

Projekt inteligentnego generatora w.cz. do indukcyjnego nagrzewania wsadów

Streszczenie. Generatory dwuczęstotliwościowe znajdują coraz szersze zastosowanie w procesach obróbki cieplnej wykorzystujących nagrzewanie indukcyjne. W artykule przedstawiono opis prototypowego stanowiska badawczego służącego do nagrzewania indukcyjnego z zastosowaniem generatora dwuczęstotliwościowego, umożliwiającego m.in. hartowanie konturowe. Stanowisko to zawiera rozbudowane układy sterowania i wnioskowania, umożliwiające znaczną automatyzację realizowanych procesów technologicznych.

Abstract. Two-frequency generators are widely used in various thermal processes with induction heating. In the paper an experimental set-up for designing and prototyping of two-frequency induction heating has been presented. The proposed solution embraces advanced control and inference mechanisms enabling effective induction heating of different type, eg. for contour hardening. High level of automatization of technological process was ensured. (The design for a smart high frequency generator for induction heating of loads)

Słowa kluczowe: nagrzewanie dwuczęstotliwościowe, generator inteligentny.

Keywords: Two-frequency induction heating, smart generators.

doi:10.12915/pe.2014.02.06

Wstęp

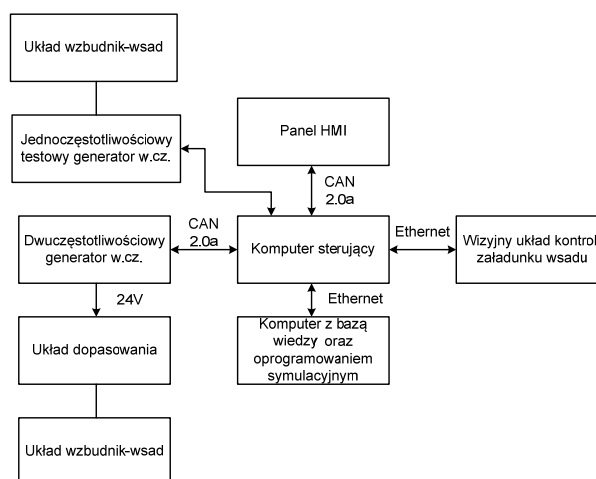
Pomimo wielu zalet nagrzewania indukcyjnego (duża szybkość, możliwość nagrzewania ciała w jego wybranych obszarach, możliwość nagrzewania ciał w ruchu) jego wadą jest mała elastyczność w zakresie dopasowania do zmieniającego się typu wzbudnika, czy rodzaju i kształtu nagrzewanego wsadu oraz zmian jego parametrów elektrycznych i cieplnych w funkcji temperatury. Parametry elektryczne generatora, takie jak: moc znamionowa czy częstotliwość prądu wzbudnika są zdeterminowane konstrukcją generatora, co ogranicza możliwości wykorzystania danego źródła zasilania do różnych zastosowań przemysłowych.

Generatory dwuczęstotliwościowe są jednym z typów generatorów wykorzystywanych do nagrzewania indukcyjnego. W porównaniu z generatorami jednoczęstotliwościowymi pozwalają one na dokładniejsze kontrolowanie procesu nagrzewania warstw materiału znajdujących się na różnych głębokościach. Specyfika działania tego typu generatorów umożliwia między innymi obróbkę cieplną wsadów o skomplikowanych kształtach, np. kół zębatach. Generatory dwuczęstotliwościowe stawiają jednak projektantom znacznie wyższe wymagania, szczególnie trudne do spełnienia w procesach o dużej zmienności parametrów obciążenia, tj. układu wzbudnik-wsad. Ponadto zastosowanie do nagrzewania indukcyjnego prądów o dwóch częstotliwościach wymaga złożonych systemów pomiaru i sterowania [1], zarówno w warstwie sterowania układami energo-elektronicznymi, jak i realizowanym procesem. Jednym z kierunków rozwojowych tego typu urządzeń jest wyposażenie ich w zaawansowane algorytmy przetwarzania danych, obszerne bazy danych właściwości fizycznych nagrzewanych wsadów czy mechanizmy wnioskowania na podstawie wiedzy na temat możliwych sposobów prowadzenia różnych procesów technologicznych. Takie nowoczesne rozwiązania informatyczne mogą między innymi wspomagać pracę tego typu układów nagrzewania poprzez automatyczne dopasowywanie impedancji wyjścia generatora do aktualnej impedancji układu wzbudnik-wsad.

