

Zbigniew KACZMARCZYK

FALOWNIK KLASY E - PRZYKŁAD PRZEKSZTAŁNIKA ENERGOELEKTRONICZNEGO NAJWYŻSZYCH CZĘSTOTLIWOŚCI

Streszczenie. Praca niniejsza ma na celu przedstawienie falownika klasy E za pomocą opisu teoretycznego, symulacji komputerowych, wybranych wyników eksperymentów laboratoryjnych oraz przykładów zastosowań. Falownik ten ma duże znaczenie w energoelektronice, ponieważ umożliwia pracę z wysoką częstotliwością (>1 MHz), czego wynikiem jest zmniejszenie gabarytów i wagi oraz zwiększenie gęstości mocy. W pracy zamieszczono opis działania falownika klasy E, jego podstawowe właściwości oraz wyniki pomiarów trzech systemów: laboratoryjnego, lewitacyjnego i do topienia proszków metali.

CLASS E INVERTER – EXAMPLE OF THE HIGHEST-FREQUENCY CONVERTER

Summary. The presentation of Class E inverter by means of relevant theory, results of simulations, results of laboratory measurements and exemplary applications are the subject of the paper. This inverter is of high importance in power electronics as it allows to obtain relatively high frequency of operation (>1 MHz), which in turn leads to reduction of size and weight and increasing of power density. The paper presents: principle of operation of Class E inverter, its main properties, results of experiments carried out with three systems: laboratory, levitation and the one for melting of metal powders.

1. MOTYWACJA

Wysoka częstotliwość przełączeń urządzeń przekształcających energię elektryczną umożliwia zmniejszenie ich gabarytów i wagi, a stąd wynika możliwość zwiększenia gęstości mocy. Ponadto wysoka częstotliwość jest niezbędna z powodów technologicznych. Przykładem może być nagrzewanie, topienie oraz hartowanie indukcyjne małych elementów metalowych. Źródłem w takim przypadku może być przekształtnik wysokoczęstotliwościowy, *falownik klasy E* - rys. 1. Głównymi zaletami tego falownika są: komutacja miękka (stąd wysoka sprawność), mała masa i gabaryty, niski poziom emitowanych zakłóceń elektromagnetycznych oraz prosta topologia (możliwość użycia tylko jednego tranzystora).

Działanie falownika klasy E zostało po raz pierwszy dokładnie przeanalizowane przez Sokalów w 1975 r. [2]. Od tego czasu ukazało się wiele publikacji na ten temat. Pomimo to wiele problemów nie zostało rozwiązanych. Przykładem może być strategia i konstrukcja układu sterowanie falownika, przeznaczonego do współpracy z obciążeniem o silnie zmiennych parametrach. Wszystko to stanowi motywację do prowadzenia dalszych prac badawczych nad falownikami klasy E.



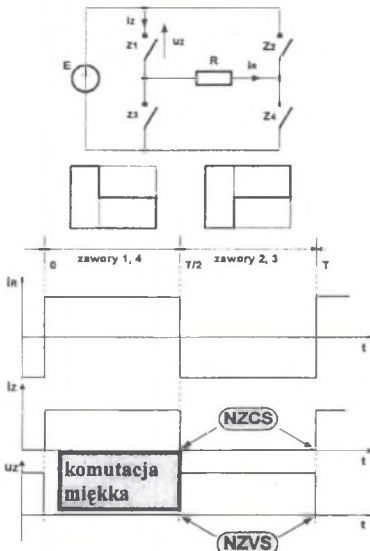
Rys.1. Falownik klasy E - wysokoczęstotliwościowy i wysokosprawny przekształtnik
Fig.1. Class E inverter - high-frequency and high efficiency inverter

Praca niniejsza ma na celu przedstawienie falownika klasy E za pomocą opisu teoretycznego, symulacji komputerowych, wybranych wyników eksperymentów laboratoryjnych, przykładów zastosowań oraz zagadnień nadal otwartych.

2. WPROWADZENIE

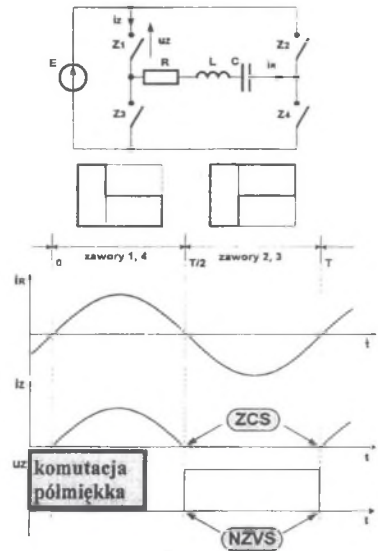
Przekształcanie DC/AC w zakresie najwyższych częstotliwości realizuje się zwykle za pomocą falowników rezonansowych: szeregowego, równoległego oraz falownika klasy E. Falownik klasy E ma wiele cech wspólnych z falownikiem szeregowym, a szczególnie z falownikiem klasy DE i z tego powodu jego opis rozpoczyna się od przytoczenia pewnych informacji o mostkowym falowniku napięciowym.

