ELEKTRYKA 2013
Zeszyt 1 (225) Rok LIX

Marcin KASPRZAK
Politechnika Śląska w Gliwicach

MOŻLIWOŚCI REALIZACJI FALOWNIKA KLASY DE 13,56 MHZ 500 W PRZY PRACY OPTYMALNEJ

Streszczenie. W artykule zamieszczono analizę możliwości realizacji falownika klasy DE 13,56MHz/500 W. Założono zasilanie napięciem 300 V DC, stan pracy optymalnej oraz zastosowanie najnowszych tranzystorów serii RF Power Mosfet. Omówiono stan aktualny tematyki falowników klasy DE. Opisano charakterystyki granicznych parametrów realizacji komutacji optymalnej. Zestawiono typy i parametry najnowszych RF Power Mosfet. Opisano procedurę oceny wartości pojemności dren-źródło i uzyskane wyniki. W konkluzji stwierdzono, że realizacja przedmiotowego falownika jest możliwa, gdy pojemność dren-źródło jest mniejsza niż 150 pF.

Słowa kluczowe: falownik klasy DE, przełączanie miękkie, wielka częstotliwość, MOSFET, driver

THE POSSIBILITY OF REALIZATION OF 13.56 MHZ/500 W CLASS DE INVERTER AT OPTIMUM COMMUTATION MODE

Summary. The possibility of realization of 13.56 MHz/500 W inverter at optimum commutation mode is presented in the paper. The 300 V DC power supply, optimum commutation mode and utility of the latest RF Power Mosfet are assumed. The actual class DE inverter literature state is discussed. Characteristics of limited values of inverter parameters ensures optimal commutation mode are described. Types and parameters of latest RF Power Mosfet are presented in the table. Procedure of evaluation of drain to source capacitance and it results are presented too. The conclusion is, that realization of the inverter is possible only if drain to source capacitance is lover than 150 pF.

Keywords: Class DE inverter, soft switching, high frequency, MOSFET, driver

1. WSTĘP

Artykuł dotyczy falownika rezonansowego klasy DE pracującego w warunkach komutacji optymalnej z częstotliwością 13,56 MHz, a w szczególności możliwości i ograniczeń jego realizacji przy wykorzystaniu najnowszych, dedykowanych tranzystorów Mosfet. Częstotliwość pracy falownika należy do pasma radiowego ISM (The Industrial, Scientific and Medical).

Falowniki pracujące z częstotliwością 13,56 MHz przy mocy kilkuset watów znajdują zastosowanie np. w nagrzewnicach indukcyjnych lub pojemnościowych.

Problematyce falowników klasy DE poświęconych jest wiele artykułów, które można pogrupować chronologicznie i tematycznie jak przedstawiono poniżej.

Artykuły z lat 1980-90, głównie naukowców Japońskich (Koizumi, Shinoda, Mori, Ikeda), dotyczą podstaw teoretycznych falownika klasy DE przy upraszczającym założeniu sinusoidalnego prądu szeregowego odbiornika *RLC* (duża wartość dobroci *Q* odbiornika), częstotliwościach ok. 1 MHz, napięciu zasilania ok. 20-30V i mocach kilku watów [1, 2]. Falowniki takie są proste w konstrukcji mając prosty obwód główny i proste sterowanie, które może zostać zrealizowane bez separacji galwanicznej w torze sterowania górnego tranzystora.

Artykuły z lat 2000-2010 poświęcone są metodom sterowania falowników klasy DE [3] oraz ich zastosowaniu w przekształtnikach DC/DC [4]. Analizy podstawowego falownika są bardziej złożone, uwzględniają skończoną wartość dobroci *Q* odbiornika i często biorą pod uwagę nieliniowość pojemności wyjściowej tranzystorów Mosfet (Sekiya, Kazimierczuk) [5], [6]. Częstotliwości opisywanych falowników mieściły się w zakresie 1-5 MHz, napięcia zasilania to ok. 20-30V, a moce nie przekraczały kilkunastu watów.

