Nr kol.1319

Bogusław GRZESIK Zbigniew KACZMARCZYK Marcin KASPRZAK

WYSOKOCZĘSTOTLIWOŚCIOWE FALOWNIKI REZONANSOWE DO NAGRZE-WANIA INDUKCYJNEGO

Streszczenie. Przedstawiono trzy podstawowe topologie falowników rezonansowych do wysokoczęstotliwościowego nagrzewania indukcyjnego. W pierwszej części zamieszczono opis typowego systemu nagrzewania indukcyjnego. Następnie opisano trzy realizacje praktyczne falowników rezonansowych: napięcia, prądu i klasy E. W opisie tym szczególną uwagę zwrócono na: problematykę wyboru optymalnego sterowania, konstrukcję obwodu głównego oraz parametry techniczne. W podsumowaniu zawarto pewne wyniki analizy porównawczej falowników.

HIGH FREQUENCY RESONANT INVERTERS FOR INDUCTION HEATING PURPOSES

Summary. There are three basic topologies of resonant inverters for high frequency induction heating purposes presented in the paper. The description of the typical system of induction heating is given in the first part of the work. Next, the practical realization of three resonant inverters are described. They are voltage-fed, current-fed and class E inverters. Particular attention has been paid to the problems of the adoption of optimal control, the design of the power circuit and technical data of the inverters. The conclusion contains certain results of comparative analysis of the converters.

1. WPROWADZENIE

Praca jest wynikiem badań teoretycznych i laboratoryjnych prowadzonych w Instytucie Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej Politechniki Śląskiej, dotyczących wysokoczęstotliwościowych, rezonansowych falowników tranzystorowych przeznaczonych do nagrzewania indukcyjnego - [4, 5, 7, 10, 15, 16]. Jej celem jest przedstawienie przykładowych rozwiązań falowników, znajdujących najczęstsze zastosowanie w nagrze-waniu indukcyjnym przy częstotliwościach powyżej 100 kHz. Wiadomości zawarte w pracy mogą być pomocne w projektowaniu oraz wyborze rozwiązań optymalnych, uwzględniających wymogi technologiczne procesów (moc, częstotliwość, czas nagrzewania) oraz warunki eksploatacyjne.

Grzejnictwo indukcyjne jest typowym obszarem zastosowania falowników rezonansowych. Wysokoczęstotliwościowe systemy nagrzewania indukcyjnego umożliwiają uzyskanie dużej gęstości mocy we wsadzie, wysokiej sprawności procesu, odpowiedniego sprzężenia wzbudnik-wsad oraz właściwych warunków technologicznych [17]. Dodatkową korzyścią pracy przekształtnika z wysoką częstotliwością jest to, że kondensatory, dławiki i transformatory mają mniejsze gabaryty i masę.

Podwyższenie sprawności przekształcania energii elektrycznej przy dużej częstotliwości wyjściowej uzyskuje się głównie przez zmniejszanie strat mocy przełączania zaworów. W praktyce jest to uzyskiwane przez zastosowanie komutacji miękkiej typu Zero Voltage Switching (ZVS) lub typu Zero Current Switching (ZCS) [3, 9, 13], tzn. przełączanie zaworów w chwilach, gdy ich napięcia (ZVS) lub/i prądy (ZCS) osiągają wartość zero. Układy zasilania systemów nagrzewania indukcyjnego wykorzystujące technikę miękkiego przełączania najczęściej bazują na falownikach rezonansowych: napięciowym, prądowym i klasy E.

2. SYSTEM NAGRZEWANIA INDUKCYJNEGO

System nagrzewania indukcyjnego w zależności od wymaganej mocy, częstotliwości oraz przeznaczenia cechuje różny stopień złożoności [2]. Na rysunku 3.1 przedstawiono typowe elementy takiego systemu.

Zasadniczym elementem systemu nagrzewania indukcyjnego jest wysokoczęstotliwościowy falownik z zespołem kluczy tranzystorowych s1-s4 i układami wyzwalania tranzystorów W.

Obwód obciążenia falownika składa się z kondensatora rezonansowego wysokiej częstotliwości C_r , transformatora dopasowującego T_d oraz wzbudnika ze wsadem.

