

# Zastosowanie falowników rezonansowych w przemyśle elektromaszynowym i wydobywczym

*Celem artykułu jest przedstawienie i omówienie najczęściej stosowanych układów zasilających nagrzewnice indukcyjne, ich właściwości oraz porównanie ich z proponowanym rozwiązaniem w postaci falownika L-LC.*

## 1. INFORMACJE OGÓLNE

---

Przekształtniki DC/AC, zwane falownikami, znajdują szerokie zastosowania w wielu dziedzinach techniki. W przemyśle górnym układy te są najczęściej stosowane do sterowania prędkością obrotową maszyn górniczych. Często układy te są również używane do topienia oraz hartowania metali. Produkcja maszyn górniczych wymaga stosowania technologicznej obróbki termicznej korpusu maszyn w celu zwiększenia ich wytrzymałości. Do tych celów często stosowane są nagrzewnice indukcyjne. Hartowany materiał (wsad) umieszczany jest najczęściej wewnątrz specjalnych pieców. Energia dostarczana jest do materiału poprzez pole elektromagnetyczne wytwarzane przez wzbudnicę. Głębokość wnikania pola elektromagnetycznego we wsad  $\delta$  regulowana jest przede wszystkim przez częstotliwość prądu wzbudnika:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (1)$$

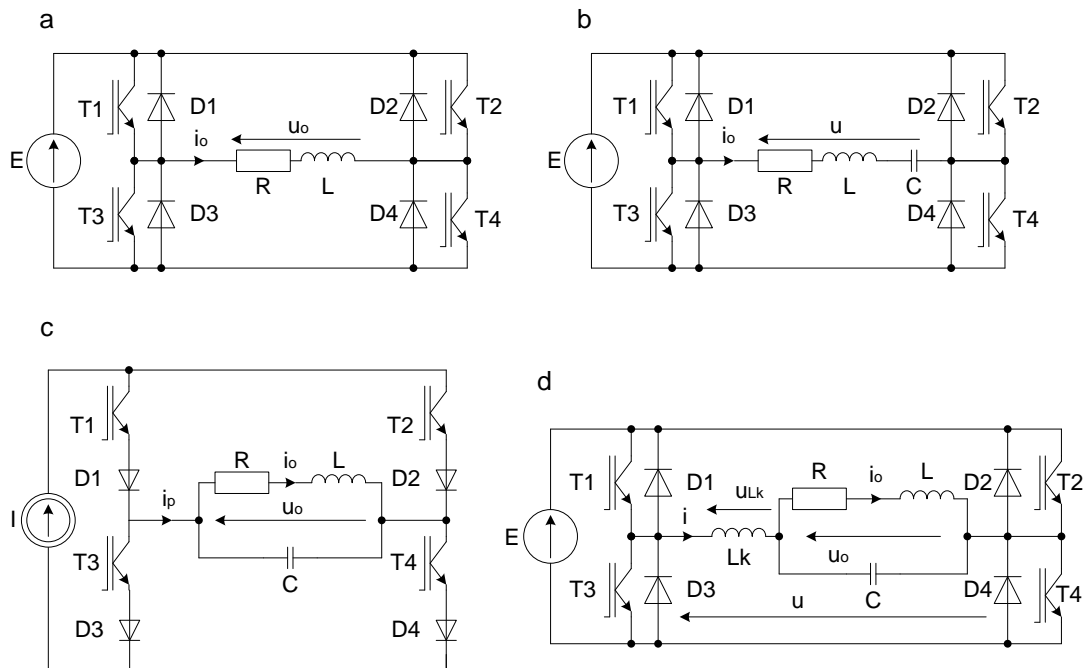
gdzie:

$f$  – częstotliwość pola elektromagnetycznego,  
 $\mu$  – przenikalność magnetyczna nagrzewanego materiału,  
 $\sigma$  – konduktywność nagrzewanego materiału.