Osobna grupa artykułów dotyczy scalonych wzmacniaczy klasy D i DE najwyższych częstotliwości (2,4-32 GHz), o mocy do 4W w zastosowaniach do łączności bezprzewodowej WLAN i Bluetooth [7] oraz w telekomunikacji [16].

W literaturze niewiele jest opisów falowników klasy DE o mocach kilkuset watów. Do najciekawszych można zaliczyć [8], w którym opisano falownik klasy DE 13,56 MHz/300 W z drajwerem (ang. driver) o sinusoidalnym kształcie napięcia bramkowego. Opisy falowników większych mocy można znaleźć w firmowych notach aplikacyjnych [9], jednak problematyka pracy optymalnej (rys. 1b) [14] i odpowiednia analiza teoretyczna są zazwyczaj pomijane.

W literaturze polskiej do cennych pozycji poświęconych tematyce falowników DE należy zaliczyć artykuły z Instytutu Radioelektroniki Politechniki Warszawskiej (Modzelewski, Mikołajewski), dotyczące układów o mocy kilkuset watów oraz metod sterowania mocy wyjściowej, np. [10]. Badania falowników klasy DE prowadzone są również w Instytucie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej (Matysik, Szymański). Autorzy zaproponowali własne rozwiązanie bardzo trudnego zagadnienia, jakim jest samoczynne dostrojenie falownika do pracy optymalnej w zmiennych warunkach obciążenia [11].

W ramach wcześniejszych prac prowadzonych w KENER opracowano i zbadano falowniki klasy DE o częstotliwości do ok.10 MHz, mocy kilkuset watów, z drajwerami o quasi-prostokątnym i sinusoidalnym kształcie napięcia bramkowego [12, 13]. W skonstruowanych i przebadanych falownikach wykorzystywano wysokoczęstotliwościowe tranzystory mocy serii DE375 [17] oraz dedykowane dla nich drajwery scalone DEIC420 [19].

Wyniki zawarte w artykule są kontynuacją wcześniejszych prac autora [15] i dotyczą falowników klasy DE o częstotliwości pracy 13,56 MHz. Analiza aktualnej literatury na temat

przedmiotowych falowników pokazała pewne braki tematyczne i pozwoliła sformułować cel artykułu.

Celem artykułu jest analiza możliwości realizacji falownika klasy DE 13,56 MHz/500 W na bazie najnowszych, dedykowanych tranzystorów serii RF Power Mosfet, przy następujących założeniach: a) falownik pracuje w warunkach komutacji optymalnej, b) uwzględnia się nieliniowość pojemności wyjściowej C_{OSS} tranzystora i jej wpływ na możliwość realizacji komutacji optymalnej, c) napięcie zasilania obwodu DC falownika E=300V.

2. WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI FALOWNIKA KLASY DE

Na rysunku 1a pokazano schemat falownika klasy DE z łącznikiem idealnym oraz pojemnością C_{DS}, która reprezentuje pojemność wyjściową C_{OSS} tranzystora Mosfet, ewentualnie dołączoną pojemność dodatkową lub np. pojemność między warstwami obwodu drukowanego. W zakresie najwyższych częstotliwości pracy falownika, równolegle do tranzystora nie dołącza się dodatkowych pojemności, tak że C_{DS} jest sumą pojemności C_{OSS} i ewentualnych liniowych pojemności pasożytniczych (ok. 5 pF/cm^2) wynikających z tego, że tranzystor jest wmontowany w obwodzie drukowanym. Na rysunku 1b zamieszczono przebiegi napięcia u oraz prądu i odbiornika przy komutacji optymalnej. Zastosowanie metody sterowania z niezmiennym czasem martwym umożliwia takie przeładowanie pojemności C_{DS}, że przy niewielkich zmianach parametrów obwodu głównego uzyskuje się przełączanie łączników zbliżone do optymalnego - załączanie ZVS+ZCS oraz wyłączenie ZVS+NZCS - rys. 1b. Jest ono takie samo jak w falowniku klasy E. Kąt β nazywa się kątem komutacji optymalnej.