W zależności od zastosowanego rozwiązania, obwód główny falownika jest zasilany z regulowanego źródła napięcia lub prądu stałego (AC-DC). Zmiana napięcia/prądu w obwodzie pośredniczącym jest podstawową metodą regulacji mocy wyjściowej. W układach małej i średniej mocy (do kilkudziesięciu kW), źródło napięcia/prądu stanowi najczęściej prostownik niesterowany z filtrem LC i regulatorem napięcia/prądu typu BUCK (DC-DC). Dla większych mocy stosowane są prostowniki sterowane z dławikiem wygładzającym w obwodzie pośredniczącym w przypadku zasilania prądowego lub z filtram LC w przypadku zasilania napięciowego.





Fig. 1. Example of Induction Heating System

Inny sposób regulacji mocy wyjściowej polega na odstrojeniu częstotliwości przełączeń f_i zaworów falownika od częstotliwości drgań własnych f_o obwodu obciążenia. W układach wysokoczęstotliwościowych (powyżej 200 kHz) jest to metoda rzadko stosowana, gdyż prowadzi do znacznego zwiększenia strat przełączania zaworów i ogranicza maksymalną częstotliwość wyjściową.

Układ sterowania z pętlą fazowego sprzężenia zwrotnego (PLL) zapewnia pracę falownika z częstotliwością $f_i = f_o$, a tym samym optymalne warunki przełączania zaworów. Realizuje on ponadto sterowanie mocą wyjściową, reguluje temperaturę wsadu oraz nadzoruje różnorodne zabezpieczenia.

Układ mechaniczny zawierający podajnik wprowadza obrabiany termicznie element w obszar pola elektromagnetycznego wzbudnika.

Najczęściej stosowany jest cieczowy układ chłodzenia radiatorów, zaworów, transformatora oraz wzbudnika. Rozbudowane układy chłodzenia są typu zamkniętego i składają się z chłodnicy płynu *Ch* z wentylatorem, pompy *P* oraz kolektora rozdzielczego. Zadaniem kolektora jest rozprowadzenie płynu chłodzącego w proporcjach odpowiadających wymaganej intensywności chłodzenia.

Falownik będący źródłem energii wysokiej częstotliwości, jest jednym z podstawowych podzespołów systemu nagrzewania indukcyjnego. W zakresie wysokich częstotliwości i dużych mocy stosowane są falowniki rezonansowe napięciowe i prądowe. Natomiast w przypadku konieczności uzyskania częstotliwości powyżej 1 MHz i małych mocach (ok. 1kW) wykorzystuje się falowniki klasy E.

3. FALOWNIK NAPIĘCIOWY

W rozdziale tym prezentuje się opis laboratoryjnego falownika napięciowego o mocy około 1 kW i maksymalnej częstotliwości wyjściowej około 350 kHz. Schemat obwodów głównych falownika zamieszczono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat obwodu głównego falownika napięciowego

Fig. 2. Main Circuit of Voltage Fed Inverter

Falownik zasilany jest ze źródła napięcia stałego E=220 V. Regulator napięcia typu BUCK ($f_i=20$ kHz) tworzą: tranzystor T_{dc} oraz elementy D_{dc} , L_{dc} , C_{dc} . Pozostałe dane elementów falownika są następujące:

- tranzystory T1, T2 MOSFET typu IRFP450 (V_{DS}=500 V, I_D=14 A),
- diody D_{s1}, D_{r1}, D_{s2}, D_{r2} typu BYP79 (t_{rr}<70 ns) eliminują diody wewnętrznej struktury tranzystorów MOSFET D_{b1} i D_{b2}. Ich stosowanie jest zalecane ze względu na nieodpowiednie parametry dynamiczne tych ostatnich, tj. zbyt długi czas wyłączania (t_{rr}≈700 ns),
- transformator dopasowujący Tr z rdzeniem ferrytowym nawinięto licą miedzianą. Uzwojenie wtórne stanowi wielowarstwowy zwój wykonany z taśmy miedzianej, połączony z jednozwojowym wzbudnikiem. Zastosowano chłodzenie wodne wzbudnika i uzwojenia wtórnego. Średnica wewnętrzna wzbudnika, wykonanego z rurki miedzianej, wynosi d_{1w} =25 mm,
- pojemność baterii kondensatorów rezonansowych wynosi $C_r = 42 \text{ nF}$,
- pojemność kondensatorów dzielnika napięciowego $C_{dl} = C_{dz} = 12 \ \mu\text{F}.$

Zastosowanie szybkiego (t_{off} <500 ns) bezpiecznika elektronicznego *BE* jest niezbędne, jako dodatkowe zabezpieczenie, podczas testów laboratoryjnych.

