

Marcin KASPRZAK

Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej

## FALOWNIK REZONANSOWY KLASY DE 8 MHz Z DRAJWEREM SINUSOIDALNYM

**Streszczenie.** W artykule opisano falownik klasy DE z wyzwaniem sinusoidalnym tranzystorów Mosfet. Wyzwalacz jest falownikiem rezonansowym klasy D, który napięciem sinusoidalnym zasila dwa transformatory bramkowe. Falownik klasy DE 8 MHz/200 W zbudowano opierając się na tranzystorze Mosfet IRF740LC o obniżonym ładunku. W falowniku klasy D wyzwalacza wykorzystano scalony sterownik DEIC420. Artykuł zawiera schemat przekształtnika, wyniki pomiarów laboratoryjnych oraz wyniki symulacji komputerowych (SPICE). Uzyskano stan pracy optymalnej i sprawność 88%. Pozytywne wyniki pozwolą opracować falownik o mocy ok. 1 kW/16 MHz z tranzystorami Mosfet do zastosowań RF.

## CLASS DE, 8 MHz RESONANT INVERTER WITH SINUSOIDAL GATE DRIVER OF MOSFET

**Summary.** The work concerns the Class DE resonant inverter with the sinusoidal gate driver of Mosfet's. The sinusoidal driver bases on Class D inverter supplying two gate drive transformers. The class DE 8 MHz/200 W inverter bases on IRF740LC low charge Mosfets. Class D driving inverter bases on solid RF driver DEIC420 type. The Paper contain schema of the inverter, laboratory measurements and SPICE simulation results. In the optimum commutation mode the 88% efficiency of inverter was obtained. Positive results of laboratory measurements allows to design a similar 1 kW/16 MHz inverter based on RF dedicated Mosfet.

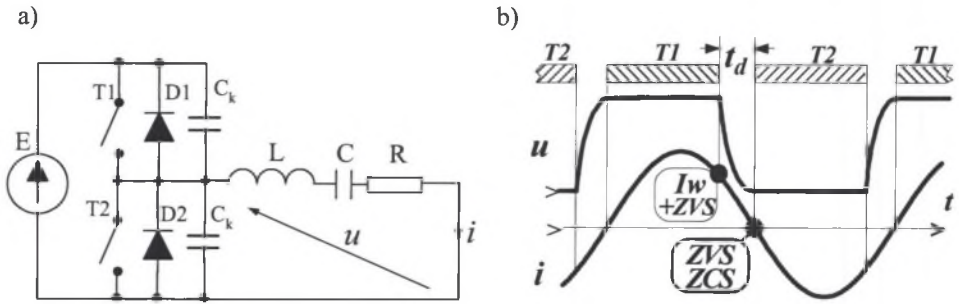
### 1. WPROWADZENIE

Tematyka artykułu związana jest z prowadzonymi w Zakładzie Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki pracami związanymi z tranzystorowymi przekształtnikami wielkich częstotliwości w zakresie do kilkunastu MHz z przeznaczeniem do nagrzewania indukcyjnego bądź nagrzewania pojemnościowego. Realizowane w Instytucie prace doprowadziły do podwyższania częstotliwości wyjściowych kolejno opracowywanych przekształtników klasy DE oraz E, [6, 7, 8].

Artykuł poświęcony jest falownikowi klasy DE o częstotliwości pracy 8 MHz z drajwerem sinusoidalnym do tranzystorów Mosfet w układzie półmostka.

Celem prowadzonych badań jest ostateczne skonstruowanie falownika klasy DE z wyzwaniem sinusoidalnym o częstotliwość pracy ok. 16 MHz i mocy do 1 kW. Zdobyte doświadczenia pozwolą na opracowanie zasad projektowania falowników klasy DE z wyzwaniem sinusoidalnym, ich analizy oraz syntezy.

