

WŁADYSŁAW PASZEK, FRANCISZEK FIKUS

Katedra Technologii i Metrologii Elektrycznej

WPŁYW ROZKŁADU PRĄDU NA MOC

W CYLINDRYCZNEJ NAGRZEWNICY INDUKCYJNEJ O POLU POPRZECZNYM

Streszczenie. W artykule omawia się porównawczo dwa rozwiązania konstrukcyjne cylindrycznej nagrzewnicy indukcyjnej o poprzecznym polu magnetycznym, z których jedna posiada równomierny a druga nieciągły okład prądu wzbudnika. Równania na moc jednostkową. Wykreślne przedstawienie wpływu nieciągłości okładu na moc. Łączne omówienie wpływu okładu i szczeliny w oparciu o przykład. Wnioski w sprawie doboru okładu prądu i innych elementów konstrukcyjnych.

1. Wstęp

Wybudowana w Hucie Batory prototypowa cylindryczna nagrzewnica indukcyjna o polu poprzecznym jest przeznaczona dla gniazda do kucia wałów korbowych. Została omówiona w [1].

Badania teoretyczne przedstawione w [2], które zostały wykonane później wykazały, że zastosowane w prototypie rozwiązanie uzwojenia nie jest optymalne. Parametry nagrzewnicy mogą ulec poprawie, jeśli przyjęty ciągły rozkład okładu prądu zastąpi się nieciągłym, zajmującym tylko część obwodu wzbudnika.

Zasadniczym zadaniem artykułu jest zbadać w jakim stopniu zmiana rozkładu prądu wpływa na zwiększenie mocy wydzielającej się we wsadzie.

Zastosowanie takiej konstrukcji uzwojenia, która pozostawia na swoim obwodzie szczeliny niezajęte przez pręty wzbudnika otwiera nowe, korzystniejsze możliwości zawieszenia wykładziny szamotowej w obudowie nagrzewnicy.

Łączne omówienie tych zagadnień na tle dyskusji konstrukcji nagrzewnicy prototypowej i zaproponowanych zmian prowadzi do wniosków o wartości praktycznej, które mogą być wykorzystane przy projektowaniu podobnych urządzeń.

2. Rozwiązania konstrukcyjne i modele - odpowiedniki

Rozwiązanie konstrukcyjne prototypu nagrzewnicy omówionej w [1] określono umownie literą A. Jej przekroje podłużny i poprzeczny pokazane są szkicowo na rys. 1 (A-1 i A-2). Zgodnie z przeznaczeniem nagrzewnica ma służyć do miejscowego nagrzania wsadu długości l do temperatury 1200°C . Wsad wprowadzony do nagrzewnicy przed wykonaniem kolejnego wykorbienia posiada już z jednej strony wykorbienie. Odcinek λ nie podlega przeróbce plastycznej, więc nie potrzebuje być nagrzany. Długość λ jest rzędu 10 cm. Stąd zachodziła konieczność zastosowania takiego rozwiązania, by spełniona była nierówność

$$\frac{l}{2} + \lambda < \frac{l}{2}$$

Wykładzinę szamotową zawieszono przy pomocy śrub w tarczach bocznych. Przy obranej konstrukcji uzwojenia czołowe wzbudnika nie przenoszą mocy do wsadu. Z drugiej zaś strony występuje nierównomierne nagrzewanie wzdłuż odcinka l na skutek oddziaływania końców wzbudnika i odprowadzenia ciepła do zimnych końców wsadu. Zjawiska te prowadzą do nierównomiernego rozkładu temperatury wzdłuż grzanego odcinka.

W [2] wykazano, że zastąpienie równomiernego okładu prądu przez okład nieciągły powstały przez usunięcie zwojów wzbudnika leżących w bezpośredniej bliskości osi $y-y$, prowadzi do poprawy sprawności grzania.

W świetle tego wniosku celowym jest rozpatrzyć rozwiązanie konstrukcyjne umownie określone literą B. Przekrój poprzeczny nagrzewnicy wg tego rozwiązania jest pokazany na rys. 2 (B-2). Na obwodzie określonym kątem $2\frac{1}{2}$ nie ma uzwojenia. Powstałe w ten sposób rozcięcie w wzbudniku może być wykorzystane dla zawieszenia w obudowie wykładziny szamotowej.

