ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1991

Seria: ELEKTRYKA z. 113 Nr kol. 983

Tadeusz SKOCZKOWSKI

ALGORYTM WYZNACZANIA PARAMETRÓW ELEKTROMAGNETYCZNYCH PRZY INDUKCYJNYM NAGRZEWANIU WSADU FERROMAGNETYCZNEGO

Streszczenie. W artykule omówiono pewną metodę obliczania parametrów wsadu ferromagnetycznego nagrzewanego indukcyjnie. Idea metody polega na podziale masywnego elementu ferromagnetycznego na cienkie warstwy o ustalonych wartościach stałych materiałowych ρ i μ i powiązaniu wartości natężenia pola megnetycznego na zewnętrznej i wewnętrznej ściance każdej warstwy z jej rezystancją i reaktancją. Metoda zakłada harmoniczność pól, uwzględnia nieliniowość charakterystyki magnesowania, zależność przenikalności magnetycznej i rezystywności od temperatury i dowolny, ale z góry zadany rozkład temperatury w nagrzewanym ciele. Ma ona charakter iteracyjny, a jej realizacja komputerowa zapewnia dużą szybkość obliczeń. Może ona być uzupełnieniem klasycznych metod projektowania nagrzewnic lub stanowić samodzielny blok obliczeń elektromagnetycznych w modelach pól sprzężonych. Zastosowanie metody zilustrowano obliczeniami intensywności zjawiska tłumienia fali elektromagnetycznej w ściance rury przy różnych stopniach jej nagrzania.

1. Wstęp

Z uwagi na złożoność zjawisk fizycznych występujących w nagrzewnicach indukcyjnych zadanie obliczania parametrów elektrycznych nagrzewnicy stanowi trudne zagadnienie teoretyczne i obliczeniowe. Współczesne modele procesów nagrzewania indukcyjnego oparte są głównie na MRS lub MES i umożliwiają analizę wielowymiarowych pól nieliniowych i niestacjonarnych [1].

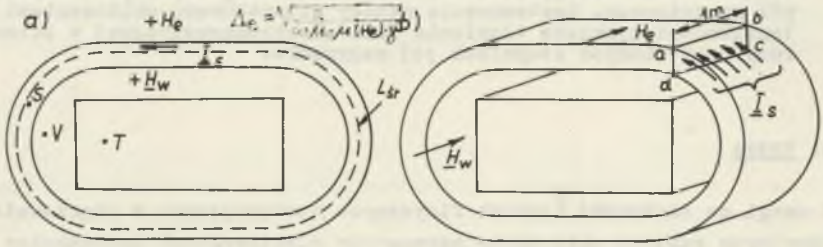
Modele takie są jednak bardzo złożone, a ich użycie bardzo kosztowne. Istnieje cały szereg zagadnień praktyki inżynierskiej, które wymagają modeli prostszych, szybszych i tańszych. Takimi zagadnieniamo mogą być np. symulacja komputerowa procesu zagrzewania z uwzględnieniem wpływu źródła zasilania lub optymalizacja nagrzewnic. Dlatego też w dalszycm ciągu stosuje się klasyczne metody obliczania nagrzewnic indukcyjnych, które pozwalają dość dokładnie wyznaczyć parametry nagrzewnicy, o ile tylko potrafimy z małym błędem obliczyć parametry samego wsadu, szczególnie ferromagnetycznego [2].

W niniejszej pracy zostanie omówiony sposób obliczania parametrów wsadu ferromagnetycznego, który w powiązaniu z jedną ze znanych metod obliczania nagrzewnic może stanowić jej cenne uzupełnienie.

2. Zarys metody

Do wyznaczenia parametrów elektromagnetycznych wsadu ferromagnetycznego nagrzewanego indukcyjnie można wykorzystać metodę, której idea polega na podziale grubego elementu ferromagnetycznego na cienkie warstwy o ustalonych wartościach stałych materiałowych ρ i μ i powiązaniu wartości natężenia pola magnetycznego na zewnętrznej ściance każdego elementu z parametrami jego magnetycznego, a następnie elektrycznego schematu zastępczego [3, 4, 5].

