

ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

KRZYSZTOF KUREK

ZASTOSOWANIE NUMERYCZNEJ SYMULACJI DO ANALIZY PRACY I PROJEKTOWANIA CYLINDRYCZNYCH NAGRZEWNIC INDUKCYJNYCH SKROŚNYCH

HUTNICTWO z. 53

GLIWICE 1998

POLITECHNIKA ŚLĄSKA ZESZYTY NAUKOWE Nr 1398



KRZYSZTOF KUREK

ZASTOSOWANIE NUMERYCZNEJ SYMULACJI DO ANALIZY PRACY I PROJEKTOWANIA CYLINDRYCZNYCH NAGRZEWNIC INDUKCYJNYCH SKROŚNYCH

and the second s

OPINIODAWCY Dr hab. inż. – Jerzy Pasternak Dr hab. inż. – Tadeusz Rodacki Profesor Politechniki Śl.

KOLEGIUM REDAKCYJNE

REDAKTOR NACZELNY	 Pro
REDAKTOR DZIAŁU	 Dr
	Pre

rof. dr hab. Zygmunt Kleszczewski hab. inż. Stanisław Serkowski of. Politechniki Śląskiej SEKRETARZ REDAKCJI — Mgr Elżbieta Lesko

> Opracowanie redakcyjne Mgr Kazimiera Szafir

Wydano za zgodą Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0324 - 802X

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice

Nak1 19+83	Ark. wyd. 7	Ark. druk. 5,375		Papier	offset. 70x100, 80 g
Oddano do droku 10.98	Podpis.	do druku 9.10.98	Druk	ukończ. w	październiku 1998 r.
Zam. 356/9*					

Fotokopie, druk i oprawę wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

SPIS TREŚCI

7

WAŻNIEJSZE	OZNA	CZENIA
------------	-------------	---------------

1.	WSTĘP	11
2.	PRZEGLĄD LITERATURY	12
	2.1. Charakterystyka zagadnienia	12
	2.2. Zagadnienie elektromagnetyczne	12
	2.2.1. Metody analityczne	13
	2.2.2. Metody przybliżone	13
	2.2.3. Metody numeryczne	13
	2.3. Zagadnienie temperaturowe	14
	2.4. Sprzężenie pól	15
	2.5. Podsumowanie	16
3.	CEL, ZAKRES I TEZA PRACY	17
	3.1. Cel pracy	17
	3.2. Zakres i teza pracy	17
4.	DWUWYMIAROWY MODEL INDUKCYJNEGO UKŁADU GRZEJNEGO	19
	4.1. Model sprzężonego zagadnienia elektromagnetycznego i temperaturowego	19
	4.1.1. Pole elektromagnetyczne	19
	4.1.2. Pole elektromagnetyczne w środowisku z ferromagnetykami	2
	4.1.3. Niestacjonarne pole temperaturowe	2
	4.1.4. Sprzężenie pół	2
	4.2. Programy własne	2'
	4.2.1. Program RZIND do obliczeń pola elektromagnetycznego	2
	4.2.2. Program TEMP do obliczeń niestacjonarnego pola temperatury	2
	4.2.3. Sprzężenie pól elektromagnetycznego i temperaturowego	2
	4.3. Programy profesjonalne uzupełnione własnymi procedurami	2

5.	OBLICZENIA PARAMETRÓW ELEKTRYCZNYCH, CIEPLNYCH	
	I EKSPLOATACYJNYCH	30
	5.1. Wielkości całkowe pola elektromagnetycznego	30
	5.2. Minimalizacja zużycia energii elektrycznej	34
	5.2.1. Nagrzewanie równomierne całego wsadu	35
	5.2.2. Nagrzewnica ze wzbudnikiem uniwersalnym	42
	5.2.3. Nagrzewanie końców wsadów	47
	5.3. Koszty inwestycyjne i eksploatacyjne	55
6.	DOŚWIADCZALNA WERYFIKACJA UZYSKANYCH WYNIKÓW	59
	6.1. Opis badań na stanowisku laboratoryjnym do nagrzewania skrośnego	59
	6.1.1. Opis stanowiska	59
	6.1.2. Wyniki	60
	6.1.3. Weryfikacja obliczeń symulacyjnych	62
	6.2 Opis badań na stanowisku laboratoryjnym do nagrzewania częstotliwością	
	średnią	62
	6.2.1. Opis stanowiska	62
	6.2.2. Wyniki	63
	6.3. Próby w warunkach przemysłowych	64
	6.3.1. Opis stanowiska i wyniki badań nagrzewnic sieciowych ze wzbudnikami wielowarstwowymi	64
	6.3.2. Badanie nagrzewnic średniej częstotliwości ze wzbudnikami uniwersalnymi	67
7.	PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE	68
DC)DATKI	71
	D.1. Pole elektromagnetyczne w środowiskach ferromagnetycznych	71
	D.2. Właściwości fizyczne stali	73
	D.3. Właściwości fizyczne rdzenia magnetycznego	75
Lľ	TERATURA	76
ST	RESZCZENIA	85

CONTENTS

LIST OF SYMBOLS

1. I	NTRODUCTION	11
	ALT DATE AND ADDRESS OF ADDRESS ADDRES ADDRESS ADDRESS	
2. I	LITERATURE'S REVIEW	12
2	2.1. The problem's characteristics	12
2	2.2. An electromagnetic problem	12
	2.2.1. Analytical methods	13
	2.2.2. Approximate methods	13
	2.2.3. Numerical methods	13
2	2.3. A thermal problem	14
1	2.4. Fields' coupling	15
2	2.5. Summary	16
3.	A PURPOSE, RANGE AND A THESIS OF THE PAPER	17
:	3.1. A purpose of the paper	17
:	3.2. Range and a thesis of the paper	17
4.	THE TWO-DIMENSIONAL MODEL OF THE INDUCTION HEATING	
	SYSTEM	19
	4.1. The model of the coupled electromagnetic and thermal problems	19
	4.1.1. The electromagnetic field	19
	4.1.2. The electromagnetic field in ferromagnetic environment	21
	4.1.3. The non-stationary thermal field	22
	4.1.4. Fields' coupling	23
	4.2. Own programs	27
	4.2.1. A program RZIND for electromagnetic field's calculations	27
	4.2.2. A program TEMP for non-stationary thermal field's calculations	27
	4.2.3. Electromagnetic and thermal fields' coupling	28
	4.2 Professional programs complemented by own procedures	28

5. CALCULATION OF THE ELECTRICAL, THERMAL AND RUNNING

	PARAMETERS	30
	5.1. Integral quantities of the electromagnetic field	30
	5.2. Minimisation of electrical energy consumption	34
	5.2.1. Uniform heating of the whole charge	35
	5.2.2. A heater with a universal inductor	42
	5.2.3. Heating of the charges' tips	47
	5.3. Investing and running costs	55
6.	EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE OBTAINED RESULTS	59
	6.1. A tests' description on the laboratory through heating stand	59
	6.1.1. Description of the stand	59
	6.1.2. Results	60
	6.1.3. Verification of the simulation's calculation	62
	6.2. A tests' description on the laboratory medium frequency stand	62
	6.2.1. Description of the stand	62
	6.2.2. Results	63
	6.3. Tests in industrial conditions	64
	6.3.1. Description of the stand and results of main frequency heaters with	
	multilayer inductor	64
	6.3.2. Tests of medium frequency heaters with universal inductor	67
7.	SUMMARIES AND CONCLUSIONS	68
A	PPENDIXES	71
	D.1. Electromagnetic field in ferromagnetic environment	71
	D.2. Physical characteristics of steel	73
	D.3. Physical characteristics of a magnetic core	75
R	EFERENCES	76
S	UMMARIES	85

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA

. A.	- magnetyczny potencjał wektorowy i jego składowa, Wb·m ⁻¹
	 współczynnik krzywizny
1	- indukcja magnetyczna, T
2	- pojemność kondensatora, F
0	stała Stefana, $C_0 = 5.6693 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
	- ciepło właściwe, J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
4	- średnica wzbudnika, m
12	- średnica wsadu, m
5	- energia elektryczna, kW·h
ζ,	- jednostkowe zużycie energii, kW·h·kg ⁻¹
	- częstotliwość prądu, Hz
	- grubości warstw uzwojenia wielowarstwowego, mm
H	- natężenie pola magnetycznego, A·m ⁻¹
1	- wysokość przewodu, mm
$I_{S} I_{E}$	- natężenie prądu całkowitego, prądu źródłowego, prądów wirowych, A
	- numer elementu
w	 entalpia właściwa nagrzewanego wsadu, kW·h·kg⁻¹
1	- całkowita gęstość prądu w przekroju przewodu wzbudnika, A·m ⁻²
I _E	- gęstość prądów wirowych indukowanych we wzbudniku, A·m ²
Is	 gęstość prądu źródłowego, A·m⁻²
I,	- wartość indukcji nasycenia, T
K. K. K. K. Kekr	K, K, K, K, K, K, K, K, K,
	- koszt budowy nagrzewnicy, koszt dodatkowy, energii elektrycznej
	zużywanej w procesie produkcyjnym, eksploatacji, konstrukcji
	mechanicznych, obsługi nagrzewnicy, remontów, wykonania toru
	zasilającego, urządzeń pomocniczych, wykonania wzbudnika, zł
L	- indukcyjność cewki, H
l,	- długość wzbudnika, m
12	- długość wsadu, m
m	- liczba zwojów
m _w m _{wR}	- masa wsadu. masa wsadu nagrzewanego w ciągu roku, kg
n	- liczba warstw uzwojenia

-	moc czynna, pobierana przez nagrzewnicę, pobierana przez układ grzejny
	(wzbudnik - wsad), wydzielona we wsadzie, użyteczna, kW
-	średnia moc dostarczona do nagrzewnicy w czasie nagrzewania do
	temperatury końcowej, kW
-	średnie jednostkowe zużycie energii, kW·h·kg ⁻¹
-	moc bierna pobierana przez układ grzejny, kvar
-	gęstość strumienia cieplnego przechodzącego do otoczenia, przez
	konwekcję, przez promieniowanie, W·m ⁻²
-	rezystancja wzbudnika, Ω
-	promień i-tego zwoju wzbudnika, m
-	składowa promieniowa
-	powierzchnia przekroju poprzecznego, m ²

- S, skorygowane pole przekroju poprzecznego i-tego zwoju wzbudnika, m²
 - grubość przewodów, mm
- T, T_{a} temperatura, temperatura punktu Curie, °C U
 - napięcie, V
 - napięcie w i-tym zwoju wzbudnika, V
- objętościowa gęstość mocy wydzielonej we wsadzie, W·m-3 W
- Χ reaktancja, Ω Ζ

P, P, P, P, P, P, P,

 p_i

Q

R

R,

r

S

 \underline{U}

Z

β

 Δ_{og}

Δ,

ε

S, S,

q, q, q, q,

- impedancja, Ω
- składowa osiowa
- współczynnik wymiany ciepła, przez konwekcję, przez promieniowanie, $\alpha, \alpha_k \alpha_r$ W·m⁻²·K⁻¹
 - współczynnik określający spadek przenikalności magnetycznej w pobliżu temperatury punktu Curie
- konduktywność wsadu, konduktywność wzbudnika, S·m⁻¹ Yz YI
- δ głębokość wnikania, m
- grubość ścianki nagrzewanej rury, mm Δ

AP, AP, AP, AP, AP, AP, AP, AP,

- moc strat, dodatkowych, w kondensatorach kompensujących moc bierną, w układzie symetryzacji, w transformatorze dopasowującym, w torze wielkoprądowym, w uzwojeniu wzbudnika, w źródle zasilania, kW moc strat cieplnych, kW ΔP_c grubość warstwy wyłożenia materiałów ogniotrwałych, m
- szczelina powietrzna pomiędzy wsadem a wyłożeniem ogniotrwałym, m $\Delta_{s=}$
 - grubość warstwy wyłożenia materiałów termoizolacyjnych, m
- odległość między wzbudnikiem i wsadem, m Δ_{ww}
 - współczynnik emisyjności

przenikalność magnetyczna wsadu, H·m⁻¹ przenikalność magnetyczna próżni, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \, \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ wartość poczatkowej względnej przenikalności magnetycznej dla H = 0 gęstość wsadu, kg·m-3 -

9

- grubość ścianki przewodu (rurki), mm
- kąt przesunięcia fazowego między napięciem i prądem
- obszar obliczeniowy
- pulsacja, rad·s-1

ζ

ξ

 μ_0

 μ_{r0}

Q

X

φ

 Ω

ω

1, no net no

2. Log hy

	the second s

1. WSTĘP

Indukcyjna metoda grzejna coraz częściej eliminuje proces płomieniowy, a w niektórych nowszych procesach technologicznych jest sposobem jedynym i jak na razie niezastąpionym, na przykład przy nagrzewaniu objętościowym, selektywnym, w próżni bez wprowadzania chemicznych zanieczyszczeń. Niewątpliwy wpływ na rozwój tej metody mają zmieniające się relacje pomiędzy kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi przemian elektrotermicznych, uwzględniające ceny surowców energetycznych, sprawności tych przemian, koszty budowy urządzeń w powiązaniu z transportem surowców i energii, zapotrzebowanie energii użytkowej, automatyzację urządzeń i wreszcie ochronę środowiska.

Czynnikiem ograniczającym zastosowanie elektrotermicznych urządzeń indukcyjnych jest brak wystarczająco dokładnych, a przy tym użytecznych metod obliczeniowych, umożliwiających analizę zjawisk elektromagnetycznych i cieplnych, zachodzących w nagrzewnicach indukcyjnych w czasie ich pracy, a także programów wspomagających ich projektowanie. Większość prac literatury przedmiotowej omawia zagadnienia związane z nagrzewnicami indukcyjnymi wycinkowo, tzn. osobno traktuje zagadnienia elektromagnetyczne, cieplne i termosprężyste. W przodujących w produkcji przetwórczej krajach szeroko prowadzone są badania nad zwiększeniem sprawności nagrzewnic, gdyż stanowi ona w chwili obecnej jedną z barier ograniczających zastosowanie nagrzewania indukcyjnego, zwłaszcza w procesach przeróbki plastycznej. Istnieje więc pilna potrzeba opracowania takiej metody obliczeniowej, która umożliwi obliczenie i zaprojektowanie nagrzewnicy z uwzględnieniem konieczności zwiększenia jej sprawności i jednocześnie spełniającej wymagania technologiczne związane z rozkładem temperatury i jej dopuszczalnych gradientów.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

2.1. Charakterystyka zagadnienia

Szeroki rozwój nowoczesnych technik elektrotermicznych, w tym metody indukcyjnej, wymusza wykonanie wszechstronnej analizy zjawisk zachodzących w czasie przemiany od energii elektrycznej pobieranej ze źródła do energii cieplnej uzyskanej w nagrzewanym wsadzie. Przeprowadzona analiza powinna umożliwić projektowanie i budowę efektywniejszych, bardziej energooszczędnych urządzeń o zoptymalizowanej konstrukcji oraz opracowanie nowocześniejszych technologii. Konieczne jest zatem uwzględnienie sprzężonych zagadnień elektromagnetycznych oraz cieplnych. Z takim podejściem do zagadnień elektrotermicznych można się spotkać w literaturze niezbyt często, co jest związane z trudnościami matematycznymi, nawet dla układów o stosunkowo nieskomplikowanej geometrii. Powszechne jest natomiast podejście, zgodnie z którym autorzy zajmują się każdym z zagadnień oddzielnie. Do analizy zjawisk w nagrzewnicach indukcyjnych są stosowane zarówno metody analityczne, numeryczne, jak również półempiryczne.

2.2. Zagadnienie elektromagnetyczne

Zagadnieniu elektromagnetycznemu w indukcyjnych układach grzejnych, czy też szerzej zagadnieniom strat wiroprądowych, poświęconych jest wiele prac. Przeważają jeszcze ciągle metody opracowane w ubiegłym lub na początku naszego stulecia, oparte na modelu jednowymiarowym. Stanowią one podstawę dla szeregu metod przybliżonych, chętnie używanych przez projektantów. Dają one zadowalające wyniki zwłaszcza dla układów o stosunkowo prostej geometrii i dla układów "długich", gdy długość układu grzejnego jest kilkunastokrotnie lub przynajmniej kilkukrotnie większa od jego średnicy. W ostatnich latach wraz z rozwojem techniki mikrokomputerowej nastąpił bardzo szybki rozwój metod numerycznych, umożliwiających obliczanie praktycznie dowolnych układów dwuwymiarowych [45,73,76,77,78,81,82,83,84,85,87,93,95,105,112,117,118,131,137], a ostatnio także trójwymiarowych [2,3,10,16,18,21,22,23,31,80,86,88,89,90,92,94,97,98,99,100,108,109,113,125,132, 133,134].

2.2.1. Metody analityczne

Do tej bardzo obszernej grupy metod obliczeniowych [5,12,13,14,15,19,20,25,67,74,79,115, 123,124,128,136,139] można zaliczyć: rozwiązanie analityczne równań jednowymiarowych, metodę rozdzielania zmiennych, metodę szeregu i całki Fouriera oraz metody specjalne. Do podstawowych zalet metod analitycznych należy uzyskanie rozwiązania analitycznego, co ułatwia dyskusję wyników i optymalizację procesu oraz niski koszt i czas obliczeń. Wadą jest konieczność stosowania silnych założeń upraszczających, co prowadzi do znacznych błędów, niwecząc podstawową zaletę, czyli dokładność. Ponadto mogą być stosowane tylko w układach o prostej geometrii i zazwyczaj wymagają założenia liniowości i jednorodności środowiska oraz prostych warunków brzegowych. Metody analityczne nie pozwalają na analizę pola w obszarze wzbudnika, gdyż obszar ten nie występuje w ogóle lub co najwyżej w postaci nieskończenie cienkiej folii.

2.2.2. Metody przybliżone

Pojęcie "metody przybliżone" należy traktować umownie, gdyż każda metoda obliczeniowa ze względu na zastosowane uproszczenia jest w mniejszym lub większym stopniu przybliżeniem. Tu jednak uproszczenia są bardzo istotne, a wyniki ukierunkowane są na dosyć wąską grupę zastosowań. Przy próbie jej rozszerzenia powstają znaczne błędy [5,11,12,13,19,20,34,70,71,72, 102,110,120,123,126,127,135]. Większość z nich oparta jest na modelu jednowymiarowym, a skończone wymiary układu czy też asymetrię kształtu uwzględnia się przez liczne współczynniki korekcyjne. Najczęściej stosowane metody przybliżone to: metoda transformatora powietrznego stosowana dla układów z wsadami niemagnetycznymi, często stosowana metoda oporów magnetycznych oraz metoda oporów wniesionych.

2.2.3. Metody numeryczne

Rozwój techniki mikrokomputerowej sprawił, że coraz większego znaczenia w zagadnieniach elektromagnetycznych, występujących w indukcyjnych urządzeniach elektrotermicznych, nabierają metody numeryczne [1,3,9,10,29,31,66,77,88,92,94,109,118,131]. Umożliwiają one nie tylko analizę układów o skomplikowanej geometrii (także w układach 3-D) [3,31,93,96,109,125, 132,134], ale również uwzględnienie zmienności parametrów wsadu [17,24,29,49,75,82,105, 117,121,130,132,137], tak charakterystycznej dla nagrzewania indukcyjnego. Wśród stosowanych metod numerycznych można wyróżnić następujące grupy metod:

 Metody obszarowe. W skład tej grupy wchodzą najczęściej stosowane dla potrzeb nagrzewania metody różnic skończonych (MRS) [24,45,77,81,82,83,96,121,138] oraz elementów skończonych (MES) [9,10,16,18,31,59,87,88,94,108,140,141] i rzadziej metoda równań całkowych [128,129,130,131].

 Metody brzegowe: metoda kolokacji na brzegu, elementów brzegowych (MEB) oraz równań całkowych brzegowych [112,113].

Metody mieszane: polowo-obwodowe, obszarowo-brzegowe, analityczno-numeryczne.

