

**Aleksiej A. IDIJATULIN<sup>1</sup>, Siergiej F. SARAPUŁOW<sup>1</sup>,  
Piotr SZYMCZAK<sup>2</sup>, Marcin WARDACH<sup>2</sup>**

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**

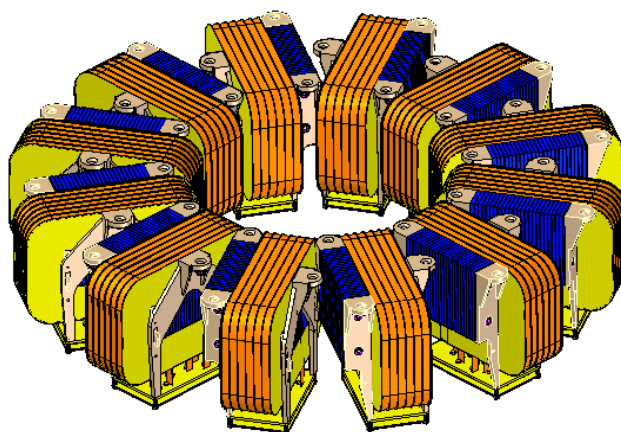
WMEM może posiadać dwa wzbudniki: jeden spełniający funkcję grzania i wytopu metalu (element grzejny), drugi – funkcję elektromechanicznego sterowania cyrkulacją metalu (element mieszania). Funkcje wzbudników są zatem ściśle rozdzielone. Niewykluczone przy tym są warianty, w których jeden wzbudnik spełnia 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 wypełnienia uzwojeń. Rdzeń składający się z płytek powinien być tak połączony i ściągnięty, aby stanowił dostatecznie sztywną konstrukcję mechaniczną podstawy WMEM, zapewniającą jego

## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

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.

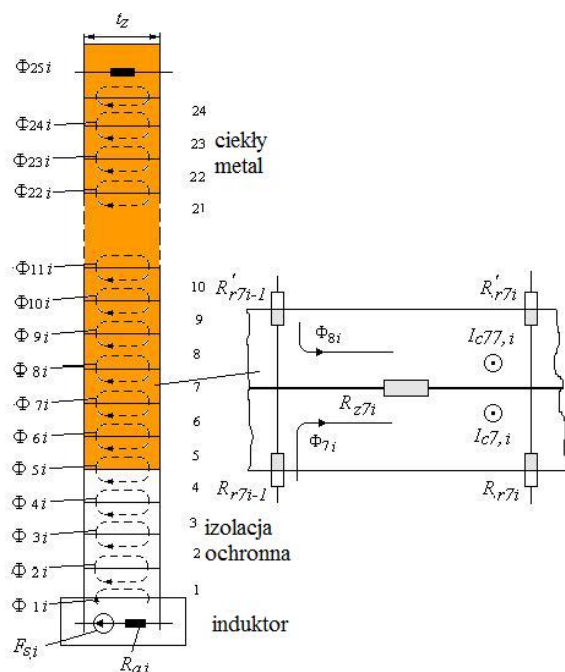
W procesie projektowania rozważano dwie możliwości rozmieszczenia wzbudników: oba wokół bocznej powierzchni tygła, jeden wzbudnik, tzw. grzejny, obejmuje boczną powierzchnię tygła, natomiast drugi, tzw. wirujący - pod dnem tygła. Rozwiązanie drugie nie zawsze jest efektywne, a w niektórych przypadkach 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, celem 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.

Przeanalizujemy 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:

$$(1) \quad \begin{cases} (Z_i)(\Phi_i) - (R_{i2})(\Phi_2) = (F_s), \\ \dots \\ -(R_{i,i-1})(\Phi_{i-1}) + (Z_i)(\Phi_i) - (R_{i,i+1})(\Phi_{i+1}) = 0, \\ \dots \\ -(R_{Q,Q-1})(\Phi_Q) + (Z_{Q+1})(\Phi_{Q+1}) = 0. \end{cases}$$

dla  $i = 1 \dots Q$

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.

## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

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

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

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]

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

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

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

gdzie elementy współczynników macierzy wynoszą odpowiednio:

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

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

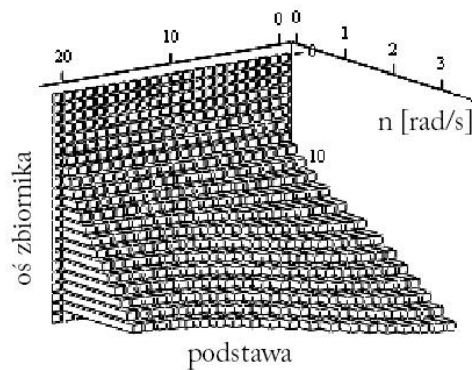
$$F_{jed,ij} = \frac{F_{ring}}{2 \cdot \pi \cdot r_{i,j} \cdot h_r \cdot h_z} - \text{jednostkowa siła pociągowa w pierścieniu o numerze } i,j.$$

$\eta_{din}$  – współczynnik lepkości z uwzględnieniem turbulencji.

Badania doświadczalne wykazały [3], że obliczeniowy rozkład prędkości ciekłego wsadu dla typowych indukcyjnych pieców tyglowych daje zadowalające dla obliczeń inżynierskich wyniki, gdy wartość  $\eta_{din}$  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 lepkiem. Zgodnie z drugą zasadą Newtona mamy:

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

## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

gdzie  $m$  – masa metalu w tyglu  
 $a$  – przyspieszenie,  $m/s^2$   
 $F$  – siła pociągowa, N  
 $F_{mp}$  – siła tarcia o ścianki tygla i podstawę pieca, N

Dalej możemy napisać, że:

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

gdzie  $S_{cm}$  - średnia powierzchnia ścianki tygla,  $m^2$   
 $S_n$  - powierzchnia podstawy pieca,  $m^2$   
 $\eta_{din}$  – współczynnik średniej lepkości dynamicznej,  $Ns/m^2$

Wartość przyspieszenia z (5) wynosi:

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

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

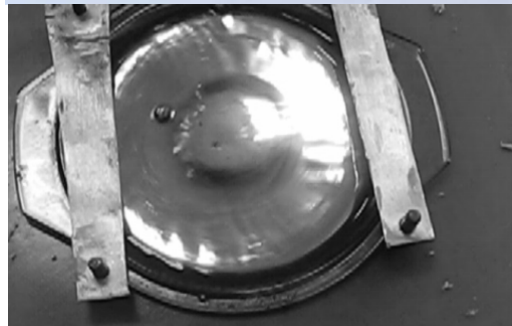
$$(8) \quad t = \frac{V}{a} = \frac{V \cdot m}{F - F_{mp}} = \frac{V \cdot m}{F - (S_{cm} + S_n) \cdot \eta_{din}}$$

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

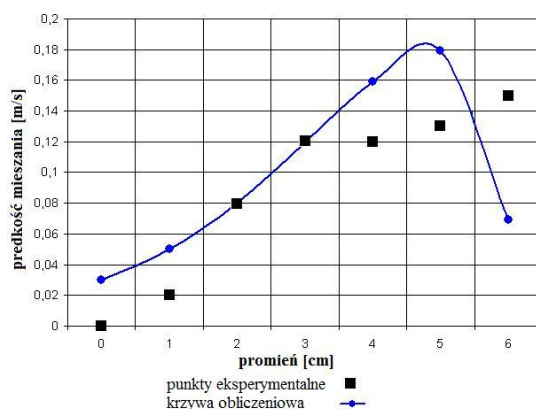
a)



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.



## **VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010**

- [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. Оpubл. 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 г.,
- [11] Szymczak P., *Dinamiczeskaja model i strukturalnaja schiema liniejnogo asynchronnogo dwigatiela.* Elektrizestvo, 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. Sarapulow 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

