ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2001
Seria: ELEKTRYKA z.180 Nr kol.1525

Adam MAREK
Tadeusz RODACKI

PORÓWNANIE WŁAŚCIWOŚCI FALOWNIKÓW DO NAGRZEWANIA INDUKCYJNEGO

Streszczenie. W artykule przeprowadzono porównanie właściwości zasilaczy do nagrzewania indukcyjnego. Obciążenie tego typu układów składa się z zastępczych parametrów R, L, C połączonych szeregowo bądź równolegle. Porównaniu poddane zostały powszechnie stosowane falowniki napięcia i prądu oraz falownik hybrydowy.

COMPARISON OF PROPERTIES OF FEEDERS FOR INDUCTION HEATING

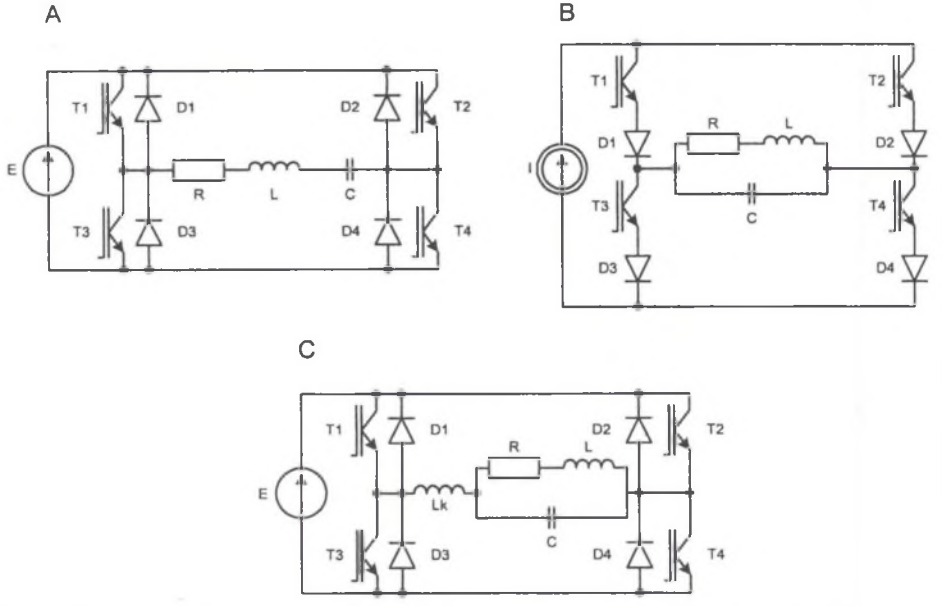
Summary. The paper presents the comparison of properties of feeders used for induction heating. The load consists of equivalent R, L, C parameters of the heating inductor – charge and compensate capacitor configuration connected in series or in parallel. The comparison was made for such commonly used feeders as voltage and current inverters as well as hybrid ones.

1. WSTĘP

Omawiane zasilacze stosowane są w grzejnictwie indukcyjnym przy częstotliwościach od kilkuset Hz do około 100 kHz. Do porównania właściwości i funkcjonowania zasilaczy wybrane zostały falowniki prądu i napięcia [1, 2, 6] oraz falownik hybrydowy [3, 4, 5]. Pierwsze dwa przemienniki są najczęściej spotykanymi rozwiązaniami wykorzystywanymi do nagrzewania indukcyjnego, natomiast falownik hybrydowy został skonfrontowany z tymi przemiennikami w celu ocenienia jego przydatności jako alternatywnego zasilacza mogącego służyć do nagrzewania indukcyjnego. We wszystkich układach przyjęte zostanie obciążenie w postaci R, L, C. W zapisie tym parametry R, L określają zastępczą rezystancję i indukcyjność zastępczą układu grzejnego wzbudnik – wsad, a parametr C oznacza pojemność kondensatora kompensującego.

