

## Pasywne układy LLC i LCCL dopasowania impedancji obciążenia indukcyjnie nagrzewanego wsadu

**Streszczenie.** W celu efektywnego przekazywania energii mocy czynnej z generatora do indukcyjnie nagrzewanego wsadu niezbędne jest zwykle stosowanie układów dopasowania impedancji. Powszechnie są w tym celu wykorzystywane tzw. transformatory dopasowujące średniej i wysokiej częstotliwości. Funkcje te mogą pełnić również bierne układy pasywne. W artykule zostały przeanalizowane układy LLC trzeciego i LCCL czwartego rzędu z punktu widzenia możliwości realizacji funkcji dopasowania impedancji.

**Abstract.** For an efficient energy transfer from the generator to induction heating charge it is usually necessary to use an impedance matching systems. For this purpose commonly used are matching transformers of medium and high frequency. These functions can also be realised by a passive systems. In the paper the third and fourth order passive systems LLC and LCCL in terms of the feasibility of impedance matching function were analysed. (**Passive LLC and LCCL systems for impedance matching of induction heating load**).

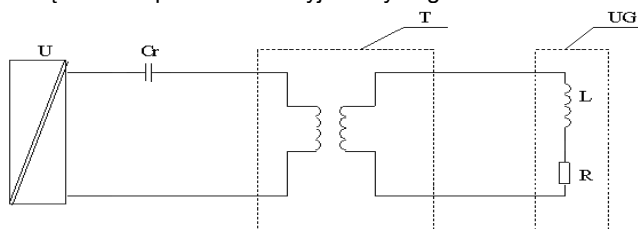
**Słowa kluczowe:** nagrzewanie indukcyjne, obwody dopasowujące.

**Keywords:** induction heating, matching systems.

doi:10.12915/pe.2014.02.11

### Wprowadzenie

Efektywność procesu nagrzewania indukcyjnego jest w znacznym stopniu uwarunkowana efektywnością przekazywania energii między źródłem zasilania i indukcyjnym układem grzejnym. Zwykle użytkownik dysponuje generatorem o ustalonych parametrach wyjściowych natomiast obciążenie w postaci układu grzejnego charakteryzuje się zmienną impedancją wynikającą z bieżących potrzeb technologicznych. Zatem koniecznym staje się użycie elementu dopasowującego złożony i kosztowny generator do różnych impedancji obciążenia. Powszechnie stosowanym rozwiązaniem jest transformator dopasowujący (rys.1), który dzięki możliwości zmiany przekładni pozwala na dostosowanie impedancji obciążenia do parametrów wyjściowych generatora.



U – generator, Cr – kondensator obwodu rezonansowego, T – transformator dopasowujący, UG – układ grzejny, L, R – zastępcza indukcyjność i rezystancja

Rys. 1. Transformator jako element dopasowujący.

Rozważania teoretyczne wskazują, że w miejsce transformatora dopasowującego można wykorzystać układy pasywne złożone z indukcyjności oraz pojemności [1], [2], [3]. Jednakże nie są to rozwiązania tożsame. Różnią się one pewnymi cechami funkcjonalnymi i konstrukcyjnymi, które zostaną przedstawione poniżej w artykule.

Transformator dopasowujący, charakteryzuje się między innymi, stałością przekładni, praktycznie niezależnie od częstotliwości (w zakresie jego pracy) oraz możliwością zapewnienia separacji galwanicznej, co stanowi o jego zaletach. Natomiast pod względem konstrukcyjnym jest on dość złożonym podzespołem, co z kolei może czynić go kosztownym. Ponadto, niezależnie od transformatora dopasowującego, do zapewnienia prawidłowej pracy generatora, konieczne jest użycie oddzielnych kondensatorów obwodu rezonansowego, jak to przykładowo (dla rezonansu szeregowego) pokazano na rysunku 1. Układy dopasowujące typu LLC [1], LCC [3], czy też bardziej złożone LCCL [2] stanowią pod względem

konstrukcyjnym zespół oddzielnych łatwo konfigurowalnych elementów, którymi są dławiki oraz kondensatory obwodu rezonansowego. Układy te zawierają kondensatory niezbędne do zapewnienia prawidłowej pracy generatora rezonansowego.