Podstawowa topologia, z której wywodzi się falownik szeregowy, to mostkowy falownik napięciowy - rys. 2. Przebiegi czasowe prądu zaworu i_z oraz napięcia na zaworze u_z są prostokątne. Zawór jest przełączany przy niezerowym napięciu (*non-zero-voltage-switching - NZVS*) oraz przy niezerowym prądzie (*non-zero-current-switching - NZCS*), czego rezultatem są straty mocy przełączania. Tego typu przełączanie jest określane mianem komutacji twardej (*hard-commutation - NZCS+NZVS*).



Rys.2. Falownik napięcia z obciążeniem rezystancyjnym

Fig.2. Voltage-source inverter with resistive load

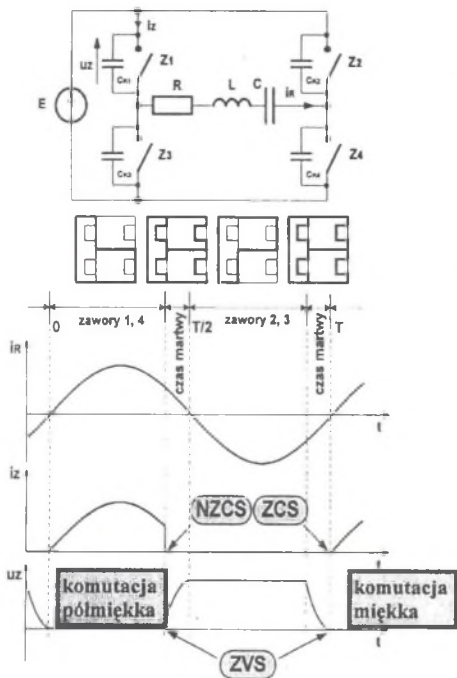


Rys.3. Rezonansowy falownik napięcia szeregowy (falownik szeregowy klasy D)

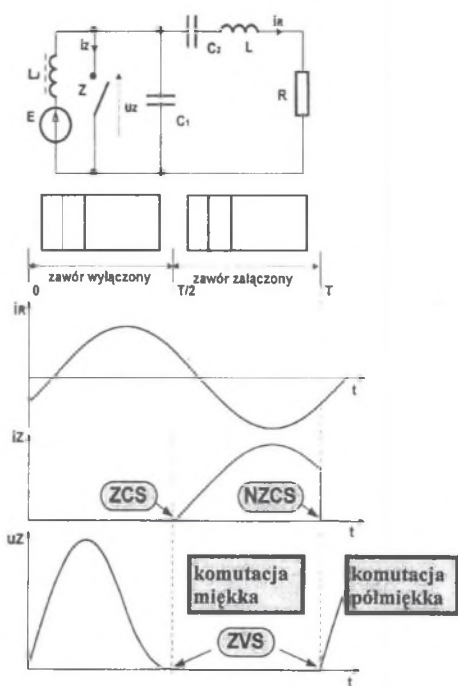
Fig.3. Voltage-source series resonant inverter (Class D series inverter)

Mostkowy falownik napięciowy stanowi bazę dla rezonansowego falownika szeregowego - rys. 3. Gdy współczynnik dobroci szeregowego obwodu rezonansowego jest odpowiednio duży, to prąd obciążenia i_R jest prawie sinusoidalny. Zawory mogą być przełączane przy zerowym prądzie (*zero-current-switching - ZCS*). Napięciowo jest realizowana komutacja twarda, tj., przełączanie zaworów przy niezerowym napięciu (NZVS). Straty mocy przełączania są mniejsze niż straty w przypadku poprzednim - rys. 2. Ten typ przełączania, jako całość, jest określany komutacją półmiękką (*half-soft-commutation - ZCS+NZVS*).

Falownik szeregowy klasy DE (rys. 4) jest modyfikacją rezonansowego falownika szeregowego, której celem było ulepszenie warunków przełączania zaworów. Modyfikacja ta polegała na wprowadzeniu w układzie sterowania czasu martwego, przez który wszystkie zawory falownika są wyłączone, oraz dołączeniu równoległe do zaworów Z kondensatorów komutacyjnych C_K . Przez czas martwy kondensatory komutacyjne są przeładowywane prądem odbiornika i w ten sposób napięcia na zaworach oczekujących na załączenie zmniejsza się do zera. Dzięki temu uzyskano tzw. *komutację maksymalnie miękką* zaworów falownika. Oznacza ona, że zawór jest załączany przy zerowym napięciu ($ZVS=ZVS_{ON}$) i jednocześnie przy zerowym prądzie ($ZCS=ZCS_{ON}$) oraz wyłączany przy zerowym napięciu ($ZVS=ZVS_{OFF}$) i przy niezerowym prądzie ($NZCS=NZCS_{OFF}$). Symbolicznie załączanie można oznaczyć jako $ZVS_{ON}+ZCS_{ON}$. Podobnie wyłączanie może być oznaczone poprzez $ZVS_{OFF}+NZCS_{OFF}$. Komutację maksymalnie miękką oznaczyć można jako $ZVS_{ON}+ZCS_{ON}+ZVS_{OFF}+NZCS_{OFF}$.



