

Tadeusz SKOCZKOWSKI

BADANIE POLA ELEKTRYCZNEGO I TEMPERATURY W NAGRZEWNICACH INDUKCYJNYCH PRZEGLĄD LITERATUROWY

Sreszczenie: Artykuł stanowi przegląd metod stosowanych przy badaniu pól elektromagnetycznych i temperatury w nagrzewnicach indukcyjnych. Podano cechy nagrzewnic indukcyjnych, które mają znaczenie przy badaniu zjawisk fizycznych w nagrzewnicach i podano cechy dobrej metody badania nagrzewnic indukcyjnych. Omówiono takie metody badania jak: metody analityczne, modelowanie analogowe, modelowanie fizyczne, metody numerycznej analizy pól ze szczególnym uwzględnieniem metod bazujących na opisie całkowym. Podano przykłady zastosowania poszczególnych metod. Przedstawiono metody badania pól sprzężonych w nagrzewnicach indukcyjnych. Omówiono zalety, wady i perspektywy zastosowania przedstawionych metod.

1. WSTĘP

Badanie zjawisk elektromagnetycznych i termokinetycznych w nagrzewnicach indukcyjnych jest zadaniem niezwykle atrakcyjnym z punktu widzenia teorii pola i zastosowań metod numerycznych. Nagrzewnice indukcyjne charakteryzują m.in. następujące interesujące nas przy modelowaniu cechy:

- składają się z obszarów przewodzących i nieprzewodzących, materiałów ferromagnetycznych i mogą zawierać części ruchome;
- wymuszenie może mieć charakter prądowy lub napięciowy a przebiegi wymuszające mogą być niesinusoidalne;
- pola elektromagnetyczne i temperatury są bardzo silnie sprzężone;
- pola są silnie nieliniowe a w materiałach ferromagnetycznych występuje bardzo silne nasycenie magnetyczne;
- zastępcze stałe czasowe obu pól różnią się o rzędy;
- pola opisane są mieszanymi równaniami eliptyczno-parabolicznymi;
- geometria nagrzewnic dopuszcza zazwyczaj analizę dwuwymiarową (2D) pól;

- istnieją duże trudności z dokładnym przyjęciem warunków granicznych (dotyczy to głównie pola temperatury), jak i z późniejszą weryfikacją eksperymentalną uzyskanych wyników obliczeń;
- układ sterowania i regulacji źródła zasilania ma istotny wpływ na proces nagrzewania, szczególnie przy zasilaniu nagrzewnic z przekształtników tyrystorowych;
- nagrzewnice mogą wchodzić w skład złożonych procesów technologicznych. Metoda umożliwiająca badanie nagrzewnic indukcyjnych powinna:
 - umożliwiać uwzględnienie powyższych cech, oczywiście tylko w przypadkach, gdy jest to konieczne;
 - zapewniać dużą dokładność, krótki czas obliczeń a zatem i niski koszt obliczeń;
 - wymagać niewiele danych wejściowych i obliczać użyteczne dane projektowe;
 - zachowywać uniwersalność przy zamianie pewnych danych wejściowych;
 - umożliwiać pewną analizę a nawet optymalizację procesu nagrzewania;
 - być dostosowana do wykonywania nawet na komputerach osobistych np. w standardzie IBM/AT.

Poniżej zostaną omówione zalety, wady i perspektywy rozwoju różnych metod badania pól w nagrzewnicach indukcyjnych.

2. BADANIE POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO

A. METODY ANALITYCZNE

Można zaproponować następujący podział tej bardzo obszernej grupy metod:

- rozwiązywanie analityczne równań różniczkowych 1D,
- metoda rozdzielania zmiennych,
- metoda całki i szeregu Fouriera,
- metody specjalne.

Zalety tych metod są następujące: są najtańsze i pozwalają uzyskać wyniki w stosunkowo krótkim czasie, końcowe rozwiązanie otrzymuje się w postaci wzorów zamkniętych, co ułatwia dyskusję nad wpływem poszczególnych parametrów i optymalizację procesu, opisują rozkład pola w badanym obszarze i nie ograniczają się do jego dyskretnych punktów, umożliwiają weryfikację wyników metod numerycznych [4, 11, 22, 25, 31, 37, 42, 46, 48, 49, 53].

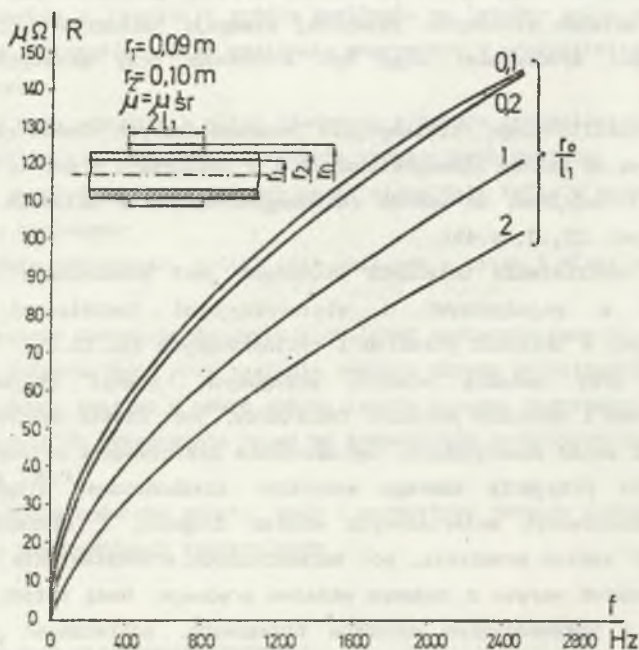
Wadą jest konieczność ich stosowania przy tak silnych założeniach upraszczających, że uzyskane wyniki obarczone są zazwyczaj dużym błędem, w ten sposób zniweczona zostaje ich największa zaleta - dokładność samej metody. Stosowane mogą być w układach o prostej geometrii lub oddzielnych częściach układów złożonych; zazwyczaj wymagają założenia o liniowości i jednorodności środowiska; mogą być stosowane przy prostych warunkach brzegowych.

