i-MITEL 2010

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna

Innowacyjne Materiały
i Technologie w Elektrotechnice

21-23 kwietnia 2010
Gorzów Wlkp.

Uniwersytet Zielonogórski

GALMAR

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna

Innowacyjne Materiały i Technologie w Elektrotechnice

i-MTEL 2010

MATERIAŁY KONFERENCYJNE
z płytą CD

Przyłęsko k. Gorzowa Wielkopolskiego
21-23 Kwietnia 2010

RADA WYDAWNICZA

Krzysztof Urbanowski (*przewodniczący*), Marian Adamski,
Rafał Ciesielski, Michał Drab, Maria Fic, Bohdan Halczak,
Andrzej Maciejewski, Janusz Matkowski,
Anna Walicka, Zdzisław Wołk, Ryszard Błażyński (*sekretarz*)

UNIWERSYTET
ZIELONOGÓRSKI

RECENZJA

Ryszard Strzelecki
Grzegorz Benysek
Michał Zeńczak

SKŁAD

Jacek Rusiński

PROJEKT OKŁADKI

Galmar Marciniak s.j.

© Copyright by Uniwersytet Zielonogórski
Zielona Góra 2010

ISBN 978-83-7481-327-3

OFICYNA WYDAWNICZA
UNIWERSYTETU ZIELONOGÓRSKIEGO
65-246 Zielona Góra; ul. Podgórna 50
tel./faks (068) 328 78 64; e-mail: oficynawydawnicza@adm.uz.zgora.pl

ORGANIZATORZY

INSTYTUT INŻYNIERII ELEKTRYCZNEJ
UNIWERSYTETU ZIELONOGÓRSKIEGO

oraz

STOWARZYSZENIE ELEKTRYKÓW POLSKICH
ODDZIAŁ GORZOWSKI

we współpracy z:

Zachodniopomorskim Uniwersytetem Technologicznym
Instytutem Elektrotechniki w Warszawie
Polskim Towarzystwem Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej
Oddział w Zielonej Górze oraz Oddział w Szczecinie
Komitetem Energoelektroniki Stowarzyszenia Elektryków Polskich
ENEA Operator Sp. z o.o.

PATRONAT HONOROWY

WICEPREZES RADY MINISTRÓW
MINISTER GOSPODARKI W RZĄDZIE RP

Waldemar Pawlak

WOJEWODA LUBUSKI

PREZES SEP

Artykuły po recenzjach zakwalifikował do druku
Komitet Naukowy Konferencji
nakładem Instytutu Inżynierii Elektrycznej
Uniwersytetu Zielonogórskiego w ilości 150 egz.

KOMITET NAUKOWY

HONOROWY PRZEWODNICZĄCY

prof. dr hab. Kazimierz ZAKRZEWSKI

Komitet

Ryszard Strzelecki - Przewodniczący
Aleksandra Rakowska – z-ca przewodniczącego
Grzegorz Benysek – z-ca przewodniczącego
Lech Subocz– z-ca przewodniczącego
Vladimir S. Blintsov
Valery I. Chrisanov
Kazimierz Cywiński
Antoni Dmowski
Zbigniew Fedyczak
Zbigniew Hanzelka
Marek Hartman
Ryszard Kacprzyk
Wojciech Jarzyna
Franciszek Mosiński
Roman Muszyński
Maciej Pawlik
Heinz-H. Schramm
Detlef Schulz
Piotr Szymczak
Zbigniew Wróblewski
Michał Zeńczak
Krzysztof Zymmer

KOMITET ELEKTROTECHNIKI POLSKIEJ AKADEMII NAUK
patronat naukowy

PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY
WIADOMOŚCI ELEKTROTECHNICZNE
patronat medialny

KOMITET ORGANIZACYJNY

Edward Cadler - przewodniczący
Stanisława Cadler – sekretarz
Marcin Jarnut
Jacek Rusiński

SPIS TREŚCI

Manfred BAESCH, Jose CARDINAELS, Paweł KIEŁKOWSKI
Mufy przejściowe dla sieci kablowych średniego napięcia 11
Bożena BITTNER, Jan BURSA
Elektroizolacyjna kompozycja epoksydowa o wysokiej ciepłoodporności . 19
Janusz BYRCZEK
Pewność i wysoka jakość zasilania - przykłady zastosowania reklozerów w krajowych sieciach dystrybucyjnych SN 27
Edward CADLER, Kazimierz HERLENDER
Oprawy oświetlenia zewnętrznego z półprzewodnikowymi źródłami światła LED 33
Valery I. CHRISANOV
Transient Analysis of the Cage Induction Motor Start up 41
Valery I. CHRISANOV, Sebastian WISZNIEWSKI
Sea Wind-Wave Power Plant on the Base of Permanent Magnet Synchronous Generators 47
Piotr CIERZNIEWSKI
Aspekty projektowania iluminacji latarni morskich 55
Sławomir CIEŚLIK
Przyłączenie farmy wiatrowej o mocy znamionowej 8 MW do szyn rozdzielni SN w stacji elektroenergetycznej WN/SN zasilającej elektroenergetyczną sieć dystrybucyjną 63
Grzegorz DĄBROWSKI, Sławomir SKRODZKI, Krzysztof WOLIŃSKI
Analiza działania zabezpieczeń różnicowych transformatorów 110/SN w wybranej spółce dystrybucyjnej w latach 2000 – 2009 77
Henryk DĘBICKI
Rozproszona, inteligentna energetyka oparta o Odnawialne Źródła Energii. Czy musimy być skazani na energetykę jądrową? Jak uprawy energetyczne sprzyjają ochronie przyrody? Co zrobić z odpadów? 87
Waldemar DOŁĘGA
Operatorzy systemów dystrybucyjnych a generacja rozproszona w aspekcie bezpieczeństwa elektroenergetycznego 93
Stefan DOMEK, Paweł DWORAK, Krzysztof OKARMA, Krzysztof PIETRUSEWICZ
Techniki wizyjne w automatyzacji procesu pozycjonowania przedmiotu obrabianego na frezarce sterowanej numerycznie 101
Stefan DOMEK, Paweł DWORAK, Krzysztof PIETRUSEWICZ
Zintegrowany system monitorowania warunków pracy układu napędowego obrabiarki sterowanej numerycznie 107

