

Zygmunt KUCZEWSKI

Tadeusz SKOCZKOWSKI

Instytut Podstawowych Problemów  
Elektrotechniki i Energoelektroniki  
Politechniki Śląskiej

## GRZANIE INDUKCYJNE W PROCESACH METALURGICZNYCH

**Streszczenie.** W artykule omówiono możliwości stosowania nagrzewania indukcyjnego w przemyśle metalurgicznym, a głównie przy produkcji rur. Porównano metody nagrzewania płomieniowego i indukcyjnego, omówiono główne problemy obliczeniowe indukcyjnych układów grzejnych, scharakteryzowano źródła zasilania.

### 1. Przesłanki technologiczno-energetyczne

Rozwój technologii charakteryzuje się nie tylko stałym ulepszeniem jakości wyrobu i powiększeniem jego ilości, lecz również minimalizowaniem materiałówochłonności i energochłonności. Narastający niedobór energii i surowców przy coraz bardziej zaostrzających się wymaganiach związanych z ochroną środowiska zmusza do poszukiwania nowych, lepszych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych. W wielu technologiach, również w termicznych procesach metalurgicznych nagrzewanie ogniowe zastępuje się elektrycznym, stosując do tych celów nagrzewanie łukowe plazmowe, indukcyjne i oporowe. Około 80% energii zużywanej przez przemysł metalurgiczny pochłaniają procesy nagrzewania i topienia metali. O skali zagadnienia niech świadczy fakt, że w kraju około 20% produkowanej energii elektrycznej zużywa się w przemysłowych procesach elektrotermicznych. Ze względu na przestarzałe urządzenia oraz ich nieprzewidywaną eksploatację w krajowych procesach elektrotermicznych zużywa się kilkadziesiąt procent energii więcej niż wynikałoby to z racjonalnej gospodarki energetycznej [1].

Spośród stosowanych metod elektrotermicznych na szczególną uwagę zasługuje nagrzewanie indukcyjne ze względu na dużą szybkość nagrzewania, dużą sprawność, powtarzalność wyników nagrzewania, łatwość zmian parametrów obróbki cieplnej, małą zgorzelinę, precyzyjne umiejscowienie obszaru nagrzewanego, możliwość i łatwość pełnej automatyzacji procesu. Do wad grzejnictwa indukcyjnego zaliczono swego czasu wysoki koszt inwestycyjny urządzeń grzewczych, który obecnie przy stosowaniu statycznych przekształtników energii elektrycznej poważnie zmalał. Głównym i przekonującym wskaźnikiem, przemawiającym za stosowaniem grzania indukcyjnego, jest

mniejże zużycie energii - o 30% w stosunku do grzenia w piecach płomieniowych [2]. Z wyżej podanych względów wzrost grzenia indukcyjnego w skali światowej do celów walcowniczych w latach 1980-2000 przewidywany jest o około 25% [3]. Związane jest to głównie z mniejszym jednostkowym zużyciem energii na grzenie do obróbki plastycznej wynoszącej 360-440 kWh/tonę.

## 2. Grzenie indukcyjne przy produkcji rur

Od pewnego czasu w nowoczesnej technologii produkcji rur bezszwowych stosowane jest coraz częściej grzenie indukcyjne. Nowoczesna walcownia rur bezszwowych charakteryzuje się dużą wydajnością sięgającą do 400-600 tysięcy ton rocznie. Przy pracy trójzminowej wynosi to 67-86 ton wssadu na godzinę. Średnice produkowanych rur bezszwowych mieszczą się pomiędzy 17 a 950 mm. Do gazociągów i ropociągów produkowane są rury bezszwowe nawet o średnicach ponad 1900 mm. Typowy i powszechnie spotykany stosunek grubości ścianki rury bezszwowej do wewnętrznego promienia rury wahs się w granicach 0,07 - 0,12. W pewnych szczególnych przypadkach, np. dla obwodu hydraulicznego siłowników wysokociśnieniowych, stosunek ten może dochodzić do liczby 0,25. W typowych walcowniach rur szybkość walcowania wynosi od 0,5 do 8,5 m/s, w nowoczesnych walcowniach dochodzi nawet do 16 m/s (57,6 km/godz). Pod względem magnetycznym spotyka się dużą różnorodność materiałów walcowanych rur. Mogą to być ferromagnetyki - stale węglowe, ferrytyczne, perlityczne lub nieferromagnetyczne - stale sustenitowe, żaroodporne, miedź, aluminium i inne stopy metali kolorowych.