Metody analitycznego rozwiązywania jednowymiarowych równań różniczkowych stosowane są do wsadów niemagnetycznych i w połączeniu z metodą Nejmmana lub metodami iteracyjnymi do wsadów ferromagnetycznych w układach płaskich i cylindrycznych [31, 37, 46, 49].

Metoda rozdzielenia zmiennych stosowana jest powszechnie do obliczeń nagrzewnic z pojedynczymi i wielosekcyjnymi induktorami z polami harmonicznymi w układach płaskich i cylindrycznych [22, 25, 31]. Ma ona duże znaczenie przy badaniu efektów brzegowych, ocenie wpływu bocznika magnetycznego i sposobów połączeń induktorów, jest często wykorzystywana do weryfikacji metod numerycznych. Ograniczenia zastosowania metody wynikają z konieczności przyjęcia szeregu warunków: nieskończonej długości wsadu, stałych właściwości materiałowych wzdłuż długości i obszarowo stałych właściwości wzdłuż promienia, pól harmonicznych, przedstawienia wzbudnika w formie cienkich warstw z zadanyim okładem prądowym. Wadą metody są również trudności z wprowadzaniem warunków brzegowych, konieczność numerycznego wyznaczania współczynników harmonik, złożoność wzorów końcowych szczególnie przy dużej ilości warstw podzłału obszaru. Zastosowanie tej metody upraszcza się obliczeniowo przy wykorzystaniu impedancyjnych warunków granicznych pozwalających połączyć rozwiązania dla zadania wewnętrznego i zewnętrznego.

Metodzie rozdzielenia zmiennych są bliskie pod względem ograniczeń, wad i zalet metody całki i szeregu Fouriera [10, 31, 42, 53]. Idea tych metod polega na znalezieniu rozwiązania równania pola elektromagnetycznego zapisanego dla potencjału wektorowego w postaci całki lub szeregu Fouriera. Dodatkową wadą metody szeregu Fouriera jest wprowadzanie źródła błędu obliczeń wynikającego z konieczności przyjęcia stosunku długości hipotetycznych wzbudników do ich odległości. Czasochłonność obliczeń obu metodami na EMC sprawia, że atrakcyjność metod maleje, a korzyści wynikające z uwzględnienia wpływu skończonej długości wzbudnika, mogą w przypadku wsadów ferromagnetycznych, zostać zniwelowane koniecznością przyjęcia do obliczeń uśrednionej wartości przenikalności magnetycznej wsadu [42]. Na rys.1 pokazano przykład obliczeń

wykonanych metodą całki Fouriera - zmianę rezystancji rury ferromagnetycznej w funkcji częstotliwości dla różnych stosunków promienia rury do jej długości [42].



Rys.1. Rezystancja wsadu rurowego w funkcji częstotliwości obliczona metodą całki Fouriera

Fig.1. Resistance of the heated pipe versus frequency computed by the method of Fourier's integral

Specjalne metody analityczne np. odwzorowań konforemnych, odbić zwierciadlanych, metoda Grinberga mają przy obliczaniu nagrzewnic indukcyjnych małe zastosowanie.

B. MODELOWANIE ANALOGOWE

Podział tej grupy metod jest następujący:

- modelowanie w ośrodkach ciągłych,
- modele siatkowe,
- modelowanie przy użyciu maszyn analogowych.

Zaletami tej grupy metod są: pogładowość, duża szybkość działania, możliwość modelowania procesów stacjonarnych i niestacjonarnych, liniowych i nieliniowych. Podstawowe wady to często mała dokładność wyników, trudności przy uwzględnieniu nieliniowości, szczególnie tych zmieniających się w czasie i przestrzeni, mały obszar zastosowań każdego modelu, awarie złożonego analogowego sprzętu obliczeniowego.

Modelowanie w ośrodkach ciągłych można podzielić na modelowanie w wannach elektrolitycznych i na papierze przewodzącym. Obie metody mają już obecnie przede wszystkim znaczenie dydaktyczne.

Modele siatkowe stosowane są do rozwiązywania zagadnień brzegowych opisanych równaniami Laplace'a, Helmholtza lub Fouriera w obszarach dwu- lub nawet trójwymiarowych. Zaletami modeli siatkowych są: duża szybkość działania i stabilność, stwarzają one jednak duże problemy przy zadawaniu warunków granicznych, nieliniowościach i wprowadzaniu rozkładów wewnętrznych źródeł ciepła w przypadku modelowania pól cieplnych [12,23,31]. Podobne uwagi można sformułować w przypadku zastosowania maszyn analogowych do analizy pól w nagrzewnicach indukcyjnych [12,14,36,42].

C. MODELOWANIE FIZYCZNE

Podział tej grupy metod jest następujący:

- modelowanie w oparciu o teorię podobieństwa,
- eksperyment planowany.

Jest to jedna z podstawowych metod badania nagrzewnic indukcyjnych, obejmująca badania na modelach fizycznych i obiektach rzeczywistych. Modelowanie fizyczne stosowane jest do rozwiązywania zadań o charakterze konstrukcyjnym lub technologicznym, sprawdzania modeli matematycznych, określania wpływu przyjętych założeń, a także zjawisk nie uwzględnionych przy modelowaniu matematycznym. Wadami są wysoki koszt i trudności z wykonaniem modelu lub obiektu rzeczywistego, mała dokładność pomiaru wielu wielkości fizycznych, ograniczona obserwowalność. Stosowane są zazwyczaj do obiektów, najczęściej 3D, dla których nie istnieją efektywne metody obliczeniowe [3,12,31].

