Seria: HUTNICTWO z. 18

Nr kol. 606

Franciszek FIKUS, Tadeusz WIECZOREK, Stanisław GÓRA, Zygmunt SZCZEPAŃSKI

OBLICZANIE PARAMETROW ELEKTROMAGNETYCZNEGO DOZOWNIKA TRÓJFAZOWEGO DO CIEKŁYCH METALI

> <u>Streszczenie</u>. W pracy przedstawiono zasadę działania i obliczenia elektromagnetycznego dozownika trójfazowego do ciekłych metali. Dozownik ten stanowi oryginalne, opatentowane rozwiązanie autorów. W stosunku do innych, polskich i zagranicznych elektromagnetycznych urządzeń dozujących, urządzenie to zezwala na osiąganie większych wysokości podnoszenia przy dużych wydajnościach. Konstrukcyjnie dozownik został tak rozwiązany, aby mógł być dobudowany do dowolnego pieca metalurgicznego. Może on być zastosowany do odlewania metali nieżelaznych a w przyszłości przewiduje się, że również do stopów żelaza.

1. WSTEP

Badania nad elektromagnetycznymi (magnetohydrodynamicznymi) urzędzeniami do przemieszczania ciekłych metali w metalurgii prowadzone sę obecnie w wielu krajach świata, a w tym także w Polsce w Zakładzie Elektrotechniki i Elektrotermii Instytutu Metalurgii Politechniki Śląskiej w Katowicach. Opracowano już kilka prototypów przemysłowych urzędzeń, wśród których do najlepiej zbadanych i wypróbowanych należą dozowniki – elektrodynamiczny i kondukcyjny. Stwierdzono, że urzędzenia te posiadają następujące zalety: niewielkie zużycie energii elektrycznej, możliwość regulacji wielkości dawki w szerokich granicach, prostę budowę (szczególnie elektrodynamiczny), dużą bezawaryjność pracy i inne. Jednak, zakres ich stosowania poważnie ogranicza wysokość podnoszenia metalu. Dla dozownika elektrodynamicznego wynosi ona ok. 15-20 cm, natomiast dla kondukcyjnego ok. 30-40 cm, jednak przy niewielkiej wydajności. Tak więc, w procesach, w których wymagana jest większa wysokość podnoszenia i wyższa wydajność nie można ich stosować.

Z tych powodów w Instytucie Metalurgii opracowano nowy typ urządzenia, tzw. dozownik trójfazowy^{X)}. Obecnie na zbudowanym prototypie prowadzone są próby dozowania.

x)Urządzenie to zostało zgłoszone w UP PRL i otrzymało patent tymczesowy nr P 202605.

2. ZASADA UZIAŁANIA DOZOWNIKA TRÓJFAZOWEGO

Dozownik trójfazowy przedstawiono schematycznie na rys. 1. Składa się on ze wzbudnika (1) wytwarzającego magnetyczne pole biegnące, rdzenia ma-



Rys. 1. Schemat ideowy dozownika trójfazowego

1 - uzwojenie 3-fazowe, 2 - rdzeń magnetyczny, 3 ciekły metal w kanale ceramicznym, 4 - rura łącząca z piecem, 5 - kanał wylewowy gnetycznego (2) i kanału ceramicznego (3), posiadającego rurę łączącą z piecem (4) i kanał wylewowy (5), Zaseda działania dozownika polega na wykorzystaniu sił powstających w ciekłym metalu, na skutek oddziaływania prądów wyindukowanych w nim i biegnącego pola magnetycznego wzbudnika.

Biegnace pole magnetyczne wytwarzane przez wzbudnik dozownika trójfazowego ma analogiczny przebieg i własności jak pole biegnące elektrycznego silnika liniowego. Jedyna różnica polega na tym, że pole uzyskiwane w dozowniku jest polem biegnącym cylindrycznym, natomiast w silniku jest ono polem płaskim, Kierunek poruszania się pola (a tym samym kierunek siły działającej na ciekły melal w kanale dozownika z rys. 1) zależny jest od kolejności faz w uzwojeniu trójfazowym wzbudnika. W związku z tym dozownik z magnetycznym polem biegnącym (rys. 1) moze być wykorzystywany zarówno jako pompa (siła działa ku górze) lub jako zawór (siła działa w dół), przy czym w czasie pracy zaworowej metal oprócz tego, że jest wtłaczany do zbiornika, nagrzewa się jeszcze dodatkowo pradami indukowanymi. W porówna-

niu z dozownikami jednofazowymi jest to zaleta zwiększająca możliwości stosowania urządzenia.