Proces produkcyjny rur bezszwowych składa się z czterech podstawowych faz, a mianowicie: otrzymanie tutei grubościennej, walcowanie rury surowej, walcowanie rury gotowej i wykańczenie rury. Potokowość jest cechą charakterystyczną trzech pierwszych faz stanowiących procesy prowadzone na gorąco. Proces walcowania musi odbywać się w ściśle określonym przedziale temperaturowym elementu. Oprócz samego procesu walcowania w skład potokowej linii produkcyjnej wchodzi również urządzenie grzewcze utrzymujące określoną temperaturę elementu walcownego. Wydajności i niezawodności urządzeń grzewczych musi odpowiadać wydajność i niezawodność walcarek.

Przedstawione podstawowe parametry technologiczne produkcji rur bezszwowych stanowią podstawę i punkt wyjścia do zaprojektowania układu elektromagnetycznego urządzenia do indukcyjnego nagrzewania rur w procesie produkcji. Obszerne dane dotyczące samej technologii produkcji rur bezszwowych, jak i wymagań stawianych urządzeniom do grzenia indukcyjnego biorących udział w tym procesie, można znaleźć w literaturze [4, 5, 6, 7].

### 3. Piece płomieniowe z nagrzewnice indukcyjne

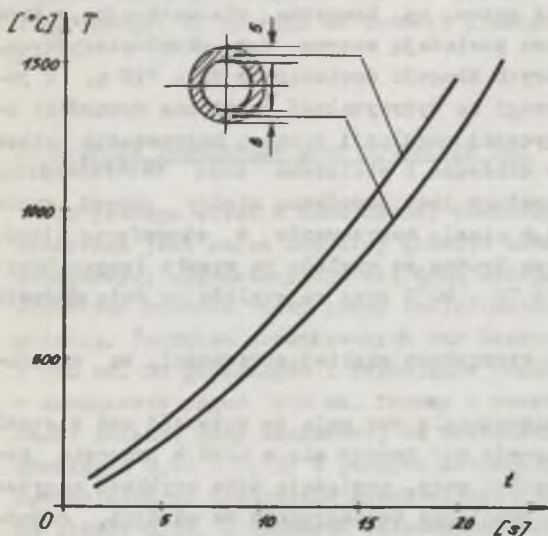
W stosowanych technologiach produkcji rur bezszwowych spotyka się piece grzewcze płomieniowe opalane gazem, np. komorowe, wielosekcyjne, z trzonym obrotowym. Piece płomieniowe posiadają szereg wad eksploatacyjnych. W piecach wielosekcyjnych, których długość dochodzi do 80 - 120 m, w początkowych sekcjach należy z uwagi na wytrzymałość termiczną wymurówki ograniczyć moc. Układy automatycznej regulacji procesu nagrzewania pieca płomieniowego są złożone, mało dokładne i obciążone dużą bezwładnością. Niska dokładność pomiaru temperatury jest powodowana między innymi grubą warstwą zgorzeli powstającej w czasie nagrzewania w atmosferze tlenu. Również warunki pracy obsługi są trudne ze względu na wysoką temperaturę w otoczeniu pieców, dochodzącą do 70 - 80°C oraz ze względu na dużą głośność pracy, sięgającą do 120 dB.

Gazowe piece grzewcze, przy stosunkowo niskiej sprawności, są energochłonne [6].

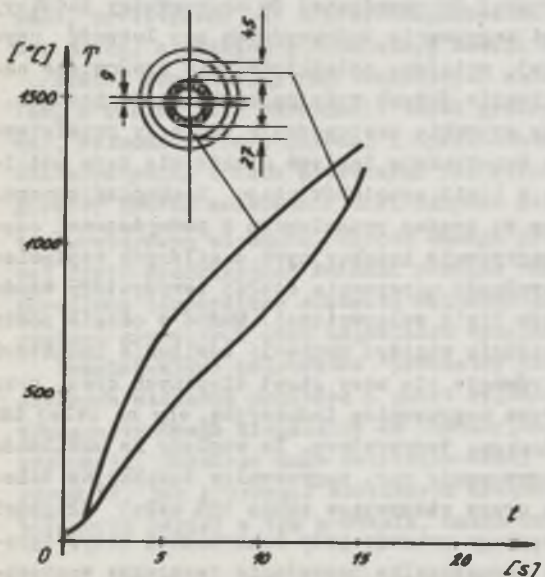
Nagrzewnice indukcyjne do nagrzewania rur mają tę wyższość nad piecami płomieniowymi, że w zasadzie prawie nie tworzy się w nich w procesie nagrzewania zgorzeli na powierzchni rury, posiadają dużą szybkość nagrzewania, gdyż generowanie ciepła przebiega bezpośrednio we wśrodku, odznaczają się dużą niezawodnością i łatwą wymiennalnością części, charakteryzują się długą żywotnością, a co najważniejsze - łatwo poddają się automatyzacji, gdyż można w sposób skuteczny i precyzyjny oddziaływać na parametry strugi energii elektrycznej doprowadzonej do nagrzewnicy indukcyjnej. Również istotnymi zaletami nagrzewnic indukcyjnych są: łatwość usytuowania w linii technologicznej, mniejsza uciążliwość dla środowiska naturalnego oraz możliwość uzyskiwania dużych wydajności technologicznych.