Zadanie nasze i jego założenia sformułujemy w sposób następujący: Wewnątrz ciała S o cienkich ściankach ($d \ll \Delta e$) i dowolnym kształcie znajduje się ciało T o znanej impedancji. Zakładamy, że ciało S jest nieskończenie długie, wszystkie przebiegi są harmoniczne, na zewnętrznej powierzchni ciała S wymuszane jest pole magnetyczne H_e, pomija się reakcję prądów wirowych ciała T. Celem naszym jest obliczenie wartości natężenia pola H_w na wewnętrznej powierzchni ciała S, prądu I_s płynącego w ciele S, mocy czynnej wydzielanej w S oraz impedancji układu ciał S i T. Szkic układu obliczeniowego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Szkic układu obliczeniowego

Fig. 1. Schematic diagram of the analytical system

Dla uproszczenia zapisu załóżmy, że rozpatrujemy jedynie fragment o długości jednostkowej np. 1 metra nieskończenie długiego ciała S.

Związek między natężeniami H_e i H_w na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni ciała S można znaleźć stosując prawo Ampera.

$$\oint_{L(abcda)} (\vec{H}_e - \vec{H}_w)\vec{dl} = \underline{I}_S \, . \tag{1}$$

Zastąpmy teraz nasze cienkie ciało S bardzo cienką powłoką o długości średniej $L_{śr}$ i rezystancji R_S:

$$R_S = \oint_{L_{śr}} \frac{\rho}{d} dl . \tag{2}$$

Przy założonej harmoniczności pola dla konturu $L_{śr}$ można zapisać:

$$\underline{U}_1 = j\omega\underline{\Phi}_1 = j\omega(\underline{\Phi}_T + \Phi_V + \underline{\Phi}_{wew}) = j\omega(\frac{1}{\underline{Z}_{MT}} + \frac{1}{R_{MV}} + \frac{1}{R_{MS_{wew}}})\underline{H}_w . \tag{3}$$

Po uwzględnieniu związku między impedancją elektryczną i magnetyczną $Z = \frac{j\omega}{\underline{Z}_M}$ zapiszmy równanie (3) w postaci:

$$\underline{U}_1 = (\underline{Z}_T + jX_V + jX_{S_{wew}})\underline{H}_w \tag{4}$$

gdzie: Φ_1 - całkowity strumień magnetyczny skojarzony z ciałami T,V wewnętrzną częścią (od ścianki wewnętrznej do $L_{śr}$) ciała S, $\underline{\Phi}_T$, Φ_V, $\underline{\Phi}_{S_{wew}}$ - - składowe strumienia $\underline{\Phi}_1$, skojarzone odpowiednio z ciałami T, V, i wewnętrzną częścią S, Z_{MT}, Z_T - impedancja magnetyczna i elektryczna ciała T, R_{MV}, R_V, $R_{MS_{wew}}$, $R_{S_{wew}}$ - rezystancja magnetyczna i elektryczna odpowiednio ciała V i wewnętrznej części S, $\underline{U}_1$ - napięcie indukowane wzdłuż konturu $L_{śr}$ przez zmianę strumienia $\underline{\Phi}_1$.

