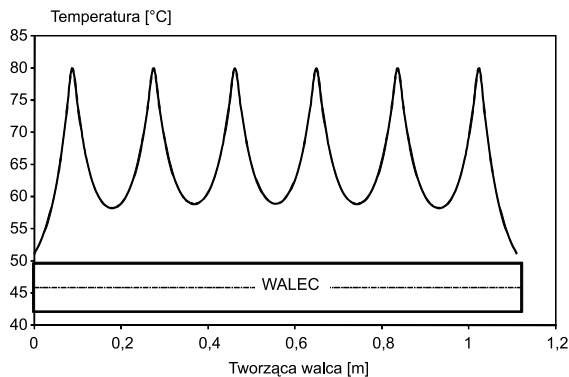


Andrzej Frączyk*, Piotr Urbanek*, Jacek Kucharski*

Algorytm sterowania ruchem wzbudnika i mocą zapewniający równomierny rozkład temperatury nagrzewanego indukcyjnie obracającego się walca stalowego

1. Wprowadzenie

Wymagania jakościowe dotyczące rozkładu temperatury na powierzchni obracającego się walca stalowego nagrzewanego indukcyjnie, wynikające z reżimów technologicznych w procesach, w których wykorzystuje się takie układy grzejne (przemysł papierniczy, gumowy i inne), są coraz większe. Klasyczne metody regulacji temperatury walca [1] (np. regulacji ciągłej PD lub PID), bazujące na pomiarze temperatury ściśle określonej, niewielkiej powierzchni (najczęściej pod wzbudnikiem) oraz statycznych wzbudników, nie dają możliwości zapewnienia odpowiedniej jakości nagrzewania. W szczególności nieuniknione są znaczne różnice temperatury pomiędzy wzbudnikami wzdłuż tworzącej walca. Ilustruje to rysunek 1.

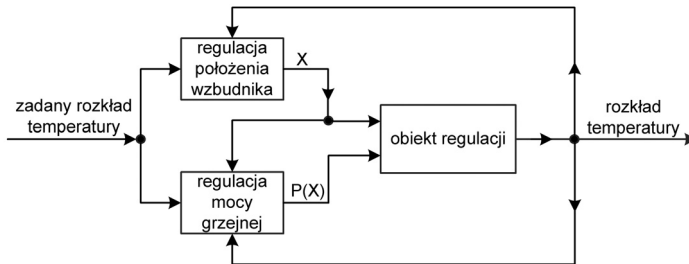


Rys. 1. Rozkład temperatury w stanie cieplnie ustalonym podczas regulacji temperatury sześcioma wzbudnikami

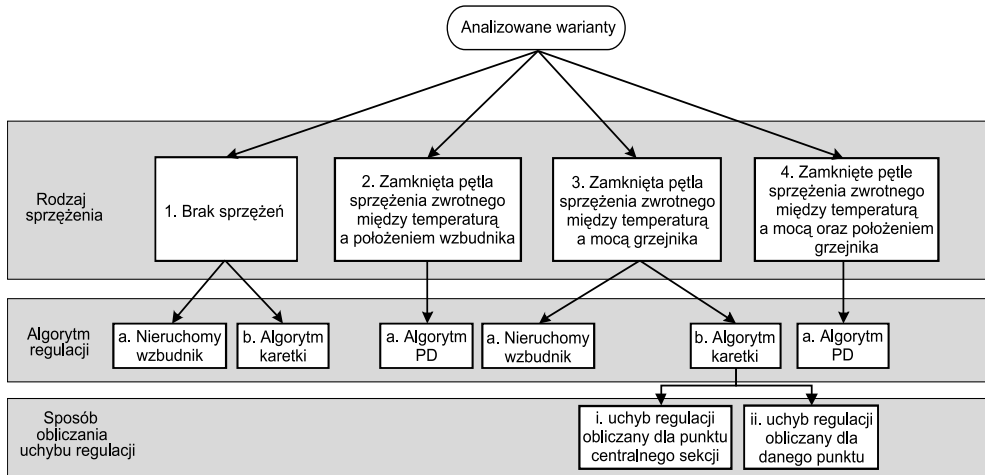
* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka

Istnieje możliwość poprawy tego stanu rzeczy poprzez wprowadzenie ruchomych wzbudników, co pozwala uzyskać efekt „rozmycia” mocy grzejnej w strefach nieobjętych działaniem statycznych wzbudników. Takie rozwiązanie wymaga jednak opracowania stosownych algorytmów poruszania się wzbudników oraz sterowania ich mocą.