Właściwości falownika klasy DE zależą od pojemności C_{DS} przy ustalonej wartości pojemności C w obwodzie rezonansowym. W analizach uproszczonych, właściwości falownika można opisać w zależności od parametru $b=C/C_{DS}$ oraz dobroci odbiornika $Q=\omega L/R$. Z analiz tych wynika, że ze wzrostem pojemności C_{DS}, wzrasta kąt komutacji optymalnej β. Można go opisać zależnością (1), zakładając sinusoidalny prąd odbiornika i liniowe *RLC*:

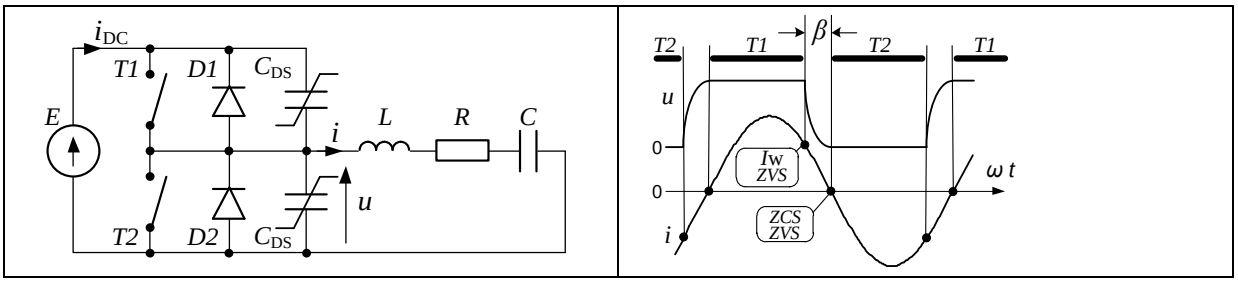
$$\beta = \arccos\left(1-\frac{\pi}{bQ}\right) \tag{1}$$

Zależność (1) daje poprawne wyniki dla wartości b i Q dopiero powyżej 5, ale pokazuje wpływ tych parametrów na wartość kąta komutacji optymalnej β.

W celu uzyskania dokładnych wartości kąta komutacji optymalnej β w funkcji Q i b posłużono się modelem falownika (rys. 1a) z łącznikami przełączającymi się natychmiastowo, a gałąź *RLC* musiała być rozpatrywana bez uproszczeń. Rozwiązania uzyskano metodami numerycznymi z wykorzystaniem pakietu *MathCad*, a metodę opisano w [14]. Na podstawie takich analiz uzyskano pary granicznych wartości b_{gr} i Q_{gr}, dla których jeszcze możliwa jest komutacja optymalna. Charakterystykę granicznych wartości b_{gr} i Q_{gr} zamieszczono na

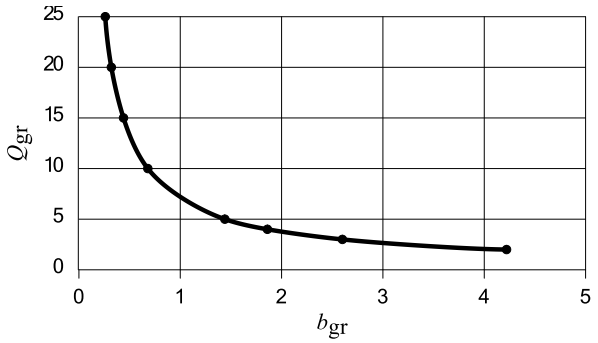
rysunku 2. Wynika z niej, że wraz ze wzrostem dobroci Q odbiornika możliwe jest zmniejszenie parametru b, co oznacza możliwość zwiększenia pojemności C_{DS}. Dla zapewnienia komutacji optymalnej, pary wartości parametrów b i Q falownika powinny leżeć na krzywej parametrów granicznych lub powyżej tej krzywej. Dla b_{gr} i Q_{gr} wartości kątów komutacji optymalnej β są duże i zawierają się w przedziale 67-91°el.