## 2. IDEA STEROWANIA SINUSOIDALNEGO

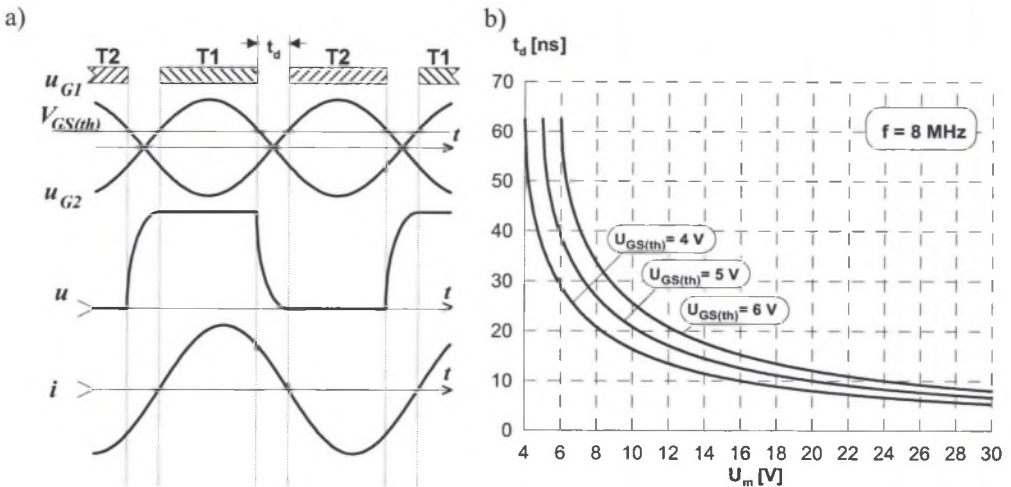


Rys. 1. a) Model falownika rezonansowego klasy DE; b) przebiegi napięcia i prądu wyjściowego w warunkach komutacji optymalnej

Fig. 1. a) Model of Class DE resonant inverter; b) waveforms of the inverter output voltage  $u$  and current  $i$  in optimal commutations condition

Schemat falownika klasy DE zamieszczono na rys. 1a. Pracuje on z komutacją miękką, ideę której objaśniono na rys. 1b na przykładzie tranzystora  $T1$ . Załączanie realizowane jest jako ZVS+ZCS, natomiast wyłączenie ZVS+NZCS.

W klasycznym rozwiązaniu sterowanie falownika klasy DE wymaga zastosowania dwóch wyzwalaczy (driver): jednego na dolnym ( $T2$ ), a drugiego na górnym potencjale ( $T1$ ). Wiąże się to najczęściej z koniecznością stosowania dwóch zasilaczy, co komplikuje i podraża układ. Ponadto sterowanie tranzystora na górnym potencjale i przy wysokich częstotliwościach sprawia najwięcej kłopotu, ze względu na konieczność stosowania separacji galwanicznej drajwera górnego względem układu sterowania. Sterowanie sinusoidalne wydaje się więc rozwiązaniem prostym.



Rys. 2. a) Idea sterowania sinusoidalnego falownika klasy DE; b) charakterystyki sterowania czasem martwym  $t_d$  w funkcji amplitudy  $U_m$  napięcia bramkowego

Fig. 2. a) Principles of sinusoidal gate drive of Class DE inverter; b) characteristics of dead time  $t_d$  control as a function of amplitude  $U_m$  of gate voltage

Ideę sterowania sinusoidalnego tranzystorów MOSFET falownika klasy DE zaczerpnięto z pracy [9], gdzie w drajwerze sinusoidalnym zastosowano falownik klasy E. W opisanym rozwiązaniu zamiast falownika klasy E w obwodzie rezonansowym drajwera wykorzystano falownik klasy D. Autor artykułu zastosował wcześniej taki sposób sterowania do falownika klasy DE o częstotliwości pracy 1 MHz [7].