D. METODY NUMERYCZNE

Podział tej grupy metod jest bez wątpienia najbardziej skomplikowany i

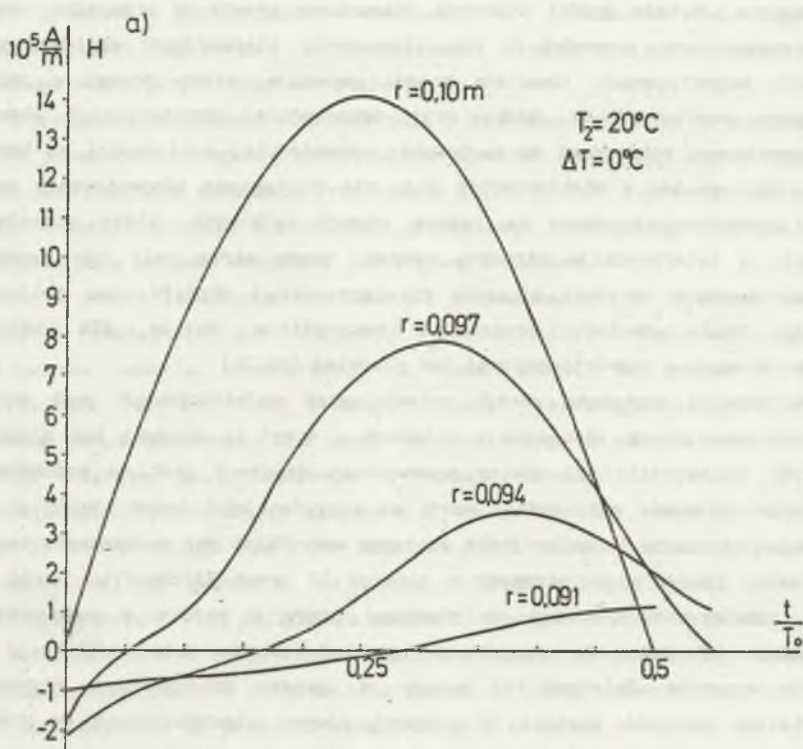
złożony. Najwygodniej do naszych potrzeb można go przeprowadzić następująco [41]:

- metody obszarowe:
 - metoda różnic skończonych (MRS),
 - metody oparte o metodę residuów ważonych (metoda kollokacji punktowej, metoda momentów, metoda kollokacji w podobszarach, metoda Galerkina i jej realizacja numeryczna - metoda elementów skończonych (MES), metoda najmniejszych kwadratów),
 - metoda równań całkowych objętościowych;
- metody brzegowe:
 - metoda kollokacji na brzegu,
 - metoda Trefftza,
 - metoda wykorzystująca rozwiązania osobliwe i jej realizacja,
 - numeryczna metoda elementów brzegowych (MEB),
 - metoda równań całkowych brzegowych;
- metody hybrydowe:
 - analityczno-numeryczne,
 - obszarowo-brzegowe,
 - polowo-obwodowe.

Ogólna charakterystyka tych metod przedstawiona jest w wielu pracach np. [1, 4, 19, 21, 53]. Omówmy tylko te metody numeryczne, które znalazły najszersze zastosowanie przy rozwiązywaniu zadań grzejnictwa indukcyjnego.

Wśród metod obszarowych zdecydowanie dominują dwie metody - MRS [1, 4, 12, 15, 17, 18, 21, 27, 28, 29, 31, 32, 35, 42, 43, 44, 50, 54] i MES [1, 5, 17, 18, 21, 24, 38, 41]. Pozwalają one bez trudu uwzględnić nieliniowości materiałowe, sprzężenie pól, pola niestacjonarne, złożone warunki brzegowe i geometryczne, prowadzą do układów równań algebraicznych numerycznie atrakcyjnych, tj. macierzy rzadkich i diagonalnie dominujących.

MRS była w latach niedostępności pakietów MES prostą metodą formułowania i rozwiązywania problemów polowych, najczęściej dwuwymiarowych. Obecnie uważa się, że MES z uwagi na możliwość uwzględnienia bardziej skomplikowanych kształtów badanego obszaru, łatwość wprowadzenia warunków granicznych jest lepsza w zastosowaniach do grzejnictwa indukcyjnego od MRS. Przewagę MES pogłębia dodatkowo jej bardzo szybki rozwój wynikający ze stosowania jej w wielu dziedzinach techniki, co doprowadziło do powstania komercyjnych pakietów opartych na MES.



Rys.2. Przebiegi natężenia pola magnetycznego H . Wsad ferromagnetyczny. Wynik obliczeń MRS

Fig.2. Waveforms of magnetic field strength. Ferromagnetic charge. Results computed by FDM

Przebiegi natężenia pola magnetycznego $H(t)$ w zagadnieniu jednowymiarowym obliczone za pomocą MRS przy uwzględnieniu sprzężenia nieliniowego pola elektromagnetycznego i temperatury pokazano na rys.2 [43].

W ostatnim dziesięcioleciu pojawiły się publikacje, w których do opisu pola elektromagnetycznego w nagrzewnicach indukcyjnych zastosowano metodę równań całkowych. Sformułowanie całkowe problemu jest znacznie słabiej dokumentowane w literaturze niż różniczkowe i dlatego poświęcimy temu sformułowaniu więcej uwagi.

Zastosowanie do opisu zjawisk elektromagnetycznych metody źródeł wtórnych, prowadzi do równania całkowego Fredholma II rodzaju [13,15,52].

Rozwiązanie równania tego typu stanowi zawsze skomplikowane zadanie numeryczne. Metoda źródeł wtórnych stosunkowo prosta w przypadku wsadów niemagnetycznych, prowadzi do skomplikowanych, iteracyjnych obliczeń przy wsadach magnetycznych. Omawiana metoda generuje układy równań o pełnej macierzy współczynników, które przy odpowiedniej dyskretyzacji obszaru obliczeniowego niezbędnej do zachowania odpowiedniej dokładności są bardzo duże. Dlatego też w elektrotermii dąży się do takiego sformułowania opisu pola elektromagnetycznego za pomocą równań całkowych, który pozwala w oparciu o interpretację fizyczną równań, znany obraz pola lub symetrię układu znacznie uprościć algorytm rozwiązywania i skrócić czas obliczeń. Metody takie zostały opracowane szczególnie dobrze dla układów dwuwymiarowych o symetrii osiowej lub płaskiej [29,31].