Metoda różnic skończonych w latach 50. i 60. była metodą dominującą i do chwili obecnej jest często stosowana [23,81,137]. Jej zalety to przede wszystkim duża użyteczność oraz prosta interpretacja zarówno matematyczna, jak i fizykalna. Używana jest w problemach o raczej prostej geometrii, co prowadzi często do znacznych uproszczeń modeli urządzeń technicznych.

Początek zastosowań metody elementów skończonych datuje się od lat 70. [17]. Główny nurt zastosowań MES dotyczy maszyn elektrycznych, lecz w ostatnich latach następuje gwałtowny jej rozwój także w innych dziedzinach elektryki, w tym elektrotermii. Większość pakietów profesjonalnych, np. OPERA2D, TOSCA, CARMEN, COMPEL, MAGNET, FLUX2D, FLUX3D, EDDYCUFF, QUICKFIELD używa właśnie MES. Wydaje się, że MES, z uwagi na możliwość uwzględnienia bardziej skomplikowanych kształtów i łatwość wprowadzania warunków granicznych, jest lepsza w zastosowaniach do zagadnień polowych od MRS.

Rzadziej do analizy układów grzejnych stosuje się inne metody, jak np. równań całkowych [130] czy źródeł wtórnych [131].

Dużo mniejsze zastosowanie w porównaniu do metod obszarowych znalazły metody brzegowe [67,112,113,134]. Początki MEB sięgają lat 70. Podstawowe zalety metod brzegowych to: dyskretyzacja jedynie brzegu obszaru (a nie całego obszaru jak w MRS i MES), zmniejszenie rozmiaru zadania numerycznego o jeden oraz dokładne uwzględnienie zjawiska naskórkowości.

W zagadnieniach elektrotermicznych dużego znaczenia nabiera uwzględnienie wpływu źródła zasilania, obwodu kompensacji czy symetryzacji, co zmusza do użycia odpowiedniego układu równań obwodowych, ograniczając opis polowy do samego układu grzejnego. Wymagania te można zrealizować przy zastosowaniu metod polowo-obwodowych [85,100,116].

2.3. Zagadnienie temperaturowe

Literaturę związaną z obliczaniem pól temperatury we wsadzie w czasie nagrzewania metodą indukcyjną można podzielić podobnie jak w przypadku zagadnienia elektromagnetycznego (p.2.2) pamiętając, że również metody numeryczne są metodami przybliżonymi. Wobec powyższego wszystkie uwagi ogólne, dotyczące poszczególnych metod, są w większości obowiązujące także w przypadku pola temperatury.

Wydaje się, że metody analityczne są w dziedzinie nagrzewania indukcyjnego ciągle dominujące. Ich duża liczba wynika z faktu, że są używane od wielu lat. Są to metody: rozdzielania zmiennych Fouriera, funkcji źródłowych Greena, potencjałów cieplnych, przekształceń całkowych, wariacyjne - Ritza, Kantorowicza, Biota, czy linearyzacji [7,8,26,32,37,75,101]. W pracach tych rozwiązuje się równanie Fouriera-Kirchhoffa w układach jednorodnych i izotropowych z odpowiednimi warunkami początkowymi i brzegowymi, przy założeniu stałego lub ekspotencjalnego rozkładu gęstości mocy we wsadzie, co niezupełnie odpowiada warunkom nagrzewania indukcyjnego. Metody analityczne umożliwiają uzyskanie rozwiązania najdokładniejszego i najogólniejszego, ale dotyczą one głównie prostych geometrycznie układów, w których ciepło rozchodzi się jednokierunkowo, co w przypadku analizy zagadnień technicznych prowadzi do dużych uproszczeń. Dlatego też rozwinęła się druga grupa metod, zwana metodami przybliżonymi [4,11,12,13,19,34,102,111,119,120,136], w których następuje albo znaczne uproszczenie równań różniczkowych przewodnictwa cieplnego, sprowadzając zagadnienie do jednowymiarowego i liniowego albo ich uproszczone rozwiązanie. Dodatkowo wprowadza się wiele współczynników korekcyjnych, pozwalających zbliżyć otrzymane rozwiązanie do wyników eksperymentalnych. Metody te najczęściej są opracowywane i użyteczne dla bardzo wąskiej grupy lub nawet pojedynczych urządzeń.

Z zastąpieniem ciągłego modelu przenoszenia ciepła modelem dyskretnym mamy do czynienia w przypadku metod numerycznych. Chociaż uzyskany w tym przypadku wynik jest trudny do analizy, to ze względu na fakt możliwości obliczania układów w zasadzie o dowolnej geometrii, a także układów anizotropowych i nieliniowych, coraz częściej stosuje się właśnie metody numeryczne [7.8,27,28,50,69,77,83,118,142]. Dominuje tu metoda siatek (różnicowa, różnic skończonych) [34,50,77,83], chociaż używane są również metody wariacyjne (elementów skończonych, lokalnych wariacji), metoda prostych, czy też metody statystyczne (Monte Carlo).

2.4. Sprzężenie pól

Analiza zjawisk zachodzących w procesach nagrzewania indukcyjnego powinna się odbywać w zasadzie wyłącznie w oparciu o sprzężenie pól: elektromagnetycznego i temperaturowego, gdyż tylko w specyficznych przypadkach można uzyskać zadowalające wyniki przy rozprzęgnięciu pól [58]. Mimo to trudności związane ze sprzęganiem powodują, że tylko w niewielu pracach można znaleźć analizę zjawisk elektromagnetycznych i cieplnych sprzężonych [29,49,59,122], a w większości prac pola się rozprzęga, a proces nagrzewania dzieli się na przedziały, w których uśrednia się parametry materiałowe. Przy takim podejściu nieuchronne są duże niedokładności otrzymanych wyników rozkładu temperatury, przy czym wielkość błędu jest uzależniona od ilości przedziałów, przyjętych rozkładów źródeł ciepła i strat cieplnych. W większości prac dotyczących pól sprzężonych jedno- i dwuwymiarowych używana jest MRS [50,59,122]. W niewielu pracach stosowana jest MES [29,59]. Jeżeli chodzi o programy profesjonalne, to jedynie FLUX2D umożliwia analizę dwuwymiarową pól sprzężonych [26,76].

2.5. Podsumowanie

Podsumowując przegląd literatury należy stwierdzić, że w przypadku zagadnień dotyczących nagrzewania indukcyjnego istnieje bogata literatura, chociaż powszechne jest podejście wycinkowe, dotyczące bądź zagadnień elektromagnetycznych, bądź cieplnych. Zdecydowanie najskromniej prezentują się tutaj metody związane z analizą zagadnień sprzężonych, które mogą w sposób najpełniejszy odpowiedzieć na potrzeby nagrzewania indukcyjnego. Stąd też analiza dwuwymiarowa pól sprzężonych staje się najważniejszym zadaniem porównywalnym z wagą problemów trójwymiarowych niesprzężonych. Nawet w przypadku jedynie analizy elektromagnetycznej, najlepiej od strony teoretycznej rozpracowanej dziedziny nagrzewania, można zaobserwować pewne opóźnienie w stosunku do innych dziedzin inżynierii elektrycznej.

W przypadku układów nieliniowych i niestacjonarnych pól sprzężonych największe znaczenie mają obecnie metody numeryczne, a szczególnie MRS i MES, natomiast rozwiązania analityczne czy też przybliżone mogą być stosowane tylko w nielicznych przypadkach i to jedynie dla bardzo uproszczonych modeli i prostych warunków brzegowych.

Duże perspektywy rozwoju będą miały metody hybrydowe polowo-obwodowe ze względu na możliwości uwzględnienia zarówno złożonych zjawisk polowych w układzie grzejnym, jak też często skomplikowanego układu zasilania (źródła zasilania, układy kompensacji i symetryzacji).

W przypadku analizy numerycznej coraz większego znaczenia będą nabierały prace nie ograniczające się tylko do oceny ilościowej pola w dyskretnych punktach, ale także do wyznaczania parametrów globalnych układu grzejnego oraz procesu grzewczego.

3. CEL, ZAKRES I TEZA PRACY

3.1. Cel pracy

Duże moce i związane z tym koszty inwestycyjne, różnorodność wykonań i zwykle jednostkowa produkcja nagrzewnic indukcyjnych, przy znacznej zależności parametrów eksploatacyjnych od konstrukcji wzbudników i parametrów zasilania, uzasadniają potrzebę poszukiwania efektywnych modeli obliczeniowych, umożliwiających wybór optymalnych rozwiązań w fazie projektowania i eliminujących w znacznym stopniu budowę i badania kolejnych prototypów.

Celem niniejszej pracy jest dwuwymiarowa analiza procesu nagrzewania indukcyjnego, obejmująca sprzężone pola elektromagnetyczne i temperaturowe, która umożliwi optymalizację konstrukcji nagrzewnicy indukcyjnej w układzie osiowosymetrycznym.

3.2. Zakres i teza pracy

Zakres pracy obejmuje następujące zagadnienia:

- analizę zjawisk elektromagnetycznych w nagrzewnicach cylindrycznych ze wsadami niemagnetycznymi i ferromagnetycznymi,
- analizę niestacjonarnych, źródłowych pól temperaturowych w indukcyjnych układach grzejnych osiowosymetrycznych,
- sprzężenie pól elektromagnetycznych i temperaturowych oraz ocenę wpływu metody sprzężenia na dokładność obliczeń,
- przygotowanie na podstawie opracowanych modeli programów umożliwiających obliczanie parametrów elektrycznych i eksploatacyjnych nagrzewnic, wspomagających ich projektowanie,
- przetestowanie przydatności programów profesjonalnych do zagadnień nagrzewania indukcyjnego oraz opracowanie własnych procedur, które rozszerzą możliwości obliczeniowe programów dla tych zagadnień, a także bazy danych zawierających właściwości fizyczne materiałów używanych w procesach przetwórczych,
- zbadanie możliwości ograniczenia zużycia energii w procesie nagrzewania poprzez zastosowanie wzbudników wielowarstwowych oraz dobór właściwej konstrukcji nagrzewnicy i parametrów zasilania,

- analizę kosztów inwestycyjnych oraz eksploatacyjnych nagrzewnic indukcyjnych,
- weryfikację doświadczalną zaproponowanych modeli obliczeniowych.
 Sformułowano następującą tezę pracy:

Symulacja komputerowa procesu nagrzewania w indukcyjnym układzie grzejnym, z uwzględnieniem sprzężenia pól elektromagnetycznego i temperaturowego oraz zmieniających się właściwości fizycznych wsadu, stwarza racjonalne podstawy projektowania nagrzewnic indukcyjnych, gwarantując uzyskanie założonego efektu techniczno-ekonomicznego.

the supersystem of the supersyst

and the second part of a second second second second second second

4. DWUWYMIAROWY MODEL INDUKCYJNEGO UKŁADU GRZEJNEGO

4.1. Model sprzężonego zagadnienia elektromagnetycznego i temperaturowego

Rozpatruje się osiowosymetryczny układ grzejny, schematycznie przedstawiony na rys.4.1a, którego elementami są:

- wzbudnik <u>1</u>, stanowiący szeregowe połączenie m zwojów z przewodu nawojowego lub rurki o profilu okrągłym lub prostokątnym,
- niemagnetyczny lub magnetyczny wsad 2,
- rdzeń lub ekran magnetyczny 3.

Analizowane jest pole elektromagnetyczne we wszystkich obszarach obliczeniowych Ω oraz niestacjonarne pole temperaturowe we wsadzie Ω_2 , przy czym oba pola są wzajemnie sprzężone.





b'

Rys.4.1. Indukcyjny układ grzejny: (a) wzajemne położenie elementów, (b) model obliczeniowy

Fig.4.1. The induction heating system: (a) mutual position of elements, (b) calculation model

4.1.1. Pole elektromagnetyczne

W przypadku analizy pola elektromagnetycznego w układach dwuwymiarowych metoda magnetycznego potencjału wektorowego zaliczana jest do najskuteczniejszych [66,105]. Potencjał

wektorowy zdefiniowany jako B = rot A ma tylko jedną składową:

$$\mathbf{A}(r,z,t) = \mathbf{r}\mathbf{0} + \mathbf{z}\mathbf{0} + \boldsymbol{\varphi}A_{m}(r,z,t)$$

W rozpatrywanym przypadku w obszarze obliczeniowym $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3 \cup \Omega_4$ jak na rys.4.1b pole elektromagnetyczne zdefiniowane jest następująco:

$$\left(\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla\right) A_{\varphi} - \gamma \frac{\partial A_{\varphi}}{\partial t} = -J_{S}(t)$$
(4.1)

Dla stanu quasi ustalonego oraz wymuszenia sinusoidalnego równanie (4.1) przyjmuje postać

$$\left(\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla\right) \underline{A}_{\varphi} - j \omega \gamma \underline{A}_{\varphi} = -\underline{J}_{S}, \qquad (4.2)$$

gdzie: A_{φ} - składowa potencjału wektorowego,

 $\mu = f(H,T)$ - przenikalność magnetyczna wsadu,

y = f(T) - konduktywność wsadu,

- pulsacja,

ω

<u>J</u>s - gęstość prądu źródłowego.

W przypadku wzbudnika będącego przewodnikiem w kształcie pierścienia równanie (4.2), w którym występują dwie nieznane wielkości: potencjał \underline{A}_{φ} oraz gęstość prądu źródłowego \underline{J}_{φ} , można zastąpić równaniem różniczkowo-całkowym [29,35,36], zawierającym jedną niewiadomą - potencjał wektorowy \underline{A}_{φ} oraz wielkość zadaną - prąd I płynący we wzbudniku. Prąd ten można określić na podstawie prawa Ampere'a

$$I = \iint_{S_i} \underbrace{J}_S dS - j \omega \gamma \iint_{S_i} \underbrace{A}_{\varphi} dS, \qquad (4.3)$$

gdzie: S_i - przekrój poprzeczny *i*-tego zwoju wzbudnika, przy czym $i = 1 \dots m$. Zatem nieznaną wartość gęstości prądu źródłowego można określić z zależności:

$$I_S = \frac{I}{S_i^*} + j \frac{\omega \gamma}{S_i^*} \int \int \underline{A}_{\varphi} dS, \qquad (4.4)$$

gdzie: S_i^* - skorygowane pole przekroju poprzecznego przewodu wzbudnika. W rozpatrywanym osiowosymetrycznym układzie współrzędnych

$$S_i^* = R_i \iint_r \frac{1}{r} dr dz , \qquad (4.5)$$

gdzie: R, - promień i-tego zwoju wzbudnika.

Podstawiając (4.4) do (4.2) otrzymuje się równanie różniczkowo-całkowe zawierające tylko jedną niewiadomą - potencjał wektorowy \underline{A}_{φ}

$$\frac{1}{\mu} \left(\nabla^2 \underline{A}_{\varphi} - \frac{\underline{A}_{\varphi}}{r^2} \right) - j \omega \gamma \underline{A}_{\varphi} + j \frac{\omega \gamma}{S_i^*} \int_{S_i} \underline{A}_{\varphi} dS = -\frac{I}{S_i^*}$$
(4.6)

Jednoznaczność rozwiązania (4.1) zapewniają następujące warunki brzegowe (rys.4.1b):

$$\overline{AB}$$
: $A_{\varphi} = 0$ antysymetria prądów wzbudnika 1(4.7) \overline{BC} : $B_r = 0$ symetria względem osi r(4.8)

$$\overline{CD}, \overline{DA}$$
: $B_n = 0$ w dostatecznie dużym oddaleniu od układu (4.9)

Na podstawie znajomości potencjału $A_{\varphi}(r,z,t)$ można wyznaczyć objętościową gęstość mocy wydzielonej we wsadzie:

$$v(\mathbf{r}, z, t) = \omega^2 \gamma \underline{A}_{\varphi} \underline{A}_{\varphi}^*$$
(4.10)

4.1.2. Pole elektromagnetyczne w środowisku z ferromagnetykami

W przypadku analizy pola elektromagnetycznego w układzie grzejnym z materiałami ferromagnetycznymi konieczna jest znajomość charakterystyk magnesowania tych materiałów. Charakterystykę magnesowania aproksymowano funkcją [26]:

$$B(H,T) = \mu_0 H + J_{s0} \frac{H_a + 1 - \sqrt{(H_a + 1)^2 + 4H_a(1 - a)}}{2(1 - a)} \cdot \beta(T), \quad (4.11)$$

gdzie:

$$H_a = \mu_0 H \frac{\mu_{r0} - I}{J_{s0}}$$

$$\beta(T) = 1 - e^{\frac{T - T_c}{b}}$$
$$\beta(T) = e^{\frac{10(T_2 - T)}{b}}$$

dla $\beta(T) \leq 0,1$

dla $0, 1 \leq \beta(T) \leq 1$

$$\beta(T_1) = e^{\frac{10(T_2 - T_1)}{b}} = 0.1$$

- a współczynnik krzywizny (0 $\leq a \leq 0,5$),
- J_{s0} wartość indukcji nasycenia ferromagnetyka (rys.D.1.1),
- współczynnik określający spadek przenikalności magnetycznej w pobliżu punktu Curie (rys.D.1.2),
- T_c temperatura Curie.

4.1.3. Niestacjonarne pole temperaturowe

Pole temperaturowe powstaje we wsadzie $\underline{2}$ wskutek wydzielenia się mocy strat o średniej gęstości w(r,z) - obszar Ω_2 , rys.4.1b, zgodnie z równaniem

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} - w, \qquad (4.12)$$

gdzie:

- przewodność cieplna,
- ρ gęstość,
- c ciepło właściwe,

przy czym jednoznaczność rozwiązania w czasie t > 0 zapewniają warunki brzegowe:

$$\overline{EB}, \overline{BG}: \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \qquad \text{symetria względem osi } r, z \qquad (4.13)$$

$$\overline{EF}, \overline{FG}: \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T - T_a) \text{ konwekcyjny przepływ ciepła z obszaru } \Omega_2 \qquad (4.14)$$

$$\text{do otoczenia o temperaturze } T_a$$

oraz warunek początkowy dla t = 0:

$$\Omega_2: \quad T(r,z,0) = T_{start} \tag{4.15}$$

Na rozkład temperatury we wsadzie wpływają: rozkład gęstości mocy wydzielonej, czas nagrzewania, właściwości cieplne wsadu oraz warunki wymiany ciepła z otoczeniem. W rozważaniach przyjęto uproszczony model wymiany ciepła przez konwekcję i promieniowanie, sprowadzający się do założenia, że współczynnik wymiany ciepła jest funkcją temperatury $\alpha = f(T)$ [28].

Całkowity strumień ciepła przechodzącego do otoczenia q można wyrazić sumą strumieni ciepła wynikających z konwekcji q_k i promieniowania q_r

$$q = q_k + q_r = (\alpha_k + \alpha_r)(T - T_a) = \alpha(T)(T - T_a), \qquad (4.16)$$

przy czym

$$q_k = \alpha_k(T)(T - T_a) \tag{4.17}$$

$$q_r = \varepsilon(T)C_0(T^4 - T_a^4) , \qquad (4.18)$$

gdzie:

i

 α_k - współczynnik wymiany ciepła przez konwekcję,

- a, współczynnik wymiany ciepła przez promieniowanie,
- ε współczynnik emisyjności,
- C_0 stała Stefana (5.6693·10⁻⁸ W/(m²K⁴)).

Wygodnie jest wyrazić strumień cieplny wynikający z promieniowania wzorem:

$$q_r = \alpha_r(T)(T - T_o) \tag{4.19}$$

uzyskując w rezultacie zależność (4.16).

4.1.4. Sprzężenie pól

Modelowanie procesu nagrzewania indukcyjnego wymaga sprzężenia pola elektromagnetycznego i temperaturowego. Ich połączenie, a więc stworzenie pełnego modelu matematycznego, jest trudne z powodu występujących nieliniowości wynikających ze zmiany właściwości fizycznych wsadu w czasie nagrzewania γ , λ , $\rho c = f(T)$, zwłaszcza, gdy wsad jest ferromagnetykiem $\mu = f(H,T)$. W literaturze spotkać można różne sposoby uproszczenia problemu:

Problem nieliniowości jest pomijany (superpozycja dwu pól liniowych) lub uwzględniony tylko częściowo: μ = f(H), λ ρc = f(T), γ ≠ f(T), np. w [50]. Jest to tzw. sprzężenie lekkie (rys. 4.2). Algorytm rozwiązania przebiega w dwóch etapach. Najpierw w wyniku analizy pola otrzymuje się rozkład gęstości mocy wydzielonej w nagrzewanym obszarze, a następnie w drugim kroku przechodzi się do analizy niestacjonarnego, nieliniowego pola temperatury.