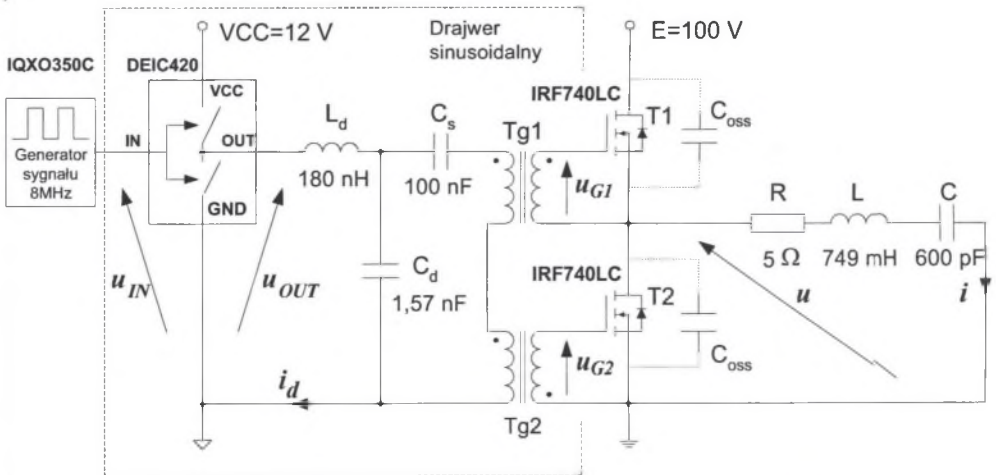
Idea sterowania (rys. 2a) polega na zastosowaniu dwóch sinusoidalnych napięć bramkowych będących w przeciwfazie. Istnienie napięcia progowego (*Gate Threshold Voltage*,  $V_{GS(th)}$ ) w tranzystorze MOSFET pozwala na sterowanie czasem martwym  $t_d$  poprzez zmianę amplitudy sinusoidalnych napięć bramkowych  $u_{G1}$  oraz  $u_{G2}$ .

Na rys. 2b zamieszczono charakterystyki sterowania czasem martwym  $t_d$  w funkcji amplitudy  $U_m$  napięcia bramkowego, przy częstotliwości 8 MHz dla trzech wartości napięć progowych  $V_{GS(th)}=(4, 5, 6)$  V. Poprzez zmianę napięcia bramkowego istnieje więc możliwość dokładnego dostrojenia falownika klasy DE do pracy w warunkach komutacji optymalnej.

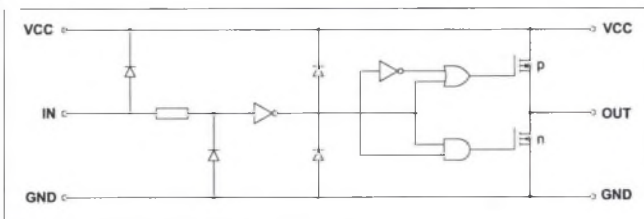
### 3. ROZWIĄZANIE PRAKTYCZNE FALOWNIKA KLASY DE

Projekt i realizację falownika klasy DE z drajwerem sinusoidalnym wykonano zgodnie z rys. 3. Zasadniczy układ falownika DE stanowią tranzystory T1 i T2 oraz szeregowy obwód RLC, którego częstotliwość rezonansowa wynosi  $f_0=7,51$  MHz.

a)



b)



Rys. 3. a) Schemat ideowy falownika klasy DE z drajwerem sinusoidalnym; b) drajwer DEIC420  
Fig. 3. a) Schematic diagram of the Class DE inverter with sinusoidal gate driver; b) driver DEIC420

Generator sinusoidalnych napięć bramkowych (driver) zbudowano na bazie falownika klasy D. Składa się on ze scalonego generatora sygnału sterującego 8 MHz, wysokoczęstotliwościowego scalonego sterownika DEIC 420 [10, 11], obwodu rezonansowego ( $L_d$ ,  $C_d$ ), kondensatora separującego  $C_s$  oraz dwóch transformatorów bramkowych Tg1 i Tg2. Transformatory nawinięto na rdzeniu pierścieniowym TN23/14/7 z materiału 4C65, przekładnia 3:1. Innym możliwym rozwiązaniem jest zastosowanie jednego transformatora bramkowego z dwoma uzwojeniami wtórnymi.

W draywerze i falowniku zastosowano wysokonapięciowe kondensatory ceramiczne ( $C_s$ ,  $C_d$ ,  $C$ ).

