

Adam MAKOSZ

Tadeusz RODACKI

OPTIMALIZACJA MOCY NAGRZEWNICY INDUKCYJNEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono koncepcję nowego sposobu sterowania falownika nagrzewnicy indukcyjnej. Zadaniem sterowania jest doprowadzenie do układu wzbudnik - wsad maksymalnej mocy. Za pomocą procesu symulacji metoda ta została porównana do metody stałego czasu dysponowanego na wyłączenie tyrystorów falownika.

THE POWER OPTIMIZATION IN INDUCTION HEATER

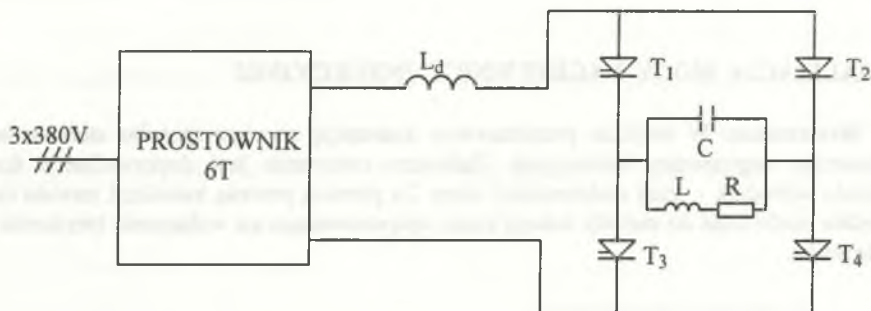
Summary. The new idea of controlling the frequency of the inverter in induction heater has been presented in the paper. The control aims at supplying the maximum power to the heating coil - charge system. This process has been compared to the constant circuit turn-off time of inverter thyristors.

1. WPROWADZENIE

Nagrzewanie indukcyjne jest szeroko stosowane w przemyśle metalurgicznym jako ekonomiczny sposób nagrzewania metalowych elementów, czy też hartowania ich powierzchni. Wykorzystanie przekształtników tyrystorowych spowodowało wypieranie przetwornic elektromaszynowych zwiększając sprawność procesów nagrzewania. Pośród źródeł zasilania nagrzewnic indukcyjnych jedno z ważniejszych miejsc zajmuje układ równoległego tyrystorowego falownika prądu zasilanego z prostownika sterowanego przez dławik o dużej indukcyjności (rys. 1). Jest on stosowany dla częstotliwości od kilkuset Hz do kilku kHz oraz dla mocy od kilku kW do ułamków MW [1, 2].

Podstawowym elementem takiego układu nagrzewnicy jest sterownik falownika, który realizuje zadany sposób sterowania. Jedną z najczęściej stosowanych i praktycznie jedyną metodą sterowania jest metoda regulacji stałego czasu dysponowanego na wyłączenie tyrystorów falownika (SCD) [3, 4]. Polega ona na tym, że sterownik tak zmienia częstotliwość

załączania zaworów, by utrzymać zadany przez operatora czas dysponowany na wyłączenie tyrystorów. Choć mowa o tyrystorach SCR, to falownik może być skonstruowany także na bazie tyrystorów GTO (czy RCT, ZTO, SITh) lub tranzystorów (IGBT, MOSFET, SIT), a metoda SCD może być zastosowana jako metoda uważana za efektywną.



Rys. 1. Schemat poglądowy nagrzewnicy indukcyjnej

Fig. 1. The scheme diagram of the induction heater

2. WADY METODY SCD

Sposób sterowania za pomocą metody SCD może być stosowany tylko tam, gdzie nie zachodzą duże zmiany R i L obciążenia falownika. Jeśli tak się dzieje, to mogą wystąpić problemy z doбором pojemności C obwodu rezonansowego falownika, tak by sterownik utrzymał stały czas dysponowany na wyłączenie tyrystorów. Prowadzi to w efekcie do zmniejszania częstotliwości pracy falownika w celu utrzymania wspomnianego czasu, co ze względu na zmienione parametry R i L nie jest możliwe [5]. Ilustracją omówionej sytuacji są wyniki symulacji przedstawione na rysunku 2 i 3. W lewym górnym rogu na rysunku 2 umieszczono wartość częstotliwości, przy której sterownik działał poprawnie po raz ostatni. W lewym górnym rogu na rysunku 3 umieszczono wartość maksymalną mocy, jaką w procesie nagrzewania falownik dostarczył do wsadu. Rezystancja i indukcyjność wsadu została wyznaczona metodą oporów magnetycznych. Założono, że wsad wykonano z materiału ferromagnetycznego, dla którego:

$$\sigma(9) = 10^7 / (0.00859 + 1) - \text{konduktywność wsadu}, \quad (1)$$

$$\mu(H, \vartheta) = 1 + \left(515300H^{-0.896} - 1 \right) \left(1 - \left(\frac{\vartheta}{750} \right)^6 \right) \quad \text{dla } \vartheta < 750 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2a)$$

$$\mu(H, \vartheta) = 1 \quad \text{dla } \vartheta \geq 750 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2b)$$

- przenikalność magnetyczna wsadu.

Symulację przeprowadzono dla danych:

$z = 85$ - liczba zwojów wzbudnika,

$l = 1 \text{ m}$ - długość wsadu,

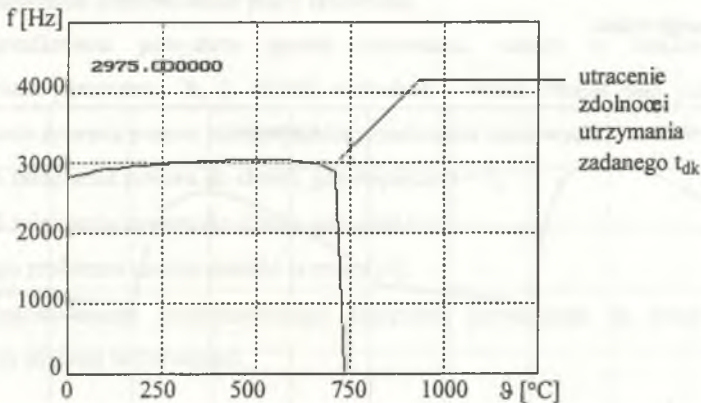
$r_{wsa} = 0.09$ - promień wsadu,

$r_{wzb} = 0.1$ - promień wzbudnika,

$k_w = 0.85$ - współczynnik wypełnienia uzwojeń,

$C = 80 \text{ } \mu\text{F}$ - pojemność obwodu falownika,

$I_{zas} = 300 \text{ A}$ - prąd prostownika.

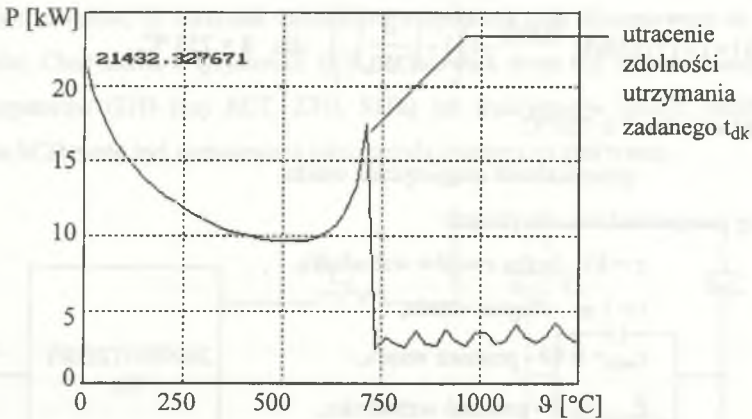


Rys. 2. Efekt "wyłączenia falownika" - przebieg częstotliwości

Fig. 2. The result of "switching-off the inverter" - the frequency course

W okolicach punktu Curie następuje znaczna zmiana wartości rezystancji i indukcyjności układu wzbudnik - wsad (rys. 4), co staje się przyczyną zmiany wartości częstotliwości drgań własnych obwodu falownika i pociąga za sobą sytuację, w której regulator nie może osiągnąć zadanego czasu. Częstotliwość drgań własnych układu wyrażona jest zależnością:

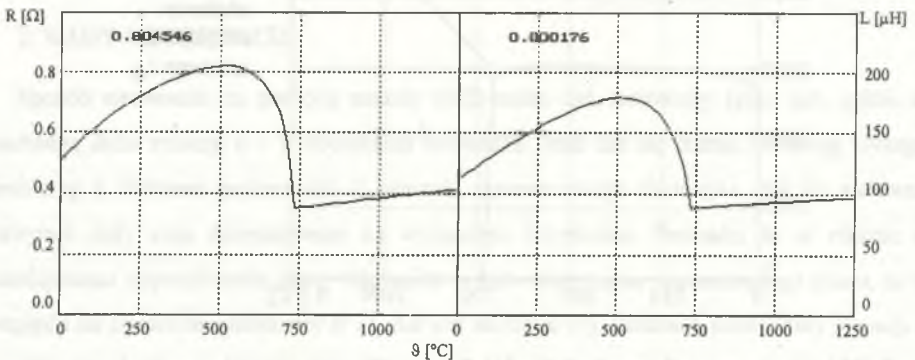
$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L} \right)^2} \quad (3)$$



Rys. 3. Efekt "wyłączenia falownika" - przebieg mocy

Fig. 3. The result of "switching-off the inverter" - the power course

O poprawności doboru pojemności bezpośrednio decyduje zakres zmian częstotliwości drgań własnych (1) - albo maksymalna, albo minimalna jej wartość powoduje, że nie można utrzymać zadanego czasu.



Rys. 4. Przykładowe zmiany R i L układu wzбудnik - wsad w funkcji temperatury wsadu. Wynik symulacji komputerowej

Fig. 4. Typical changes of R and L of heating coil - charge system as a function of the charge temperature. Computer simulation results

Stosowanie sterowania metodą SCD ma także negatywny wpływ na wartość mocy dostarczonej do wsadu przez falownik. Dla każdych wartości R , L układu wsad - wzбудnik, przy zasilaniu falownika prądem I oraz przy pojemności C w obwodzie falownika istnieje taka częstotliwość pracy, dla której moc dostarczona do wsadu osiąga wartość maksymalną.

Utrzymywanie przez sterownik stałego czasu dysponowanego powoduje, że falownik nie pracuje z maksymalną mocą. W ten sposób dopływ energii do wsadu ograniczany jest przez sterowanie.

3. METODA MAKSYMALIZACJI MOCY (MMM)

Badania symulacyjne wykazały, że istnieje takie sterowanie częstotliwością pracy falownika, które umożliwi dostarczenie do wsadu maksymalnej energii. Charakteryzuje się ono możliwością zastosowania pojemności C falownika o wartości należącej do znacznie szerszego przedziału, niż dla metody SCD. Wadą tego sterowania jest to, że czasy dysponowane na wyłączenie tyrystorów falownika są niekiedy na tyle małe, że wykluczają zastosowanie do budowy falownika tyrystorów SCR. Wadę tą można zniwelować stosując do konstrukcji falownika zawory półprzewodnikowe innego typu (GTO, tranzystory z diodami) lub zmieniając tak pojemność C falownika, by uzyskać zwiększenie czasu dysponowanego przez zmniejszenie częstotliwości pracy falownika.

Aby zrealizować powyższy sposób sterowania, należy w trakcie nagrzewania zidentyfikować parametry R , L układu wzbudnik - wsad. Proces taki jest możliwy do zrealizowania poprzez pomiar następujących przedziałów czasowych:

- od chwili załączenia zaworu do chwili, gdy napięcie $u = 0$,
- od chwili załączenia zaworu do chwili, gdy prąd $i = 0$.

Opis tego problemu można znaleźć w pracy [6].

Nad zastosowaniem przedstawionego algorytmu prowadzone są prace w IETiP w Politechnice Śląskiej w Gliwicach.

4. PORÓWNANIE METOD SCD I MMM

Porównanie obu metod przeprowadzono za pomocą programu symulacyjnego opartego na analizie symbolicznej. Założenia i opis programu można znaleźć w pracy [7]. Dla porównania pokazano także przebiegi dla częstotliwości dającej maksymalną moc (iteracyjnie poszukiwano częstotliwości, dla której ona występuje). Pokazano także wyniki przy sterowaniu metodą MMM dla danych podanych poniżej (metoda SCD, rys. 2 i 3), to jest:

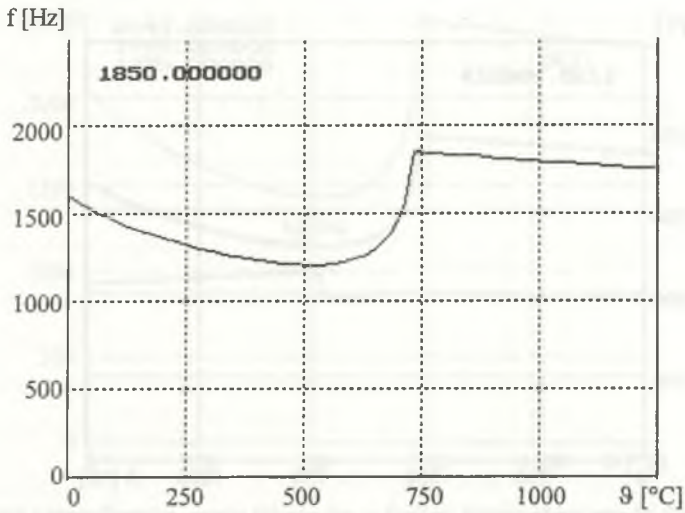
zestaw A: $z = 85$ - liczba zwojów wzbudnika,
 $l = 1$ m - długość wsadu,
 $r_{wsa} = 0.09$ - promień wsadu,
 $r_{wzb} = 0.1$ - promień wzbudnika,
 $k_w = 0.85$ - współczynnik wypełnienia uzwojeń,
 $C = 80 \mu\text{F}$ - pojemność obwodu falownika,
 $I_{zas} = 300$ A - prąd prostownika,
materiał wsadu - ferromagnetyk opisany równaniami 1, 2a, 2b.

Porównania metod SCD i MMM oraz wykresów dla maksymalnej mocy - MAX (wyznaczonych w sposób iteracyjny) dokonano dla danych:

zestaw B: $z = 80$ - liczba zwojów wzbudnika,
 $l = 0.9$ m - długość wsadu,
 $r_{wsa} = 0.09$ - promień wsadu,
 $r_{wzb} = 0.1$ - promień wzbudnika,
 $k_w = 0.85$ - współczynnik wypełnienia uzwojeń,
 $C = 87 \mu\text{F}$ - pojemność obwodu falownika,
 $I_{zas} = 100$ A - prąd prostownika,
materiał wsadu - ferromagnetyk opisany równaniami 1, 2a, 2b.

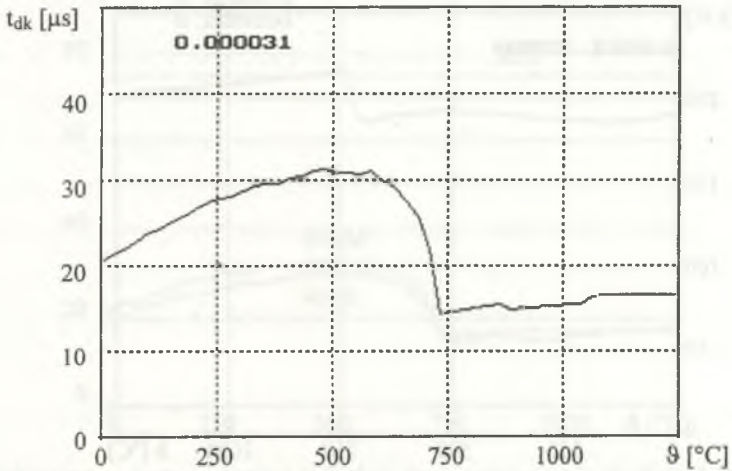
W lewych górnych narożnikach wykresów podane są maksymalne wartości przedstawionej wielkości w jednostkach układu SI. Jeśli badane są trzy metody, to wartości podawane są w kolejności: SCD, MMM, MAX.

Zaznaczyć należy, że prezentowane wykresy są wynikami symulacji komputerowych, a weryfikacja doświadczalna zostanie dopiero przeprowadzona po wykonaniu odpowiedniego urządzenia, nad którego konstrukcją prowadzi się prace w IETiP na Politechnice Śląskiej w Gliwicach.



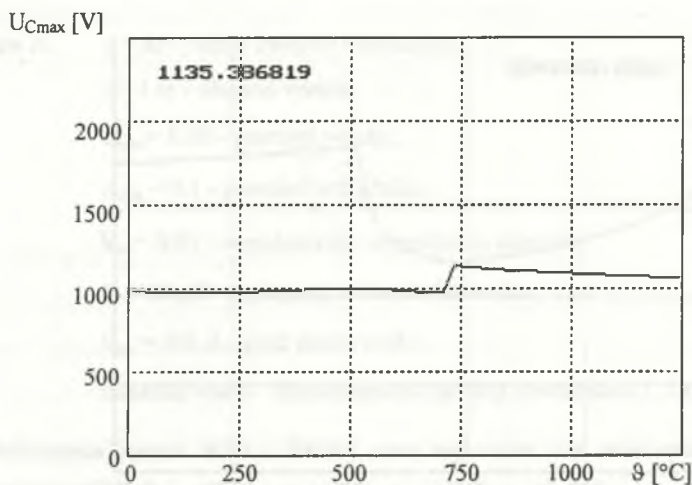
Rys. 5. Wykres częstotliwości pracy falownika w funkcji temperatury wsadu dla danych A