Do topienia materiałów używa się zasilaczy pracujących przy małych częstotliwościach pracy (duża głębokość wnikania pola elektromagnetycznego we wsad – zależność (1)) często opartych na tyrystorach. Z kolei do hartowania materiałów wykorzystuje się zasilacze pracujące przy dużych częstotliwościach (mała głębokość wnikania pola elektromagnetycznego – zależność (1)). Poza częstotliwością pracy na

wybór układu zasilającego nagrzewnicę indukcyjną zasadniczy wpływ ma przewidywana moc dostarczana do nagrzewanego materiału. Zestawienie tych dwóch czynników decyduje o wyborze rodzaju falownika. Na rys. 1 pokazane zostały przykłady najczęściej stosowanych rozwiązań: falownik z komutacją twardą (rys. 1a), falownik napięcia z szeregowym obwodem rezonansowym (w skrócie nazywany falownikiem szeregowym – rys. 1b), falownik prądu z równoległym obwodem rezonansowym (w skrócie nazywany falownikiem równoległym – rys. 1c) oraz falownik z szeregowo-równoległym obwodem rezonansowym (w skrócie nazywany falownikiem L-LC – rys. 1d). Na schematach tych parametry RL stanowią zastępcze parametry układu grzejjego wzbudnik-wsad (układu nagrzewnicy indukcyjnej oraz nagrzewanego materiału).

W przypadku, gdy wymagane jest aby układ służył do topienia metali (mała częstotliwość pracy falownika) i jednocześnie dostarczał dużą moc do wsadu mogą być stosowane falowniki z komutacją twardą (rys. 1a). W zasilaczach tego typu przełączanie zaworów odbywa się przy dużym prądzie obciążenia i pełnym napięciu zasilania. Mimo to w użytych zaworach falownika dominują straty występujące w stanie przewodzenia. Wynika to stąd, że straty przełączania zaworów są proporcjonalne do częstotliwości pracy falownika, ale częstotliwość pracy przekształtnika jest mała. Ze wzrostem częstotliwości pracy falownika zwiększają się proporcjonalnie straty mocy przełączania zaworów falownika. Przy dużych częstotliwościach przełączeń zaworów falownika straty te dominują w ogólnym bilansie strat mocy w zaworach.



Rys. 1. Schematy falowników:

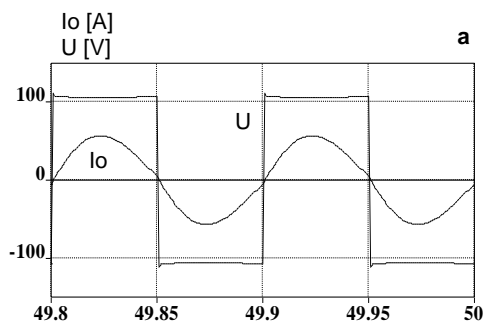
a) z komutacją twardą, b) napięcia z szeregowym obwodem rezonansowym, c) prądu z równoległym obwodem rezonansowym, d) L-LC z szeregowo-równoległym obwodem rezonansowym

Ograniczenie strat mocy w zaworach falownika uzyskuje się przez użycie falowników rezonansowych. W tym celu do obciążenia reprezentowanego przez parametry RL dodatkowo dołącza się kondensator kompensujący C. W zależności od sposobu połączenia kondensatora wyróżnia się falowniki szeregowe (szeregowe połączenie kondensatora C z obciążeniem RL – rys. 1b) oraz falowniki równoległe (równoległe połączenie kondensatora C z obciążeniem RL – rys. 1c). Zastosowanie elementu kompensującego pozwala w sposób znaczący ograniczyć straty przełączania, zwłaszcza w przypadku pracy układu przy częstotliwościach rezonansowych. Inną korzyścią występowania obwodu rezonansowego jest możliwość uzyskania wartości skutecznej napięcia (dla falownika szeregowego) lub prądu (dla falownika równoległego) obciążenia RL większej od odpowiednio wartości skutecznej napięcia bądź prądu wyjściowego falowników. Krotność stosunku wartości skutecznej napięcia (prądu) obciążenia do wartości skutecznej napięcia (prądu) wyjściowego falownika jest związana z dobrocią Q szeregowego (równoległego) obwodu rezonansowego. Falowniki szeregowe zasilane są ze źródła napięcia, zaś falowniki prądu ze źródła prądu (taki charakter źródła najczęściej uzyskuje się w wyniku szeregowego połączenia sterowanego źródła napięcia lub zastosowania łącznika prądu stałego z dławikiem o dużej indukcyjności). Z punktu widzenia zasilania, układ falownika L-LC (rys. 1d) ma identyczną strukturę co falownik szeregowy (rys. 1b).