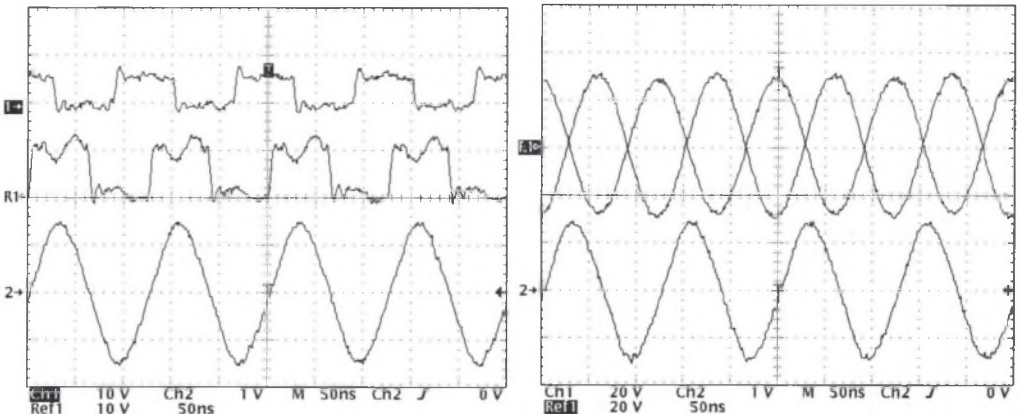
#### 4. WYNIKI POMIARÓW LABORATORYJNYCH

Przeprowadzono badania laboratoryjne falownika przy mocy wyjściowej w zakresie ok. (50-200) W. Jako obciążenie zastosowano bezindukcyjne oporniki w obudowach TO-220 o łącznej rezystancji  $R=5 \Omega$  lub  $7.5 \Omega$ . Rezystancja pojedynczego rezystora wynosiła  $R_i=1 \Omega$ . Tranzystory T1/T2, sterownik DEIC420 oraz rezystory odbiornika umieszczono na radiatorach chłodzonych wodą. W prezentowanym rozwiązaniu ograniczenie mocy wyjściowej do ok. 200 W wynika z dopuszczalnej mocy odbiornika.

Na rys. 4 zamieszczono przebiegi napięć i prądów wyzwalacza sinusoidalnego podczas wstępnego dostrajania. Transformatory bramkowe obciążone były pojemnością zastępczą  $C_{zast}=3,3 \text{ nF}$  (zamiast obwodu bramkowego tranzystorów T1/T2). Wyniki uzyskano przy następujących parametrach zasilania wyzwalacza:  $V_{CC}=12 \text{ V}$ ,  $I_{VCC}=1,75 \text{ A}$ . Prąd skuteczny obwodu rezonansowego wyzwalacza  $I_{d(RMS)}=1,95 \text{ A}$

Na rys. 5a zamieszczono przebiegi napięcia i prądu wyjściowego falownika oraz zespół napięć bramkowych  $u_{G1}$ ,  $u_{G2}$ . Wyniki uzyskano przy następujących parametrach zasilania:  $E=50 \text{ V}$ , prąd zasilania  $I_{DC}=1,32 \text{ A}$ , prąd skuteczny odbiornika  $I_{(RMS)}=3,2 \text{ A}$ . Moc zasilania  $P_{IN}=E \cdot I_{DC} = 66 \text{ W}$ , moc odbiornika  $P=55,7 \text{ W}$ , sprawność falownika  $\eta=84\%$ .

Na oscylogramach z rys. 5a widoczne jest odkształcenie napięć bramkowych. Falownik pracuje w warunkach zbliżonych do komutacji optymalnej.



$u_{IN}$  - napięcie sterujące (8 MHz), 10 V/dz.  
 $u_{OUT}$  - napięcie wyjściowe sterown. 10 V/dz.  
 $i_d$  - prąd obwodu rezonansowego, 2 A/dz.