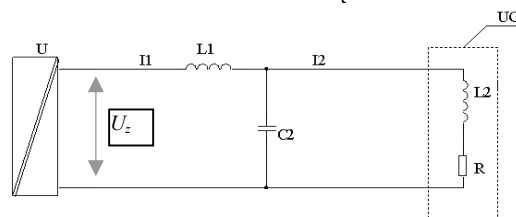
Tego typu układy mogą jednak rodzić problemy nie występujące przy stosowaniu transformatora, co wymaga szczegółowego przeanalizowania.

W artykule przeprowadzono taką analizę przy założeniu, że generator posiada strukturę falownika napięciowego.

Do obliczeń symulacyjnych użyto komercyjnego programu Portunus [4].

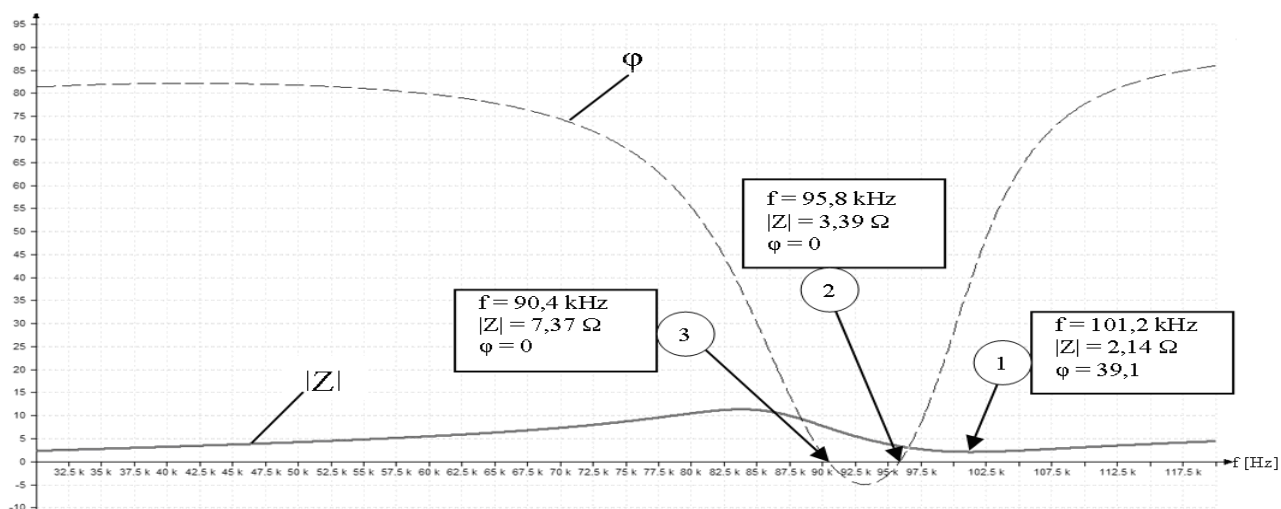
### Układ dopasowania typu LLC

Na rysunku 2 przedstawiono schemat połączenia generatora i obciążenia z wykorzystaniem obwodu typu LLC utworzonego z indukcyjności szeregowej  $L_1$ , indukcyjności  $L_2$  stanowiącej indukcyjność zastępczą układu grzejnego UG oraz kondensatora obwodu rezonansowego  $C_2$ . Prezentowany układ jest obwodem 3-go rzędu, który w zależności od wartości użytych elementów może mieć dwie częstotliwości rezonansowe [1].

