

Adam MAKOSZ

IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW WSADU

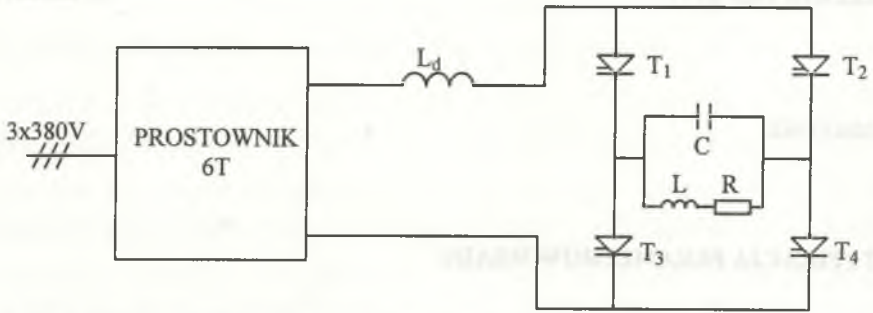
Streszczenie. W artykule przedstawiono koncepcję identyfikacji parametrów R i L układu wzbudnik - wsad w trakcie procesu nagrzewania indukcyjnego. Identyfikacja bazuje na pomiarze przedziałów czasowych związanych z przebiegami prądu i napięcia układu wzbudnik - wsad. Zamieszczono przykładowe wykresy charakterystycznych wielkości wyznaczone za pomocą programu komputerowego.

THE IDENTIFICATION OF THE CHARGE PARAMETERS

Summary. The idea of identifying the R and L parameters of heating coil-charge system during the induction heating process is presented in the article. The identification is based on the measurement of time intervals related to the current and voltage courses of the heating coil-charge system. The results of the typical quantities calculated with the help of computer program are represented in the graphical form.

1. WPROWADZENIE

Nagrzewanie indukcyjne wsadów ferromagnetycznych jest skomplikowanym procesem fizycznym. Na skutek nieliniowości podstawowych parametrów opisujących proces indukcji elektromagnetycznej problem nagrzewania wsadu od strony sterowania ogranicza się do kontrolowania najistotniejszych parametrów elektrycznych w taki sposób, by nagrzewanie było procesem skutecznym. Na rysunku 1 przedstawiono schemat analizowanej nagrzewnicy indukcyjnej, zbudowanej na podstawie równoległego falownika prądu. Układ ten jest bardzo rozpowszechniony, ma zastosowanie w zakresie częstotliwości od kilkuset do 5000 Hz dla tyrystorów SCR i mocy ok kilku kW do ułamków MW [1, 2].

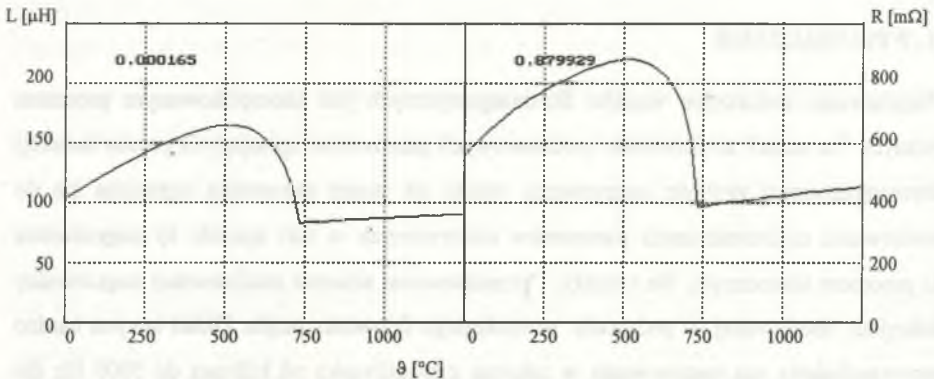


Rys. 1. Schemat nagrzewnicy indukcyjnej

Fig. 1. The scheme diagram of the induction heater

Dla tego układu sterowanie sprowadza się do kontrolowania czasu dysponowanego na wyłączenie tyrystorów i takim korygowaniu częstotliwości pracy, by czas dysponowany został utrzymany na zadanym poziomie.