3. ANALIZA MATEMATYCZNA DOZOWNIKA TRÓJFAZOWEGO

W rozdziałe tym przedstawi się obliczenie rozkładu pola elektromagnetycznego, mocy i sił w dozowniku trójfazowym z cylindrycznym polem biegnącym. Zagadnienia te zostaną rozwiązane za pomocą metody dokładnej w oparciu o równania różniczkowe pola elektromagnetycznego.

Model obliczeniowy dla analizowanego zagadnienia przedstawiono na rys. 2. Uwzględniono w nim skończoną wysokość wzbudnika oraz odległości pomiędzy poszczegolnymi cewkami. Zezwala to na przeprowadzenie dokładnej analizy pracy dozownika.



Rys. 2. Model obliczeniowy dozownika trójfazowego 1 – rdzeń magnetyczny, 2 – uzwojenie, 3 – ciekły metal, 4 – szczelina między metalem a wzbudnikiem I-V – obszary obliczeniowe

Zagadnienie zostanie rozwiązane w oparciu o metodę całki Fouriera [2, 3, 4].

3.1. Potencjał wektorowy

Punktem wyjścia do obliczeń jest równanie różniczkowe potencjału wektorowego Ā, które we współrzędnych walcowych przyjmuje postac:

(5)

$$\frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - (\frac{1}{r^2} + m^2)A = 0, \qquad (1)$$

gdzie:

$$\bar{A} = \bar{A}(r, \mathcal{C}, z) = A(r, z) I_{\mathcal{C}} e^{j\omega t} = A$$
(2)
$$m^{2} = j\omega G \mu_{0}.$$

Wektory pola elektromegnetycznego wyrażają się za pomocą potencjału wektorowego w postaci

$$\bar{B} = \mu \bar{H} = rot \bar{A}, \qquad (3)$$
$$E = -\frac{\partial \bar{A}}{\partial t}.$$

Rozwiązanie ogólne równania (2) ma postać całki Fouriera

$$\bar{A} = \int_{0}^{\infty} \left[CI_1(pr) + DK_1(pr) \right] \cos kz + \left[C'I_1(pr) + D'K_1(pr) \right] \sin kz \right] dk, \qquad (4)$$

gdzie:

$$p = \sqrt{k^2 + j\omega G\mu_0}$$

W poszczególnych obszarach obliczeniowych (rys. 2) równanie (4) ma postać:

$$A_{2} = \int_{0}^{\infty} \left\{ \begin{bmatrix} C_{2}I_{1}(kr) + D_{2}K_{1}(kr) \end{bmatrix} \cos kz + \begin{bmatrix} C_{2}'I_{1}(kr) + D_{2}'K_{1}(kr) \end{bmatrix} \sin kz \right\} dk,$$

$$A_{3} = \int_{0}^{\infty} \left\{ \begin{bmatrix} C_{3}I_{1}(kr) + D_{3}K_{1}(kr) \end{bmatrix} \cos kz + \begin{bmatrix} C_{3}'I_{1}(kr) + D_{3}'K_{1}(kr) \end{bmatrix} \sin kz \right\} dk,$$

$$A_{4} = \int_{0}^{\infty} \left\{ \begin{bmatrix} C_{4}I_{1}(pr) + D_{4}K_{1}(pr) \end{bmatrix} \cos kz + \begin{bmatrix} C_{4}'I_{1}(pr) + D_{4}'K_{1}(pr) \end{bmatrix} \sin kz \right\} dk,$$

$$A_{5} = \int_{0}^{\infty} \begin{bmatrix} D_{5}K_{1}(kr) \cos kz + D_{5}'K_{1}(kr) \sin kz \end{bmatrix} dk.$$

Potencjału w obszarze i nie podaje się, gdyż obszar ten jest rdzeniem magnetycznym i nie podlega obliczeniom. Potencjały (5) spełniają następujące warunki brzegowe:

$$A_{2} = A_{3} \quad dla \quad r = R_{2},$$

$$A_{3} = A_{4} \quad dla \quad r = R_{3},$$

$$A_{4} = A_{5} \quad dla \quad r = R_{4},$$

$$H_{z2} = 0 \quad dla \quad r = R_{1},$$

$$H_{z2} - H_{z3} = \mu_{0} 0 \quad dla \quad r = R_{2},$$

$$H_{z3} = H_{z4} \quad dla \quad r = R_{3},$$

$$H_{z4} = H_{z5} \quad dla \quad r = R_{4}.$$

gdzie:

$$H_{zi} = \frac{1}{r} \frac{\partial (r A_i)}{\partial r} = \frac{A_i}{r} + \frac{\partial A_i}{\partial r}.$$
 (7)