Przy potokowej produkcji rur szerokie zastosowanie znalazły przelotowe nagrzewnice indukcyjne. Prosta konstrukcja takiego urządzenia daje możliwość zainstalowania nagrzewnic w linii samotoków ciągu technologicznego. Nagrzewnice indukcyjne zasilane są prądem przemiennym o podwyższonej częstotliwości. Zasadniczą wadą nagrzewnic indukcyjnych zasilanych napięciem o stałej częstotliwości jest trudność utrzymania stałej temperatury wśrodku w czasie krótkotrwałych postojów linii walcowniczej. Można w czasie postoju linii technologicznej odpowiednio obniżyć napięcie zasilania induktorów aby moc dostarczana do wśrodku równała się mocy strat cieplnych oraz przesunąć rurę tam i z powrotem przez nagrzewnicę indukcyjną, aby na całej długości rury utrzymać prawie jednkową temperaturę. Ze względu na możliwość ograniczenia długości linii nagrzewania rur, nagrzewnice indukcyjne dzieli się na dwie grupy. Pierwsza grupa stanowiąca około 25% całej długości i będąca grupą nagrzewania wstępnego pracuje przy maksymalnej mocy, ograniczonej jedynie ze względu na dopuszczalne naprężenia termiczne występujące we wśrodku.

Nagrzewnice indukcyjne drugiej grupy mają za zadanie doprowadzenie temperatury rury do wartości granicznych. W pierwszej grupie induktorów mają miejsce dwie fazy nagrzewania: faza pierwsza - związana z przyrostem temperatury powierzchni od temperatury otoczenia do temperatury przemian magnetycznych we wśrodku (punkt Curie), faza druga - zwana przejściową, w której sten niemagnetyczny obejmuje całą głębokość wśrodku. Druga grupa nagrzewnic indukcyjnych ma za zadanie dogrzać wśrodek i wyrównać temperaturę wewnątrz wśrodku. W przypadku koniecznego postoju linii technologicznej wśrodek znajdujący się w pierwszej grupie nagrzewnic zostaje wycofany, a induktory tej grupy odłącza się od źródła zasilania, zaś druga grupa induktorów zasilana jest mniejszą mocą odpowiadającą stratom mocy, a wśrodek jest przesuwany tem i z powrotem, będąc stale przygotowany do uruchomienia linii technologicznej. Proces optymalizacji pracy układu grzewczego wiąże się z temperaturą wśrodku oraz z minimalizacją pojawiających się różnic temperatury wśrodku, co jest związane ze sterowaniem zasilania wzbudników oraz z ruchem wśrodku [8, 9]. W procesie walcowania rury, na skutek styku rury z walcami oraz z trzpieniem, obwodowe różnice temperatur może dochodzić do  $300^{\circ}\text{C}$ , zaś wzdłużne różnice do  $200^{\circ}\text{C}$ . W



Rys. 1. Różnice temperatury w ścianie rury przy różnej grubości ścianki

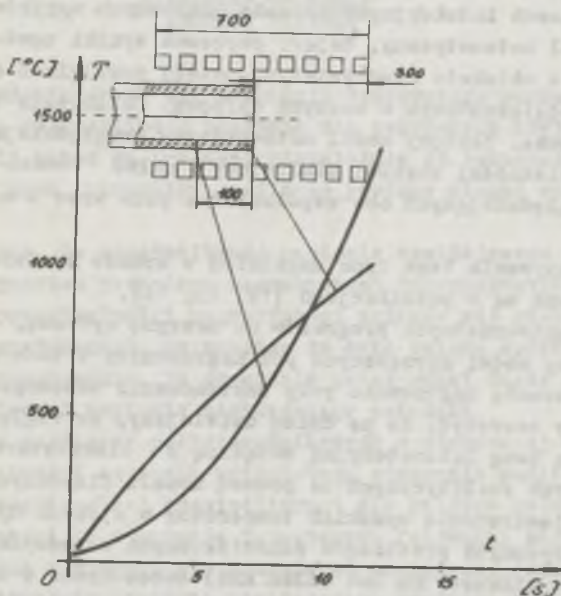


Rys. 2. Różnice temperatury powierzchni rury przy przesunięciu osi rury i wzbudnika