Rys. 4.2. Uproszczony algorytm rozwiązania zagadnienia sprzężonego (sprzężenie lekkie) Fig. 4.2. Simplified algorithms of the coupled problem's solution (light coupling)

Problem nieliniowy sprzężony, z uśrednionymi właściwościami fizycznymi wsadu w kroku czasowym, dla którego obliczane jest pole elektromagnetyczne (tzw. pseudosprzężenie). Obliczenie pola temperatury prowadzi się w kolejnych krokach czasowych, aż do uzyskania zadanej temperatury. Obliczenia elektromagnetyczne są prowadzone tylko dla pewnych zadanych przyrostów temperatury wsadu. W przypadku wsadu ferromagnetycznego przyrost

temperatury w kolejnych krokach czasowych ulega zmianie (zmniejszeniu w otoczeniu temperatury przemiany magnetycznej [29,59]). Innymi słowy właściwości wsadu są uśrednione w przyjętych przedziałach temperaturowych.

Sprzężenie pełne. Po obliczeniu temperatury w każdym kroku czasowym następuje powrót do zagadnienia elektromagnetycznego i ponowne (czasem kilkakrotne) rozwiązanie zagadnienia elektromagnetycznego dla skorygowanych wartości parametrów materiałowych zależnych od temperatury, aż do uzyskania założonej dokładności (rys.4.3).





Z badań przedstawionych przez autora w pracy [59] wynika, że jedynie uwzględnienie pełnego sprzężenia pól prowadzi do zadowalających wyników (rys.4.4, krzywa A). W przypadku sprzężenia lekkiego (krzywa B), a także przy nieuwzględnieniu nieliniowości (krzywa C) przebieg obliczonej krzywej nagrzewania znacznie odbiega od wartości otrzymanych eksperymentalnie i taki sposób analizy jest dopuszczalny tylko dla przypadku nagrzewania niskotemperaturowego do ok. 200°C. Przy korzystaniu z pseudosprzężenia (krzywe D i E) dokładność obliczeń zależy od przyjętego przedziału temperatur dla kolejnych kroków, w których następuje obliczanie pola elektromagnetycznego. Wymagane jest tu pewne doświadczenie w ustalaniu przedziałów temperatur. Niewłaściwy wybór tych przedziałów może powodować otrzymanie zamiast monotonicznego narastania temperatury przebiegu oscylacyjnego, szczególnie w okolicy punktu przemiany magnetycznej.



- Rys.4.4. Przebieg nagrzewania w wybranym punkcie wsadu: A sprzężenie pełne, B - sprzężenie lekkie, C - superpozycja pól liniowych, D - pseudosprzężenie $(\Delta T = 75 \ ^{\circ}C), E$ - pseudosprzężenie $(\Delta T = 150 \ ^{\circ}C)$
- Fig.4.4. Heating course at the selected point of the charge: A -hard coupling, B light coupling, C superposition of linear fields, D pseudo coupling ($\Delta T = 75^{\circ}C$), E pseudo coupling ($\Delta T = 150^{\circ}C$)

Każdy z przedstawionych sposobów postępowania wiąże się z określonym nakładem pracy, niezbędnym czasem prowadzenia obliczeń oraz posiadaniem odpowiedniego sprzętu komputerowego.

4.2. Programy własne

Symulacja komputerowa procesu nagrzewania jest możliwa albo na bazie własnych programów napisanych specjalnie do rozwiązania wybranych problemów na podstawie zbudowanego modelu lub też z wykorzystaniem oferowanych programów komercyjnych.

Pierwszy z tych sposobów dominował do połowy lat dziewięćdziesiątych. Do jego charakterystycznych cech zaliczyć należy:

- dobrą znajomość programu przez autorów,
- · często nie najlepsze rozwiązanie problemów numerycznych,
- zazwyczaj cząstkowe opracowanie procesu przygotowania danych i modelu (preprocesing) oraz analizy i wizualizacji wyników (postprocesing), co znacznie ogranicza możliwości programu oraz wydłuża czas obliczeń.

Wszystko to powodowało, że autorzy byli zazwyczaj jedynymi użytkownikami takich programów.

4.2.1. Program RZIND do obliczeń pola elektromagnetycznego

Program rozwiązuje pole elektromagnetyczne w indukcyjnym układzie grzejnym na podstawie przedstawionego w p.4.1.1 modelu, aproksymując równanie (4.5) z warunkami (4.7)-(4.9) metodą różnic skończonych. W pliku wejściowym DRZ_IN.TXT dokonuje się dyskretyzacji obszaru obliczeniowego oraz wprowadza się właściwości fizyczne środowiska, a także stałe niezbędne do obliczeń. W pliku wynikowym VRZ_IND.TXT otrzymuje się wartości gęstości mocy w_{ij} w poszczególnych węzłach. Program własny autora RZIND wykorzystano w pracach [45,52].

4.2.2. Program TEMP do obliczeń niestacjonarnego pola temperatury

Program rozwiązuje na podstawie przedstawionego w p.4.1.3 modelu niestacjonarne pole temperatury (4.12) z warunkami brzegowymi (4.13) i (4.14) oraz początkowym (4.15) metodą różnic skończonych.

Program wymaga sporządzenia następujących plików:

a) zbioru danych wejściowych DTEMP.TXT, zawierającego:

- wymiary geometryczne obszaru Ω₂(wsadu), w którym jest obliczany rozkład temperatury oraz jego właściwości fizyczne,
- warunki brzegowe oraz początkowe pola temperatury,
- informację o czasowej dyskretyzacji obliczeń;
- b) zbioru danych DW.TXT, zawierającego rozkład wewnętrznych źródeł ciepła w_{i,ν} uzyskany w wyniku działania programu RZIND w Ω₂.
 Program TEMP wykorzystano w pracach [50,53].

4.2.3. Sprzężenie pól elektromagnetycznego i temperaturowego

Numeryczne rozwiązanie sprzężonego problemu jest realizowane wg algorytmu umożliwiającego obliczenia w węzłach [i, j], w przedziałach czasowych $t_l = l \Delta t$, gdzie l = 1,

- 2, ..., każdy w dwu krokach, przy czym:
- krok realizuje rozwiązanie równań pola elektromagnetycznego (4.5) (4.9) z uwzględnieniem właściwości elektrycznych materiału wsadu (γ_{k,j,l}), odpowiadających temperaturom T_{k,j,l}. W wyniku otrzymuje się gęstość objętościową mocy w węzłach w_{k,l}.
- 2 krok realizuje obliczenia temperatury w węzłach sieci z uwzględnieniem właściwości cieplnych wsadu $(\lambda_{i,j}, \rho c_{i,j})$ w temperaturach $T_{i,j}$. Wynikiem są temperatury $T_{i,j}$. Wynikiem są temperatury $T_{i,j}$.

Program napisano w języku PASCAL na komputer PC 486. Został wykorzystany w pracach [49,56].

4.3. Programy profesjonalne uzupelnione własnymi procedurami

Rozwój techniki mikrokomputerowej sprawił, że obecne możliwości obliczeniowe szerokiej gamy problemów technicznych, w tym również zagadnień związanych z nagrzewaniem indukcyjnym, są znacznie większe. Wzrosła szybkość, jak również precyzja obliczeń. Możliwe jest to także dzięki bogatej ofercie programów komercyjnych, takich jak: ANSYS, SYSTUS, COSMOS, OPERA, QUICK FIELD, FLUX, pracujących na różnych platformach sprzętowych, przede wszystkim w DOS, ale ostatnio także w WINDOWS, OS2 itd. Duża podaż sprawia, że ich cena nie stanowi już bariery nie do pokonania jak na warunki krajowe, tak wiec coraz wieksza liczba badaczy sięga po nie w swojej pracy. Zaletą ich jest dobre profesjonalne opracowanie wszystkich modułów, w tym także problemu pre- oraz postprocesingu. Kolejne ich wersje są coraz bardziej przyjazne dla użytkownika, co również zwiększa zasięg ich zastosowania. Programy te w większości dobrze radzą sobie z zagadnieniami obliczeniowymi, związanymi z polem elektromagnetycznym, w tym również w układzie 3D, natomiast pole temperatury jest jedynie dodatkiem i jest to najczęściej pole stacjonarne. Większość z nich charakteryzuje się jednak dosyć istotną wadą. Ponieważ ze względów komercyjnych usiłują dotrzeć do szerokiego kręgu użytkowników, więc ich autorzy tworzą je tak, aby były one jak najbardziej uniwersalne, co często uzyskuje się kosztem precyzji w rozwiązaniu szczegółowych problemów poszczególnych użytkowników, jak np. w nagrzewaniu indukcyjnym.

Zagadnienia związane z nagrzewaniem indukcyjnym, wymagające sprzężenia obydwu pól, znajdują się jedynie w ofercie firmy Cedrat i to w układzie 2D (FLUX2D). Dodatkową zaletą pakietu FLUX jest możliwość sprzęgnięcia wielkości obwodowych (źródło zasilania, bateria kondensatorów, dowolne połączenie zwojów wzbudnika) z obliczanymi wielkościami polowymi układu grzejnego wzbudnik-wsad. Korzystanie z programów profesjonalnych może odbywać się jednym z następujących sposobów:

- Wykorzystanie dostępnych programów, np. FLUX, umożliwiających rozwiązanie całego zagadnienia, przy czym rola użytkownika polega na sformułowaniu modelu w procesie preprocesingu oraz analizy i dyskusji otrzymanych wyników [57,62,63,64,114].
- Zastosowanie programu komercyjnego, realizującego częściowo problem użytkownika, natomiast pozostała część jest rozwiązywana innymi metodami. Użytkownik musi uzupełnić program własnymi procedurami lub opracować własny program współpracujący z programem profesjonalnym [50,53,58,61,65,66,104].

Większość obliczeń przedstawionych w rozdz. 5 wykonano z wykorzystaniem pakietu FLUX2D, uzupełnionego własnymi procedurami, pozwalającymi zamodelować specyficzne właściwości materiałowe, parametry źródła zasilania i układów pomocniczych oraz umożliwiające przeprowadzenie obliczeń parametrów elektrycznych i eksploatacyjnych nagrzewnicy (np. sprawności). Ponadto przygotowano bank danych materiałowych, obejmujący właściwości materiałowe dla większości metali nieżelaznych, spotykanych w przemyśle przetwórczym oraz wielu gatunków stali.

5. OBLICZENIA PARAMETRÓW ELEKTRYCZNYCH, CIEPLNYCH I EKSPLOATACYJNYCH

5.1. Wielkości całkowe pola elektromagnetycznego

Otrzymany w wyniku analizy sprzężonego pola elektromagnetycznego i temperaturowego rozkład potencjału wektorowego $A_{\varphi} = A_{\varphi}$ (*r*,*z*,*t*) pozwala na wyznaczenie zarówno gęstości objętościowej mocy (wzór 4.10) wydzielonej we wsadzie, jak i innych wielkości całkowych. Gęstość prądów wirowych indukowanych w *i*-tym zwoju wzbudnika oblicza się z zależności:

$$I_{E_{r}} = -j\omega\gamma \iint_{S} A_{\varphi} dS$$
(5.1)

Ponieważ prąd I_E jest znany, prąd źródłowy I_S można wyznaczyć z całkowitego prądu płynącego we wzbudniku [35]

$$I_{S} = I - I_{E} \tag{5.2}$$

Spadek napięcia U, w i-tym zwoju jest określony zależnością

$$\underline{J}_{i} = \frac{J_{s_{i}}}{\nu} 2\pi R_{i}, \tag{5.3}$$

gdzie:
$$J_{S_i} = \frac{I_s}{S_i^*}$$
 - gęstość prądu źródłowego w *i*- tym zwoju, zaś S_i^* wyznacza się ze

wzoru (4.5).

Z

W rozpatrywanym w rozdz. 4 modelu indukcyjnego układu grzejnego wzbudnik stanowi szeregowe połączenie *m* zwojów. Impedancję takiego wzbudnika oblicza się następująco:

$$=\frac{1}{I}\sum_{i=1}^{m}\underline{U}_{i},$$
(5.4)

natomiast rezystancję i reaktancję wzbudnika można wyznaczyć jako:

 $R = Re(\underline{Z}) \qquad \omega L = Im(\underline{Z}) \tag{5.5}$

Znając rezystancję i reaktancję wzbudnika można obliczyć współczynnik mocy

$$\cos\varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$
(5.6)

Poprawy współczynnika mocy dokonuje się najczęściej przez zastosowanie równoległego układu kompensacji. Wówczas pojemność baterii kondensatorów C, zapewniająca całkowitą kompensację, wynosi:

$$C = \frac{L}{R^2 + \omega^2 L^2}$$

Sprawność elektryczna indukcyjnego układu grzejnego jest definiowana jako stosunek mocy czynnej, wydzielonej we wsadzie do całkowitej mocy czynnej, dostarczonej do wzbudnika

$$\eta_{el} = \frac{P_{ws}}{P_n} = \frac{P_{ws}}{P_{ws} + \Delta P}, \qquad (5.7)$$

gdzie: $P_{ws} = \int w(r,z) d\Omega$, a w(r,z) jest obliczone zgodnie z zależnością (4.10),

$$P_n = UI\cos\varphi,$$

ΔP - suma mocy strat we wzbudniku.

Wzór (5.7) określa sprawność elektryczną indukcyjnego układu grzejnego. Całkowita sprawność nagrzewnicy indukcyjnej musi uwzględnić dodatkowo moc strat w torze zasilającym, kondensatorach, rdzeniach magnetycznych oraz straty ciepła związane z wymianą ciepła w trakcie nagrzewania. Tak więc całkowita sprawność elektrotermiczna [36,42] wynosi:

$$\eta = \frac{P_{uz}}{P_1} = \eta_{tz} \eta_{el} \eta_{e}, \tag{5.8}$$

gdzie:

- sprawność toru zasilającego

$$\eta_{tz} = \frac{P_n}{P_j} = I - \frac{\Delta P_{tz}}{P_j}$$

(5.9)

- sprawność elektryczna układu grzejnego (5.7)

$$\eta_{el} = \frac{P_{ws}}{P_{e}} = 1 - \frac{\Delta P_{u} + \Delta P_{d}}{P_{e}}$$
(5.10)

- sprawność cieplna

$$\eta_c = \frac{P_{u\dot{z}}}{P_{ws}} = 1 - \frac{\Delta P_c}{P_{ws}}, \qquad (5.11)$$

przy czym:

- P_1 moc pobierana przez nagrzewnicę (rys. 5.1),
- P_n moc pobierana przez układ grzejny (wzbudnik wsad),
- P_{ws} moc przekazywana do wsadu,

 $P_{\rm sc}$ - moc użyteczna.



Rys. 5.1. Nagrzewnica indukcyjna z wielowarstwowym wzbudnikiem Fig. 5.1. The induction heater with the multilayer inductor

W bilansie mocy (rys. 5.2) można wyróżnić następujące składniki:

 ΔP_{ir} - moc strat w źródle zasilania,

- ΔP_{ir} moc strat w transformatorze dopasowującym,
- ΔP_k moc strat w kondensatorach kompensujących moc bierną,
- $\Delta P_{\rm tw}$ moc strat w torze wielkoprądowym,

- ΔP_s moc strat w układzie symetryzacji (tylko przy f = 50 Hz),
- ΔP_{μ} moc strat w uzwojeniu wzbudnika,
- ΔP_d moc strat dodatkowych (obudowa, rdzenie, ekrany, prowadnice wsadu),
- ΔP_c straty cieplne,



Rys. 5.2. Bilans mocy nagrzewnicy indukcyjnej Fig. 5.2. Power balance of the induction heater

przy czym moc strat w torze zasilającym (5.9) wynosi:

$$\Delta P_{tz} = \Delta P_{tr} + \Delta P_{tr} + \Delta P_{k} + \Delta P_{tw} + \Delta P_{s}$$
(5.12)

Sprawności torów zasilających nagrzewnic indukcyjnych sieciowej i średnich częstotliwości wynoszą około 90 + 95%. O sprawności elektrycznej układu wzbudnik-wsad ($\eta_{el} = 50 \div 95$ %) decydują głównie następujące czynniki (wzbudnik wielowarstwowy):

- liczba warstw uzwojenia n i grubości przewodów (ścianek rurek) g_i (i = 1, 2, ..., n) poszczególnych warstw (jednakowe lub zróżnicowane),
- częstotliwość f prądu wzbudnika,
- odległość między wzbudnikiem i wsadem Δ_{ww} (rys. 5.1)

$$\Delta_{ww} = \Delta_{og} + \Delta_{l} + \Delta_{sz} = \Delta_{wyl} + \Delta_{sz} , \qquad (5.13)$$

• stosunek długości wzbudnika l₁ i wsadu l₂.

Tak więc

$$\eta_{el} = F_1(n, g_{P} \Delta_{ww}, f, l_1/l_2)$$

(5.14)

W wymianie ciepła układu grzejnego zasadnicze znaczenie ma przewodzenie. Sprawność cieplna nagrzewnicy η_c zależy więc przede wszystkim od jakości materiałów ogniotrwałych i termoizolacyjnych, od ich przewodności cieplnej λ_{ac} i λ_{ac} oraz grubości warstw wyłożenia Δ_{ac} i Δ_{ac}

 $\eta_c = F_2(\lambda_{og'} \Delta_{og'} \lambda_r \Delta_r)$ (5.15)

5.2. Minimalizacja zużycia energii elektrycznej

Wpływ poszczególnych zmiennych w zależności (5.14) na sprawność elektryczną nagrzewnicy jest zróżnicowany. Znaczący wzrost sprawności można uzyskać stosując uzwojenia wielowarstwowe. Zwiększanie liczby warstw *n* we wzbudniku powoduje wzrost sprawności, nawet o 30 % [38,46,47]. Praktycznie, ze względu na trudności związane z wykonaniem wzbudnika, liczba ta dochodzi do 5, gdyż dalsze powiększanie nie ma uzasadnienia ekonomicznego (zbyt duży koszt inwestycyjny). Autor w pracach [47,48,57,61,62] wykazał, że istnieje tu pewne niebezpieczeństwo, mianowicie przy nieprawidłowo dobranych grubościach poszczególnych warstw sprawność może być taka sama albo nawet mniejsza niż przy uzwojeniu jednowarstwowym.

W przypadku wzbudnika jednowarstwowego długiego maksymalną sprawność elektryczną uzyskuje się, gdy grubość przewodu (ścianki) jest nie mniejsza niż 1,57 $\delta(\delta$ - głębokość wnikania) [72,115].

Wpływ odległości wzbudnika i wsadu jest raczej oczywisty. Maksymalną sprawność elektrotermiczną osiąga się, gdy stosunek średnicy wewnętrznej wzbudnika i średnicy wsadu dąży do jedności. Przy nagrzewaniu skrośnym straty cieplne są stosunkowo duże z uwagi na długi czas nagrzewania i wysoką temperaturę wsadu. W celu ich zmniejszenia stosuje się materiały ogniotrwałe i termoizolacyjne, umieszczone między wsadem i wzbudnikiem, co powoduje zwiększenie średnicy wzbudnika. Tak więc w praktyce sprawność zbliżoną do maksymalnej uzyskuje się dla stosunkowo szerokiego zakresu zmian grubości wyłożenia odniesionego do średnicy wsadu $(0.15 \div 0.5) d_{ww}/d_2$ [115].

Ograniczony jest również możliwy zakres zmian l_1/l_2 . W celu zapewnienia równomiernego nagrzewania wsadu długość wzbudnika powinna być większa od długości wsadu. W przypadku nagrzewnic, w których długość wzbudnika jest znacznie większa od jego średnicy $l_1 >> d_1$, uważa się, że wartość stosunku l_1/l_2 powinna się mieścić w zakresie l + (2 + 3) d_{ww}/l_2 [72] lub l + (1 + 1.5) d_1/l_2 [115].