2. SCHEMATY I KRÓTKA CHARAKTERYTYKA ZASILACZY BĘDĄCYCH PRZEDMIOTEM BADAŃ

W rozpatrywanych układach połączenie elementów R, L, C odbywa się w sposób szeregowy (dla falownika napięcia), a dla falownika prądowego i hybrydowego jest to równoległe połączenie zastępczych parametrów R, L układu grzejnego wzbudnik – wsad z kondensatorem kompensującym C. W wyniku zastosowania tych zasilaczy przez obciążenie przepływa prąd (dla falownika prądu) bądź też pojawia się napięcie (dla falownika napięcia oraz falownika hybrydowego) o kształcie prostokątnym (dla przypadku idealnego). Kształt ten jest wynikiem przełączania naprzemiennie par zaworów poszczególnych falowników.



Rys. 1. Schematy rozpatrywanych falowników do nagrzewania indukcyjnego: A – falownik napięcia, B – falownik prądu, C – falownik hybrydowy

Fig. 1.Considered inverters schemes for induction heating: A – voltage inverter, B – current inverter, C – hybrid inverter

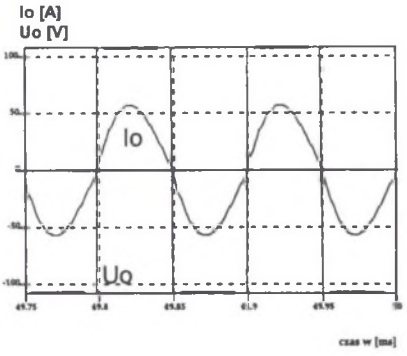
Do najważniejszych czynników charakteryzujących poszczególne zasilacze zalicza się: źródło zasilania (źródło napięcia dla falowników napięcia i hybrydowego oraz źródło prądu dla falownika prądu); wspomniany już wcześniej sposób połączenia elementów R, L, C; zakres częstotliwości pracy i mocy zasilaczy (falownik napięcia – praca przy średnich mocach oraz przy średnich i wyższych częstotliwościach, falownik prądowy – stosowany do największych mocy oraz przy małych i średnich częstotliwościach przełączania zaworów, falownik hybrydowy – praca przy średnich mocach oraz przy średnich częstotliwościach); konieczność występowania diod (diody zwrotne dla falowników napięcia i hybrydowego oraz

diody odcinające dla falowników prądu – diody te nie są konieczne w przypadku gdy zaworami są tyrystory); liczba zasadniczych schematów zastępczych (cztery dla falowników napięcia i hybrydowego oraz dwa dla falownika prądu). Uproszczone schematy omawianych układów przedstawia rys. 1.

