

**JERZY ZGRAJA**Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki  
Politechniki Łódzkiej**SYSTEM POMIAROWO-SYMULACYJNY  
DO POŚREDNIEGO OKREŚLANIA  
PARAMETRÓW MATERIAŁOWYCH  
WSADÓW NAGRZEWANYCH INDUKCYJNIE**Recenzent: **dr hab. inż. Marek Orzyłowski**

Maszynopis dostarczono: 1. 10. 2010

*Przy projektowaniu stanowiska do nagrzewania indukcyjnego powszechnie wykorzystywane są polowe obliczenia symulacyjne, obejmujące co najmniej analizę sprzężonego zagadnienia elektromagnetyczno-cieplnego. Ich dokładność jest w oczywisty sposób uwarunkowana znajomością materiałowych charakterystyk temperaturowych, szczególnie materiału wsadu. Przy braku wiarygodnych danych literaturowych wyznaczenie charakterystyk materiałowych wsadu wymaga specjalistycznych badań laboratoryjnych. Rozwiązania tego zagadnienia można poszukiwać również w metodzie pośredniego określenia charakterystyk materiałowych, wykorzystując algorytmy optymalizacyjne w procesie porównywania wyników symulacyjnych i pomiarowych rozkładów pola temperatury w funkcji czasu, dla indukcyjnie nagrzewanej próbki wsadu. W pracy zaprezentowano takie stanowisko badawcze oraz omówiono metodę pośredniego wyznaczania charakterystyk materiałowych dla wsadów niemagnetycznych.*

## 1. WPROWADZENIE

Nagrzewanie indukcyjne jest jedną z najpopularniejszych metod nagrzewania wykorzystywanych w obróbce cieplnej i przeróbce plastycznej metali. Przy wielu swoich zaletach posiada ono również pewne wady, wśród których za główną można uznać małą uniwersalność. Stanowisko do nagrzewania czy hartowania indukcyjnego zawierające źródło zasilania, wzbudnik, układ podający i chłodzący jest zazwyczaj dobrze dopasowane do określonego, wąskiego asortymentu wsadów. Zmiana rodzaju wsadu pociąga za sobą (poza oczywistą potrzebą dopasowania układu podającego) potrzebę ponownego zaprojektowania wzbudnika, niekiedy zmiany technologii nagrzewania czy chłodzenia, a nawet źródła zasilania. Problemy wynikające z braku uniwersalności są jedną z podstawowych przyczyn ograniczających stosowanie nagrzewania indukcyjnego w praktyce przemysłowej. Biorąc pod uwagę liczbę różnego rodzaju parametrów wpływających na proces nagrzewania indukcyjnego, dobór indukcyjnego układu grzejnego bez zastosowania symulacji komputerowej może być bardzo czasochłonny i kosztowny. Wśród problemów symulacyjnych procesu nagrzewania indukcyjnego symulowanie polowych zagadnień elektromagnetyczno-cieplnych wysuwa się na plan pierwszy. Jest to zazwyczaj realizowane poprzez rozwiązywanie sprzężonych równań Maxwella i Fouriera-Kirchhoffa. W przypadku przyjęcia założenia o harmoniczności przebiegów elektromagnetycznych mogą one, przy wykorzystaniu zespolonego wektorowego potencjału magnetycznego  $\mathbf{A}$ , zostać opisane zależnościami:

$$j\omega\gamma\mathbf{A} + \text{curl}[(1/\mu)\text{curl}\mathbf{A}] = \mathbf{J}_s \quad (1)$$

gdzie:  $\omega$  – pulsacja,  $\gamma$  – przewodność elektryczna,  $\mu$  – przenikalność magnetyczna,  $\mathbf{J}_s$  – gęstość prądu wymuszenia

oraz

$$\text{div}[(-\lambda)\text{grad}\vartheta] + \rho c \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = p_v \quad (2)$$