Jerzy DORA, Ryszard KACPRZYK, Anna KISIEL, Paweł ŻYŁKA
System zasilania głowic atomizacyjnych do wytwarzania elektro-aerozoli 113
Paweł DWORAK, Krzysztof PIETRUSEWICZ
Regulator o zmiennej strukturze w sterowaniu wielowymiarowym obiektem cieplnym 121
Salavat M. FATKULLIN, Wasilij E. FRIZEN, Piotr SZYMCZAK, Sebastian WISZNIEWSKI
Modelowanie matematyczne procesów cieplnych w indukcyjnych przetwornikach cylindrycznych 131
Adam GUBAŃSKI, Jacek REZMER, Krzysztof LEŚNIAK
Zastosowania metod ewolucyjnych w analizie TSDC 141
Kazimierz HERLENDER, Władysław BOBROWICZ
Techniczne i ekonomiczne aspekty budowy małych elektrowni wodnych 151
Aleksiej A. IDIJATULIN, Siergiej F. SARAPUŁOW, Piotr SZYMCZAK, Marcin WARDACH
Badania wielofunkcyjnego mieszadła elektromagnetycznego 159
Marcin JARNUT, Grzegorz BENYSEK
Zastosowanie układów energoelektronicznych w technologii SmartGrid i V2G 169
Ryszard KACPRZYK, Tomasz CZAPKA
Układ wyładowczy z jonizacją wsteczną 177
Ryszard KACPRZYK, Paweł ŻYŁKA
Efekt ekranowania podczas elektryzacji cząstek aerozoli w głowicach z naddźwiękowym przepływem gazu 187
Jacek KANIEWSKI
Implementacja układu sterowania transformatora hybrydowego 197
Roman KŁOPOCKI
Selektywność aparatów zabezpieczających 207
Marcin LEWANDOWSKI, Adam PELESZ
Elektryzacja kropel aerozoli wytwarzanych przy użyciu głowic hydraulicznych 215
Piotr LEŻYŃSKI
Warunki kompensacji napięcia zaburzeń wspólnych w falownikach napięcia przy modulacji sinusoidalnej PWM z dodatkiem przebiegów o częstotliwości trzeciej harmonicznej 223
Marek ŁOBODA
Wymagane badania elementów ochrony odgromowej 233
Olgierd MAŁYSZKO, Sebastian SZKOLNY, Michał ZEŃCZAK
Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa w systemie elektroenergetycznym z farmami wiatrowymi 237

Olgierd MAŁYSZKO, Sebastian SZKOLNY, Michał ZEŃCZAK
Zastosowanie przewodów wysokotemperaturowych przy podłączaniu farm wiatrowych 245
Henryk MISZTAL
Analiza porównawcza pracy układów regulacji z regulatorami PID o zmodyfikowanej strukturze 251
Franciszek MOSIŃSKI
Transformator to newralgiczny element systemu elektroenergetycznego 261
Jan MUĆKO
Metody sterowania szeregowego falownika rezonansowego zapewniające jednoczesną komutację ZVS i „prawie ZCS" 275
Piotr MYSIAK
Analiza pracy w dziedzinie częstotliwościowej trójfazowego dławika sprzężonego zastosowanego w wybranych układach wielopulsowych przekształtników diodowych 289
Piotr PAPLICKI
Silniki magnetoelektryczne do hybrydowych napędów samochodowych . 303
Maciej PAWLIK
„Energymix" krajowej elektroenergetyki w 2020 roku 309
Stanisław PIENIĄŻEK
Oprawy oświetleniowe ze źródłami światła LED i ich stosowanie w oświetleniu drogowym 317
Tomasz PIOTROWSKI
Zastosowanie logiki rozmytej w diagnostyce transformatorów metodami DGA 323
Jerzy POMIANOWSKI
Dwuwarstwowa folia o właściwościach elektretowych 331
Aleksandra RAKOWSKA
Linie kablowe wysokich i najwyższych napięć – doświadczenia eksploatacyjne 337
Artur ROJEK, Wiesław MAJEWSKI
Materiały nakładek ślizgowych pantografów 347
Paweł RÓZGA
Dynamika wyładowań elektrycznych rozwijających się w oleju transformatorowym od izolowanej elektrody WN 353
Robert SMOLEŃSKI, Adam KEMPSKI, Tomasz TARCZEWSKI
Wnikanie do sieci rozdzielczych SN zaburzeń elektromagnetycznych przewodzonych generowanych przez przekształtniki energoelektroniczne w sieciach nn 361
Andrzej SOWA, Krzysztof WINCENCIK
Przewód o izolacji wysokonapięciowej elementem urządzenia piorunochronnego 369