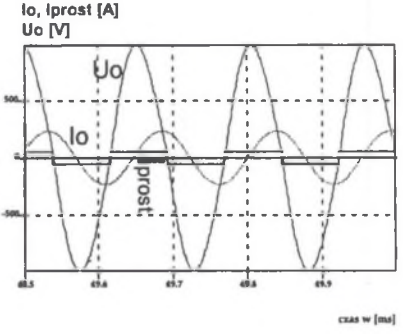
2.1. Falowniki napięcia i prądu

Schematy układów zostały przedstawione na rys. 1 (jednofazowy, mostkowy falownik napięcia – A; jednofazowy, mostkowy falownik prądu – B). Zaletami zasilaczy występujących w postaci falownika napięcia są: możliwość wyłączania zaworów przy zerowej wartości prądu obciążenia; mniejsze straty przełączania zaworów w porównaniu do falowników prądu – szczególnie przy pojemnościowym charakterze odbiornika; prosta regulacja mocy wyjściowej zasilacza poprzez zmianę częstotliwości; falownik nie wymaga układu startowego; sinusoidalny kształt prądu wyjściowego falownika; możliwość stosowania do dużych mocy i wysokiej częstotliwości. Natomiast do wad tego typu zasilaczy należy zaliczyć: możliwość pojawienia się zwarcia skrośnego (w przypadku jednoczesnego przewodzenia zaworów w jednej gałęzi) charakteryzującego się możliwością uszkodzenia zaworów w wyniku przepływu bardzo dużych prądów; w przypadku dużych dobroci układu R, L, C napięcie wyjściowe wzbudnika może być wielokrotnie większe od napięcia wyjściowego falownika; występowanie dużej stromości narastania napięcia na zaworach; praca możliwa jedynie poniżej częstotliwości drgań własnych układu (dla zaworów w postaci tyrystorów). Z kolei do zalet falowników prądu zalicza się: możliwość uzyskania prądu odbiornika o wartości skutecznej kilkakrotnie większej od wartości skutecznej prądu zasilającego (kompensacja mocy biernej za pomocą kondensatora); proste ograniczenie skutków zwarcia skrośnego poprzez stabilizację prądu obwodu pośredniczącego (w przypadku utraty sterowalności zasilacza); występowanie napięcia wyjściowego wzbudnika równego napięciu wyjściowemu falownika; sterowanie mocy wyjściowej poprzez zmianę prądu w obwodzie pośredniczącym; małą stromość narastania napięcia na zaworach wynikającą z sinusoidalnego kształtu napięcia wyjściowego. Najważniejsze wady falownika prądu to: wyłączanie zaworów następuje przy niezerowej wartości prądu obciążenia; występowanie dużej stromości narastania prądu zaworów; pojawianie się dodatkowych strat wskutek zastosowania diod odcinających; konieczność występowania układu startowego (w przypadku zastosowania tyrystorów); występowanie dużych strat załączania i wyłączania (wskutek komutacji występującej przy niezerowych wartościach napięcia i prądu – szczególnie przy zastosowaniu tyrystorów); praca możliwa jest jedynie powyżej częstotliwości drgań własnych układu (dla zasilaczy tyrystorowych); możliwość występowania napięcia wyjściowego o wartości znacznie przekraczającej wartość napięcia zasilającego (przy dużej dobroci obwodu); konieczność zastosowania drogiego, o dużych

gabarytach i dużej indukcyjności dławika w obwodzie pośredniczącym (wada ta może być ograniczona poprzez zastosowanie łącznika prądu stałego w obwodzie pośredniczącym).



Rys. 2. Przebiegi napięcia i prądu obciążenia dla falownika napięcia
Fig. 2. Load voltage and load current waveforms of the bridge, single – phase voltage inverter



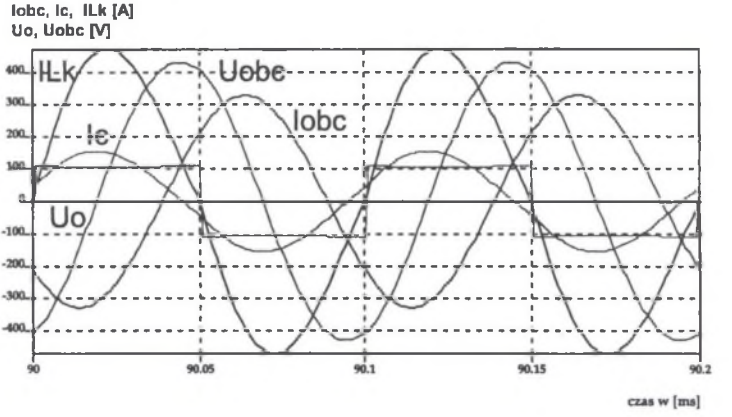
Rys. 3. Przebiegi napięcia i prądu obciążenia oraz prądu zasilającego obciążenie dla falownika prądu
Fig.3. Load voltage, load current and feeding current waveforms of the bridge, single – phase current inverter

Rysunki 2 i 3 przedstawiają przebiegi napięć i prądów obciążenia dla obu falowników przy częstotliwości przełączania zaworów bliskiej częstotliwości drgań własnych omawianych układów.