Fig. 5. The inverter frequency vs. charge temperature as per data A



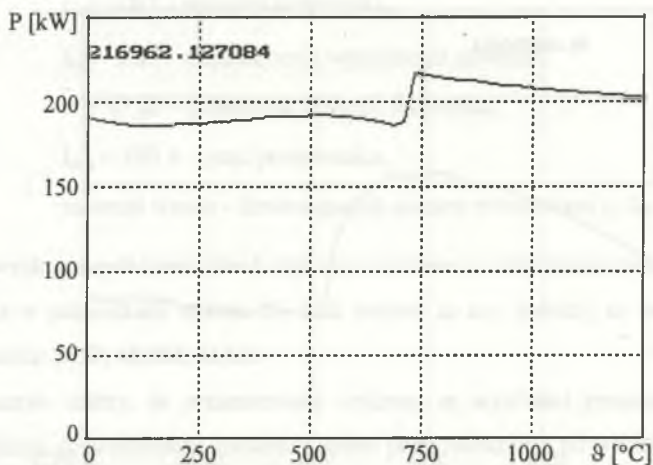
Rys. 6. Wykres czasu dysponowanego w funkcji temperatury wsadu dla danych A

Fig. 6. The circuit turn-off time vs. charge temperature as per data A



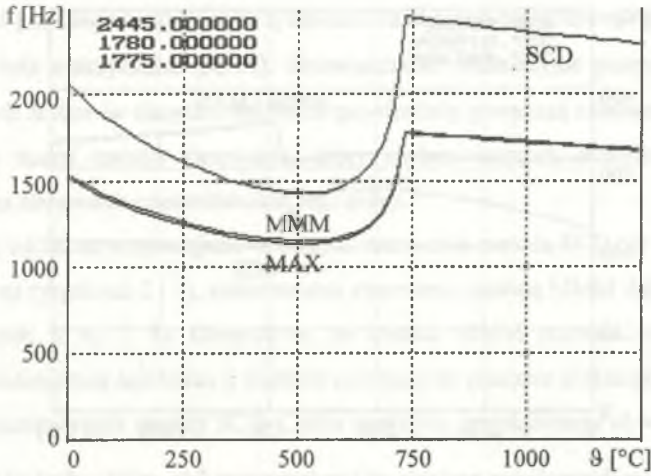
Rys. 7. Wykres maksymalnej wartości napięcia na kondensatorze falownika w funkcji temperatury wsadu dla danych A

Fig. 7. The inverter condenser maximum voltage vs. charge temperature as per data A