W niniejszym artykule przedstawiono koncepcję prototypowego stanowiska inteligentnego, dwuczęstotliwościowego generatora do nagrzewania indukcyjnego, konstruowanego w ramach projektu badawczego PBS1/A4/2/2012 przez Instytut Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej oraz Zakład Elektroniki Przemysłowej ENIKA Sp. z o.o.

Struktura stanowiska dwuczęstotliwościowego generatora do nagrzewania indukcyjnego

Schemat ideowy stanowiska badawczego przedstawia rysunek 1.

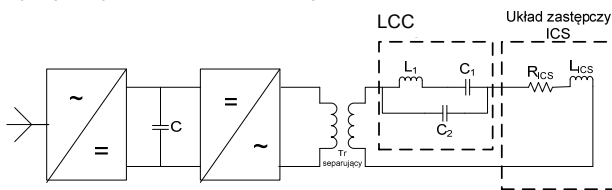


Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

Głównymi elementami stanowiska są generator dwuczęstotliwościowy, będący podstawowym członem wykonawczym układu oraz komputer sterujący pracą tego generatora. Układ dopasowania, pełniący rolę interfejsu pomiędzy generatorem a układem wzbudnik-wsad, ma za zadanie dostosowanie parametrów elektrycznych układu grzejjego oraz generatora w szerokim zakresie zmian warunków pracy. Z kolei komputer sterujący dzięki współpracy z systemem symulacyjno-wnioskującym wykorzystującym opisaną niżej bazę wiedzy, umożliwia wysoki stopień automatyzacji pracy układu oraz wprowadza elementy „inteligencji” między innymi poprzez realizowanie mechanizmów wnioskowania w oparciu o zgromadzoną wiedzę. Stanowisko wyposażone jest także w profesjonalny panel operatorski, a także wizyjny układ kontroli załadunku wsadu. Schemat blokowy generatora LCC przedstawia rysunek 2.

W układzie tym falownik pełnomostkowy zasila układ wzbudnik-wsad (ICS) poprzez obwód LCC stanowiący element 3-go rzędu [1,2]. Wartości indukcyjności i pojemności obwodu sprzęgającego dobiera się tak, aby

wraz z indukcyjnością układu ICS występowały dwie wcześniej zdefiniowane częstotliwości rezonansu szeregowego MF i HF. Elementy gałęzi L_1 , C_1 stanowią wraz układem ICS obwód rezonansu szeregowego o niższej częstotliwości (MF), natomiast gałąź pojemności C_2 wraz układem ICS stanowi układ rezonansu szeregowego o wyższej częstotliwości pracy (HF). Poprzez odpowiednie sterowanie pracą falownika wykorzystujące jednocześnie nakładanie się i wzajemną modulację dwóch sygnałów sterujących uzyskuje się w układzie ICS prąd będący sumą dwóch przebiegów o różnej wartości amplitud poszczególnych częstotliwości. Regulację mocy doprowadzanej do układu ICS można realizować np. poprzez zmianę amplitudy sygnału w przypadku częstotliwości niższej MF oraz odstrojenie od częstotliwości rezonansu w przypadku częstotliwości wyższej HF. Projektowany układ falownika umożliwia jednoczesną, płynną regulację mocy każdej z częstotliwości osobno w całym zakresie oraz praktycznie dowolny podział mocy między częstotliwościami pracy.



Rys.2. Struktura zastosowanego falownika dwuczęstotliwościowego.