Układ sterowania wraz z pętlą fazowego sprzężenia zwrotnego (PLL) zapewnia przełączanie tranzystorów falownika przy zerowym prądzie (ZCS) z częstotliwością drgań własnych obwodu obciążenia ($f_i = f_0$).

Podstawowe stany pracy tranzystorowego falownika napięciowego omówiono na podstawie przebiegów oscyloskopowych napięcia tranzystora u_T oraz prądu obciążenia i_0 - rys. 3.

W zależności od stosunku częstotliwości przełączania f_i do częstotliwości drgań własnych obwodu obciążenia f_0 , wyróżnia się trzy zasadnicze stany pracy falownika - (rys. 3.a, b, c) [8]:



I - $f_i > f_0$ (rys. 3a); II - $f_i = f_0$ (rys. 3b); III - 0.5 $f_0 < f_i < f_0$ (rys. 3c);

Przełączanie tranzystorów z częstotliwością różną od rezonansowej (I i III) odbywa się przy dużych wartościach prądu lub napięcia. Wynikają stąd znaczne straty mocy przełączania i ograniczenie maksymalnej częstotliwości przełączeń. W przypadku II przełączanie odbywa się przy zerowym prądzie odbiornika i_0 i tranzystorów (ZCS).

W praktycznych rozwiązaniach falowników konieczne jest stosowanie układów ograniczających straty przełączania w tranzystorach (*snubbers*). Najkorzystniejsze warunki przełączania daje zastosowanie układu odciążającego w postaci kondensatorów przyłączonych równolegle do tranzystorów [19]. W takim przypadku wyłączanie tranzystora musi odbywać się przy niewielkim prądzie. Wymusza to warunek $f_i > f_0$ oraz konieczność zastosowania sterowania z poprawnie dobranym czasem wyłączenia obu tranzystorów (*dead time*). Sterowanie wymaga znacznie większej precyzji, a długotrwałe odstrojenie od rezonansu grozi uszkodzeniem tranzystorów - załączenie tranzystora przy pełnym napięciu kondensatora odciążającego.

4. FALOWNIK PRĄDOWY

Poniżej przedstawiono opis laboratoryjnego falownika prądowego o mocy około 1 kW i maksymalnej częstotliwości wyjściowej 250 kHz. Schemat zastępczy obwodów głównych falownika i pokazano na rysunku 4.

Dane konstrukcyjne falownika:

- falownik zasilany jest z sieci napięcia stałego E=220 V,
- tranzystor T_{dc} , dławik L_{dc} oraz dioda D_{dc} tworzą źródło prądowe o regulowanej wydajności - zapewnia ono sterowanie mocą wyjściową falownika,
- tranzystory T1-T4 MOSFET typu IRF440 (V_{DS} =500 V, I_D = 8 A),
- diody *D1-D4* typu BYR29 ($t_{rr} < 70 \text{ ns}, I_D = 8 \text{ A}$),
- wzbudnik bez transformatora dopasowującego: $d_{lw} = 30 \text{ mm}, z = 14, l_l = 40 \text{ mm},$
- wsad z materiału ferromagnetycznego, walcowy: $d_2 = 25$ mm, $l_2 = 50$ mm,
- kondensator rezonansowy C_r=580 nF.

Przybliżone parametry zastępcze układu wzbudnik-wsad dla dwójnika szeregowego RL wynoszą: $R=1.3 \Omega$, $L=4.03 \mu$ H a Q=1.95 przy częstotliwości przełączeń $f_i=100$ kHz. Diody D1-D4, przejmujące ujemne napięcie gałęzi tranzystor-dioda, powinny być diodami szybkimi o miękkim zaniku prądu wstecznego. Zmniejsza to przepięcia przy wyłączaniu.