Próby z nagrzewaniem pokazały ponadto, że izolacja zwojów przylegających do osi $x-x$ była po otwarciu nagrzewnicy narażona na promieniowanie wsadu i tym samym na szybkie starzenie się. (Zwoje zaznaczone na przekroju A-2 prostokątami pełnymi). Dla zwiększenia żywotności nagrzewnicy i pewności ruchu usunięto zagrożone zwoje i pozostawiono wolny wycinek obwodu określony kątem ε (przekrój B-2). Uwolnioną od zwojów część obwodu można wyzyskać dla dodatkowego mocowania górnej wykładziny szamotowej. W tym celu przewidziano wzdłuż brzegów wykładziny wargi, które będą opierać się na palcach z stali żaroodpornej przykręconych do konstrukcji. Wykładzina o wymaganych kształtach może być wykonana w kraju.

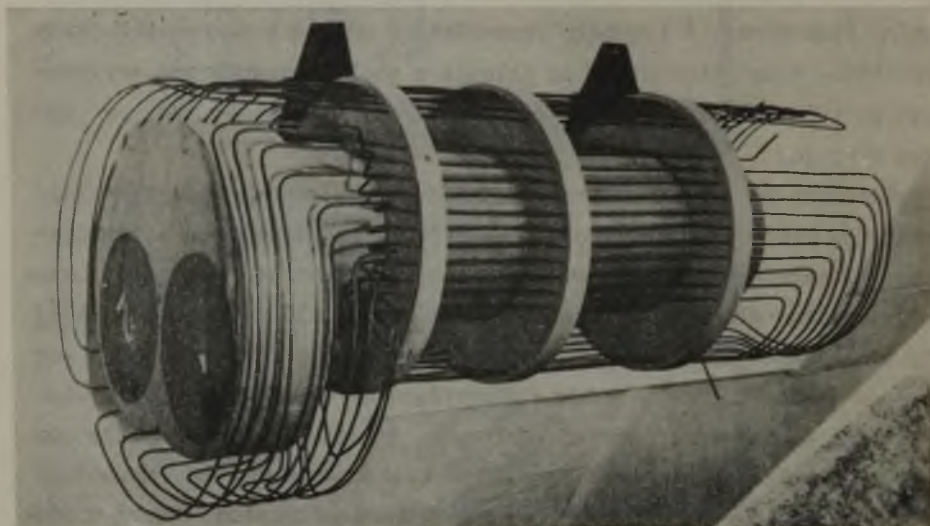
Zawieszenie wykładziny w obudowie na zębie wymaga jeszcze jak widać z przekroju podłużnego B-1, usunięcia rdzeni magnetycznych z środkowej części nagrzewnicy. Ich usunięcie wpływa korzystnie na rozkład temperatury wzdłuż długości wsadu. Sprawa ta została bliżej omówiona w [3]

Po zawieszeniu wrażliwej wykładziny szamotowej w obudowie stają się zbyt liczne tarcze boczne stosowane w rozwiązaniu A. Możliwe jest więc teraz także usytuowanie uzwojeń czołowych, by również przekazywały moc do wsadu. Ukształtowanie czoł uzwojeń jak na przekroju B-1 spowoduje nagrzewanie dotychczas zimnych końców i tym samym ograniczy odpływ ciepła z odcinka 1 i przyczyni się do zmniejszenia nierównomierności nagrzewania tej części wsadu, która będzie podlegać przeróbce plastycznej.

Technika grzania wymaga dla urownomiernienia temperatury w przekroju poprzecznym, przekręcenia wsadu o kąt 90° po nagraniu w wyjściowym położeniu. Uzwojenie czołowe od strony korby musi być tak ukształtowane, by z jednej strony zezwalało na ten obrót a z drugiej jak najbardziej do niej przylegało. Rys. 3 pokazuje model drewniany wsadu i model uzwojenia z drutu. Liczby 1 i 2 w czarnych kołach oznaczają położenia czopów korby w dwu położeniach (przesuniętych o kąt 90°).