Komunikacja z operatorem zrealizowana będzie przy zastosowaniu panelu operatorskiego ENI-P01024/768. Umożliwia on zadawanie parametrów pracy układu np. przebiegu w czasie dostarczanej do wsadu z uwzględnieniem jej rozkładu na poszczególne częstotliwości robocze. Podstawowe parametry techniczne panelu są następujące:

- wyświetlacz: matryca TFT, 262 tys. kolorów, rozmiar 10", rozdzielczość 1024x768 pikseli
- oddziaływanie operatora: ekran dotykowy, 4 klawisze funkcyjne
- interfejsy komunikacyjne: CAN, USB (możliwość podłączenia urządzenia magazynujące USB w celu archiwizacji danych).

Komputer sterujący jest odpowiedzialny za zarządzanie właściwym działaniem całego systemu oraz pośredniczenie w komunikacji pomiędzy elementami składowymi stanowiska. Na stanowisku prototypowym będzie to klasyczny komputer PC, wyposażony w odpowiednie interfejsy komunikacyjne. W zastosowaniach przemysłowych projektowanego urządzenia planowane jest zastąpienie komputera PC dedykowanym układem mikroprocesorowym. Główne zadania realizowane przez komputer sterujący to:

- komunikacja z oprogramowaniem sprzętowym sterującym działaniem generatora w.cz.
- obsługa baz danych i bazy wiedzy oraz oprogramowania wspomagającego podejmowanie decyzji przez obsługę procesu technologicznego
- sterowanie układem dopasowania 3-go rzędu (LLC [3])
- obsługa panelu sterowania HMI
- obsługa układu kontroli załadunku wsadu.

W projektowanym rozwiązaniu przyjęto, iż proces dopasowanie impedancji wyjściowej generatora i układu nagrzewania będzie miał charakter dwuetapowy. Wstępne (zgrubne) dopasowanie związane z realizacją różnych klas procesów technologicznych będzie uzupełnione układami dynamicznego dopasowanie impedancji widzianej na

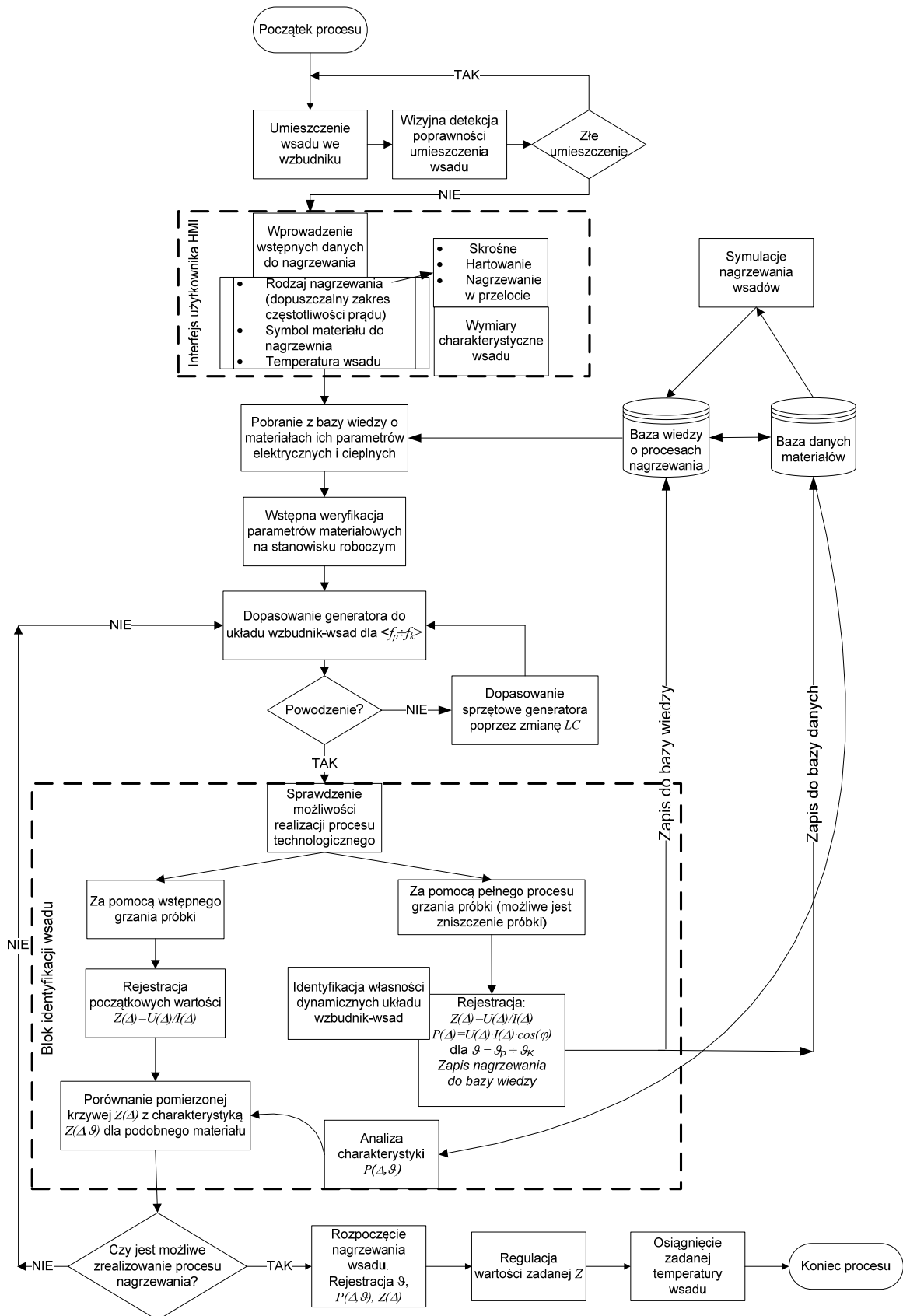
zaciskach generatora do zmieniających się podczas nagrzewania parametrów wsadu (R_{ICS} oraz L_{ICS}).