W procesie walcowania rury, na skutek styku rury z walcami oraz z trzpieniem, obwodowe różnice temperatur może dochodzić do  $300^{\circ}\text{C}$ , zaś wzdłużne różnice do  $200^{\circ}\text{C}$ . W

W celu uniknięcia zbyt dużych różnic temperatur pomiędzy poszczególnymi rurami i w samej rurze wprowadza się układy automatycznej regulacji z napięciowym lub temperaturowym sprzężeniem zwrotnym [6, 10, 11].

Na rys. 1 przedstawiono różnicę temperatur dwóch punktów rury przy nierównomiernej grubości ścianki, zaś na rys. 2 pokazano różnice temperatur dwóch punktów rury w przypadku wzajemnego przesunięcia osi rury i wzbudajka. Rys. 3 obrazuje nierównomierność nagrzewania końca rury w przypadku, gdy rura znajduje się w środkowej części induktora.



Rys. 3. Różnice temperatury przy nagrzewaniu końca rury w środkowej części wzbudnika

#### 4. Sposoby analizowania elektrotermicznych układów nagrzewania indukcyjnego

W nagrzewanym indukcyjnie elemencie występują dwa współzależne pola: pole elektromagnetyczne i pole cieplne. Niestacjonarność parametrów elektrotermicznych wsadu wynika z zależności wielkości fizycznych wsadu od temperatury, natężenia pola magnetycznego i jego częstotliwości. W celu zaprojektowania wydajnego i optymalnego układu nagrzewania indukcyjnego projektant powinien panować nad tymi zgodznościami w takim stopniu, aby stworzony przez niego model matematyczny możliwie dokładnie odzwierciedlał zachodzące zależności w różnych stanach pracy. W dotychczas spotykanych metodach analizowania zjawisk elektrotermicznych w nagrzewnicach indukcyjnych wprowadzono szereg założeń upraszczających, np. osobno roz-

ważano każde z występujących pól, zakładano niezależność pola magnetycznego i pola termicznego, co prowadziło do konieczności przyjmowania stałych i uśrednionych temperatur oraz innych wielkości fizycznych, procesy termiczne uważano za zjawiska adiabetyczne, zaś fale elektromagnetyczne traktowano tylko dwuwymiarowo a nie przestrzennie. Przewodzenie ciepła przez ściankę walcową sprowadzono do zagadnienia przewodzenia przez płytę. Przyjmuje się zbyt uproszczony opis wymiany ciepła w nagrzewnicy. Tego typu założenia upraszczające prowadziły przy modelowaniu procesów elektrotermicznych w nagrzewnicach indukcyjnych do mało dokładnych wyników. Chcąc stworzyć wierny model matematyczny, dający poprawne wyniki zgodne z zachodzącymi zjawiskami w obiekcie rzeczywistym, należy posługiwać się nowoczesnym narzędziem obliczeniowym - maszyną cyfrową. Obliczenia takie są złożone i czasochłonne. Złożony model matematyczny uwzględniający większość występujących zależności stanowi nieliniowy układ równań różniczkowych cząstkowych uwzględniających oba współzależne pole wraz z warunkami granicznymi.

Metody rozwiązywania tego typu zagadnień w sposób bardziej lub mniej uproszczony podane są w publikacjach [12, 13, 14].

Opracowanie uniwersalnych programów na maszynę cyfrową, uwzględniających cały złożony model sprzężonych pól nagrzewnicy i inne związki, pozwoli na konstruowanie nagrzewnic przy zastosowaniu wspomaganie komputerowego [3]. Należy zauważyć, że na dzień dzisiejszy, ze względu na bardzo szczupłą krajową bazę laboratoryjną związaną z elektrotermią, możliwość weryfikacji danych analitycznych za pomocą modeli fizycznych jest bardzo ograniczona. Rejestrowanie wysokich temperatur w stanach dynamicznych i wielkości elektrycznych przebiegów odkształconych o podwyższonej częstotliwości (rzędu kilkuset Hz lub kilku kHz) wobec braku w kraju odpowiedniego wyposażenia laboratoryjnego jest praktycznie nierealizowalne.

