozkładów temperatury wzdłuż tworzącej walca dla różnej liczby zastosowanych wzбудników, generujących jednakową moc grzejną. Jak widać, w skrajnych przypadkach wartość rozrzutu  $R$  może przekraczać  $30^{\circ}\text{C}$  przy ogrzewaniu walca jednym wzбудnikiem i maleje do  $1,1^{\circ}\text{C}$  w przypadku nagrzewania za pomocą dużej liczby (78) małych źródeł ciepła, stanowiących z pewnym przybliżeniem moc rozłożoną w sposób ciągły na jego powierzchni. Oczywiście ten ostatni przypadek jest nierealizowalny fizycznie, ale stanowi ważne odniesienie dla innych sposobów minimalizowania wartości rozrzutu temperatury wzdłuż tworzącej walca. Łatwo bowiem przewidzieć, iż istnieje taki ciągły rozkład mocy, który zapewni równomierny lub inny zadany rozkład temperatury.

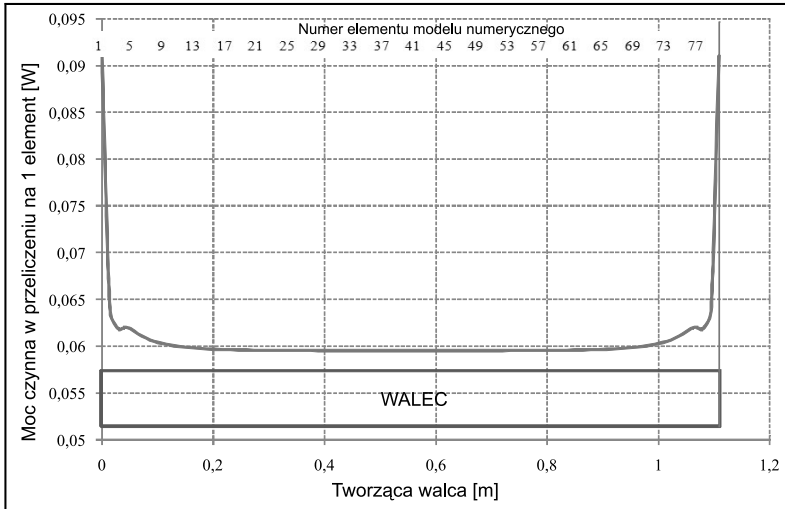


**Rys. 4.** Rozkład temperatury w stanie cieplnie ustalonym w przypadku zasilania układu 1, 2, 5 oraz 78 wzbudnikami (ciągły rozkład mocy)

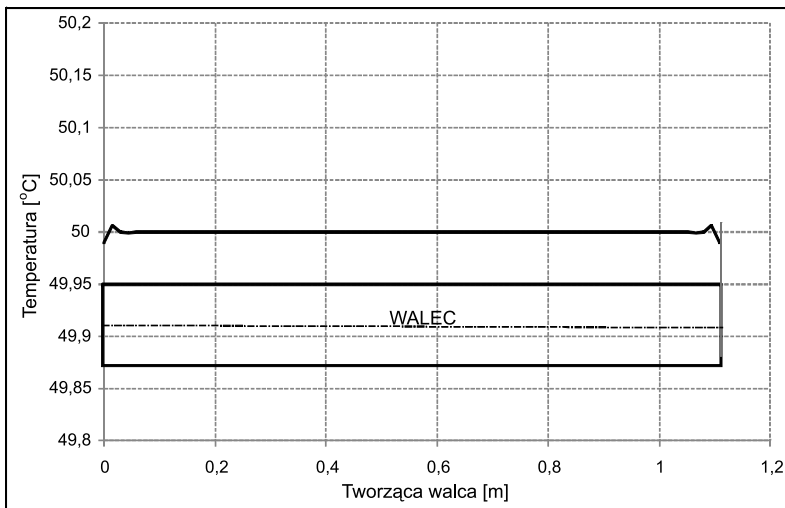
Na rysunku 4 można zauważyć, że w przypadku zasilania wszystkich 78 wzbudników jednakową mocą, z uwagi na specyficzny charakter wymiany ciepła pomiędzy powierzchnią czołową i powierzchniami bocznymi walca wartość temperatury ulega obniżeniu na krańcach układu, powodując wspomniany rozrzut temperatury. Wynika stąd, że w celu uzyskania równomiernego rozkładu temperatury należy generować nieco większą moc na

brzegach walca. Na drodze obliczeniowej podjęto próbę wyznaczenia takiego „optymalnego” rozkładu mocy cieplnej, a wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 5.

Rozkład temperatury w stanie cieplnie ustalonym obliczony na podstawie wyznaczonej mocy przedstawia rysunek 6.