Rys.4. Falownik szeregowy klasy DE
Fig. 4. Class DE series inverter



Rys.5. Falownik klasy E z równoległym kondensatorem (*topologia podstawowa*)
Fig.5. Class E inverter with parallel capacitor (*basic topology*)

Schemat falownika klasy E o topologii podstawowej z równoległym kondensatorem zamieszczono na rys. 5. W falowniku tym również można uzyskać komutację maksymalnie miękką zaworu typu $ZVS_{ON}+ZCS_{ON}+ZVS_{OFF}+NZCS_{OFF}$. Zaletą tego falownika jest to, że posiada on tylko jeden tranzystor. Wadą jest wysoka wartość napięcia na wyłączonym zaworze, która wielokrotnie przewyższa wartość napięcia zasilania.

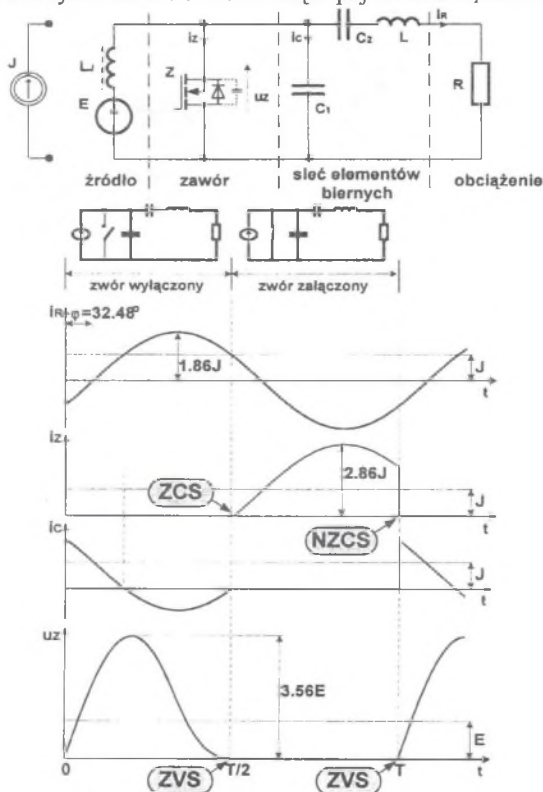
Realizowana przez falownik klasy E komutacja umożliwia uzyskanie pracy z wysoką częstotliwością oraz wysoką sprawnością (85+95%, 1÷5 MHz [4]).

3. PODSTAWOWE WŁAŚCIWOŚCI FALOWNIKA KLASY E

3.1. Zasada działania

Falowniki klasy E cechuje najwyższa sprawność [3]. Najczęściej omawianą odmianą falownika klasy E jest falownik z rys. 6, z równoległym kondensatorem oraz szeregowym obwodem rezonansowym.

W zakresie wysokich częstotliwości (powyżej 1 MHz) jako zawór są stosowane tranzystory mocy MOSFET. Z analizy schematu falownika wynika, że pasożytnicza pojemność wyjściowa tranzystora może stanowić część pojemności C_1 . Stanowi to zaletę.



Rys. 6. Zasada działania falownika klasy E z równoległym kondensatorem
Fig. 6. Principle of operation of Class E inverter with parallel capacitor

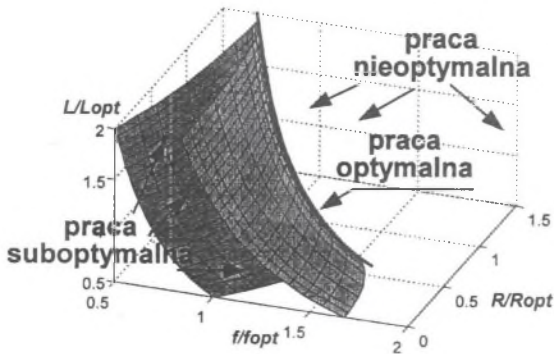
Do analizy zasady działania falownika przyjmuje się najczęściej następujące założenia upraszczające: zawór Z bezstratny i bezinercyjny, elementy RLC są idealne, źródło napięcia E z szeregowym dławikiem L_J jest zastępowane źródłem prądu J , współczynnik przełączeń zaworu wynosi 0.5, parametry falownika C_1 , C_2 , L , R i częstotliwość pracy f są dobrane tak, aby zapewnić maksymalnie miękką komutację zaworu falownika.

Przy współczynniku dobroci obwodu szeregowego RLC_2 większym od 2.5, kształt prądu obciążenia i_R jest zbliżony do sinusoidalnego. Częstotliwość drgań własnych obwodu RLC_2 jest nieco niższa od częstotliwości przełączeń. Kąt fazowy φ wynosi około 32° - rys. 6. Podczas gdy zawór jest wyłączony, napięcie na zaworze u_Z wynika z prądu i_C przeładującego kondensator C_1 . Gdy zawór jest załączony, prąd zaworu jest równy: $J \cdot i_R$.

Średnia wartość prądu zaworu i_Z wynosi J , a średnia wartość napięcia na zaworze u_Z jest równa E . Względne wartości maksymalne prądu zaworu i napięcia na zaworze zaznaczono na rys. 6; są one równe odpowiednio: 2.86, 3.56.