## 5. Częstotliwość napięcia w procesie grzania indukcyjnego

Jednym z podstawowych parametrów elektrycznych nagrzewnic indukcyjnych decydującą o procesie nagrzewania oraz wpływającym zasadniczo na wskaźniki energetyczne procesu, jest częstotliwość napięcia zasilania. Wybór odpowiedniej częstotliwości napięcia jest jedną z wstępniejszych decyzji projektanta układu grzewczego. Przy wyborze częstotliwości napięcia zasilającego można kierować się minimalnym czasem nagrzewania, minimalnym zużyciem energii, minimalnymi naprężeniami termicznymi wewnątrz wsadu itp. W praktyce dąży się do uzyskania minimalnego czasu nagrzewania i do dużej sprawności energetycznej procesu. Warunek minimalnego czasu ogranicza częstotliwość napięcia od góry, warunek wysokiej sprawności energetycznej ogranicza częstotliwość napięcia od dołu. Ograniczenia te określają dość szeroki przedział częstotliwości, z którego należy wybrać optymalną wartość

wynikającą z kompromisu. Różni autorzy w swoich publikacjach [6, 14, 17] podają różne zalecane częstotliwości albo oparte na bardzo prostych modelach o prostej geometrii, np. walcowej, kwadratowej itp., albo na związkach analitycznych ważnych tylko dla danego obiektu i danej technologii. Brak jest natomiast, jak dotychczas, podstawowych opracowań analitycznych. Ogólną wytyczną przy doborze częstotliwości napięcia zasilającego wzbudnik dla temperatur leżących powyżej punktu Curie jest nierówność

$$0,25 < \frac{\text{głębokość wnikania}}{\text{grubość ścianki}} < 1$$

Na skutek zmieniających się w funkcji temperatury parametrów fizycznych wsadu optymalna częstotliwość napięcia dla złożonych kryteriów będzie się zmieniać. Jeżeli układ ma pracować niezależnie od temperatury wsadu w warunkach optymalnych, parametry zasilacza powinny ulegać zmianie w funkcji temperatury.

Jest oczywiste, że częstotliwość napięcia zasilającego powinna być inna przed i za punktem przemiany magnetycznej ferromagnetyku, gdyż przy zmianie względnej przenikalności magnetycznej zmienia się głębokość wnikania pola elektromagnetycznego, co pociąga za sobą zmianę sprawności energetycznej procesu nagrzewania. Po przejściu przez punkt Curie należałoby zwiększyć częstotliwość napięcia zasilającego wzbudnik.

Wprowadzenie zasilaczy półprzewodnikowych o sterowanej w szerokim zakresie częstotliwości napięcia wyjściowego stworzyło możliwość dostosowania każdorazowo optymalnej częstotliwości dla każdego rodzaju wsadu i temperatur. Możliwości te stwarzają tyrystorowe falowniki mocy, których konstrukcja jest już w stopniu wystarczającym opanowana. Algorytm sterowania mocą i częstotliwością napięcia zasilającego powinien być sformułowany ze względu na minimalny czas nagrzewania przy żądanym rozkładzie temperatury we wsadzie. Ten ostatni warunek jest często podawany przez technologów w postaci dopuszczalnej różnicy temperatur między powierzchnią a innym wewnętrznym punktem wsadu [18]. Rozwiązanie tak postawionego zadania prowadzi do wyznaczenia punktów, w których należy zmienić napięcie falownika, przy utrzymaniu dopuszczalnej amplitudy napięcia dla danej częstotliwości, ze względu na uzyskanie jak najlepszej sprawności nagrzewania. Układ nagrzewania indukcyjnego będzie pracować przy optymalnych parametrach, gdy sterowanie przekształtnika tyrystorowego będzie ściśle realizowane wg zadanego algorytmu. Do tego celu będzie mógł być użyty mikroprocesor realizujący założone zadanie.

## 6. Zasilacze do nagrzewania indukcyjnych

Najprostszym sposobem nagrzewania indukcyjnego, ale obciążonym wieloma wadami i niedoskonałościami, jest bezpośrednie zasilanie induktora prze-