Ryszard STRZELECKI, Dmitri VINNIKOV
Models of the qZ-Converters 377
Paweł SZCZEŚNIAK
Analiza i badania właściwości układu napędowego z matrycowo reaktancyjnym przemiennikiem częstotliwości o modulacji Venturiniego 389
Piotr SZYMCZAK
Analiza stanów cieplnych nieustalonych w silnikach indukcyjnych liniowych 399
Piotr SZYMCZAK, Krystian CZYŻEWSKI, Jarosław ROJEK
Analiza cieplna napędu z liniowymi silnikami indukcyjnymi o regulowanej częstotliwości 409
Grzegorz TADRA
Układ sterowania do przekształtnika matrycowego prądu o modulacji wektorowej oraz czterostopniowej strategii komutacji 417
Zenon TARTAKOWSKI, Janusz MICHALSKI
Wysokonapełnione kompozyty z tworzyw recyklatowych do zastosowań na wyroby elektrotechnicze 427
Artur TYMIŃSKI, Maciej SZUMSKI, Piotr BARMUTA, Kazimierz CYWIŃSKI, Emil CYWIŃSKI
Wybrane problemy pomiaru hałasu wokół obiektów i urządzeń elektroenergetycznych 433
Marcin WARDACH
Badania wpływu klinów magnetycznych na pulsacje w maszynie elektrycznej z magnesami trwałymi 439
Bogusław WĘGRZYN, Piotr DRAPIKOWSKI
Zalecenia metodyczne opracowania ramowych instrukcji eksploatacji urządzeń elektrycznych 449
Sebastian WISZNIEWSKI
Analiza wybranych charakterystyk liniowego silnika tubowego indukcyjnego 457
Krzysztof ZIELSKI
Zastosowanie nowoczesnych beziskiernikowych ograniczników do ochrony od przepięć w sieciach SN 467

Aleksiej A. IDIJATULIN[1], Siergiej F. SARAPUŁOW[1], Piotr SZYMCZAK[2], Marcin WARDACH[2]

Uralski Państwowy Uniwersytet Techniczny w Jekaterynburgu, Rosja (1)
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologicznego w Szczecinie, Polska (2)

Badania wielofunkcyjnego mieszadła elektromagnetycznego

Streszczenie. *W publikacji przedstawiono charakterystykę mieszadła elektromagnetycznego ciekłego metalu – jako wielofunkcyjnego urządzenia – do przetapiania i kształtowania właściwej jego struktury. Podano jego model matematyczny i procedurę obliczeń przy pomocy pakietu MathCAD 14. Zamieszczono także wyniki badań teoretycznych ukazujących - w postaci trójwymiarowego wykresu - obraz rozkładu prędkości w objętości części wtórnej, a także porównawczą charakterystykę wyznaczenia prędkości mieszadła, uzyskaną na drodze badań symulacyjnych i drogą eksperymentalną.*

Abstract. *The characteristic of electromagnetic rabble, as a multifunction device to remelt and forming adequate structure, has been shown in this paper. The first part presents the mathematic model and calculation method with usage of the MathCAD14. The second part of the paper contains results of theoretical studies describing speed distribution in the volume of the secondary part presented as 3D graph. The last part is a comparison of theoretical and experimental characteristics of speed calculation of the electromagnetic rabble.* ***(Research of multifunction electromagnetic rabble)***

Słowa kluczowe: mieszadło elektromagnetyczne, ciekły metal, model matematyczny, symulacja komputerowa
Keywords: electromagnetic rabble, liquid metal, mathematic model, computer simulation

Wstęp

Współczesne potrzeby ekonomiczne rozwoju przemysłu budowy maszyn oraz wymagania odbiorców przemysłu hutniczego stawiają coraz wyższe wymagania w zakresie jakości produkcji. Na pierwszym miejscu bierze się pod uwagę wysoką jakość i mniejsze koszty wytworzenia. Te właśnie aspekty zmuszają technologów do szukania nowych sposobów otrzymywania czystego produktu przy minimalnych odpadach produkcyjnych [1-8]. Nowe rozwiązania powinny spełniać wiele wymogów, m.in. zapewniać minimalne koszty produkcji i eksploatacji.

W Katedrze Elektrotechniki i Elektrotechnologicznych Systemów Uralskiego Państwowego Uniwersytetu Technicznego w Jekaterynburgu i w Zakładzie Maszyn i Napędów Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie (d. Politechniki Szczecińskiej), od 2008 r. prowadzone są wspólne prace badawcze mające na celu zbudowanie wielofunkcyjnego mieszadła elektromagnetycznego – WMEM. Jego zasadniczym przeznaczeniem jest roztopienie i wprowadzenie w ruch wirowy wsadu oraz nadanie mu właściwej struktury, zgodnie z wymaganiami procesu technologicznego. W istocie WMEM to indukcyjne urządzenie elektryczne o budowie tarczowej lub bocznej, pracujące przy niskich częstotliwościach. Zastosowanie takich częstotliwości uwarunkowane jest koniecznością wytworzenia jednostkowych sił obrotowych w całej objętości ciekłej części wtórnej. Podstawowym jego zadaniem jest wprowadzenie części wtórnej w ruch wirujący i wytworzenie w niej leja [8,9]. Lej tworzy się wskutek oddziaływania odśrodkowych sił wirujących na warstwy ciekłej masy.

Przegląd badań teoretycznych i eksperymentalnych pokazał, że istnieje szereg wymogów oraz rozwiązań konstrukcyjnych, wpływających na proces technologiczny WMEM [1-9].

Badania były ukierunkowane na określenie optymalnych parametrów wzbudnika, częstotliwości i amplitudy prądu zasilającego oraz wartości sił oddziaływujących na ciekłą część wtórną materiału. Niezwykle istotnym zadaniem było zbadanie możliwości utworzenia leja do prowadzenia procesu technologicznego. Celem pracy jest przeprowadzenie kompleksowych badań studialnych mających na celu opracowanie i zbudowanie modelu fizycznego WMEM, który spełniałby przytoczone wcześniej wymogi.

Wymagania stawiane WMEM

Podczas pracy WMEM w jego uzwojeniach oraz rdzeniu tracona jest energia elektryczna i magnetyczna. Ciepło wydzielające się w trakcie długotrwałej pracy powinno być odprowadzane na zewnątrz. W tym celu należy zapewnić swobodny dostęp powietrza do aktywnych elementów WMEM. Służy temu odpowiednia, otwarta, konstrukcja wzbudnika, zapewniająca - w wyniku konwekcji i promieniowania - oddawanie ciepła zewnętrznej powierzchni uzwojeń. Bardziej perspektywiczne są systemy wymuszonego chłodzenia powietrzem, bezpośredniego chłodzenia wodą lub zastosowanie nowych materiałów izolacyjnych o wysokich temperaturach dopuszczalnych.