- Rys. 4. Schemat obwodu głównego falownika prądowego
- Fig. 4. Main Circuit of Current Fed Inverter

Układ sterowania z pętlą fazowego sprzężenia zwrotnego (PLL) zapewnia przełączanie tranzystorów falownika przy zerowym napięciu (ZVS), z częstotliwością drgań własnych obwodu obciażenia fo.

Podstawowe stany pracy falownika zilustrowano za pomocą oscylogramów napięcia kondensatora u_c oraz pradu wyjściowego i_0 (rys.5).

W zależności od stosunku czestotliwości f_i do f_0 , wyróżnia sie trzy podstawowe stany pracy falownika - (rys. 5.a, b, c) [8, 9]:





- Rys. 5. Przebiegi oscyloskopowe napięcia kondensatora uc oraz prądu wyjściowego falownika i_0 dla trzech podstawowych stanów pracy
- Fig. 5. Oscillograms of the Capacitor Voltage u_C and the Output Current i_0 for Three Fundamental Modes of Operation

 $I - f_i > f_0$ (rys. 5a);

II - $f_i = f_0$ (rys. 5b);

III - $f_i < f_0$ (rys. 5c);

Przełączanie tranzystorów z częstotliwością różną od rezonansowej (I i III) odbywa się podobnie jak w przypadku falownika napięciowego - przy dużych wartościach prądu lub napięcia. Szczególnie niekorzystne warunki przełączania uzyskuje się w przypadku III - jest to typowa komutacja twarda ze znacznym przepieciem i stratami przełączania. W przypadku II przełączanie następuje przy zerowym napięciu odbiornika i tranzystorów (ZVS).

Najkorzystniejszym przypadkiem jest sterowanie zapewniające naturalną komutacje pradów gałęzi falownika - rys. 5b [1, 9]. Polega ono na stosowaniu zakładki impulsów

załączających (overlap time). Para tranzystorów następujących załączana jest przy niewielkim napięciu u_c . Rozpoczyna się naturalna komutacja, która powinna zakończyć się przed zmianą polaryzacji napięcia u_c . Czas trwania komutacji jest zależny od nie uwzględnionych w schemacie pasożytniczych indukcyjności doprowadzeń. Tranzystory są wyłączane przy zerowym prądzie i napięciu (ZCS+ZVS). Załączanie odbywa się przy niewielkim napięciu i zerowym prądzie (LVS+ZCS). Falownik pracuje wówczas z częstotliwością f_i nieco większą od f_0 . Szczegółowy opis powyższego przypadku zamieszczono w pracach [8] i [9].

5. FALOWNIK KLASY E

Poniżej przedstawiono sposób działania, opis konstrukcji i pomiary oscyloskopowe falownika klasy E, wykorzystywanego w laboratoryjnym systemie nagrzewania lewitacyjnego metali.

Falownik klasy E jest falownikiem z odbiornikiem rezonansowym, w którym poprzez odpowiedni dobór sposobu sterowania oraz wartości elementów obwodu głównego minimalizuje się straty przełączeń - [13, 18]. Najczęściej stosowanym sterowaniem jest przełączanie tranzystora ze stałą częstotliwością f_i i wypełnieniem 0.5. Uzyskuje się przy tym prosty układu sterowania oraz najlepsze wykorzystanie parametrów prądowo-napięciowych zaworu.

Wartości elementów obwodu głównego: C_1 , C_2 , L_2 - rys. 6.a - wyznacza się dla założonej częstotliwości pracy falownika f_i , parametrów odbiornika oraz dobroci wyjściowego obwodu rezonansowego - [5, 13, 14]. Dławik L_1 gwarantuje dobre wygładzenie prądu zasilającego. Poprawny dobór parametrów falownika zapewnia załączenie przy zerowym napięciu (ZVS) i zerowym prądzie (ZCS), a wyłączanie przy zerowym napięciu (ZVS) i niezerowym prądzie (NZCS) - rys.7a. Rezultatem tego jest eliminacja strat mocy załączania oraz redukcja strat wyłączania poprzez ograniczenie szybkości narastania napięcia (kondensator C_1).