miennym napięciem sieciowym o częstotliwości 50 Hz. Jednak zasilanie napięciem o stałej częstotliwości nie daje możliwości sterowania i prowadzenia zoptymalizowanego procesu nagrzewania wssdu. Przy jednofazowym obciążeniu sieci zasilającej, szczególnie o małej mocy zwarciowej, istnieje konieczność symetryzowania obciążenia sieci trójfazowej dodatkowymi elementami biernymi. Również konstrukcja induktora, ze względu na duże siły elektrodynamiczne, musi być odporniejsza na odkształcenia uzwojeń wzbudnika. W zespole zasilanie nagrzewnicy indukcyjnej napięciem o częstotliwości 50 Hz stosuje się w przypadku wssdów litych o dużych wymiarach. W niektórych technologiach, przy dwustopniowym grzeniu indukcyjnym, w pierwszym stopniu w tzw. nagrzewaniu wstępnym, które prowadzone jest dla wssdów ferromagnetycznych do temperatury 600 - 700°C stosuje się napięcie o częstotliwości 50 Hz. Dalsze nagrzewanie w stopniu drugim prowadzi się przy zasilaniu napięciem o częstotliwości podwyższonej z przemienniki częstotliwości. Dwustopniowe układy sterowane są w dwóch odmianach. Albo dla każdej częstotliwości jest oddzielny induktor, albo ten sam induktor jest przystosowany do zasilania napięciem o dwóch różnych częstotliwościach [6, 14, 17]. Dwustopniowe nagrzewanie zaleca się stosować dla wssdów ferromagnetycznych o średnicy większej niż 80 mm. W tych przypadkach uzyskuje się dużą równomierność nagrzewania wssdu. Należy zwrócić uwagę, że po przekroczeniu punktu Curie, przy zasilaniu nagrzewnicy napięciem o częstotliwości 50 Hz bardzo znacznie pogorsza się sprawność energetyczna procesu nagrzewania. Przykłady technicznych rozwiązań układów nagrzewania dwustopniowego znaleźć można w szeregu publikacji [16, 17, 19]. Zanim zaczęto wprowadzać do układów nagrzewania indukcyjnego statyczne półprzewodnikowe przekształtniki, stosowano maszynowe przetwornice częstotliwości, które generowały napięcia o częstotliwości do 10 kHz. Porównanie wskaźników techniczno-ekonomicznych obu rodzajów zasilaczy o podwyższonej częstotliwości: maszynowych i półprzewodnikowych [20] wskazuje na zdecydowaną wyższość tych ostatnich pod każdym względem. Jedynie magnetyczne powielacze częstotliwości mogą w zakresie częstotliwości do kilkuset Hz konkurować z zasilaczami półprzewodnikowymi pod względem energetycznym [21, 22]. Ze względu na generowanie stałej częstotliwości powielacze magnetyczne są stosowane np. w piecach do topienia metali. Wyższość przekształtników półprzewodnikowych opartych na tyrystorach nad innymi maszynowymi i magnetycznymi polega również na możliwości zmian częstotliwości napięcia wyjściowego w sposób płynny od bardzo małych wartości do kilku kHz. Ta właściwość stwarza możliwość doboru optymalnej częstotliwości dla każdego rodzaju wssdu tak pod względem struktury materiałowej, jak i kształtów geometrycznych. Przekształtnik tyrystorowy może być równieżysterowany na maksymalną moc doprowadzoną do wssdu, co zezwoli na zminimalizowanie czasu nagrzewania. Falowniki stosowane do nagrzewania indukcyjnego budowane są przeważnie jako falowniki prądowe równoległe lub napięciowe szeregowo, zaś ich moce jednostkowe dochodzą do 1,2 MW przy częstotliwościach napięcia wyjściowego

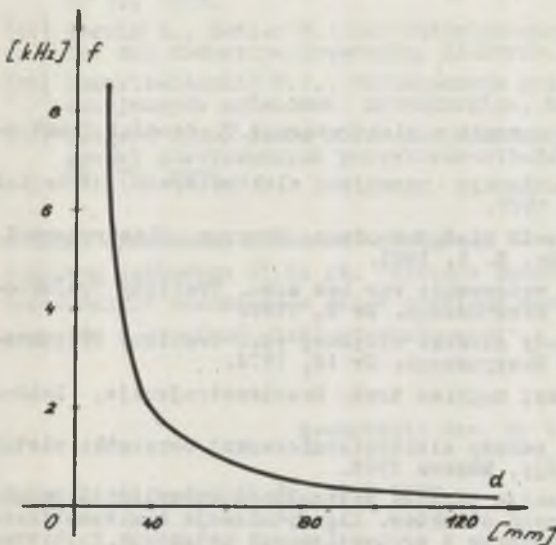


300 - 600 Hz lub do około 1500 kW przy częstotliwościach 2 - 3 kHz [2, 11, 19, 23, 24].

Publikacje literaturowe dotyczące projektowania i eksploatacji falowników są dość liczne, chociaż nie poruszają wszystkich zagadnień związanych ze specyfiką układów elektrotermicznych [15, 25, 26].

W praktyce można również spotkać mieszany sposób nagrzewania wssadu - płomieniowo-indukcyjny. Można spotkać rozwiązanie mieszane układu grzewczego, w którym induktor elektromagnetyczny jest zainstalowany przed piecem płomieniowym.