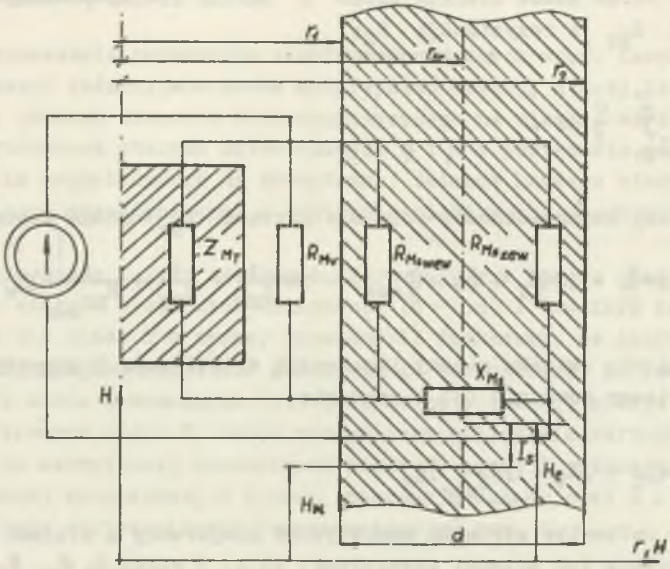
Napięcie $\underline{U}_1$ jest równoważone przez spadek napięcia wywołany przepływem prądu $\underline{I}_s$ przez rezystancję R_S:

$$\underline{I}_S R_S = (\underline{Z}_T + jX_V + jX_{S_{wew}})\underline{H}_w . \tag{5}$$

Magnetyczny schemat zastępczy odpowiadający równaniom (1) i (3) w przypadku rury o promieniach r_1 i r_2 przedstawiono na rys. 2.
Magnetycznemu schematowi zastępczemu z rys. 2 odpowiada elektryczny schemat zastępczy z rys. 3.
Ścianka rury została podzielona na dwie części promieniem $r_{śr}$, według wzorów w dalszej części pracy, warstwa wewnętrzna posiada rezystancję magnetyczną $R_{MS_{wew}}$, a warstwa zewnętrzna $R_{MS_{zew}}$, X_{MS} odpowiada rezystancji elektrycznej R_S.

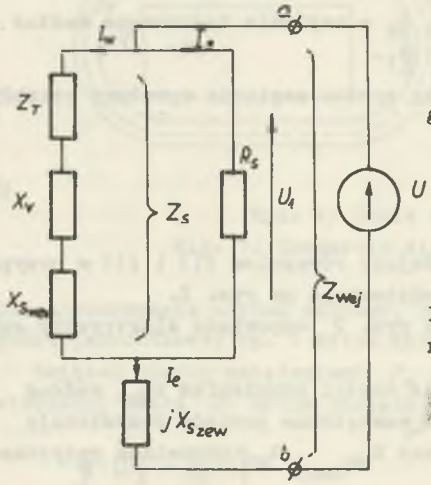
Z równań (1) i (5) można zapisać:

$$\underline{H}_w = H_e \frac{R_S}{R_S + \underline{Z}_S} \tag{6}$$



Rys. 2. Podział rury na warstwy

Fig. 2. Pipe division into layers



Rys. 3. Magnetyczny schemat zastępczy

Fig. 3. Magnetic equivalent circuit

$$\underline{I}_S = H_e \frac{\underline{Z}_S}{R_S + \underline{Z}_S} \tag{7}$$

gdzie:

$$\underline{Z}_S = \underline{Z}_T + jX_V + jX_{S_{wew}} \tag{8}$$

X_V - reaktancja szczeliny powietrznej między T i S.

Impedancja wyjściowa Z_{wej} układu widziana z zacisków a - b wynosi:

$$\underline{Z}_{wej} = \frac{R_S \underline{Z}_S}{R_S + \underline{Z}_S} + jX_S. \tag{9}$$