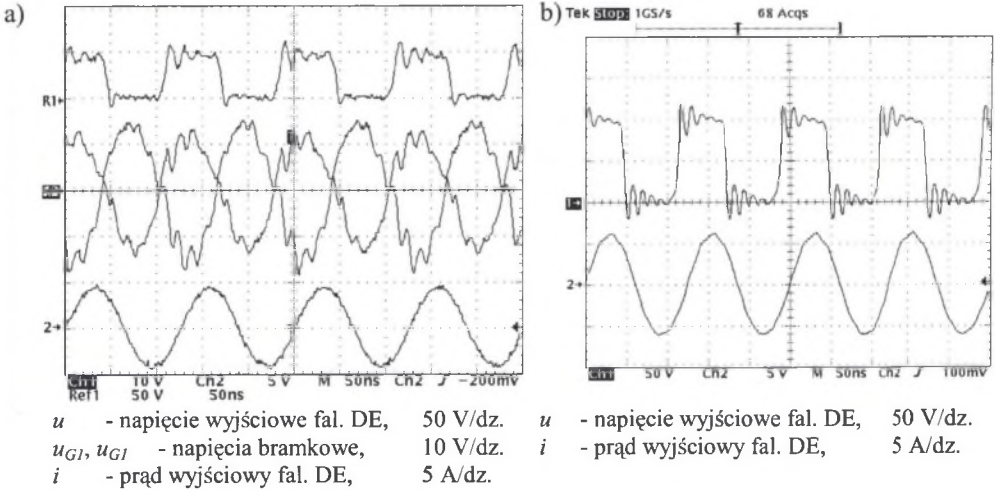
$u_{G1}, u_{G2}$  - napięcia bramkowe, 20 V/dz.  
 $i_d$  - prąd obwodu rezonansowego, 2 A/dz.

Rys. 4. Przebiegi napięć i prądów wyzwalacza sinusoidalnego. Transformatory bramkowe Tg1 i Tg2 obciążone pojemnością 3,3 nF

Fig. 4. Waveforms of sinusoidal gate driver. Gate driver transformers loaded 3,3nF capacitance

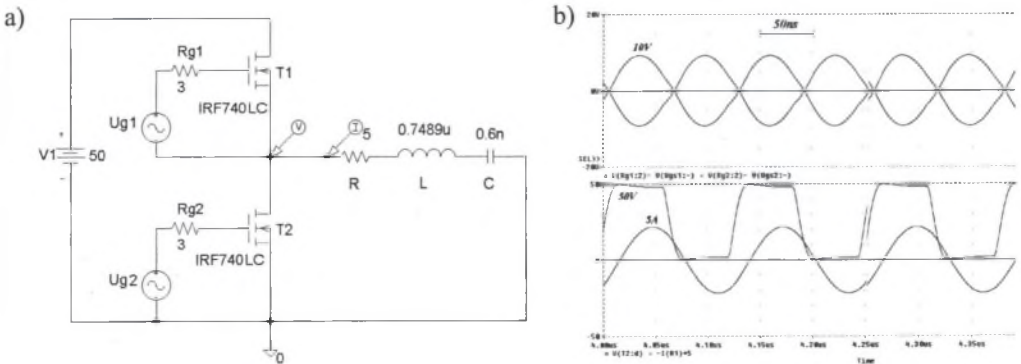
Przeprowadzono również pomiary przy wyższym napięciu zasilania:  $E=100$  V, prąd zasilania  $I_{DC}=1,9$  A, prąd skuteczny odbiornika  $I_{(RMS)}=4,6$  A. Moc zasilania  $P_{IN}=E \cdot I_{DC} = 190$  W, moc odbiornika  $P=167,2$  W, sprawność falownika  $\eta=88\%$ .

W ramach badań przeprowadzono symulacje komputerowe falownika DE (Spice) w oparciu o modele biblioteczne tranzystora IRF740LC, a przykładowe wyniki zamieszczono na rys. 6.