Otrzymanie odpowiednio ukształtowanych pól sił i prędkości uwarunkowane jest spełnieniem przez WMEM następujących wymagań:

1. Ograniczenie, a nawet zniwelowanie menisku powstającego wskutek działania wzbudnika grzejnego;
2. Quasi-zmniejszenie ciężaru przyściennych warstw ciekłej masy przy pomocy wzbudnika grzejnego;
3. Utworzenie wgłębienia w kształcie leja o głębokości nie mniejszej niż 50 cm;
4. Częściowe podgrzanie wsadu;
5. Niedopuszczenie do przegrzania wzbudników;
6. Zwiększenie aktywnej powierzchni wzajemnego oddziaływania między podstawowym metalem i szlaką;
7. Wyrównanie temperatury w całej objętości stopionej masy.

Celem zbadania procesów w rozpatrywanych agregatach do przetapiania opracowano zestaw programów komputerowych, na bazie metody detalizowanych elektrycznych, magnetycznych i cieplnych schematów zastępczych, detalizowanych schematów strukturalnych, a także metody różnic skończonych [10-13].

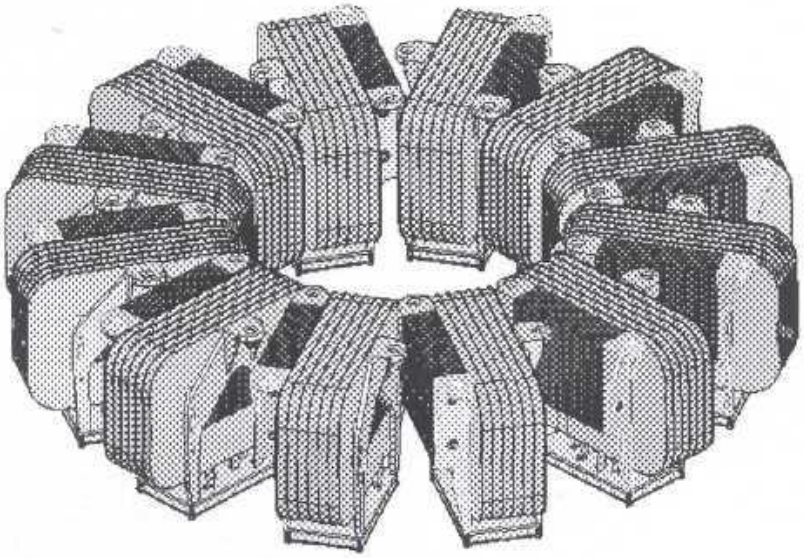
Propozycja WMEM

WMEM może posiadać dwa wzbudniki: jeden spełniający funkcję grzania i wytopu metalu (element grzejny), drugi – funkcję elektromechanicznego sterowania cyrkulacją metalu (element mieszania). Funkcje wzbudników są zatem ściśle rozdzielone. Niewykluczone przy tym są warianty, w których jeden wzbudnik spełnia obie funkcje równocześnie.

Jeden z wariantów tarczowego urządzenia WMEM przedstawiono na rys. 1. Konstrukcyjną i mechaniczną podstawą WMEM jest jego system magnetyczny, nazywany rdzeniem lub magnetowodem, na którym umieszczone są cewki z uzwojeniami.

Przy konstruowaniu magnetowodu należy dążyć do zminimalizowania zużycia blachy transformatorowej i uzyskania możliwie dużego współczynnika wypełniania uzwojeń. Rdzeń składający się z płytek powinien być tak połączony i ściągnięty, aby stanowił dostatecznie sztywną konstrukcję mechaniczną podstawy WMEM, zapewniającą jego

mechaniczną wytrzymałość podczas podnoszenia i mocowania aktywnego elementu do podstawy pieca [8,9].



Rys. 1. Elektromagnetyczny WMEM

Podczas pracy WMEM w jego uzwojeniach oraz rdzeniu tracona jest energia elektryczna i magnetyczna. Ciepło wydzielające się w trakcie długotrwałej pracy powinno być odprowadzane na zewnątrz. W tym celu należy zapewnić swobodny dostęp powietrza do aktywnych elementów WMEM. Służy temu odpowiednia, otwarta, konstrukcja wzbudnika.

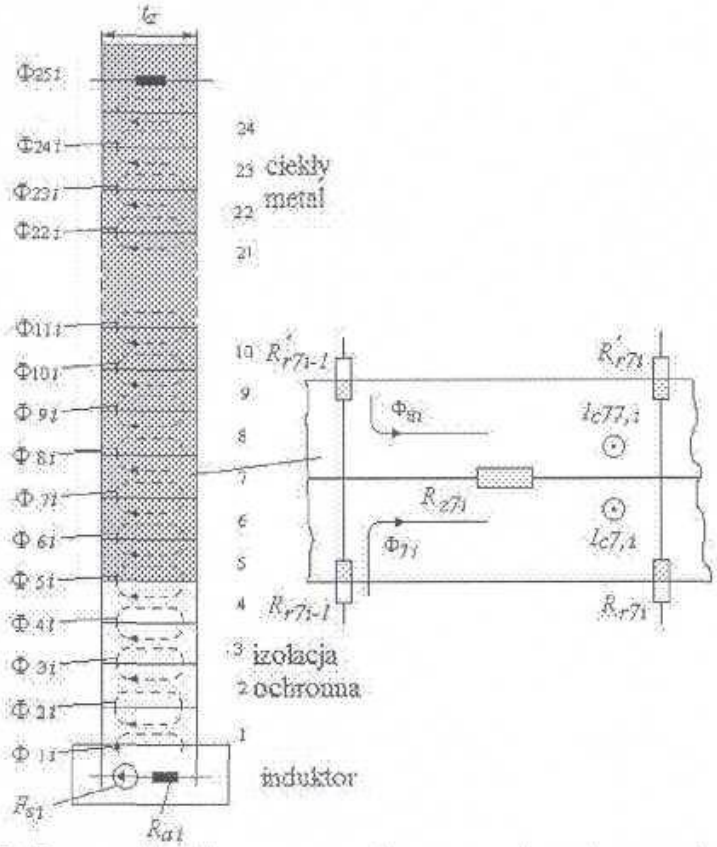
W procesie projektowania rozważano dwie możliwości rozmieszczenia wzbudników: oba wokół bocznej powierzchni tygla, jeden wzbudnik, tzw. grzejny, obejmuje boczną powierzchnię tygla, natomiast drugi, tzw. wirujący - pod dnem tygla. Rozwiązanie drugie nie zawsze jest efektywne, a w niektórych przypadkach wręcz niemożliwe. Natomiast połączenie obu funkcji w jednym wzbudniku wymaga spełnienia konkretnych założeń określonych wskaźnikami energetycznymi WMEM.