Moc czynna wydzielona w ciele S wynosi:

$$P_S = I_S^2 R_S \tag{10}$$

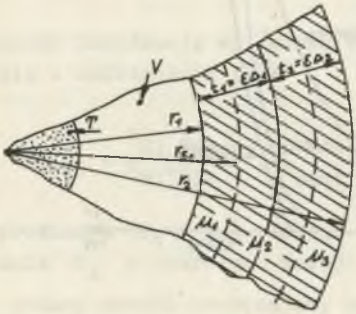
moc czynna wydzielona w ciele T wynosi:

$$P_T = H_W^2 \mathrm{Re}\{Z_T\}. \tag{11}$$

3. Zastosowanie metody do analizy wsadów ferromagnetycznych

Przedstawiony sposób obliczania parametrów elektrycznych bardzo cienkich warstw można stosować w przypadku cylindrycznych ciał ferromagnetycznych, dla których głębokość wnikania jest mniejsza lub porównywalna z grubością ścianki wsadu. Wystarczy wtedy podzielić ściankę cylindra na cienkie warstwy, z których każda spełnia warunek:

$d_i \ll \Delta_e$ ze stałymi wartościami ρ_i i μ_i,



Rys. 4. Elektryczny schemat zastępczy

Fig. 4. Electrical equivalent circuit

a następnie stosując kolejno zależności (6), (7), (9) można obliczać parametry układów ferromagnetycznych o dowolnej grubości ścianki. Należy wtedy postępować w sposób następujący. Na rys. 4 przedstawiono rurę ferromagnetyczną, wewnątrz której znajduje się ciało T o impedancji Z_T. Rozkład $\rho(T)$, a więc i rozkład temperatury w ściance rury S uważamy za znany. Zakładamy pewną wartość H_w na wewnętrznej powierzchni rury i znajdujemy z krzywej nagrzewania odpowiadającą jej przenikalność μ_1, a następnie głębokość wnikania Δ_1. Wprowadzamy warstwę o szerokości $t_1 = \varepsilon\Delta_1$, gdzie $\varepsilon \ll 1$ i zakładamy, że na grubości t_1 rezystywność ma stałą wartość ρ_1. Przyjmujemy, że na promieniu $r_{s1} = r_1 + \frac{1}{2} t_1$ przepływa cały prąd $\underline{I}_1$, jaki indukuje się w warstwie o szerokości t_1. Oznacza to, że natężenie pola zmienia się skokowo na promieniu r_{s1} od wartości $\underline{H}_w$ do $\underline{H}_{e1}$. Przenikalność magnetyczna będzie miała wartość:

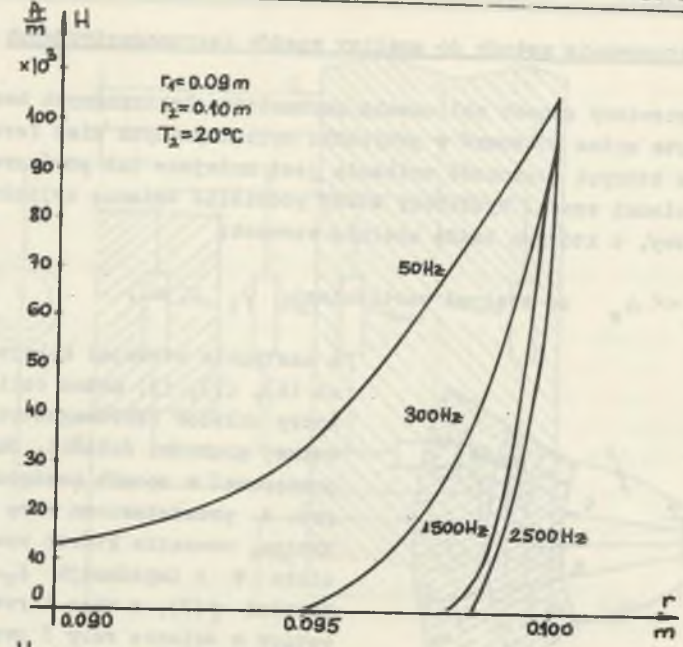
$$\mu = \mu_1(H_w) \quad \text{dla} \quad r_1 \leq r \leq r_{S1}$$