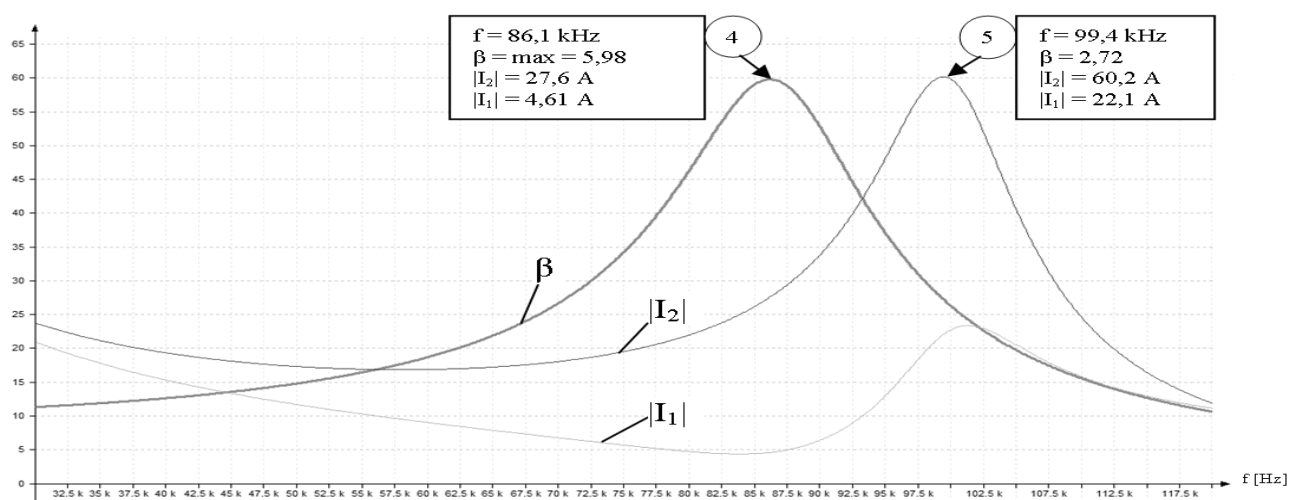


Rys. 2. Topologia układu dopasowania LLC.

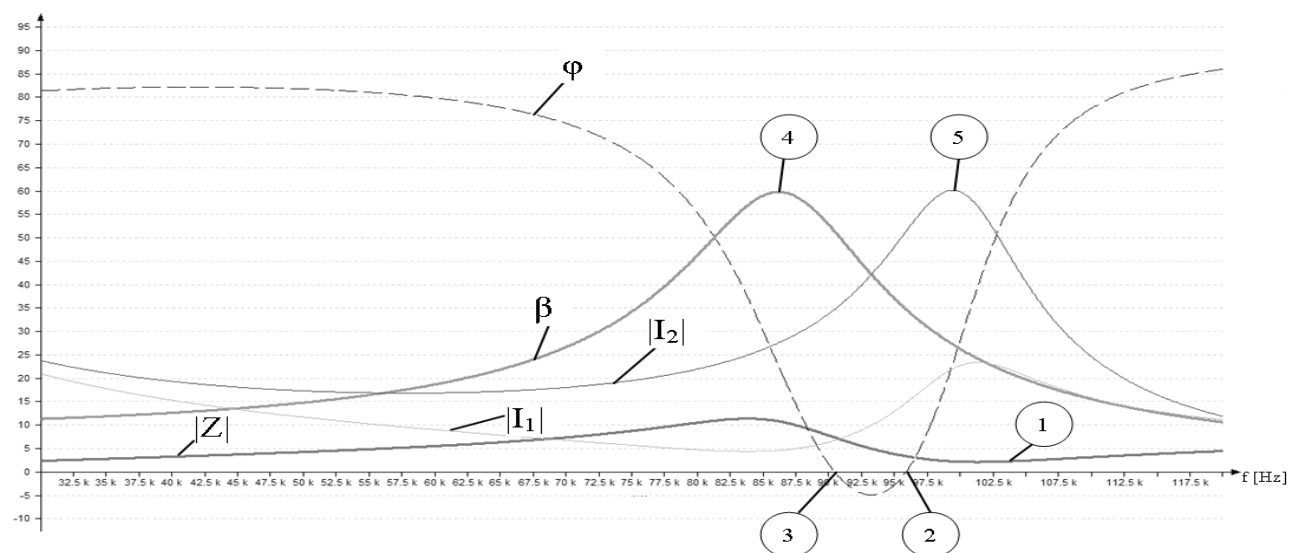
Częstotliwość rezonansowa  $f_1$  wynika z rezonansu indukcyjności  $L_2$  i pojemności  $C_2$ , a druga częstotliwość  $f_2$  wynika z rezonansu połączonych równolegle indukcyjności  $L_2$  i pojemności  $C_2$  oraz indukcyjności  $L_1$ . Ze względu na zapewnienie stabilności całego układu korzystne jest utrzymywanie punktu pracy falownika przy częstotliwości  $f_2$ . Na rysunku 3 przedstawiono, w funkcji częstotliwości, wykresy modułu impedancji wejściowej  $|Z|$  oraz fazy  $\varphi$  otrzymane z obliczeń symulacyjnych wykonanych przy  $U_z=50V$  dla następujących wartości elementów układu:  $L_1=9,18 \mu H$ ,  $L_2=3,06 \mu H$ ,  $C_2=1,1 \mu F$ ,  $R=0,28 \Omega$ . Wykres wartości przekładni dynamicznej  $\beta$  określonej zależnością (1) oraz modułu prądu wejściowego  $|I_1|$  i modułu prądu układu grzejnego  $|I_2|$  w funkcji częstotliwości przedstawia rysunek 4.