Najczęściej spotykaną wersją metody całek objętościowych jest metoda obwodów sprzężonych stosowana w układach o symetrii osiowej lub płaskiej [31,34]. W metodzie tej obszar przewodzący dzielony jest na podobszary, stosując następnie odpowiednie wzory na rezystancję i indukcyjność własną każdego podobszary i indukcyjność wzajemną wszystkich par podobszary tworzy się układ równań algebraicznych o postaci II prawa Kirchhoffa. Układ ten jest rozwiązywany z uwagi na niezależne prądy w każdym z podobszary. Identyczne sformułowanie równań można uzyskać stosując metodę kollokacji lub metodę momentów. Zaletami tej metody są: prosta interpretacja fizyczna, oparta na analogii postaci otrzymanych równań algebraicznych do równań opisujących układ obwodów sprzężonych magnetycznie, możliwość zastosowania wzorów na współczynniki samoindukcji obwodów sprzężonych, symetryczna postać macierzy współczynników i możliwość uwzględnienia źródła zasilania i bocznika magnetycznego. Sformułowanie za pomocą metody obwodów sprzężonych jest bardzo wygodne przy obliczaniu rozkładu prądów wirowych, sił i ciśnień, szczególnie w układach liniowych dwuwymiarowych, gdyż polem otrzymywanym z tego sformułowania jest bezpośrednio pole gęstości prądów wirowych [21].

Dążąc do dalszego ułatwienia rozwiązywania równań Fredholma można je algebraizować wprowadzając dyskretyzację badanego obszaru tylko w jednym wymiarze. Jest to możliwe, gdy znany jest rozkład pola wzdłuż jednej współrzędnej, np. r lub z . W praktyce rozkład ten jest szacowany na podstawie wyników jakiegokolwiek metody dla pola jednowymiarowego [31]. Postępowanie takie znacznie zmniejsza wymiar zadania algebraicznego, ale wprowadza znaczne trudności w obliczaniu współczynników układu równań, które można interpretować, jako współczynniki indukcyjności wzajemnej między

obwodami a cienkim dyskiem mającym znany rozkład prądów. Do obliczenia współczynników indukcyjności wzajemnej w zależności od wymiarów geometrycznych nagrzewnicy i intensywności efektu powierzchniowego można stosować wzory przybliżone lub dokładne.

W przypadku znajomości rozkładu pola w kierunku normalnym do powierzchni ciała przedstawiony sposób postępowania prowadzi do znanej metody obliczeń przy impedancyjnych warunkach granicznych [8, 29, 30, 31]. Poprawne rozwiązanie zadania elektrodynamiki w problemach grzejnictwa indukcyjnego daje znajomość rozkładu pola zarówno wewnątrz, jak i zewnątrz wsadu.

Znając jednak impedancję tzw. kwadratu jednostkowego $z_0 = E_t / H_t$ można znacznie uprościć rozwiązanie, gdyż znajomość z_0 można obliczyć dopiero po wspólnym obliczeniu zadania wewnętrznego i zewnętrznego, to jednak w wielu przypadkach, np. dla wsadu niemagnetycznego, ferromagnetycznego z silnym efektem powierzchniowym, dla wsadu dwuwarstwowego a czasami również przy słabym efekcie powierzchniowym z_0 można określić *a priori* z dużą dokładnością. Wykorzystując znajomość z_0 na powierzchni wsadu, pola w jego wnętrzu nie analizuje się i do obliczeń można stosować skalarny potencjał magnetyczny, co znacznie upraszcza obliczenia w przypadku problemów wielowymiarowych. Przy obliczaniu wsadów ferromagnetycznych z_0 zależy silnie od natężenia pola H i obliczenia muszą mieć charakter iteracyjny. Metoda ma największe znaczenie w połączeniu z innymi metodami numerycznymi, np. MRS, MES zastosowanymi do problemu wewnętrznego i metodami całkowymi opisującymi pole zewnętrzne, styk modelu zewnętrznego i wewnętrznego można uzyskać wtedy właśnie przez zastosowanie impedancyjnych warunków granicznych.

Szeroka klasa problemów brzegowych może być sformułowana za pomocą równań całkowych na brzegu rozpatrywanego obszaru, w ogólności dotyczy to tych problemów, dla których rozwiązanie fundamentalne równania różniczkowego jest z góry znane [2, 6, 7, 20].

W porównaniu z obszarowymi metodami analizy (MRS, MES lub metoda całek obszarowych) sformułowanie problemu za pomocą równań całkowych brzegowych ma trzy wydatne zalety:

- rozmiar zadania numerycznego jest efektywnie zmniejszany o 1, zadania 3D (przestrzenne) stają się zadaniami 2D (powierzchniowymi), zadania 2D (płaskie) wymagają całkowania tylko w jednym wymiarze (liniowe), prowadzi to zazwyczaj do układów równań mniejszych niż układy otrzymywane w identycznych zadaniach przy zastosowaniu metod obszarowych;

- analiza może być w równym stopniu stosowana do problemów zewnętrznych, jak i wewnętrznych;
- przy sformułowaniu za pomocą II równania Fredholma problem numeryczny jest dobrze uwarunkowany.

Metoda pozwala analizować układy niejednorodne, wielowarstwowe, ze wsadami magnetycznymi ($\mu = \text{const}$) lub niemagnetycznymi przy dowolnej długości wsadu i wzbudnika i dowolnej częstotliwości, przy dowolnym położeniu wsadu wzdłuż osi wzbudnika, polach harmonicznym. Obliczenia numeryczne są trudne, otrzymywane macierze są pełne a dominacja głównej przekątnej nie jest zapewniona.