Modele matematyczne

Przy określeniu elektromagnetycznych parametrów WMEM dla założonych wymiarów geometrycznych, celowym jest wykorzystanie metody detalizowanych schematów zastępczych - magnetycznych i elektrycznych. [10-13]. Aby analizować procesy hydrodynamiczne, można wykorzystać metodę różnic skończonych. Obliczenia dla obu przypadków wykonano w programie MathCAD14.

Przeanalizujmy rozwiązania konstrukcyjne WMEM mające wpływ na formowanie modeli matematycznych. Wzbudnik to stalowa konstrukcja, rozwinięta wzdłuż średniego promienia magnetowodu do postaci płaskiego prostokątnego rdzenia z otwartymi żłobkami. Do tego rozwiązania można z powodzeniem zastosować metodę detalizowanych zastępczych schematów magnetycznych i elektrycznych [10-13]. Zakłada się przy tym, że po ostatnim na długości wzbudnika żłobku, następuje znów pierwszy żłobek, czyli magnetowód pozostaje „zamknięty". W ten sposób możliwe staje się pominięcie efektu brzegowego. Uzwojenie wzbudnika wykonane jest z cewek pierścieniowych, nawiniętych wokół jarzma, co pozwala uzyskiwać wiele wariantów konstrukcyjnych. Obszar obliczeniowy omawianego modelu podzielony jest na 25 warstw wzdłuż wysokości oraz 12 odcinków na długości. Szerokość detalizowanego

odcinka równa jest jednej podziałce żłobkowej wzbudnika. Zakłada się, że uzwojenie zasilane jest trójfazowym prądem symetrycznym.



Rys. 2. Fragment detalizowanego zastępczego schematu magnetycznego

Model matematyczny tworzy układ macierzowych równań równowagi magnetycznej i elektrycznej dla otrzymanego detalizowanego zastępczego schematu magnetycznego pokazanego na rysunku 2., który ma postać:

$$
(1)\qquad \begin{cases}
(Z_1)(\Phi_1)-(R_{12})(\Phi_2)=(F_s), \\
\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\
-(R_{i,i-1})(\Phi_{i-1})+(Z_i)(\Phi_i)-(R_{i,i+1})(\Phi_{i+1})=0, \\
\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\
-(R_{Q,Q-1})(\Phi_Q)+(Z_{Q+1})(\Phi_{Q+1})=0.
\end{cases}
$$

dla $i = 1...Q$

Na rysunku 2 pokazano podstawową warstwę obwodu magnetycznego, odpowiadający i-temu konturowi (jego szerokość najczęściej przyjmuje się jako równą jednej podziałce żłobkowej wzbudnika t_1), a obok - siódmy element warstwy. Jak widać, obejmuje on górną połowę zastępczego schematu magnetycznego, a ósmy – połowę dolną. W schemacie zastępczym pokazano oporności magnetyczne (reluktancje) tangencjalne (styczne) R_z i normalne (osiowe) R_r dla górnej i dolnej części warstwy. W obwodzie pokazano także prądy I_c, indukowane w siódmej warstwie i-tego elementu oraz magnetomotoryczną siłę $F_{s,i}$ odpowiedniego żłobka wzbudnika w pierwszej warstwie. Jeżeli trzeba uwzględnić strumienie magnetyczne z zewnętrznej strony rdzenia, wzbudnik „przesuwa się" do wewnętrznych warstw schematu. Właściwości warstw i ich rozmiary odzwierciedlają specyficzne cechy poszczególnych elementów.

Oporność macierzowa własna warstwy stanowi postać trójdiagonalnej macierzy, której macierz wierszowa *i*, ma następującą postać (wprowadzono podwójną numerację warstw i odcinków):

$$(Z_i) = \left[0 \ldots\ldots - \left(R_{rj,i} - \frac{V_z}{2t_z} \frac{\gamma t_z h}{2\pi r_{j,i}} \right) \cdot \left(R_{zj,i} + R_{zj-1,i} + \right.\right.$$
$$\left. \left. + 2R_{rj,i} - j\omega \frac{\gamma t_z h}{2\pi r_{j,i}} \right) - \left(R_{rj-1,i} + \frac{V_z}{2t_z} \frac{\gamma t_z h}{2\pi r_{j,i}} \right) \ldots\ldots 0 \right] \tag{2}$$

gdzie $R_{rj,i} = R_{rj-1,i} + R'_{rj,i}$.

Jej elementy zawierają elektryczne przewodności, pomnożone przez współczynniki sprzęgające strumienie magnetyczne i SEM (transformacji $j\omega$ i rotacji $V_z/2t_z$) odpowiednich obwodów. W rezultacie oporności magnetyczne wyrażają się wartościami zespolonymi i uwzględniają indukowane prądy w warstwach przewodzących części wtórnej, poruszających się z prędkością V_z. Oporność wzajemna obwodów sąsiednich wzdłuż osi warstw jest w ogólnym przypadku diagonalną macierzą, w której niezerowy element jest równy ($-R_{zj,i}$). Struktura układu równań macierzowych (1) odpowiada metodzie schematów zastępczych strumieni magnetycznych. Rozwiązanie równań pozwala znaleźć strumienie w każdym obwodzie detalizowanego schematu zastępczego.