Rys. 3. Charakterystyka modułu i fazy impedancji wejściowej układu dopasowania LLC w funkcji częstotliwości.



Rys. 4. Charakterystyka przekładni dynamicznej oraz modułów prądów I1, I2 układu dopasowania LLC w funkcji częstotliwości.



Rys. 5. Charakterystyka parametrów układu dopasowania LLC w funkcji częstotliwości.

Przyjęto, że dynamiczna przekładnia  $\beta$  jest stosunkiem modułu prądu układu grzejnego do modułu prądu wejściowego całego układu LLC i wyraża się wzorem:

$$(1) \quad \beta = \frac{|I_2|}{|I_1|}$$

gdzie:  $|I_2|$  - moduł prądu obciążenia,  $|I_1|$  - moduł prądu wejściowego układu LLC.

Na przebiegach przedstawionych na rysunku 3 oraz rysunku 4 zaznaczono charakterystyczne punkty pracy układu od 1 do 5. Przebiegi te z zaznaczonymi punktami charakterystycznymi zebrano na rysunku 5.

Zaznaczone punkty charakterystyczne to:

- Pkt. 1 - charakteryzuje się najmniejszą wartością modułu impedancji  $|Z_{min}|=2,14 \Omega$  - co występuje dla  $f=101,2 \text{ kHz}$ ,  $\varphi=39,1^\circ$ .
- Pkt. 2 - faza impedancji wejściowej przyjmuje wartość  $\varphi=0$  - co występuje dla  $f=95,8 \text{ kHz}$ ,  $|Z|=3,39 \Omega$ .
- Pkt. 3 - faza impedancji wejściowej przyjmuje wartość  $\varphi=0$  - co występuje dla  $f=90,4 \text{ kHz}$ ,  $|Z|=7,37 \Omega$ .
- Pkt. 4 - przekładnia dynamiczna osiąga wartość maksymalną  $\beta_{MAX}=5,98$ , - co występuje dla  $f=86,1 \text{ kHz}$ ,  $|I_2|=27,6 \text{ A}$ ,  $|I_1|=4,6 \text{ A}$ .
- Pkt. 5 - prąd układu grzejnego UG osiąga wartość maksymalną  $|I_{2MAX}|=60,2 \text{ A}$  - co występuje dla  $f=99,4 \text{ kHz}$ ,  $\varphi=23,3^\circ$ ,  $\beta=2,72$ ,  $|I_1|=22,1 \text{ A}$ .