W trakcie nagrzewania zmianie ulegają wartości R i L układu wzbudnik - wsad. Zmiany te są dwójakiego rodzaju. Długotrwałe - postępujące w trakcie całego procesu i determinowane głównie przez temperaturę wsadu (rys. 2), a zaburzane zmianą częstotliwości pracy falownika oraz zmiany szybkie, których przyczyną jest zmiana natężenia pola



Rys. 2. Przykładowe zmiany R i L układu wzbudnik - wsad w trakcie nagrzewania. Wyniki symulacji komputerowej

Fig. 2. The typical changes of R and L of the heating coil-charge system during heating process. Computer simulation results

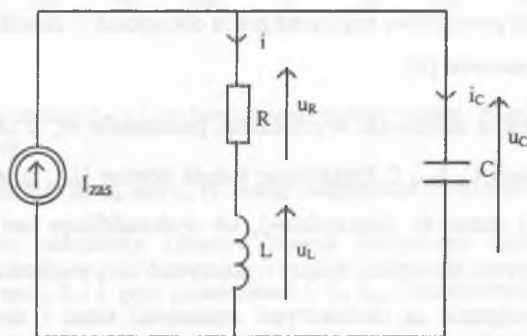
magnetycznego w trakcie jednego okresu pracy falownika. Mają one znikomy wpływ na kształt przebiegów czasowych wielkości elektrycznych falownika, czego dowodzi analiza

zawartości wyższych harmonicznych w prądzie i napięciu falownika [3, 4]. Zmiany długotrwałe mają istotny wpływ na proces nagrzewania i determinują one najważniejszą wielkość procesu - moc dostarczoną do wsadu. Decydują więc o efektywności nagrzewania.

Budowane aktualnie nagrzewnice o konstrukcji przedstawionej na rysunku 1 funkcjonują opierając się na wspomnianym algorytmie sterowania, utrzymującym stały czas dysponowany na wyłączenie tyrystorów falownika [5, 6, 7]. Taki algorytm nie jest w stanie dostosować działania falownika do zmian parametrów obciążenia. Aby uzyskać lepsze efekty energetyczne [8], należy zastosować proces identyfikacji parametrów obciążenia falownika (R i L układu wzbudnik - wsad) w trakcie procesu nagrzewania.

2. OPIS MATEMATYCZNY

Aby określać wartości parametrów R, L układu wzbudnik - wsad, należy stworzyć model matematyczny nagrzewnicy z rysunku 1. Zastosowany do analizy obwód elektryczny przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Schemat zastępczy nagrzewnicy z rysunku 1

Fig. 3. The induction heater equivalent scheme (heater shown in Fig. 1)

Przyjęto następujące założenia:

- wszystkie elementy elektryczne są idealne,
- nie uwzględnia się komutacji,
- prostownik wraz z układem regulacji prądu obwodu pośredniczącego i dławikiem L_d zastąpiono źródłem prądu [4],

- analizuje się tylko przebiegi oscylacyjne falownika $\left(\frac{1}{LC} > \frac{R^2}{4L^2} \right)$.

W efekcie otrzymuje się równanie różniczkowe:

$$I_{zas} = LC \frac{d^2 i}{dt^2} + RC \frac{di}{dt} + i. \quad (1)$$

Rozwiązaniem równania są zależności opisujące obwód falownika:

$$i(t) = \frac{2U_0 - R(I_0 + I)}{2\omega L} e^{-\xi t} \sin \omega t + (I_0 - I) e^{-\xi t} \cos \omega t + I, \quad (2)$$

$$i_c(t) = \frac{R(I_0 + I) - 2U_0}{2\omega L} e^{-\xi t} \sin \omega t + (I - I_0) e^{-\xi t} \cos \omega t, \quad (3)$$

$$u_c(t) = RI + (U_0 - RI) e^{-\xi t} \cos \omega t + \left[\frac{R}{2\omega L} (U_0 - IR) + \frac{I - I_0}{\omega C} \right] e^{-\xi t} \sin \omega t, \quad (4)$$

gdzie:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad \text{- częstotliwość drgań własnych układu,} \quad (5)$$

$$\xi = \frac{R}{2L} \quad \text{- współczynnik tłumienia drgań własnych układu,} \quad (6)$$

T - okres pracy falownika,

U_0, I_0 - warunki początkowe napięcia i prądu obciążenia w chwili załączenia kolejnej pary zaworów [9].