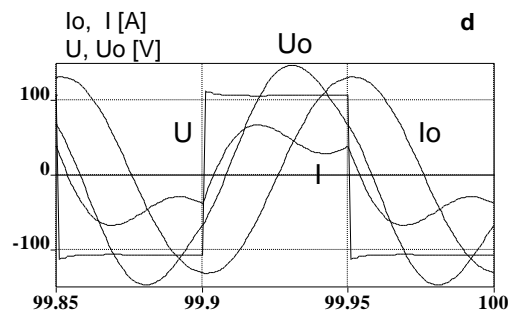
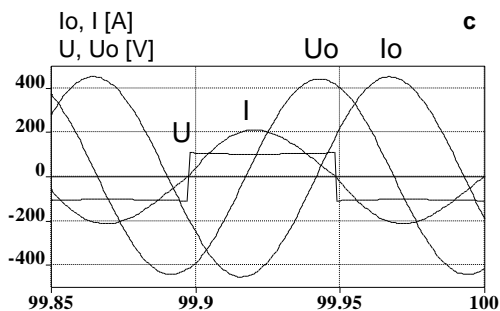
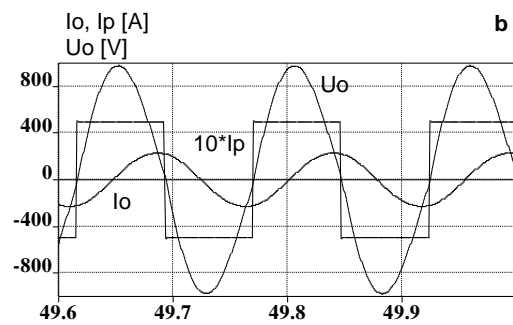
Z takiej budowy przekształtnika wynika kilka korzyści. Po pierwsze można zasadniczo ograniczyć straty przełączania zaworów (przełączanie zeronapięciowe ZVS lub zeroprądowe ZCS), przez co można przełączać zawory falownika z równie dużymi częstotliwościami, co falownik szeregowy. Po drugie falownik L-LC zasilany jest ze źródła napięcia, wobec tego nie występuje tutaj problem konieczności stosowania w obwodzie pośredniczącym dławika o dużej wartości indukcyjności i gabarytach czy też łącznika prądu stałego (wówczas można użyć dławików o mniejszych indukcyjnościach i gabarytach). Z punktu widzenia obciążenia falownik L-LC przypomina falownik równoległy (rys. 1 c), ze względu na równoległe połączenie nagrzewnicy indukcyjnej z kondensatorem kompensującym. Taka konfiguracja sprawia, że można uzyskać sytuację, w której wartość skuteczna prądu płynącego przez odbiornik RL może być kilka razy większa od wartości skutecznej prądu wyjściowego falownika płynącego przez dławik  $L_k$  (rys. 1d). Po bieżnie przedstawione własności falownika L-LC wskazują, że omawiany układ łączy korzystne cechy falowników szeregowych oraz równoległych.

## 2. PORÓWNANIE WŁAŚCIWOŚCI FALOWNIKÓW

Omawiane zasilacze stosowane są w przy często-



tliwościach od kilkuset Hz do kilkuset kHz. Wobec



Rys. 2. Przebiegi najważniejszych napięć i prądów falowników z rys. 1:  
 a) szeregowego pracującego w pobliżu częstotliwości rezonansu szeregowego,  
 b) równoległego pracującego w pobliżu częstotliwości rezonansu równoległego,  
 c) L-LC pracującego w pobliżu częstotliwości rezonansu szeregowego,  
 d) L-LC pracującego w pobliżu częstotliwości rezonansu równoległego

tego do porównania właściwości i funkcjonowania zasilaczy wybrane zostały falowniki rezonansowe (rys. 1 b, c, d). Pierwsze dwa przekształtniki są powszechnie spotykanymi rozwiązaniami wykorzystywanymi w przemyśle, natomiast falownik L-LC został z nimi skonfrontowany jako rozwiązanie alternatywne. We wszystkich układach przyjęto obciążenie w postaci obwodu rezonansowego RLC (elementy RL określają rezystancję i indukcyjność zastępczą układu grzejnego wzbudnik-wsad, element C oznacza pojemność kondensatora kompensującego). W rozpatrywanych układach elementów RLC tworzą szeregowy obwód rezonansowy (falownik szeregowy – rys. 1b) lub równoległy obwód rezonansowy (falownik równoległy – rys. 1c i falownik L-LC – rys. 1c).