3.2. Przestrzeń parametrów - zintegrowany opis działania

Funkcjonowanie falownika klasy E opisane na rys. 6 określane jest jako *praca optymalna*. Falownik może pracować również *suboptymalnie* lub *nieoptymalnie*. Sprawność falownika osiąga wartość najwyższą dla pracy optymalnej, zmniejsza się dla pracy suboptymalnej oraz jest najmniejsza dla pracy nieoptymalnej. Wszystkie powyższe rodzaje pracy falownika mogą być scharakteryzowane, jako pewna całość, za pomocą *przestrzeni parametrów falownika*. Przykład takiej przestrzeni zamieszczono na rys. 7. Parametry L , R , f zostały znormalizowane. Jeśli punkt parametrów leży na zewnątrz przestrzeni ograniczonej przez zaznaczoną powierzchnię, to falownik pracuje nieoptymalnie. Praca optymalna jest uzyskiwana, gdy parametry są wyznaczone przez krzywą „praca optymalna” - rys. 7. W pozostałych przypadkach falownik pracuje suboptymalnie.



Rys. 7. Przestrzeń parametrów falownika klasy E
Fig. 7. Space of parameters of the Class E inverter

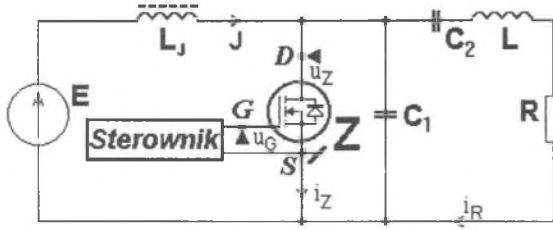
4. PRZYKŁADOWE WYNIKI POMIARÓW LABORATORYJNYCH

Wyniki pomiarów laboratoryjnych zamieszczono w celu nadania zamieszczonym informacjom aspektu ilościowo-technicznego.

4.1. Model laboratoryjny falownika klasy E

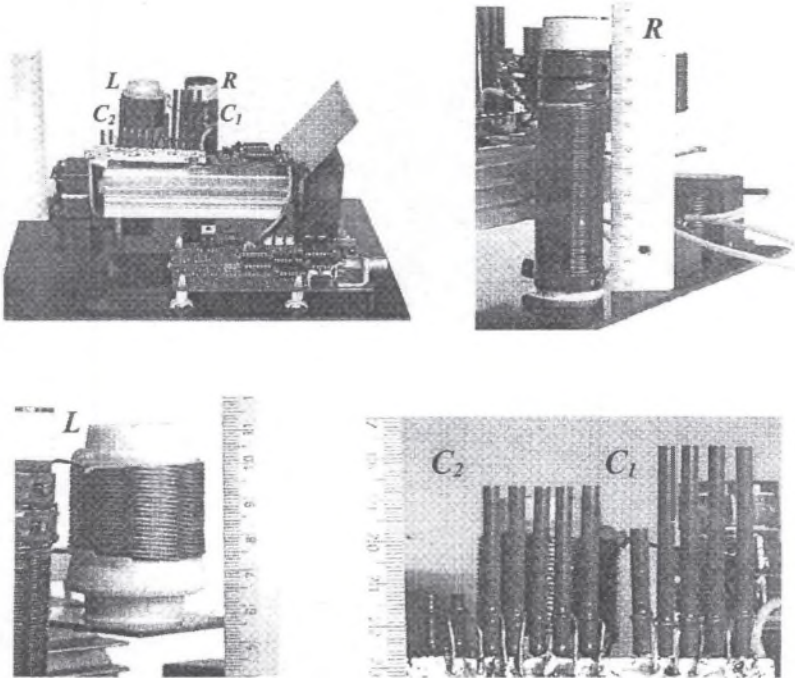
Dane techniczne modelu laboratoryjnego zaczerpnięto z pracy [4] ($P=416$ W, $E=80$ V, $J=5.2$ A, $f=1$ MHz, $\eta=94.4\%$, $2 \times \text{IRF740}$).

W konstrukcji modelu wykorzystano dwa połączone równolegle tranzystory MOSFET typu IRF740. Schemat falownika przedstawiono na rys. 8.



Rys.8. Schemat falownika laboratoryjnego
Fig.8. Schematic diagram of the laboratory inverter

Fotografie falownika znajdują się na rys.9. Pokazują one poszczególne elementy falownika: układ sterowania, rezystor obciążenia R , cewkę szeregowego obwodu rezonansowego L oraz kondensatory C_1 i C_2 .



