

**PIOTR URBANEK, JACEK KUCHARSKI**  
Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej

## **IDENTYFIKACJA WSADU W DWUCZĘSTOTLIWOŚCIOWYM NAGRZEWANIU INDUKCYJNYM**

*W pracy przedstawiono założenia dotyczące struktury i działania systemu określającego zdolność do nagrzewania wsadu przy założonym procesie technologicznym na stanowisku inteligentnego generatora dwuczęstotliwościowego. Opisano metody potwierdzania własności fizycznych nagrzewanego wsadu oraz otrzymywania doświadczalnego nowych informacji, które mogą być zapisane w postaci reguł w bazie wiedzy.*

### **WPROWADZENIE**

Pomimo wielu zalet nagrzewania indukcyjnego wsadów metalicznych (duża szybkość, możliwość nagrzewania ciała w jego wybranych obszarach, możliwość nagrzewania ciał w ruchu) jej wadą jest mała elastyczność w zakresie dopasowania do zmieniającego się typu wzbudnika, czy rodzaju nagrzewanego wsadu oraz zmian jego parametrów elektrycznych i cieplnych w funkcji temperatury. Parametry takie, jak moc znamionowa i częstotliwość prądu dostarczanego płynącego do wzbudnika były najczęściej stałe i zdeterminowane budową generatora. W efekcie już na samym początku nagrzewania wiadomo było, że pewnych procesów nagrzewania na danym stanowisku nie da się zrealizować, a inne mogą być przeprowadzone dopiero po uprzednim dostrojeniu impedancyjnym. Zmiana parametrów elektrycznych układu generator-wzbudnik-wsad polega na zamontowaniu odpowiedniego wzbudnika, doborze przekładni transformatora dopasowującego i załączeniu baterii kondensatorów w celu kompensacji mocy biernej. Pomimo zrealizowania takiego doboru mogło jednak dość do sytuacji, że przy nagrzewaniu ciał do wysokich temperatur (powyżej przemiany fazowej) moc generowana we wsadzie gwałtownie malała nie pozwalając na osiągnięcie zadanej temperatury wsadu. Podczas pierwszej próby nagrzewania obsługa zwykle nie wiedziała, czy dany materiał osiągnie założoną temperaturę wymaganą do jego obróbki. Niepewność ta wynika ze złożonego charakteru procesów fizycznych, jakie zachodzą w trakcie nagrzewania wsadu.

Biorąc pod uwagę opisane wyżej techniczne niedogodności nagrzewania indukcyjnego w zespole Zastosowań Informatyki w Elektrotechnologiach rozpoczęto realizację budowy nowoczesnego, posiadającego cechy inteligencji obliczeniowej generatora dwuczęstotliwościowego. Dzięki wyposażeniu go w układy dopasowania do zmieniającej się impedancji obciążenia oraz sterujące tym procesem algorytmy wykorzystujące nieprecyzyjne dane pomiarowe będzie on w stanie samoczynnie dopasować się do zmiany parametrów obciążenia w wyniku realizowania procesu technologicznego. Dodatkowo, dzięki wbudowanej bazie danych własności fizycznych nagrzewanych wsadów oraz algorytmach wnioskowania typowych dla baz wiedzy, urządzenie będzie w stanie wspomóc nie tylko sterowanie procesem samego nagrzewania, ale również ułatwić obsługę procesu dopasowania impedancji wyjścia generatora do układu wzbudnik-wsad.

### 1. WPŁYW ZMIAN WŁASNOŚCI FIZYCZNYCH WSADU PODCZAS PROCESU NAGRZEWANIA INDUKCYJNEGO NA JEGO IMPEDANCJĘ WIDZIANĄ Z ZACISKÓW GENERATORA W.CZ.

Większość procesów technologicznych, w których jest wykorzystywane nagrzewanie indukcyjne wymaga osiągnięcia wysokich temperatur w bardzo krótkim czasie, co powoduje, że w trakcie procesu nagrzewania równie szybko zmieniają się ich własności materiałowe, z których najważniejsze to:

- Dla wsadów ferromagnetycznych poniżej temperatury tzw. punktu Curie (dla typowych stopów stali wynosi ona ok. 700°C) istnieje duża, nieliniowa zmienność przenikalności magnetycznej względnej  $\mu_r$  wyrażanej jako stosunek indukcji magnetycznej  $B [T]$  do natężenia pola magnetycznego  $H [A/m]$  ( $\mu_r = B/H$ ). Powyżej tej temperatury ferromagnetyki na skutek zmiany fazy ciała stałego stają się paramagnetykami ( $\mu_r \cong 1$ ), co znacznie zmniejsza sprawność tego rodzaju nagrzewania,
- Rosnąca wartość rezystywności wsadu wraz ze wzrostem jego temperatury ( $\rho = f(\theta)$ ), również powoduje spadek gęstości prądu we wsadzie przekładającej się na spadek mocy czynnej w nim generowanej. Na rezystywność wsadu ma również wpływ efekt naskórkowości, który rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości pola elektromagnetycznego,
- W zakresie parametrów cieplnych na uwagę zasługuje również zmiana przewodności cieplnej  $\lambda$  oraz ciepła właściwego  $c_w$  wraz

z temperaturą ciała (najczęściej wartości te w zakresie 20÷1000°C zmieniają się średnio o około 25%.

Traktując układ generator – wzbudnik – wsad, jako obwód elektryczny, w którym wzbudnik wraz ze wsadem jest reprezentowany, jako zmieniająca się w trakcie nagrzewania impedancja obciążenia  $Z$ :

$$Z = R + jX_L \quad (1)$$

gdzie:  $R$  – rezystancja układu wzbudnik – wsad,  
 $X_L$  – reaktancja układu wzbudnik – wsad ( $X_L = 2\pi fL$ ),

można stwierdzić, że zmiana w trakcie procesu nagrzewania  $R$  zależy od częstotliwości  $f$  prądu indukowanego we wsadzie (efekt naskórkowości) oraz jego temperatury  $\vartheta$  (zmiana rezystywności ciała ( $\rho = F(f, \vartheta)$ ), natomiast  $X_L$  zależy głównie od częstotliwości  $f$  pola magnetycznego. Wzrost temperatury wsadu  $\vartheta$  będzie powodował wzrost obciążenia generatora i w zależności od jego budowy spowoduje albo spadek mocy czynnej generowanej we wsadzie, albo przeciążenie źródła zasilania.

Powyższe rozważania wskazują na potrzebę, aby przed oraz podczas procesu nagrzewania indukcyjnego ciał metalicznych (a szczególnie ferromagnetyków) zrealizować automatyczne dopasowanie impedancyjne wymuszone zmianą ich parametrów materiałowych w funkcji temperatury. Sposób realizacji tego zadania zostanie przedstawiony w dalszej części artykułu.

## 2. METODY IDENTYFIKACJI ZDOLNOŚCI NAGRZEWANIA WSADU NA STANOWISKU INTELIGENTNEGO GENERATORA DWUCZĘSTOTLIWOŚCIOWEGO

Idea inteligentnego generatora dwuczęstotliwościowego bazuje na dwóch adaptacyjnych układach dopasowania do impedancji obciążenia  $Z$  :

- Dopasowania pasywnego, przy wykorzystaniu zmian sprzężeń magnetycznych w elementach układów rezonansowych [1].
- Dopasowania wymuszonego realizowanego za pomocą specjalnych algorytmów zmiany częstotliwości w trakcie procesu nagrzewania wsadu.

Jeden i drugi rodzaj dopasowania będzie oparty zarówno na wbudowanej do systemu bazie wiedzy, jak i metodzie „uczenia się” przebiegu procesu nagrzewania. Jako parametry wejściowe będą w tych działaniach wykorzystywane nie tylko mierzone sygnały elektryczne źródła zasilania, ale również inne sygnały pochodzące z realizowanego procesu, tj. rozkłady temperatury wsadu, czy informacje o pracy podajników wsadu.

Z naukowego punktu widzenia można tu mówić o zagadnieniu sterowania opartego na wektorze niepewnych i/lub nieprecyzyjnych sygnałów wejściowych z wykorzystaniem bazy wiedzy i mechanizmów wnioskowania, w tym wnioskowania przybliżonego.

Ogólny schemat postępowania przy dopasowaniu impedancyjnym oraz identyfikacji wsadu na stanowisku pokazany jest na rys. 1.