Rys. 6. Schematy zastępcze falownika klasy E o podstawowej topologii: a) schemat uproszczony, b) schemat pełny obwodów głównych

Fig. 6. Equivalent Circuits of Basic Topology of Class E Inverter: a) Simplyfied One, b) Details of Power Circuit of the Inverter Uproszczony schemat opisywanego laboratoryjnego systemu nagrzewania indukcyjnego pokazano na rysunku 6b. Składa się on z: falownika klasy E, transformatora dopasowującego - Tr, wzbudnika - wz oraz źródła napięcia stałego - E, które zasila falownik przez dławik wygładzający - L_1 . System ten wykorzystywany jest do badań zjawiska lewitacyjnego nagrzewania niewielkich wsadów metalowych [6].

Zawór falownika tworzą dwa połączone równolegle tranzystory T_1 , T_2 oraz cztery diody $D_1 \div D_4$. Zastosowano tranzystory polowe mocy MOSFET typu IRF840 i diody szybkie BYW29-200. Łączenie szeregowe/równoległe tych elementów wynikło z konieczności uzyskania odpowiedniej wytrzymałości napięciowej oraz obciążalności prądowej. Układ sterowania przełącza tranzystory z częstotliwością f_i =1 MHz oraz wypełnieniem D=0.5. Napięcie bramkowe tranzystora T_1 posiada kształt trapezowy, o poziomach +12 V i 0 V oraz czasie narastania/opadania około 30 ns.

Z powodu małych wymiarów wsadu i wzbudnika (mała impedancja) okazało się konieczne zastosowanie transformatora dopasowującego. Jest to transformator ferrytowy, o 12 zwojach uzwojenia pierwotnego oraz jednym zwoju wtórnym, chłodzonym wodą. Wzbudnik wykonano z rurki miedzianej o 2.5 mm średnicy zewnętrznej i 1.5 mm wewnętrznej. Wzbudnik pokazano na rysunku 7b, na którym widoczny jest lewitujący wsad aluminiowy o kształcie kuli o średnicy 2.5 mm. Wzbudnik chłodzono wodą destylowaną.



Rys. 7.a) Oscylogramy napięcia i prądów falownika, b) zdjęcie wzbudnika z lewitującym wsadem

Fig. 7.a) Oscillograms of Voltage and Currents of the Inverter, b) Fotograph of the Coil with the Levitating Sample

Układ wzbudnik-wsad podłączony poprzez transformator dopasowujący stanowi obciążenie falownika. W uproszczonym schemacie zastępczym - rys.6a - obwód ten sprowadzono do dwójnika szeregowego L_2 -R. Schemat ten umożliwia wyznaczenie wartości elementów falownika, minimalizujących straty mocy przełączeń zaworu.

Przy mocy zasilania P=200 W i częstotliwości $f_i=1$ MHz, odpowiednie parametry zastępcze (rys.6) dla wsadu w postaci kuli miedzianej o średnicy 3.5mm wynoszą:

 L_1 =200 µH, C_1 =5.25 nF, C_2 =2.46 nF, L_2 =10.9 µH, R=5.8 Ω .

Ilustracją tego przypadku są przebiegi czasowe napięcia u_Z , prądu zaworu i_Z oraz prądu wyjściowego i_R przedstawione na rys.7a.

6. WNIOSKI

Z materiału przedstawionego w artykule oraz poprzednich pracach wykonanych przez autorów [5, 7, 8, 10] wynikają następujące wnioski:

- W wysokoczęstotliwościowych systemach nagrzewania indukcyjnego najczęściej znajdują zastosowanie falowniki tranzystorowe: prądowy, napięciowy i klasy E.
- 2. W celu uzyskania jednakowych mocy czynnych odbiornika i założonej częstotliwości nagrzewania, falownik prądowy wymaga zasilania napięciem wyższym niż falownik napięciowy. Tendencja ta pogłębia się ze wzrostem wartości dobroci Q - [10]
- 3. W porównaniu z falownikiem napięciowym i prądowym, falownik klasy E cechuje większa prostota układu sterowania oraz mniejsza liczba stopni swobody w wyborze optymalnych parametrów elementów. Dla określonej częstotliwości i obciążenia, wartości elementów obwodu głównego należy dobrać wg. odpowiedniego algorytmu [13, 14]. Falownik pracujący w warunkach optymalnych realizuje załączanie typu ZVS+ZCS i wyłączanie ZVS+NZCS, dając przez to najwyższą sprawność przy wysokich częstotliwościach.
- 4. Falowniki prądowy i napięciowy są układami najczęściej stosowanymi w praktyce. Obszar zastosowań falownika klasy E jest ograniczony do zakresu najwyższych częstotliwości (powyżej 1 MHz) oraz mocy do kilkuset watów [11, 12].
- 5. Określony proces nagrzewania indukcyjnego może być prowadzony za pomocą różnych falowników, a kryterium wyboru mogą stanowić np.: technologia, koszty, masa oraz gabaryty urządzenia.
- 6. Na rynku dostępne są falowniki przeznaczone do nagrzewania indukcyjnego, pracujące z częstotliwością od 10 kHz do 500 kHz i mocach 1 kW do 1.5 MW. Umożliwiają one realizację prawie wszystkich procesów technologicznych wymagających nagrzewania indukcyjnego.