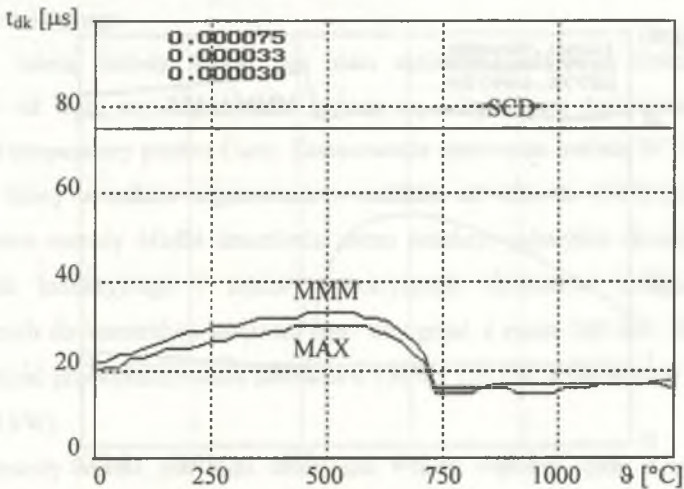


Rys. 8. Wykres mocy w funkcji temperatury wsadu dla danych A

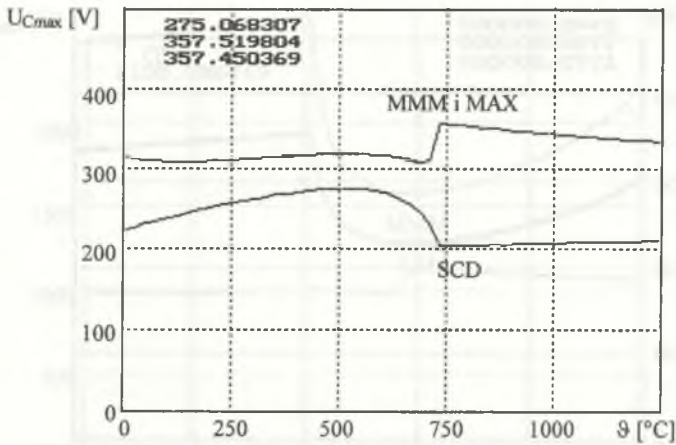
Fig. 8. The power vs. charge temperature as per data A



Rys. 9. Wykres częstotliwości pracy falownika w funkcji temperatury wsadu dla danych B
 Fig. 9. The inverter frequency vs. charge temperature as per data B

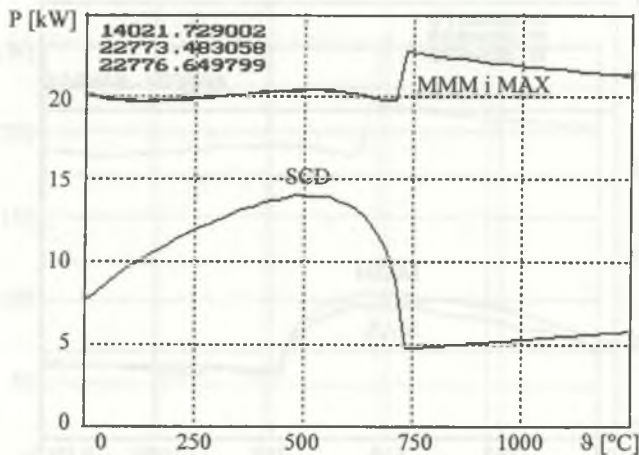


Rys. 10 Wykres czasu dysponowanego w funkcji temperatury wsadu dla danych B
 Fig. 10. The circuit turn-off time vs. charge temperature as per data B



Rys. 11. Wykres maksymalnego napięcia na kondensatorze falownika w funkcji temperatury wsadu dla danych B

Fig. 11. The inverter condenser maximum voltage vs. charge temperature as per data B



Rys. 12. Wykres mocy w funkcji temperatury wsadu dla danych B

Fig. 12. The power vs. charge temperature as per data B

5. PODSUMOWANIE

Z przedstawionych wykresów wynika, że przebiegi mocy, maksymalnego napięcia na kondensatorze falownika, częstotliwości pracy falownika oraz (w mniejszym stopniu) czasu dysponowanego na wyłączenie tyrystorów falownika otrzymane metodą MMM nie odbiegają

wartościami od przebiegów uzyskanych z obliczeń iterujących częstotliwość pracy falownika tak, by moc była maksymalna (MAX). Doświadczenia symulacyjne przeprowadzono dla kilkuset różnych zestawów danych i wszystkie potwierdziły powyższą zależność. Oznacza to, że znaleziony został sposób sterowania, który spełnia warunek maksymalizacji mocy falownika przez sterowanie częstotliwością jego pracy.

Okazuje się także, że w sytuacjach, w których sterowanie metodą SCD nie było skuteczne (podobnie jak na rysunkach 2 i 3), zastosowanie sterowania metodą MMM daje zadowalające rezultaty (rysunki 5, 6, 7, 8). Oznacza to, że metoda MMM pozwala na zastosowanie pojemności kondensatora falownika o wartości należącej do znacznie szerszego przedziału niż w przypadku zastosowania metody SCD. Cecha ta ułatwia projektowanie obwodów siłowych falownika.

Najważniejszą jednak zaletą metody MMM jest to, że wartość mocy falownika jest znacznie wyższa (od 30% do 90% - rysunek 12) od wartości mocy uzyskanej przez sterowanie metodą SCD. Oznacza to możliwość skrócenia czasu nagrzewania, a więc przyspieszenie procesu produkcyjnego.