2.2. Falownik hybrydowy

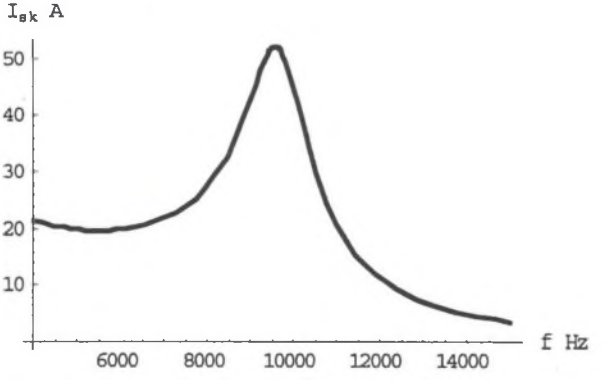
Schemat układu przedstawiony został na rys. 1 (oznaczony symbolem C). Omawiany falownik ma cechy obu omawianych wcześniej jednofazowych, rezonansowych falowników prądu i napięcia. Podobnie jak w przypadku falownika napięcia z szeregowym obwodem rezonansowym, układ tego typu zasilany jest ze źródła napięcia. Również obwód przekształcający napięcie stałe na napięcie przemienne, prostokątne jest taki sam (zawory przekształtnika wraz z diodami zwrotnymi), jak w przypadku falownika napięcia. Zasadniczym czynnikiem różniącym oba te układy jest obciążenie falownika występujące tutaj w postaci równoległego obwodu R, L, C (tak jak to występowało w przypadku falownika prądu) z szeregowo dołączoną dodatkową indukcyjnością L_k. Indukcyjność ta spełnia w układzie kluczową rolę – bez niej układ nie mógłby prawidłowo funkcjonować. W zależności od częstotliwości przełączania zaworów zastępcza impedancja układu R, L, C ma charakter rezystancyjno–indukcyjny, rezystancyjny bądź rezystancyjno–pojemnościowy. Przebiegi

najważniejszych napięć i prądów dla częstotliwości przełączania zaworów bliskiej częstotliwości rezonansu szeregowego układu pokazuje rys. 4



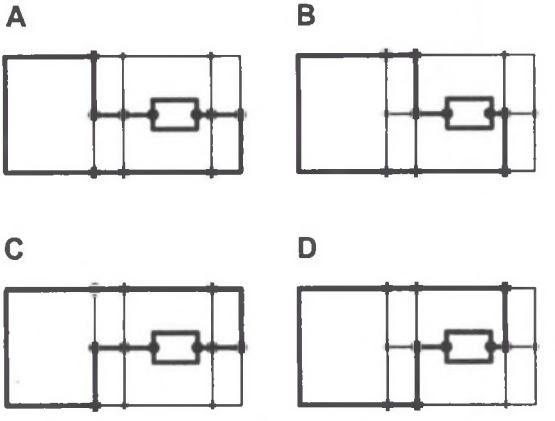
Rys. 4. Przebiegi najważniejszych napięć i prądów falownika hybrydowego
Fig. 4.The most important voltage and current waveforms of hybrid inverter

W omawianym zasilaczu występują dwie częstotliwości rezonansowe: częstotliwość rezonansu równoległego związana z równoległym obwodem rezonansowym R, L, C oraz częstotliwość rezonansu szeregowego związana z obwodem rezonansowym L_k, R, L, C. Sytuację tą obrazuje przykładowa zależność wartości skutecznej prądu obciążenia w funkcji częstotliwości przełączania zaworów falownika hybrydowego przedstawiona na rys. 5.