- 7. Współczesne systemy nagrzewania indukcyjnego wyposażone są w systemy mikroprocesorowe. Spełniają one wiele funkcji - od sterowania falownika, poprzez kontrolę wszelkiego rodzaju zabezpieczeń, a skończywszy na dwukierunkowej komunikacji z systemami nad- i podrzędnymi.
- 8. Prowadzone badania falowników wysokoczęstotliwościowych wykazują, że istnieją perspektywy rozwoju nowych konstrukcji i zastosowań.

Pracę wykonano w ramach projektów nr [8 T10A 013 08] i [8 S502 042 07] finansowanych przez Komitet Badań Naukowych.

LITERATURA

- 1. Berkan W., Michalski A., Serafin S., Zymmer K.: 50 kHz, 25KW frequency converter with IGBT for induction heating. PEMC'94, Warszawa, wrzesień 1994, pp. 537-542.
- Dede E. J., et all: Transistors are replacing electronic tubes and thyristors in induction heating generators. Elektrowärme international, 50 Jahrgang, Heft B1/1992, pp.B26 -B32.
- 3. Dmowski A., Bugyi R., Szewczyk P.: Safe operating conditions of semiconductor devices in resonant converters. PEMC'94, Warszawa, wrzesień 1994, pp. 537-542.
- Grzesik B., Kołodziej H.: Tyrystorowy prądowy falownik rezonansowy do indukcyjnego topienia metali. IV Krajowa Konferencja Energoelektroniki, Warszawa 27-28.09.1990, Materiały konferencyjne: tom I, s. 221-229.
- Grzesik B., Kaczmarczyk Z.: Class E inverter for levitation melting. PEMC'94, Warszawa, wrzesień 1994, pp. 1060-1065.
- Grzesik B., Kaczmarczyk Z.: Study of Class E inverter, a supplying source for levitation heating/melting. Fourth European Space Power Conference, 4-8 September 1995.
- Grzesik B., Kasprzak M.: Opracowanie teoretycznych podstaw projektowania tranzystorowych urządzeń falownikowych dla potrzeb grzejnictwa indukcyjnego. Projekt badawczy KBN Nr PB-05559/S2 93/04, Gliwice 1993/1994.
- Grzesik B., Kasprzak M.: Falowniki średniej i wysokiej częstotliwości do nagrzewania indukcyjnego - stan aktualny. ZN Pol. Śl., Elektryka z.139, s.149-163.