Rys. 5. Obliczony rozkład mocy czynnej zasilającej walec zapewniający najkorzystniejszy rozkład temperatury na jego powierzchni

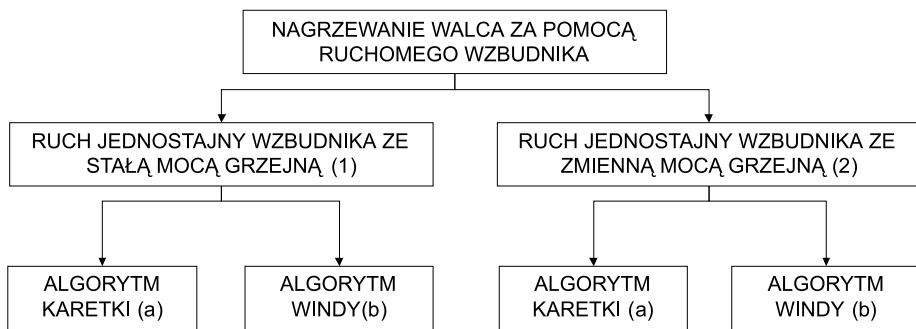


Rys. 6. Rozkład temperatury na powierzchni walca zasilanego mocą uwzględniającej wymianę ciepła z otoczeniem przez powierzchnie boczne walca

Z przedstawionych obliczeń symulacyjnych wynika, że dysponując odpowiednim ciągłym rozkładem mocy grzejnej na powierzchni walca, można zmniejszyć niemalże do zera rozrzut temperatury na powierzchni walca. Widoczne na rysunku 6 odchylenia temperatury na krańcach walca wynikają z dokładności obliczeń numerycznych i jako takie nie mają znaczenia praktycznego.

#### 4. Nagrzewanie walca za pomocą ruchomego wzbudnika

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 ruch wzbudnika wzdłuż tworzącej walca. Na rysunku 7 przedstawiono fragment przyjętej klasyfikacji metod poruszania wzbudnika i jego zasilania wykorzystywanych w niniejszym artykule.



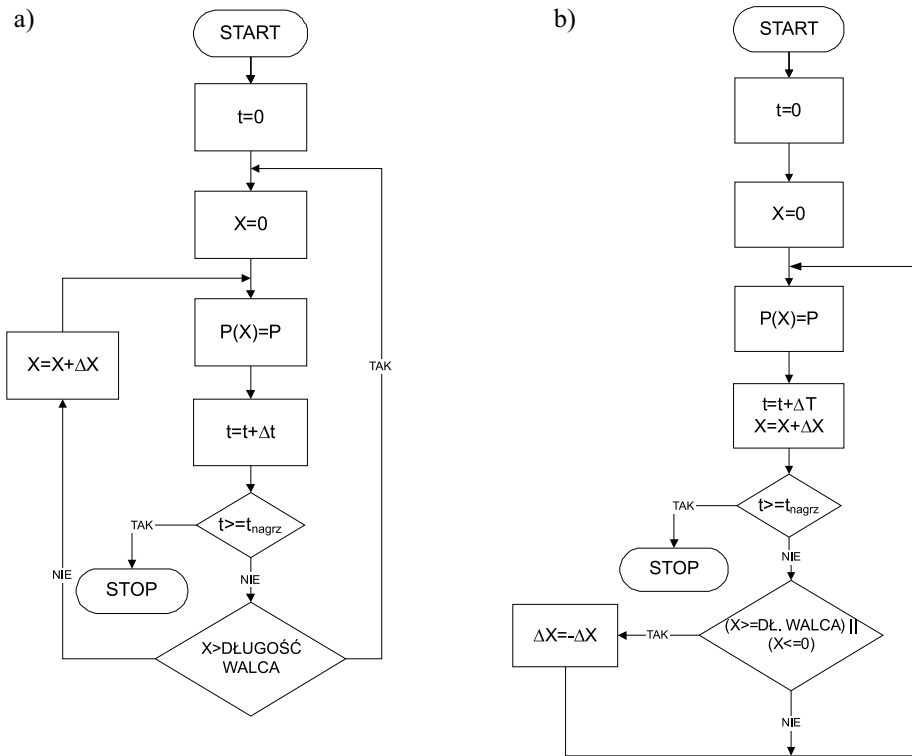
Rys. 7. Warianty nagrzewania walca za pomocą ruchomego wzbudnika

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 8.

W przypadku nagrzewania walca metodami 2a i b (rys. 7) w sieci działań na rysunkach 8a i b 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 5. Zatem w tym przypadku blok dostarczania mocy będzie zawierał wyrażenie:

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

gdzie  $P_{\text{var}}(X)$  – jest wartością mocy czynnej wyznaczonej dla każdego elementu  $X$  przedstawioną na rysunku 5.