Biorąc pod uwagę występujące w układzie dwie pętle sprzężenia zwrotnego przedstawione na rysunku 2, w celu przebadania wpływu każdej z nich na równomierność rozkładu temperatury na powierzchni walca przeanalizowano warianty pracy układu, różniące się aktywnymi sprzężeniami zwrotnymi, przedstawione na rysunku 3.



Rys. 2. Sprzężenia zwrotne występujące w badanym obiekcie



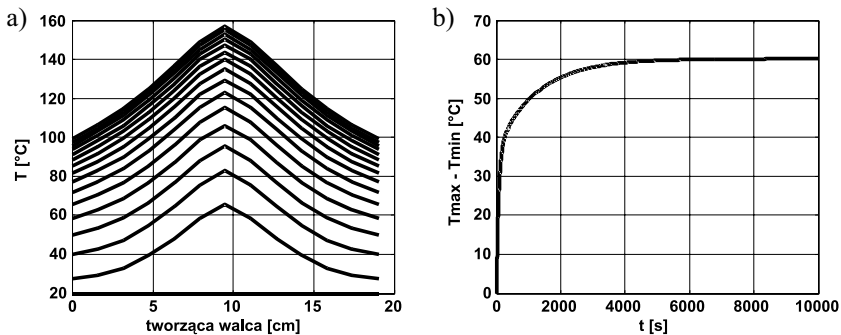
Rys. 3. Diagram analizowanych wariantów badań dotyczących rozkładu temperatury na powierzchni wirującego walca

W badaniach zastosowano model numeryczny nagrzewanego indukcyjnie obracającego się walca stalowego [2]. Aby skrócić czas obliczeń, badania prowadzono z użyciem jednej sekcji grzejnej, co nie zmienia ogólności rozważań. Dla wszystkich wariantów (1, 2, 3

oraz 4 z rys. 3) przedstawiono rozkłady temperatury rejestrowane z interwałem czasowym 200 s, w przypadku otwartej pętli sprzężenia pomiędzy temperaturą a mocą, natomiast w przypadku zamkniętej pętli – z interwałem 50 s. Ponadto w celu zobrazowania dynamiki zmian nierównomierności temperatury, dla każdego wariantu przedstawiono przebieg różnicy temperatur pomiędzy maksymalną a minimalną wartością temperatury wzdłuż tworzącej walca w funkcji czasu.

2. Wpływ ruchu wzbudnika na rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca w układzie otwartym

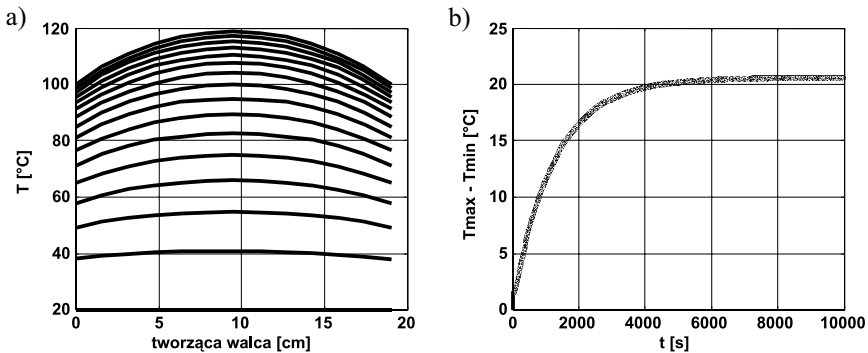
Punktem odniesienia umożliwiającym określenie wpływu poszczególnych sprzężeń na równomierność temperatury jest układ z otwartymi sprzężeniami zwrotnymi, w którym nieruchomy wzbudnik umieszczony był pośrodku badanego obiektu (wariant 1a). Uzyskane dla tego przypadku wyniki przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca (a) oraz wartość nierównomierności rozkładu temperatury w czasie (b) dla wariantu 1a

W pracy [2] wykazano, że możliwe jest znaczne zwiększenie równomierności rozkładu temperatury przez zastosowanie ruchomego wzbudnika dostarczającego niezmienną w czasie moc grzejną. Dlatego drugim analizowanym wariantem jest przypadek nagrzewania walca przy zastosowaniu wzbudnika zasilanego stałą i identyczną jak w wariantie 1a mocą grzejną, przemieszczanego zgodnie z algorytmem „karetki” (wariant 1b). Uzyskane wyniki przedstawia rysunek 5.