Do numerycznego rozwiązywania równań całkowych brzegowych można stosować wiele metod, np. metodę iteracyjną, ale obecnie metodą najpopularniejszą jest MEB, która może być również uważana jako modyfikacja metody Galerkina [1,2,7,20]. Otrzymywana w MEB macierz współczynników jest pełna, a jej elementy zależą silnie od geometrii układu, można przypomnieć, że MRS i MES generują macierze rzadkie a ich współczynniki są zależne od postaci równań. W przypadku obszarów z niejednorodnością materiałową w metodzie MEB rośnie gwałtownie liczba równań przez co metoda może stać się mniej atrakcyjna w stosunku do metod obszarowych, w których uwzględnienie niejednorodności środowiska nie powoduje większych trudności. Zaletą MEB jest możliwość obliczania prądów wirowych w stanach nieustalonych metodą quasianalityczną, podczas gdy metody obszarowe wymagają różniczkowania numerycznego, co może prowadzić do poważnych błędów z uwagi na oscylacje [20].

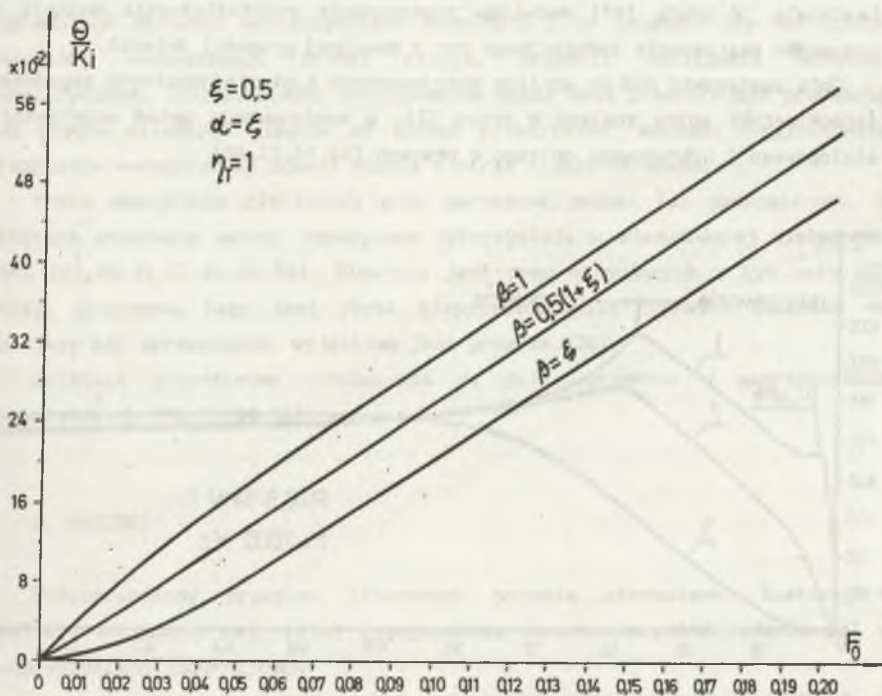
Metody hybrydowe będące połączeniem metod obszarowych i brzegowych stosowane są w przypadku konieczności uwzględnienia nieograniczonego obszaru powietrznego. Stanowią one połączenie MES lub MRS z metodą elementów nieskończonych lub MEB [1,12,40].

Chęć uwzględnienia w obliczeniach urządzeń elektromagnetycznych wpływu źródła zasilania i jego układu regulacji zmusza do opisanie obwodu zasilania odpowiednimi równaniami obwodowymi, ograniczając opis polowy do samego urządzenia elektromagnetycznego [26]. W przypadku zasilania nagrzewnic ze źródeł półprzewodnikowych opis może się znacznie skomplikować przez konieczność uwzględnienia stanu załączenia lub wyłączenia poszczególnych zaworów [5,9,39,45].

3. BADANIE POLA TEMPERATURY

Prawie wszystkie opisane powyżej metody badania pola elektromagnetycznego są stosowane do badań pola temperatury, a przedstawione powyżej uwagi ogólne dotyczące poszczególnych metod są w większości obowiązujące również w wypadku pola temperatury. Tak więc poniżej ograniczymy się do przedstawienia tylko najbardziej charakterystycznych zastosowań poszczególnych metod w przypadku nagrzewania indukcyjnego rur.

Ogólnie można stwierdzić, że w tym zastosowaniu dominują metody analityczne, oparte na linearyzacji odcinkowej procesu nagrzewania [33].



Rys. 3. Krzywe wzrostu temperatury względnej obliczone metodą przekształcenia Hankela

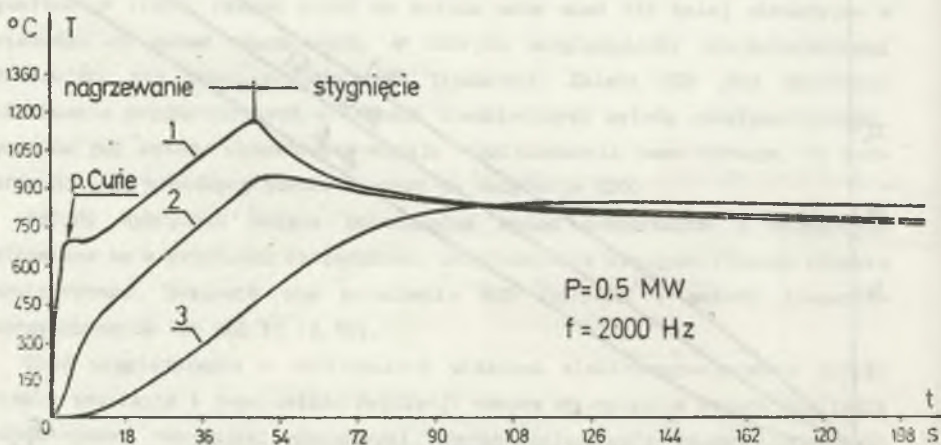
Fig. 3. Temperature rise computed by the method of Hankel's transform

Stosunkowo często do obliczania nieustalonych i ustalonych, wielowymiarowych rozkładów temperatury stosowana jest metoda rozdzielania

zmiennych [4,10,12]. Wprowadzenie w tej metodzie złożonych warunków wymiany ciepła i rzeczywistych rozkładów wewnętrznych źródeł ciepła może znacznie skomplikować obliczenia na EMC.