Zadaniem układu dopasowania LLC jest możliwe dokładne przybliżenie wartości impedancji obciążenia, które stanowi układ wzbudnik-wsad, do znamionowej impedancji wyjściowej falownika. Dopasowanie to realizowane będzie poprzez zmianę wartości indukcyjności L_1 [3] zgodnie z zapisanymi w bazie wiedzy algorytmami wykorzystującymi zarówno wiedzę o własnościach materiałowych nagrzewanego wsadu, jak i o procesie jego nagrzewania pochodzącą z wcześniejszych symulacji komputerowych. W tym celu planowane jest wyposażenie systemu w procedury budowy przyrostowej bazy wiedzy na temat przebiegu różnych procesów technologicznych oraz mechanizmy uczenia się na podstawie przeprowadzanych dotychczas procesów z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji. Ogólny schemat postępowania przy dopasowaniu impedancyjnym oraz identyfikacji wsadu na stanowisku pokazany jest na rysunek 3.

Zaprezentowana sieć działań przedstawia algorytm postępowania podczas procesu nagrzewania wsadu o nieznanymi bliżej własnościach materiałowych. Nagrzewanie to ma być prowadzone od temperatury otoczenia do temperatury określonej przez wymagania procesu technologicznego. 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 materiałowych pobierana jest informacja o podstawowych parametrach elektrycznych i cieplnych grzanej próbki. Na tej podstawie dedykowany algorytm określa: dopuszczalny zakres częstotliwości prądu we wzbudniku ($f_p \div f_k$), oraz sprawdza, czy dla tych częstotliwości istnieje częstotliwość optymalnej lub suboptymalnej pracy układu, tzn. czy przez cały czas nagrzewania generator będzie pracować wykorzystując większość swojej mocy znamionowej (pojęcie optymalnej pracy układu generator – wzbudnik – wsad zostało wyjaśnione w pracy [2] w oparciu o analizę zmienności modułu impedancji $|Z|$ oraz kąta przesunięcia fazowego φ między prądem a napięciem na wzbudniku w funkcji częstotliwości prądu). Jeśli warunki te nie są spełnione, to następuje procedura pasywnego dopasowania impedancyjnego realizowana poprzez zmianę wartości indukcyjności i pojemności (LC), opisana w [4].