Wielkości U_0, I_0 niosą możliwość wyznaczenia parametrów R, L obciążenia falownika przy znanych wartościach C, I_{zas}, f . Praktycznie jednak pomiar U_0, I_0 jest niemożliwy (lub bardzo niedokładny, a przez to nieprzydatny), co dyskwalifikuje ten sposób określania parametrów R, L obciążenia falownika. Należy wykorzystać inne wielkości.

Napięcie i prąd obciążenia są niezależnymi zmiennymi stanu i zawierają dostateczne informacje do wyznaczenia R, L . Aby nie dokonywać pomiaru chwilowych wartości prądu i napięcia, proponuje się wykorzystać pomiar przedziałów czasowych określonych nierozwiązywalnymi symbolicznie równaniami:

$$u_c(t_{dk}) = 0, \quad (7)$$

$$i_0(t_{iz}) = 0. \quad (8)$$

Pomiar przedziałów czasowych rozpocząć należy w chwili załączenia kolejnej pary zaworów falownika. Rysunek 4 przedstawia zmiany wartości przedziałów czasowych t_{dk} i t_{iz} w trakcie nagrzewania indukcyjnego dla danych:

$$z = 85 \text{ - liczba zwojów,}$$

$l = 1 \text{ m}$ - długość wsadu,

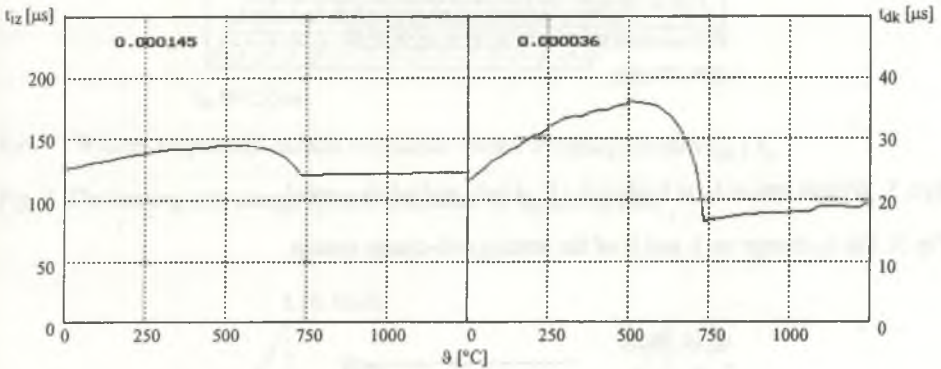
$r_{\text{wsa}} = 0.09 \text{ m}$ - promień wsadu,

$r_{\text{wzb}} = 0.10 \text{ m}$ - promień wzbudnika,

$k_w = 0.85$ - współczynnik wypełnienia uzwojenia,

$C = 100 \mu\text{F}$ - pojemność kondensatora falownika,

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



Rys. 4. Przykładowe zmiany t_{dk} i t_{iz} w funkcji temperatury wsadu. Wyniki symulacji komputerowej

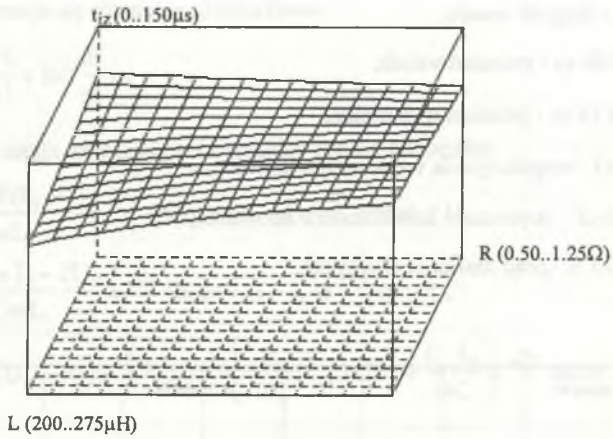
Fig. 4. The typical changes of t_{dk} and t_{iz} vs. charge temperature. Computer simulation results