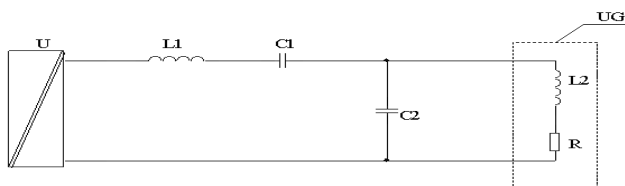
Analizowany układ dopasowania 3-go rzędu typu LLC dla przyjętych wartości charakteryzuje się właściwościami, które mają szczególne znaczenie praktyczne:

- nawet minimalna wartość modułu impedancji wejściowej jest znaczącą krotnością wartości rezystancji zastępczej UG - patrz Pkt. 1,
- przy danej wartości amplitudy napięcia zasilającego, maksymalna moc czynna jest wydzielana w UG przy częstotliwości dla której impedancja Z układu dopasowującego ma charakter indukcyjny ( $\varphi=23,3^\circ$ ), a nie czynny i występuje w pobliżu częstotliwości przy której moduł impedancji wejściowej osiąga swoje minimum  $|Z_{min}|$ . Przekładnia dynamiczna  $\beta$  jest wtedy w przybliżeniu równa  $\beta \approx L_1/L_2$  ... patrz Pkt.5.

W praktycznych zastosowaniach w celu dopasowania układu obciążenia do wyjścia generatora należy dla wcześniej zdefiniowanych parametrów UG oraz wymaganej częstotliwości pracy wyznaczyć wartość indukcyjności szeregową  $L_1$  oraz kondensatora rezonansowego  $C_2$  z zależności przedstawionych między innymi w pracy [1].

### Układ dopasowania typu LCCL

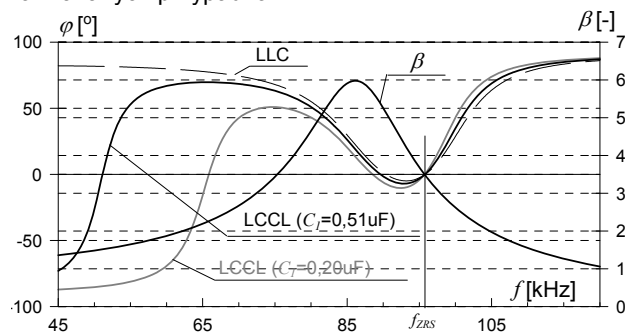
Układ dopasowania 4-go rzędu typu LCCL [2] przedstawiono na rysunku 6. W układzie tym mogą występować trzy różne częstotliwości rezonansowe. W celu porównania układu z rozważanym wyżej układem LLC



Rys. 6. Topologia układu dopasowania LCCL.

przyjęto, że przy doborze parametrów  $L_1$  i  $C_1$  zachowana zostanie wartość częstotliwości zastępczego rezonansu szeregowego (ZRS) występująca poprzednio w układzie LLC tj.  $f_{ZRS}=95,8 \text{ kHz}$ . Częstotliwość ZRS (lub zbliżona do niej) jest zazwyczaj wykorzystywana jako częstotliwość robocza przy wykorzystywaniu układów LLC. W rozważaniach przyjęto arbitralnie dwie wartości pojemności  $C_1=0,51 \mu\text{F}$  oraz  $C_1=0,20 \mu\text{F}$ , co skutkowało (przy spełnieniu wyżej podanego warunku) zmianą wartości indukcyjności  $L_1$  odpowiednio na  $14,60 \mu\text{H}$  oraz  $23,02 \mu\text{H}$ .

