ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: ELEKTRYKA z. 198 Nr kol. 1709

Marcin KASPRZAK, Wojciech JURCZAK
Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki

FALOWNIK KLASY DE 8MHz/300W DO NAGRZEWANIA POJEMNOŚCIOWEGO

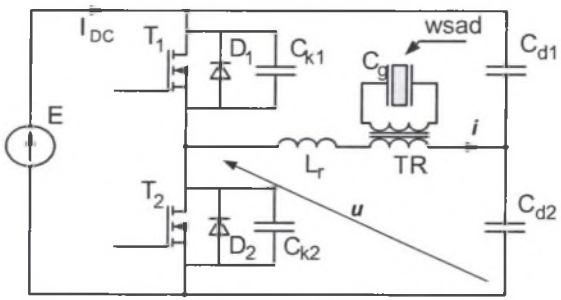
Streszczenie. Opisano falownik klasy DE o częstotliwości pracy 8 MHz/300 W wykorzystany jako zasilacz nagrzewnicy pojemnościowej. Omówiono elementy składowe nagrzewnicy: obwód główny falownika, transformator dopasowujący podwyższający napięcie o przekładni (1:7:9:10) oraz kondensator grzejny. Przeprowadzono próby nagrzewania kilku dielektryków oraz wykonano próbę przetopienia polimetakrylanu. Rejestrowano temperatury próbek podczas nagrzewania. W konkluzji potwierdzono pełną możliwość zastosowania falownika klasy DE w małogabarytowym systemie nagrzewania pojemnościowego.

CLASS DE 8MHz/300W INVERTER FOR DIELECTRIC HEATING APPLICATIONS

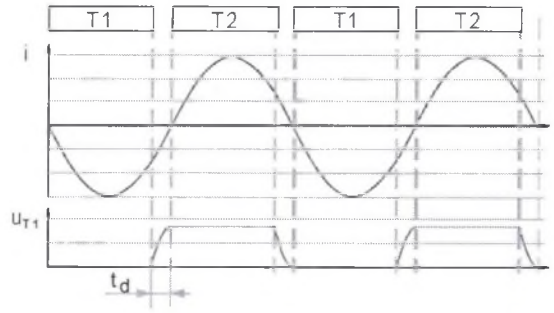
Summary. The paper contains the description of a class DE 8MHz/300W inverter used as a part of dielectric heating system. The system components: inverter power board, HF push up matching transformer (turn-to-turn ratio 1:7:9:10) and heating capacitor are described. The inverter is based on DE375-102N12A Mosfet transistors and a DEIC420 ultra fast driver. The results of heating, melting and cooling Plexiglas are given. The heating sample temperature was measured during heating experiments. In conclusion, it can be started that the class DE inverter is suitable for dielectric heating systems.

1. WPROWADZENIE

Tematyka artykułu związana jest z prowadzonymi w Katedrze Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki pracami związanymi z tranzystorowymi przekształtnikami wielkich częstotliwości w zakresie do kilkunastu MHz. Zamieszczone wyniki są rezultatem badań wstępnych mających na celu doprowadzić do kompleksowego zbadania, a następnie skonstruowania małogabarytowej nagrzewnicy pojemnościowej z falownikiem klasy DE lub E z przeznaczeniem do badań materiałów polimerowych. Chociaż systemy nagrzewania pojemnościowego istnieją i są stosowane [5], to zdecydowanie brakuje opracowań dotyczących strony energoelektronicznej takich systemów (generator tranzystorowy, transformator).



