ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1981

Seria: ELEKTRYKA z. 76 Nr kol. 689

Tomasz TROJOK

Walcownia Metali - Dziedzice

WPŁYW UKSZTAŁTOWANIA KANAŁU PIECA INDUKCYJNEGO NA WYDZIELONĄ W NIM ENERGIĘ CIEPLNĄ

Streszczenie. Dla kanału pieca indukcyjnego o przekroju prostokątnym, najczęściej występującym w praktyce, określono korzystne ze względu na przemianę energii elektrycznej w ciepło ukształtowania kanału. Rozważania prowadzono stosując teorię rozchodzenia się elektromagnetycznej fali płaskiej, zweryfikowaną pomiarami w układzie rzeczywistym pieca.

1. WPROWADZENIE

Fala elektromagnetyczna wysyłana przez wzbudnik pieca indukcyjnego kanałowego (p.i.k) niesie ze sobą energię określoną przez części rzeczywistą i urojoną wektora Poytinga $\underline{S}$. Zagadnienie ciepła Q wydzielonego w kanale sprowadzono do określenia maksimum części rzeczywistej S_a wektora Poytinga [1]

$$Q \sim S_a = \mathrm{Re}\,(\underline{S}). \tag{1}$$

Analizując założenia teorii rozchodzenia się elektromagnetycznej fali płaskiej stwierdzono potrzebę analizy zespołu założeń prowadzących do przyjęcia określonego rozkładu składowej stycznej H_s wektora natężenia pola magnetycznego na powierzchniach kanału p.i.k. [2]. Przeprowadzono pomiary powyższej składowej w układzie rzeczywistego p.i.k. i stwierdzono jej występowanie na wszystkich powierzchniach kanału [3].

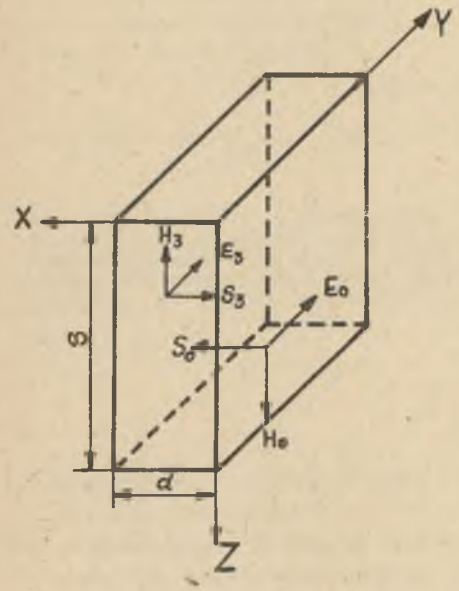
W związku z liniowością ośrodka wypełniającego kanał sumowano energie cieplne wnoszone przez fale elektromagnetyczne.

Przeanalizowano dwa przypadki:

- fala elektromagnetyczna pada na powierzchnię kanału,
- dwie identyczne fale elektromagnetyczne padają na przeciwległe powierzchnie kanału.

2. CIEPŁO NIESIONE PRZEZ POJEDYNCZĄ FALĘ ELEKTROMAGNETYCZNĄ

W wypadku kanału o przekroju prostokątnym punkt poniższy dotyczy powierzchni wewnętrznej, tj. bliżej położonej od wzbudnika p.i.k. niż powierzchnia zewnętrzna kanału.



Rys. 1. Wektory H,E,S na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni kanału

Na rysunku 1 pokazano wektory występujące na tych powierzchniach.

Na podstawie układu równań Maxwella w postaci zespolonej określono wektory natężenia pola magnetycznego $\underline{H}$ i natężenia pola elektrycznego $\underline{E}$ w kanale p.i.k. [4,1]. Znajomość powyższych wektorów pozwala na określenie ilości ciepła Q ze wzoru (1), gdyż:

$$\underline{S} = \frac{1}{2}\left[\underline{E}\ \underline{H}^{*}\right] \qquad (2)$$

gdzie:

$\underline{H}^{*}$ - wektor sprzężony z wektorem $\underline{H}$.