Dla przeprowadzenia obliczeń można zgodnie z [4] z dobrym przybliżeniem zastąpić przekrój konfiguracji wsad-wzbudnik wg A-2 nieskończone długim modelem A-3, gdzie r_a - promień wsadu, r_b - promień

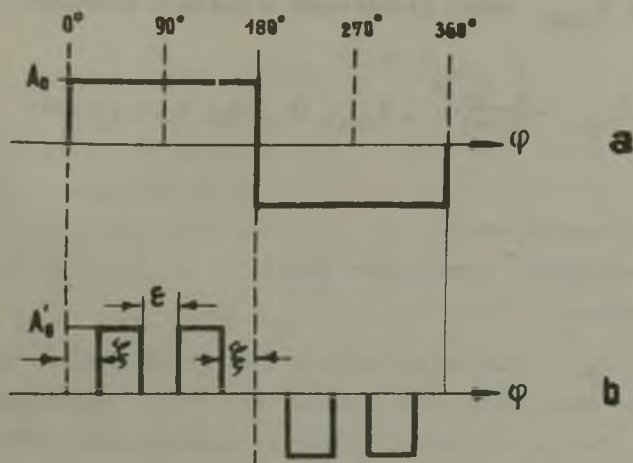
uzwojenia - folii, r_c - promień ekranu magnetycznego o $\mu = \infty$. Symbole kropka i krzyżyk oznaczają chwilowe kierunki przepływu prądu przez uzwojenie. W analogiczny sposób określono model zastępczy dla rozwiązania B na przekroju B-3. Kąty ξ i ε określają przerwy w okładzie prądu wzbudnika.



Rys. 3. Model układu wsad-wzbudnik (bez ekranu)

3. Rozkład okładki prądu i moc we wsadzie

Przebiegi okładow prądowych modeli A-3 i B-3 z rys. 1 i rys. 2 są pokazane na rys. 4. Dla przeprowadzenia analizy zachodzi konieczność ich rozkładu na szeregi Fouriera. Przebieg (a) jest jednak przypadkiem szczególnym przypadku (b) dla $\xi = \varepsilon = 0$. Wystarczy więc zająć się przebiegiem (b). Potrzebny rozkład można przedstawić następującym szeregiem



Rys. 4. Przebiegi okładów prądowych w uzwojeniach nagrzewnicy prototypowej (a) i zmodyfikowanej (b)

$$A'(\varphi) = \frac{8A'_0}{\pi} \sum_0^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \sin(2n+1) \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\xi}{2} - \frac{\xi}{4} \right] \cdot \cos(2n+1) \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\xi}{2} + \frac{\xi}{4} \right] \sin(2n+1)\varphi$$

W [5] przedstawiono równanie dla obliczenia mocy jednostkowej wnika-
jącej do wsadu na jednostkowej jego długości (na całym obwodzie) w
przypadku układu wsad-wzbudnik według A-3 (rys. 1). Równanie obowią-
zuje przy względnie dużych średnicach wsadu - odnośny warunek został
tam omówiony. Wyrażenie na \bar{S} ma postać szeregu nieskończonego.

$$\bar{S} = \sum_0^{\infty} \bar{S}_{2n+1} \quad (2)$$

gdzie każdy składnik sumy odpowiada odnośnej przestrzennej harmonicz-
nej okładu prądu.

Składnik \bar{S}_{2n+1} można przedstawić w postaci iloczynu

$$\bar{S}_{2n+1} = \left[\frac{A_0}{2n+1} \right]^2 \cdot f_{2n+1}(r_a, r_b, r_c, \tau, \mu, \omega) \quad (3)$$

gdzie

τ - rezystywność wsadu

μ - przenikalność magnetyczna wsadu

ω - pulsacja

Funkcja f_{2n+1} nie zależy od rozkładu okładu prądu w wzbudniku. Równanie (3) obowiązujące dla modelu A-3 można zaadoptować do warunków modelu B-3 i otrzyma się wtedy po uwzględnieniu równania (1)

$$\begin{aligned} \bar{S}_{2n+1} = & \left[\frac{A'_0}{2n+1} \right]^2 \sin^2(2n+1) \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\xi}{2} - \frac{\varepsilon}{4} \right] \cdot \\ & \cdot \cos^2(2n+1) \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\xi}{2} + \frac{\varepsilon}{4} \right] f_{2n+1} \end{aligned} \quad (4)$$

Argument funkcji f_{2n+1} jest taki sam jak we wzorze (3). Dla uproszczenia zapisu będzie w dalszym ciągu pominięty.