Wszystkie przywołane powyżej zależności zostały uzyskane na podstawie jednowymiarowego modelu obliczeniowego. W przypadku projektowania układów indukcyjnych tzw. "krótkich", dla których warunek $l_i >> d_i$ nie jest spełniony, korzystanie z zależności przyjętych dla układów "długich" prowadzi do znacznych błędów, a więc projektant skazany jest na własne

doświadczenie oraz intuicję, które mogą być zawodne. Dlatego też na podstawie przedstawionego w rozdz. 4 modelu dokonano wielowariantowej symulacji komputerowej nagrzewania w indukcyjnym układzie grzejnym z zastosowaniem pakietu Flux2D, badając wpływ poszczególnych zmiennych (5.14) na sprawność elektryczną.

5.2.1. Nagrzewanie równomierne całego wsadu

Badania wykonano na przykładzie nagrzewania skrośnego wsadu mosiężnego Ms58 o stosunku średnicy do długości $d_2/l_2 = 1.069$. Podstawowe wymiary oraz parametry zasilania nagrzewnicy (rys. 5.1) zestawiono w tablicy 5.1, natomiast parametry materiałowe podano w tablicy 5.2. Symulację prowadzono dla różnych wariantów geometrii wzbudnika, zmieniając liczbę $n = 1 \pm 4$, grubość warstw uzwojenia $g = (0,3 \pm 2) \delta$, odległość wzbudnika od wsadu Δ_{ww} oraz stosunek l_1/l_2 długości wzbudnika i wsadu .

Ta	bli	са	5.	1
	~ * *	~ ~~	~ .	

wymiary w	saau	i parar	neiry zasilania
Średnica wsadu	<i>d</i> ₂ ,	m	0.2138
Średnica wzbudnika	d_{l} ,	m	0.236
Długość wsadu	l ₂ ,	m	0.2
Długość wzbudnika	l ₁ ,	m	0.2
Napięcie	U,	v	40-200
Częstotliwość	f,	kHz	0.05, 0.15, 1, 2.5, 10

Tablica 5.2

Właściwości fizyczne układu grzejnego				
Konduktywność wsadu	Y2,	S/m	2.27·10 ⁷ (1 - 0.00049·T)	
Konduktywność wzbudnika	γ,,	S/m	5.6.107	
Przewodność cieplna wsadu	λ,	W/(m·K)	105.839(1 + 0.00152·T)	
Akumulacyjność cieplna wsadu	QС,	$J/(m^3 \cdot K)$	3.19·10 ⁶ (1 + 0.000297·T)	
Względna przenikalność magnety	czna w	vsadu	1	

Liczba warstw i ich grubość w uzwojeniu wielowarstwowym

Znaczący wzrost sprawności elektrycznej η_{el} nagrzewnicy (przy częstotliwości f = 50 Hz), a tym samym zmniejszenie zużycia energii można uzyskać przez zastosowanie wzbudników wielowarstwowych. Taki efekt uzyskuje się, gdy poszczególne warstwy mają grubość zbliżoną do optymalnej, tzn. takiej, dla której sprawność jest maksymalna (rys.5.3).







b)

Niespełnienie tego warunku może prowadzić do sytuacji, w której sprawność wzbudnika wielowarstwowego może być nawet niższa niż dla wzbudnika jednowarstwowego (rys.5.4 a i b). a)



- Rys. 5.4. Zależność sprawności elektrycznej nagrzewnicy (a)oraz współczynnika mocy (b), od stosunku grubości poszczególnych warstw do głębokości wnikania (jednakowe grubości warstw)
- Fig. 5.4. Dependence of electrical efficiency (a), and power factor (b), upon the thickness of particular layers to skin depth ratio (the same thickness of layers)

W przypadku wzbudnika "krótkiego" ulega zwiększeniu grubość uzwojenia, dla którego osiąga się maksymalną sprawność elektryczną z $g_1 = 1,57\delta$ na $g_2 = 1,75\delta$. Dodanie kolejnych warstw o jednakowych lub o zróżnicowanych grubościach zwiększa sprawność do wartości

maksymalnej dla następujących przedziałów: dwuwarstwowy $g = (0,7 \div 1,5)\delta$ przy jednakowej grubości oraz $g_1 > 1.2\delta$ - pierwsza warstwa i $g_2 = (0,7 + 1.2)\delta$ - druga warstwa - przy zróżnicowanej grubości; trójwarstwowy $g = (0.55 \div 1.33)\delta$ przy jednakowej grubości oraz $g_1 > 1, 2\delta$ - pierwsza warstwa, $g_2 = (0, 7 \div 1, 2)\delta$ - druga warstwa, $g_3 = (0, 5 \div 1, 0)\delta$ - trzecia warstwa - przy zróżnicowanej grubości; czterowarstwowy $g = (0,38 \div 1,15)\delta$ przy jednakowej grubości oraz $g_1 > 1,2\delta$ - pierwsza warstwa, $g_2 = (0,7 \div 1,2)\delta$ - druga warstwa, $g_3 = (0,5 \div 1,0)\delta$ trzecia warstwa, $g_4 = (0,3 \div 0,8)\delta$ - czwarta warstwa - przy zróżnicowanej grubości.



Rys. 5.5. Rozkład mocy czynnej, odniesionej do wartości średniej w poszczególnych zwojach wzbudnika czterowarstwowego (zróżnicowane grubości warstw) Fig.5.5. Distribution of relative value of active power in particular coils of the four-layer winding (the diversified thickness of layers)

Rozkład mocy strat w poszczególnych uzwojeniach jest nierównomierny. Rysunek 5.5 przedstawia moc czynna w poszczególnych zwojach i warstwach, a rys.5.6 rozkład mocy strat dla wzbudnika czterowarstwowego, przy czym wszystkie wartości mocy odniesiono do wartości średniej przypadającej na jeden zwój wzbudnika. Ze względu na symetrię układu przedstawiono jedynie połowe długości wzbudnika. Najwyższe wartości mocy czynnej występują w warstwach wewnetrznych uzwojenia (4,3), przy czym w zwojach skrajnych wszystkich warstw moc maleje. Odwrotnie dzieje się w przypadku mocy strat - najwyższe wartości strat występują w zwojach skrajnych, natomiast w zwojach środkowych straty rosną wraz ze zmniejszaniem się odległości danej warstwy od wsadu. Dzieki temu można zlokalizować miejsca, w których wydziela się największa ilość ciepła, a w związku z tym odpowiednio rozwiązać układ chłodzenia. Również napiecia na poszczególnych zwojach znacznie różnią się od siebie (rys.5.7). Najniższe wartości napięć (odniesione do napięcia średniego, przypadającego na jeden zwój) występują na zwojach

skrajnych, najwyższe - na środkowych. Różnice między pierwszym skrajnym zwojem warstwy 4 i piątym środkowym warstwy 1 dochodzą do 100 %.



- Rys.5.6. Rozkład mocy strat w poszczególnych zwojach wzbudnika czterowarstwowego odniesionych do wartości średniej (zróżnicowane grubości warstw)
- Fig.5.6. Distribution of relative value of losses in particular coils of the four-layer winding (the diversified thickness of layers)

Poszczególne warstwy mogą posiadać jednakową lub różną liczbę zwojów. Przeprowadzone obliczenia wykazały jednak minimalny wpływ różnicowania liczby zwojów w poszczególnych warstwach na wzrost sprawności (poniżej 1 %).

Odległość wzbudnika od wsadu

Wpływ odległości wzbudnika od wsadu w przypadku nagrzewnicy "krótkiej" jest zbliżony do zależności znanej dla nagrzewnic "długich" [72,115]. Należy dążyć do możliwie najmniejszych wymiarów szczeliny, pamiętając jednak o ograniczeniu strat cieplnych, a więc o dpowiedniej grubości warstwy ogniotrwałej i termoizolacyjnej. Wielkość tej szczeliny decyduje również o współczynniku mocy wzbudnika (rys.5.8), a więc o pojemności (mocy) baterii kondensatorów do kompensacji mocy biernej.



- Rys.5.7. Napięcie w poszczególnych zwojach wzbudnika czterowarstwowego odniesione do wartości średniej
- Fig.5.7. Distribution of voltage in relation to mean value in particular coils of the fourlayer winding



- Rys.5.8. Wpływ odległości między wzbudnikiem i wsadem odniesionej do średnicy wzbudnika na sprawność i współczynnik mocy
- Fig.5.8. Influence of the distance between inductor and charge in relation to charge diameter upon efficiency and the power factor

Stosunek długości wzbudnika i wsadu

Nieco większa niż dla układów "długich" powinna być długość wzbudnika l_1 . Wykonana symulacja procesu nagrzewania (dla $d_2/l_2 = 1.069$) wykazała, że niedogrzanie krańców wsadu nie występuje, jeśli stosunek l_1/l_2 jest większy od 1.2. Zależność sprawności elektrycznej oraz współczynnika mocy dla różnych wartości stosunku l_1/l_2 przedstawiono na rys.5.9.





Fig. 5.9. Influence of the inductor to charge ratio length upon efficiency and power factor

Częstotliwość

Częstotliwość prądu wzbudnika, a dokładniej stosunek średnicy wsadu do głębokości wnikania, wpływa w istotny sposób na sprawność nagrzewnicy. Dla wzbudnika jednowarstwowego powyżej pewnej wartości częstotliwości sprawność rośnie nieznacznie (rys.5.10). Wyraźny wzrost sprawności uzyskiwany dla wzbudników wielowarstwowych występuje praktycznie tylko dla częstotliwości niskich (50 Hz). Już przy dwu warstwach dla częstotliwości powyżej 250 Hz sprawność gwałtownie spada. Przy trzech i więcej warstwach i częstotliwościach wyższych od sieciowych (> 150 Hz) sprawność jest niższa niż dla uzwojenia jednowarstwowego.



Rys. 5.10. Zależność sprawności od częstotliwości zasilania Fig. 5.10. Dependence of efficiency upon frequency of the supply

Rdzeń magnetyczny

Bardzo korzystnie na proces nagrzewania wpływa rdzeń magnetyczny. Powoduje on wyraźny wzrost sprawności (tab. 5.3), a z drugiej strony następuje kilkukrotne zmniejszenie promieniowania elektromagnetycznego wokół wzbudnika [51,60].

Tablica 5.3

Wpływ rdzenia magnetycznego na parametry nagrzewnicy

	the later	bez rdzenia	z rdzeniem
P _m	kW	61.37	49.91
P _{ws} ,	k₩	38.87	36.1
cosφ	-	0.262	0.128
η_{eb}	%	63.33	72.33

Wyniki uzyskane dla nagrzewnicy ze wzbudnikiem 4-warstwowym przy optymalnej grubości warstw

Parametry materialowe rdzenia magnetycznego zestawiono w D.3.

40

5.2.2. Nagrzewnica ze wzbudnikiem uniwersalnym

W przypadku dużego zróżnicowania asortymentu produkcyjnego projektowane sa nagrzewnice uniwersalne składające się z jednego układu zasilania (generator, transformator regulacyjny, bateria kondensatorów, układ sterowania), podajnika, stacji chłodzenia wodnego ewentualnie komory wyrównawczej oraz odpowiedniego dla tego asortymentu zestawu wzbudników. Cena wzbudnika wraz z kompletem zapasowym stanowi zaledwie 10 ÷ 25 % kosztów całej nagrzewnicy. Tak więc kilka wymiennych wzbudników nie wpływa decydujaco na koszt całej nagrzewnicy i jest to rozwiązanie stosowane powszechnie, zwłaszcza przy produkcji wielkoseryjnej. Jednak w praktyce produkcyjnej spotykana jest czasem sytuacja, w której zachodzi konieczność częstych zmian asortymentu nagrzewanych wsadów przy stosunkowo krótkich seriach produkcyjnych. Wymiana wzbudników staje się wtedy bardzo uciążliwa, gdyż wydłuża znacznie czas i dezorganizuje cykl produkcyjny. Rodzi się pytanie, czy możliwe jest użycie jednego uniwersalnego wzbudnika lub chociaż zasadniczego zmniejszenia ich liczby, godzac się na nieco większą energochłonność procesu nagrzewania. W pracy analizuje się parametry nagrzewania prowadzonego przy pomocy jednego, uniwersalnego wzbudnika dla różnych wsadów.

Bazując na modelu przedstawionym w rozdz. 4 przeprowadzono symulację komputerową procesu nagrzewania wsadu o geometrii jak na rys. 5.11 i dla wymiarów oraz parametrów zasilania zestawionych w tablicy 5.4. Wzbudnik zamodelowano jako szeregowe połączenie 44 zwojów przewodu nawojowego z otworem chłodzacym o wymiarach 10×12×2 mm oraz odpowiednio 54 zwoje o wymiarach 8×15×2 mm. Właściwości fizyczne materiałów tworzących układ grzejny zestawiono w tablicy 5.2. Obliczeniom poddawano przedstawiony na rys. 5.11 układ grzejny, przy czym w kolejnych wariantach obliczeń badano wpływ następujących elementów geometrii nagrzewnicy oraz parametrów zasilania;

efektywność nagrzewania dla różnych średnic wsadu przy dwu stałych średnicach wzbudnika,

Wymiary wsadu i parametry zasilania					
Średnica wsadu	d ₂ ,	m	0.016 ÷ 0.042		
Średnica wzbudnika	<i>d</i> ₁ ,	m	0.067 ; 0.053		
Długość wsadu	l ₂ ,	m	0.5		
Długość wzbudnika	<i>l</i> ₁ ,	m	0.5		
Napięcie	U,	V	180		
Częstotliwość	f,	kHz	1, 3.5, 10		

Tablica 5.4

vmiary wsadu i parametry zasilani	a
-----------------------------------	---

- wpływ częstotliwości f prądu zasilającego na sprawność procesu z zachowaniem optymalnego stosunku grubości przewodu nawojowego do głebokości wnikania pola elektromagnetycznego δ_{Con}
- wpływ obecności rdzenia magnetycznego na proces nagrzewania,
- nagrzewanie wsadu stopniowanego,
- nagrzewanie wsadu o innych właściwościach fizycznych (niż podane w tabl. 5.4).



Rys. 5.11. Indukcyjny układ grzejny: 1 - wsad, 2 - wzbudnik, 3 - rdzeń magnetyczny Fig. 5.11. The induction heating system: 1 - charge, 2 - inductor, 3 - magnetic core

Różne średnice wsadu

Dokonano obliczeń sprawności elektrycznej oraz jednostkowego zużycia energii dla nagrzewnicy w kolejnych krokach czasowych, przy zasilaniu ze źródła napięciowego (U=180 V, f = 3500 Hz) i różnych średnicach wsadu. Wraz ze wzrostem temperatury następuje wzrost sprawności oraz współczynnika mocy (rys.5.12) oraz zmniejszanie jednostkowego zużycia energii.

W dalszych rozważaniach ograniczono się do podawania obliczonych wartości, tj.: mocy dostarczonej do układu grzejnego P,, mocy wydzielonej we wsadzie P,, współczynnika mocy

 $\cos\varphi$. sprawności elektrycznej określonej jako $\eta_{el} = \frac{P_{ws}}{P}$ dla temperatury średniej (ok. 350°C).



- Rys.5.12. Zmiana sprawności elektrycznej oraz współczynnika mocy wraz z temperaturą
- Fig.5.12. Change of efficiency and power factor due to temperature

Natomiast jednostkowe zużycie energii określono jako $E_j = \frac{P_{nsr} \cdot t}{m_w}$, gdzie: $P_{nsr} \cdot srednia moc$

w czasie nagrzewania do temperatury końcowej $T_k = 730$ °C, t - czas nagrzewania, m_w - masa wsadu. Zmniejszanie średnicy względnej wsadu, tj. średnicy odniesionej do średnicy maksymalnej dla danego wzbudnika <u>d</u>, powoduje obniżenie sprawności nagrzewania, a tym samym wzrost jednostkowego zużycia energii (tab. 5.5). Wybór minimalnej średnicy nagrzewanego wsadu przy danym wzbudniku jest związany z analizą ekonomiczną dla danej serii produkcyjnej. Jednak przebieg krzywych (rys.5.13) wskazuje, że bez znacznego pogorszenia sprawności uzasadnione jest nagrzewanie wsadów o średnicach <u>d</u> w zakresie 1 ÷ 0.8. Względne

jednostkowe zużycie energii
$$\underline{E}_{j} = \frac{E_{j}}{E_{j\min}}$$

– nie przekracza wtedy wartości 1.2.

Tablica 5.5

		Parame	try elektry	czne nagrz	zewnicy pr	zy różnych	n średnica	ch wsadu	
d = d/d	l _{2mar} [-]	1.0*	0.8*	0.69*	0.57*	0.38*	1.0**	0.64**	0.47**
P _m	kW	31.71	20.24	16.07	13.19	10.16	21.91	11.97	8.34
P _{ws}	kW	17.2	9.57	6.78	4.83	2.72	12.02	4.87	2.66
cosφ	-	0.121	0.09	0.077	0.066	0.054	0.156	0.095	0.077
η _{el}	%	54.25	47.28	42.17	36.64	26.78	54.88	40.99	31.87
<i>E</i> _{<i>j</i>} ,	kWh/kg	0.177	0.209	0.243	0.281	0.410	0.163	0.257	0.3

* Dla średnicy wzbudnika d, = 0.067 m, ** Dla średnicy wzbudnika d, =0.053 m *



45



Rys.5.13. Zależność jednostkowego zużycia energii od średnicy wsadu Fig.5.13. Dependence of the unitary energy consumption upon charge's diameter

Wpływ częstotliwości prądu zasilającego

Nie bez znaczenia jest dobór optymalnej częstotliwości dla wybranego zakresu średnic wsadu. Częstotliwość musi być tak dobrana, aby wszystkie wsady mogły być nagrzewane z dostatecznie dużą sprawnością. Jeżeli jedna średnica jest dominująca, to do niej powinna być dobrana częstotliwość. Dla badanej nagrzewnicy zmieniano częstotliwość w zakresie 1 + 10 kHz. Najwyższe wartości sprawności uzyskano dla częstotliwości ok. 3.5 kHz (tab.5.6).

Tai	bli	ca	5.1	Ć

Parametry elektryczne dla różnych częstotliwości zasilania

ſ.	kHz	1	3.5	10
P _{n.}	kW	20.99	16.07	20.52
P _{ws}	kW	9.45	9.57	8.39
cosφ	-	0.148	0.090	0.083
η _e ,	%	45.01	47.28	40.90
Е,,	kWh/kg	0.236	0.209	0.260

Wpływ rdzenia magnetycznego

Dodanie do układu grzejnego rdzenia magnetycznego (jak na rys.5.11) poprawia parametry elektryczne nagrzewnicy. Rośnie sprawność, maleje jednostkowe zużycie energii (tab.5.7).

Jednak najważniejszą korzyścią z zastosowania rdzenia magnetycznego jest zasadnicze ograniczenie promieniowania pola elektromagnetycznego wokół wzbudnika. Jest to w przypadku

nagrzewnicy ze wzbudnikiem uniwersalnym szczególnie ważne, gdyż krótkie serie i częste zmiany asortymentu wymagają zwiększonej obecności obsługi.

Tablica 5.7

Parametry elektryczne nagrzewnicy z rdzeniem magnetycznym

		z rdzeniem	bez rdzenia
P_{n} kW		20.43	20.24
P _{ws} , kW		10.15	9.57
cosφ -		0.096	0.090
Net %		49.66	47.28
E_p kW	h/kg	0.179	0.209

Nagrzewanie wsadu stopniowanego

Przy nagrzewaniu przelotowym może się zdarzyć, że występuje konieczność jednoczesnego nagrzewania po kilka lub kilkanaście sztuk wsadów o różnych średnicach. Odpowiada to umieszczeniu w nagrzewnicy wsadu o stopniowanej średnicy (rys.5.14a). W tym przypadku otrzymane wyniki (tab.5.8) wskazują, że sprawność oraz współczynnik mocy osiągają wartości wyższe niż przy nagrzewaniu wsadu o średnicy zastępczej wynikającej z zachowania jednakowej masy wsadu.