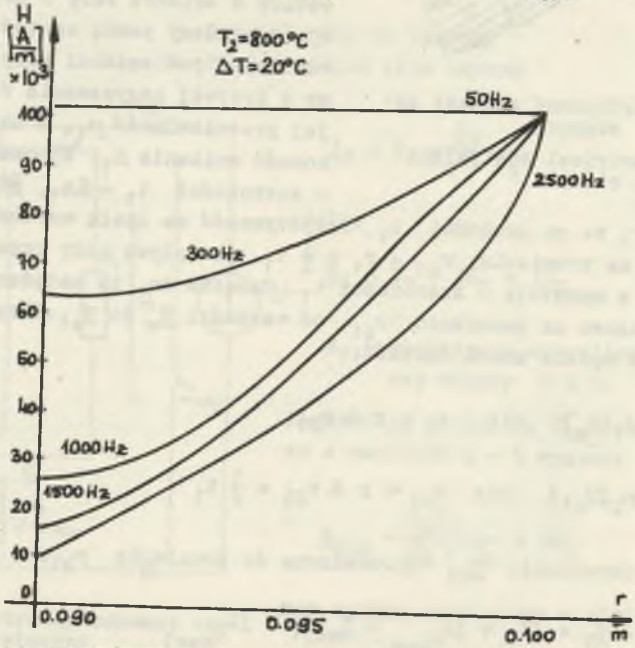
$$\mu = \mu_2(H_{e1}) \quad \text{dla} \quad r_{S1} < r \leq r_{S1} + \frac{1}{2} t_1 \,. \tag{12}$$

Obliczamy impedancję $\underline{Z}_{s1}$ sprowadzoną do promienia r_{S1}:

$$\underline{Z}_{S1} = \underline{Z}_T + jX_V + jX_{S_{wew}} = \underline{Z}_{wej1} + jX_{S_{wew1}} \tag{13}$$

gdzie: $X_{S_{wew1}} \cong \omega\mu_0\mu_1\pi r_{s1} t_1$ reaktancja wewnętrznego słoja pierwszej warstwy.





Rys. 5. Rozkład modułu natężenia pola magnetycznego w ściance rury dla różnych częstotliwości
a) stan zimny, b) stan gorący

Fig. 5. Distribution of magnetic field strength in the pipe wall for different frequencies
a) cold state, b) hot state

Zgodnie z zależnością (6) obliczamy:

$$\underline{H}_{e1} = \underline{H}_w(1 + \frac{\underline{Z}_{S1}}{R_{S1}}) \tag{14}$$

gdzie: $R_{S1} = \frac{2\pi\varrho_1 \, r_{S1}}{t_1}$ - rezystancja pierwszej warstwy.

Następnie obliczamy $\mu_2 = f(H_{e1})$ i reaktancję zewnętrznego słoja pierwszej warstwy:

$$X_{S_{zew}} \cong \omega\mu_0\mu_2 \; r_{S1} \; t_1 \; . \tag{15}$$

Obliczamy impedancję wyjściową dla promienia $(r_1 + t_1)$ pierwszej warstwy zgodnie z zależnością (9):

$$\underline{Z}_{wyj1} = \frac{R_{S1} \, \underline{Z}_{S1}}{R_{S1} + \underline{Z}_{S1}} + jX_{S_{wew1}} = \underline{Z}_{wej2} \; . \tag{16}$$

Dla promienia $(r_1 + t_1)$, znając ϱ_2 i μ_2, znajdujemy nową głębokość wnikania Δ_2 i szerokość nowej warstwy $t_2 = \varepsilon\Delta_2$.

W podany sposób postępujemy aż do momentu osiągnięcia zewnętrznej powierzchni rury. Porównujemy obliczoną wartość H_e z wartością zadaną i jeżeli te wartości różnią się nieznacznie, obliczenia przerywamy. Jeżeli błąd obliczeń jest zbyt duży, wybieramy nową wartość H_w i powtarzamy procedurę.