Informacja otrzymana w wyniku obliczeń elektromagnetycznych dla mocy i siły w elementach danego urządzenia zostanie wykorzystana do określenia prędkości ruchu oddzielnych warstw ciekłego metalu. Należy zauważyć, że jego warstwy dolne poruszają się z większą prędkością niż pozostałe ze względu na ich małą odległość od wzbudnika. Do określenia prędkości, z jaką poruszają się poszczególne warstwy ciekłego metalu, niezbędne są obliczenia magnetohydrodynamiczne WMEM w środowisku MathCAD14. Pozwalają one wyznaczyć prędkości ruchu metalu w dowolnym punkcie zbiornika. Ze względu na symetrię względem centralnej osi zbiornika zadanie obliczeniowe ma charakter symetryczny. Obszar wanny z ciekłym metalem „rozbijany jest" przy użyciu skończonej siatki różnicowej na kwadraty o boku równym *h*, przy czym ich liczba w osi pionowej i poziomej jest jednakowa. Wartości siły wprowadza się do obliczeń z wykorzystaniem macierzy o wymiarach „n_x" x "n_y" poprzez sumowanie jednostkowych sił w odpowiednim elemencie siatki, przy czym n_x=n_y, gdzie n_x, n_y – to liczba kwadratów skończonej różnicowej siatki wzdłuż odpowiednich osi.

Do rozwiązania zadania hydromechanicznego wykorzystano program do obliczeń równań pochodnych cząstkowych pakietu MathCAD14. Prędkości ruchu ciekłego metalu pod wpływem elektromagnetycznych sił są obliczane na podstawie równania Navier-Stokesa [5]

$$\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = -\frac{F_{jed}}{\eta_{din}} \tag{3}$$

Po zapisaniu układu równań (3) w formie różnicowej przyjmie on postać równania Poissona:

(4)
$$V_{i+1,j}\cdot\left(1+\frac{h_r}{2\cdot r_{i,j}}\right)+V_{i-1,j}\left(1-\frac{h_r}{2\cdot r_{i,j}}\right)+V_{i,j+1}\cdot\frac{h_r^2}{h_z^2}+$$
$$+V_{x,y-1}\cdot\frac{h_r^2}{h_z^2}-2\cdot V_{x,y}\left(1+\frac{h_r^2}{h_z^2}\right)=-\frac{F_{ring}\cdot h_r^2}{\eta_{din}\cdot 2\cdot\pi\cdot r_{i,j}\cdot h_r\cdot h_z}$$

gdzie elementy współczynników macierzy wynoszą odpowiednio:

$$\left(1+\frac{h_r}{2\cdot r_{i,j}}\right)=a;\qquad \left(1+\frac{h_r}{2\cdot r_{i,j}}\right)=b;$$
$$\left(\frac{h_r^2}{h_z^2}\right)=c=d;\qquad 2\left(1+\frac{h_r^2}{h_z^2}\right)=e$$

h_r, h_z – krok podziału obszaru obliczeniowego odpowiednio wzdłuż promienia i wysokości części wtórnej,

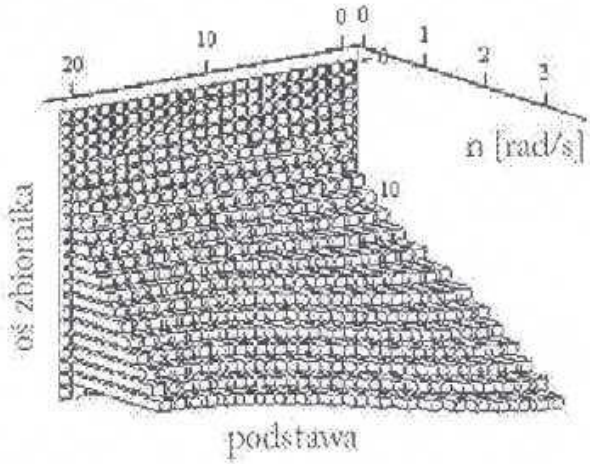
$F_{jed,ij}=\dfrac{F_{ring}}{2\cdot\pi\cdot r_{i,j}\cdot h_r\cdot h_z}$ - jednostkowa siła pociągowa w pierścieniu o numerze *i,j*.

η_{din} – współczynnik lepkości z uwzględnieniem turbulencji.

Badania doświadczalne wykazały [3], że obliczeniowy rozkład prędkości ciekłego wsadu dla typowych indukcyjnych pieców tyglowych daje zadawalające dla obliczeń inżynierskich wyniki, gdy wartość η_{din} zostanie zadana jako jednakowa w całym przekroju wzdłużnym tygla.

Wyniki badań

W rezultacie obliczeń otrzymujemy obraz rozkładu prędkości ciekłego metalu w objętości wanny, co pokazano na rysunku 3.