Tablica 5.8

Parametry elektryczne nagrzewnicy ze wsoch m stopniowanym

_		niestopniowany*	stopniowany
P _n ,	kW	17.05	18.49
P _{ws} ,	kW	7.38	8.38
cosφ		0.082	0.086
neb	%	43.26	45.34
E_{ρ}	kWh/kg	0.238	0.235

Dla srednicy równoważnej d₂ = 0.015m wynikającej z jednakowej masy

Nierównomierność temperatury wsadu jest znaczna (rys.5.14b), a więc taki sposób nagrzewania jest możliwy w przypadku umieszczenia wsadu przed przeróbką w komorze wyrównawczej.

Inny materiał wsadu

Zmiana asortymentu wiąże się niekiedy ze zmianą gatunku lub czasem nawet materiału wsadowego. W tablicy 5.9 zestawiono wyniki symulacji nagrzewania wsadów wykonanych z dwóch gatunków mosiądzu Ms58 i Ms63 o jednakowych wymiarach. Zmiana właściwości fizycznych wpływa na uzyskane wyniki, chociaż nie ma tu większych wątpliwości co do możliwości wykorzystania w tym przypadku wzbudnika uniwersalnego.



Rvs.5.14. Nagrzewanie wsadu stopniowanego: (a) wymiary, (b) rozkład temperatury. Fig.5.14. Heating of the stepped charge: (a) size, (b) temperature distribution

Tablica 5.9

Parametry elektryczne nagrzewnicy przy różnych gatunkach wsadu

6 3	GAL N	Ms58	Ms63
<i>P</i> _{<i>n</i>} ,	kW	18.60	19.48
P _{ws} ,	kW	7.84	8.74
cosφ,	-	0.08	0.086
net	%	42.13	44.84
<i>E</i> .,	kWh/kg	0.189	0.252

5.2.3. Nagrzewanie końców wsadów

Proces zaostrzania końców wsadu na gorąco przy ciągnieniu wymaga nagrzania krótkiego odcinka wsadu. Nie ma tu szczególnych wymagań związanych z dużą równomiernością temperatury nagrzewanej końcówki, natomiast nagrzewanie powinno odbywać się ze stosunkowo dużą szybkością [66]. Metodą symulacji komputerowej z użyciem pakietu Flux2D na podstawie modelu (rozdz. 4) przebadano układ grzejny (rys.5.15), przy czym w kolejnych wariantach obliczeń analizowano wpływ następujących elementów geometrii nagrzewnicy oraz parametrów zasilania:

- sprawności nagrzewnicy w układzie ze wzbudnikiem zewnętrznym i wewnętrznym,
- kształtu przewodu wzbudnika (stosunku h/s) na sprawność elektryczną,
- stopnia wsunięcia ζ wsadu do wzbudnika,
- grubości ścianki rury ⊿ na przebieg procesu nagrzewania,
- częstotliwości f prądu zasilającego na sprawność procesu z zachowaniem optymalnego stosunku grubości przewodu nawojowego g do głębokości wnikania pola elektromagnetycznego δ,
- rdzenia magnetycznego na przebieg procesu nagrzewania.



Rys.5.15. Układ grzejny nagrzewnicy do nagrzewania końców rur:

(a) ze wzbudnikiem zewnętrznym, (b) ze wzbudnikiem wewnętrznym

Fig.5.15. The heating system used for the pipe tips' heating: (a) with the outer inductor, (b) with the inner inductor

Badany układ grzejny stanowią: wsad rurowy stalowy (właściwości fizyczne zestawiono w załączniku) oraz wzbudnik 5-zwojowy, wykonany z rurki miedzianej o wymiarach $h \times s$ (rys.5.16), przy czym h, s = 12 + 18 mm, g = 1, 2, 3.5, 9, 15 mm, zaś $\chi = 1, 2, 3$ mm. Wymiary oraz parametry zasilania zestawiono w tablicy 5.10.

Wymiary układu grzejnego i parametry zasilania

WYMIARY UKLADU G	RZEJ	NEGO		
Średnica wewnętrzna wsadu	d _{2w} ,	m	0.28÷0	.2956
Średnica zewnętrzna wsadu	d ₂₌ ,	m	0.	3
Długość wsadu	l ₂ ,	m	1	
Średnica wewnętrzna wzbudnika zewnętrznego	diwe	m	0.34	
Średnica zewnętrzna wzbudnika wewnętrznego	disw	m	0.2	24
Długość wzbudnika	$l_{I_{\star}}$	m	0.068-	-0.098
PARAMETRY ZAS	ILANI	A		
Napięcie	U,	v	100	50
Częstotliwość	f,	kHz	1	0.05
			2.5	0.15

Nagrzewanie wzbudnikiem zewnętrznym i wewnętrznym

W celu porównania obu sposobów nagrzewania założono te same parametry zasilania (moc, częstotliwość) oraz podobną geometrię (ta sama liczba zwojów oraz odległość od wsadu).



Rys.5.16. Przewód wzbudnika: s - szerokość, h - wysokość, g - optymalna grubość, χ - grubość ścianki dla wody chłodzącej
Fig. 5.16. The inductor's lead: s - width, h - height, g - optimum wire thickness, χ - thickness of the wall for cooling water

Wzbudnik wewnętrzny ma mniejszą impedancję ze względu na mniejszą średnicę. Dlatego też porównanie wykonano dla praktycznie tych samych mocy zasilania, tzn. przy różnych napięciach zasilania, mianowicie wzbudnik zewnętrzny zasilano napięciem 100 V i 50 V, natomiast

Tablica 5.10

wewnętrzny napięciem 85 V. Wyniki obliczeń parametrów elektrycznych (dla stanu zimnego) przedstawiono w tablicy 5.11.

Tablica 5.11

Parametry elektryczne nagrzewania w układzie ze wzbudnikiem wewnętrznym i zewnętrznym

	1	Wzbudnik wewnętrzny	Wzbudnik zewnętrzny
Sprawność elektryczna	net %	88.12	91.43
Współczynnik mocy	cosφ-	0.31	0.43
Moc wydzielona	P _{ws} kW	30.525	32.020
Moc dostarczona	P_n kW	34.637	34.767

W trakcie nagrzewania moc dostarczana ze źródła oraz wydzielona we wsadzie zmienia się znacznie (rys. 5.17), natomiast sprawność elektryczna i współczynnik mocy zmieniają się w niewielkim stopniu (poniżej 2%). Analiza tablicy 5.11 prowadzi do wniosku, że korzystniejsze jest nagrzewanie wzbudnikiem zewnętrznym, gdyż nagrzewanie odbywa się zarówno z większą



Rys. 5.17. Zmiany mocy w trakcie nagrzewania Fig. 5.17. Active power change during heating

sprawnością, jak i z wyższym współczynnikiem mocy. Za takim sposobem nagrzewania przemawiają dodatkowo następujące argumenty: większa uniwersalność - wzbudnik może być wykorzystany zarówno do nagrzewania rur, jak i prętów o zbliżonych średnicach; łatwiejszy dobór zasilania - w przypadku nagrzewania końców wsadów mamy do czynienia ze wzbudnikami krótkimi o małej liczbie zwojów. Lepiej jest wtedy pracować przy niższych prądach i wyższych napięciach. Jedynym argumentem przemawiającym za nagrzewaniem od wewnątrz jest niższy

koszt wykonania wzbudnika, wynikający z mniejszych gabarytów. Oczywiście parametry elektryczne nie są decydującym czynnikiem o wyborze sposobu nagrzewania. Na rys. 5.18 przedstawiono rozkłady temperatury w przekroju poprzecznym końca rury przy obu sposobach nagrzewania. Jednak nie widać tu istotnych różnic, preferujących jeden z wariantów nagrzewania.



Rys. 5.18. Rozkład temperatury w przekroju poprzecznym końca nagrzewanej rury:

 (a) - wzbudnikiem zewnętrznym, (b) - wzbudnikiem wewnętrznym

 Fig. 5.18. Temperature distribution in the cross section of the of heated pipe's tip:

 (a) - with the outer inductor, (b) - with the inner inductor

Kształt przewodu wzbudnika

Badanie wpływu kształtu wzbudnika na sprawność ma sens jedynie dla rurki o przekroju prostokątnym (rys.5.16), ale nawet w tym przypadku możliwości są ograniczone. Porównywalne są jedynie wzbudniki o tej samej długości l_i i liczbie zwojów, natomiast minimalna szerokość przewodu musi być określona z warunków chłodzenia. Dlatego obliczenia wykonano jedynie dla 3 różnych stosunków wysokości przewodu do jego szerokości h/s przy optymalnej grubości przewodu $g = 1,5\delta_{Cu}$ i różnych ściankach $\chi = 2$ mm oraz 1 mm (wartości oznaczone *) i częstotliwości 2500 Hz. Wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 5.12.

Uzyskane wyniki wskazują, że stopień wsunięcia wsadu zasadniczo wpływa na proces nagrzewania. Przy $\xi/d_{2z} > 0.1$ występuje niedogrzanie końcówki wsadu (rys. 5.19c), natomiast przy $\xi/d_{2z} < 0$ występuje znaczne zmniejszenie strefy grzania (przy $\xi/d_{2z} = -0.1$ o połowę), a także zmniejszenie sprawności i współczynnika mocy. Jednocześnie w istotny sposób maleje moc wydzielona we wsadzie.



- Rys. 5.19. Rozkłady temperatury w nagrzewanych końcach rur przy różnym stopniu wsunięcia do wzbudnika; $a \zeta/d_{2z} = 0, b \zeta/d_{2z} = 0.1, c \zeta/d_{2z} = 0.2, d \zeta/d_{2z} = -0.1$
- Fig. 5.19. Temperature distribution in the heated tips of pipes for different degree of insertion into the inductor; $a \xi/d_{2z} = 0$, $b \xi/d_{2z} = 0.1$, $c \xi/d_{2z} = 0.2$, $d \xi/d_{2z} = -0.1$

Grubość ścianek rury

Obliczenia wykonano dla 3 różnych grubości ścianek nagrzewanej rury $\Delta = 2.2$ mm, 5 mm, 10 mm, przy częstotliwości prądu zasilającego 2500 Hz, a więc stosunek grubości do głębokości wnikania w stanie zimnym wynosił odpowiednio $\Delta/\delta = 22$, 50, 100. W tablicy 5.14 zestawiono wyniki uzyskanych parametrów elektrycznych.

52

Tablica 5.12

Wpływ kształtu przewodu na parametry elektryczne nagrzewnicy

Wielkość	Wysok	Wysokość przewodu $h = 18 \text{ mm}$				
Stosunek	h/s,	-	0.67	1.0	1.5	
Sprawność elektryczna	$\eta_{\rm cl},$	%	94.67	94.4	94.29/93.58*	
Współczynnik mocy	cosφ,	-	0.535	0.547	0.553/0.556*	
Moc wydzielona we wsadzie	$P_{\rm ws}$,	kW	- 47.7	47.2	46.6/46.7*	
Wielkość			Wysokość przewodu $h = 12 \text{ mm}$			
Stosunek	h∕s,	-	0.67	1.0	1.5	
Sprawność elektryczna	$\eta_{\rm el},$	%	91.43	91.4	91.8	
Współczynnik mocy	cosφ,	-	0.430	0.432	0.436	
Moc wydzielona we wsadzie	$P_{\rm ws}$,	kW	29.27	29.3	25.4	

Wskazują one, że zmiana stosunku h/s w możliwym zakresie zmian. przy stałej długości wzbudnika, w niewielkim stopniu wpływa na podstawowe parametry elektryczne, natomiast wpływ zmiany długości jest wyraźny. Rosną sprawność oraz współczynnik mocy, jednocześnie wydłuża się strefa, w której następuje nagrzewanie.

Stopień wsunięcia wsadu do wzbudnika

Badano wpływ stopnia wsunięcia wsadu do wzbudnika na efektywność procesu nagrzewania. Stopień wsunięcia wsadu ζ określono jako stosunek odległości początku wzbudnika i wsadu do średnicy wsadu ξ/d_{2z} . Obliczenia wykonano dla 4 różnych wartości $\xi/d_{2z} = 0, 0.1, 0.2$ i - 0.1, tzn. gdy wzbudnik wystaje poza wsad i częstotliwości 2500 Hz. Rozkłady temperatur przy takich stopniach wsunięcia pokazano na rys. 5.19, natomiast parametry elektryczne układu grzejnego zestawiono w tab. 5.13.

Tablica 5.13

Wpływ stopnia wsunięcia wsadu do wzbudnika na parametry nagrzewnicy

Stopień wsunięcia wsadu	$\zeta = \xi/d_2$	-	0	0.1	0.2	- 0.1
Sprawność elektryczna	$\eta_{\rm el},$	%	91.43	89.6	89.45	87.55
Współczynnik mocy	cosφ,	-	0.43	0.39	0.39	0.29
Moc wydzielona we wsadzie	P _{ws} ,	kW	30,52	35.41	35.6	22.1

Rdzeń magnetyczny

Wpływ rdzenia magnetycznego na proces nagrzewania jest korzystny zarówno ze względu na poprawę efektywności procesu nagrzewania (tab.5.16), jak i na zasadnicze (kilkukrotne) zmniejszenie promieniowania elektromagnetycznego wokół wzbudnika. W przypadku wzbudnika wewnętrznego rdzeń (wewnętrzny) nie wpływa tak istotnie na zmniejszenie promieniowania elektromagnetycznego. Aby uzyskać znaczący efekt, należy zastosować rdzeń na zewnątrz rury (zewnętrzny). Obliczenia wykonano dla częstotliwości f = 2500 Hz.

Tablica 5.16

Wpływ rdzenia magnetycznego na parametry nagrzewnicy										
		bez rdzenia zewnętrznego	z rdzeniem zewnętrznym	bez rdzenia wewnętrznego	z rdzeniem wewnętrznym					
P "	kW	23.68	20.39	24.15	18.11					
Pwr	kW	21.77	19	21.33	17.16					
cosq	-	0.372	0.44 '	0.263	0.479					
η _{ch}	%	91.95	93.22	86.99	94.78					

5.3. Koszty inwestycyjne i eksploatacyjne

Na koszt budowy nagrzewnicy indukcyjnej składają się następujące ważniejsze elementy [46]: (5.16) $K_{k} = K_{tr} + K_{wr} + K_{un} + K_{k} + K_{d},$

gdzie:

- koszt wykonania toru zasilającego (źródło zasilania, transformator dopasowujący, K .- bateria kondensatorów, układ symetryzacji, tor wielkoprądowy),
- koszt wykonania wzbudnika (przewód nawojowy, materiały elektroizolacyjne, K ... termoizolacyjne i ogniotrwałe, rdzenie magnetyczne itp.),
- koszt urządzeń pomocniczych (sterowania, chłodzenia, podawania wsadu, $K_{\mu\rho}$ pomiarowych itp.),
- koszt konstrukcji mechanicznych, K_k -
- koszty dodatkowe. K_d -

Procentowy udział poszczególnych elementów nagrzewnicy w całkowitym koszcie dla różnych typów nagrzewnic zestawiono w tablicach 5.17 i 5.18.

Koszt wzbudnika (wraz z kompletem zapasowym) wynosi od 10 - 25% kosztów całej nagrzewnicy. Oczywiście, wraz z liczbą warstw rosną koszty budowy wzbudnika (materiały, robocizna). W tablicy 5.19 zestawiono wzrost ciężaru uzwojeń wielowarstwowych w stosunku

Zmiana grubości ściany rury wpływa nieznacznie na parametry elektryczne. Można zaobserwować jedynie wyraźny spadek mocy wydzielonej we wsadzie przy zmniejszaniu grubości ściany rury.

Tablica 5.14

Tablica 5.15

Wpływ grubości	ścianki	rury na po	arametry nag	grzewnicy	
Grubość nagrzewanej rury	₫,	mm	2.2	5	10
Sprawność elektryczna	$\eta_{\rm cl},$	%	89.21	91.47	91.43
Współczynnik mocy	cosφ,		0.34	0.42	0.43
Moc wydzielona we wsadzie	P_{ws}	kW	21.56	28.93	30.53

Częstotliwość prądu zasilającego

Obliczenia wykonano dla 4 częstotliwości: f = 50, 150, 1000 i 2500 Hz, przy czym we wszystkich przypadkach utrzymano jednakową geometrię układu grzejnego, z wyjątkiem zachowania optymalnej dla danej częstotliwości grubości przewodu wzbudnika $g = 1.5\delta_{Cu}$. Wyniki obliczeń parametrów elektrycznych zestawiono w tablicy 5.15. Przy takiej geometrii układu grzejnego nagrzewanie końców rur powinno się odbywać przy zasilaniu wzbudnika prądem średniej częstotliwości 2500 lub 1000 Hz, gdyż przy częstotliwości sieciowej 50 Hz i potrójnej 150 Hz sprawność elektryczna procesu oraz współczynnik mocy osiągają wartości zbyt niskie. Dla wzbudnika wewnętrznego najwyższe sprawności osiąga się przy częstotliwości 10 kHz, jednak są one niższe niż w przypadku wzbudnika zewnętrznego. Dla innych średnic rur, dla których nagrzewanie końców odbywa się przed zaostrzaniem, należałoby przeprowadzić podobne obliczenia w celu sformułowania bardziej ogólnych wniosków.

ale of the second states of the second s	W	zbudnik	zewnętrzny		a harden	
Częstotliwość prądu zasilania	f,	Hz	50	150	1000	2500
Sprawność elektryczna	$\eta_{\rm el}$,	%	63.57	80.36	91.05	91.43
Współczynnik mocy	cosφ,	-	0.21	0.25	0.29	0.43
	Wz	budnik	wewnętrzny			
Częstotliwość prądu zasilania	<i>f</i> ,	Hz	500	1000	2500	10000
Sprawność elektryczna	$\eta_{\rm el},$	%	71.32	77.62	86.92	90.55
Współczynnik mocy	cosφ		0.271	0.244	0.263	0.54

do jednowarstwowych, a na rys. 5.20 przedstawiono zmiany kosztów wykonania wzbudników wielowarstwowych w stosunku do jednowarstwowych.

O koszcie eksploatacji Keks nagrzewnicy indukcyjnej decydują przede wszystkim następujące elementy:

koszt energii elektrycznej zużywanej w procesie produkcyjnym, K_E -

koszt obsługi nagrzewnicy, K_{o} -

K. koszt remontów,

inne koszty związane np. z zużyciem wody chłodzącej, sprężonego powietrza itp., Kde przy czym

 $K_F = k_F E$,

gdzie:

- średni koszt energii elektrycznej, w zł/kWh, k_E

- zużycie energii elektrycznej, w kWh. Ε

Tablica 5.17

(5.17)

Koszty budowy nagrzewnic skrośnych średniej częstotliwości do nagrzewania wsadów stalowych w rozbiciu na podstawowe elementy"

	Procentowy udział poszczególnych	Wsady stalowe					
Lp.	elementow nagrzewnicy w całkowitym koszcie	100 kW 8-10 kHz 200 kg	150 kW 3-4 kHz 350 kg	350 kW 2-3 kHz 900 kg	800 kW 1-2 kHz 2000 kg		
1.	Generator	50	45	36	30		
2.	Bateria kondensatorów (z szafą)	6	7	10	10		
3.	Wzbudniki (4 szt.)	10	12	19	25		
4.	Podajniki	13	14	16	16		
5.	Sterowanie i aparatura kontrolno- pomiarowa	15	15	12	8		
6.	Stacja chłodzenia wodnego	6	7	7	11		
7.	Dodatkowy podajnik orientujący wsad do automatyzacji procesu*	10*	10*	10*	10*		
8.	Transformator dopasowujący*	10*	10*	10*	13*		

* Urządzenia dodatkowe - jeśli występują, koszty nagrzewnicy zostają powiększone dodatkowo.