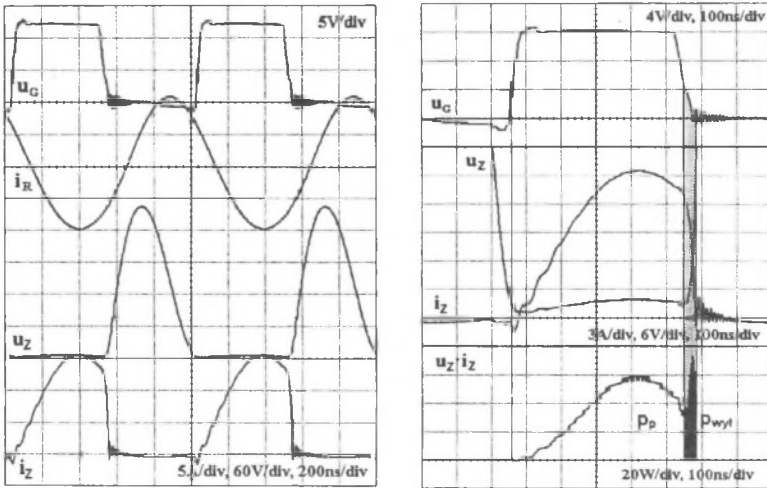
Rys.9. Widok ogólny falownika laboratoryjnego oraz jego elementów
Fig.9. General view of the laboratory inverter and its components

Parametry poszczególnych elementów falownika wynosiły: $L_f=120\ \mu\text{H}$, $C_f=3.8\ \text{nF}$, $C_2=2.5\ \text{nF}$, $L=11.8\ \mu\text{H}$ oraz $R=7.15\ \Omega$. Zostały one obliczone dla zapewnienia pracy optymalnej przy częstotliwości przełączeń 1 MHz [4].

4.2. Pomiary modelu laboratoryjnego

Skonstruowany falownik został poddany wszechstronnym pomiarom. Wybrane rezultaty pomiarów przy pracy optymalnej zaprezentowano poniżej na rys. 10.

Zmierzono następujące wielkości: napięcie bramki u_G , prąd obciążenia i_R , napięcie na zaworze u_Z oraz prąd zaworu i_Z .



Rys.10. Wyniki pomiarów przy pracy optymalnej ($2 \times \text{IRF740}$, $f=1\ \text{MHz}$, $P=416\ \text{W}$, $P_C=23.1\ \text{W}$, $\eta=94.4\%$, $P_p/P_C=89.2\%$, $P_{\text{wyt}}/P_C=9.1\%$)

Fig.10. Results of measurements during optimum operation

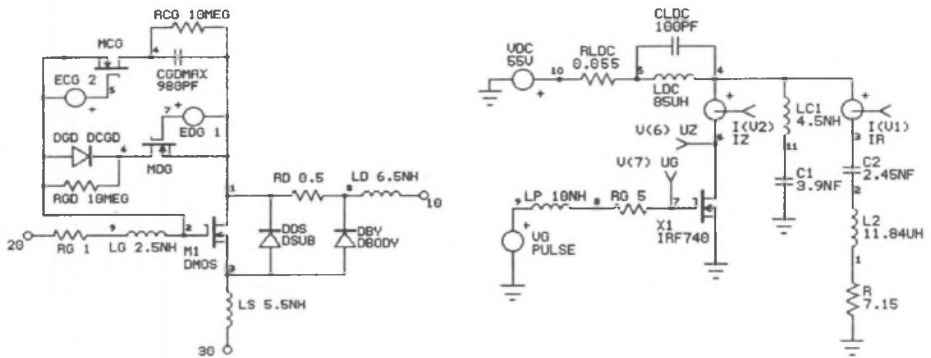
Chwilowe straty mocy zaworu $u_Z i_Z$ (rys. 10) można podzielić na dwie części: straty mocy przewodzenia p_p oraz straty mocy wyłączenia p_{wyt} .

Częstotliwość wynosi $f=1\ \text{MHz}$ przy mocy zasilającej $P=416\ \text{W}$. Całkowite straty mocy są równe $P_C=23.1\ \text{W}$, co daje sprawność falownika $\eta=94.4\%$. Względne straty mocy przewodzenia i wyłączenia wynoszą odpowiednio: $P_p/P_C=89.2\%$, $P_{\text{wyt}}/P_C=9.1\%$.

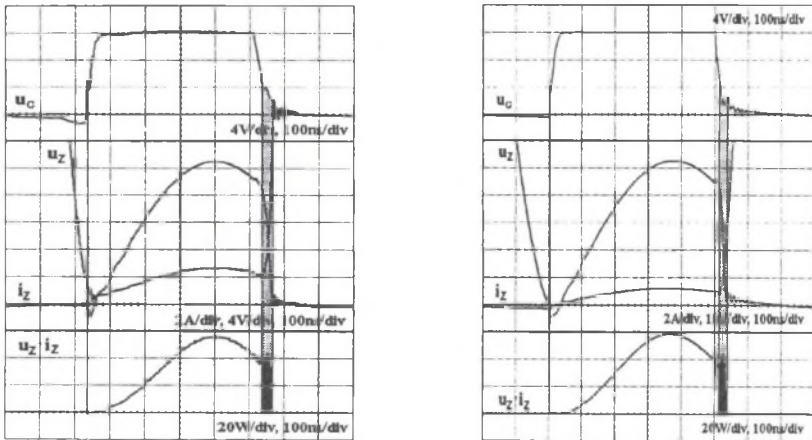
5. SYMULACJA KOMPUTEROWA FALOWNIKA

Prezentowane poniżej wybrane wyniki symulacji komputerowej działania falownika klasy E traktowane są jako materiał porównawczy.