Rys. 1. Model falownika klasy DE
Fig. 1. Model of class DE inverter



Rys. 2. Przebiegi napięcia i prądu wyjściowego falownika w warunkach komutacji optymalnej
Fig. 2. Waveforms of inverter output voltage and current in optimal commutation mode

2. ELEMENTY NAGRZEWNICY POJEMNOŚCIOWEJ

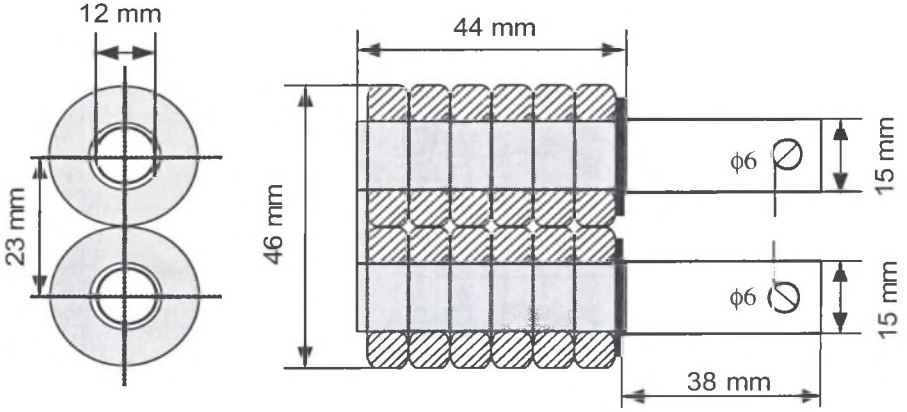
Na rys. 1a zamieszczono model nagrzewnicy pojemnościowej z falownikiem klasy DE o topologii półmostka i pojemnościowym dzielnikiem napięcia zasilania. Przedmiotowy falownik jest szeroko opisywany w literaturze, np. [1-4] i był obiektem szczegółowych badań autora w zastosowaniu do nagrzewania indukcyjnego. Na rys. 1b zamieszczono przebiegi napięcia oraz prądu wyjściowego (u, i) ilustrujące działanie falownika w warunkach pracy optymalnej. Falownik klasy DE wymaga wprowadzenia czasu martwego t_d w sterowaniu tranzystorów. Czas ten jest konieczny do przeładowania pojemności komutacyjnych (zaworowych) i uzyskania komutacji maksymalnie miękkiej (praca optymalna). Wyłączenie tranzystora odbywa się wtedy w warunkach ZVS+NZCS, a załączenie w warunkach ZVS+ZCS. Takie sterowanie minimalizuje straty przełączania oraz umożliwia pracę z częstotliwością kilkunastu MHz.

Na rys. 1a można wyróżnić następujące elementy nagrzewnicy pojemnościowej:

T_1, T_2 - tranzystory Mosfet DE375-102N12A, prod. Directed Energy [9, 10],
D_1, D_2 - diody zwrotne tranzystorów Mosfet,
C_k - pojemności komutacyjne, wykorzystano pojemność wyjściową tranzystora MOSFET (C_{DS} =150 pF),
L_r - cewka obwodu rezonansowego, L_r = 533,7 nH,
TR - transformator dopasowujący,
C_g - kondensator grzewczy,
C_{d1}, C_{d2} - pojemnościowy dzielnik napięcia zasilania, C_{d1}=C_{d2} =4,9 μF.

2.1. Transformator dopasowujący TR

Zadaniem transformatora TR było dopasowanie pojemności kondensatora grzewczego (Cg ≈ 12 pF) do wymaganej pojemności obwodu rezonansowego (ok. 800 pF) widzianej ze strony pierwotnej transformatora Td. Wzorując się na publikacjach [6, 7, 8] zdecydowano się zbudować podwyższający transformator współosiowy o konstrukcji i wymiarach przedstawionych na rys. 2. Zastosowano 12 toroidalnych rdzeni ferrytowych TN23/14/7 z materiału magnetycznego 4C65 (Ferroxcube). Uzwojenie pierwotne stanowi rurka miedziana, wewnątrz której nawinięto uzwojenie wtórne. Liczba zwoi uzwojenia wtórnego była indywidualnie dobierana w zależności od pojemności kondensatora grzejnego Cg i zawierała się w przedziale 7-10.