Analizę wpływu kątów ξ i ε na moc jednostkową przeprowadzi się przy założeniu, że przepływ wzbudnika jest w każdym przypadku jednaki, tzn. że spełniona jest równość

$$A_0 \pi = A'_0 (\pi - 2\xi - \varepsilon) = \Theta = \text{const} \quad (5)$$

Po uwzględnieniu równania (5) równanie (4) przyjmie postać

$$\begin{aligned} \bar{S}_{2n+1} = & \left[\frac{\Theta}{(\pi - 2\xi - \varepsilon) \cdot (2n+1)} \right]^2 \sin^2(2n+1) \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\xi}{2} - \frac{\varepsilon}{4} \right] \cdot \\ & \cdot \cos^2(2n+1) \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\xi}{2} + \frac{\varepsilon}{4} \right] f_{2n+1} \end{aligned} \quad (6)$$

lub w skróconym zapisie

$$s_{2n+1} = s_{2n+1}(\xi, \varepsilon) f_{2n+1} \quad (7)$$

Ze względu na to, że funkcja f_{2n+1} nie zależy od kątów ξ i ε , w analizie wpływu rozkładu okładu prądu na moc jednostkową przy stałych określonych promieniach wzbudnika, parametrach wsadu, jednej i tej samej pulsacji można ograniczyć się do zbadania czynnika s_{2n+1} .

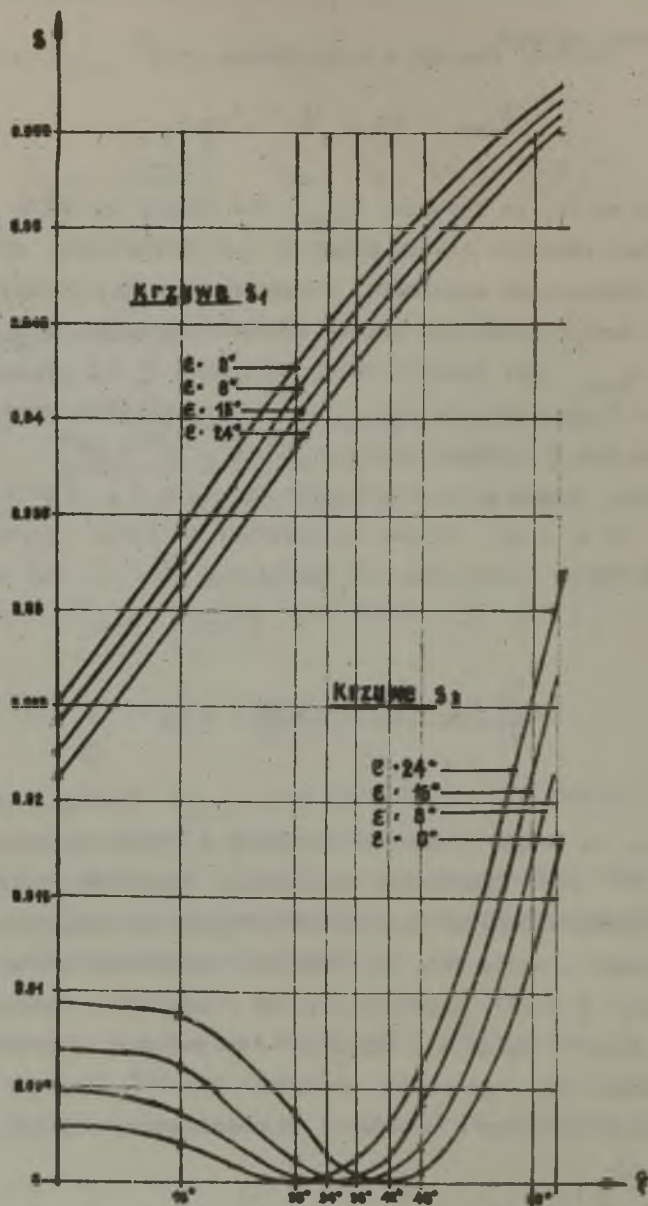
Czynnik s_{2n+1} jest funkcją dwóch zmiennych ξ i ε . Funkcję tę dla $n = 0$ i $n = 1$ przedstawia rys. 5 w układzie współrzędnych s, ξ . Krzywe wykreślono dla ε równego kolejno $0^\circ, 8^\circ, 16^\circ$ i 24° .