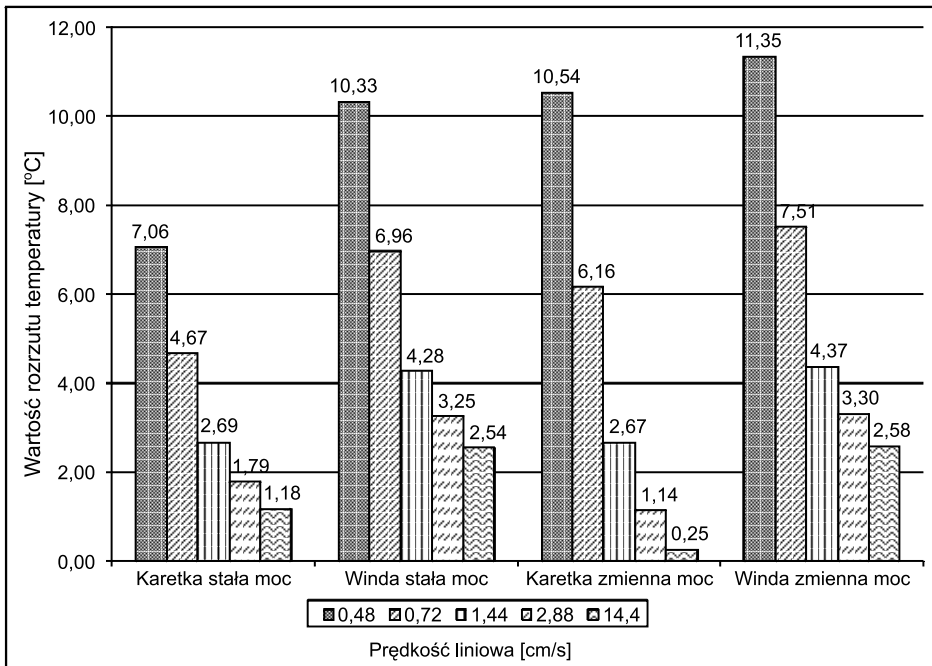


**Rys. 8.** Sieć działań algorytmów ruchu wzbudnika zasilanego stałą mocą nad powierzchnią walca: a) algorytm „karetki”; b) algorytm windy.  $X$  – odległość wzdłuż tworzącej walca

## 5. Wyniki symulacji

Wykorzystując opisany w punkcie 2 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 punkcie 3 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 9.

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, niemniej jednak ogólność przeprowadzonych rozważań pozwala sądzić, że wniosek taki jest słuszny dla dowolnego zadanego profilu temperatury i związanej z nią mocy.



**Rys. 9.** Wartość rozrzutu temperatury na powierzchni wirującego walca w zależności od wariantu nagrzewania oraz prędkości obrotowej walca

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. 5). 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. 4), biorąc pod uwagę fakt, że w każdym z nich w procesie nagrzewania wykorzystywany jest tylko jeden wzbudnik.



## 6. Podsumowanie

W artykule zaproponowano nowy sposób nagrzewania indukcyjnego wirującego walca stalowego, polegający na zastosowaniu ruchomego wzbudnika poruszającego się wzdłuż tworzącej walca. U podstaw tego podejścia leży potrzeba elastycznego kształtowania przestrzennego rozkładu mocy generowanej w materiale walca, a co za tym idzie uzyskiwania z dużą dokładnością zadanego rozkładu temperatury na jego powierzchni. Wcześniejsze prace autorów artykułu wskazują na inherentne ograniczenia stosowania w takim przypadku układu statycznych wzbudników i brak możliwości osiągnięcia postawionego celu.

Za pomocą symulacji komputerowej z wykorzystaniem numerycznego modelu układu grzejnego przeanalizowano różne algorytmy ruchu i zasilania wzbudnika, oceniając uzyskiwane w poszczególnych przypadkach rozpiętości wartości temperatury na długości walca. Badania ograniczono do procesu rozgrzewania walca od stanu zimnego, a szczegółowej analizie poddano profil temperatury w stanie ustalonym. Wyniki te porównano z rozkładami temperatury uzyskiwanymi w przypadku zastosowania różnej liczby wzbudników statycznych, a sformułowane wnioski wskazują na wysoką skuteczność zaproponowanego podejścia.

Uzyskane w wyniku badań potwierdzenie możliwości swobodnego kształtowania rozkładu mocy i pola temperatury w rozważanym układzie nagrzewania przez zastosowanie ruchomego wzbudnika otwiera szeroki obszar dalszych badań dotyczących efektywnych algorytmów sterowania ruchem wzbudnika i jego zasilaniem, zapewniających uzyskanie dowolnego zadanego profilu temperatury walca [4].

## Literatura

- [1] 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, Polska, 2007, 351–355.
- [2] Kucharski J., Urbanek P., *Modelowanie własności dynamicznych nagrzewanego indukcyjnie obracającego się walca stalowego*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 3, 2007, 57–59.
- [3] Urbanek P., *Model numeryczny zjawisk cieplnych w nagrzewanym indukcyjnie wirującym walcu*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 3, 2007, 71–74.
- [4] Frączyk A., Urbanek P., Kucharski J., *Algorytm sterowania ruchem wzbudnika i mocą zapewniający równomierny rozkład temperatury nagrzewanego indukcyjnie obracającego się walca stalowego*. Konferencja Naukowo-Techniczna: „Przetwarzanie i analiza sygnałów w systemach wizji i sterowania”, Słok, 24–26 czerwca 2009.