Efektom cyklicznego przełączania par zaworów poszczególnych falowników jest pojawienie się na ich wyjściu napięcia (falownik szeregowy oraz falownik L-LC) lub prądu (falownik równoległy) o kształcie prostokątnym (dla przypadku idealnego). Innymi podstawowymi wielkościami charakteryzującymi omawiane układy są: źródło zasilania oraz zakres mocy i częstotliwości przełączania zaworów zasilaczy. Falowniki szeregowy oraz falownik L-LC zasilane są ze źródła napięcia, natomiast falowniki

równoległe zasilane są ze źródła prądu. Poszczególne układy najczęściej stosowane są w zakresie od średnich do wielkich częstotliwości oraz dla średnich, wielkich i największych mocach. Przy czym falowniki równoległe używane są w przypadkach gdy wymagane są największe moce, zaś falowniki szeregowy – gdy zakładane są najwyższe częstotliwości pracy zasilaczy. Przewiduje się, że falowniki L-LC mogą znaleźć zastosowanie przy średnich i wielkich mocach oraz przy średnich i wielkich częstotliwościach. Z punktu widzenia zasilania, układ falownika szeregowego (rys. 1b) i L-LC (rys. 1d) posiadają identyczną strukturę. Występujące w tych układach diody zwrotne umożliwiają przepływ prądu wyjściowego falowników w kierunku przeciwnym do kierunku prądu płynącego przez tranzystory lub tyrystory. Diody odcinające falownika równoległego są elementem zabezpieczenia złącza baza-emiter w czasie przełączania par zaworów falownika (diody te nie są konieczne w przypadku, gdy zaworami falownika są tyrystory). Podobieństwa i różnice pomiędzy układami pokazują przebiegi napięć i prądów w poszczególnych układach (rys. 2).

Jedną z najważniejszych zalet zasilaczy występujących w postaci falowników szeregowych jest moż-

liwość wyłączania zaworów przy zerowej wartości prądu obciążenia (ZCS), a tym samym znaczące ograniczenie strat przełączania zaworów. Pod tym względem zastosowanie falowników szeregowych jest korzystniejsze w porównaniu do falowników równoległych (nawet w przypadku pracy układu przy częstotliwości rezonansu równoległego). Oba układy charakteryzują się prostą regulacją mocy wyjściowej zasilacza poprzez zmianę częstotliwości lub/i napięcia zasilania (źródło prądu w falownikach równoległych otrzymuje się przez szeregowe połączenie źródła napięcia z dławikiem lub przez kłuczowanie napięcia na dławiku w przerywaczach prądu stałego). Falowniki równoległe w przeciwieństwie do falowników szeregowych wymagają układu startowego (w przypadku użycia tyrystorów). Falowniki te różnią się również kształtem prądu wyjściowego. W przypadku falowników szeregowych kształt tego prądu jest zbliżony do sinusoidalnego (zwłaszcza gdy układ pracuje w pobliżu częstotliwości rezonansu szeregowego – rys. 2a), a falowników równoległych jest zbliżony do prostokątnego (rys. 2b). Dzięki temu falowniki szeregowe mogą być stosowane do pracy układu, w którym wymagane są wielkie częstotliwości przełączania tranzystorów. Zastosowanie falowników szeregowych pozwala także uzyskać na obciążeniu RL wartość skuteczną napięcia kilkakrotnie większą od wartości skutecznej napięcia zasilającego (w falownikach równoległych napięcie na obciążeniu RL jest jednocześnie napięciem wyjściowym falownika). Może to mieć szczególnie znaczenie dla doboru tranzystorów falownika mającego pracować przy dużych dobrociach obwodu równoległego (przekroczenie dopuszczalnych napięć występujących na tranzystorach falowników równoległych w stanie zaworowym), a w przypadku falowników szeregowych napięcie pojawiające się na wzбудniku może przekroczyć dopuszczalne wartości napięcia (wówczas może zająć konieczność użycia transformatora dopasowującego). Falowniki szeregowe wykazują się dużą wrażliwością na możliwość pojawienia się zwarcia skrośnego falownika (jednoczesnego występowania dwóch tranzystorów z tej samej gałęzi falownika) oraz zwarcia wzbudnika. Pojawienie się wspomnianych sytuacji prowadzi do uszkodzenia zaworów falownika ze względu na przepływ dużego prądu (prąd ograniczony jest jedynie rezystancją przewodów doprowadzających). Falowniki równoległe są pod tym względem znacznie mniej wrażliwe na pojawienie się tego typu awarii. W falownikach równoległych wielkością regulowaną jest prąd wyjściowy, dzięki czemu prąd nie wzrasta w sposób tak gwałtowny jak to ma miejsce w przypadku fa-