Wartości s_1 rosną przy zwiększaniu się kąta ξ . W przedziale kątów $\xi = 0^\circ$ do $\xi = 45^\circ$ krzywe są zbliżone do linii prostej. Przy większych następuje nieznaczne ich zagięcie w dół. I tak na przykład dla $\varepsilon = 0^\circ$

$$\frac{s_1 \text{ dla } \xi = 16^\circ}{s_1 \text{ dla } \xi = 0^\circ} = \frac{0,034}{0,025} = 1,36$$

Oznacza to, że przez wykonanie szczeliny w uzwojeniu odpowiadającej kątowi $\xi = 16^\circ$ przy zachowaniu tego samego przepływu uzyskuje się wzrost mocy jednostkowej we wsadzie pochodzącej od pierwszej harmonicznej okładu prądu o około 36%. Przy zajęciu uzwojeniem tylko połowy obwodu tzn. przy $\xi = 45^\circ$ uzyskuje się już podwojenie mocy. Przyrost mocy rośnie dalej z kątem ξ . Dla $\varepsilon > 0$ krzywe mają charakter podobny lecz leżą niżej. Dla tego samego co wyżej $\xi = 16^\circ$, lecz po wprowadzeniu dodatkowego wycięcia w uzwojeniu odpowiadającego kątowi $\varepsilon = 16^\circ$, moc zmaleje do

$$\frac{s_1 \text{ dla } \varepsilon = 16^\circ}{s_1 \text{ dla } \varepsilon = 0} = \frac{0,0306}{0,0319} = 0,96$$



Rys. 5. Przebiegi funkcji s_1 i s_3 dla różnych ϵ

Zgoła odmienny charakter mają krzywe s_3 . Wartości s_3 wraz z wzrostem kąta ξ początkowo powoli a potem szybko maleją. Przy kącie $\xi = 30^\circ + \frac{\varepsilon}{2}$ osiągają wartość równą zero, po czym silnie rosną.

Stosunek wartości $\frac{s_3}{s_1}$ dla $\xi = 0$ i $\varepsilon = 0$ wynosi $\frac{1}{9}$. Jednak przy kątach $\varepsilon > 0$ wartości s_3 rosną w przeciwieństwie do wartości s_1 . I tak przy kącie $\xi = 16^\circ$ wykonanie szczeliny odpowiadającej kątowi $\xi = 16^\circ$ powoduje wzrost wartości s_3 do

$$\frac{s_3 \text{ dla } \varepsilon = 16^\circ}{s_3 \text{ dla } \varepsilon = 0^\circ} = \frac{0,0062}{0,0019} = 3,25$$

4. Moc jako funkcja okładu i szczeliny

Korzystając z wzoru (7) znajdujemy stosunek mocy jednostkowej pochodzącej od pierwszej i trzeciej harmonicznej przestrzennej okładu jako

$$\frac{\bar{s}_3}{\bar{s}_1} = \frac{s_3}{s_1} \cdot \frac{f_3}{f_1} \quad (8)$$

Zgodnie z [2] stosunek $f_3 : f_1$ równa się jedności przy długości szczeliny równej zero. Stąd

$$\frac{\bar{s}_3}{\bar{s}_1} = \frac{s_3}{s_1} \text{ dla } r_a = r_b = r_c \quad (9)$$

W przypadku nagrzewnicy rzeczywistej z szczeliną, ogólna analiza wpływu okładu prądu prowadzi do złożonych i mało przejrzystych wyrażeń. Z tego względu ograniczymy się do omówienia przykładu.

Rozważy się konfigurację wsad-wzbudnik i następujących parametrach:

- wsad: materiał - aluminium o rezystywności $\tau = 3,2 \cdot 10^{-6}$ om cm promień $r_a = 10$ cm

- wzbudnik: przyjmuje się, że ekran magnetyczny przylega do uzwojenia, tzn. $r_b = r_c$. Przyjęto

$$10 \text{ cm} \leq r_b = r_c \leq 20 \text{ cm}$$

Przebiegi indukcji magnetycznej we wsadzie w przedziale promienia uzwojenia $10 \text{ cm} \leq r_b = r_c \leq 20 \text{ cm}$ obliczono dla tego przykładu w[2]. Korzystając z nich sporządzono krzywe \bar{S}_{1w} , $\xi = 0$, $\xi = 0$ \bar{S}_{3w} , $\xi = 0$, $\xi = 0$ naniesione linią przerywaną na rys. 6. Są to krzywe względnej mocy jednostkowej. Przyjęto, że \bar{S}_1 dla $\xi = 0$ i $\xi = 0$ równa się jedności.