Rys. 5. Zależność prądu obciążenia od częstotliwości przełączania zaworów dla falownika hybrydowego
Fig. 5. Dependence of load current on transistors switching frequency for hybrid inverter

Z przykładowego przebiegu zależności pokazanej na rys. 5 widoczne są dwa ekstrema: dla niższej częstotliwości (tutaj poniżej 6 kHz) prądu przepływający przez obciążenie osiąga minimum – jest to częstotliwość rezonansu równoległego, dla częstotliwości około 10 kHz prąd przepływający przez obciążenie osiąga maksimum i jest to częstotliwość rezonansu szeregowego. Uzyskane wartości częstotliwości rezonansowych: równoległego i szeregowego wynikają z przyjętych parametrów L_k, R, L, C. Dla tych częstotliwości w obciążeniu wydzielana jest odpowiednio minimalna i maksymalna moc.

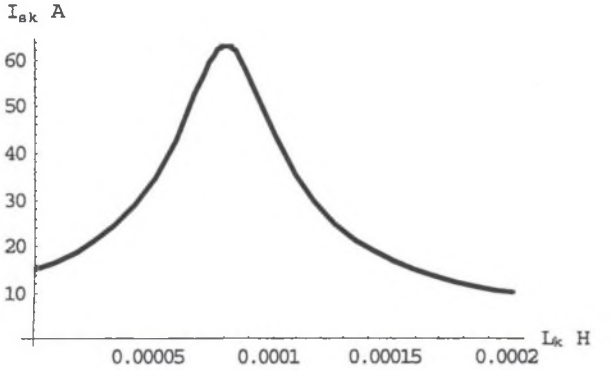


Rys. 6. Schematy zastępcze falownika hybrydowego dla częstotliwości pracy $f<f_{rs}$
Fig. 6. Hybrid inverter substitute schemes for frequency $f<f_{rs}$

Liczba stanów pracy falownika hybrydowego oraz kolejność ich pojawiania się zależne są od częstotliwości przełączania zaworów falownika oraz od wartości indukcyjności dławika dodatkowego L_k. Częstotliwość pracy zasilacza wpływa na charakter obciążenia zasilacza, natomiast wartość indukcyjności dławika L_k wpływa na wartość częstotliwości, przy których zmienia się kolejność następowania po sobie stanów pracy układu (dla częstotliwości niższych od częstotliwości rezonansu szeregowego) – kolejność występowania stanów pracy falownika hybrydowego jest inna niż falownika napięcia. Oczywiście po uwzględnieniu zjawiska komutacji prądu falownika liczba schematów zastępczych wzrasta do sześciu. W rzeczywistych układach zjawisko to występuje, co wynika z pojawiania się w gałęziach falownika indukcyjności komutacyjnych. Indukcyjności te pojawiają się tam, ponieważ wszelkie połączenia elementów posiadają rezystancję oraz indukcyjność, jak również struktura samych tranzystorów jest przyczyną ich pojawiania się. Indukcyjności te są więc elementem nieodzownym w każdym układzie, należy zauważyć więc, że zjawisko komutacji prądu praktycznie nie występuje jedynie w przypadku przełączania zaworów przekształtnika z częstotliwością drgań własnych układu znajdującej się w pobliżu częstotliwości rezonansu szeregowego f_{rs}. Przykładowo na rys. 6 pokazane zostały schematy zastępcze pracy układu dla częstotliwości niższych od częstotliwości rezonansu szeregowego f_{rs} bez uwzględnienia

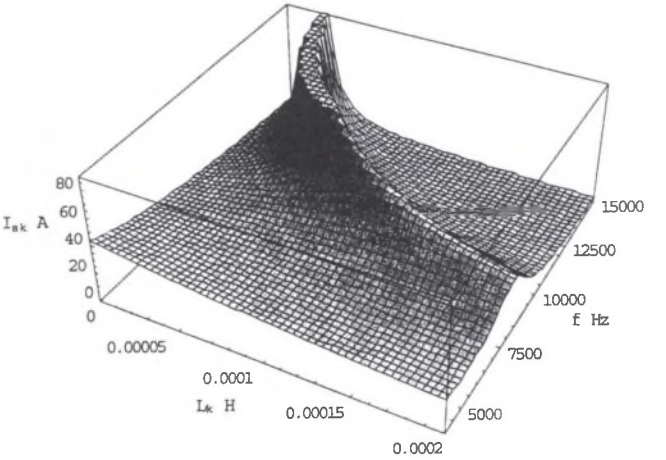
zjawiska komutacji prądu (schematy te są analogiczne do występujących przy takich częstotliwościach schematów zastępczych dla falowników napięcia).