Zastosowanie przekształcenia Laplace'a lub Hankela do jednowymiarowego równania przewodnictwa cieplnego we współrzędnych cylindrycznych pozwala sprowadzić to równanie do równania Bessela. W przypadku równań wielowymiarowych lub ruchu wsadu można stosować wielokrotne przekształcenia całkowe lub ich kombinacje, aż do sprowadzenia równania różniczkowego cząstkowego do równania różniczkowego zwyczajnego. I tak, np. w pracy [51] rozpatrzono nagrzewanie walca o skończonych wymiarach stosując dla współrzędnej r przekształcenie Hankela, a dla współrzędnej z przekształcenie Laplace'a. W pracy [47] omówiono zastosowanie przekształcenia Hankela w przypadku nagrzewania indukcyjnego rur o dowolnej grubości ścianki.

Opis zastosowań MEB do analizy stacjonarnych i niestacjonarnych zagadnień termodynamiki można znaleźć w pracy [2], a zastosowania metod modelowania analogowego i hybrydowego opisano w pracach [12,14,23,42].



Rys. 4. Przebiegi temperatury dla pełnego walca na powierzchni (1), w środku ścianki (2) i na osi walca (3). Wyniki modelowania analogowego
Fig. 4. Temperature rise for solid cylinder at the surface (1), in the middle of the wall (2) and on the pivot of the cylinder (3). The results of analog modelling

Przedstawmy teraz dwa przykłady obliczania temperatury w nagrzewnicach indukcyjnych. Krzywe wzrostu temperatury względnej obliczone metodą przekształcenia Hankela pokazano na rys.3 [47]. Założono stałą moc

powierzchniową p_0 , stałą przewodność cieplną materiału rury λ , promienie rury wynosiły r_1 i r_2 , $\xi=r_1/r_2$, $\alpha=\Delta/r_2$, $\beta=r/r_2$, F_0 oznacza kryterium Fouriera, Δ jest zastępczą głębokością wnikania fali elektromagnetycznej. Zastosowanie metody modelowania analogowego do obliczenia temperatury w nagrzewanej indukcyjnie rurze ferromagnetycznej pokazano na rys.4 [42].

4. BADANIA PÓL SPRZĘŻONYCH

Badanie pól sprzężonych powinno być wykonywane w zasadzie tylko metodami numerycznymi. Pomimo tego od lat rozprzega się oba pola dzieląc cały proces nagrzewania na przedziały, zazwyczaj trzy, i przyjmując w każdym z nich uśrednione wartości współczynników cieplnych i co istotniejsze uśrednione wartości wewnętrznych źródeł ciepła, prowadzi obliczenia metodami analitycznymi [33,42,47,49]. Postępowanie takie musi nieuchronnie prowadzić do błędów zależnych głównie od ilości przedziałów, sposobu uwzględnienia rozkładów wewnętrznych źródeł ciepła i strat ciepła ze wsadu.

Prace omawiające nieliniowe pola sprzężone jedno- lub dwuwymiarowe, w których stosowano metody numeryczne wykorzystują w zdecydowanej większości MRS [27,28,31,32,42,44,50]. Niewiele jest prac stosujących w tym celu MES [24], przyczyną tego jest chyba nieprzystosowanie typowych pakietów do analizy pól sprzężonych, wyjątkiem jest program [38].

Ostatnio przedmiotem modelowania są pola sprzężone w nagrzewnicach przelotowych [16,32,44,50].

5. WNIOSKI

Przeprowadzony przegląd literatury pozwala sformułować następujące wnioski dotyczące wad, zalet i perspektyw stosowania metod badania pól w nagrzewnicach indukcyjnych:

- zastosowanie najnowszych metod obliczania pól elektromagnetycznych w grzejnictwie indukcyjnym jest opóźnione w porównaniu z zastosowaniem tych metod do projektowania innych urządzeń i aparatów elektrycznych;
- wiele opisanych metod stanowi wciąż bardziej "przykład obliczeniowy" w rękach "badaczy" niż użyteczne narzędzie projektowe;

- najważniejszym zadaniem obliczeniowym jest obecnie badanie sprzężonych pól dwuwymiarowych, istotność tego problemu jest porównywalna z obliczeniami pól niesprzężonych w przestrzeni trójwymiarowej;
- budowane modele powinny uwzględniać wpływ warunków zasilania nagrzewnicy, np. charakter źródła zasilania i jego układu regulacji, wpływ transformatora zasilającego, baterii kondensatorów, układy połączeń induktorów it.; powinny być częścią dużych programów symulujących pracę całej linii technologicznej, w skład której wchodzi nagrzewnica;
- do rozwiązania zewnętrznego problemu elektromagnetycznego celowe jest zastosowanie metody całkowej a do obliczenia zadania elektromagnetycznego i cieplnego wewnątrz wsadu MRS lub MES, metody analityczne lub ich kombinacje;
- zdecydowanie największe znaczenie przy badaniu nieliniowych i niestacjonarnych pól sprzężonych mają obecnie MES i MRS;
- rozwiązania analityczne mogą być znalezione zazwyczaj tylko dla bardzo ograniczonej liczby przypadków liniowych i bardzo wyidealizowanych warunków granicznych;
- oceniając przydatność metod równań całkowych stosowanych samodzielnie w badaniu nagrzewnic indukcyjnych można stwierdzić, że nie umożliwiają one badania pól sprzężonych, oceny wpływu nagrzewania wsadu i jego właściwości ferromagnetycznych, nie uwzględniają odkształceń przebiegów wielkości elektromagnetycznych; ich zastosowanie powinno ograniczać się głównie do układów o słabym sprzężeniu pól, np. urządzeń MHD i nagrzewnic wsadów niemagnetycznych;
- największe perspektywy rozwoju wydają się mieć metody hybrydowe: obszarowo-powierzchniowe lub polowo-obwodowe z uwagi na fakt, że pozwalają one najpełniej uwzględnić polowe zjawiska we wsadzie i złożony niejednokrotnie układ zasilania nagrzewnicy;
- metody numeryczne wykorzystywane są zazwyczaj do oceny ilościowej pola w dyskretnych punktach, rzadziej do wyznaczania parametrów całkowych układu, np. mocy, rezystancji, sił co stanowi odrębne, zazwyczaj pracochłonne zagadnienie numeryczne.