Induktor, jako nagrzewnica wstępna, jest zasilany napięciem o częstotliwości 50 Hz. Takie rozwiązanie jest stosowane dla wssadów ferromagnetycznych o średnicy większej niż 100 mm i nieferromagnetycznych o średnicy większej niż 200 mm. Spotyka się również odwrotne usytuowanie, w którym najpierw nagrzewa się wssad metodą płomieniową, a następnie w induktorze zasilanym napięciem o pod-



Rys. 4. Wybór częstotliwości optymalnej w zależności od średnicy wssadu przy nagrzewaniu płomieniowo-indukcyjnym

wyższej częstotliwości, elektromagnetycznie. Rys. 4 pokazuje sposób doboru częstotliwości napięcie dla wssadu nagrzewanego do temperatury 800 °C metodą płomieniową, zaś do 1200 °C metodą elektromagnetyczną [25]. Jest to krzywa uzyskana metodą eksperymentalną. Przy nagrzewaniu wssadów o dużych wymiarach geometrycznych, o dużych przekrojach stosuje się nagrzewanie przy zasilaniu induktora napięciem o częstotliwości 16 - 20 Hz [2]. W tym przypadku jako zasilacze stosowane są tyrystorowe cyklokonwertory.

### Wnioski

1. Z uwagi na swoje zalety techniczno-ekonomiczne grzejnictwo indukcyjne może być szeroko stosowane przy produkcji rur.
2. Piece indukcyjne przelotowe posiadają szereg zalet w porównaniu z tradycyjnymi piecami płomieniowymi.

3. Negrzewanie płomieniowo-indukcyjne może znacznie zintensyfikować proces nagrzewania.
4. Celowa jest analiza zjawiska fizycznych w nagrzewnicach uwzględniających współzależność pola magnetycznego i cieplnego.
5. Dla każdej operacji technologicznej powinno się określać przebieg zmian optymalnej częstotliwości zasilania wzбудnika.
6. Falowniki tyrystorowe sterowane z wykorzystaniem mikroprocesorów pozwalają na techniczną realizację nagrzewania optymalnego.

## LITERATURA

- [1] Horoszko E.: Oszczędność energii w elektrotermii. *Wiadomości Elektrotechniczne*. Nr 17-18, 1981.
- [2] Burakowski T. i inni: Tendencje rozwojowe elektrotermii. *Przegląd Elektrotechniczny*. Z. 4, 1977.
- [3] Burakowski T., Hering M.: IX Międzynarodowy Kongres Elektrotermii. *Przegląd Elektrotechniczny*. Z. 2, 1981.
- [4] Grabowski S.: Nowoczesne walcowanie rur bez szwu. *Problemy Projektowe Hutnictwa i Przemysłu Maszynowego*. Nr 2, 1981.
- [5] Chyla M.: Nowoczesne metody obróbki cieplnej rur. *Problemy Projektowe Hutnictwa i Przemysłu Maszynowego*. Nr 1, 1974.
- [6] Bodażkow W.A.: Indukcyjny nagrzew rur. *Maszynostrojenije*, Leningrad 1969.
- [7] Kidin I.N.: Fizyczne osnowy elektrotermicznej obróbki metali i spawów. *Metallurgija*, Moskwa 1969.
- [8] Kołomiejeewa M.W.: Rieszzenie zadaczi optymalnego upravljenije indukcyjnym nagriewom podwiżnych obiektow. *Algorytmizacija i automatizacija technologiczeskich processow i promyszlennych ustanowok*. Kujbyszew Nr 7, 1976.
- [9] Repaport E.J.: Podwiżnoje upravljenije w zadaczach optimizacii indukcyjnogo nagriewa metazła: *Algorytmizacija i automatizacija technologiczeskich processow i promyszlennych ustanowok*. Kujbyszew. Nr 7 1976.
- [10] Szuchocki A.E., Ryskin S.E.: Induktory dla indukcyjnogo nagriewa. *Energija*, Leningrad 1974.
- [11] Szuchocki A.E.: Stabilizacija režima pri nieprierywnom indukcyjnom nagriewie: *Promyszlennaja energetika*. Nr 9, 1979.
- [12] Sigfridsson R.: Induction heaters for the continuous heating of tubes. *ASEA Journal* Nr 1, 1979.
- [13] Collatz L.: *The numerical treatment of differential equations*. Springer - Verlag. Berlin 1959.
- [14] Turowski J.: *Obliczenia elektromagnetyczne elementów maszyn i urządzeń elektrycznych*. WNT, Warszawa 1982.
- [15] Referaty IX Międzynarodowego Kongresu Elektrotermii w Cannes. 1980.
- [16] Simpson P.G.: *Grzanie indukcyjne*. WNT, Warszawa 1964.
- [17] Szamow A.N., Bodażkow W.A.: *Projektirowanije i ekaplustacija wysokoczasnych ustanowok*. *Maszgiz*, Moskwa 1963.
- [18] Bytkowski A.G. i inni: *Upravljenije nagriewom metazła*. *Metallurgija*, Moskwa 1981.
- [19] Thelin C.: *Induction heating and hot shearing plant for billets at AB Bofors-Kilsta*. *Sveden ASEA Journal*, Nr 4, 1981.