Wpływ indukcyjności na wartość osiąganego prądu skutecznego obciążenia przedstawia rys. 7.



Rys. 7. Zależność prądu obciążenia w funkcji indukcyjności L_k dla falownika hybrydowego

Fig. 7. Dependence of load current on inductor L_k inductance for hybrid inverter



Rys. 8. Zależność prądu obciążenia w funkcji częstotliwości i indukcyjności L_k dla falownika hybrydowego

Fig. 8. Dependence of load current on transistors switching frequency and inductor L_k inductance for hybrid inverter

Z przebiegu zależności wartości skutecznej prądu obciążenia w funkcji indukcyjności dodatkowej L_k wynika fakt występowania takiej wartości indukcyjności L_k, przy której prąd przepływający przez obciążenie osiąga wartość maksymalną (przy ustalonych wartościach

parametrów R, L, C oraz częstotliwości f). Występowanie dwóch maksimów prądu przepływającego przez obciążenie (w funkcji częstotliwości oraz indukcyjności L_k) przyczyniło się do wyznaczenia powierzchni, której zmiennymi niezależnymi byłyby częstotliwość pracy f oraz indukcyjność L_k. Wynik takiej operacji przedstawia rys. 8.

Otrzymany kształt powierzchni wartości prądu skutecznego przepływającego przez obciążenie przy ustalonych parametrach R, L, C wskazuje na wzrost wartości prądu skutecznego (a tym samym mocy wydzielanej w obciążeniu) wraz z obniżaniem wartości indukcyjności L_k, przy czym maksymalne wartości tego prądu są uzyskiwane przy coraz wyższych częstotliwościach przełączania zaworów.

Najważniejsze zalety falowników hybrydowych to: sinusoidalny kształt prądu przepływającego przez obciążenie i napięcia występującego na obciążeniu, a także prądu wyjściowego falownika; możliwość uzyskania prądu odbiornika o wartości skutecznej kilkakrotnie większej od wartości skutecznej prądu wyjściowego falownika (kompensacja mocy biernej za pomocą kondensatora); możliwość wyłączania zaworów przy zerowej wartości prądu obciążenia; mniejsze straty przełączania zaworów w porównaniu do falowników prądu (szczególnie przy pojemnościowym charakterze odbiornika); nie występuje konieczność stosowania układu startowego. Do wad tego typu układów zaliczamy: ograniczenie od dołu zakresu częstotliwości pracy do częstotliwości rezonansu równoległego; występowanie dużej stromości narastania napięcia na zaworach; osiąganie wartości napięć na dławiku (odbiornika) i kondensatorze znacznie przekraczających wartość napięcia zasilającego (szczególnie przy dużych dobrociach); konieczność doboru dławika w celu uzyskania tłumienia mniejszego od krytycznego; pojawianie się zwarcia skrośnego w przypadku jednoczesnego przewodzenia zaworów w jednej gałęzi charakteryzującego się możliwością uszkodzenia zaworów w wyniku przepływu bardzo dużych prądów; pojawianie się zwarcia w przypadku zaniku okresowego wyzwalania par zaworów. Zasilacze tego typu posiadają więc wiele z zalet i wad falowników napięcia i prądu. Falowniki hybrydowe od falowników napięcia i prądu wyróżnia przede wszystkim możliwość uzyskania poboru sinusoidalnego prądu przy panującym napięciu na obciążeniu oraz przepływie prądu przez obciążenie R, L o kształcie sinusoidalnym, a także występowanie dodatkowego dławika L_k i wynikających z tego faktu konieczności doboru jego indukcyjności w celu uzyskania tłumienia mniejszego od krytycznego.