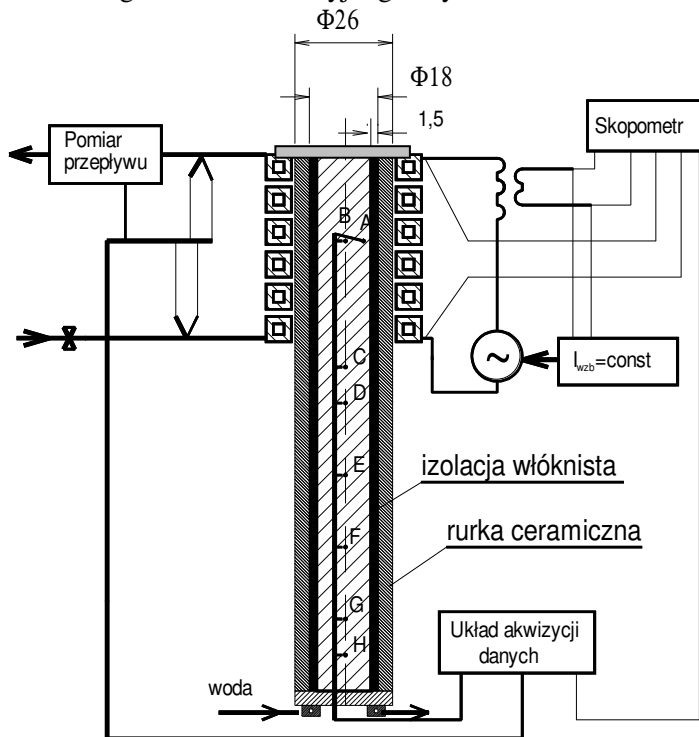
gdzie:  $\vartheta$  – temperatura,  $\lambda$  – przewodność cieplna właściwa,  $\rho$  – gęstość masy,  $c$  – ciepło właściwe,  $p_v$  – gęstość objętościowa źródeł ciepła,

przy odpowiednio dobranych warunkach brzegowych.

Prawidłowe rozwiązanie powyższego zadania jest determinowane m.in. znajomością rzeczywistych wartości stałych materiałowych. Jest to szczególnie istotne dla materiału wsadu, dla którego należy znać charakterystyki materiałowe w funkcji temperatury. Podawane w literaturze charakterystyki materiałowe dotyczą jedynie wybranych rodzajów materiałów i są one często niewystarczające do prawidłowego przeprowadzenia procesu symulacji pracy indukcyjnego układu grzejnego, a nawet mogą prowadzić do poważnych błędów

obliczeniowych [1]. Eksperymentalne wyznaczanie parametrów materiałowych jest również trudne i kosztowne.

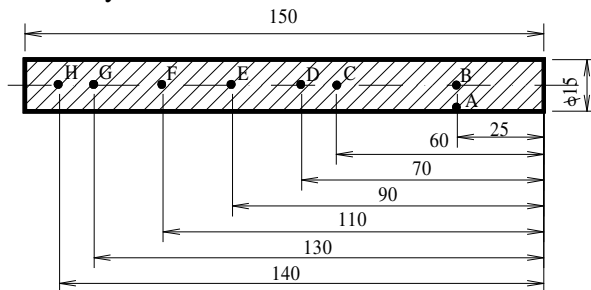
W takiej sytuacji pośrednia metoda wyznaczania charakterystyk materiałowych wydaje się najlepszym rozwiązaniem. Idea pośredniego (odwrotnego) wyznaczania parametrów materiałowych jest od wielu lat wykorzystywana w obliczeniach symulacyjnych nagrzewania indukcyjnego, ale głównie do weryfikacji stałych materiałowych. Polega to na jednostkowych weryfikacjach symulacyjnych wyników obliczeń i ewentualnej korekcji stałych materiałowych. Pewne szersze wykorzystanie tej metody przedstawiono m.in. w pracy [2]. Niniejszy artykuł dotyczy stanowiska pomiarowo-symulacyjnego do określania parametrów materiałowych wsadu na podstawie badania jego próbki na stanowisku do nagrzewania indukcyjnego, Rys.1.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe do określania parametrów materiałowych

Realizowane w stanach dynamicznych badania na testowym stanowisku do nagrzewania indukcyjnego, przedstawionym na rys. 1, były sprowadzone do pomiaru parametrów zasilania (tj. prądu, napięcia i mocy czynnej) oraz przebiegów temperatury w 8 punktach kontrolnych A÷H rozłożonych w próbce badawczej w sposób przedstawiony na rys. 2. Zarówno kształt próbki, jak i

rozkład punktów pomiarowych został dobrany z myślą o uzyskaniu możliwie wysokiej, selektywnej wrażliwości przebiegów temperatury na zmianę wartości parametrów materiałowych.