a) b)



Rys. 1. a) Model falownika klasy DE z nieliniową pojemnością C_{DS}, b) przebiegi sygnałów sterujących T1, T2, napięcia u oraz prądu i w stanie optymalnym; β – kąt komutacji optymalnej

Fig. 1. a) Model of Class DE inverter with nonlinear output C_{DS} capacitance, b) T1, T2 control signals, voltage u and current i drawings at optimum state; β – optimum commutation angle



Rys. 2. Charakterystyka granicznych wartości b_{gr} i Q_{gr} zapewniających pracę optymalną falownika DE

Fig. 2. Diagram of limited values of b_{gr} and Q_{gr} parameters ensures optimal commutation mode of Class DE inverter

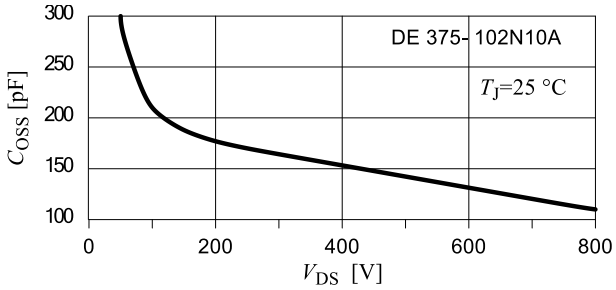
3. WSPÓŁCZESNE TRANZYSTORY SERII „RF POWER MOSFET”

Budowa falownika klasy DE 13,56 MHz/500 W jest możliwa tylko w przypadku zastosowania tranzystorów Mosfet, które przez producentów zaliczane są do klasy „RF Power Mosfets”. Najważniejsze cechy, które musi spełniać taki tranzystor to:

- mała pojemność wyjściowa C_{OSS}, szacunkowo niższa niż 300 pF, ponieważ decyduje ona o możliwości uzyskania komutacji optymalnej,

- pojemność wejściowa C_{iSS} nie większa niż 2000-3000 pF ze względu na konieczność ograniczenia strat mocy drajwera i wymaganą szybkość przełączania,
- czasy opóźnienia i przełączania na poziomie 3-8 ns,
- obudowa z wyprowadzeniami o małej indukcyjności, na poziomie 2-5 nH,
- deklarowane przez producenta przeznaczenie tranzystora do pracy we wzmacniaczach klasy C, D i E (w przeciwieństwie do przeznaczenia do wzmacniaczy klasy A, B).

Istotnym parametrem dla możliwości realizacji komutacji optymalnej w falowniku DE jest wartość pojemności C_{OSS}, która jest nieliniową funkcją napięcia dren-źródło $C_{OSS}=f(V_{DS})$. Przykład takiej charakterystyki dla tranzystora DE375-102N10A pokazano na rysunku 2.



Rys. 3. Pojemność wyjściowa C_{OSS} w funkcji napięcia V_{DS} dren-źródło tranzystora DE375-102N10A na podstawie [17]
Fig. 3. Output capacitance C_{OSS} as a function of V_{DS} drain to source voltage for DE375-102N10A Mosfet transistor based on [17]

Karty katalogowe tranzystorów Mosfet podają wartość pojemności C_{OSS} na dwa sposoby:

- w tabeli parametrów, jako pojedynczą wartość, najczęściej dla napięcia $V_{DS}=0{,}8\cdot V_{DSS}$, gdzie V_{DSS} to dopuszczalne napięcie dren-źródło (klasa napięciowa tranzystora),
- albo/i w formie wykresu $C_{OSS}=f(V_{DS})$, najczęściej w zakresie $0<V_{DS}<0{,}8\cdot V_{DSS}$.

Wobec nieunormowanego sposobu podawania wartości pojemności C_{OSS} przez producentów tranzystorów, porównania należy dokonać dla napięcia V_{DS} jak napięcie zasilania falownika ($V_{DS}=E$) na podstawie charakterystyk $C_{OSS}=f(V_{DS})$ dostępnych w kartach katalogowych.