Analizując wyniki badań przedstawione na rysunkach 4 i 5, można zaobserwować znaczną poprawę równomierności rozkładu temperatury wzdłuż tworzącej walca, wynikającą z „rozmycia” mocy grzejnej spowodowanej ruchem wzbudnika. „Rozmycie” to powoduje dodatkowo spadek wartości maksymalnej temperatury powierzchni walca, gdyż energia grzejna dostarczana do walca nie ulega zmianie.



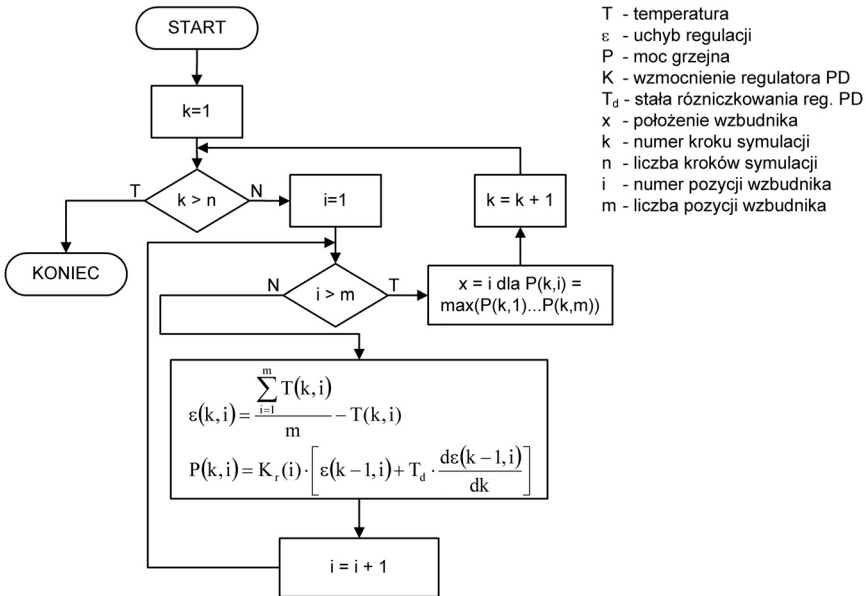
Rys. 5. Rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca (a) oraz wartość nierównomierności rozkładu temperatury (b) w czasie dla wariantu 1b

3. Wpływ sprzężenia zwrotnego pomiędzy temperaturą powierzchni walca a położeniem wzbudnika na rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca

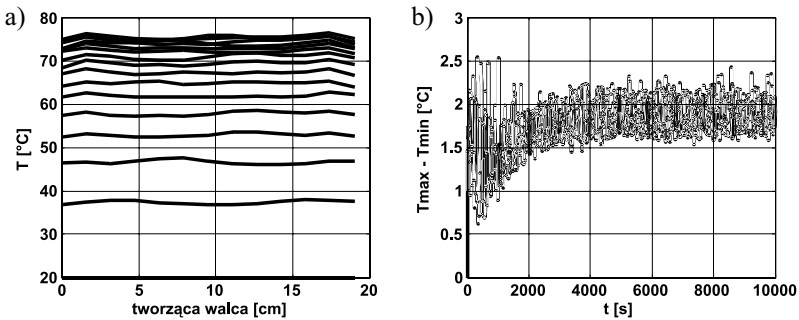
Przedstawione w punkcie 2 wyniki wskazują na zależność rozkładu temperatury na powierzchni walca od sposobu przemieszczania wzbudnika nad jego powierzchnią. Algorytmy przemieszczania wzbudnika przedstawione w pracy [2] nie używają informacji o aktualnym rozkładzie temperatury, dlatego też opracowano algorytm, który z tych informacji korzysta. Założono, iż sterowany wzbudnik może zajmować skończoną liczbę dyskretnych pozycji, co z kolei odpowiada w przybliżeniu ciągłemu rozkładowi mocy na powierzchni walca. Odpowiada to implementacji przesuwania wzbudnika przy użyciu silników krokowych. Algorytm ten bazuje na zespole m regulatorów PD, których liczba odpowiada możliwym pozycjom wzbudnika nad powierzchnią walca. Nastawy każdego z regulatorów zostały dobrane na podstawie identyfikacji metodą wymuszenia skokowego, w której sygnałem wymuszającym była moc wzbudnika umieszczonego w danej pozycji, a wyjściem odpowiadająca jej temperatura [3]. Opracowany algorytm przemieszczania wzbudnika został przedstawiony na rysunku 6.