- [20] Matthes H.G.: Umrichter als Mittel zur Rationalisierung und Energieerparung bei Induktionserwärmungsverfahren. Elektrowärme International, B. 1, 1979.
- [21] Schluckebier D.: Weiterentwicklung der magnetischen Frequenzumformung auf 450 Hz. Elektrowärme international. B. 1, 1979.
- [22] Matthes H.G.: Der Statistische Frequenz-Umrichter zum Einsatz in der industriellen Elektrowärme. Elektrowärme International. B. 3, 1977.
- [23] Morgun W.W., Czerbinskaja O.P.: Tiristornyje prieobrazowatieli powyszennoj czastoty dla elektrotermiczeskich ustanowok. Elektrotermija Nr 79, 1979.
- [24] Hornig G., Mehler F.: Der Mittelfrequenzumrichter Typ IMP-p 250/2,4 für die induktive Erwärmung. Elektrie, B. 12, 1981.
- [25] Woskriesienskij W.W.: Tiristornyje prieobrazowatieli dla pitanija indukcionnych ustanowok. Metalurgija, Moskwa 1979.
- [26] Gitgarc D.A., Ioffe J.C.: Swojstwa indukcionnych ustanowok kak nazruszki staticzeskich prieobrazowatieliej czastoty. Elektrotermija, No 75, 76, 1976.

Artykuł opracowano w ramach badań grupy tematycznej nr 1 (teoria pola), Pod-problemu Węzłowego O5.5A pt. "Wybrane podstawowe badania w dziedzinie elektrotechniki" wchodzące w skład problemu węzłowego O5.5 pt.: "Rozwój podzespołów i urządzeń elektrotechnicznych".

Recenzent: doc. dr hab. inż. Kazimierz Zakrzewski

Wpłynęło do redakcji dn. 28.V.1982 r.

#### ПРИМЕНЕНИЕ ИНДУКТИВНОГО НАГРЕВА В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

#### Резюме

В настоящей статье представлены возможности применения индуктивного нагрева в металлургической промышленности, а в особенности в трубочном производстве. Сравнены методы пламенного и индуктивного нагрева, представлены главные расчетные проблемы индукционных установок нагрева, представлены характеристики источников питания.

#### INDUCTION HEATING IN METALLURGICAL PROCESSES

#### Summary

The possibilities of use of induction heating in metallurgical industry, mainly in the the pipe industry, are described in the paper.

The methods of flame and induction heating are compared, main calculating problems of induction heaters are described, supply sources are characterized.

[1] ...

[2] ...

[3] ...

[4] ...

[5] ...

[6] ...

[7] ...

[8] ...

[9] ...

[10] ...

[11] ...

[12] ...

[13] ...

[14] ...

[15] ...

[16] ...

[17] ...

[18] ...

[19] ...

[20] ...

[21] ...

[22] ...

[23] ...

[24] ...

[25] ...

[26] ...

[27] ...

[28] ...

[29] ...

[30] ...

[31] ...

[32] ...

[33] ...

[34] ...

[35] ...

[36] ...

[37] ...

[38] ...

[39] ...

[40] ...

[41] ...

[42] ...

[43] ...

[44] ...

[45] ...

[46] ...

[47] ...

[48] ...

[49] ...

[50] ...

[51] ...

[52] ...

[53] ...

[54] ...

[55] ...

[56] ...

[57] ...

[58] ...

[59] ...

[60] ...

[61] ...

[62] ...

[63] ...

[64] ...

[65] ...

[66] ...

[67] ...

[68] ...

[69] ...

[70] ...

[71] ...

[72] ...

[73] ...

[74] ...

[75] ...

[76] ...

[77] ...

[78] ...

[79] ...

[80] ...

[81] ...

[82] ...

[83] ...

[84] ...

[85] ...

[86] ...

[87] ...

[88] ...

[89] ...

[90] ...

[91] ...

[92] ...

[93] ...

[94] ...

[95] ...

[96] ...

[97] ...

[98] ...

[99] ...

[100] ...