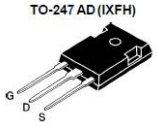
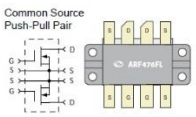
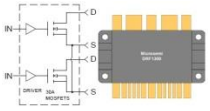
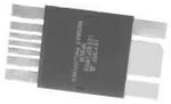
Na rynku dostępne są tranzystory serii „RF Power Mosfet", pochodzące od dwóch producentów: IXYS RF oraz Microsemi. W tabeli 1 zestawiono tranzystory Mosfet obu producentów, które wg autora spełniają kryteria zastosowania w przedmiotowym falowniku. Oprócz podstawowych parametrów statycznych i dynamicznych, podano wartości pojemności C_{OSS} dla napięcia $V_{DS}=E$=300 V, jeśli takie dane znajdowały się w kartach katalogowych.

W pozycjach 1-4 zamieszczono tranzystory serii DE firmy IXYS RF [17]. Są to tranzystory w obudowach z 6 niskoindukcyjnymi wyprowadzeniami. Ich cechą charakterystyczną jest to, że trzy elektrody główne (D,SD1,SD2) i trzy elektrody obwodu bramkowego (G,SG1,SG2) umieszczono po przeciwnych stronach obudowy. Zapewnia to

możliwość połączenia „pin-to-pin” obwodu bramkowego tranzystora z dedykowanymi drajwerami firmy IXYS, np. DEIC420, 421 lub DEIC515 [19].

Tabela 1

Parametry tranzystorów serii „RF Power Mosfet”

Lp.	Typ tranzystora	V_{DSS} [V]	I_D [A]	C_{iss} [pF]	C_{OSS} [pF]	t_{on} / t_{off} [ns]	$R_{DS(on)}$ [Ω]	Obudowa
1.	DE375-102N10A prod. IXYS RF seria DE	1000	10	2700	165 (V_{DS}= 300V)	3 / 8	1,2	
2.	DE275-501N16A prod. IXYS RF seria DE	500	16	1650	170 (V_{DS}= 300V)	2 / 5	0,4	
3.	DE375-501N21A prod. IXYS RF seria DE	500	25	2500	200 (V_{DS}= 300V)	3 / 8	0,35	
4.	IXZ318N50 prod. IXYS RF seria Z-MOS	500	19	1950	200 (V_{DS}= 300V)	4 / 6	0,34	
5.	IXFH 12N50F prod. IXYS RF seria F	500	12	1870	290 (V_{DS}= 25V)	14 / 8	0,4	
6.	ARF448 C prod. Microsemi	450	15	1400	<150 (V_{DS}= 150V)	5 / 12	0,4	
7.	ARF476FL Para push-pull prod. Microsemi	500	10	780	<70 (V_{DS}= 200V)	4 / 4	0,58	
8.	DRF1300 Para push-pull Mosfet & Driver prod. Microsemi	500	30	1800	335 (nie podano V_{DS})	3 / 4	0,24	
9.	IXZ4DF18N50 prod. IXYS RF Mosfet & Driver	500	19	nie podano	170 (V_{DS}= 300V)	3 / 3	0,29	

W pozycji 5 zamieszczono tranzystor IXFH 12N50F serii F, dla której producent deklaruje niskie wartości pojemności C_{OSS}. Producent nie podaje jednak charakterystyki

C_{OSS}=f(V_{DS}), a jedynie wartość pojemności C_{OSS}=290 pF dla niskiego napięcia V_{DS}=25 V. Porównując tę wartość z pojemnościami C_{OSS} innych tranzystorów dla V_{DS}=25 V, stwierdza się, że jest ona około dwukrotnie niższa. Sugeruje to więc niższe wartości C_{OSS} dla V_{DS}=300 V w porównaniu z pozostałymi tranzystorami.

Pozycje 6 i 7 tabeli 1 to tranzystory firmy Microsemi. Na uwagę zasługują ARF476FL zawierający parę tranzystorów w układzie push-pull, które mogą zostać połączone równolegle.