Oba wymienione przedziały czasowe można wyznaczyć iteracyjnie jako funkcje zmiennych niezależnych R i L przy parametrach f , C , I_{zas} . Przedstawiają to rysunki 5 i 6 ($f = 1000 \text{ Hz}$, $C = 100 \mu\text{F}$, $I_{\text{zas}} = 200 \text{ A}$). Aby można było wykorzystać je do wyznaczenia R i L , należy dokonać konwersji tych funkcji na postać:

$$R = f_1(t_{dk}, t_{iz}), \quad (9)$$

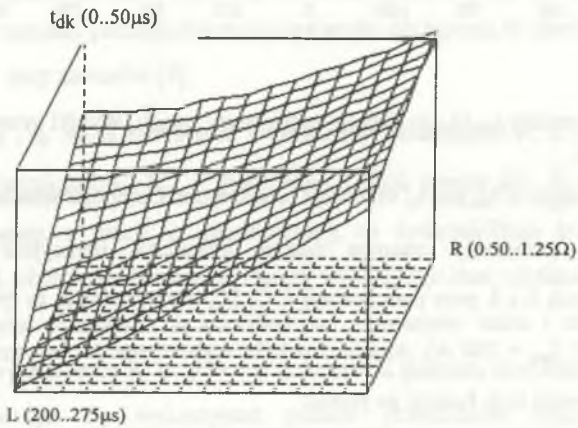
$$L = f_2(t_{dk}, t_{iz}), \quad (10)$$

przy parametrach f , C , I_{zas} . Przedstawiają to rysunki 7 i 8 ($f = 1000 \text{ Hz}$, $C = 100 \mu\text{F}$, $I_{\text{zas}} = 200 \text{ A}$). Na rysunkach 5, 6, 7, 8 w nawiasach podano zakres zmian oznaczonych wielkości (dolne ograniczenie .. górne ograniczenie).



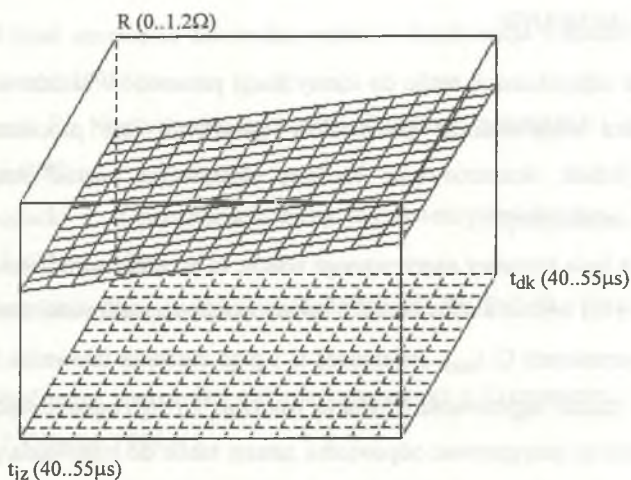
Rys. 5. Wykres zmian t_{iz} w funkcji L i R układu wzбудnik - wsad

Fig. 5. The t_{iz} change vs. L and R of the heating coil-charge system



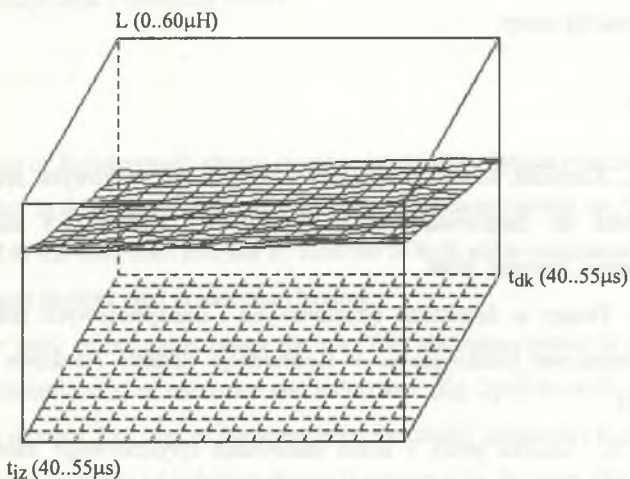
Rys. 6. Wykres zmian t_{dk} w funkcji R i L układu wzbudnik - wsad

Fig. 6. The t_{dk} change vs. L and R of the heating coil-charge system



Rys. 7. Wykres rezystancji układu wzbudnik - wsad w funkcji czasów t_{dk} i t_{iz}

Fig. 7. The heating coil-charge system resistance vs. t_{dk} and t_{iz} time



Rys. 8. Wykres indukcyjności układu wzbudnik - wsad w funkcji czasów t_{dk} i t_{iz}

Fig. 8. The heating coil-charge system inductance vs. t_{dk} and t_{iz} time

Przedstawione wykresy zostały wyznaczone na podstawie programu komputerowego skonstruowanego w IETiP na Politechnice Śląskiej w Gliwicach.