Wprowadzając potencjały (5) do warunków brzegowych (6) oraz korzystając z rozwinięcia okładu prądowego wzbudnika na całkę Fouriera:

$$J(z) = \int_{0}^{\infty} \left[J_{c} \cos kz + J_{s} \sin kz \right] dk$$
(8)

$$D_{c} = \frac{NI}{2Th k} \sum_{n=1}^{12} e^{-j\alpha_{n}} \operatorname{sinkh} \operatorname{cosk}(2n-1)(h+h_{1})$$

$$D_{s} = \frac{NI}{Th k} \sum_{n=1}^{12} e^{-j\varphi_{n}} \operatorname{sinkh sink}(2n-1)(h+h_{1}),$$

gdzie:

$$q_n = \frac{T}{3}(n-1)$$
.

Potencjał wektorowy we wsadzie (A_d) przyjmie postać ostateczną:

$$A_{4} = \frac{NI_{H_{0}}R_{2}}{3Th R_{3}} \int_{0}^{\infty} \frac{\sin kh}{k^{2}} M_{3} \frac{M_{2}I_{1}(pr) + M_{1}K_{1}(pr)}{M} \sum_{n=1}^{12} e^{-j\varphi_{n}} cosk \left[z - (2n-1)(h+h_{1})\right] dk,$$
(9)

gdzie:

.

$$M_{1} = qI_{0}(pR_{4}) K_{1}(kR_{4}) + I_{1}(pR_{4}) K_{0}(kR_{4}),$$

$$M_{2} = qK_{0}(pR_{4}) K_{1}(kR_{4}) - K_{1}(pR_{4}) K_{0}(kR_{4}),$$

$$M_{3} = K_{0}(kR_{1}) I_{1}(kR_{2}) + K_{1}(kR_{2}) I_{0}(kR_{1}),$$

$$M = M_{4} \Big[M_{2}I_{1}(pR_{3}) + M_{2}K_{1}(pR_{3}) \Big] - qM_{5} \Big[M_{2}I_{0}(pR_{3}) - M_{1}K_{0}(pR_{3}) \Big], \quad (10)$$

$$M_{4} = I_{0}(kR_{3}) K_{0}(kR_{1}) - K_{0}(kR_{3}) I_{0}(kR_{1}),$$

$$M_{5} = I_{1}(kR_{3}) K_{0}(kR_{1}) + K_{1}(kR_{3}) I_{0}(kR_{1}),$$

$$q = \frac{P}{k}.$$

3.2. <u>Indukcja magnetyczna, gęstość prędów indukowanych i moc wydziela-</u> <u>na</u>

Indukcja magnetyczna w ciekłym metalu, zgodnie z (3), przyjmuje postać:

$$B_{r4} = -\frac{\partial A_4}{\partial z},$$

$$B_{z4} = \frac{1}{r} \frac{\partial (rA_4)}{\partial r},$$
(11)

gdzie A₄ dane jest równaniem (9).

Gęstość prędów indukowanych ${\rm J}_4$ w ciekłym metalu, zgodnie z (3), wynosi

$$J_{A} = -j\omega \tilde{G} A_{A}.$$
 (12)

Gęstość mocy czynnej wydzielanej w metalu można obliczyć w oparciu o (12):

$$P_{v4} = \frac{1}{6} \left| J_4 \right|^2, \tag{13}$$

Obliczanie parametrów elektromagnetycznego dozownika...

a całkowitą moc zgodnie ze wzorem

$$P = \int_{V} P_{V} dV.$$
 (14)

3.3. Siła, ciśnienie, wysokość podnoszenia i wydajność

Gęstość sił objętościowych, wynosi

$$F_{zer} = -\frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[J_4 B_{r4}^* \right].$$
 (15)

Ciśnienie p_z, działające na ciekły metal w kanale dozownika, można obliczyć całkując (15) po wysokości kanału:

$$P_{z} = -\frac{1}{2} \int_{0}^{1} \operatorname{Re} \left[J_{4} \cdot B_{r4}^{*} \right] dz, \qquad (16)$$

gdzie:

wysokość kanału dozownika.