Dla obu tranzystorów firma Microsemi nie podaje pojemności C_{OSS} dla V_{DS}=300 V, kończąc charakterystyki C_{OSS}=f(V_{DS}) odpowiednio na 150 V i 200 V. Jednak pojemności C_{OSS} dla tych napięć są około dwukrotnie niższe w porównaniu z tranzystorami IXYS serii DE, co sugeruje również niższe wartości C_{OSS} dla V_{DS}=300 V.

Osobną kategorię stanowią tranzystory Mosfet scalone z drajwerami (poz. 8 i 9, tabela 1). Cechą charakterystyczną tych tranzystorów jest płaska obudowa z niskoindukcyjnymi wyprowadzeniami, czasy przełączeń t_{on} i t_{off} wynoszące ok. 4 ns i niskie wartości C_{OSS}. Scalenie tranzystora i drajwera pozwoliło zminimalizować indukcyjności w obwodzie bramkowym, zmniejszyć niepożądane oscylacje oraz przyśpieszyć przełączenie tranzystora. Zastosowanie takich tranzystorów upraszcza konstrukcję obwodu silnoprądowego falownika.

4. MOŻLIWOŚCI REALIZACJI KOMUTACJI OPTYMALNEJ

Celem jest określenie możliwości realizacji falownika klasy DE 13,56 MHz/500 W, który pracuje optymalnie i jest skonstruowany na bazie tranzystorów zestawionych w tabeli 1. Stwierdza się, że pod względem wszystkich parametrów zestawionych w tabeli 1, z wyjątkiem C_{OSS}, tranzystory spełniają wzmagania przedmiotowego falownika. Bazując na charakterystykach parametrów granicznych Q_{gr}=f(b_{gr}) z rysunku 2, zrealizowano procedurę obliczeniową, która pozwala na stwierdzenie, dla jakich wartości pojemności C_{OSS} możliwa jest praca optymalna. Założono, że pojemność całkowita C_{DS}=C_{OSS}. Dokładny opis procedury nie jest celem artykułu, a poniżej podaje się jedynie ideę zastosowanej metody:

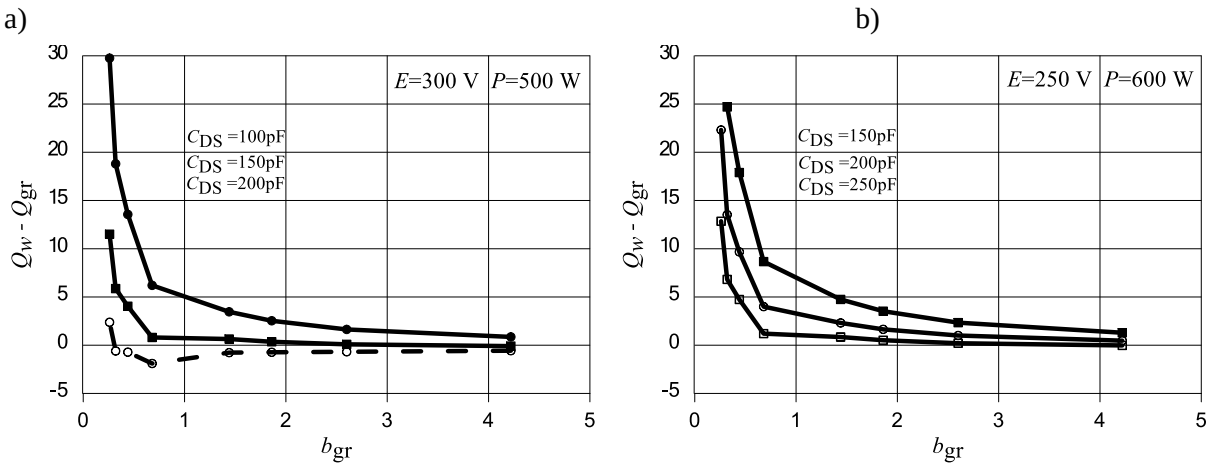
- zakłada się kolejne wartości parametru b_{gr}=C/C_{DS} jak punkty na wykresie z rysunku 2, dla sprawdzanych pojemności C_{DS} oblicza się odpowiadające im wartości pojemności C=b_{gr}·C_{DS} obwodu rezonansowego falownika, przyjęto: C_{DS}=100, 150, 200, 250 pF,
- na podstawie C obliczamy wartość indukcyjności L, korzystając z zależności na częstotliwość rezonansową f_r obwodu RLC (częstotliwość f_r jest zawsze mniejsza od 13,56 MHz i zależy od b i Q, a odpowiedni współczynnik przeliczeniowy uzyskano na drodze numerycznej),