Rys.3. Rozkład prędkości wzdłuż przekroju wanny

W celu zapewnienia właściwego procesu technologicznego, należy znać czas, w którym WMEM osiągnie wymaganą prędkość mieszanego wsadu. W pierwszym etapie prowadzimy obliczenie najbardziej prostym i przybliżonym sposobem przyjmując, że część wtórna jest stała, ale związana ze ścianką tygla tarciem lepkim. Zgodnie z drugą zasadą Newtona mamy:

(5)
$$m\cdot a=F-F_{mp},$$

gdzie m – masa metalu w tyglu
a – przyspieszenie, m/s²
F – siła pociągowa, N
F_{mp} – siła tarcia o ścianki tygla i podstawę pieca, N

Dalej możemy napisać, że:

(6) $$F_{mp} = (S_{cm} + S_n) \cdot \eta_{din},$$

gdzie S_{cm} - średnia powierzchnia ścianki tygla, m²
S_n - powierzchnia podstawy pieca, m²
η_{din} – współczynnik średniej lepkości dynamicznej, Ns/m²

Wartość przyspieszenia z (5) wynosi:

(7) $$a = \frac{F - F_{mp}}{m}$$

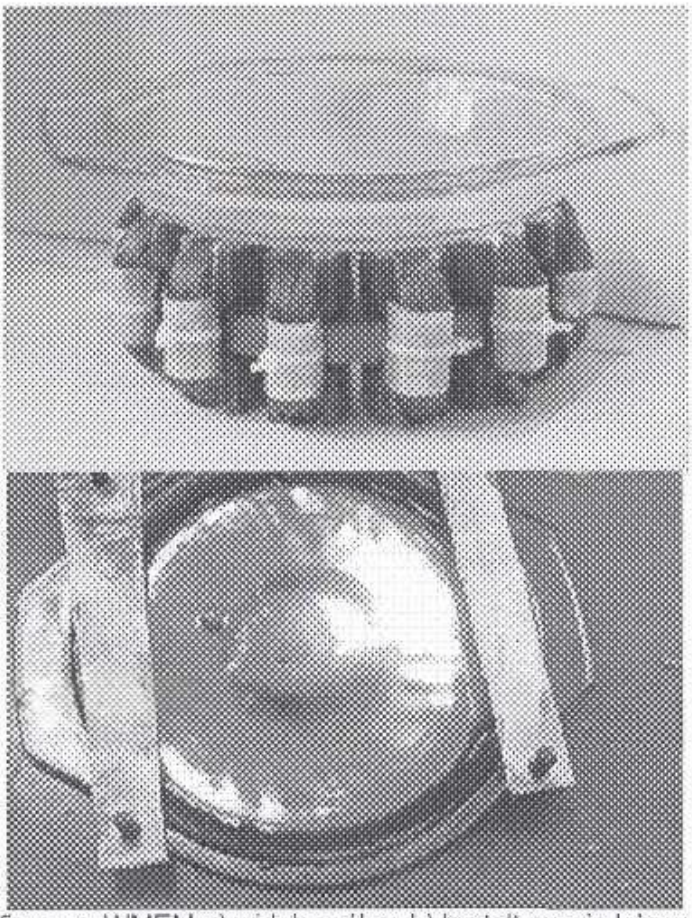
A zatem potrzebny czas, w którym część wtórna rozpędzi się do wymaganej prędkości, wynosi:

(8) $$t = \frac{V}{a} = \frac{V \cdot m}{F - F_{mp}} = \frac{V \cdot m}{F - (S_{cm} + S_n) \cdot \eta_{din}}$$

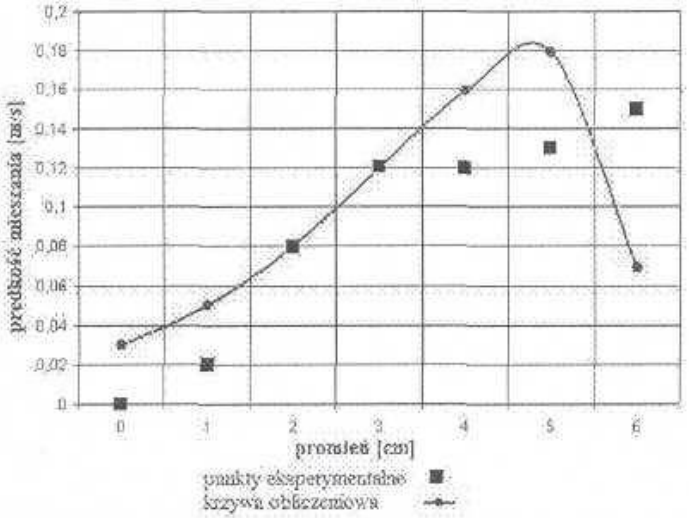
W ramach badań WMEM przeprowadzono również obliczenia cieplne, aby dokonać wyboru dopuszczalnego reżimu pracy i nie dopuścić do przegrzania wzbudnika.

a)

b)



Rys. 4 . Model fizyczny WMEM a) widok ogólny, b) kształtowanie leja w ciekłym metalu



Rys.5. Charakterystyki rozkładu prędkości WMEM na powierzchni metalu

W celu dokonania oceny dokładności przedstawionych obliczeń wykonano model tarczowego WMEM (rys. 4) i przeprowadzono badania eksperymentalne (rys. 5). Okazało się, że uzyskano zadowalającą zbieżność uzyskanych wyników teoretycznych i eksperymentalnych [14].

Podsumowanie

Przedstawiono charakterystykę wielofunkcyjnego mieszadła elektromagnetycznego do przetapiania i kształtowania struktury ciekłego metalu.

Wykorzystanie metody detalizowanych zastępczych schematów magnetycznych i elektrycznych pozwala na uzyskanie obrazu rozkładu prędkości oddzielnych warstw wsadu mieszadła elektromagnetycznego.

Wyniki modelowania matematycznego w oparciu o zaproponowane modele matematyczne z wykorzystaniem środowiska MathCAD pozwoliły zbudować model fizyczny urządzenia i przeprowadzić badania eksperymentalne.

Porównanie rezultatów badań teoretycznych i eksperymentalnych potwierdza możliwość budowy wielofunkcyjnego mieszadła elektromagnetycznego z zastosowaniem wzbudnika tarczowego.

Publikacja została opracowana w wyniku wspólnej pracy badawczej pt. „High efficient AC electromechanical energy converters for linear electrical drives, cooling systems and magnetohydrodynamic plants" realizowanej w latach 2008-2010 przez Katedrę Elektrotechniki i Systemów Elektrotechnologicznych Uralskiego Państwowego Uniwersytetu Technicznego i Zakładu Maszyn i Napędów Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego.