Średnią wysokość podnoszenia h_p oblicza się, znając ciśnienie p_z ze wzoru

$$P_z = \delta h_p, \qquad (17)$$

gdzie:

y - ciężar właściwy metalu.

Wydajność (Q) dozownika można określić na podstawie prędkości ciekłego metalu w kanale (V_m):

$$Q = \mathcal{T}(R_2^2 - R_1^2) V_m = 2\mathcal{T}f\tau(1-s)(R_2^2 - R_1^2).$$
(18)

3.4. Przykład obliczeniowy

Obliczenia parametrów dozownika trójfazowego wg metody dokładnej, zgodnie ze wzorami (9) - (18) wykonano na maszynie cyfrowej "Odra 1305" w Ośrodku Obliczeniowym Politechniki Ślęskiej w Gliwicach. Do obliczeń przyjęto następujące dane:

 $R_1 = 0,075 \text{ m};$ $R_2 = 0,101 \text{ m};$ $R_3 = 0,135 \text{ m};$ $R_4 = 0,160 \text{ m};$ h = 0,018 m; $h_1 = 0,003 \text{ m};$ r = 0,135 m; C,160 m;

z	= -	-0,02	m ;	0,003	m ş	0,039	m ;	0,162	m ş	0,249	m;	0,252	m ;
	c	0,333	m ;	0,339	m ;	0,417	m;	0,465	m;	0,501	m;	0,701	м.
μ,	=	4 F .	. 10 ⁻⁷	H .	б ×)	= 0,27	107	<u>S</u> ; ω	= 314	4,1 <u>1</u> .			

Na podstawie (11) uzyskano rozkłady składowej B^{XX)} indukcji magnetycznej na powierzchni wewnętrznej (r = 0,135 m) i zewnętrznej (r = 0,160 m) kanału z ciekłym metalem. Uzyskane wyniki, w stosunku do okładu prądowego NI, przedstawiono na rys. 3.

Gęstość prądu indukowanego w kanale dozownika, obliczoną w oparciu o (12), przedstawiono na rys. 4 (w stosunku do NI).

Na podstawie uzyskanych wyrażeń na gęstość prędu i składową promieniową indukcji magnetycznej wykreślono zależności gęstości mocy czynnej wydzielanej w ciekłym metalu (rys. 5) i gęstości objętościowej sił ponderomotorycznych (rys. 6).

Całkując uzyskane f_{zśr} wzdłuż wysokości kanału dozownika (zgodnie z 16) uzyskano ciśnienie p_z na powierzchniach wewnętrznej i zewnętrznej kanału, czyli

- dla r = Rz

$$P_{z1} = \frac{P_z}{N^2 r^2} = 547,38 \ 10^{-6} \ \frac{N}{m^2 A^2},$$

- dla r = R_d

$$P_{z2} = \frac{P_z}{N^2 I^2} = 68,38 \ 10^{-6} \ \frac{N}{m^2 A^2}.$$

Tak więc średnie ciśnienie w kanale wynosi:

$$\frac{P_{zsr}}{N^2 I^2} = \frac{P_{z1} + P_{z2}}{2} = 307,88 \ 10^{-6} \ \frac{N}{m^2 A^2},$$
(19)

X) Do obliczeń przyjęto konduktywność ciekłego cynku.

^{XX)}Z uwagi na to, że pomiędzy kolejnymi cewkami uzwojenia wzbudnika dozownika znajdują się przekładki izolacyjne o grubości kilku mm (przerwy między cewkami widoczne na rys. 1) dokładny przebieg indukcji nie jest tak gładki, jak to przedstawiono na rysunku. Na przekładkach będę bowiem występować ostrzejsze spadki indukcji, niż na wysokości cewki. W związku z tym przedstawione przebiegi należy traktować jako uśrednione.