Wielkość K_{eks} można odnieść do masy wsadu nagrzewanego w nagrzewnicy indukcyjnej, np. w czasie rocznej eksploatacji m_{wR}

$$K_{jeks} = \frac{K_{eks}}{m_{wR}} = k_E p_j + \frac{1}{m_{wR}} (K_o + K_r + K_{de}) = k_E \frac{l_w}{\eta_{l2} \eta_{el} \eta_c} + \frac{1}{m_{wR}} (K_o + K_r + K_{de}), \quad (5.18)$$

gdzie:

 P_i

i.,

- średnie jednostkowe zużycie energii elektrycznej,

- entalpia właściwa nagrzewanego wsadu,

 η_{e} η_{el} η_{c} - sprawność odpowiednio toru zasilającego, elektryczna i cieplna nagrzewnicy.

Tablica 5.18

Koszty budowy nagrzewnicy skrośnej częstotliwości sieciowej do nagrzewania wsadów z metali nieżelaznych w rozbiciu na podstawowe elementy¹⁾

Lp.	Procentowy udział poszczególnych elementów nagrzewnicy w całkowitym koszcie	800 kW, 50 Hz 3500 kg (Ms63)
1.	Transformator regulacyjny	16
2.	Układ zasilania (w tym kondensatory)	24 (8)
3.	Wzbudniki (4 szt.)*	16*
4.	Podajniki	28
5.	Układ sterowania	8
6.	Stacja chłodzenia wodnego*	8*
7.	Komora wyrównawcza z dodatkowym podajnikiem**	25**

wzbudników wzrastają o 6%, natomiast koszty stacji chłodzenia wodnego maleją o 2 %.

Urządzenia dodatkowe - jeśli występują, koszty nagrzewnicy zostają powiększone dodatkowo. ...

Tablica 5.19

Zmiany ciężaru uzwojeń wielowarstwowych w stosunku do jednowarstwowych (grubości optymalne)¹⁾

Liczba Wzrost ciężaru uzwojenia warstw (średnica wsadu 0,2 m)		Typ uzwojenia
2	1.59	1.
3	2.08	Grubości warstw
5	2.93	ZIOZINCOwane

Dane uzyskane od producenta nagrzewnic indukcyjnych



Rys.5.20. Koszt budowy wzbudnika wielowarstwowego \underline{K}_{wz} odniesiony do wzbudnika jednowarstwowego

Fig. 5.20. The building cost of the multilayer inductor K. in relation to the single-layer one

Ponieważ zastosowanie wzbudników wielowarstwowych umożliwia wzrost sprawności elektrycznej nagrzewnicy, koszty eksploatacji maleją (rys.5.21) pomimo zwiększającego się udziału kosztów obsługi i remontów wraz z rosnącą liczbą warstw wzbudnika. Ostatecznym kryterium wyboru liczby warstw wzbudnika wielowarstwowego muszą być względy ekonomiczne. Trzeba znaleźć dla projektowanej nagrzewnicy o określonej mocy i poziomie produkcji optimum pomiędzy wzrastającymi kosztami budowy i malejącymi kosztami eksploatacyjnymi.



- Rys.5.21. Koszt eksploatacji wzbudnika wielowarstwowego \underline{K}_{eks} odniesiony do wzbudnika jednowarstwowego
- Fig. 5.21. The running cost of the multilayer inductor K_{eks} in relation to the single-layer one

6. DOŚWIADCZALNA WERYFIKACJA UZYSKANYCH WYNIKÓW

Weryfikacji uzyskanych wyników obliczeniowych dokonano na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz w warunkach przemysłowych:

- na laboratoryjnym stanowisku nagrzewania skrośnego częstotliwością sieciową, wyposażonym we wzbudnik wielowarstwowy,
- na laboratoryjnym stanowisku nagrzewania skrośnego częstotliwością średnią 2-5 kHz,
- na stanowisku produkcyjnym nagrzewania skrośnego wsadów do przeróbki plastycznej w jednym z krajowych zakładów przetwórczych metali nieżelaznych.

6.1. Opis badań na stanowisku laboratoryjnym do nagrzewania skrośnego

6.1.1. Opis stanowiska

Stanowisko laboratoryjne do badania nagrzewnicy indukcyjnej ze wzbudnikiem wielowarstwowym (rys. 6.1) składa się z następujących elementów: 1 - transformatora zasilającego 380/40-120 V, 2 - baterii kondensatorów, 3 - wzbudnika, 4 - wsadów, 5 - układu pomiarowego wyposażonego w komputerowy system zbierania danych (rys. 6.2).



- Rys. 6.1. Stanowisko laboratoryjne badania nagrzewnicy indukcyjnej sieciowej częstotliwości ze wzbudnikiem wielowarstwowym: 1 - transformator, 2 - bateria kondensatorów, 3 - wzbudnik, 4 - wsad, 5 - układ pomiarowy
- Fig. 6.1. The laboratory's stand for testing of the main frequency induction heater with a multilayer inductor: 1 transformer, 2 condenser battery, 3 inductor, 4 charge, 5 measuring system

Wzbudnik nagrzewnicy składa się z trzech warstw odpowiednio: warstwa zewnętrzna 12zwojowa o długości 0.345 m i średnicy 0.31 m, wykonana z profilu 25×38 mm z otworem chłodzącym o średnicy 21 mm, środkowa 21-zwojowa o długości 0.325 m i średnicy 0.27 m, wykonana z profilu 12×8 mm z przyspawaną rurką chłodzącą 8×4×1 mm i wewnętrzna 22zwojowa o długości 0.325 m i średnicy 0.235 m, wykonana z profilu 11.5×5.5 mm z przyspawaną rurką chłodzącą taką samą jak w warstwie środkowej. Każda z warstw posiada indywidualne wyprowadzenia końcówek, a więc nagrzewnica może pracować również jako dwui jednowarstwowa. Do badań przygotowano wsady walcowe o różnych średnicach, wykonane ze stopów aluminium, mosiądzu i stali. Układ pomiarowy nagrzewnicy stanowi komputerowy system zbierania danych, w skład którego wchodzą następujące elementy: komputer (5) wraz z kartą pomiarową (4), kasety pomiarowe (3) z odpowiednimi przetwornikami wielkości elektrycznych oraz temperatury (rys. 6.2). W różnych miejscach na powierzchni wsadu umieszczono termoelementy.



- Rys.6.2. Układ pomiarowy: 1 wzbudnik, 2 wsad, 3 kaseta pomiarowa, 4 karta pomiarowa, 5 komputer
- Fig. 6.2. The measuring system: 1 inductor, 2 charge, 3 measuring cassette, 4 measuring card, 5 computer

6.1.2. Wyniki

Nagrzewano wsad mosiężny Ms58 o długości 0.246 m i średnicy 0.196 m, o właściwościach fizycznych zestawionych w tablicy 5.2 oraz wsady wykonane ze stopów aluminium, dokonując pomiaru podstawowych wielkości elektrycznych oraz temperatury wsadu. Uzyskane wyniki posłużyły do weryfikacji obliczeń uzyskanych metodą symulacji komputerowej opartej na modelu przedstawionym w p. 4 i 5. Sprawność pomiarową nagrzewnicy określono jako stosunek entalpii

właściwej wsadu przy nagrzewaniu od temperatury otoczenia 20°C do średniej temperatury w końcu nagrzewania. W tablicy 6.1 i 6.2 przedstawiono wyniki pomiarów oraz porównanie z wynikami obliczeń, natomiast na rys. 6.3 porównano przebiegi temperatury w czasie nagrzewania na powierzchni czołowej wsadu mosiężnego, nagrzewanego do temperatury końcowej 600°C, w odległości 20 mm od powierzchni bocznej.

Tablica 6.1

Parametry elektryczne nagrzewnicy sieciowej trójwarstwowej*

		-					
Wsad	U, V	I, A		P, 1	kW	cos q	
and the second		Pomiar	Oblicz.	Pomiar	Oblicz.	Pomiar	Oblicz.
Ms58	60	626	630	10.705	10.584	0.285	0.281
AFII	60	672	681	11.162	11.440	0.275	0.28
CIAL 1	00						

* Wartości średnie

Tablica 6.2

Jednostkowe zużycie energii oraz sprawność nagrzewnicy sieciowej trójwarstwowej

Wsad m		Ε,	E_i ,	l _w ,	η, %		
W Baa	kg	kW∙h	kW·h·kg ⁻¹	kW·h·kg ⁻¹	Pomiar	Oblicz.	
Ms58	65.12	10.105	0.1552	0.07325	47.20	45.86	
Ak11	19.76	7.813	0.3954	0.16953	42.87	41.16	



Rys.6.3. Zmiany temperatury w trakcie nagrzewania w wybranym punkcie wsadu Fig.6.3. The changes of temperature at the selected charge's point during heating

6.1.3. Weryfikacja obliczeń symulacyjnych

Przedstawione wyniki pozwalają na stwierdzenie, że właściwie przeprowadzona symulacja, ze starannie dobranymi właściwościami fizycznymi materiałów, może być cennym narzędziem w analizie pracy oraz projektowaniu nagrzewnic indukcyjnych. Pomimo złożonej geometrii nagrzewnicy z uzwojeniem trójwarstwowym wystąpiła bardzo dobra zbieżność wyników wielkości elektrycznych (< 5%) oraz temperatury (maksymalne różnice temperatury obliczonej i zmierzonej nie przekroczyły 10°C). W przypadku weryfikacji temperatury należy zwrócić szczególną uwagę na dobór wartości parametrów materiałowych wsadu, zwłaszcza w przypadku materiałów stopowych, gdyż spotykane w literaturze dane materiałowe, takie jak: przewodność cieplna, ciepło właściwe, współczynnik wymiany ciepła przez konwekcję, czy wreszcie współczynnik emisyjności podawane są w dość szerokim przedziale i można tu uzyskać bardzo różne wyniki.

6.2. Opis badań na stanowisku laboratoryjnym do nagrzewania częstotliwością średnią

6.2.1. Opis stanowiska

Stanowisko laboratoryjne do badania nagrzewnicy indukcyjnej średniej częstotliwości składa się z następujących elementów: TPCz - generatora (1+5 kHz, 100 kW), C - baterii kondensatorów, Tr - transformatora dopasowującego, 1 - wzbudnika, 2 - wsadów, 3,4,5 - układu pomiarowego, stanowiącego komputerowy system zbierania danych (rys. 6.4).



- Rys.6.4. Układ pomiarowy: 1 wzbudnik, 2 wsad, 3 kaseta pomiarowa, 4 karta pomiarowa, 5 komputer
- Fig.6.4. The measuring system: 1 inductor, 2 charge, 3 measuring cassette, 4 measuring card, 5 computer

Wzbudnik nagrzewnicy (rys. 6.5) o długości 0.19 m i średnicy 0.055 m składa się z 35 zwojów wykonanych z profilu 12×8 mm z przyspawaną rurką chłodzącą 8×4×1 mm.



Rys. 6.5. Wzbudnik nagrzewnicy średniej częstotliwości Fig. 6.5. The medium frequency heater's inductor

6.2.2. Wyniki

Nagrzewano pręty: stalowy (stal węglowa) o właściwościach fizycznych pokazanych na rys. D.2.1 i mosiężny, dokonując pomiaru podstawowych wielkości elektrycznych oraz temperatury wsadu. Również w tym przypadku dokonano weryfikacji doświadczalnej obliczeń (tab. 6.3 i 6.4 oraz rys. 6.6). Sprawność pomiarową nagrzewnicy określono analogicznie jak w p. 6.1.2, przy czym pręty nagrzewano do średniej temperatury końcowej w przypadku stali równej 1000°C, zaś w przypadku mosiądzu 750°C. Porównania przebiegów temperatury dla wsadu stalowego (rys.6.6) dokonano dla punktu na osi wsadu w odległości 5 mm od powierzchni czołowej. Także w przypadku nagrzewania prądami częstotliwości średniej uzyskano zadowalającą zbieżność wyników.

Tablica 6.3

Parametry elektryczne nagrzewnicy średniej częstotliwości*

Wsad	f, kHz	U, V	I, A		<i>P</i> ,1	kW	co.	sφ
			Pomiar	Oblicz.	Pomiar	Oblicz.	Pomiar	Oblicz.
Stal	3.50	198.5	501	508	16.96	17.35	0.1705	0.172
Mosiądz	4.30	201.5	484	502	9.362	10.62	0.096	0.105

* Wartości średnie

Tablica 6.4

Jednostkowe zużycie energii oraz sprawność nagrzewnicy średniej częstotliwości

64

Wsad	m _w , kg	<i>E</i> , kW∙h	E _j , kW·h·kg ⁻¹	kW·h·kg ⁻¹	η, %	
					Pomiar	Oblicz.
Stal	1.0365	0.2685	0.2594	0.176	67.84	68.7
Mosiądz	1.827	0.1767	0.149	0.092	61.74	63.05



Rys. 6.6. Zmiany temperatury w trakcie nagrzewania w wybranym punkcie wsadu Fig. 6.6. The changes of temperature at the selected charge's point during heating

6.3 Próby w warunkach przemysłowych

Oprócz badań w warunkach laboratoryjnych przeprowadzono badania przemysłowe. Badano nagrzewnice częstotliwości sieciowej do nagrzewania skrośnego wsadów do przeróbki plastycznej w jednym z zakładów przetwórczych metali nieżelaznych [43] oraz nagrzewnice średniej częstotliwości do nagrzewania prętów mosiężnych [65].

6.3.1. Opis stanowiska i wyniki badań nagrzewnic sieciowych ze wzbudnikami wielowarstwowymi

Badaniom poddano prototypy nagrzewnic ze wzbudnikami dwu- i trójwarstwowymi, następnie uzyskane wyniki porównano z parametrami nagrzewnicy o tradycyjnym jednowarstwowym uzwojeniu [43]. Próby prowadzono na tym samym stanowisku roboczym zmieniając jedynie typ wzbudnika. Wzbudnik II (rys. 6.7) składał się z dwu warstw: zewnętrznej, wykonanej z profilu 16×23 mm z otworem chłodzącym, mającej 60 zwojów oraz średnicę 0.27 m i wewnętrznej z profilu 25×8 mm z otworem chłodzącym 6×6 mm, 40 zwojów o średnicy 0.25 m. Obydwie warstwy miały długość 1.08 m. Wzbudnik III składał się z trzech warstw: zewnętrznej, wykonanej z profilu 30×23 mm z otworem chłodzącym, 35 zwojów o średnicy 0.328 m i długości 1.085 m, środkowej - profil 40×7 mm z przyspawaną rurką chłodzącą, 25 zwojów o średnicy 0.287 m i długości 1.071 m i wewnętrznej - 25 zwojów, profil 40×5 mm, o średnicy 0.25 m i długości 1.071m. Wzbudnik tradycyjny I nawinięty z profilu 12×16×2 mm stanowił 82 zwoje o średnicy 0.27 m i długości 1.08 m.



Rys.6.7. Konstrukcja badanych wzbudników Fig.6.7. Tested inductors' construction

We wszystkich przypadkach nagrzewano stacjonarnie, w porównywalnych warunkach, wsady z mosiądzu E1 o średnicy 0.2 m i długości 0.65 m, do zbliżonej temperatury średniej. Pomiarów dokonano w układzie pomiarowym przedstawionym na rys. 6.8. W tablicy 6.5 przedstawiono ważniejsze parametry elektryczne (wartości uśrednione w całym cyklu nagrzewania). Pomiarów dokonano z użyciem komputerowego sytemu zbierania danych w odstępach jednosekundowych. Prąd *I* jest prądem skompensowanym, napięcie *U* mierzono na wzbudniku. Wyniki tych pomiarów umożliwiły obliczenie jednostkowego zużycia energii oraz sprawności nagrzewnic (tab. 6.6), analogicznie do p. 6.1.2 oraz 6.2.2. Obok w tej samej kolumnie zamieszczono wartość sprawności obliczonej metodą symulacji komputerowej dla istniejącej geometrii układu grzejnego.

Tablica 6.5

Parametry elektryczne nagrzewnicy						
Typ wzbudnika	U, V	I, A	P, kW	<i>E</i> , kW·h		
I - warstwowy	380.3	953.4	380.36	42.05		
II - warstwowy	387.9	710.5	284.0	20.75		
III - warstwowy	381.3	693.3	266.3	33.21		



- Rys. 6.8. Układ pomiarowy do badań przemysłowych: 1 wzbudnik, 2 wsad, 3 kaseta pomiarowa, 4 karta pomiarowa, 5 komputer, 6 pirometr optyczny
 Fig. 6.8. The measuring system for industrial tests: 1 inductor, 2 charge, 3 measuring
- cassette, 4 measuring card, 5 computer, 6 optical pyrometer

Stwierdzono dobrą zbieżność wyników pomiarowych i obliczeniowych; różnice wynosiły ok. 2%. Dla wzbudnika II i III zaobserwowano wyraźnie mniejsze wartości zużycia energii niż dla wzbudnika I. Także sprawność wzbudnika II jest o ok. 24 %, a wzbudnika III o ok. 29 % wyższa niż wzbudnika I. Przebieg prób oraz informacje uzyskane od użytkowników wskazują jednak na większą awaryjność wzbudników II i III w stosunku do tradycyjnych nagrzewnic ze wzbudnikami I.

T OTOWILL	ine spra	wnosci nag	rzewnic ze	wzbudnikami e	o różnej liczb	ie warstu	v
Тур	mwy	$\begin{array}{ c c c c c } T, & E, & E_{j}, \\ {}^{0}C & kW \cdot h & kW \cdot h \cdot kg^{-1} & kW \end{array}$	Е,	E_{j} ,	i	η, %	
wzoudnika	кg		kW·h·kg ⁻¹	Pomiar	Oblicz.		
I-warstwowy	251	722	42.05	0.1674	0.08904	53.1	55.4
II-warstwowy	251	446*	20.75	0.0827	0.054309	65.6	63.6
III-warstwowy	251	731	33.21	0.1323	0.090304	68.2	69.9

D'.

*) W trakcie pomiaru nastąpiła awaria układu chłodzenia wzbudnika, dlatego też wzbudnik nagrzano jedynie do tej temperatury średniej.

6.3.2. Badanie nagrzewnic średniej częstotliwości ze wzbudnikami uniwersalnymi

Badaniom poddano nagrzewnice indukcyjne średniej częstotliwości (3500 Hz) [65] do nagrzewania przelotowego mosiądzu, w jednym z zakładów produkcyjnych elementów armatury. Do badań przygotowano wsady o różnych średnicach ($d_2 = 0.034, 0.024, 0.022$ i 0.016 m), co pozwoliło na weryfikację doświadczalną nagrzewnicy ze wzbudnikami uniwersalnymi (p.5.2.2). Badania wykonano na dwóch nagrzewnicach o średnicach wzbudnika $d_1 = 0.067$ i 0.053 m, mierząc pirometrem optycznym temperaturę końcową wsadu na wyjściu z nagrzewnicy T_k oraz czas nagrzewania t. Ponadto zmierzono napięcie U, prąd wzbudnika I oraz moc dostarczoną do generatora P_{1^*} Sprawność nagrzewnicy określono jako stosunek entalpii do jednostkowego zużycia energii. W tablicy 6.7 przedstawiono wyniki doświadczalne parametrów elektrycznych dla średniej temperatury nagrzewania ok. 350°C oraz entalpii i jednostkowego zużycia energii dla temperatury końcowej. Porównanie wyników sprawności i jednostkowego zużycia energii dla obliczeń (p.5.2.2) i eksperymentu wskazuje na ich dobrą zbieżność (< 10 %). Uzyskano nieco niższe sprawności niż w innych przypadkach, co można wyjaśnić tym, że zostały one obliczone z mocy P_1 na wejściu do generatora, a więc zawierają moc strat generatora i toru zasilania.