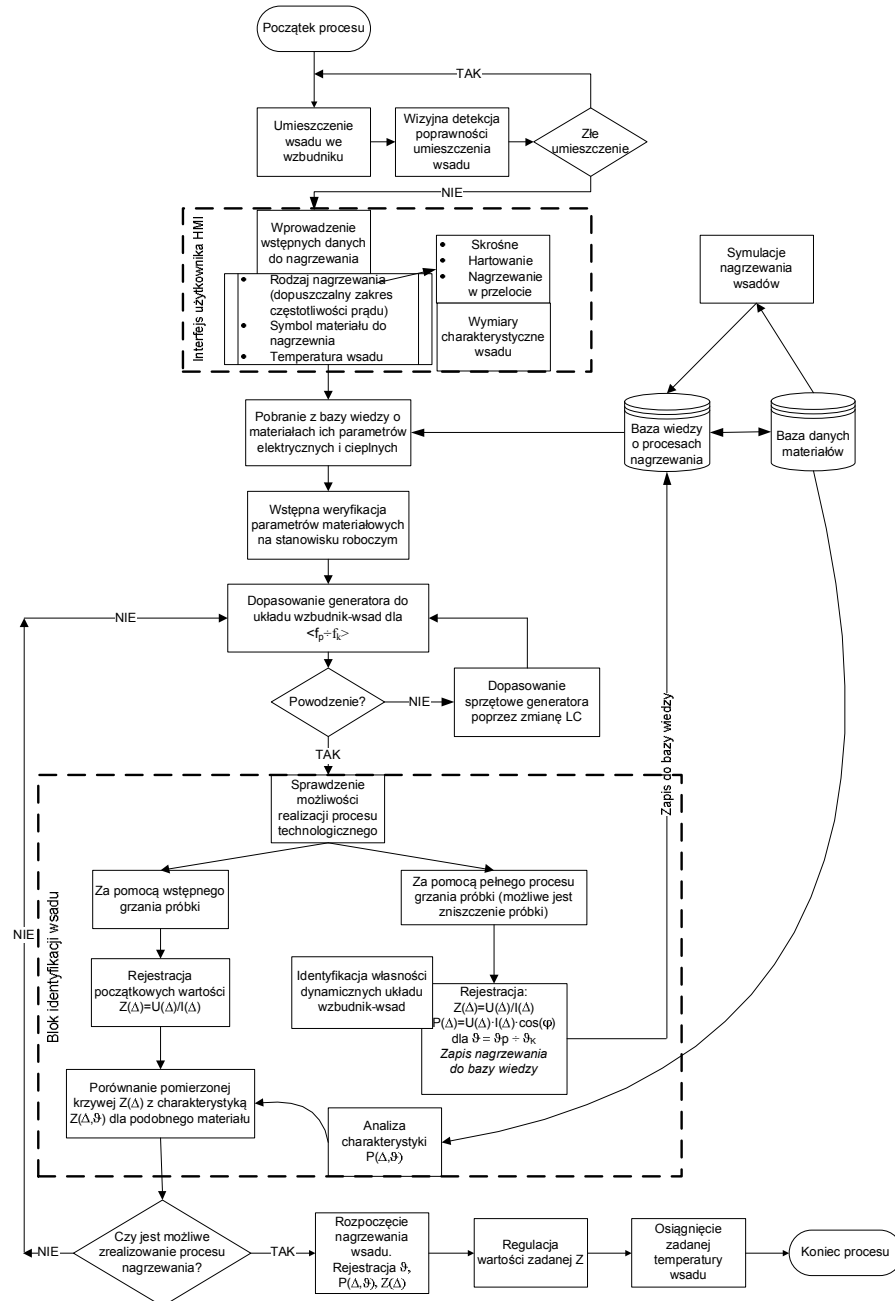
Przedstawiony na rys. 1 schemat przedstawia algorytm postępowania podczas procesu nagrzewania wsadu o nieznanymi bliżej własnościach materiałowych do określonej temperatury. Przed rozpoczęciem cyklu nagrzewania zakłada się, że kształt oraz liczba zwojów wzbudnika dostosowane są do geometrii wsadu oraz rodzaju nagrzewania (nagrzewanie skośne, hartowanie, itp.). W takim wypadku system identyfikacji wizyjnej położenia wsadu kontroluje jedynie poprawność jego umieszczenia we wzbudniku. W kolejnym kroku obsługa wprowadza podstawowe dane parametrów nagrzewania, takie jak: rodzaj nagrzewania, wymiary charakterystyczne wsadu dla danego rodzaju nagrzewania, temperatura nagrzewania wsadu oraz rodzaj materiału (symbol stopu), z którego wykonany jest wsad. Następnie, z istniejącej bazy danych własności materiałów pobierana jest informacja o podstawowych parametrach elektrycznych i cieplnych grzanej próbki. Na tej podstawie algorytm doboru określi: dopuszczalny zakres częstotliwości prądu we wzbudniku ( $\langle f_p \div f_k \rangle$ ), oraz sprawdzi, czy dla tych częstotliwości istnieje częstotliwość optymalnej pracy układu (pojęcie optymalnej pracy układu generator-wzbudnik-wsad zostało wyjaśnione w pracy [2] w oparciu o analizę zmienności modułu impedancji  $|Z|$  oraz kąta przesunięcia fazowego  $\varphi$  między prądem a napięciem na wzbudniku w funkcji częstotliwości prądu). Jeśli nie, to następuje procedura pasywnego dopasowania impedancyjnego realizowana poprzez zmianę wartości indukcyjności i pojemności (LC), opisana w [2]. Po takim dopasowaniu następuje ponowne sprawdzenie, czy dla wybranego zakresu częstotliwości  $\langle f_p \div f_k \rangle$  można uzyskać jeszcze lepsze dopasowanie do optymalnej pracy układu. Może się to odbyć poprzez wymuszenie w układzie wzbudnik – wsad sygnału zbliżonego do impulsu Diraca i analizy numerycznej, które częstotliwości prądu z wybranego wcześniej zakresu  $\langle f_p \div f_k \rangle$  mogą być użyte do zapewnienia stabilnej pracy analizowanego układu.