- na podstawie napięcia zasilania falownika E i mocy wyjściowej P, uwzględniając kąt komutacji β i związane z tym obniżenie mocy wyjściowej, obliczono wymaganą wartość rezystancji R odbiornika,
- na podstawie obliczonych parametrów R, L i C wyznaczono dobroć odbiornika, którą oznaczono jako Q_w,
- porównujemy wyznaczoną dobroć Q_w z dobrocią Q_{gr} dla początkowego parametru b_{gr}.

Jeśli wyznaczona w ten sposób dobroć $Q_w > Q_{gr}$ dla początkowej wartości b_{gr}, to komutacja optymalna jest realizowalna dla założonej wartości C_{DS}.

Wyniki przeprowadzonej procedury obliczeniowej zamieszczono na rysunku 4. Wykreślono tam różnice Q_w-Q_{gr} w funkcji parametru b_{gr} dla czterech wartości pojemności C_{DS}. Dodatnia różnica świadczy o możliwości realizacji komutacji optymalnej, a jej wartość odzwierciedla „zapas" możliwości zwiększenia dobroci Q odbiornika lub pojemności C_{DS}.

W celach porównawczych wykresy sporządzono dla dwóch przypadków: rys. 4a) dla początkowych założeń P=500 W i E=300 V, rys. 4b) dla P=600 W, E=250 V. Analiza wykresów pozwala na stwierdzenie, że w przypadku z rys. 4a komutacja optymalna jest możliwa dla pojemności C_{DS}<150 pF. Dla pojemności C_{DS}=200 pF wartości Q_w-Q_{gr} są ujemne, co wyklucza komutację optymalną (charakterystykę zaznaczono linią przerwaną). Zwiększenie mocy i obniżenie napięcia zasilania (rys. 4b) skutkuje koniecznością zmniejszenia rezystancji R odbiornika i końcowym wzrostem dobroci Q. Powoduje to korzystne poszerzenie zakresu dopuszczalnych wartości C_{DS} do wartości 250 pF.



Rys. 4. Charakterystyki realizowalności komutacji optymalnej dla dwóch falowników klasy DE: a) dla E=300 V, P=500 W, b) dla E=250 V, P=600 W

Fig. 4. Diagram of possibilities of realization of optimum commutation mode for two Class DE inverters: a) for E=300 V, P=500 W, b) for E=250 V, P=600 W

5. WNIOSKI

Celem artykułu była analiza możliwości realizacji falownika klasy DE 13,56 MHz/500 W oparta na najnowszych, dedykowanych tranzystorach serii RF Power Mosfet. Wymogiem była praca falownika w warunkach komutacji optymalnej.

Na podstawie uproszczonego modelu falownika i opisanej procedury wykazano, że uzyskanie komutacji optymalnej w przedmiotowym falowniku jest możliwe, jeśli zostaną zastosowane tranzystory serii RF Power Mosfet o pojemnościach wyjściowych C_{OSS}<150 pF.

Odpowiedni dobór napięcia zasilania przy założonej mocy falownika daje możliwość zwiększenia dobroci Q odbiornika, a w efekcie szerszy zakres dopuszczalnych pojemności wyjściowych C_{OSS}. Uzyskany w ten sposób „zapas" pojemności C_{OSS} jest istotny z powodu niedokładności modelu, który nie uwzględniał procesów przełączania tranzystora i jego rezystancji.