W niniejszym artykule opisane zostaną procedury badania możliwości nagrzewania do określonej temperatury ϑ włożonej do wzbudnika próbki polegające na porównaniu wybranych własności nagrzewanego wsadu z bazą danych właściwości materiałowych oraz wnioskującą bazą wiedzy zawierającą informacje o sposobie nagrzewania. Ich zadaniem jest potwierdzenie zapisanych wcześniej w bazie danych właściwości materiałowych wsadu oraz uzupełnienie tych właściwości o nowe dane pomiarowe, które będą zapisane w postaci predykatów (wrażań opisujących własności nagrzewanej próbki i relacji między nimi) dających się wykorzystać do budowy klauzul opisujących sposób nagrzewania wsadu.

Procedury te zostały ujęte na rysunku 3 w zestawie działań o nazwie „Blok identyfikacji wsadu”.



Rys. 3. Sieć działań procesu wspomaganego nagrzewania indukcyjnego nowego wsadu. Objasnienia symboli: f_p, f_k – częstotliwość początkowa i końcowa, Δ – krok czasowy, ϑ – temperatura wsadu, P – moc wydzielana we wsadzie, Z – impedancja układu wzbudnik – wsad.

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 ϑ 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 Δ jest czasem próbkowania rejestrowanego sygnału, φ – 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 oszacowania, czy będzie możliwe nagrzanie wsadu do założonej temperatury.
- Za pomocą rejestracji nagrzewania próbki do zadanej temperatury hartowania lub kucia. Metoda ta będzie wykonywana w sytuacji, gdy baza wiedzy nie zawiera wystarczających informacji o realizacji procesu technologicznego. Metoda ta dopuszcza 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 ϑ . 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 struktury i parametrów 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 doboru potrzeb automatycznego sterowania

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 właściwości materiałowych połączona logicznie z bazą wiedzy o realizowanych wcześniej procesach nagrzewania. Relacyjna baza danych będzie zawierać informacje o

katalogowych właściwościach 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 służące do wykrycia zależności pomiędzy wczytywanymi danymi z uwzględnieniem ograniczeń zapisanych w regułach wykonywania procesów nagrzewania.
- Zarówno struktura bazy danych, jak i reguły będą rozwijane wraz z realizacją konstrukcji generatora.

Podsumowanie.

W artykule przedstawiono koncepcję budowy prototypowego stanowiska badawczego służącego do wysoce zautomatyzowanego dwuczęstotliwościowego nagrzewania indukcyjnego. Omówiono planowaną strukturę układu oraz ważniejsze rozwiązania sprzętowe na tle ich zadań i funkcjonalności.

Jednym z ważniejszych założeń projektowych systemu jest zapewnienie konfigurowalności układu na etapie prototypowania z jednoczesnym zachowaniem łatwości jego wdrożenia w postaci zwartego urządzenia przemysłowego.

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

LITERATURA

- [1] Esteve V., Jordan J., Dede E.J., Sanchis-Kilders E., Maset E., (2006). Induction heating inverter with simultaneous dual-frequency output, *Applied Power Electronics Conference and Exposition. APEC '06. Twenty-First Annual IEEE*, pp1505-1509
- [2] Zhangyin Tu, Yueqing Zhou, Nianfu Zhang (2012). Study of Control for Induction Heating Power Supply with LLC Resonant Load Based on DSP. *Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*.
- [3] Kobos W., Zgraja J., (2013). Pasywne układu dopasowania impedancji obciążenia indukcyjnie nagrzewanego wsadu. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej*, str. 117-124.
- [4] Cesano M., Etflandrin S., Griffiero G., Natale L., (2010). Design optimization of a high frequency power for induction heating application supply. *International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources HES-10*, Padua, Italy, pp.419-424

Autorzy: dr hab. inż. Jacek Kucharski, Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej, al. Politechniki 11, 90-924 Łódź, e-mail: jacek.kucharski@p.lodz.pl, dr inż. Andrzej Frączyk, Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej, al. Politechniki 11, 90-924 Łódź e-mail: andrzej.fraczyk@p.lodz.pl, dr inż. Piotr Urbanek, Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej, al. Politechniki 11, 90-924 Łódź, e-mail: piotr.urbanek@p.lodz.pl, mgr inż. Tomasz Jaworski, Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej, al. Politechniki 11, 90-924 Łódź, e-mail: tjaworski@kis.p.lodz.pl.