Wyniki uzyskane w wyniku zastosowania zaprezentowanego wyżej algorytmu przy stałej i identycznej jak w wariantach 1a i 1b mocy przedstawia rysunek 7.

Analiza wyników zamieszczonych na rysunku 7 wskazuje, iż przemieszczanie wzbudnika przy zastosowaniu algorytmu wykorzystującego informację o aktualnym rozkładzie temperatury walca w pętli sprzężenia zwrotnego powoduje istotne zmniejszenie nierówności tego rozkładu.



Rys. 6. Algorytm przesuwania wzbudnika bazujący na regulatorach PD

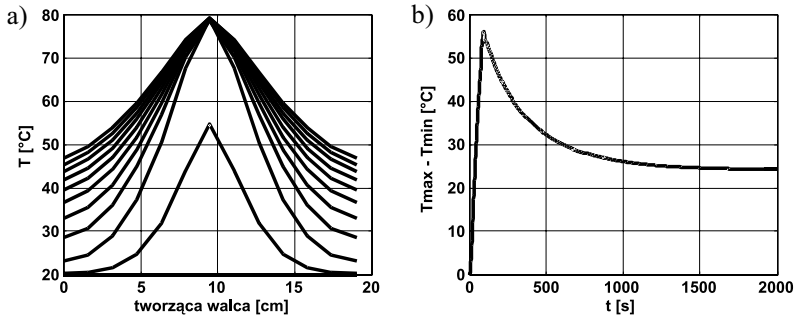


Rys. 7. Rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca (a) oraz wartość nierównomierności rozkładu temperatury w czasie (b) dla wariantu 2a

4. Wpływ sprzężenia zwrotnego pomiędzy temperaturą a mocą wzbudnika na rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca

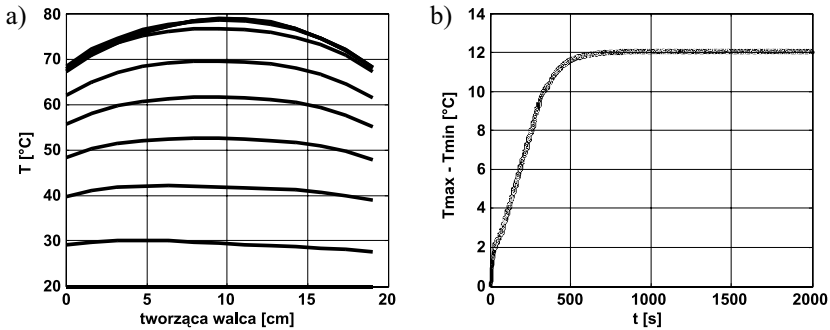
Analizowane wcześniej przypadki dotyczyły wariantów, w których wzbudnik nagrzewał układ stałą mocą. Kolejnym krokiem badań jest zbadanie wpływu ruchomego wzbudnika na równomierność temperatury przy mocy zasilającej generowanej w zamkniętej pętli

sprężenia zwrotnego. Punktem odniesienia jest przypadek, w którym układ był nagrzewany nieruchomym, centralnie położonym wzbudnikiem (wariant 3a). Uzyskane wyniki przedstawia rysunek 8.



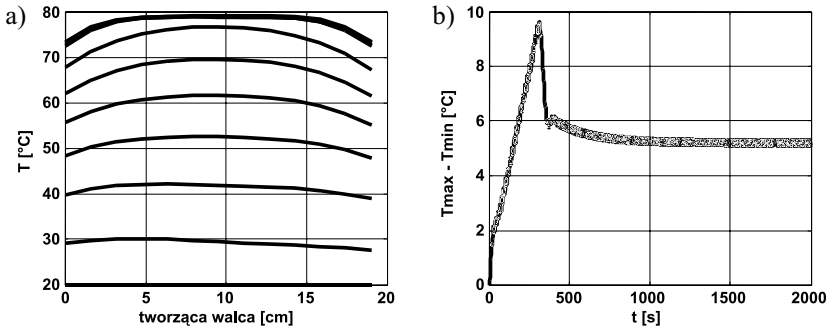
Rys. 8. Rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca (a) oraz wartość nierównomierności rozkładu temperatury w czasie (b) dla wariantu 3a

W następnym etapie badań sprawdzono zachowanie się układu podczas przemieszczania wzbudnika przy użyciu algorytmu „karetki”. Sygnałem zwrotnym była temperatura środkowego punktu strefy grzejnej, gdyż w praktyce najczęściej tam właśnie umieszczany jest czujnik temperatury. Odpowiada to wariantowi 3bi na rysunku 3. Uzyskane wyniki przedstawia rysunek 9.



