

JERZY ZGRAJA**Instytut Elektroenergetyki
Politechnika Łódzka**

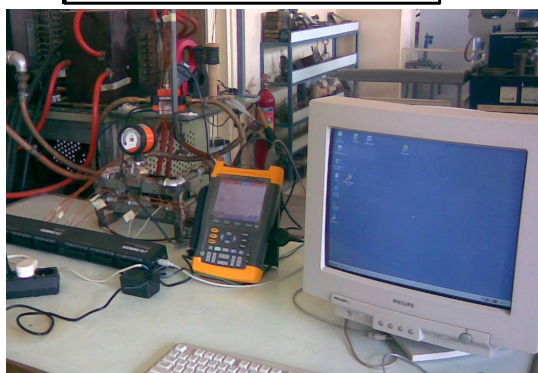
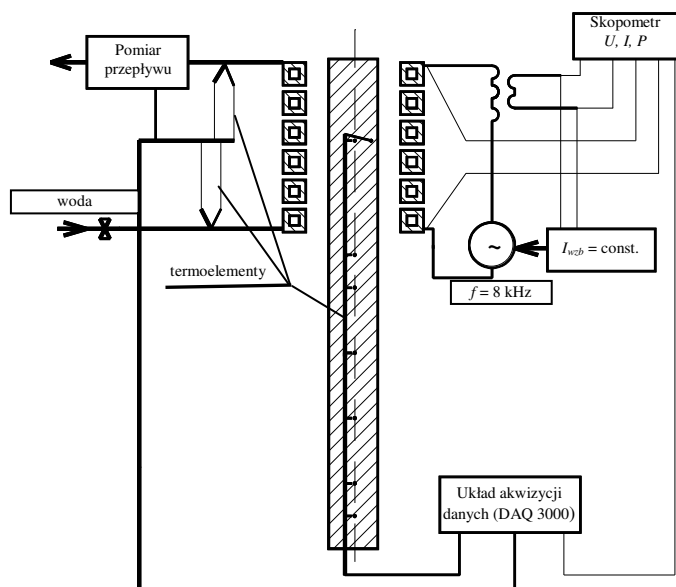
WYKORZYSTANIE DETERMINISTYCZNEJ TECHNIKI OPTYMALIZACJI DO OKREŚLENIA PARAMETRÓW MATERIAŁOWYCH INDUKCYJNIE NAGRZEWANYCH WSADÓW

Streszczenie – Przy braku wiarygodnych danych literaturowych wyznaczenie charakterystyk materiałowych wsadu wymaga przeprowadzenia specjalistycznych badań laboratoryjnych. Rozwiązania tego zagadnienia można poszukiwać również w metodzie optymalizacyjnego określenia charakterystyk materiałowych, wykorzystując w tym celu program do symulacji pracy układu wzbudnik-wsad oraz stanowisko do nagrzewania indukcyjnego próbki wsadu. W pracy zaprezentowano takie stanowisko badawcze oraz omówiono efektywność wykorzystania deterministycznej techniki sekwencyjnego programowania kwadratowego.

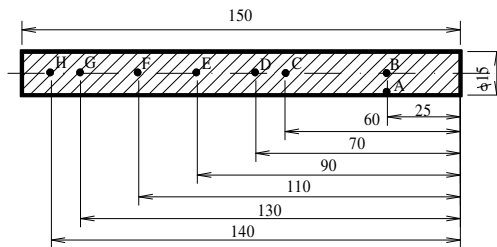
1. WPROWADZENIE

Wyznaczanie parametrów elektrycznych indukcyjnego układu grzejnego jest zazwyczaj realizowane na drodze symulacji komputerowej sprzężonego zagadnienia elektromagnetyczno-cieplnego, to jest poprzez rozwiązywanie sprzężonych równań Maxwella i Fouriera-Kirchhoffa. Prawidłowa realizacja tego zadania jest determinowana m.in. znajomością rzeczywistych wartości stałych materiałowych. Jest to szczególnie istotne dla materiału wsadu, dla którego należy znać rzeczywiste charakterystyki materiałowe w funkcji temperatury. Podawane w literaturze charakterystyki materiałowe dotyczą jedynie wybranych rodzajów materiałów, są one często niewystarczające do prawidłowego przeprowadzenia procesu symulacji indukcyjnego układu grzejnego, a nawet mogą prowadzić do poważnych błędów obliczeniowych [1]. Eksperymentalne wyznaczanie parametrów materiałowych jest również często trudno dostępne.