Na rys. 11 zamieszczono model tranzystora MOSFET oraz model falownika w programie SPICE®. Wyniki symulacji oraz wyniki pomiarów falownika laboratoryjnego znajdują się na rys. 12. Rezultaty symulacji są zbliżone do pomiarów laboratoryjnych.



Rys.11. Model tranzystora MOSFET oraz model falownika w programie SPICE®
 Fig. 11. Model of MOSFET transistor and model of the inverter in SPICE®



Rys.12. Pomiary (po prawej) i wyniki symulacji falownika
 Fig.12. Measured waveforms (on the left) and simulation results of the inverter

6. ZASTOSOWANIA

Falowniki klasy E mogą być stosowane wszędzie tam, gdzie wymagane są względnie proste, sprawne (~90%), wysokoczęstotliwościowe (kilka MHz) źródła, w zakresie mocy od kilku watów do kilku kilowatów. Przykładowo mogą to być: źródła do nagrzewania indukcyjnego, elementy przetwornic napięcia DC/DC, źródła do przetworników ultradźwiękowych używanych do oczyszczania powierzchni.

Dwa zastosowania falownika klasy E opisuje się dokładniej. Pierwsze, to system lewitacyjny nagrzewania oraz topienia metali. Drugie to system topienia proszków metali.

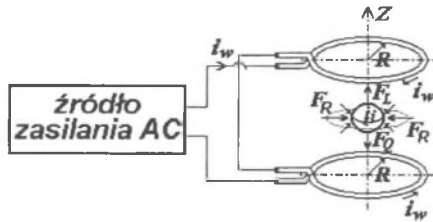
6.1. System lewitacyjny [4]

6.1.1. Zjawisko lewitacji

System lewitacyjny został po raz pierwszy skonstruowany przez Okressa w 1952 [1].

Zjawisko lewitacji elektromagnetycznej polega na utrzymywaniu w zawieszeniu elementu wykonanego z materiału przewodzącego prąd w polu elektromagnetycznym uformowanym przez cewkę o specjalnym kształcie. W ogólnym przypadku cewka ta składa się z dwóch połączonych szeregowo części, które wytwarzają pola przeciwne - rys. 13.

Lewitacja jest głównie wykorzystywana w eksperymentach laboratoryjnych, np. otrzymywanie stopów, oczyszczanie metali czy też topienie trudno topliwych materiałów przewodzących i nieprzewodzących.

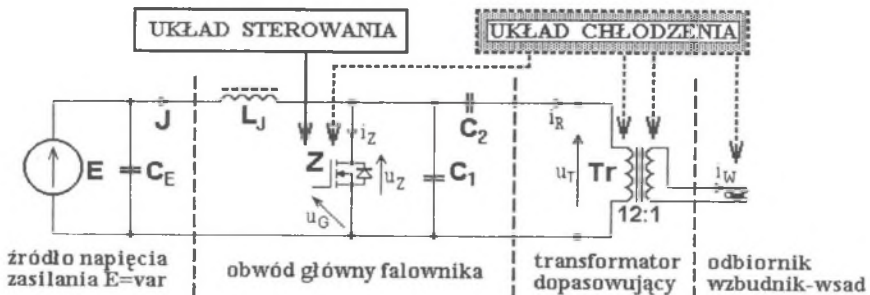


Rys.13. System lewitacyjny indukcyjnego nagrzewania i topienia metali (Okress [1])

Fig.13. Levitation system for induction heating and melting (Okress [1])

6.1.2. System laboratoryjny

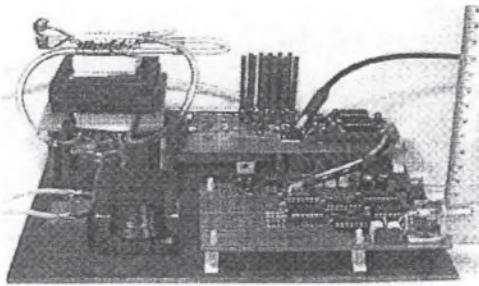
Schemat systemu podano na rys. 14. Widok ogólny przedstawiono na rys. 15. Jednym z ważniejszych jego elementów jest transformator, stanowiący jedną całość konstrukcyjną z cewką lewitacyjną - rys. 16. Jest to transformator ferrytowy o przekładni 12:1, chłodzony wodą. Falownik zbudowano na dwóch połączonych równolegle tranzystorach IRF740.