Rys. 9. Rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca (a) oraz wartość nierównomierności rozkładu temperatury w czasie (b) dla wariantu 3bi

Dysponując możliwością pomiaru pola temperatury (np. za pomocą kamery termowizyjnej), można określić wartość mocy zasilającej generatora przy użyciu informacji o temperaturze w pozycji aktualnie zajmowanej przez wzbudnik (wariant 3bii). Dzięki temu znacznie wzrosła równomierność rozkładu pola temperatury na powierzchni walca. Uzyskane wyniki przedstawia rysunek 10.



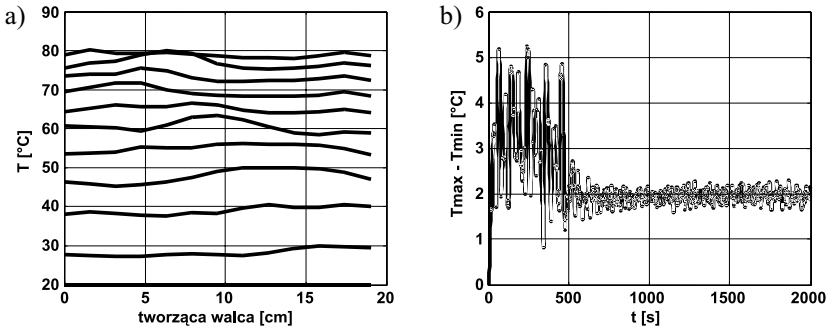
Rys. 10. Rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca (a) oraz wartość nierównomierności rozkładu temperatury w czasie (b) dla wariantu 3bii

Z przedstawionych badań wynika, że jeżeli w zamkniętym układzie regulacji temperatury powierzchni walca w pętli regulacji mocy grzewczej (rys. 2) wykorzystuje się informacje o rozkładzie całego pola temperatury, to w czasie procesu nagrzewania walca nierównomierność rozkładu temperatury nie przekracza 10°C (w stanie ustalonym wynosi poniżej 6°C). W przypadku gdy do analizowanego układu dostarczymy informację jedynie z jednego wybranego punktu walca, np. ze środka strefy grzewczej (przypadek, gdy pomiar temperatury jest realizowany za pomocą jednego, nieruchomego czujnika), nierównomierność pola temperatury ustala się na poziomie 12°C .

5. Wpływ sprzężeń zwrotnych pomiędzy temperaturą a mocą wzbudnika oraz jego położeniem na rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca

Najbardziej zaawansowana metoda regulacji temperatury o równomiernym rozkładzie wzdłuż tworzącej walca wykorzystuje informacje o aktualnym rozkładzie temperatury do określania zarówno wartości mocy grzewczej, jak i położenia wzbudnika. Do określania położenia wzbudnika zastosowano algorytm bazujący na zespole regulatorów PD, natomiast do regulacji poziomu temperatury wykorzystano algorytm regulacji PD. Uzyskane wyniki przedstawia rysunek 11.

Z rysunku 11 wynika, że zastosowanie w układzie regulacji temperatury powierzchni wirującego walca dwóch osobnych pętli sprzężenia – kontrolujących poruszanie się wzbudnika i moc grzewczą do niego dostarczaną przyniosło najlepszy, z dotychczas uzyskanych efektów. Działanie obydwu pętli sprawia, że nierównomierność rozkładu temperatury podczas procesu nagrzewania nie przekracza $5,5^{\circ}\text{C}$, natomiast w stanie cieplnie ustalonym wynosi ok. 2°C .