Dla powierzchni wewnętrznej kanału otrzymano:

$$Q_o \sim \frac{H_o^2}{2\gamma\varepsilon}\left[\frac{\operatorname{sh}\frac{2(d-x)}{\varepsilon} + \sin\frac{2(d-x)}{\varepsilon}}{\operatorname{ch}\frac{2d}{\varepsilon} - \cos\frac{2d}{\varepsilon}}\right] \qquad (3)$$

i analogicznie dla powierzchni zewnętrznej:

$$Q_3 \sim \frac{H_3^2}{2\gamma\varepsilon}\left[\frac{\operatorname{sh}\frac{2x}{\varepsilon} + \sin\frac{2x}{\varepsilon}}{\operatorname{ch}\frac{2d}{\varepsilon} - \cos\frac{2d}{\varepsilon}}\right] \qquad (4)$$

gdzie:

γ - rezystywność metalu w kanale,

Q_o - ciepło wnoszone przez falę elektromagnetyczną padającą na wewnętrzną powierzchnię kanału,

Q_3 - ciepło wnoszone przez falę elektromagnetyczną padającą na zewnętrzną powierzchnię kanału,

H_o - składowa styczna wektora H na powierzchni wewnętrznej kanału o przekroju prostokątnym,

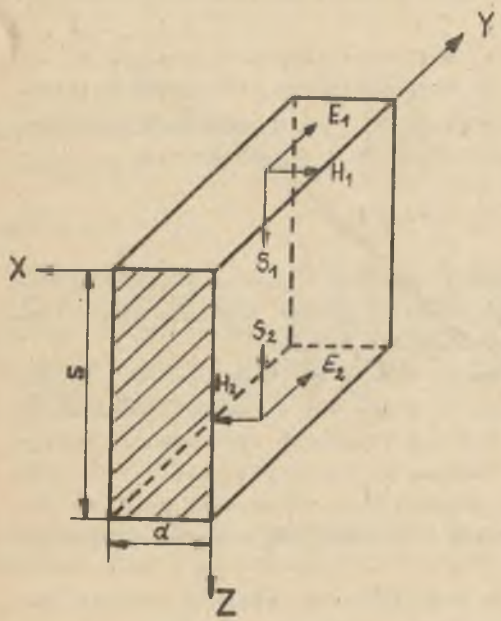
H_3 - składowa styczna wektora H na powierzchni zewnętrznej kanału o przekroju prostokątnym.

Z analizy zależności (3) i (4) wynika, że wartości Q_o i Q_3 są maksymalne przy spełnieniu:

$$\frac{d}{g} > 1{,}57 \quad \text{lub} \quad \frac{d}{g} < 1{,}1. \tag{5}$$

Stwierdzono również silny wpływ, zależnych przede wszystkim od odległości kanału i wzbudnika, wartości składowych stycznych H_o i H_3 na wartości Q_o i Q_3 ($Q \sim H_s^2$).

3. CIEPŁO NIESIONE PRZEZ IDENTYCZNE FALE ELEKTROMAGNETYCZNE PADAJĄCE NA PRZECIWLEGŁE POWIERZCHNIE



Rys. 2. Wektory H,E,S na bocznych powierzchniach kanału

W przypadku kanału o przekroju prostokątnym poniższy punkt dotyczy powierzchni bocznych. Na rysunku 2 pokazano kierunki wektorów $\underline{E}_1$, $\underline{E}_2$, $\underline{H}_1$, $\underline{H}_2$ charakteryzujących poszczególne fale elektromagnetyczne. Wektory $\underline{E}_1$ i $\underline{E}_2$ mają ten sam kierunek, zwrot i wartości liczbowe. Wektory $\underline{H}_1$ i $\underline{H}_o$ charakteryzują się przeciwnymi zwrotami, tym samym kierunkiem i wartością liczbową. Wektory Poytinga $\underline{S}_1$ i $\underline{S}_2$ mają przeciwny zwrot, ten sam kierunek i wartość liczbową.

Postępując analogicznie jak w punkcie 2 oraz opierając się na pracach [5,6] otrzymano:

$$Q_1 + Q_2 \sim \frac{(H_o + H_3)^2}{8\gamma g}\left[\frac{\operatorname{sh}\frac{s-2z}{g} + \sin\frac{s-2z}{g}}{\operatorname{ch}\frac{s}{g} - \cos\frac{s}{g}}\right] \tag{6}$$

gdzie:

Q_1, Q_2 - ciepła wnoszone przez fale elektromagnetyczne padające na boczne powierzchnie kanału.

Z analizy wzoru (6) wynika, że przy spełnieniu jednego z poniższych warunków:

$$\frac{s}{g} > 3,14 \quad \text{lub} \quad \frac{s'}{g} < 2,2 \tag{7}$$

wartości Q_1 i Q_2 osiągają maksimum.