Pozostałe dwie krzywe dla $\xi = 16^\circ$ i $\xi = 0$ oraz dla $\xi = 16^\circ$ $\xi = 16^\circ$ wyznaczono mnożąc każdorazowo rzędne krzywej kreskowanej przez odpowiednie współczynniki wynikające z rys. 5.

Dla założenia, że długość szczeliny mieści się w przedziale (2,5 - 5) cm, uzyskuje się w rozpatrywanym przypadku w wyniku modernizacji nagrzewnicy przy niezmiennym przepływie następujące zmiany mocy:

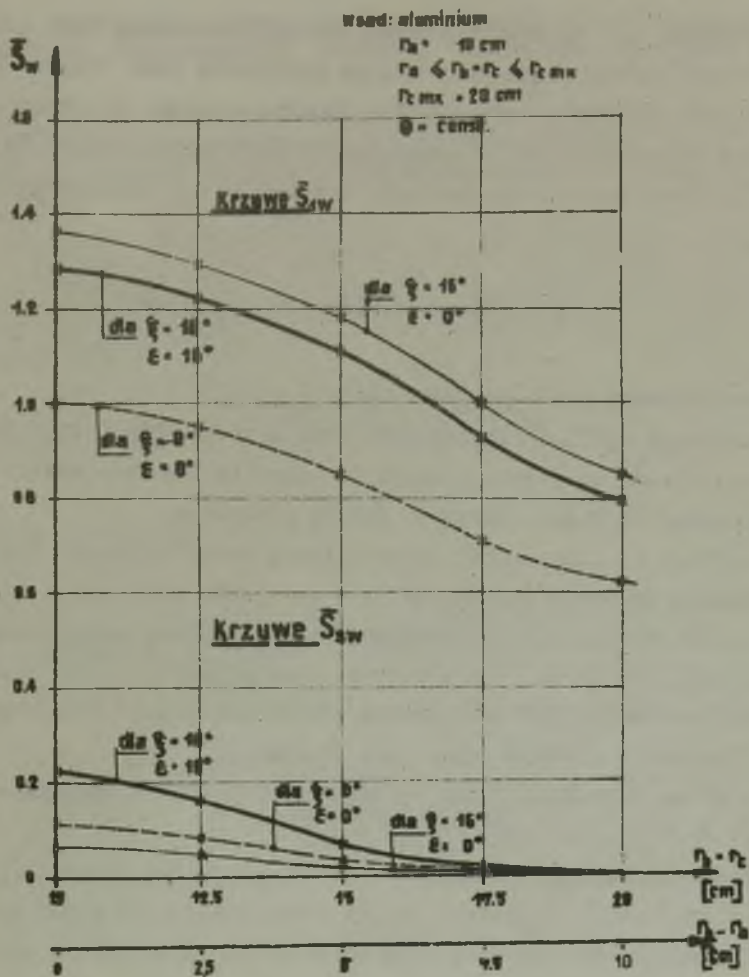
- Przez zastosowanie szczelin tylko w osi y-y ($\xi = 16^\circ$, $\xi = 0^\circ$) wzrosła moc pochodząca od pierwszej przestrzennej harmonicznej okładu prądu \bar{S}_{1w} o około 35%.

Moc zaś \bar{S}_{3w} zmalała o około 3% mocy \bar{S}_{1w} .

W sumie więc moc w tym przypadku wzrosła o około $(35\% - 3\%) = 32\%$.

- Przez zastosowanie szczelin w osi y-y i w osi x-x ($\xi = 16^\circ$, $\xi = 16^\circ$) moc \bar{S}_{1w} będzie o blisko 10% mniejsza niż przy jednej tylko szczelinie, lecz stratę tę prawie w całości pokryje przyrost mocy \bar{S}_{3w} . Sumaryczna moc będzie więc tylko nieznacznie mniejsza (rzędu kilku %).

Przy powyższej analizie ograniczono się do zbadania wpływu tylko pierwszych dwóch przestrzennych harmonicznych okładu prądu. Z rys. 6 wynika, że moc \bar{S}_{3w} stanowi w realnym przedziale szczelin już tylko kilka a najwyżej kilkanaście procent mocy \bar{S}_{1w} . Udziały mocy wyższych harmonicznych są wielokrotnie mniejsze i dlatego mogą być z dobrym przybliżeniem pominięte.