- Grzesik B., Kasprzak M.: Optymalizacja warunków przełączania w rezonansowym równoległym falowniku prądowym. VI Sympozjum "Podstawowe Problemy Energoelektroniki i Elektomechaniki" Gliwice-Ustroń marzec 1995, s. 381-392.
- Grzesik B., Kasprzak M.: Falowniki rezonansowe: szeregowy i równoległy porównanie uproszczonych modeli. VI Sympozjum "Podstawowe Problemy Energoelektroniki i Elektromechaniki" Gliwice-Ustroń marzec 1995, s. 369-374.
- Hinchliffe S., Hobson L., Collins D.: Optimised Class-E amplifier with load variation. Electronics Letters, vol. 23, no. 18, August 1987, pp. 973-974.
- 12. Hinchliffe S., Hobson L., Houston R. W.: A high power Class E amplifier for high-frequency electric process heating. Int. J. Electronics, vol. 64, no. 4, 1988, pp. 667-675.
- Kazimierczuk M.: Teoria wzmacniacza mocy wielkiej częstotliwości klasy E. Rozpr. Elektrotechniczne t. 25, z. 4, 1979, s. 957-986.
- Kazimierczuk M., Puczko K.: Exact Analysis of Class E tuned power amplifier at any Q and switch duty cycle. IEEE Trans. Circ. Syst., vol.CAS-34,no.2, Feb.1987, pp.149-159.
- Kołodziej H., Grzesik B., Myrcik Cz.: Małogabarytowy zasilacz do pieca indukcyjnego. Materiały konferencji: Nowoczesne urządzenia i technologie elektrotermiczne w metalurgii, org.: Polski Komitet Elektrotermii, SEP, SITHP, Szczyrk 1987, s.184-193.
- Ogos J., Kołodziej H., Nowak J., Myrcik Cz., Grzesik B.: Prototypowe urządzenie do indukcyjnego nagrzewania rur. Materiały konferencji: Nowoczesne urządzenia i technologie elektrotermiczne w metalurgii, org.: Polski Komitet Elektrotermii, SEP, SITHP, Szczyrk 1987, s.164-172.
- 17. Sajdak C., Samek E.: Nagrzewanie indukcyjne. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1987.
- Sokal N. O., Sokal A. D.: Class E a new class of high-efficiency tuned single-ended switching power amplifiers. IEEE J. Solid-State Circuits, vol. SC-10, no. 3, June 1975, pp. 168-176.
- Berkan W., Michalski A., Serafin S., Zymmer K.: Tranzystorowe przekształtniki częstotliwości do nagrzewania indukcyjnego. VI Sympozjum "Podstawowe Problemy Energoelektroniki i Elektomechaniki" Gliwice-Ustroń marzec 1995, s. 121-126.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Tadeusz Skoczkowski

Wpłyneło do Redakcji dnia 14 lipca 1995 r.

Abstract

Three types of resonant inverters are usually applied in systems of high frequency induction heating, namely: voltage-fed inverter with series resonant circuit, current-fed inverter with parallel resonant circuit and Class E inverter. Capacitors, inductors and transformers are most efficiently utilised in systems with resonant inverters. It results in high density of the power in the heated sample and also results in low dimensions of the system. To get high efficiency it is necessary to limit the switching loss. In resonant inverters it is gained by means of soft commutation (ZVS, ZCS).

A schematic diagram of typical system for induction heating is presented in Fig.1. It consists of the following main units: supplying AC/DC source, resonant inverter, matching transformer Td and the excitation coil with a heated piece of metal. The remaining part of the system contains: control unit with PLL subsystem, protection unit U> I>, water-cooling system for switches and the feeder of the heated pieces of metal Pw. The main part of the paper describes the way of operation and the design of the resonant (current-fed, voltage fed and Class E) inverters.

In part 3 in Fig. 2, there is the schematic diagram of voltage-fed inverter of 1kW and 350kHz. It consists of DC/DC BUCK converter, electronic short-circuit protection BE, inverter main circuit, matching transformer Tr and excitation coil with the heated piece of metal. Application of capacitor snubbers at switching frequency a little higher than the resonant one and adjusting of proper turn-off time of transistors result in maximum efficiency (Fig. 3b).

In part 4 there is resonant current-fed inverter (1kW, 250kHz) described. There are the data and design details given in this part of the paper. The inverter is supplied from current source. The excitation coil is connected to resonant capacitor Cr in parallel. Minimisation of switching loss is gained by means of proper adjustment of switching frequency which is a little higher than the resonant one that is accomplished by the setting of required overlap time.

The third inverter - the one of Class E is described in part 5. It is applied in cases when the frequency higher than MHz is needed. The inverter is depicted in Fig. 6. The characteristic feature of this inverter is its soft switching-on which is of ZVS+ZCS type and semisoft switching-off what means of ZVS+NZCS type. To obtain such commutation it is necessary to synthesise thorough fully parameters of its elements. There is schematic diagram of inverter Class E - 300W and 1MHz which is used in laboratory systems for levitation heating of metals.

Described voltage-fed, current-fed and Class E inverters are the most frequently used inverters in systems of induction heating. The first two are used at frequencies below 1MHz while Class E inverter above this frequency.