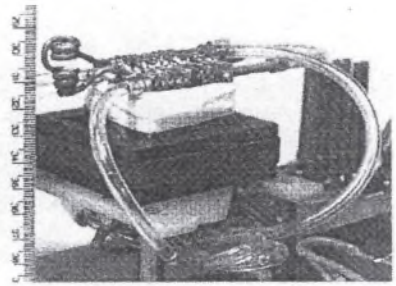
Rys. 14. Schemat systemu lewitacyjnego

Fig. 14. Schematic diagram of the levitation system

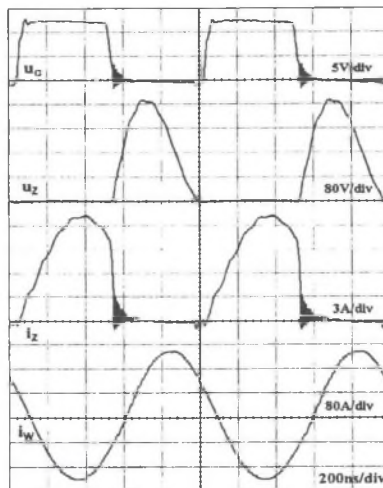
Przebiegi napięć i prądów (rys. 17) zmierzono przy mocy zasilania 418 W oraz przy lewitującym wsadzie miedzianym o kształcie kuli i średnicy 2.5 mm. Częstotliwość pracy falownika wyniosła 1.016 MHz, a wartość skuteczna prądu wzbudnika 148 A.



Rys.15. Widok ogólny systemu lewitacyjnego
Fig.15. General view of the levitation system



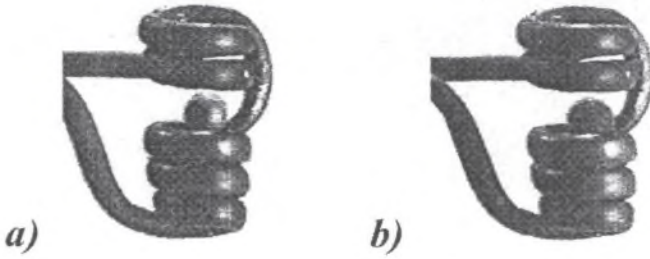
Rys.16. Transformator dopasowujący z cewką lewitacyjną
Fig. 16. Matching transformer with levitation coil



Rys.17. Zmierzone napięcia i prądy ($P=418.6\text{W}$, $f=1.016\text{MHz}$, $I_{w(RMS)}=148\text{A}$)
Fig.17. Measured waveforms of the system

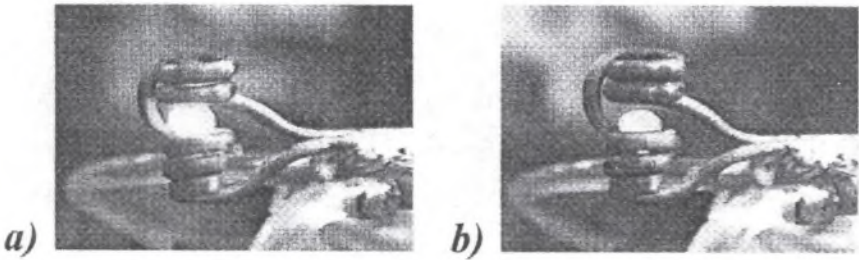
6.1.3. Cewka lewitacyjna/lewitujący wsad

Cewkę lewitacyjną wraz z lewitującym wsadem przedstawiono na rys. 18, 19. Widoczne są na nich wsady lewitujące, wykonane z aluminium oraz miedzi, o różnych średnicach i dla różnych wartości skutecznych prądu wzbudnika (98 A - rys.18, 148 A - rys.19).



Rys.18. Wsady lewitujące: a) Al, b) Cu; ($\varnothing 2.5$ mm, 98 A, 500°C)

Fig.18. Levitation samples: a) Al, b) Cu; ($\varnothing 2.5$ mm, 98 A, 500°C)

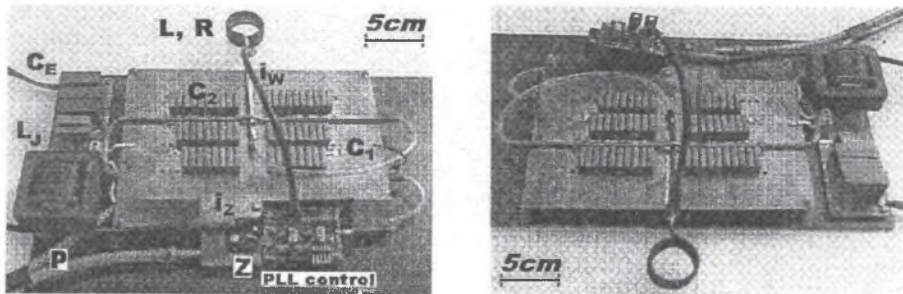


Rys.19. Wsady lewitujące: a) Al, b) Cu; ($\varnothing 4$ mm, 148 A, 1100°C)

Fig.19. Levitation samples: a) Al, b) Cu; ($\varnothing 4$ mm, 148 A, 1100°C)

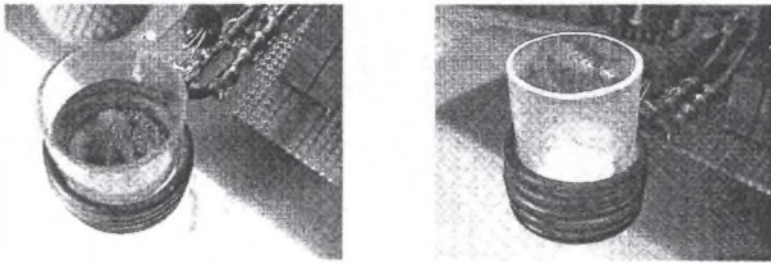
6.2. System indukcyjnego topienia proszków metali [5]

Przeznaczeniem systemu było topienie proszków metali, głównie miedzi, o granulacji 0.1 mm. W systemie zastosowano falownik klasy E 1 kW, 1 MHz. W falowniku użyto dwa tranzystory MOSFET typu IRFP360, chłodzone wodą. Konstrukcję systemu ilustrują fotografie z rys. 20.