Rys. 2. Rozkład punktów pomiaru temperatury próbki badawczej

W trakcie badań eksperymentalnych mierzono również temperaturę oraz przepływ wody chłodzącej wzbudnik, co pozwoliło na wykorzystanie metody kalorymetrycznej do określenia strat mocy we wzbudniku.

Te komputerowo zbierane informacje stanowiły podstawę do wyznaczenia metodami programowania matematycznego (przy wykorzystaniu komputerowych symulacji pola elektromagnetycznego i pola temperatury) poszukiwanych charakterystyk materiałowych, tj. rezystywności, ciepła właściwego oraz przewodności cieplnej właściwej w funkcji temperatury.

## 2. METODA POŚREDNIEGO OKREŚLANIA PARAMETRÓW MATERIAŁOWYCH

Prezentowana pośrednia metoda określania charakterystyk materiałowych bazuje na porównywaniu pomierzonych i obliczonych przebiegów temperatury w punktach pomiarowych próbki wsadu. Zaletą takiej metody są stosunkowo łatwe to przeprowadzenia pomiary oraz możliwość korzystania z oprogramowania wykorzystywanego w procesie projektowania indukcyjnego stanowiska grzejnego (oprogramowania do numerycznych obliczeń polowych). Metoda ta ma również słabe strony. Procesy optymalizacyjne bazujące na obliczeniach polowych sprzężonych zagadnień elektromagnetyczno-ciepłych są komputerowo kosztowne. Ta istotna niedogodność może być jednak wyraźnie ograniczona z jednej strony poprzez stosowanie odpowiednio dobranych technik optymalizacyjnych, a z drugiej strony poprzez wykorzystanie wydajnego sprzętu komputerowego i szybkich procedur rozwiązywania zagadnień polowych. Innym ograniczeniem w stosowaniu omawianego pośredniego wyznaczania charakterystyk materiałowych jest problem uzyskiwania jednoznacznego, prawidłowego wyniku, tj. właściwych charakterystyk materiałowych. W

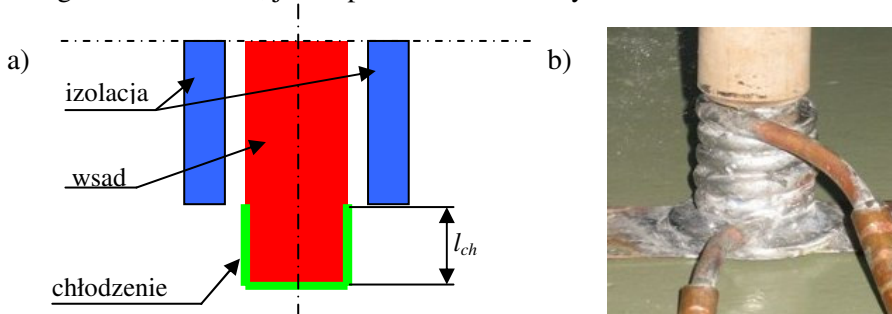
metodzie tej istnieje bowiem ryzyko uzyskiwania minimalizacji funkcji celu przy błędnie określonych parametrach, na skutek „zastępowania” wpływu jednych parametrów materiałowych wpływem innych parametrów. Metoda ta wymaga więc z jednej strony takiego określenia funkcji celu (w tym doboru kształtu próbki badawczej i rozkładu punktów pomiarowych) aby uzyskać możliwie selektywny wpływ poszczególnych parametrów na jej wartość, a z drugiej strony poszukiwania innych mechanizmów ograniczających możliwość wystąpienia sygnalizowanego powyżej zjawiska. Jednym z takich mechanizmów może być wstępne szacowanie poszukiwanych charakterystyk [3]. Z punktu widzenia wysokiej funkcjonalności stanowiska do pośredniego wyznaczania charakterystyk materiałowych wskazane jest aby ich wstępne, pomiarowe, szacowanie mogło być zrealizowane na tym samym stanowisku pomiarowym (rys. 1). Na prezentowanym stanowisku stosunkowo łatwo jest zrealizować szacowanie przewodności cieplnej właściwej i ciepła właściwego.