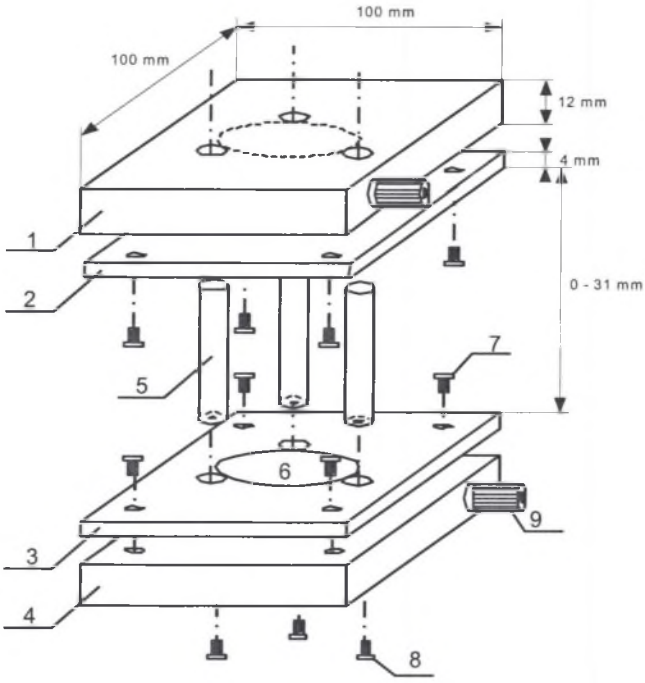
Rys. 3. Konstrukcja i wymiary transformatora dopasowującego TR
Fig. 3. Matching transformer TR - construction and dimensions

2.2. Kondensator grzewczy

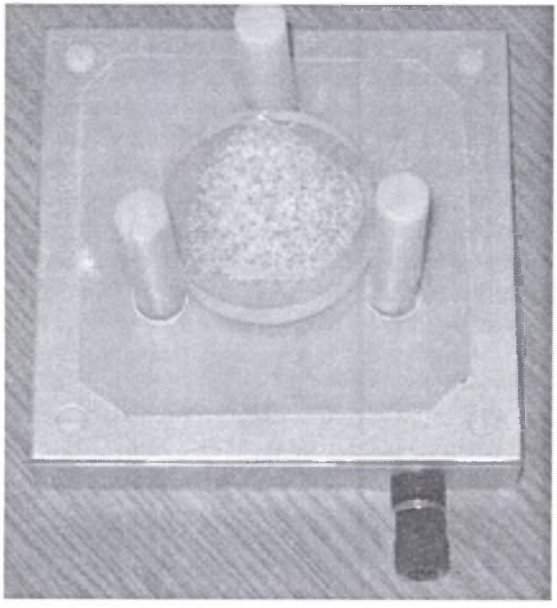
Kondensator grzewczy stanowi element nagrzewnicy pojemnościowej, w którym umieszcza się nagrzewany wsad. Kształt kondensatora grzewczego, jego wymiary i budowa zależą od rodzaju i kształtu wsadu oraz od przebiegu procesu technologicznego. W tym przypadku zbudowano kondensator grzewczy (rys. 4 i rys. 5) z okrągłymi okładzinami o średnicy d=45 mm. Dopuszczalna grubość walcowych próbek wynosi 20 mm.

Dodatkowo na rys. 4 została przedstawiona konstrukcja kondensatora grzewczego, przy której wyróżnić można następujące elementy składowe kondensatora:

1,4 - górna i dolna podstawa okładziny kondensatora wykonana z tekstolitu,
2,3 - płytki tekstolitowe z naklejonymi okładzinami kondensatora,
5 - kołki prowadzące,
6 - okładziny kondensatora z folii miedzianej (średnica d=45 mm, grubość g=0.1 mm),
7,8 - plastykowe śruby mocujące M3.