**W niniejszym artykule opisane zostaną procedury badania możliwości nagrzewania do określonej temperatury  $\vartheta$  włożonej do wzbudnika próbki polegające na porównaniu wybranych własności nagrzewanego wsadu z bazą danych własności materiałowych oraz wnioskującą bazą wiedzy zawierającą informacje o sposobie nagrzewania.** Ich zadaniem jest potwierdzenie zapisanych wcześniej w bazie danych własności materiałowych wsadu oraz uzupełnienie tych własności o nowe dane pomiarowe, które będą zapisane w postaci predykatów (wrażen opisujących własności próbki i relacji między

nimi) dających się wykorzystać do budowy klauzul opisujących sposób nagrzewania wsadu. Procedury te zostały ujęte na rysunku 1 w zestawie działań o nazwie „Blok identyfikacji wsadu”. Mają one na celu przede wszystkim odpowiedzieć na pytanie, czy przy określonych wcześniej parametrach nagrzewania (częstotliwość prądu wymuszającego, moc znamionowa generatora, wartość impedancji dopasowania) będzie można skutecznie przeprowadzić założony dla danego wsadu proces technologiczny.

Badania takie będzie można przeprowadzić na dwa sposoby:

- Za pomocą wstępnego nagrzewania próbki połączonego z pomiarem impedancji układu wzbudnik wsad. Jest to tzw. metoda nieniszcząca polegająca na pomiarze wartości napięcia  $u(t)$ , prądu we wzbudniku  $i(t)$  oraz współczynnika mocy  $\cos(\varphi)$  dla wybranej wcześniej częstotliwości prądu  $f$  oraz początkowych wartości temperatury  $\vartheta$  wsadu (np. do 100°C). Następnie obliczone charakterystyki impedancji  $z(\Delta) = u(\Delta)/i(\Delta)$  oraz mocy  $P(\Delta) = u(\Delta) \cdot i(\Delta) \cdot \cos(\varphi)$  (gdzie  $\Delta$  jest czasem próbkowania rejestrowanego sygnału,  $\varphi$  – kątem przesunięcia fazowego między napięciem a prądem) są porównywane z charakterystykami zapisanymi w bazie wiedzy o procesie technologicznym dla danej klasy materiałów. Zakłada się przy tym, że wcześniejsza wiedza zapisana o danym rodzaju wsadu wystarczy do przewidzenia, czy będzie możliwe nagrzanie wsadu do założonej temperatury.
- Za pomocą rejestracji nagrzewania próbki w pełnym zakresie temperatury. Metoda ta będzie stosowna w sytuacji, gdy baza wiedzy nie zawiera wystarczających informacji o realizacji procesu technologicznego. Metoda ta dopuszcza przegrzanie (a przez to zniszczenie) próbki w celach zarejestrowania wartości prądu we wzbudniku  $i(\Delta, \vartheta)$  oraz napięcia zasilającego  $u(\Delta, \vartheta)$ , w funkcji czasu nagrzewania  $t$  i temperatury  $\vartheta$ . Tak, jak poprzednio obliczane są wartości  $z(\Delta, \vartheta)$  oraz  $P(\Delta, \vartheta)$ . Dodatkowo, podczas nagrzewania wsadu badana jest jego odpowiedź temperaturowa na wymuszenie skokowe mocy, dająca możliwość wyznaczenia klasycznymi metodami strukturę i parametry modelu opisującego dynamikę układu wzbudnik-wsad. Zebrane charakterystyki zapisywane są w bazie wiedzy o procesie nagrzewania danej klasy wsadów w celu późniejszego ich wykorzystania w procesie wspomaganego dopasowania układu wzbudnik – wsad dla podobnych próbek oraz w procesie wyznaczania modelu układu dla potrzeb automatycznego sterowania procesem nagrzewania wsadu.