Kolejną zaletą metody MMM jest mała zmienność mocy w trakcie nagrzewania niezależnie od tego, czy nagrzewanie kończy się osiągnięciem temperatury niższej, czy wyższej od temperatury punktu Curie. Zastosowanie sterowania metodą SCD daje w efekcie zmienność mocy w trakcie nagrzewania w zakresie od 40% do 150% (rysunki 3 i 12). Wykorzystanie metody MMM umożliwia zatem redukcję gabarytów (koszty) zasilacza do nagrzewania indukcyjnego i lepsze wykorzystanie elementów energoelektronicznych zastosowanych do konstrukcji zasilacza (np.: aby grzać z mocą 100 kW, dla metody SCD należy dokonać przewymiarowania zasilacza o 150% - 150 kW, a dla metody SCD wystarczy 110% - 110 kW).

Wadą metody MMM jest duża zmienność i małe wartości czasu dysponowanego na wyłączenie tyrystorów falownika. Należy więc albo zastąpić tyrystory SCR innymi zaworami, albo tak zmienić pojemność obwodu falownika, by spowodowało to obniżenie częstotliwości pracy na tyle, aby uzyskać odpowiednią wartość t_{dk} . Spowoduje to jednak obniżenie mocy falownika, któremu przeciwdziała się przez zwiększenie prądu zasilającego falownik (co także, choć w nieznacznym stopniu, powiększa t_{dk}).

Istnieje możliwość zoptymalizowania mocy nagrzewania przy sterowaniu metodą MMM zależnie od wartości zastosowanej pojemności - dla różnych pojemności obwodu falownika

moc przy sterowaniu metodą MMM jest różna. Powoduje to jednak zmiany częstotliwości nagrzewania, a więc wymaga zastosowania odpowiednich zaworów energoelektronicznych do konstrukcji falownika.

Wymienione cechy dają pozytywny obraz metody MMM, a jako że jej zastosowanie wydaje się dawać konkretne efekty materialne, staje się ona warta upowszechnienia.

LITERATURA

1. Grzesik B., Kasprzak M.: Stan aktualny urządzeń falownikowych średniej i wysokiej częstotliwości do nagrzewania indukcyjnego. VI Konferencja Badania Naukowe w Elektrotermii, Szczyrk 1994.
2. Hering M.: Postęp w dziedzinie tyrystorowych i tranzystorowych źródeł zasilania dla potrzeb grzejnictwa indukcyjnego. V Konferencja Badania Naukowe w Elektrotermii, Ustroń 1991.
3. Skoczkowski T., Kalus M.: Układ sterowania i regulacji falownika równoległego zasilającego nagrzewnicę indukcyjną. ZN Pol. Śl., Elektryka z. 120, Gliwice 1991.
4. Waradzyn Z.: Układ sterowania falownika prądu. V Konferencja Badania Naukowe w Elektrotermii, Ustroń 1991.
5. Makosz A.: Symulacja pracy falownika prądowego do nagrzewania indukcyjnego. Praca magisterska, Pol. Śl., Gliwice 1987.
6. Makosz A.: Identyfikacja parametrów układu wzbudnik - wsad. ZN Pol. Śl., Elektryka z. 147, Gliwice 1996.
7. Makosz A.: Symulacja pracy nagrzewnicy indukcyjnej. ZN Pol. Śl., Elektryka z. 147, Gliwice 1996.

Recenzent: Dr hab. inż. Czesław Sajdak. Prof. Pol. Śl.

Wpłynęło do Redakcji dnia 2 listopada 1995 r.

Abstract

Induction heating is often used in metallurgical industry as very effective method of heating steel elements or tempering their surfaces. Current parallel inverter connected to the controlled rectifier by inductor of high value inductance is one of the most important devices used in induction heating (fig. 1).

The new idea of controlling the frequency of the inverter in induction heater has been presented in the paper. The control aims at supplying the maximum power to the heating coil - charge system. The drawbacks of the universally applied method, where the constant circuit turn-off time of the inverter thyristors is adjusted are presented in the paper (fig. 2, 3). The reasons of this are changes of the resistance and inductance of inverter charge during the heating process (fig. 4). The two methods have been compared by means of a simulation program.

The results of the simulation have been represented graphically (fig. 5 -12). The principal advantages of the maximum power method have been described. They show that the maximum power method is one of the most effective way of controlling induction heating process.