Rys. 4. Konstrukcja i wymiary kondensatora grzewczego
Fig. 4. Heating capacitor – construction and dimensions



Rys. 5. Zdjęcie jednej z okładek kondensatora wraz z nadtopioną próbką pleksiglasową
Fig. 5. Heating capacitor plate with semi-melted Plexiglas sample

3. WYNIKI POMIARÓW NAGRZEWANIA DIELEKTRYKÓW

Do prób nagrzewania pojemnościowego wykorzystano następujące próbki:

a) próbka tekstolitowa 1 - d=45 mm, g=8 mm
b) próbka bakelitowa - d=45 mm, g=12 mm
c) próbka pleksiglas - d=45 mm, g=8 mm
d) próbka tekstolitowa 2 - d=45 mm, g=12 mm

Kondensator grzewczy wraz z nagrzewaną próbką wymagał indywidualnego dopasowania do falownika klasy DE. Pojemność Cg kondensatora wraz z próbką mierzono za pomocą analizatora impedancji Agilent 4294A. Istotna była wartość pojemności Cg dla częstotliwości 8 MHz jako częstotliwości pracy badanej nagrzewnicy. Wstępnego doboru przekładni dokonywano przy założeniu, że pojemność Cg transformuje się z kwadratem przekładni. Kolejnym krokiem była weryfikacja pomiarowa pojemności zastępczej Cr widzianej ze strony pierwotnej transformatora TR i ewentualna korekta przekładni. Celem było uzyskanie zastępczej pojemności Cr ≈800 pF. Przykłady dopasowania dla czterech próbek zamieszczono w tabeli 1.

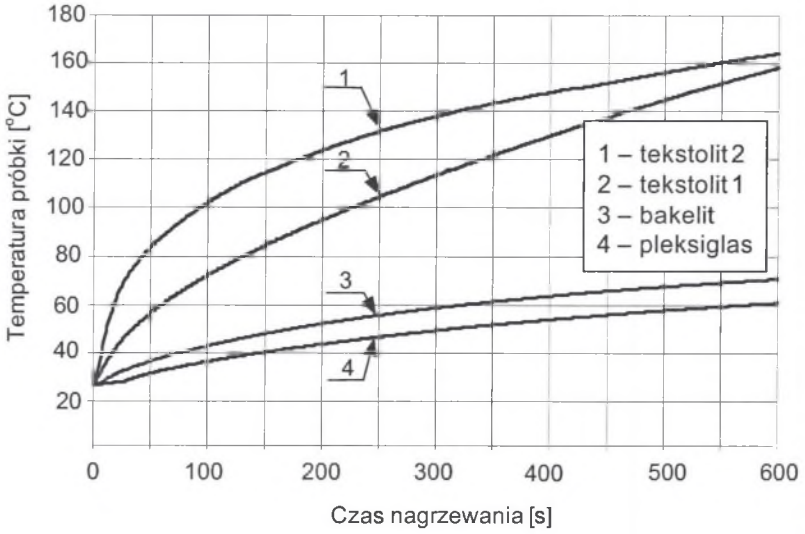
Tabela 1

Dopasowania pojemności Cg kondensatora grzewczego do falownika

Rodzaj próbki	**Cg**	**Przekładnia transformatora**	**Cr**	**Optymalna częstotliwość pracy**
[-]	[pF]	[-]	[pF]	[MHz]
Tekstolit	11	1:9	890	7,55
Bakelit	8,1	1:10	797	8
Pleksiglas	7,3	1:10	860	7,8
Tekstolit 2	16	1:7	840	7,7