LITERATURA

- [1] Bolkowski i inni: Komputerowe metody analizy pola elektromagnetycznego, Wyd. Pol. Warszawskiej, Warszawa 1986
- [2] Brebbia C.A.: Topics in Boundary Element Research, Vol.3, Computational Aspects, Springer Verlag, Heidelberg 1987
- [3] Burke P.E., Lawers J.D.: The use of modeling methods in the design of electroheat equipment, IEEE Vol.IA-19, No 1, 1983, pp.57-63
- [4] Ciok Z.: Metody obliczania pól elektromagnetycznych i przepływowych. Wyd. Pol. Warszawskiej, Warszawa 1981
- [5] Coulomb J.L., Sabonnadiere J.C., SAPR w elektrotechnice. Mir, Moskwa 1988
- [6] Fawzi T.H., Ali K.F., Burke P.E.: Boudary integral iquations analysis of induction devices with rotational symmetry, IEEE Vol.MAG-19, No 1, 1983
- [7] Fawzi T.H., Ali K.F., Burke P.E.: Boudary element analysis of multilayer induction problems with rotational symmetry, IEEE Vol.MAG-19, No 6, 1983
- [8] Fawzi T.H., Ahmed M.T., Burke P.E.: On the use of the impedance boundary conditions in eddy current problems, IEEE Vol.MAG-21, No 5, 1985
- [9] Ferrieux J.P., Keradec J.P., Boudon Y.: A series resonant inverter for induction heating, European Power Electronics Conference, Grenoble 1987
- [10] Fikus F.: Miejscowe indukcyjne nagrzewanie rur w procesach obróbki plastycznej. Z.N. Politechniki Śląskiej, Hutnictwo, nr 487, z.9, 1976
- [11] Gołębiowski J.: Badanie granicznych zagadnień pól elektromagnetycznych i termicznych metodami analitycznymi, Wyd. Pol. Białostockiej, Białystok 1989
- [12] Hering M.: Termokinetika dla elektryków. WNT, Warszawa 1979
- [13] Hodgkins W.R., Waddington J.F.: The solution of 3-dimensional induction heating problems using an integral equation method. IEEE, Vol.MAG-18, No 2, 1982
- [14] Kački E., Woźniakowski M.: Modelowanie analogowe, hybrydowe i cyfrowa symulacja maszyn analogowych. PWN, Warszawa 1979
- [15] Kolbe E., Reiss W.: Eine metgode zur numerischen Bestimmung des Stromdichteverteilung, Wiss.Z.Hochschule Elektrotechnik Ilmenau, B.9, No 3, 1963
- [16] Kolbe i inni.: Möglichkeiten zur Modellierung der induktiven Erwärmung mit Vorschub, Elektrowärme Int., nr 39, B.6, 1981
- [17] Konrad A.: Eddy currents and modelling, IEEE Trans.Vol.MAG 21, No 5, 1985
- [18] Konrad A.: Electromagnetic devices and the application of computational techniques in their design, IEEE Vol.MAG-21, No 6, 1985

- [19] Krawczyk A.: Uwagi o metodyce rozwiązywania zagadnień brzegowych. Prace Instytutu Elektrotechniki, z.124, 1983
- [20] Krawczyk A.: Analiza niestacjonarnych pól elektromagnetycznych metodami całkowo-brzegowymi, Prace Instytutu Elektrotechniki, z,149
- [21] Lavers J.D.: Numerical solution methods for electroheat problems, IEEE Vol.MAG-19, No 6, 1983
- [22] Lupi S., Niemkow W.S.: Analiticeskij rasczot cilindriczeskich indukcionnych sistem, Elektricestwo, nr 6, 1978
- [23] Macewityj J.M., Kuniesz J.: Gibridnoje modelirovanie tiepłowych procesow. Naukowa Dumka, Kijów 1987
- [24] Masse Ph., Morel B., Breville Th.: A finite element prediction correction scheme for magneto-thermal coupled problem during Curie transition. IEEE Vol.MAG-21, No 5, 1985
- [25] Moon P., Spencer D.E.: Teoria pola. PWN, Warszawa 1966
- [26] Nakata T., Takahashi N.: Direct finite element analysis of flux and current distributions under specified conditions, IEEE vol.MAG-18, No 2, 1982
- [27] Napieralska-Jabłońska E.: Analiza niestacjonarnego pola elektromagnetycznego w nagrzewanym indukcyjnie ferromagnetyku o zmiennych parametrach fizycznych, rozprawa doktorska, Łódź 1978
- [28] Niedbała R.: Planowanie procesów objętościowego nagrzewania indukcyjnego wsadów ferromagnetycznych, Przeg.Elektrot., nr 2, 1985
- [29] Niemkow W.S., Polewodow B.S.: Matematическое моделирование на EWM устройств высокочастотного нагрива, Maszynostrojenie, Leningrad 1980
- [30] Niemkow W.S.: Rasczot induktorow s ispolzowaniem impedansnych granicznych uslowij, Elektricestwo, nr 6, 1980
- [31] Niemkow W.S.: Demidowicz B.: Teoria i rasczlot ustrojstw indukcionnogo nagriewa, Energoatomizdat, Leningrad 1988
- [32] Nücke B., Mülbauer A.: Numerische Simulation des induktiven Erwärmungsvorganges in Stangenerwärmungsanlagen, Elektrowärme Int., nr 46,B.2,1988
- [33] Pawłow N.A.: Inżeniernyje tiepłowyje rasczoty indukcionnych nagriewatieliej, Energija, Moskwa 1978.
- [34] Pawłow N.A., Pronin A.M.: Rasczot płoskoparallelnych indukcionnych sistem s magnitoprawodami na osnowie intiegralnych mietodow. Izw.wuzow SSSR, Elektromechanika, 1984, nr 9.
- [35] Poliewodow B.S., Demidowic W.B., Skorcow J.A.: Modelirovanie tiepłowych i ellektromagnitnych processow w indukcionnych plazmotronach. Izw.wuzow, Elektromechanika, nr 9, 1984.
- [36] Roberts J.: Analogue treatment of eddy currents and magnetic flux penetration in saturated iron, Proc. IEE 109, Part C, No.16, 1962.
- [37] Rodygin N.M.: Indukcionnyj nagriew stalnych izdatielij, Swierdłowsk, Metalurgizdat, 1950.
- [38] Sabonnadiere J.C. i inni: FLUX: a general interactive Finite Elements package for 2D elektromagnetic field, IEEE Vol. MAG-18, No.2, 1982.