Rys. 1. Sieć działań procesu wspomaganego nagrzewania indukcyjnego nowego wsadu

Po opisanym procesie identyfikacji wiadomym będzie, czy dla określonych warunków pracy generatora moc przez niego dostarczana będzie wystarczająca do nagrzania wsadu do żądanej temperatury. Docelowo, sterowanie mocą generatora będzie uwzględniało również algorytm zmiany częstotliwości w trakcie nagrzewania wsadu. Skutkiem takiego rodzaju sterowania jest maksymalne wykorzystanie mocy generatora w całym procesie nagrzewania wsadu.

Kluczowym dla działania całego systemu doboru najlepszych warunków pracy generatora oraz najlepszych parametrów nagrzewania wsadu jest baza danych własności materiałowych połączona logicznie z bazą wiedzy o realizowanych wcześniej procesach nagrzewania. Relacyjna baza danych będzie zawierać informacje o katalogowych własnościach materiałowych nagrzewanych materiałów, które uzupełniane będą o pomiary realizowane w ramach badania własności materiałowych próbek na osobnym stanowisku pomiarowym. Mechanizm wnioskowania w bazie wiedzy będzie realizowany poprzez dwa typy wnioskowania:

- Wnioskowanie wstecz służące do pobierania informacji z relacyjnej bazy danych,
- Wnioskowanie w przód służy do wykrycia zależności pomiędzy czytowanymi danymi z uwzględnieniem ograniczeń zapisanych w regułach wykonywania procesów nagrzewania.

Zarówno struktura bazy danych, jak i reguły będą rozwijane wraz z realizacją konstrukcji generatora.

### 3. PODSUMOWANIE

Rozpoczęty projekt budowy inteligentnego generatora dwuczęstotliwościowego realizowany jest równolegle przez kilka zespołów wykonujących badania w Instytucie Informatyki Stosowanej oraz w Zakładzie Elektroniki Przemysłowej ENIKA w Łodzi. Przedstawiona wizja realizacji wyboru najlepszego wariantu sterowania mocą grzejną, jak i obciążenia generatora jest przedmiotem analiz zespołu Inteligencji Obliczeniowej Instytutu Informatyki Stosowanej PŁ. Niektóre jej elementy, na skutek prac projektowych i montażowych urządzenia mogą w przyszłości ulec pewnym modyfikacjom.

### LITERATURA

- [1] Cesano M., Etflandrin S., Griffero G., Natale L.: Design Optimtization of a High Frequency Power for Induction Heating Application Supply. International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources HES-10, 19-21 May 2010, Padua, Italy, pp.419-424.
- [2] Kobos W., Zgraja J.: Pasywne układu dopasowania impedancji obciążenia indukcyjnie nagrzewanego wsadu. Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy Ciepłne w Elektrotechnice i Elektrotechnologie”. Konopnica 2013.

**Praca współfinansowana ze środków NCBiR w ramach projektu Badań Stosowanych nr umowy PBS1/A4/2/2012.**

### CHARGE IDENTIFICATION IN DUAL-FREQUENCY INDUCTION HEATING

#### SUMMARY

*This paper presents the assumptions regarding the structure and operation of a system for determining the ability of the heating load at a given process in stand of an intelligent dual-frequency generator. The methods of physical confirmation and receiving an experimental data of new information that can be stored in the form of rules in the knowledge base have been also described.*

Keywords: dual-frequency induction heating, charge identification, knowledge-based database.