3. PODSUMOWANIE

Tworzenie odpowiednich tablic do identyfikacji parametrów układu wzбудnik - wsad na bazie pomiaru odpowiednich przedziałów czasowych jest procesem czasochłonnym. Umożliwia jednak skonstruowanie bardziej efektywnych metod sterowania falownika nagrzewnicy indukcyjnej [9].

Jeśli znane będą rozmiary nagrzewanego wsadu, to po przeprowadzeniu symulacji procesu nagrzewania [10] będzie można określić zakres zmian częstotliwości pracy falownika (przy dobranych wartościach C , I_{zas}). Pojemność C i prąd zasilania falownika I_{zas} z reguły nie są zmieniane w trakcie nagrzewania (chyba że zmuszają do tego ograniczenia napięciowe i prądowe). Pozwoli to przygotować odpowiedni zestaw tablic do sterowania (sterownik zmienia częstotliwość pracy falownika w sposób dyskretny, co ogranicza liczbę potrzebnych tablic). Problem sterowania przy użyciu wielkiej liczby danych został przedstawiony w pracy [11].

W IETiP na Politechnice Śląskiej prowadzone są aktualnie prace badawcze na temat możliwości wykorzystania identyfikacji parametrów wsadu do sterowania pracą falownika metodą maksymalnej mocy.

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. Waradzyn Z.: Analiza pracy i układ sterowania tyrystorowego falownika prądu do nagrzewania indukcyjnego. Praca doktorska, AGH, Kraków 1993.
4. Makosz A.: Symulacja pracy falownika prądowego do nagrzewania indukcyjnego. Praca magisterska, Pol. Śl., Gliwice 1987.
5. Skoczkowski T., Kalus M.: Układ sterowania i regulacji falownika równoległego zasilającego nagrzewnicę indukcyjną. ZN Pol. Śl., Elektryka z. 120, Gliwice 1991.
6. Kalus M.: Sterowanie optymalne grzania indukcyjnego rur. Praca doktorska, Pol. Śl., Gliwice 1985.

7. Waradzyn Z.: Układ sterowania falownika prądu. V Konferencja Badania Naukowe w Elektrotermii, Ustroń 1991.
8. Sajdak C., Samek E.: Nagrzewanie indukcyjne. Podstawy teoretyczne i zastosowanie. Śląsk, Katowice 1987.
9. Makosz A., Rodacki T.: Optymalizacja mocy nagrzewnicy indukcyjnej. ZN Pol. Śl., Elektryka z. 147, Gliwice 1996.
10. Makosz A.: Symulacja pracy nagrzewnicy indukcyjnej. ZN Pol. Śl., Elektryka z. 147, Gliwice 1996.
11. Makosz A.: Współpraca sterownika mikroprocesorowego z komputerem. 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 of ferromagnetic charge is very complicated physical process. Using power electronic converters in this process cause that the heating efficiency grows up. Current parallel inverter connected to the controlled rectifier by inductor of high value inductance (fig. 1) is one of the most important devices used in induction heating.

Controlling the work of induction heater the way that maximum power is supplied to the charge needs the identification of resistance and inductance (fig. 2) of the coil - charge system during the heating process. The idea of the identifying the charge parameters is presented in the paper. The mathematical model of induction heater is presented in the paper (fig. 3, equ. 1 - 6). The identifying process needs measurements of time intervals described by equations 7, 8. The way of transforming the measured time intervals into the resistance and inductance values being identified has been explained. The typical changes of described time intervals during the heating process are presented at fig. 4. Time intervals changes vs. resistance and inductance of heating coil - charge system (fig. 5, 6) and results of transforming them (fig. 7, 8) are presented in the paper. The advantages of applying the process of identifying the parameters of the heating coil - charge system have been listed.