Zakładając występowanie jednowymiarowego, ustalonego, przewodzenia ciepła gęstość strumienia cieplnego można określić z prawa Fouriera, co przy wykorzystaniu wartości temperatury w punktach kontrolnych pomiaru temperatury, np. punktach C i D (rys. 1) można zapisać:

$$q = \frac{P_{str,z}}{F_c} = -\lambda \text{ grad } \vartheta \approx \lambda \frac{\vartheta_D - \vartheta_C}{l_{CD}} \quad (3)$$

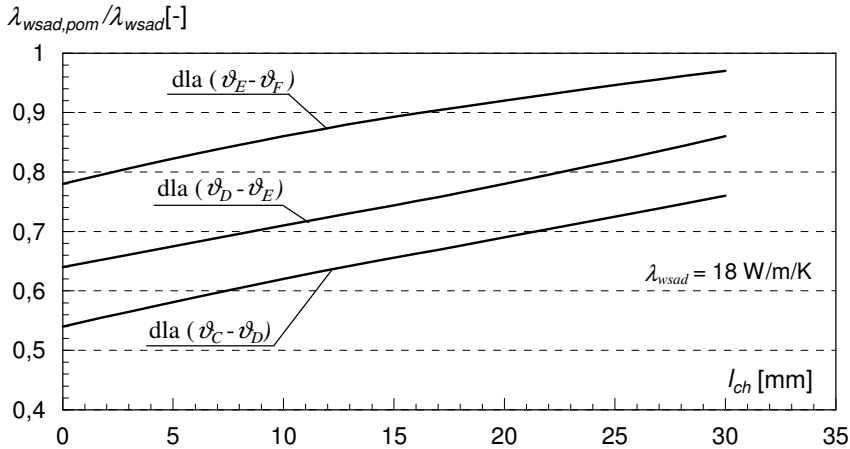
gdzie:  $P_{str,z}$  – ustalony strumień cieplny przepływający wzdłuż wsadu,  $F_c$  – powierzchnia przekroju poprzecznego próbki wsadu,  $l_{CD}$  – odległość między punktami pomiarowymi C i D.

Dokładność szacowania przewodności cieplnej właściwej jest przy takim podejściu zależna od stopnia spełnienia założenia o jednokierunkowym przepływie ciepła. Z tego też względu zmodyfikowano układ chłodzenia „zimnego” końca wsadu, jak to przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Zmodyfikowany układ chłodzenia końca próbki wsadu:  
a) rysunek poglądowy, b) realizacja praktyczna

Zwiększenie długości  $l_{ch}$  strefy chłodzącej zwiększa dokładność szacowania wartości przewodności cieplnej właściwej, ale z drugiej strony skraca „czynną” długość wsadu wystającą poza wzbudnik. Na rys. 4 przedstawiono uzyskany symulacyjnie, dla różnych punktów kontrolnych wyznaczania temperatury, wpływ długości  $l_{ch}$  strefy chłodzącej na wartość stosunku szacowanej na podstawie wzoru (3) przewodności cieplnej właściwej  $\lambda_{wsad,pom}$  do rzeczywistej przewodności cieplnej próbki wsadu  $\lambda_{wsad}$ . Na stanowisku pomiarowym zastosowano chłodzenie o długości  $l_{ch}=30\text{mm}$ .



Rys. 4. Wpływ długości  $l_{ch}$  bocznej strefy chłodzenia wsadu na względną wartość szacowanej przewodności cieplnej właściwej

Na prezentowanym stanowisku pomiarowym szacowanie ciepła właściwego zrealizowano poprzez szacowanie wartości dyfuzyjności cieplnej metodą bazującą na metodzie opracowanej przez Ångströma [4], co zostało przedstawione w [3].