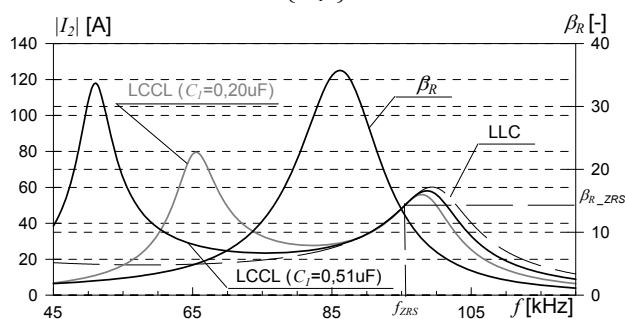
Na rysunkach 7 przedstawiono w funkcji częstotliwości wyniki przesunięcia fazowego  $\varphi$  między prądem i napięciem zasilającym uzyskane dla rozważanych układów LCCL i LLC. Na rysunku przedstawiono również przebieg dynamiczna przekładnia  $\beta$  który jest taki sam dla wszystkich rozważanych przypadków.



Rys. 7. Przesunięcie fazowe na wejściu układu dopasowania oraz przekładnia dynamiczna w funkcji częstotliwości pracy.

Na rysunku 8 przedstawiono w funkcji częstotliwości przebiegi modułu prądu obciążenia  $|I_2|$  oraz dynamicznej przekładni rezystancji określonej wzorem:

$$(2) \quad \beta_R = \text{Re} \left\{ \frac{U_Z}{I_1} \right\} \cdot \frac{1}{R}$$

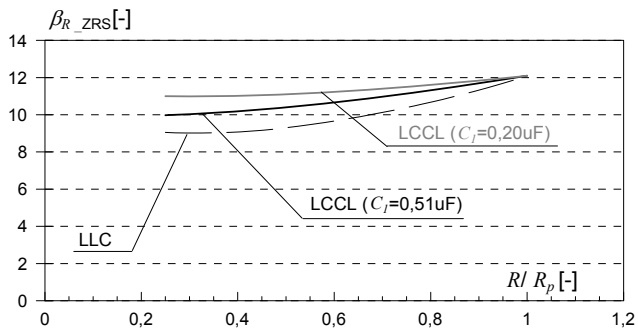


Rys. 8. Moduł prądu obciążenia oraz dynamiczna przekładnia rezystancji w funkcji częstotliwości pracy.

Jak widać na przedstawionych wykresach przebieg wartości dynamicznej przekładni rezystancji nie zależy (przy przyjętych założeniach) od rodzaju układu dopasowującego i przy częstotliwości  $f_{ZRS}$  ZRS wartość tej przekładni wynosi  $\beta_{R\_ZRS}=12,1 \Omega/\Omega$ . Również przebiegi modułu prądu  $|I_2|$  obciążenia są do siebie zbliżone w okolicach częstotliwości ZRS, co czyni rozważane układy LLC i LCCL dość równoważne z punktu widzenia funkcji dopasowania impedancyjnego.

Jednym z istotnych ograniczeń w pełnym wykorzystywaniu źródła zasilania przy nagrzewaniu indukcyjnym jest „dynamiczna” zmiana parametrów obciążenia w trakcie procesu nagrzewania, wywołana zmianą temperatury wsadu. Dotyczy to zarówno rezystancji jak i indukcyjności zastępczej obciążenia. Rozważono jak zmiany rezystancji  $R$  obciążenia wpływają na wartość

dynamicznej przekładni rezystancji  $\beta_{R\_ZRS}$  występującej przy częstotliwości ZRS (zmiana wartości częstotliwości  $f_{ZRS}$  wywołana jedynie zmianą  $R$ ) w układach LCCL i LLC. Uzyskane wartości przekładni, w funkcji względnej zmiany rezystancji  $R$  odniesionej do przyjmowanej dotychczas wartości rezystancji  $R_p=0,28\Omega$ , przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Zmiana wartości dynamicznej przekładni rezystancji  $\beta_{R\_ZRS}$  wywołana zmianą rezystancji obciążenia.