Program napisany na EMC wg powyższego algorytmu został wykorzystany do określenia wpływu zmian rezystywności i jej współczynnika temperaturowego, charakterystyki magnesowania, wymiarów geometrycznych rury, temperatury powierzchni i jej gradientu w ściance rury oraz częstotliwości na parametry wsadu [5].

Zastosowanie metody zilustrowano obliczeniami intensywności zjawiska tłumienia fali elektromagnetycznej w ściance rury przy różnych stopniach jej nagrzania (rys. 5).

4. Podsumowanie

Przedstawiona metoda oparta jest na bardzo prostych podstawach teoretycznych i może być łatwo zrealizowana na EMC. Pozwala ona uwzględnić w obliczeniach nieliniowość charakterystyki magnesowania ferromagnetyka i nierównomierny stopień nagrzania wsadu. Może być traktowana jako uzupełnienie klasycznych metod obliczania nagrzewnic lub jako blok obliczeń elektromagnetycznych w modelach pól sprzężonych procesu nagrzewania indukcyjnego.

LITERATURA

[1] Lavers J.D.: Numerical solution methods for electroheat problems, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG - 19, No 6, November 1983.

[2] Słuchockij A.A., Ryskin S.E.: Induktory dla indukcjonnogo nagriewa. Leningrad, Energija, 1974.

[3] Niemkow W.S.: Indukcjonnyj nagriew obłoczok s proizwolnoj tolszczinoj stienki. Izw. AN SSSR "Energetika i Transport" nr 3 1979.

[4] El. - Markaby M.S., Fawzi T.H., Ahmed M.T.: Approximate treatment of nonlinear current problems, IEEE Trans on Magnetics, Vol. MAG - 18 No 6, November 1983.

[5] Skoczkowski T.: Wpływ zmian częstotliwości, temperatury i parametrów materiałowych na rezystancję i reaktancję wsadu rurowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Elektryka, z. 113, Gliwice 1989.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Kazimierz Zakrzewski

Wpłynęło do redakcji dnia 2 maja 1988 r.

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ЗАГОТОВКИ

Р е з ю м е

В статье описан метод определения параметров индукционно нагреваемой ферромагнитной заготовки. Идея метода заключается в разделении массивного ферромагнитного элемента на такие слои с постоянными коэффициентами материала и связи значений напряженности магнитного поля на внешней и внутренней стенке каждого слоя с ее омическим и реактивным сопротивлением. В методе предполагаются гармонические поля, учитывается нелинейная характеристика намагничивания, зависимость магнитной проницаемости и удельного сопротивления от температуры и произвольное наперед заданное распределение температуры в нагреваемом теле.

Метод имеет итерационный характер а его реализация на ЭВМ обеспечивает большую скорость расчетов. Может он быть дополнением классических методов проектирования индукционных установок или быть независимым блоком электромагнитных расчетов в моделях связянных полей. Применение метода проиллюстрировано расчетом интенсивности затухания электромагнитной волны в стенке трубы при различных степенях ее нагрева.

ALGORITHM OF ELECTROMAGNETIC PARAMETERS EVALUATION IN THE INDUCTION HEATED FERROMAGNETIC BODY

S u m m a r y

A method of calculating the electromagnetic parameters of induction heated ferromagnetic body has been presented in this paper. The idea of the method consists in diving thick ferromagnetic body into thin layers with fixed material constants ϱ and μ and in connecting the values of electromagnetic field strength at external and internal walls of each layer with its resistance and reactance. The method assumes harmonic fields, takes into account the nonlinearity of the magnetic curve, dependence of magnetic permeability and resistivity on temperature and arbitraty but given in advance, temperature distribution in the heated body. It is of iterative type and its computer application enables fast computations. The method can be treated as an appendix to the classical methods of designing induction heaters or as an independent block of electromagnetic computations in coupled field models. Its application has been illustrated by evaluation of the intensity of electromagnetic wave damping in the pipe wall for different thermal states.