Rys. 6. Przykładowe przebiegi mocy jednostkowej w zależności od szczeliny ξ i ϵ

5. W n i o s k i

Z krzywych s_1 na rys. 5 wynika, że moc pochodząca od pierwszej harmonicznej okładu prądu przy stałym przepływie jest tym większa, im większe jest rozcięcie we wzbudniku określone kątem ξ . Wolny wycinek wzbudnika określony kątem ξ prowadzi do zmniejszenia mocy S_1 . Ubytek mocy S_1 jest jednak poza zakresem przedziału $\Delta \xi$ określonego nierównością

$$30^\circ + \frac{\xi}{2} - 15^\circ < \Delta \xi < 30^\circ + \frac{\xi}{2} + 15^\circ$$

zrekompensowany przez przyrost mocy S_3 .

Postulowana szybkość nagrzewania określa potrzebną moc, jaka musi być przekazywana do wsadu. Stosowanie szczelin o dużych kątach ξ może przeprowadzić do dużych wartości okładu prądowego.

Ze względu na konieczność odprowadzenia wydzielającego się ciepła pochodzącego od strat elektrycznych w uzwojeniu wzbudnika i od nagrzewania przez gorący wsad, maksymalne wartości okładu prądu nie mogą przekraczać 3-5 kA/cm. Wybór dużych okładów jest poza tym związany z stosowaniem kosztownych nietypowych źródeł zasilania (transformatory o dużych prądach i niskich napięciach wtórnych).

W praktyce projektowej należy dążyć do stosowania możliwie dużych okładów prądów i zwiększania kąta ξ .

Jednocześnie celowym będzie zastosować minimalną szczelinę w uzwojeniu w osi x-x, co z jednej strony uchroni izolację rurki przed nadmiernym promieniowaniem przy wyjmowaniu gorącego wsadu a z drugiej zezwoli na pewniejsze wielopunktowe podparcie wykładziny szamotowej. Mała strata mocy spowodowana kątem ξ rzędu kilkunastu stopni jest wtedy skompensowana zmniejszeniem awaryjności urządzenia.

Przedstawione wnioski przemawiają w całej rozciągłości na korzyść rozwiązania konstrukcyjnego nagrzewnicy pokazanej na rys. 2. Wybudowanie takiej zmodyfikowanej nagrzewnicy przewidziane jest w Hucie Batory.

LITERATURA

- [1] Fikus F., Nagrzewnica indukcyjna częstotliwości sieciowej o dzielnym wzбудniku, Materiały III Krajowej Konferencji Elektrotermii 1965 r.
- [2] Paszek W. i Fikus F., Podstawowa i wyższe harmoniczne pola magnetycznego w wzбудniku cylindrycznym o polu poprzecznym nagrzewnicy indukcyjnej, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Elektryka nr 24/1969 r.
- [3] Fikus F., Wpływ ekranu magnetycznego na moc nagrzewnicy indukcyjnej z polem poprzecznym, Przegląd Elektrotechniczny z. 2/1969 r.
- [4] Fikus F., Analiza pola magnetycznego i mocy w nagrzewnicy indukcyjnej z dzielnym wzбудnikiem, Praca doktorska, Biblioteka Politechniki Śląskiej.
- [5] Fikus F., Metoda obliczania cylindrycznej nagrzewnicy indukcyjnej z polem poprzecznym, Materiały IV Krajowej Konferencji Elektrotermii 1969 r.

Przyjęto do druku w czerwcu 1969 r.

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА НА МОЩНОСТЬ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ С ПОПЕРЕЧНЫМ ПОЛЕМ

Резюме

В статье рассматриваются сравнительно два конструкторские решения индукционного нагревателя с поперечным магнитным полем, с которых одно имеет равномерную, а другое прерывистую линейную нагрузку индуктора. Уравнения удельной мощности. Начертательное представление влияния прерывистости линейной нагрузки и воздушного зазора на основе примеров. Выводы по подборе линейной нагрузки и других конструкторских элементов.

INFLUENCE OF THE CURRENT DISTRIBUTION ON POWER IN THE CYLINDRIC
INDUCTION HEATER WITH A TRANSVERS MAGNETIC FLUX

S u m m a r y

There were compared two designing solutions of a cylindric induction heater with a transvers magnetic flux, where one has an uniform and the other an discontinous system of the current distribution. Graphical presentation of the influence on power of the current distribution discontinuity. A summary discussion of current distribution and air gap influence based on example. Conclusions on choise of current distribution and on other designing elements.