Wielkości Q_1 i Q_2 są wprost proporcjonalne do kwadratu składowej stycznej ($Q \sim H_s^2$), której wartość zależy przede wszystkim od odległości kanał - wzbudnik.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

W oparciu o wyznaczony na podstawie pomiarów rozkład wektora H_s określono najkorzystniejsze ze względu na przemianę cieplną zależności wymiarów kanału o przekroju prostokątnym. Zależności te są określone przez wzory (5) i (7).

Niemniej określenie najkorzystniejszej geometrii kanału ze względu na wydzielone w nim ciepło nie upoważnia do bezpośredniego zastosowania zależności (5) i (7) w praktyce przemysłowej. Można bowiem zwiększyć ilość ciepła Q, które dla kanału o przekroju prostokątnym równa się:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \tag{8}$$

lecz jednocześnie zmniejszyć intensywność wymiany cieplnej pomiędzy kanałem a wanną p.i.k., gdzie odbywa się właściwy proces topienia zimnego wsadu i nie uzyskać zmniejszenia energochłonności p.i.k.

Ograniczenie dowolności ukształtowania kanału wprowadza sposób ubijania wyłożenia ogniotrwałego dna pieca, co wiąże się z koniecznością zachowania swobodnego dostępu od góry do każdego fragmentu powierzchni kolejnych warstw materiału ceramicznego. Stosunkowo niska wytrzymałość termiczna wyłożenia ogniotrwałego ogranicza zmniejszanie odległości pomiędzy kanałem a wzbudnikiem, co zwiększa wartość składowej H_s natężenia pola magnetycznego.

Oprócz tego należy brać pod uwagę, iż zaprojektowane wymiary szablonu kanału ulegają ciągłym zmianom w trakcie eksploatacji pieca.

Reasumując zależność (5) i (7) mają znaczenie pomocnicze przy projektowaniu geometrii kanału pieca indukcyjnego, jak również interpretacji jego własności w trakcie eksploatacji.

LITERATURA

[1] Wajnberg A.M.: Indukcjonnyje pławilnyje pieczi. Energija, Moskwa 1967.

[2] Trojok T., Skrobol S., Paździorek Z.: Wybrane założenia teorii grzania indukcyjnego w kontekście obliczeń rozkładu gęstości prądu w kanale pieca indukcyjnego. Materiały I Konferencji Centralnej Sekcji Elektrotermii Hutniczej, ss. 247-254. Żelazno 1979.

[3] Trojok T.: Mierzenie natężenia pola magnetycznego wzbudnika pieca indukcyjnego. Rudy i Metale 1979 R 24, nr 9, ss. 439-441.

[4] Skóra E.: Teoretyczna analiza przemiany energii elektrycznej w ciepło w kanale i zbiorniku metalu indukcyjnego pieca kanałowego. Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej nr 22/73.

[5] Horoszko E.: Elektromagnetyczne pole w kanale indukcyjnym pieca. Archiwum Elektrotechniki, tom XXII, zeszyt 2, 1973.

[6] Horoszko E.: Ein Beitrag zur Theorie des Induktionsrinnenofens, Elektrowarme International 30 1972 (B3), ss.130-137.

Wpłynęło do Redakcji dnia 20.VI.1980 r. Recenzent:

Prof. dr inż. Eugeniusz Horoszko

ВЛИЯНИЕ СФОРМИРОВАНИЯ КАНАЛА ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ
НА ВЫДЕЛЯЮЩУЮСЯ В НЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ

Р е з ю м е

Для канала индукционной печи с прямоугольным сечением, выступающим чаще всего на практике, определено полезное сформирование канала, учитывая превращение электрической энергии в тепло. Рассуждения проведены, применяя теорию распространения электромагнитной плоской волны, проверенную измерениями в действительной системе печи.

THE INFLUENCE OF AN INDUCTIVE FURNACE CHANNEL SHAPE OW
THE HEAT ENERGY EMITTED IN THIS CHANNEL

S u m m a r y

The channel shape, profitable with regard to electrical energy conversion into heat is determined for an inductive furnace channel with a rectangular cross-section, being the most frequent one in practice. The investigations have been carried out utilizing the theory of electromagnetical plane wave dispersion, verified by measurements made in a real setting of a furnace.