Tablica 6.7

Wyniki doświadczalne nagrzewnicy średniej częstotliwości f = 3500 Hz

		Wzbi	udnik I $d_i = 0.$	Wzbudnik II $d_i = 0.053$ m		
<i>d</i> ₂ ,	m	0.034	0.024	0.016	0.022	0.016
U,	V	367	330	260	270	260
I,	A	1310	1105	839	919	836
P ₁ ,	kW	45	25.3	12.4	22.5	14.9
f,	kHz	3.5	3.4	3.35	3.35	3.2
<i>T</i> _{<i>k</i>} ,	°C	650	670	670	703	630
t,	S	67	72	89	64	55
i.,	kW·h·kg ⁻¹	0.08	0.082	0.082	0.086	0.077
<i>E</i> _{<i>j</i>} ,	kW·h·kg ⁻ⁱ	0.184	0.245	0.345	0.244	0.263
η,	%	43.47	33.46	23.76	37.45	29.27
E,*,	kW·h·kg ⁻¹	0.187	0.237	0.341	0.226	0.296
η_{e}^{*} ,	%	45.97	35.12	26.16	39.75	31.52

* Wartości obliczone

Tablica 6 6

66

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W pracy przedstawiono dwuwymiarową analizę procesu nagrzewania indukcyjnego, obejmującą sprzężone pola elektromagnetyczne i temperaturowe w układzie osiowosymetrycznym. Opracowane modele matematyczne i odpowiadające im algorytmy numeryczne umożliwiają modelowanie procesu nagrzewania w indukcyjnych nagrzewnicach skrośnych z uwzględnieniem nieliniowych, zmieniających się w czasie nagrzewania właściwości wsadu.

Zbudowane modele mogą stanowić efektywne narzędzie w pracach projektowych nad konstrukcją nagrzewnic o zmniejszonej energochłonności, przy zadanym kształcie pola temperatury w nagrzewanym wsadzie. Ponadto przeprowadzono analizę kosztów budowy i eksploatacji nagrzewnic, pozwalającą na podjęcie zasadnych ekonomicznie decyzji inwestycyjnych dla określonych procesów produkcyjnych.

Do najważniejszych zagadnień przedstawionych w pracy zaliczyć należy:

- Opracowanie dwuwymiarowych modeli obliczeniowych do analizy sprzężonych pól elektromagnetycznych i temperaturowych w układzie o symetrii osiowej, ze zmieniającymi się właściwościami materiałowymi wsadu w czasie procesu nagrzewania.
- Przygotowanie na podstawie opracowanych modeli własnych programów umożliwiających obliczanie parametrów elektrycznych i eksploatacyjnych nagrzewnic, wspomagających ich projektowanie.
- Przetestowanie przydatności programów profesjonalnych do zagadnień nagrzewania indukcyjnego oraz opracowanie własnych procedur rozszerzających możliwości obliczeniowe tych programów w zagadnieniach związanych z nagrzewaniem indukcyjnym.
- Zbadanie wpływu metody sprzęgnięcia pól na dokładność uzyskanych wyników modelowania procesu nagrzewania.
- Zbadanie możliwości ograniczenia zużycia energii w procesie nagrzewania poprzez zastosowanie wzbudników wielowarstwowych oraz dobór właściwej konstrukcji nagrzewnicy i parametrów zasilania.
- Zbadanie możliwości kształtowania pola temperatury we wsadzie, w tym również przy nagrzewaniu końców rur oraz możliwości zastosowania uniwersalnego wzbudnika.
- Przedstawienie analizy kosztów inwestycyjnych oraz eksploatacyjnych nagrzewnic indukcyjnych.
- Przedstawienie wyników badań laboratoryjnych i przemysłowych prototypów nagrzewnic o poprawionej konstrukcji, pozwalających jednocześnie zweryfikować zaproponowane modele.

Na podstawie przeprowadzonych w pracy analiz oraz uzyskanych wyników można sformułować następujące wnioski:

- Ze względu na bardzo duże moce współczesnych przemysłowych nagrzewnic indukcyjnych wskazane jest posługiwanie się metodą symulacji komputerowej w celu optymalizacji ich konstrukcji zamiast budowania kosztownych prototypów i poddawania ich badaniom. Znaczenia nabiera więc zbudowanie dobrych modeli obliczeniowych oraz zweryfikowanych programów wspomagających prace projektowe.
- Stosowanie prostych modeli, np. 1D, zapewniających uzyskanie wyników w krótkim czasie, zaleca się we wstępnej fazie projektowej. Złożone modele warto stosować w etapach końcowych w celu uściślenia analizy, której proste modele nie mogą uwzględnić, oraz optymalizacji konstrukcji nagrzewnicy.
- Modele w układzie 2D są przy obecnych możliwościach ogólnie dostępnej techniki komputerowej optymalnym narzędziem do analizy procesu nagrzewania w indukcyjnych nagrzewnicach skrośnych osiowosymetrycznych. Sprzężenie pól elektromagnetycznego i temperaturowego w układzie 3D jest teoretycznie możliwe, ale praktycznie trudne do wykonania ze względu na techniczne możliwości wykonania obliczeń.
- Jedynie pełne sprzężenie pól gwarantuje zadowalające z punktu widzenia dokładności odwzorowania przebiegu narastania temperatury w procesie nagrzewania indukcyjnego(<niż
- 5 % błędu). Stosowanie tzw. "pseudosprzężenia" wymaga pewnego doświadczenia w ustalaniu przedziałów czasowych, zwłaszcza przy nagrzewaniu wsadu ferromagnetycznego w okolicy punktu Curie. Sprzężenie lekkie może być stosowane w zasadzie tylko w układach liniowych, np. przy nagrzewaniu niskotemperaturowym.
- Przez zastosowanie wzbudników wielowarstwowych w nagrzewnicach sieciowej częstotliwości można znacznie zwiększyć sprawność elektryczną nagrzewnicy, a co za tym idzie zmniejszyć energochłonność procesu. Muszą być przy tym spełnione pewne wymagania dotyczące zachowania koniecznych warunków, związanych z grubością poszczególnych warstw uzwojenia. Problem doboru optymalnej liczby warstw musi być rozpatrywany łącznie z analizą kosztów budowy i eksploatacji nagrzewnicy.
- W przypadku krótkoseryjnej produkcji wielu asortymentów uzasadnienie ekonomiczne pod pewnymi warunkami ma wykorzystanie nagrzewnicy z uniwersalnym wzbudnikiem.
 Spełnione winny być niektóre wymagania związane z wymiarami i materiałem wsadu, częstotliwością prądu zasilającego, rdzeniami magnetycznymi.
- Przy nagrzewaniu końców rur korzystniejsze jest nagrzewanie wzbudnikiem zewnętrznym, wyższa jest wtedy sprawność oraz współczynnik mocy. Nagrzewany koniec rury powinien być umieszczony dość precyzyjnie we wzbudniku, aby zapobiec niedogrzaniu lub zmniejszeniu strefy grzania.

Przygotowane: metodyka obliczeń symulacyjnych, programy oraz wykonane i sformułowane wnioski umożliwiają uzyskanie założonego efektu techniczno-ekonomicznego przy

projektowaniu nagrzewnic indukcyjnych skrośnych, co zostało potwierdzone w badaniach weryfikacyjnych w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych. Tak więc postawiona teza została udowodniona.

W dalszych pracach związanych z nagrzewnicami indukcyjnymi należałoby:

- Uwzględnić inne zjawiska fizyczne, głównie termosprężyste i termopłastyczne oraz metalurgiczne.
- Opracować model optymalizacji procesu nagrzewania.
- Przedstawiony model uzupełnić analizą pól sprzężonych w układach trójwymiarowych.

DODATKI

D.1. Pole elektromagnetyczne w środowiskach ferromagnetycznych

Aproksymacja charakterystyki magnesowania za pomocą funkcji (4.11) wiąże się z wyborem odpowiedniego współczynnika krzywizny *a* (rys. D.1.1).



- Rys.D.1.1. Aproksymacja charakterystyki magnesowania dla różnych wartości współczynnika krzywizny a
- Fig. D.1.1. Approximation of magnetisation characteristics for different values of the curvature factor a

Spadek wartości przenikalności magnetycznej w pobliżu punktu Curie wyjaśnia rys. D.1.2.





W środowiskach ferromagnetycznych wielkości pola takie jak indukcja magnetyczna i natężenie pola magnetycznego są w rzeczywistości niesinusoidalne pomimo zasilania sinusoidalnego. Jedynym sensownym rozwiązaniem jest wtedy aproksymacja oparta na koncepcji równych energii. Związane to jest z obliczeniem z krzywej B(H) dla rozpatrywanego ferromagnetyka równoważnej krzywej, dla której wszystkie wartości używane jako zespolone (B, H, ...) są sinusoidalne. Tak więc w zagadnieniu elektromagnetycznym nieliniowym jedynie wielkości związane z energią są oczywiste (siły, moce, indukcyjności...). Pozostałe wielkości mogą być błędnie obliczone, zwłaszcza przy dużych nasyceniach. Krzywe równoważne $B_i(H_{eq})$ można obliczać w różny sposób. Wyjaśnienie problemu analizy zagadnienia elektromagnetycznego w środowisku ferromagnetycznym przy zasilaniu ze źródła napięciowego przedstawiono na rys. D.1.3. Odpowiada to sytuacji, w której przebieg indukcji magnetycznej jest sinusoidalny. Punkty krzywej równoważnej $B_i(H_{eq})$ są obliczane z początkowej $B_i(H_i)$, przy zachowaniu tej samej energii:

 $\int_{0}^{B} H(B) dB = const \quad (A = A')$





Przy zasilaniu prądowym natężenie pola ma przebieg sinusoidalny (rys.D.1.4). Punkty równoważnej krzywej $B_{eql}(H_l)$ oblicza się z początkowej $B_l(H_l)$ przy tej samej energii:





Rys.D.1.4. Sinusoidalny przebieg natężenia pola H Fig.D1.4. Sine wave H

D.2. Właściwości fizyczne stali

Symulację procesu nagrzewania końców rur (p.5.2.3) przeprowadzono dla stali St 35 o właściwościach fizycznych pokazanych na rys.D.2.1.



- Rys. D.2.1. Właściwości fizyczne stali St35: (a) $\mu = f(B)$, (b) $\gamma = f(T)$, (c) λ , $\rho c = f(T)$, (d) $\beta = f(T)$
- Fig. D.2.1. Physical characterics of steel St35: (a) $\mu = f(B)$, (b) $\gamma = f(T)$; (c) λ , $\rho c = f(T)$, (d) $\beta = f(T)$

D.3. Właściwości fizyczne rdzenia magnetycznego

Do obliczeń przyjęto rdzeń magnetyczny o charakterystyce magnesowania przedstawionej na rys. D.3.1 oraz konduktywności $\gamma = 0$ S/m.



Fig. D.3.1. Saturation curve B(H)

75

parampto spant specify remained the workshift of the

LITERATURA

- 1. Andree W., Mauwe H.W.: Inductive heating of thin sheet metal. Elektrowärme International, vol.50, No.2, August 1992, s. B160-B164.
- Andree W., Schulze D., Wang Z.: 3D Wirbelstromberechnung f
 ür die induktive Querfelderwärmung. Workshop Num. Feldberechnung in der Elektrowärme, Technical University of Ilmenau, Subdepartment of Electroheat, September 1993.
- 3. Andree W., Schulze D., Wang Z.: 3D Eddy current computation in the transverse Flux induction heating equipment. IEEE Trans. Magn., vol.30, No.5, September 1994.
- 4. Babat G.I.: Indukcionnyj nagriew mietałłow i jego promyszliennyje primienienija. Energija, Moskwa 1975.
- 5. Baker R.M.: Design and calculation of induction heating coils. AIEE Trans., No.76, 1957.
- Biddelcombe C.S., Heighway E.A., Simkin J., Trowbridge C.W.: Methods for eddy current computation in three dimensions. IEEE Trans. Magn., vol.MAG.18, March 1982, s. 492-497.
- Bielajew N.M., Rjadno A.A.: Mietody niestacjonarnoj tieploprowodnosti. Wysszaja Szkoła, Moskwa 1978.
- Bielajew N.M., Rjadno A.A.: Mietody tieorii tiepłoprowodnosti. T 1/2. Wysszaja Szkoła, Moskwa 1982.
- Bíró O., Preis K.: On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of three-dimensional eddy current. IEEE Trans. Mag., vol. 25, No. 4, July 1989, s. 3145-3159.
- Biro O., Preis K.: Finite element analysis of 3-D eddy current. IEEE Trans. Magn., vol.26, March 1990, s. 418-423.
- 11. Bodażkow W.A.: Indukcjonnyj nagriew trub. Maszinostrojenie, Leningrad 1969.
- 12. BogdanowW.N., Ryskin S.E., Szamow A.N.: Indukcjonnyj nagriew w kuzniecznom proizwodstwie. Maszinostrojenie, Moskwa Leningrad 1956.
- 13. Brokmeier R.H.: Induktives Schmelzen. BBC Ver., Mannheim 1966.
- 14. Buchholz H.: Elektrische und Magnetische Potentialfelder. Springer Ver., Berlin Göttingen -Heidelberg 1957.
- 15. Buchholz H.: Das Magnetfeld der Wirbelströme in einem elektrischen Induktionsofen und andere ableitbare Wirbelströmfelder. Arch. f. Elektrot., 6.H., 1958.

- Chari M.V.K., D'Angelo J., Palmo M.A., Sharma D.K.: Application of three-dimensional electromagnetic analysis methods to electrical machinery and devices. IEEE Trans. Energy Conversion, EC-1, 2, 151, 1986.
- 17. Chari M.V.K.: Finite element solution of the eddy current problem in magnetic structure. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-93,(1), 1974, s. 62-72.
- Coulomb J.L.: Finite model three-dimensional magnetic field computation. IEEE Trans. Magn., vol.17, No.6, November 1981, s. 3241-3246.
- 19. Davies J., Simpson P.G.: Induction heating handbook. McGraw Hill Book Co. (UK) Ltd., Maidenhead, Berkshire, England, 1979.
- Donskoj A.W.: On the theory of induction heating of ferromagnetic bodies. VII Cong. UIE, Warszawa 1972.
- 21. Dreher T., Meunier G.: 3D Modeling of electromagnets fed by alternating voltage sources. IEEE Trans. Magn. vol.29, No.2, March 1993.
- Emson C.R., Simkin J.: An optimal method for 3-D eddy currents. IEEE Trans. Magn., vol. Mag-19, November 1983, s. 2450-2452.
- 23. Emson C.R., Simkin J., Trowbridge C.W.: Futher developments in three dimensional eddy current analysis. IEEE Trans. Magn., vol. MAG-21, November 1985, s. 2231-2234.
- 24. Erdeleyi E.A., Fusch E.F.: Fields in electrical devices containing soft nonlinear materials. IEEE Trans. Magn., MAG-10, No.4, 1974, s. 1103-1108.
- 25. Fluerasu C., Galan N.: Eddy currents and the power converted into heat inside a very long cylindrical conductor placed in a.c. coil of finite lenght. Rev. Roum. Sci., t.II, No.2, 1966.
- 26. Flux2D v.7.20. User's Guide, Cedrat, Grenoble, 1996.
- 27. Guz E., Kącki E.: Pola temperatury w ciałach stałych. PWN, Warszawa 1967.
- 28. Hering M.: Termokinetyka dla elektryków. WNT, Warszawa, 1980.
- Iskierka S.: Analiza numeryczna procesu hartowania indukcyjnego z uwzględnieniem wzajemnych wpływów zjawisk elektrotermicznych, termicznych i mechanicznych. Wyd. Pol. Częstochowskiej nr 44, 1997.
- Kadzimierz K., Kurek K., Muras J., Sajdak Cz., Wieczorek T.: Zastosowanie indukcyjnego nagrzewania skrośnego w wybranych procesach technologicznych. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. s. "Hutnictwo" z.36, Gliwice 1991, s. 73-78.
- Kameari A.: Three dimensional current calculation using finite element method with A-V in conductor and Ω in vacuum. IEEE Trans. Magn., MAG-24, No.1, 1988.
- 32. Kącki E.: Termokinetyka. WNT, Warszawa 1967.
- Kershaw D.S.: The incomplete Cholesky-conjugate gradient method for the iterative solution of systems of linear equations. J.Comput. Phys., vol.26, 1978, s. 43-65.
- 34. Knoch-Kaźmierczak H., Kaźmierczak J.: Hartowanie indukcyjne. PWT, Warszawa 1959.
- Konrad A.: Integrodifferential finite element formulation of two-dimensional steady-state skin effect problems. IEEE Trans. Magn., vol.18, No.1, 1982, s. 284-292.

- 36. Konrad A.: The numerical solution of steady-state skin effect problems an integrodifferential approach. IEEE Trans. Magn., vol.17, No.1, 1981, s. 1148-1181.
- 37. Kowalenko A.D.: Izobrannyje trudy. Naukowa Dumka, Kijów 1976.
- Kurek K., Paździorek K., Sajdak Cz., Widera T., Zborowski A.: Poprawa sprawności energetycznej nagrzewnic indukcyjnych sieciowej częstotliwości do metali nieżelaznych. Gospodarka Paliwami i Energią, nr 6, 1986, s. 4-6.
- Kurek K.: Zastosowanie skrośnego nagrzewania indukcyjnego niskotemperaturowego w praktyce przemysłowej. IV Konferencja "Badania naukowe w elektrotermii". Wisła 1989, s. 52-58.
- 40. Kurek K.: Nagrzewanie indukcyjne spieków przed kuciem. V Konferencja "Badania naukowe w elektrotermii". Ustroń 1991, s. 70-79.
- Kurek K., Barglik J., Kadzimierz R., Sajdak Cz., Wieczorek T.: Nagrzewanie indukcyjne w procesach utwardzania powierzchniowego wyrobów hutniczych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej s. "Hutnictwo", z.36, Gliwice 1991, s. 53-59.
- Kurek K.: Zastosowanie wzbudników wielowarstwowych do nagrzewania indukcyjnego niskotemperaturowego uchwytów naklejniczych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej s. "Hutnictwo", z.43, Gliwice 1992 s. 59-73.
- Kurek K., Zborowski A.: Porównanie sprawności różnych typów wzbudników nagrzewnic indukcyjnych do wlewków z metali nieżelaznych. VI Konferencja "Badania naukowe w elektrotermii". Szczyrk 1994, s.170-176.
- 44. Kurek K., Przyłucki R.: Komputerowe wspomaganie w projektowaniu energooszczędnych nagrzewnic indukcyjnych częstotliwości sieciowej. Konferencja "Wspomaganie komputerowe projektowania urządzeń elektrotermicznych". Szczyrk 1994, s. 147-154.
- Kurek K., Ulrych B.: Method of calculation of a cylindrical heating system multi-layer inductor - charge. IV Sympozjum "Symulacja, pomiary i diagnostyka w elektrotermii". Białystok 1995, s. 195-200.
- Kurek K., Sajdak Cz.: Energochłonność nagrzewania indukcyjnego w procesach przeróbki plastycznej. VI Sympozjum "Podstawowe problemy energoelektroniki i elektromechaniki PPPE'95". Ustroń 1995, s. 127-133.
- Kurek K., Sajdak Cz.: Energy consumption of induction heaters for through heating of charges prior to plastic working. Mezinarodní Vědecka Konference. Ostrava 1995, s. 9-16.
- Kurek K., Przyłucki R.: Minimalizacja zużycia energii w procesie indukcyjnego nagrzewania materiałów do przeróbki plastycznej. II Konferencja "Zastosowanie komputerów w zakładach przetwórstwa metali". Wisła 1995, s. 35-43.
- Kurek K.: Modelling of induction through heating process. VIII International Scientific Conference, "ELEKTROENERGETIKA'96". Kosice 1996, s. 225-230.