Rys. 20. Widok systemu topienia proszków metali

Fig. 20. View of the system for melting metal powders



Rys.21. Wzbudnik oraz tygiel wraz z proszkiem miedziowym poniżej i powyżej temperatury topnienia ($\sim 1200^{\circ}\text{C}$)

Fig.21. Photographs of coil and crucible with copper powder below and above melting point ($\sim 1200^{\circ}\text{C}$)

Rys. 21 przedstawia cewkę wzbudnika i naczynie z topionym wsadem. Wsadem jest proszek miedziany. Widoczny jest proces nagrzewania proszku oraz stan uzyskany po jego stopieniu. Czas potrzebny do stopienia 10 g proszku wynosił około 10 s.

7. PODSUMOWANIE

W artykule zamieszczono: opis zasady działania falownika klasy E i jego podstawowych właściwości, wybrane wyniki eksperymentów laboratoryjnych oraz przykłady zastosowań.

Do zagadnień wymagających dalszych badań w ramach prac prowadzonych nad falownikami klasy E można zaliczyć:

- układy dopasowujące odbiornik do falownika,
- analizę ograniczeń w zakresie częstotliwości, sprawności i mocy falownika,
- strategie i konstrukcje sterowania,
- wszechstronne porównanie falownika klasy E z innymi falownikami rezonansowymi oraz
- nowe obszary zastosowań.

LITERATURA

1. Okress E. C., Wroughton D. M., Comenetz G., Brace P. H., Kelly J. C. R.: Electromagnetic levitation of solid and molten metals, *Journal of Applied Physics*, vol. 23, no. 5, May 1952, p. 545-552.
2. 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, p. 168-176.
3. Kazimierzczuk M. K., Czarkowski D.: *Resonant power converters*, Wiley & Sons, Inc., New York 1995.
4. Kaczmarczyk Z.: *Analiza energoelektronicznych falowników rezonansowych klasy E wysokiej częstotliwości*, praca doktorska, Pol. Śląska, Gliwice 1996.
5. Kaczmarczyk Z., Grzesik B., Junak J.: System indukcyjnego topienia proszków metali, IV Szkoła - Konferencja Elektrotechnika Prądu Niesinusoidalne, Zielona Góra 18-20 czerwca 1998, s. 192-201.

Praca była prezentowana w Fachhochschule, Trewir, Niemcy, 17 lipca 1998
Class E inverter - the example of a high-frequency converter

Recenzent: Dr hab. inż. Bogusław Grzesik, prof. Pol. Śl.

Wpłynęło do Redakcji 13 lipca 1999 r.

Abstract

The presentation of Class E inverter (Fig. 6) by means of relevant theory, results of simulations, results of laboratory measurements and exemplary applications are the subject of the paper. This inverter is of high importance in power electronics as it allows to obtain relatively high frequency of operation (>1 MHz), which in turn leads to reduction of size and weight and increasing of power density. Such high frequency is needed in contemporary technology where induction heating is the example (melting and hardening of small metal details).

In order to have complete characterisation of the Class E inverter it is necessary to see it together with inverters of Class D and DE which are given in Figs. 3 and 4.

The advantages of the Class E inverter are: soft-commutation (hence high efficiency), small weight and size, low level of EMI (Electromagnetic Interference) and simplicity of its topology (only one transistor).

Efficiency of the Class E inverter reaches the highest level at the optimum operation (maximum soft commutation - $ZV_{SON}+ZC_{SON}+ZV_{SOFF}+NZC_{SOFF}$), falls down at the suboptimum operation and goes further down at the non-optimum operation. All these modes of operation can be characterised in the space of parameters of the inverter. The example of such a space is presented in Fig. 7.

The paper delivers the results of measurements which have been carried out in three systems. The first one, having resistor and inductor as the load and called laboratory model, has the following parameters: $P=416$ W, $E=80$ V, $J=5.2$ A, $f=1$ MHz, $\eta=94.4\%$, 2xIRF740 - Fig. 9. The second system is the levitation system used for melting small metal pieces ($P=418.6$ W, $E=91$ V, $J=4.6$ A, $f=1.016$ MHz, $J_{W(RMS)}=148$ A, 2xIRF740) - Fig. 15. The last one is the induction system for melting metal powders ($P\approx 1$ kW, $f\approx 1$ MHz, 2xIRFP360) - Fig. 20.

Some problems which need to be studied in the area of Class E inverters are given in the conclusion. They are: matching circuits and devices, analysis of the upper limits of the frequency, power and efficiency of the inverter, control strategies, comparison of Class E inverter with other resonant topologies and other applications.