- [39] Satio Y. i inni: Modelling of nonlinear inductor exhibiting hysteresis loops and its application to the single phase parallel inverters, IEEE Vol.MAG-19, No.6, 1983.
- [40] Salon S.J., Schneider J.M.: A hybrid finite element-boundary integral formulation of the eddy current problem, IEEE Vol.MAG-18, No.2,1982.
- [41] Sikora R. i inni: System oprogramowania metod numerycznych analizy pól elektromagnetycznych, Przegląd Elektrotechniczny, nr 2, 1985.
- [42] Skoczkowski T.: Analiza zjawisk elektromagnetycznych i cieplnych w nagrzewnicach indukcyjnych wsadów walcowych, praca doktorska, Pol. Śl., Gliwice 1985.
- [43] Skoczkowski T., Kalus M.: A mathematical model of induction heating of steel ferromagnetic pipes, IEEE Trans. Vol.MAG 25, No.5, 1989.
- [44] Skoczkowski T.: Computer simulation of the process of induction heating of ferromagnetic pipes. ISEF'89, Łódź 1989.
- [45] Skoczkowski T.: Model matematyczny procesu nagrzewania indukcyjnego uwzględniający wpływ tyrystorowego źródła zasilania. SPETO, Wisła 1989.
- [46] Skoczkowski T.: Algorytm wyznaczania parametrów elektromagnetycznych przy indukcyjnym nagrzewaniu wsadu ferromagnetycznego. Z.N. Pol. Śl., Elektryka, Z.113, 1991.
- [47] Skoczkowski T.: Analytical method of evaluation temperature field in an induction heated pipe. Archiwum Elektrotechniki, zgłoszony w 1988r.
- [48] Skoczkowski T.: Certain remarks on the application of the Fourier integral to evaluation of induction heater parameters. Archiwum Elektrotechniki, zgłoszony w 1988r.
- [49] Siuchockij A.E., Ryskin S.E.: Induktory dla indukcyjnego nagriewa, Energija, Leningrad 1974.
- [50] Stochniol A., Niemkov V.S., Demidovitch V.B.: Computer aided design of the continuous induction heating of slabs, ISEF'89, Łódź 1989.
- [51] Szachurdin W.I., Narygin V.A.: Temperaturnoje polie w koniecznom połom cylindrie pri indukcyjnom nagriewie, Fiz. i chim. obrobot. mat. nr 2, 1976.
- [52] Tozoni O.W.: Metod wtoricznych istocznikow w elektrotechnike, Energija, Moskwa 1975.
- [53] Turowski J.: Obliczenia elektromagnetyczne elementów maszyn i urządzeń elektrycznych, WNT, Warszawa 1982.
- [54] Wiak S.: Analiza pól elektromagnetycznych niestacjonarnych metoda różnic skończonych w obwodach magnetycznych przetworników elektromechanicznych, Z.N. Pol. Łódzkiej, nr 580, Łódź 1989.

Recenzent: doc dr hab.inż. Andrzej Krawczyk

Wpłynęło do Redakcji dnia 25 września 1990 r.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО И ТЕМПЕРАТУРИОГО ПОЛЕЙ В ИНДУКЦИОННЫХ НАГРЕВАТЕЛЯХ. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.

Р е з ю м е

В статье представлен обзор методов применяемых для исследования электромагнитных и температурных полей в индукционных нагревателях. Представлены свойства индукционных нагревателей, которые имеют значение при исследовании физических явлений в нагревателях и показаны черты эффективного метода исследования индукционных нагревателей. Рассмотрены такие методы как: аналитические методы, аналоговое моделирование, физическое моделирование, численные методы, особенно интегральные методы. Описаны примеры применения этих методов. Представлены методы исследования сопряженных полей в индукционных нагревателях. Рассказано преимущества, недостатки и перспективы развития рассматриваемых методов.

INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC AND TEMPERATURE FIELDS IN INDUCTION HEATERS. REVIEW.

S u m m a r y

The paper reviews the methods applied for investigation of electromagnetic and temperature fields in induction heaters. The features of induction heaters which matter by investigation of physical phenomena in heaters as well as the features of the good method of investigation of induction heaters have been given. Such methods as analytical methods, analog modelling, physical modelling and numerical modelling of the fields with special attention paid to the methods based on integral description have been discussed. Examples of application of the methods are given. The methods of investigation of coupled fields in induction heaters have been presented. The advantages, disadvantages and the prospects for future application of the discussed methods have been given.