lowników szeregowych (występujący w obwodzie pośredniczącym dławik o dużej indukcyjności uniemożliwia skokową zmianę prądu wyjściowego falownika). Możliwe jest proste ograniczenie skutków zwarcia skrośnego poprzez stabilizację prądu obwodu pośredniczącego. Sposób sterowania pracą tranzystorów falowników szeregowych i równoległych jest bardzo podobny – tranzystory falowników wyzwalane są na przemian parami ( $T_1$ ,  $T_4$  i  $T_2$ ,  $T_3$ ). W zależności od źródła zasilania w omawianych układach pojawia się duża stromość narastania napięcia na zaworach (falownik szeregowy) lub duża stromość narastania prądu (falownik równoległy). Najważniejszą zaletą falowników równoległych jest możliwość uzyskania wartości skutecznej prądu obciążenia RL kilkakrotnie większej od wartości skutecznej prądu zasilającego poprzez kompensację mocy biernej za pomocą kondensatora (w falownikach szeregowych wartość skuteczna prądu obciążenia RL jest równa wartości skutecznej prądu wyjściowego falownika). Dzięki temu układy te są predysponowane do zasilania obciążeń wymagających największych mocy. Wadą falowników równoległych jest pojawianie się dodatkowych strat pojawiających się wskutek użycia diod odcinających oraz konieczność zastosowania drogiego, o dużych gabarytach i dużej indukcyjności dławika w obwodzie pośredniczącym (wada ta może być częściowo ograniczona poprzez zastosowanie łącznika prądu stałego).

Z punktu widzenia zasilania, układ falownika L–LC (rys. 1d) posiada identyczną strukturę co falownik szeregowy (rys. 1b). Korzyścią zastosowania takiej budowy przekształtnika jest, jak już wspomniano, przede wszystkim możliwość zasadniczego ograniczenia strat przełączania zaworów (przełączanie zeronapięciowe ZVS lub zeroprądowe ZCS), a tym samym skrócenie czasu trwania komutacji i przełączania zaworów falownika (układ może pracować z równie dużymi częstotliwościami co falownik szeregowy). Falownik L–LC zasilany jest ze źródła napięcia, wobec tego nie występuje tutaj problem konieczności stosowania w obwodzie pośredniczącym dławika o dużej indukcyjności i gabarytach. Te dwa wspomniane aspekty upodabniają falownik L–LC do falownika szeregowego. Sposób połączenia obciążenia RL z kondensatorem kompensującym jest natomiast taki sam jak w falowniku równoległym (równoległe połączenie układu grzejnego wzbudnik-wsad z kondensatorem kompensującym). Jak opisywano wcześniej taka konfiguracja umożliwia uzyskanie wartości skutecznej prądu płynącego przez odbiornik RL kilkakrotnie większego od wartości skutecznej prądu wyjściowego