Omawiana metoda pośredniego określania charakterystyk materiałowych bazuje na procesie optymalizacyjnym. W procesie tym wektor decyzyjny stanowią współczynniki zależności funkcyjnych określających charakterystyki materiałowe wsadu, a funkcja celu bazuje na różnicach w przebiegach czasowych temperatury wsadu pomierzonych eksperymentalnie oraz wyznaczonych obliczeniowo dla różnych wartości wektora decyzyjnego. W procesie obliczeniowym wymagane jest więc realizowania kosztownych komputerowo obliczeń sprzężonych zagadnień elektromagnetyczno-cieplnych, co uzasadnia poszukiwanie efektywnych, dla tego zagadnienia, technik optymalizacyjnych.

W pracy przedstawiono [5] możliwość wykorzystania do powyższego celu metodologii powierzchni odpowiedzi (Response Surface Methodology RSM) [6] z wykorzystaniem interpolacyjnej funkcji wielokwadrkowej (multiquadric MQ). RSM można scharakteryzować ogólnie jako zespół statystycznych i

matematycznych technik wykorzystanych w celu znalezienia najlepiej „dopasowanej” reprezentacji podlegającego badaniu systemu fizycznego. Ten sposób podejścia znalazł zastosowanie również w metodach optymalizacji, gdzie rzeczywistą funkcję celu próbuje się zastąpić jej prostszą w zapisie matematycznym reprezentacją [6].

W literaturze światowej stosowane są różne metody „zastąpienia” rzeczywistej funkcji celu, poczynając od posługiwania się zapisem wielomianowym, poprzez np. różne funkcje radialne (Radial Basis Functions RBF) [7]. Głównym powodem wykorzystywania do interpolacji bazowych funkcji radialnych jest ich zdolność do dobrej interpolacji rzeczywistych funkcji wielu zmiennych, przy stosunkowo prostej formie.

Bazującą na RBF funkcję interpolacyjną  $F(\mathbf{x})$  opisującą funkcję  $N$  zmiennych  $f(\mathbf{x})$  daną w  $M$   $\{x_i \in \mathbb{R}^N; i=1, \dots, M\}$  punktach, można ogólnie zapisać w postaci [7]:

$$F(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^M c_i g(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|) \quad (4)$$

gdzie:  $g(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|)$  jest jedną z funkcji radialnych.

Wykorzystując równość:

$$F(\mathbf{x}_j) = f(\mathbf{x}_j) \quad \text{dla } j=1..M \quad (5)$$

występujące w (4) współczynniki  $\mathbf{c} = \{c_i\}$  można obliczyć z zależności macierzowej:

$$\mathbf{G} \mathbf{c} = \mathbf{f} \quad (6)$$

gdzie:

$$\mathbf{f} = \{f(\mathbf{x}_j), j=1, \dots, M\},$$

a elementy macierzy kwadratowej

$$\mathbf{G} = \{G_{j,i}, j, i=1, \dots, M\} \text{ wynoszą } G_{j,i} = g(\|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|).$$

Do interpolacji i aproksymacji wykorzystywane są różne postacie funkcji radialnych  $g(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|)$  [6], np.:

$$g(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|) = (\alpha^2 + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^2)^\beta; \quad 0 < \beta < 1 \quad (7)$$

gdzie:  $\alpha, \beta$  to stałe.

Zależność (7) dla współczynnika  $\beta = 0,5$  przedstawia postać wielokwadrykową (Multiquadric MQ) funkcji radialnej.

Cechą która uczyniła z funkcji MQ niezastąpione wręcz narzędzie do interpolacji i aproksymacji danych jest jej silna monotoniczność w otoczeniu punktu środkowego będącego jedynym ekstremum funkcji. Interpolacja za pomocą funkcji MQ jest doskonałym narzędziem do interpolacji mało liczebnych zbiorów danych. Polega ona na wyznaczeniu współczynników funkcji składającej się z  $M$  funkcji MQ, których punkty środkowe  $\mathbf{x}_i \{ \mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^N; i=1, \dots, M \}$  są punktami interpolowanego zbioru (są określone dla rzeczywistej funkcji celu). Tak określona MQ funkcja interpolacyjna  $F(\mathbf{x})$  ma postać:

$$F(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^M c_i \sqrt{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^2 + h} \quad (8)$$

gdzie:  $h$  – parametr „przesunięcia” odpowiadający za wygięcie funkcji interpolacyjnej,  $c_i$  – współczynniki funkcji wielokwadrykowej,  $\mathbf{x}_i$  –  $i$ -ty punkt interpolacyjny,  $M$  – liczba punktów interpolowanych.