Rys. 5. Przebiegi napięć i prądów falownika DE z wyzwalaczem sinusoidalnym,  $f=8$  MHz

Fig. 5. Waveforms of Class DE inverter with sinusoidal gate driver,  $f=8$  MHz



Rys. 6. Wyniki symulacji falownika klasy DE w programie Spice: a) model falownika; b) przebiegi, kolejno: napięcie  $u_{G1}$  i  $u_{G2}$  oraz napięcia i prądu wyjściowego

Fig. 6. Results of simulation of Class DE inverter (Spice Software): a) model of the inverter; b) waveforms of: gate voltages  $u_{G1}, u_{G2}$  and inverter output voltage and current

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule zamieszczono opis oraz wybrane wyniki pomiarów falownika klasy DE 8 MHz / 200 W. Poprawność idei sterowania sinusoidalnego sprawdzono w warunkach laboratoryjnych. Najważniejsze wnioski są następujące:

- Badania układu przeprowadzono wykorzystując popularne i tanie tranzystory IRF740LC (o obniżonym ładunku). Uzyskane pozytywne wyniki oraz doświadczenia pozwalają na bezpieczne zastosowanie w falowniku tranzystorów serii DE 375-501N21A (500 V / 21 A) o czasach przełączania kilku ns [12]. Pozwoli to na podwyższenie częstotliwości do ok. 16 MHz oraz mocy wyjściowej do ok. 1 kW.
- Potwierdzono możliwość wykorzystania sterownika scalonego DEIC420 [11] do kluczowania szeregowego obwodu rezonansowego drajwera sinusoidalnego.
- Dla poprawnej pracy układu istotne jest prawidłowe zestrojenie obwodu rezonansowego drajwera. Przy ustalonej wartości napięcia VCC, regulacja napięcia bramkowego odbywa się np. poprzez zmianę indukcyjności obwodu rezonansowego wyzwalacza.
- Sterowanie sinusoidalne z transformatorami bramkowymi jest rozwiązaniem prostym, ale układ wymaga precyzyjnego zestrojenia.

## LITERATURA

1. Koizumi H., Suetsugu T., Fuji M., Shinoda K., Mori S., Ikeda K.: *Class DE High-Efficiency Tuned Power Amplifier*, IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Fundamental Theory and Application, vol. 43, no. 1, January 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. Hamill D.C.: *Impedance plane analysis of class DE amplifier*. Electronics Letters, Vol 30, No. 23, 10<sup>th</sup> November 1994.
5. Kazimierczuk M. K., Czarkowski D.: *Resonant power converters*, John Wiley & Sons, USA 1995.
6. Grzesik B., Kaczmarczyk Z., Kasprzak M.: *Wybrane właściwości rezonansowego falownika klasy DE w warunkach komutacji optymalnej*, IV Konferencja "Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE'99", Pol. Łódźka, Łódź -Arturówek 17-19 listopada 1999, tom I, pp.223-228.
7. Grzesik B., Kaczmarczyk Z., Kasprzak M.: *1MHz Sinusoidal Gate Driver for Class DE Inverter Operating with Variable Load and Frequency*, 31st IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC'00, Galway (Ireland), June 2000, pp. 817-822.
8. Kasprzak M.: *Class DE, 2MHz/500W Frequency Multiplier*, 14<sup>th</sup> International Conference on Electrical Drives and Power Electronics EDPE 2001, 3-5 October 2001, the High Tatras, Slovakia, pp. 250-255.
9. El-Hamamsy S.: *Design of High-Efficiency RF Class-D Power Amplifier*, IEEE Transactions of Power Electronics, vol. 9, no. 3, May 1994, pp. 297-308.
10. *DEIC420 – 20 Ampere Low-Side Ultrafast RF MOSFET Driver* – Directed Energy, Inc., An IXIS Company, 2001, Nota Aplikacyjna.
11. *EVIC420 – DEIC420 High Frequency gate Driver IC Evaluation Board*, Directed Energy, Inc., An IXIS Company, 2002, Nota Aplikacyjna.
12. *DE 375-501N21A - RF Power MOSFET*, IXIS Company, 2003, Nota Aplikacyjna.

*Pracę wykonano w ramach projektu finansowanego przez KBN nr 4 T10A 065 24, 2003/04.*

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Citko

Wpłynęło do Redakcji: 21 kwietnia 2004 r.