LITERATURA

[1] Fikus F., Wieczorek T., Urządzenia magnetohydrodynamiczne w odlewniach i hutach, Wyd. „Śląsk", Katowice, 1979.
[2] Podrzucki C., Szopa J., Piece i urządzenia metalurgiczne stosowane w odlewnictwie, Wydawnictwo „Śląsk", Katowice, 1982,
[3] Тир Л.Л. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией металла в электропечах/ Л.Л. Тир, М.Я. Столов. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1991.
[4] Sajdak C., Samek E., Nagrzewanie indukcyjne, Wydawnictwo „Śląsk", Katowice, 1985.
[5] Сарапулов Ф.Н., Сидоров О.Ю., *Магнитогидродинамические машины с бегущим или пульсирующим магнитным полем. Методы расчета: Учебное пособие.* Екатеринбург: УГТУ, 1994.
[6] Hering M., Podstawy elektrotermii, WNT Warszawa, Cz. I 1992 r., Cz. II 1998 r.

[7] Przyłucki R., Sajdak C., *Obliczenia parametrów indukcyjnych urządzeń grzejnych do wsadów płaskich,* Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2000

[8] Коршунов Е.А., Буркин С.П., Сарапулов Ф.Н. и др. *Плавильный агрегат* Патент на изобретение N2207476. Опубл. в БИ N18 от 27.06.2003 г.

[9] Коршунов Е.А, Гайнанов Д.Н., Бастриков В.Л. и др. *Многофункциональный плавильный агрегат для реализации новых технологий в условиях миниметаллургических предприятий и литейных цехов крупных машиностроительных заводов* // Литейщик России №10, 2004. с.21-25.

[10] Иванушкин В.А., Сарапулов Ф.Н., Шымчак П., *Структурное моделирование электромеханических систем и их элементов.*. Wyd. Politechniki Szczecińskiej, 2000 r.,

[11] Szymczak P., *Dinamiczeskaja model i strukturnaja schiema liniejnogo asynchronnogo dvigatiela.* Elektriczestvo, 2003 Nr 11, s. 56-63.

[12] Сарапулов Ф.Н, Сарапулов С.Ф., Шымчак П., *Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения: Учебное пособие*, 2-е издание, перераб. и дополн. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005.

[13] Szymczak P. *Modeling and transient analysis of the linear induction motor by detailed structural schemes.* Przegląd Elektrotechniczny 2007, nr 11, s. 128-130.

[14] Idiyatulin A.A., Fatkullin S.M., Sarapulov S.F, Sarapulov F.N. *Simulation of the Multifunctional Melting Unit.*, Proc. of IFOST-2008, 23-29. 06. 2008, Novosibirsk-Tomsk, pp. 425-429.

***Autorzy**: mgr inż. Idiyatulin Aleksiej Aleksandrowicz, Katedra Elektrotechniki i Systemów Elektrotechnologicznych Uralskiego Państwowego Technicznego Uniwersytetu, 620002 Jekaterynburg, ul. Mira 19, E-mail: idiyatulin@mail.ru;*
doc. dr inż. Sarapułow Siergiej Fiodorowicz, Katedra Elektrotechniki i Systemów Elektrotechnologicznych Uralskiego Państwowego Technicznego Uniwersytetu, 620002 Jekaterynburg, ul. Mira 19, E-mail: sarapulovfn@yandex.ru;
dr inż. Piotr Szymczak, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, E-mail: piotr.szymczak@zut.edu.pl;
dr inż. Marcin Wardach, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, E-mail: marwar@zut.edu.pl

Rewolucja w uziemieniach i ochronie odgromowej

Uchwyt gąsiorowy

Podwójna powłoka cynkowa i lakiernicza zapewnia odporność korozyjną przez kilkadziesiąt lat

Bednarka pomiedziowana

Powłoka miedziana o grubości 0,070 mm skutecznie zabezpiecza przed korozją przez kilkadziesiąt lat

Drut pomiedziowany (przewód uziemiający)

Powłoka miedziana o grubości 0,070 mm skutecznie zabezpiecza przed korozją przez kilkadziesiąt lat

Uziom pomiedziowany

Powłoka miedziana o grubości 0,250 mm, nie do zdarcia podczas wbijania, zabezpiecza przed korozją przez kilkadziesiąt lat

Trwałość i estetyka

Wychodząc naprzeciw potrzebom klientów, którzy chcą czuć się bezpiecznie w swoich domach proponujemy nową ochronę odgromową opracowaną na potrzeby budownictwa.

Proponujemy produkty do realizacji estetycznej ochrony odgromowej opartej na drutach i bednarkach stalowych pomiedziowanych. Mając na względzie trwałość instalacji zabezpieczającej mienie i życie ludzkie zaprojektowaliśmy kompletną ochronę odgromową w oparciu o przewody wykonane ze stali miedziowanej elektrolitycznie oraz elementy mocujące i złączne zabezpieczone przed korozją szczelną, podwójną powłoką cynkową i lakierniczą.

Elementy nowej ochrony odgromowej zostały kompleksowo zbadane zgodnie z wymaganiami normy PN EN 50164-1, PN EN 50164-2, PN EN 60068-2-52, PN ISO 6957, PN EN ISO 6988 w laboratoriach Politechniki Warszawskiej Wydziału Inżynierii Materiałowej oraz Instytutu Mechaniki Precyzyjnej. Wyniki badań potwierdzają odporność przewodów pomiedziowanych na wszelkiego rodzaju agresywne atmosfery.

Galmar Marciniak s.j.
ul. Kobylińska 5
61-424 Poznań, Polska
tel. +48/61/835 80 00
tel. export +48/61/835 80 01
fax +48/61/830 10 20

e-mail: office@galmar.pl
www.galmar.pl

ISBN 978-83-7481-327-3