Współczynniki  $c_i$  występujące w (8) można obliczyć rozwiązując układ równań liniowych postaci:

$$\mathbf{c} = \mathbf{X}\mathbf{X}^{-1} \mathbf{y} \quad (9)$$

gdzie:  $\mathbf{y} = [ f(\mathbf{x}_1), f(\mathbf{x}_2), \dots, f(\mathbf{x}_M) ]^T$ ;  $f(\mathbf{x})$  – rzeczywista funkcja celu;  $\mathbf{X}\mathbf{X}$  – macierz kwadratowa o wyrazach postaci:

$$XX_{ij} = \sqrt{\|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|^2 + h} \quad (10)$$

dla  $i, j = 1, 2, \dots, M$ .

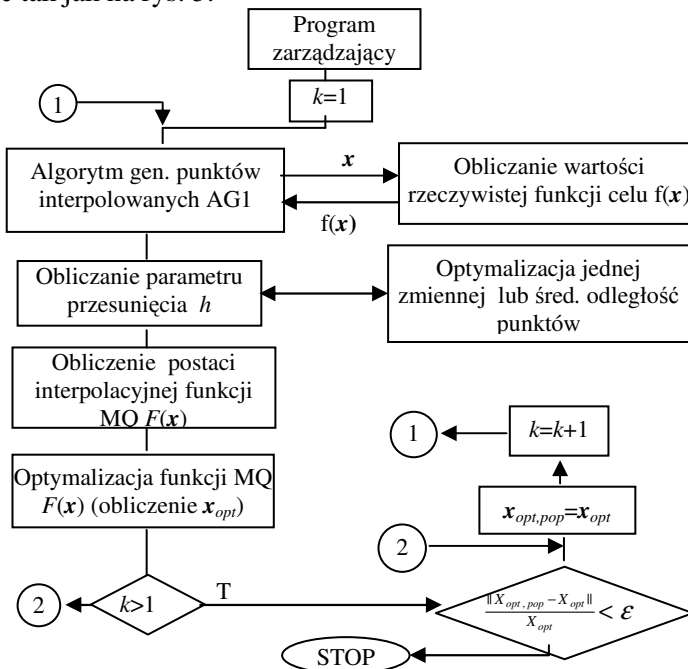
Obliczenie parametru  $h$  występującego w (10) może być zrealizowane np. poprzez zastosowanie „algorytmu wykluczającego” opisanego w [7]. Polega on na wykorzystaniu  $M_l$  punktów zbioru  $M$  danych interpolowanych. Dobraną drogą optymalizacji funkcji jednej zmiennej parametr  $h$  ma zapewnić minimalizację średniego odchylenia między wartościami funkcji celu w wybranych losowo  $M_l$  punktach, a wartościami MQ funkcji interpolacyjnej dla tych punktów (stanowiących wartości wektora zmiennych decyzyjnych).

Podstawowy problem w efektywnym wykorzystaniu omówionej wyżej metody optymalizacji z wykorzystaniem funkcji MQ polega na określeniu efektywnego algorytmu generowania punktów do interpolacji. Wybór punktów interpolowanych realizowano w dwóch etapach. W pierwszym etapie bazowano na podanym przez użytkownika punkcie startu  $\mathbf{x}_0$  (wykorzystywana jest w ten sposób wiedza użytkownika, projektanta), a w drugim etapie (który jest etapem



powtarzanym) wybór punktów bazował na uznanym za optymalny (drogą optymalizacji interpolacyjnej funkcji MQ) w poprzednim cyklu iteracyjnym, wektorze zmiennych decyzyjnych  $x_{opt}$  lub wektorze najbardziej zbliżonym do optymalnego ze wszystkich uznawanych za optymalne w poprzednich iteracjach. Ta ogólna zasada oraz mechanizm losowego doboru punktów interpolowanych zostały zaimplementowane w postaci algorytmów opisanych w [6]. Szczególnie dobre efekty przebiegu procesu optymalizacyjnego uzyskano dla algorytmu AG1, który wykorzystano w prezentowanym zagadnieniu.