Rys. 11. Rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca (a) oraz wartość nierównomierności rozkładu temperatury w czasie (b) dla wariantu 4a

6. Podsumowanie badań

W celu porównania przedstawionych wyżej wyników różnych wariantów poruszania się i zasilania wzbudnika, zdefiniowano syntetyczny wskaźnik jakości uwzględniający nierównomierność rozkładu temperatury występującą w całym procesie nagrzewania. Wskaźnikiem tym jest średnia wartość odchylenia standardowego temperatury dla poszczególnych kroków obliczeniowych, wyrażona zależnością:

$$QI = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m \left(T_{k,i} - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m T_{k,i} \right)^2} \quad (1)$$

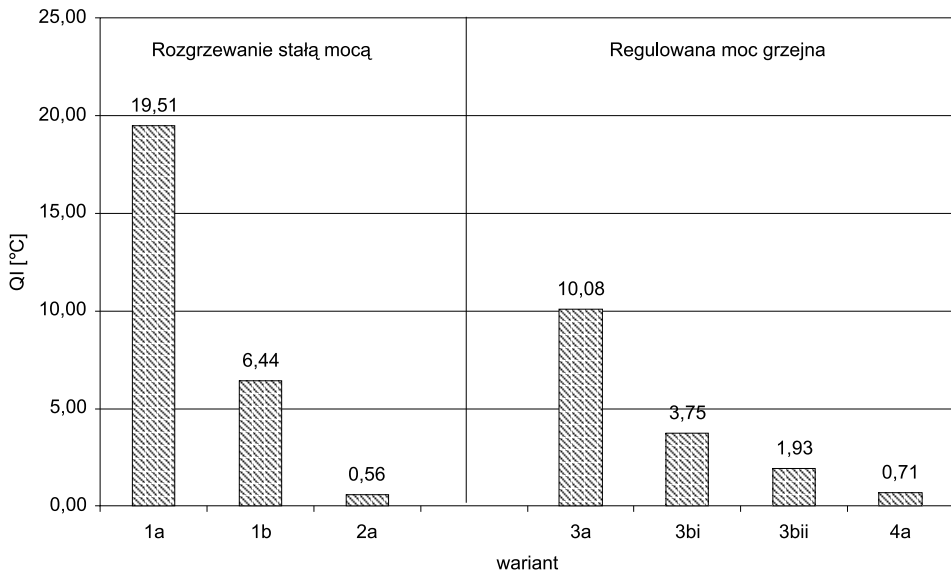
gdzie:

- T – temperatura,
- K – numer kroku symulacji,
- n – liczba kroków symulacji,
- i – numer pozycji wzbudnika,
- m – liczba pozycji wzbudnika.

Dla każdego z analizowanych wariantów przesuwania i zasilania wzbudnika obliczono wartości wskaźnika wyrażonego wzorem (1). Uzyskane wyniki przedstawia rysunek 12.

Analiza danych przedstawionych na rysunku 12 pozwala wyciągnąć wniosek, iż opracowany algorytm określania pozycji wzbudnika nad powierzchnią walca, bazujący na zespole regulatorów PD, we właściwy sposób korzysta z dostarczanej mu informacji o rozkładzie pola temperatury nagrzewanego obiektu, umożliwiając uzyskanie znacznie bardziej równomiernego rozkładu temperatury na powierzchni badanego obiektu (zarówno w stanach dynamicznych, jak i w stanie ustalonym) niż algorytmy niekorzystające z informacji o rozkładzie pola temperatury, np. algorytm karetki. Dalsze badania dotyczące nagrzewania

z zastosowaniem ruchomych wzbudników dotyczyć będą m.in. opracowania algorytmów, które w sposób jeszcze bardziej efektywny niż przedstawiony w niniejszym artykule algorytm bazujący na regulatorach PD będą wykorzystywać informację o rozkładzie pola temperatury nagrzewanego obiektu. Ponadto konieczne jest opracowanie algorytmu umożliwiającego określanie pozycji zespołu kilku wzajemnie współpracujących ze sobą wzbudników.



Rys. 12. Wartości wskaźnika QI obliczone dla analizowanych wariantów przemieszczania wzbudnika

Literatura

- [1] Michalski L., Kuźmiński K., Sadowski J., *Regulacja temperatury urządzeń elektrotermicznych*. WNT, Warszawa, 1981.
- [2] Urbanek P., Frączyk A., Kucharski J., *Kształtowanie profilu pola temperatury nagrzewanego indukcyjnie wsadu za pomocą ruchu wzbudnika*. Seminarium „Przetwarzanie i analiza sygnałów w systemach wizji i sterowania”, Słok 2009.
- [2] Kucharski J., Urbanek P., *Modelowanie własności dynamicznych nagrzewanego indukcyjnie obracającego się walca stalowego*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 3, 57–59, 2007.