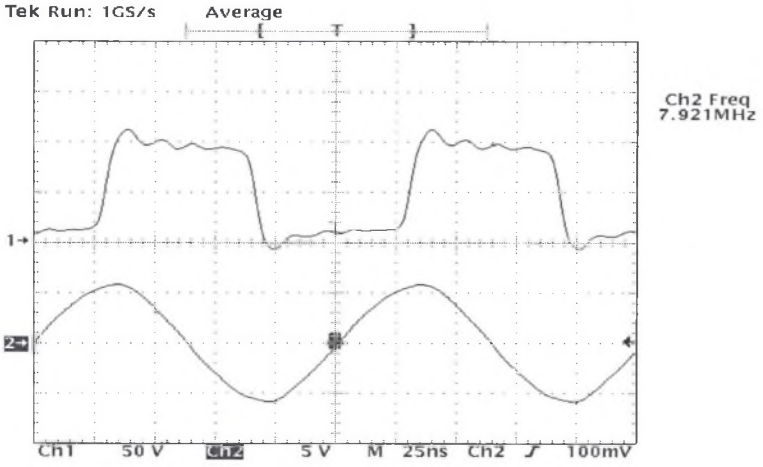
Falownik był zestrajany do pracy optymalnej a regulacja mocy falownika odbywała się metodą amplitudową, czyli poprzez zmianę napięcia zasilania E falownika. Na rys. 6 zamieszczono przebiegi temperatury podczas nagrzewania badanych próbek. Termopara typu K została umieszczona centralnie w nagrzewanej próbce. Wykorzystano dedykowany system do pomiaru i rejestracji temperatur firmy National Instrument. Wszystkie 4 pomiary zostały wykonane przy jednakowej wartości mocy wejściowej falownika P_{DC}=60 W (moc na szynie DC).

Natomiast na rys. 7 przedstawiono oscylogramy prądu i napięcia podczas nagrzewania próbki pleksiglasu (4). W pomiarach wykorzystano oscyloskop cyfrowy Tektronix TDS620B z dedykowanymi sondami: P6139A (napięciowa) oraz P6022AC (prądowa).



Rys. 6. Porównanie czasów nagrzewania badanych próbek dla mocy wejściowej falownika; P_{DC}=60 W, E=100 V, I_{DC} = 0,6 A

Fig. 6. Comparison of sample heating times for inverter input power P_{DC}=60 W, E=100 V, I_{DC} = 0,6 A



kanał 1: u – 50 V/dz, kanał 2: i – 5 A/dz.

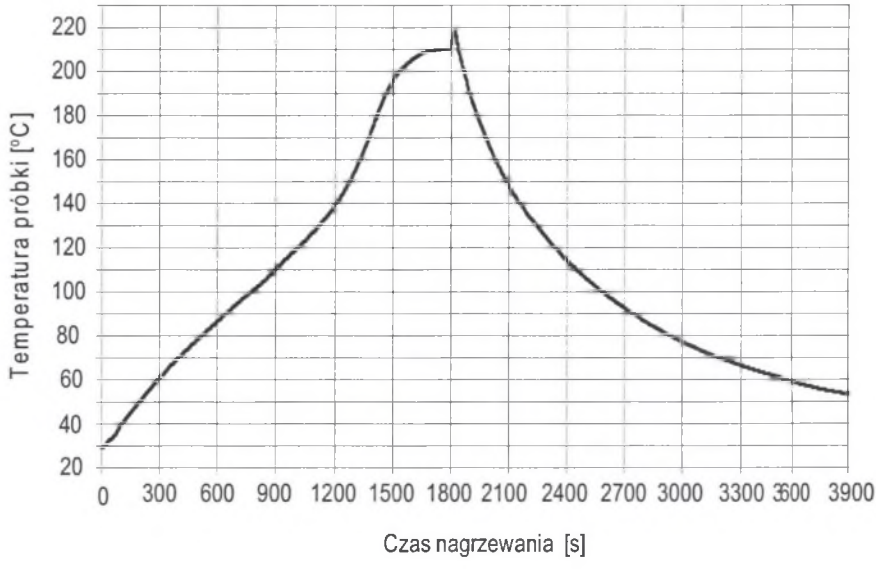
Rys. 7. Przebieg napięcia tranzystora u oraz prądu obwodu rezonansowego i podczas próby nagrzewania próbki pleksiglasu

Fig. 7. Waveforms of transistor voltage u and resonant circuit current i during dielectric heating of Plexiglas sample

Przeprowadzono również próbę przetopienia pleksiglasu (d=45 mm, g=8 mm) przy mocy wejściowej falownika P_{DC}=115 W. Na rys. 8 zamieszczono zarejestrowany przebieg temperatury. Na krzywej nagrzewania można wyróżnić strefę uplastycznienia materiału przy

temperaturze powyżej 120°C. Objawiło się to wzrostem stratność dielektryka, a w konsekwencji wzrostem mocy dostarczanej do wsadu i wzrostem szybkości nagrzewania.