Rys. 3. Składowa promieniowa indukcji magnetycznej a – dla $r = R_3$; b – dla $r = R_4$

Ь)





Rys. 4. Gęstość prądu indukowanego w ciekłym metalu a – dla r = R_3 ; b – dla r = R_4





natomiast średnia siła podnosząca metal:

$$\frac{f_{z \circ r}}{N^2 I^2} = \frac{P_{z \circ r}}{N^2 I^2} (R_2^2 - R_1^2) \mathcal{F} = 7,14 \ 10^{-6} \frac{N}{A^2}.$$
 (20)

Wysokość podnoszenia, zgodnie z (17), wynosi

$$\frac{n_p}{N^2 I^2} = \frac{p_{zer}}{N^2 I^2} = 4,55 \ 10^{-9} \ \frac{m}{A^2}.$$
 (21)

Całkowita moc czynna wydzielana w ciekłym metalu, zgodnie z (14), wynosi:

$$\frac{P}{N^2 I^2} = 0,024 \ 10^{-2} \frac{W}{A^2}.$$
 (22)

Celem obliczenia wydajności założono poślizg s = 0,98 [5]. Wtedy średnia prędkość ciekłego metalu w kanale wynosi

$$v_m = (1-s)2\hat{l}f = 0,25\frac{m}{c}$$
 (23)

natomiast wydajność, zgodnie z (18)

$$Q = 0,005 \frac{m^3}{s},$$

uwzględniając gęstość właściwą ciekłego cynku

$$Q = 142.8 \frac{t}{5}$$
 (24)

Wyrażenia (19) - (24) określają podstawowe parametry zaprojektowanego dozownika.

4. PODSUMOWANIE

Dozownik trójfazowy jest nowym, oryginalnym rozwiązaniem w zakresie elektromagnetycznych urządzeń dozujących, współpracujących z piecami metalurgicznymi. Przeprowadzone analiza matematyczna urządzenia wykazała, że dozownik trójfazowy zezwala na uzyskiwanie dużych wydajności (np. dla Zn ponad 100 t/h), przy stosunkowo dużych wysokościach podnoszenia. Poza tym charakteryzuje się prostą budową.

Urządzenie to stwarza znaczne możliwości wykorzystania w nowo budowanych i modernizowanych odlewniach. Może być zastosowane do opróżniania

Obliczanie parametrów elektromagnetycznego dozownika...

stałych pieców metalurgicznych z jednoczesną możliwością regulacji dawki ciekłego metalu. Oprócz tego może służyć do zalewania form umieszczonych na przenośniku taśmowym lub karuzelowym, albo do zalewania maszyn ciśnieniowych.

LITERATURA

- Krumin J.K.: Wzaimodiejstwije bieguszczego magnitnogo pole s prowodiaszczej sredoj. Zinatnie, Riga 1969.
- [2] Fikus F., Sajdak C., Wieczorek T.: K woprosu rasczieta cilindriczeskich... WELC, Moskwa 1977.
- [3] Fikus F., Wieczorek T., Sajdak C.: Urzędzenia MHD do dozowania i mieszania ciekłych metali. V Konferencja Elektrotermii, Katowice 1977.
- [4] Fikus F., Sajdak C., Wieczorek T.: Obliczanie pola elektromagnetycznego i sił ponderomotorycznych w cylindrycznych mieszadłach do ciekłych metali. Archiwum Elektrotechniki (w druku).
- Werte L.A.: Magnitnaja gidrodynamika w mietałżurgii. Mietałżurgia, Moskwa 1977.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТРЁХФАЗНОГО ДОЗАТОРА. ДЛЯ ЖИЛКИХ МЕТАЛЛОВ

Резюме

В статье рассматриватся принцип действия и вычисления электромагнитного трёхфазного дозатора для жидкого металла. Этот дозатор нвляется оргинальным, патентованное решение авторов. В соотношении к другим, польским и заграничным электромагнитным устройствам дозирующим это устройство даёт возможность достичь больших высот подбёма при большой пронзводительности. Дозатор сконструирован ток, что может быть достоен к любой металлургической печи. Его можно применить для литья цветных металлов а в будущем предусматривается тоже для литья сплавов железа.

CALCULATION OF PARAMETERS OF LIQUID METALS ELECTRO-MAGNETIC THREE-PHASE FEEDER

Summary

The paper presented the principle of operation and of calculation of the liquid metals electro-magnetic three-phase feeder. The feeder is an original, patented construction of its authors. In comparison to the other, electro-magnetic feeders designed in Poland and abroad, this device allows for acchieving greater elevation heights, remaining highly afficient. The feeder has been designed in this way that it can be built up into any metallurgic furnace. It can be utilized in non-ferrous metals casting, and is in future expected to serve in iron alloys casting.