BIBLIOGRAFIA

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" 1996, Vol. 43, No. 1, p. 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, London, 1994, Vol. 5, p. 105-108.
3. Sekiya H., Koizumi H., Mori S., Sasase I., Jianming Lu, Yahagi T.: FM/PWM control scheme in class DE inverter. „IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers" 2004, Vol. 51, Issue 7, p. 1250-1260.
4. Sekiya H., Nemoto S., Jianming Lu, Yahagi T.: Phase control for resonant DC-DC converter with class-DE inverter and class-E rectifier. „IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers" 2006, Vol. 53, No. 1, p. 254-263.
5. Sekiya H., Watanabe T., Suetsugu T., Kazimierczuk M.K.: Analysis and Design of Class DE Amplifier With Nonlinear Shunt Capacitances. „IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers" 2009, Vol. 56 , Iss. 10, p. 2362-2371.
6. Sekiya H., Sagawa N., Kazimierczuk M. K.: Analysis of Class DE Amplifier With Nonlinear Shunt Capacitances at Any Grading Coefficient for High Q and 25 % Duty Ratio, IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, Vol. 25, Iss. 4, p. 924-932.
7. Stauth J.T., Sanders S.R.: A 2.4GHz, 20dBm class-D PA with single-bit digital polar modulation in 90 nm CMOS, IEEE Custom Integrated Circuits Conference 2008, p. 737-740.

8. El-Hamamsy S.: Design of High-Efficiency RF Class-D Power Amplifier. „IEEE Transactions of Power Electronics" 1994, Vol. 9, No. 3, p. 297-308.
9. 3kW and 5kW Half-Bridge Class-D RF Generators at 13.56MHz with 89% Efficiency and Limited Agility, Directed Energy, Inc., An IXIS Company, 2002, Nota Aplikacyjna Doc #9300-0008 Rev 1.
10. Modzelewski J., Mikolajewski M.: Output Voltage Control by Frequency Regulation in Class-DE Power Amplifier, EUROCON 2007 The International Conference on „Computer as a Tool" Warsaw, Sept 9-12, 2007, p. 1423-1428.
11. Matysik J., Szymanski B.: Charge Controlled Class DE Series Resonant Converter - New Concept, EUROCON 2007 The International Conference on „Computer as a Tool" Warsaw, Sept 9-12, 2007, p. 1355-1359.
12. Kasprzak M.: Falownik rezonansowy klasy DE 8 MHz z drajwerem sinusoidalnym. Kwartalnik „Elektryka" 2004, z. 192, s. 85-90.
13. Kasprzak M., Jurczak W.: Falownik klasy DE 8MHz 300 W do nagrzewania pojemnościowego. Materiały konferencji „Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE'2005" Łódź 2005, s. 261-265.
14. Grzesik B., Kaczmarczyk Z., Kasprzak M.: Wybrane właściwości rezonansowego falownika klasy DE w warunkach komutacji optymalnej. Konferencja „Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE'99 ", Łódź 1999, Tom I, s. 223-228.
15. Kasprzak M., Rędzia D.: Falownik klasy DE 13,56 MHz/500 W z drajwerem typu flyback. „Przegląd Elektrotechniczny" 2010, Nr 2, s. 243-246.
16. The ARRL Handbook 2004 for radio communications.
17. RF Power MOSFET, IXIS Company, Noty Aplikacyjne 2009, www.ixys.com (2011).
18. RF Power MOSFET, Microsemi, Noty Aplikacyjne 2010, www.microsemi.com (2011).
19. DEIC420, DEIC421, DEIC515-Low-Side Ultrafast RF Mosfet Drivers, IXIS RF Company, Noty Aplikacyjne 2004-2010, www.ixys.com (2011).

Dr inż. Marcin KASPRZAK
Politechnika Śląska
Wydział Elektryczny
Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki
ul. Krzywoustego 2
44-100 Gliwice
e-mail: Marcin.Kasprzak@polsl.pl