Wykresy przedstawione na rysunku 9 pokazują, że przy zmniejszaniu rezystancji obciążenia występuje również zmniejszanie wartości dynamicznej przekładni rezystancji. Jest to bardzo niekorzystne zjawisko z punktu widzenia możliwości dobrego dopasowania źródła i obciążenia. Powoduje ono, że względne zmiany rezystancji postrzeganej przez źródło są większe niż zmiany rzeczywistości występujące. Na tle tego porównania widać zaletę układu LCCL, szczególnie z tak dobranymi parametrami, aby pierwsza (najniższa) częstotliwość rezonansowa był możliwie bliska drugiej częstotliwości rezonansowej (zastępczego rezonansu równoległego ZRR). Dzięki zastosowaniu układu LCCL można z jednej strony uzyskać zmianę „statyczną” wartości rezystancji postrzeganej w ZRS przez źródło (funkcja transformatora dopasowującego), a z drugiej strony zminimalizować niekorzystny efekt wzmacniania przez układ LLC zmian „dynamicznych” rezystancji postrzeganej przez źródło przy zmianie rezystancji obciążenia wywołanej zmianą temperatury indukcyjnie nagrzewanego wsadu.

### Podsumowanie

Obwody dopasowujące 3-go rzędu typu LLC oraz 4-go rzędu typu LCCL spełniają w pewnym zakresie pracy funkcje transformatora dopasowującego. Wyraża to między

innymi parametr przekładni dynamicznej prądu  $\beta$  oraz dynamicznej przekładni rezystancji  $\beta_R$ . Parametry te są funkcją punktu pracy generatora, tj. częstotliwości, a także wartości elementów obwodu rezonansowego  $C_2$ ,  $L_2$ ,  $R$ . Zmiana np. rezystancji zastępczej  $R$  układu grzejnego w trakcie procesu nagrzewania, skutkuje zmianą przebiegów  $\beta(f)$  i  $\beta_R(f)$ , przy czym ujawnia się niekorzystna cecha analizowanych obwodów dopasowujących, polegająca na zmianie wartości tych wielkości dla częstotliwości ZRS, zmianie której kierunek jest zgodnym z kierunkiem zmian  $R$ . W przypadku  $\beta_R$  skutkuje to wzmocnieniem względnej zmiany rezystancji postrzeganej przez falownik, w stosunku do rzeczywistej względnej zmiany rezystancji obciążenia, co w efekcie pogarsza dopasowanie źródła i obciążenia. Porównując dla tego przypadku analizowane obwody LLC 3-go rzędu i LCCL 4-go rzędu nieco korzystniejsze parametry przekładni dynamicznych (mniejsze zmiany) uzyskuje się w obwodzie 4-go rzędu. Ze względu na zbliżone parametry obu typów obwodów dopasowujących oraz na prostszą strukturę obwodu 3-go rzędu, w praktycznych zastosowaniach przemysłowych wykorzystanie obwodu typu LLC wydaje się jednak zasadniejsze.

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

### LITERATURA

- [1] Zheng Gao, Yueqing Zhou, Research on Switching Losses for Induction Heating Power Supply with LLC resonant Load, *International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, (2011), 2474-2477.
- [2] Zhang Z.J., Bergman N.W., Li H. M: Analysis and Design of LCCL Load matching Circuit for High-Frequency Induction Heating Series Resonant Inverter, *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*, (2012), Vol. 7,N.5, 5392-5399.
- [3] Li Jin-gang, Zhong Yan-ru, Zhao Miao: Study on a New Method of Voltage-Source Induction Heating Load-Matched, *IPEMC*, (2006).
- [4] Adapted Solutions GmbH, User Manual PORTUNUS v.5.1, (2012).

**Autorzy:** dr hab. inż. Jerzy Zgraja, prof. PŁ, Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail:jerzy.zgraja@p.lodz.pl; mgr inż. Witold Kobos, ZEP Enika, ul. Morgowa 11, 04-703 Łódź, E-mail: w.kobos.@enika.pl.