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 korekcie stałych materiałowych. Pewne szersze wykorzystania tej metody przedstawiono m.in. w pracy [2]. Niniejszy artykuł dotyczy stanowiska pomiarowo-symulacyjnego do określania parametrów materiałowych rzeczywistego wsadu na podstawie badania jego próbki na stanowisku do nagrzewania indukcyjnego. 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 pomiaru przebiegów temperatury w 8 punktach kontrolnych A÷H rozłożonych w próbce badawczej w sposób przedstawiony na rys. 2.



Rys. 1. Stanowisko badawcze

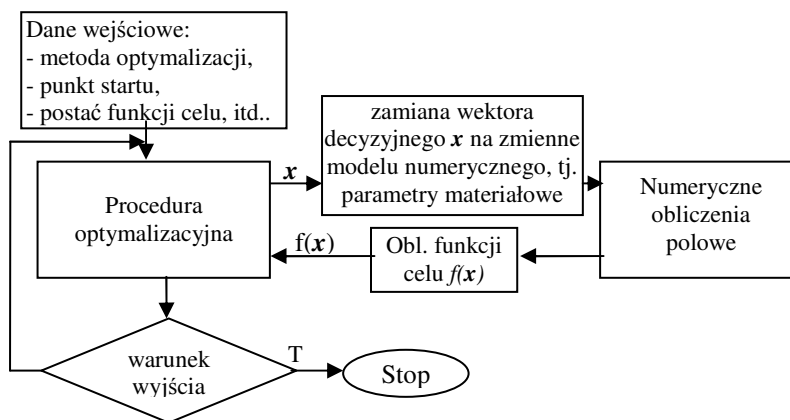


Rys. 2. Rozkład punktów pomiaru temperatury próbki badawczej

Te komputerowo zbierane informacje stanowiły podstawę do wyznaczania, 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. W prezentowanej pracy zbadano efektywność wykorzystania deterministycznej techniki optymalizacji do realizacji opisanego wyżej zadania.

2. PAKIET DO OPTIMALIZACYJNEGO WYZNACZANIA PARAMETRÓW MATERIAŁOWYCH

Do optymalizacyjnego wyznaczania charakterystyk materiałowych wykorzystano pakiet oprogramowania, którego ogólny algorytm działania przedstawiono na rys. 3. Pozwalał on na realizację zadań optymalizacyjnych nie tylko dla badanej, osiowoosymetrycznej, konstrukcji układu wzбудnik-wsad, ale również dla innych typów konstrukcji 2D. Przyjęto, że rozważania polowe będą dotyczyły sprzężonego zagadnienia elektromagnetyczno-cieplnego, co pozwoliło wyznaczać charakterystyki temperaturowe badanych materiałów wsadu.



Rys. 3. Ogólny algorytm pakietu do optymalizacji układu wzбудnik-wsad

W strukturze rozważanego pakietu obliczeniowego można wydzielić trzy podstawowe bloki funkcyjne:

- ◆ blok zarządzający,
- ◆ blok obliczeń polowych,
- ◆ blok algorytmu optymalizacyjnego.

Zarówno blok zarządzający, jak i blok algorytmu optymalizacyjnego zbudowano w środowisku programowania MATLAB, wykorzystując dodatkowo Toolbox z procedurami optymalizacyjnymi. W bloku obliczeń polowych posłużono się komercyjnym programem FLUX2D pozwalającym na realizację obliczeń elektromagnetyczno-ciepłnych. Wykorzystanie programu FLUX2D wynikało z jednej strony z dużych możliwości programu w obliczaniu sprzężonych zagadnień elektromagnetyczno-ciepłnych w połączeniu z zewnętrznym obwodem elektrycznym, a z drugiej strony z istniejącej w programie możliwości zewnętrznego sterowania jego pracą.

3. FUNKCJA CELU ORAZ NORMALIZACJA ZMIENNYCH DECYZYJNYCH

Optymalizacyjne wyznaczanie charakterystyk materiałowych oparto na porównywaniu obliczanych symulacyjnie i pomiarowo przebiegów temperatury w przedstawionych na rys.2 ośmiu punktach kontrolnych A÷H. Bazując na tej ogólnej zasadzie określono, podlegającą minimalizacji w procesie optymalizacji, funkcję celu postaci:

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

gdzie: i_p – liczba punktów kontrolnych ($i_p = 8$) wartości temperatury, n_t – liczba chwil czasowych pomiaru temperatury, ϑ^p – wartość pomierzona temperatury, ϑ^o – obliczona symulacyjnie wartość temperatury.

Tak określona funkcja celu jest uwrażliwiona na względne błędy obliczania wartości temperatury, a nie na różnice bezwzględne.

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. Przyjęto liniowy przebieg wszystkich powyższych charakterystyk w postaci:

$$y = x_1 (1 + x_2 \vartheta) \quad (2)$$

gdzie: x_1, x_2 – stałe.