falownika płynącego przez dławik  $L_k$  (rys. 2c, d). jego indukcyjności jest obok częstotliwości pracy przekształtnika jednym z najważniejszych czynników wpływających na właściwości pracy falownika L–LC. Widać więc, że falownik L–LC łączy najważniejsze zalety falownika szeregowego i falownika równoległego. Oczywiście oprócz zalet wspomnianych układów falownik L–LC przejął również niektóre ich wady. Do najważniejszych z nich można zaliczyć: wrażliwość układu na pojawienie się zwarcia wzbudnika (choć znacznie mniejszą niż w przypadku falownika szeregowego, ze względu na występujący w obwodzie dławik  $L_k$ ), możliwość wystąpienia zwarcia skrośnego półmostka falownika, występowanie dużej stromości narastania napięcia na zaworach podczas przełączania zaworów, a ponadto dodatkowe straty w dławiku  $L_k$ . Wskazane własności wskazują, że falownik L–LC mógłby znaleźć zastosowanie w szerokim zakresie częstotliwości roboczych oraz mocy.

### 3. WYBÓR CZĘSTOTLIWOŚCI PRACY

Falowniki szeregowy i równoległy są predysponowane do pracy przy częstotliwościach rezonansowych lub w ich pobliżu (falownik szeregowy przy częstotliwości rezonansu szeregowego – zależność (2), falownik równoległy przy częstotliwości rezonansu równoległego – zależność (3)). Natomiast zakres możliwych częstotliwości roboczych falownika L–LC jest znacznie szerszy [3,5,6,7]. Jako najkorzystniejsze przyjęto: częstotliwość rezonansu szeregowego  $f_s$  (zależność (4), rys. 2 c) i równoległego obwodu  $RLCL_k$  (zależność (5), rys. 2d)  $f_r$  oraz częstotliwość rezonansu równoległego obwodu RLC –  $f_{rown}$  (zależność (3)) [3,5,7]. Zależności te uzyskano w oparciu o elementy z rys. 1.

Dławik ten spełnia w układzie kluczową rolę. Dobór

$$f_{ser} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2)$$

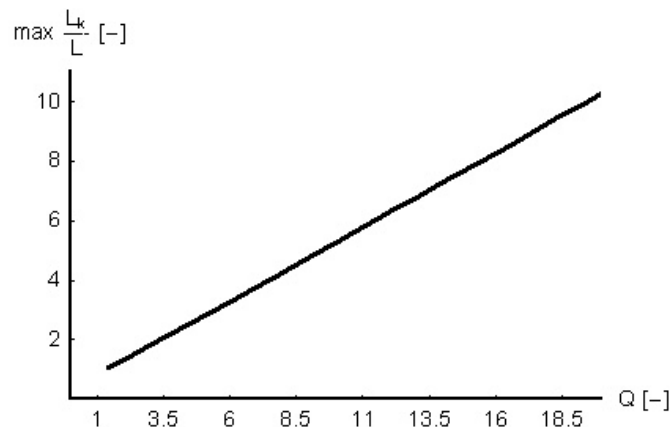
$$f_{rown} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}} \quad (3)$$

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} + \frac{1}{2L_k C} - \frac{R^2}{2L^2} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{2L^2}{R^2 L_k C} \left( 1 + \frac{L^2}{2R^2 L_k C} \right)} - \frac{4L}{R^2 C} \right)} \quad (4)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} + \frac{1}{2L_k C} - \frac{R^2}{2L^2} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2L^2}{R^2 L_k C} \left( 1 + \frac{L^2}{2R^2 L_k C} \right)} - \frac{4L}{R^2 C} \right)} \quad (5)$$

Właściwości układu pracującego przy obu częstotliwościach rezonansu równoległego są podobne. Wobec tego do dalszej analizy przyjęto częstotliwość rezonansu równoległego  $f_{rown}$  (obwodu RLC). O jej wyborze zadecydowały względy praktyczne, zwłaszcza niezależność częstotliwości rezonansowej od wartości indukcyjności dławika  $L_k$  oraz prostota realizacji technicznej takiego stanu pracy (doprowadzenie do zgodności faz napięcia wyjściowego  $u$  oraz prądu obciążenia  $i_o$ ). Niezależność częstotliwości rezonansowej od wartości indukcyjności  $L_k$  ma szczególne znaczenie w przypadku pracy układu z małymi wartościami dobroci  $Q = 2\pi fL/R$  obwodu RLC. Wynika to z występowania zależności  $L_k/L = f(Q)$  (zależność (6), rys. 3), wskazującej na możliwość pojawienia się sytuacji, w której niemożliwe będzie doprowadzenie do pracy układu z częstotliwością  $f_r$  czy też  $f_s$  [3, 5, 6, 7].