3. WNIOSKI KOŃCOWE

W wyniku przeprowadzonego porównania właściwości omawianych falowników stwierdzono, że:

a) zastosowanie dla największych mocy znajduje tyrystorowy falownik prądu z równoległym obwodem rezonansowym (przy częstotliwościach pracy 500, 1000 Hz),
b) dla mocy do około 1 MW przy częstotliwościach przełączania zaworów powyżej 20 kHz stosowany jest falownik napięciowy z szeregowym układem rezonansowym,
c) przy średnich mocach (mniejszych od jednego MW) stosowane są tranzystorowe falowniki prądowe,
d) wydaje się, że interesującym rozwiązaniem dla częstotliwości od kilku do kilkunastu kHz może okazać się hybrydowy falownik tranzystorowy,
e) z punktu widzenia poboru mocy z układu zasilającego najkorzystniejszym układem wydaje się falownik hybrydowy (możliwość poboru prądu o kształcie zbliżonym do sinusoidalnego w szerokim zakresie częstotliwości roboczych),
f) największe ograniczenie zjawiska komutacji prądu uzyskuje się dla falowników napięcia i hybrydowego,
g) najbardziej odpornym układem na zwarcia skrośne (w przypadku jednoczesnego przewodzenia zaworów w jednej gałęzi) jest zasilacz w postaci falownika prądu, w którym w prosty sposób można ograniczyć jego skutki poprzez stabilizację prądu obwodu pośredniczącego,
h) wraz ze zmniejszaniem indukcyjności dodatkowej extremum wartości skutecznej prądu przepływającego przez obciążenie występuje przy coraz wyższych częstotliwościach przełączania zaworów falownika hybrydowego (rys. 8),
i) układ falownika hybrydowego wymaga ograniczenia zakresu częstotliwości przełączania zaworów,
j) układ falownika hybrydowego nie wymaga dodatkowego układu startowego.

LITERATURA

1. Barlik R., Nowak M.: Technika tyrystorowa. WNT, Warszawa 1985.
2. Barlik R., Nowak M., Tunia H., Smirnow A.: Układy energoelektroniczne. WNT, Warszawa 1982.
3. Matthes H.–G.: Der statistische Frequenz – Umrichter zum Einsatz in der industriellen Elektrowarme. Heft B3, 1977.
4. Matthes H.–G., Jurgens R.: HF – Rohrschweissen mit IGBT – Reihenschwingkreis–umrichter. Elektrowarme international. Heft B4, 1998.
5. Matthes H.–G., Mauler E.: Stromversorgungseinrichtungen fur Induktionserwarmungs–anlagen. Elektrowarme international. Heft B2, 1978.
6. Tunia H., Winiarski B.: Podstawy energoelektroniki. WNT, Warszawa 1975.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego Nr 8 T10A 054 19 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 2000 – 2001.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Czesław Sajdak

Wpłynęło do Redakcji dnia 31 maja 2001 r.

Abstract

The paper presents the comparison of properties of the following inverters used for induction heating: voltage inverter, current inverter and hybrid inverter (Fig. 1). The most important voltage and current waveforms of the discussed inverters are shown in Figs. 2, 3 and 4. The paper also presents the most important advantages and disadvantages of the particular configurations. Due to the fact that voltage and current inverters are widely described in the literature, emphasis is laid on hybrid inverters. The dependences between the transistors switching frequency and the inductor inductance L_k as well as its impact on R, L load current are shown in Figs. 5, 7 and 8. There is also shown, based on the equivalent schemes of a hybrid inverter, the operation of such a kind of feeder used at the switching frequency lower than the series resonant frequency f_{rs} (Fig. 6).