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

$$\mathbf{x} = \{x_1; x_2; x_3; x_4; x_5; x_6\} \quad (3)$$

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:

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

gdzie wektor startowy procesu optymalizacji wynosi:

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

Badana próbka wsadu została zaopatrzona w dwuwarstwową izolację cieplną powierzchni bocznych. Zaizolowano cieplnie również czołową powierzchnię górną wsadu, natomiast dolna powierzchnia czołowa była w sposób pośredni chłodzona wodą, tak jak to przedstawiono na rys. 4.



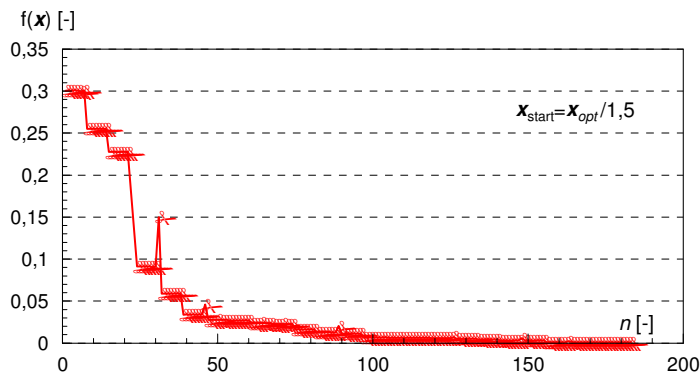
Rys. 4. Układ wzbudnik-próbka badawcza wsadu

W procesie symulacji przyjęto dodatkowo, że na powierzchni bocznej wsadu występuje trzeci warunek brzegowy wymiany ciepła o parametrach: $\alpha = 8 (1+2 \cdot 10^{-3} \vartheta) \text{ W/m}^2/\text{K}$, $\varepsilon = 0,8$, a na powierzchni izolującej górne czoło wsadu: $\alpha = 10 (1+2 \cdot 10^{-3} \vartheta) \text{ W/m}^2/\text{K}$, $\varepsilon = 0,8$, oszacowany w sposób opisany w [3]. Dla dolnej chłodzonej powierzchni przyjęto pierwszy warunek brzegowy.

4. EFEKTYWNOŚĆ DETERMINISTYCZNEJ TECHNIKI SEKWENCYJNEGO PROGRAMOWANIA KWADRATOWEGO PRZY WYZNACZANIU PARAMETRÓW MATERIAŁOWYCH INDUKCYJNIE NAGRZEWANEGO WSADU

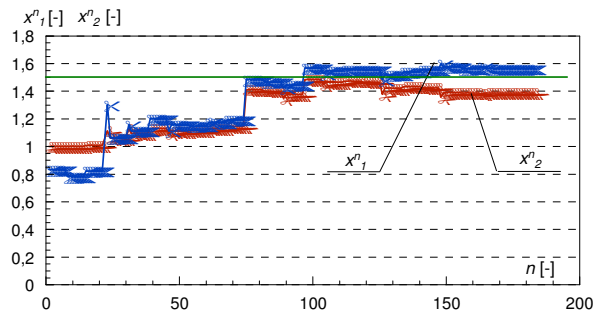
W pracy przebadano efektywność deterministycznej techniki sekwencyjnego programowania kwadratowego [4] w procesie optymalizacyjnego wyznaczania charakterystyk materiałowych. W prezentowanych badaniach ograniczono się do porównywania wzorcowych i wyznaczanych w trakcie optymalizacji wyników obliczeń symulacyjnych. Oznacza to, że do realizacji tego celu rzeczywiste wyniki pomiaru temperatury zastąpiono wynikami wzorcowych obliczeń symulacyjnych. Parametry materiałowe przyjęte w obliczeniach wzorcowych uznawano za wartości optymalne, tj. takie do których powinien dążyć proces optymalizacyjny. Startowe wektory decyzyjne procesu optymalizacji przyjmowano w przedziale $x_{opt}/1,5 \div 1,5x_{opt}$, tj. w granicach oczekiwanego błędu jaki może być popełniany przy posługiwaniu się w obliczeniach symulacyjnych rzeczywistych układów wzbudnik-wsad parametrami materiałowymi określonymi na podstawie danych literaturowych.

Na rys. 5 przedstawiono przebieg procesu optymalizacji realizowanego dla wsadu o parametrach zbliżonych do stali nierdzewnej.