$$L_k \leq \frac{Q^2}{2Q-1} L \quad (6)$$



Rys. 3. Wykres zależności maksymalnego stosunku  $L_k/L = f(Q)$ 

Prostota realizacji praktycznej pracy układu przy częstotliwości  $f_s$  wynika stąd, że przebieg napięcia wyjściowego  $u$  ma kształt prostokątny, zaś prądu obciążenia  $i_o$  ma kształt zbliżony do sinusoidalnego z dominującą pierwszą harmoniczną. W przypadku pracy układu z częstotliwością  $f_r$ , poza problemem związanym z koniecznością zwracania uwagi na wartość stosunku indukcyjności  $L_k/L$ , pojawiają się trudności z wyznaczeniem w modelu laboratoryjnym częstotliwości, przy której występuje zgodność faz pierwszych harmoniczných napięcia wyjściowego  $u$  oraz prądu wyjściowego  $i$  (zniekształcenie prądu wyjściowego  $i$  będące efektem znacznego udziału wyższych harmoniczných, rys. 2d).

#### 4. WNIOSKI

Falowniki rezonansowe znajdują szerokie zastosowania w dziedzinach, które w procesach technologicznych wymagają termicznej obróbki. Przeprowadzona analiza wskazuje, że falowniki szeregowo znajdują zastosowania szczególnie w układach wymagających najwyższych częstotliwości roboczych (dzięki znaczącemu ograniczeniu strat przełączania zaworów), zaś falowniki równoległe w układach wymagających największych mocy (ze względu na możliwość zwielokrotnienia prądu płynącego w obciążeniu RL). Proponowany falownik z szeregowo-równoległym obwodem rezonansowym (falownik L-LC) łączy najważniejsze wspomniane cechy falownika szeregowego oraz falownika równoległego. Elementem odróżniającym falownik L-LC od falownika szeregowego i równoległego jest obciążenie falownika. Występuje ono tutaj w postaci szeregowo-równoległego obwodu rezonansowego. Taka konfiguracja pozwala jednocześnie na skorzystanie z właściwości równoległego obwodu rezonansowego i pracę układu przy częstotliwości rezonansu szeregowego. Dzięki temu osiągalny zakres częstotliwości pracy układu jest zbliżony do zakresu częstotliwości roboczych falownika szeregowego. Są to najkorzystniejsze warunki pracy układu falownika L-LC. W takich warunkach układ może być wykorzystany jako źródło zasilania nagrzewnicy indukcyjnej w zakresie wielkich częstotliwości pracy oraz dużych mocy.

#### Literatura

1. *Espí JM., Dede EJ., García R., Castelló J., Martí JM.*: Nuevas tendencias basadas en osciladores de tres elementos para

- Calentamiento por Inducción: el inversor L-LC. Ediciones Técnicas Rede, Enero 2001.
2. *Geisel H.*: Das Betriebsverhalten von Schwingkreisumrichter für induktive Erwärmung. Elektrowärme international. Bd. 27 Nr 6 1969.
3. *Marek A.*: Analiza pracy falownika z szeregowo-równoległym obwodem rezonansowym zasilającego nagrzewnicę indukcyjną. Rozprawa doktorska, Gliwice 2006.
4. *Marek A.*: Równoległe łączenie modułów tranzystorowych w falownikach L-LC dużej mocy zasilających nagrzewnicę indukcyjną. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 198, Gliwice 2006.
5. *Marek A.*: Wpływ częstotliwości pracy na właściwości układu falownika L-LC do nagrzewania indukcyjnego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 198, Gliwice 2006.
6. *Marek A.*: Wybrane aspekty pracy falownika L-LC do nagrzewania indukcyjnego. XI Sympozjum PPEE'2005, Wisła 2005.
7. *Marek A.*: Wybrane zagadnienia związane z pracą falownika L-LC. SENE 2005, Łódź 2005.
8. *Matthes H.-G.*: Der statistische Frequenz – Umrichter zum Einsatz in der industriellen Elektrowärme international. Heft B3, 1977.

Recenzent: dr inż. Zygmunt Szymański