Wykorzystując omówioną wyżej technikę optymalizacyjną, ogólny algorytm działania pakietu do wyznaczania charakterystyk materiałowych można przedstawić tak jak na rys. 5.



Rys. 5. Ogólny algorytm działania pakietu do optymalizacyjnego wyznaczania charakterystyk materiałowych, przy wykorzystaniu interpolacyjnej funkcji MQ

W niniejszej pracy ograniczono się jedynie do porównywania wzorcowych i wyznaczanych jako optymalne wyników obliczeń symulacyjnych. Obliczenia symulacyjne sprzężonego zagadnienia elektromagnetyczno-cieplnego realizowano przy wykorzystaniu komercyjnego programu FLUX. W pracy analizowano jedynie wsady niemagnetyczne, co sprowadziło zadanie do optymalizacyjnego wyznaczania trzech charakterystyk materiałowych, tj. charakterystyki rezystywności, ciepła właściwego i przewodności cieplnej właściwej materiału

próbki wsadu w funkcji temperatury  $\vartheta$ . Przyjęto liniowy przebieg wszystkich powyższych charakterystyk w postaci:

$$y = x_1 (1 + x_2 \vartheta) \quad (11)$$

gdzie:  $x_1, x_2$  – stałe.

Przy przyjętym założeniu wektor decyzyjny procesu optymalizacyjnego zawierał 6 składowych (zmiennych decyzyjnych) i miał postać:

$$\mathbf{x} = \{x_1; x_2; x_3; x_4; x_5; x_6\} \quad (12)$$

Wartości poszczególnych zmiennych decyzyjnych (parametrów materiałowych) mogą się od siebie znacząco różnić (nawet o kilkanaście rzędów), co bardzo utrudnia prowadzenie procesu optymalizacji. Uwzględniając powyższe przeprowadzono normalizację wektora decyzyjnego  $\mathbf{x}$ , posługując się w procesie optymalizacji wektorem znormalizowanym  $\mathbf{x}^n$ , w którym poszczególne zmienne decyzyjne zostały odniesione do swoich wartości startowych:

$$\mathbf{x}^n = \{x_1 / x_{1,start}; x_2 / x_{2,start}; x_3 / x_{3,start}; x_4 / x_{4,start}; x_5 / x_{5,start}; x_6 / x_{6,start}\} \quad (13)$$

gdzie wektor startowy procesu optymalizacji wynosił:

$$\mathbf{x}_{start} = \{x_{1,start}; x_{2,start}; x_{3,start}; x_{4,start}; x_{5,start}; x_{6,start}\}$$

Dla funkcji celu postaci:

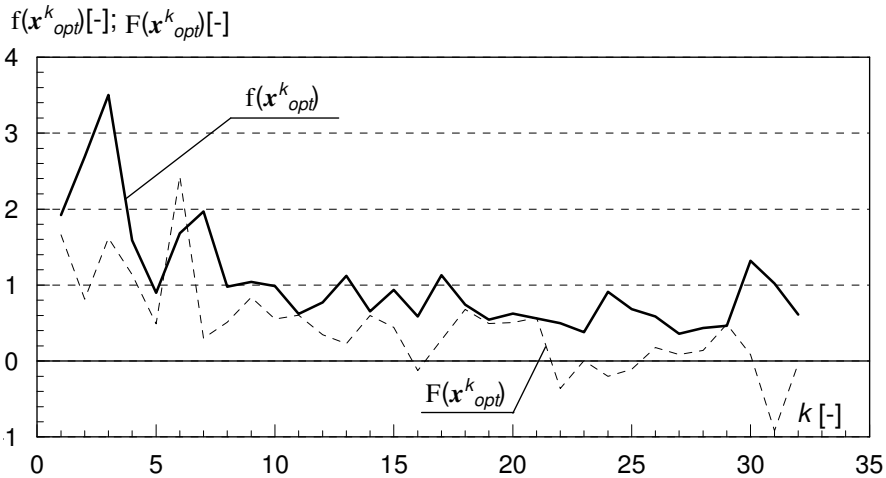
$$f(\mathbf{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i_p} \sum_{j=1}^{n_t} (\vartheta_{ji}^p - \vartheta_{ji}^o)^2}{i_p \cdot n_t}} \quad (14)$$