- Kurek K., Przyłucki R., Ulrych B.: Nonstationary thermal field in the induction heating system with axial symmetry. Acta techn. CSAV 41, 405-407 Institute of Electrical Engineering Acad. Sci. Czech Republic 1996.
- Kurek K., Marzec S.: Badanie zagrożeń wynikających z promieniowania elektromagnetyczngo dla pracowników w procesie hartowania indukcyjnego. Hutnik nr 4, 1996, s. 138-140.
- Kurek K.: Modelowanie nagrzewnic indukcyjnych skrośnych do wsadów przed ich przeróbką plastyczną. III Konferencja "Zastosowanie komputerów w zakładach przetwórstwa metali". Koninki 1996, s. 9-15.
- 53. Kurek K., Ulrych B.: Symulacja komputerowa procesu nagrzewania indukcyjnego wsadów cylindrycznych. V Sympozjum "Symulacja, pomiary i diagnostyka w elektrotermii". Hołny Mejera 1996, s. 231-239.
- 54. Kurek K., Hadasik E.: Symulacja komputerowa nagrzewania indukcyjnego próbki w plastometrze skrętnym. IV Konferencja "Zastosowanie komputerów w zakładach przetwórstwa metali". Ustroń 1997, s. 25-32.
- Kurek K., Grosman F., Hadasik E.: Analiza procesu nagrzewania indukcyjnego próbki w plastometrze skrętnym. V Seminarium Naukowe "Nowe technologie i materiały w metalurgii i inżynierii materiałowej". Katowice 1997, s. 14-18.
- Kurek K., Przyłucki R., Ulrych B.: Sprzężenie pól elektromagnetycznego i temperaturowego w indukcyjnych układach grzejnych. XX Seminarium z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów SPETO'97. Gliwice - Ustroń 1997, s. 193-196.
- Kurek K.: Optimization of induction heater construction. International Seminar on: "Simulation and identyfication of electroheat processes". Łódź 1997, s. 31-36.
- Kurek K., Hadasik E.: Optymalizacja wzbudnika nagrzewnicy indukcyjnej plastometru skrętnego metodą symulacji komputerowej. International Scientific Conference FORMING'97, Roznov pod Radhoštem 1997, s. 43-47.
- Kurek K., Przyłucki R., Ulrych B.: Induction heating as coupled or non-coupled electromagnetics and temperature problems. Acta techn. CSAV 42, Institute of Electrical Engineering Acad. Sci Czech Republic 1997.
- Kurek K., Krach A., Marzec S.: Zastosowanie symulacji komputerowej do ograniczania promieniowania elektromagnetycznego przy nagrzewaniu indukcyjnym. VI Sympozjum "Symulacja, pomiary i diagnostyka w elektrotermii". Hołny Mejera 1997, s. 113-117.
- Kurek K.: Influence of geometry and supply parameters of induction heater on its work. International Scientific Conference "Elektroenergetika'97". Ostrava 1997, s. 88-93.
- 62. Kurek K., Sajdak Cz.: Energooszczędne wzbudniki nagrzewnic indukcyjnych skrośnych zwłaszcza do wsadów miedzianych. Konferencja Naukowo-Techniczna "Wykorzystanie miedzi w polskim przemyśle elektrotechnicznym". Ustroń 1997, s. 89-96.

- 80
- Kurek K.: Zastosowanie pakietu FLUX2D do symulacji procesów elektrotermicznych. III Konferencja Naukowo-Techniczna "Zastosowania komputerów w elektrotechnice" ZKwE'98. Poznań - Kiekrz 1998, s. 409-412.
- 64. Kurek K., Grosman F., Hadasik F.: Kształtowanie pola temperatury we wsadzie na przykładzie nagrzewania indukcyjnego próbki w plastometrze skrętnym. VI Seminarium Naukowe "Nowe technologie i materiały w metalurgii i inżynierii materiałowej". Katowice 1998, s. 85-88.
- 65. Kurek K.: The effectiveness of induction heating process of the different diameter charges in heaters with the universal inductor. IHS-98 International Induction Heating Seminar, Padova, Italy 1998, s.63-70.
- Kurek K.: Nagrzewanie indukcyjne końców rur do zaostrzania na gorąco przed ciągnieniem. IX International Scientific Conference, "ELEKTROENERGETIKA'98". Košice 1998, s. 225-230.
- 67. Krakowski M.: On certain properties of the electric vector potential in eddy-current problems. IEE Proceedings, Part A, 134, (10), 1987, s. 768-772.
- 68. Krawczyk A., Tegopoulos J.A.: Numerical modelling of eddy currents. Clarendon Press Oxford, 1993.
- 69. Krstewa A.P., Dimitrow M.A., Georgiew A.P., Zachariew S.M.: Elektriczieskije paramietry i rieżimy raboty indukcjonnogo nagriewatiela kotła. I Międzyn. Konf. MMEt. Wisła 1986.
- 70. Lammeraner I., Stafl M.: Wichriewyje toki. Energija, Moskwa Leningrad 1967.
- 71. Langer E .: Teorie indukcniho a dielektrickeho tepla. Academia, Praga, 1979.
- 72. Liwiński W.: Nagrzewnice indukcyjne skrośne. WNT, Warszawa 1968.
- Lombard P., Meunier G.: A general method for electric and magnetic coupled problem in 2D and magnetodynamic domain. IEEE Trans. Magn., vol.26, No.2, March 1990.
- Lupi S., Niemkow W.S.: Induttori multipli con o scenza schermo ferromagnetico per corpi cilindrici bimetalici o cavi. Att.e Memoria d'Academie Patavina di Scienze, vol. LXXXVIII, 1975-76.
- 75. Łykow A.W.: Teoria tiepłoprowodnosti. Wysszaja Szkoła, Moskwa 1967.
- Marchand Ch., Foggia A.: 2D finite element program for magnetic induction heating. IEEE Trans.,vol. MAG-19, No.6, 1983, s. 2647-2649.
- 77. Mayer D., Ulrych B.: Základy numerického rešeni elektrickych a magnetickych poli. SNTL/ALFA, Praha 1988.
- Meunier G., Shen D., Coulomb J.L.: Modelisation of 2D and axisymmetric magnetodynamic domain. IEEE Trans. Magn., vol.24, No.1, January 1988.
- 79. Moon P., Spencer D.E.: Teoria pola. PWN, Warszawa 1966.
- Morisue T.: Magnetic vector potential and electric scalar potential in three-dimensional eddy current problem. IEEE Trans. Magn., MAG-18, March 1982, s. 531-535.

- Müller W.: A new iteration technique for solving stationary eddy current problems using the method of finite differences. IEEE Trans. Magn., vol. MAG-18, No.2, March 1982.
- Muller W., Kramer C., Kruger J.: Calculation of 2- or 3- dimensional linear or nonlinear fields by the CAD-Program PROFI. IEEE Trans. Mag., vol.19, No. 6, 1983, s. 2670-2673.
- Nacke B., Mühlbauer A.: Numerische Simulation von induktiven Erwärmungsvorgangen mittels der Methode der finiten Differenzen. I Międzyn. Konf. MMEt, Wisła 1986.
- Nakata T., Takahashi N., Kawase Y.: Eddy current analysis of cylindrical parallel conductors including circulating currents. Papers of Technical Meeting on Static Apparatus. IEE of Japan, SA-80-4, 1980.
- 85. Nakata T., Takahashi N.: Direct finite element analysis of flux and current distribution under specified conditions. IBID Mag-24, 2, 325, 1982.
- Nakata T., Takahashi N., Fujiwara K., Miura M., Okada Y.: Boundary conditions for finite element analysis of 3-D magnetic fields. Proceedings of International Workshop for Eddy Current Code Comparison, 219, Tokyo 1986.
- Nakata T., Takahashi N., Fujiwara K.: Efficient solving techniques of matrix equations for finite element analysis of eddy currents. Computing Conference, Graz 1987.
- Nakata T., Takahashi N., Fujiwara K.: Physical meaning of gradφ in eddy current analysis using magnetic vector potentials. IEEE Trans. Mag., vol.24, No.1, January 1988, s. 178-181.
- Nakata T., Takahashi N., Fujiwara K., Muramatsu K., Cheng Z.G.: Comparison of various methods for 3-D eddy current analysis. IEEE Trans. Magn., vol.24, No.6, November 1988.
- Nakata T., Takahashi N., Fujiwara K., Ahagon A.: 3-D non-linear eddy current analysis using the time-periodic finite element method. IEEE Trans. Magn., MAG-25, No.5, 1989.
- Nakata T., Takahashi N., Fujiwara K., Niinobe H., Misawa K.: Finite element analysis of inducted currents in axisymetric multi-conductors connected in parallel to voltage sources. IEEE Trans. Magn., vol.26, No.2, March 1990.
- 92. Nakata T., Fujiwara K.: Present status of 3-D numerical analysis of magnetic fields. In: Electromagnetic forces and applications (ed. Tani J. and Takagi T.), Elsevier, Amsterdam 1992.
- Nose Y.: Comparison of calculated and measured results of IEEJ models on eddy current. IBID, SA-89-70, RM-89-59.
- 94. Nowak L., Demenko A., Kowalski K.: Numerical simulation of 3D magnetic field distribution in nonhomogenous anisotropic regions using the finite element method. Zesz.
- Nauk. Pol. Poznańskiej, s. Elektryka, z.43, 1994, s. 31-48.
- 95. Onuki T., Wakao S., Yamamura T.: Physical meaning of gauge conditions in eddy current analysis. IEEE Trans. Magn., vol 29, No.6, November 1990.
- Patecki A., Szymański G.: Calculation of 3D eddy current problems by the finite difference method using the A, A-V formulation. CEFC'94, Aix-les-Bains, Francja, 5-7 July, 1994.

- 82
- 97. Patecki A.: Calculation of 3D eddy currents with voltage exitation. Proceedings of IGTE'94, Graz, Austria, 26-28 September 1994.
- 98. Patecki A.: Calculation of 3D eddy-currents problems in nonlinear magnetic fields with voltage excitation. ISEF'95, Thessaloniki 1995.
- Pillsbury R.D.: A three dimensional eddy current formulation using two potentials: The magnetic vector potential and total magnetic scalar potential. IEEE Trans. Magn., vol.MAG-19, November 1983, s. 2284-2287.
- 100. Piriou F., Razek A.: A non-linear coupled 3D model for magnetic field and electric circuit equations. IEEE Trans. Magn., vol.28, No.2, March 1992.
- 101. Podstrigacz J.S., Burak J.I., Gaczkiewicz A.R., Czerniawskaja L.W.: Tiermouprugost elektroprowodnych tieł. Naukowa Dumka, Kijów 1977.
- Praca zbiorowa pod red. K.Kegela: Elektrowärme Theorie und Praxis. W.Girardet, Essen 1974.
- 103. Preis K.: A contribution to eddy current calculations in plane and axisymmetric multiconductor systems. IBID, MAG-19, 6, 2397, 1983.
- Przyłucki R., Kurek K.: Symulacja komputerowa procesu hartowania indukcyjnego stali. XXI Seminarium z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów SPETO'98, Ustroń -Gliwice 1998, s. 233-236.
- Racinowski B.: Calculations of the nonlinear magnetic field using the magnetic vector potential. Proceedings of IGTE'94, Graz, Austria 1994.
- 106. Ražnjević K .: Tablice cieplne z wykresami. WNT, Warszawa 1974.
- Reichert K.: Ein numerisches Verfahren zur Berechnung von Anordnungen zur induktiven Erwärmung. Elektrowärme Int., Bd. 26, Nr 4, 1968.
- Renchan W., Stoegner H., Preis K.: Calculation of 3D eddy current problems by finite element method using either an electric or a magnetic vector potential. IEEE Trans. Magn., vol.24, January 1988, s. 122-125.
- Robert P., Ito M., Takahasi T.: Numerical solution of three dimensional transient eddy current problems by the A-φ method. IEEE Trans. Mag., vol.28, No.2, March 1992, s. 1166-1169.
- Rodger D., Eastham J.F.: A formulation for low frequency eddy current solutions. IEEE Trans. Magn., vol. MAG-19, November 1983, s. 2443-2446.
- 111. Rodigin N.M.: Indukcjonnyj nagriew stalnych izdielej. Mietałłurgizdat, Moskwa 1950.
- 112. Rucker W.M., Richter K.R.: Calculation of two-dimensional eddy current problems with the boundary element method. IEEE Trans. Magn., MAG-19, No.6, 1983, s. 2429-2432.
- Rucker W.M., Richter K.R.: A BEM code for 3-D eddy current calculations. IEEE Trans. Magn., MAG-26, No.2, 1990, s. 462-465.

- 114. Sajdak Cz., Kurek K., Przyłucki R.: Influence of induction heater's model simplifications on accuracy of system's impedance and efficiency determination. III International Conference on Advanced Methods in Theory of Electrical Engineeering Applied to Power Systems. Plzeň, 1997, s. 79-86.
- 115. Sajdak Cz., Samek E.: Nagrzewanie indukcyjne. "Śląsk", Katowice 1985.
- 116. Salon S.J., DeBortoli M.J., Palma R.: Coupling of transient fields, circuits, and motion using finite element analysis. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 4, (11), 1990, s. 1077-1106.
- 117. Sato T., Inoue Y., Saito S.: Solution of magnetic field, eddy current and circulating current problems, taking magnetic saturation and effect of eddy current and circulating current paths into account. IEEE Winter Meeting, A 77-168, 1977.
- Schulze D., Andree W.: Numerische Modellierung von Induktionserwärmungsanlagen und Induktionserwärmungsprozessen. I Międzyn. Konf. MMEt, Wisła 1986.
- 119. Schwartz T.: Termokinetyka układów elektrotermicznych. WNT, Warszawa 1966.
- 120. Simpson P.G.: Grzanie indukcyjne. PWN, Warszawa 1964.
- Skoczkowski T.: Pola sprzężone elektromagnetyczne i temperatury w nagrzewnicach indukcyjnych rur. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej s. "Elektryka", z.121, Gliwice 1991.
- Skoczkowski T.: Nagrzewanie indukcyjne. Przegląd Elektrotechniczny, 10/1996 s. 253-259.
- 123. Słuchocki A.E.: Induktory. Maszinostrojenie, Leningrad 1973.
- 124. Sommerfeld A.: Elektrodynamik (tłum. ros. Eliektrodinamika). Fiz-Mat Lit., Moskwa, 1958.
- 125. Song H., Ida N.: An eddy current constraint formulation for 3D electromagnetic field calculations. IEEE Trans. Magn., MAG-27, No.5, 1991, s. 4012-4015.
- 126. Stansel N.R.: Induction heating. Mc-Graw Hill Book Co., New York 1949.
- 127. Sundberg Y .: Induction heating. Vasta Aros Frycken Aktiebolag Vasteras, 1965.
- 128. Szymański G.: Zastosowanie metod całkowych w elektrodynamice technicznej. Praca habilitacyjna. Rozprawy nr 135, Politechnika Poznańska, 1982.
- 129. Szymański G.: Electrodynamic forces within metal cylinder generated by short-circuit current. Arch. Elektr. Vol. 67, 1984, s. 71-74.
- 130. Szymański G.: Watt-hour efficiency of system loop inductor ferromagnetic plate. Arch. Elektr. Vol. 67, 1984. s. 325-328.
- 131. Tozoni O.W.: Rasczet elektromagnitnych polej na wyczislitielnych maszinach. Naukowa Dumka, Kijów, 1967.
- Tozoni O.W., Mayergoyz I.D.: Analysis of 3-D electromagnetic fields. Technika USRR, 1974.
- Trowbridge C.W.: Low frequency electromagnetic field computation in three dimension. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 52, (3), 1985, s. 653-674.

- 134. Tsuboi H., Misaki T.: Three dimensional analysis of eddy current distribution by the boundary element method. IEEE Trans. Magn., MAG-23, No.5, 1987, s. 3044-3046.
- 135. Wajnberg A.M.: Indukcionnyje pławilnyje pieczi. Mietałłurgia. Moskwa 1967.
- 136. Walter F.: Die Grundlagen der elektrischen Ofenheizung. Geest u. Portig K.G., Lipsk, 1950.
- Weiss J., Cendes Z.J.: Efficient finite element solution of multipath eddy current problems. IBID, MAG-18, 6, 1710, 1982.
- Wiak S., Zakrzewski K.: Numerical calculation of transients in electrical circuits with nonlinear eddy current skin effect. IEE Proceedings, 116, (2), 1987, s. 156-160.
- Wieczorek T.: Analiza nagrzewnic indukcyjnych płaskich i cylindrycznych stosowanych w procesach obróbki cieplnej i plastycznej metałi. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej s. "Hutnictwo", z.42, Gliwice 1992.
- 140. Zienkiewicz O.C.: Metoda elementów skończonych. Arkady, Warszawa 1972.
- 141. Zienkiewicz O.C.: The finite element method. Mc Graw-Hill, New York 1978.
- Zlamal M.: Finite element method in heat conduction problems. In: The mathematics of finite elements and applications, Academic Press, New York 1976.

ZASTOSOWANIE NUMERYCZNEJ SYMULACJI DO ANALIZY PRACY I PROJEKTOWANIA CYLINDRYCZNYCH NAGRZEWNIC INDUKCYJNYCH SKROŚNYCH

STRESZCZENIE

Przedstawiono dwuwymiarową analizę procesu nagrzewania indukcyjnego, obejmującą sprzężone pola elektromagnetyczne i temperaturowe w układzie osiowosymetrycznym. Na podstawie analizy danych literaturowych oraz rezultatów wstępnych prac własnych sformułowano tezę, że zastosowanie symulacji komputerowej procesu nagrzewania w indukcyjnym układzie grzejnym stwarza racjonalne podstawy projektowania nagrzewnic indukcyjnych, gwarantując uzyskanie założonego efektu techniczno-ekonomicznego.

Opracowano modele obliczeniowe uwzględniające specyficzne cechy procesu nagrzewania wsadu o zmieniających się właściwościach. Na ich podstawie zbudowano algorytmy numeryczne umożliwiające modelowanie procesu nagrzewania do analizy pracy i projektowania nagrzewnic. Przetestowano także przydatność programów profesjonalnych do zagadnień związanych z grzejnictwem indukcyjnym, uzupełniając je własnymi procedurami, rozszerzającymi możliwości obliczeniowe tych programów.

Wykonano obliczenia i na ich podstawie sformułowano wnioski, pozwalające na taką optymalizację konstrukcji nagrzewnic, która umożliwi obniżenie zużycia energii w procesie nagrzewania indukcyjnego. Zbadano także możliwości kształtowania pola temperatury we wsadzie, w tym również przy nagrzewaniu końców rur lub zastosowaniu uniwersalnego wzbudnika w wieloasortymentowej, krótkoseryjnej produkcji.

Przedstawiono analizę kosztów budowy oraz eksploatacji nagrzewnic umożliwiającą podejmowanie trafnych ekonomicznie decyzji inwestycyjnych bądź projektowych.

Wykonane badania laboratoryjne i przemysłowe prototypów nagrzewnic sieciowej częstotliwości ze wzbudnikami wielowarstwowymi oraz średniej częstotliwości umożliwiły weryfikację doświadczalną modeli obliczeniowych oraz wyników obliczeń numerycznych, potwierdzając przyjętą tezę pracy, dając zarazem podstawę do wykorzystania symulacji komputerowej w praktyce projektowej nagrzewnic indukcyjnych.

APPLICATION OF NUMERICAL SIMULATION FOR ANALYSIS OF THROUGH INDUCTION HEATERS' WORK AND DESIGN FOR CHARGES WITH AXIAL SYMMETRY

SUMMARY

A two-dimensional analysis of the induction heating process containing coupled electromagnetic and thermal fields in the system with axial symmetry has been presented. Basing on a literature data's analysis and the results of the own preliminary work, a thesis has been stated that the application of a heating process' computer simulation in the induction heating system creates a rational basis of induction heaters' design ensuring the predicted technically-economical effect.

Calculation models have been worked out taking into account specific features of the charge's heating with changing properties. Numerical algorithms have been built on their base enabling heating process' modelling for the work's analysis and heater's design. Utility of professional programs for the problems connected with induction heating has been tested complementing them with own procedures extending calculation possibilities of the programs.

The calculations have been made and on their basis conclusions have been reached allowing optimisation of the heater's construction that enables reducing energy consumption during the induction heating process. Possibilities of thermal field's shaping in the charge have been examined as well, including pipe ends' heating or application of a universal inductor to multi-assortment, short series production.

An analysis of building and running costs of the heaters has been presented enabling economically proper investment and design decisions.

Carried out laboratory and industrial tests of main frequency heaters' prototypes with multilayer inductors and medium frequency ones have enabled experimental verification of the calculation models and the numerical calculations' results confirming the paper's thesis, in the same time giving the basis for application of the computer simulation in the induction heaters' design routine.