Topienie pleksiglasu rozpoczęło się przy temperaturze 210°C. Świadczy otym chwilowy brak przyrostu temperatury związany z koniecznością dostarczenia dodatkowego ciepła reakcji.



Rys. 8. Nagrzewania i przetopienie i chodzenie próbki pleksiglasowej; P_{DC}=115 W, E=120 V, I_{DC}=0,96 A

Fig. 8. Heating, melting and cooling of Plexiglas sample; P_{DC}=115 W, E=120 V, I_{DC}=0,96 A

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule zamieszczono opis zastosowania falownika klasy DE, który pracował w nagrzewnicy pojemnościowej 8 MHz. Z wykonanych badań wynikają następujące wnioski:

- Falownik klasy DE może być z powodzeniem stosowany w małogabarytowych nagrzewnicach pojemnościowych. W celu zapewnienia komutacji optymalnej, falownik powinien pracować z pętlą PLL ze względna na zmienność parametrów odbiornika pojemnościowego w trakcie nagrzewania.
- Zastosowane tranzystory Mosfet serii DE375-102N12A z dedykowanym wyzwalaczem scalonym DEIC420 gwarantują poprawną pracę falownika klasy DE upraszczając w znaczny sposób jego konstrukcję.
- W celu dopasowania kondensatora grzewczego Cg do falownika, konieczne jest stosowanie transformatora dopasowującego TR podwyższającego napięcie. Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że transformator ten jest newralgicznym elementem systemu. W tym przypadku decydującymi są: odpowiedni dobór rdzenia, materiału nawojowego oraz konstrukcja zapewniająca maksymalne sprzężenie.

- Jak wynika z rozeznania autora, istnieje zapotrzebowanie na małogabarytowe systemy laboratoryjne do badań materiałów polimerowych. Przeprowadzone badania dają podwaliny pod opracowanie takiego systemu.

LITERATURA

1. Koizumi H., Suetsugu T., Fuji M., Shinoda K., Mori S., Iked K.: *Class DE High-Efficiency Tuned Power Amplifier, IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Fundamental Theory and Application*, vol. 43, no. 1, Janauary 1996, pp. 51-60.
2. Koizumi H., Iwadare M., Mori S., Ikeda K., "*A class D type high frequency tuned power amplifier with Class E switching conditions*," Int. Symp. on Circuits and Systems, vol. 5, pp. 105-108, London, June 1994.
3. Shinoda K., Suetsugu T., Matsuo M., Mori S.: *Idealized Operation of Class DE Amplifier and Frequency Multipliers, IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Fundamental Theory and Application*, vol. 45, no. 1, January 1998, pp. 34-40.
4. Ian Douglas de Vries: *High Power and High Frequency Class-DE Inverters, phd thesis*, University of Cape Town, August 1999.
5. Nagrzewanie indukcyjne i pojemnościowe – *poradnik, WNT, Warszawa 1970*, tłumaczenie z języka rosyjskiego.
6. The ARRL *Handbook 2004 for radio communications.*
7. Cogitore B., Keradec J.P., Barbaroux J.: *The Two Winding Transformer: An experimental method to obtain a Wide Frequency Range Equivalent Circuit.*: 1994.
8. Hay Ian Lu, Jian Guo Zhu, Ron Hui: *Experimental Determination of Stray Captaincies in High Frequency Transformers.*
9. EVIC420 – DEIC420 *High Frequency gate Driver IC Evaluation Board*, Directed Energy, Inc., An IXIS Company, 2002, Nota Aplikacyjna
10. DE 375-501N21A - RF Power MOSFET, IXIS Company, 2003, *Nota Aplikacyjna*

Praca finansowana z projektu badawczego KBN Nr 3 T10A 021 28, 2005/2006

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 listopada 2005 r.

Recenzent: Prof. dr hab.inż. Tadeusz Citko