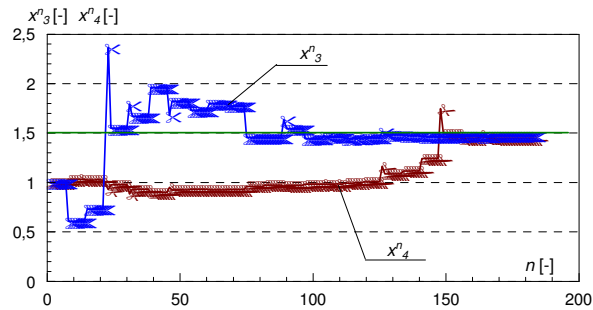


Rys. 5. Zmiana wartości funkcji celu $f(x)$ w trakcie procesu optymalizacyjnego z techniką deterministyczną

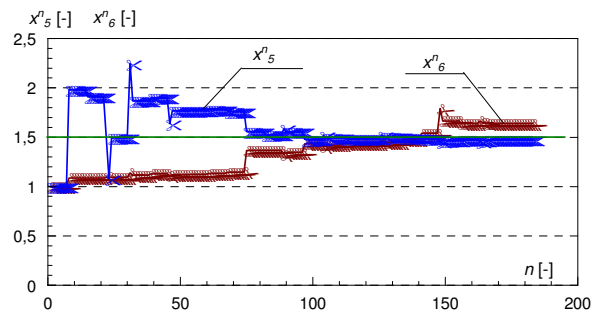
Przedstawiony przebieg pokazuje, że proces optymalizacyjny prowadzi do radykalnego obniżenia wartości funkcji celu w stosunku do wartości dla wektora startowego. Jako wartości wektora startowego przyjęto $x_{start} = x_{opt}/1,5$. Na rys. 6÷8 przedstawiono przebiegi zmian znormalizowanych zmiennych decyzyjnych $x_1^n \div x_6^n$ w trakcie procesu optymalizacji.



Rys. 6. Przebieg wartości normalizowanych zmiennych decyzyjnych x_1^n i x_2^n w funkcji liczby n obliczenia wartości funkcji celu



Rys. 7. Przebieg wartości normalizowanych zmiennych decyzyjnych x_3^n i x_4^n w funkcji liczby n obliczenia wartości funkcji celu



Rys. 8. Przebieg wartości normalizowanych zmiennych decyzyjnych x_5^n i x_6^n w funkcji liczby n obliczenia wartości funkcji celu

Przedstawione na rys. 6÷8 przebiegi zmian wszystkich zmiennych decyzyjnych (parametrów materiałowych) można uznać za zadawalające, gdyż dążą one do optymalnej wartości 1,5. Jedyne w przypadku zmiennych x_2^n i x_6^n (odzwierciedlających szybkość zmian z temperaturą rezystywności i akumulacyjność ciepłej, co stosunkowo słabo przenosi się na całe przebiegi zmian temperatury)

wartości uznane za optymalne odbiegały więcej niż o 5% od wartości optymalnych. Zaprezentowana metoda optymalizacji z techniką deterministyczną wykazywała się, w zdecydowanej większości rozważanych przypadków, większą efektywnością niż metoda bazująca na interpolacyjnej funkcji wielokwadrkowej [5]. Metoda ta jednak i w tym przypadku wykazywała typową dla metod deterministycznych skłonność wpadania w tzw. „pułapkę minimum lokalnego”, co obniża jej efektywność.

LITERATURA

- [1] Zgraja J., Kula P., Pacyniak T.: Simulation of Induction Hardening of Massive Elements, 16th International Conference on Electrical Machines ICEM2004, pp. 849-850, Kraków, 2004.
- [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., Teodorczyk T.: Experimental – Numerical Method for Estimation of Convection Coefficient during Induction Heating, XVI International Congress on Electricity Applications in Modern World UIE, Cracow, May, 2008, pp. 133-134.
- [4] The Math Works Inc. Optimization Toolbox 3 User's Guide, 2007.
- [5] Zgraja J.: Wykorzystanie funkcji wielokwadrkowej w metodzie optymalizacyjnego określania parametrów indukcyjnie nagrzewanego wsadu, materiały z konferencji – Postępy w Elektrotechnice Stosowanej, PES-7, Kościelisko, 2009 r.

USING THE DETERMINISTIC TECHNIQUE IN THE OPTIMISATION METHOD OF DETERMINING THE PROPERTIES OF INDUCTION HEATED CHARGE

Summary

In many cases it is impossible to find in accessible references the credible information about charge material properties. In such situation the material properties of the charge should be experimentally determined before the computer simulation, which can be difficult and expensive. In other way it can be realised by indirect method by comparing, in optimisation process, the experimental and simulation results. In the paper such method using deterministic optimization technique has been presented.

Keywords: induction heating, optimisation