gdzie:  $\vartheta^p, \vartheta^o$  – pomierzona i obliczona wartość temperatury,  $i_p$  – liczba punktów kontrolnych (przyjęto  $i_p=8$ ) wartości temperatury,  $n_t$  – liczba chwil czasowych porównywania temperatury,

na rys. 6 przedstawiono wykresy zmian wartości funkcji celu  $f(\mathbf{x})$  i interpolacyjnej, wielokwadykowej, funkcji celu  $F(\mathbf{x})$  obliczonych dla uznanych za optymalne w kolejnych  $k$ -tych cyklach optymalizacyjnych wektorów zmiennych decyzyjnych  $\mathbf{x}_{opt}^k$ .

Zarówno wykres  $f(\mathbf{x})$  jak i wykres interpolacyjnej funkcji wielokwadykowej  $F(\mathbf{x})$ , wskazują na poprawny przebieg procesu optymalizacyjnego, w którym mamy do czynienia z sukcesywnym obniżaniem wartości funkcji celu. Występujący w algorytmie doboru punktów interpolacyjnych AG1 element

stochastyczny zwiększa wprawdzie lokalne zmiany obserwowanych przebiegów, ale obniża ryzyko pułapki minimum lokalnego.



Rys. 6. Zmiana wartości rzeczywistej  $f(x)$  i interpolacyjnej  $F(x)$  funkcji celu w trakcie procesu optymalizacyjnego

Efektywność prezentowanego procesu pośredniego ustalania charakterystyk materiałowych jest zdaniem autora jednak nadal zbyt mała i wymaga dalszych prac. Przyszłe badania zostaną również nakierowane na znacznie trudniejsze do analizy wsady ferromagnetyczne, które jednak stanowią podstawowy asortyment nagrzewanych indukcyjnie wsadów.

## LITERATURA

- [1] Zgraja J., Kula P., Pacyniak T., 'Simulation of Induction Hardening of Massive Elements', 16th International Conference on Electrical Machines ICEM2004, (2004), pp. 849-850.
- [2] Rappaz M., Desbiolles J-L., Drezet J, Gandin Ch.-A., Jacot A., Thevoz Ph., 'Application of Inverse Methods to the Estimation of Boundary Conditions and Properties', Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes, Eds. M. Cross and J. Campbell, (1995), pp. 449.
- [3] Zgraja J., 'Experimental Estimation the Initial Values of the Material Parameters of Induction Heated Charge, Determined by Optimization Process', Dresden, EPM2009, pp.197-200.
- [4] Bodzenta J., Kazmierczak-Balata A., Pyka M., New approach to data analysis in modified Ångström's method, Journal de Physique IV (Proceedings), Vol.e 137, Issue 1, November 2006, pp. 251-257.

- [5] Zgraja J., 'Bazujące na metodologii powierzchni odpowiedzi optymalizacyjne wyznaczanie parametrów materiałowych indukcyjnie nagrzewanego wsadu', *Przegląd Elektrotechniczny* nr 12/2009, ss. 212-215.
- [6] Zgraja J., 'Symulacja i optymalizacja komputerowa w analizie indukcyjnego nagrzewania powierzchni płaskich', *Zeszyt Naukowe PŁ*, nr 996, 2007.
- [7] Alotto P. et al., 'A multiquadrics-based algorithm for the acceleration of simulated annealing optimisation procedures', *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 32, No.3, (1996), pp.1198-1201.

## **EXPERIMENTAL-SIMULATION SYSTEM FOR INDIRECT DETERMINING OF MATERIAL CHARACTERISTICS OF INDUCTION HEATED CHARGE**

### **Abstract**

The computer simulations of coupled electromagnetic and thermal fields are commonly used during design process of induction heating systems. Their accuracy obviously depends on the knowledge of material characteristics, specially of the charge. At the lack of credible reference characteristics of the charge the specialist laboratory examinations are required. It is possible to solve this issue also in the indirect way, by determining material characteristics by using of optimisation algorithms in the process of comparing the calculated and measured temperature fields variation of induction heated specimen of the charge. At the work such a research stand was presented as well as a method of indirect determining material characteristics for nonmagnetic charges.

Politechnika Łódzka  
Katedra Informatyki Stosowanej