ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2004
Seria: ELEKTRYKA z. 192 Nr kol. 1634

Zbigniew KACZMARCZYK
Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej

MAPY PRACY FALOWNIKÓW KLAS D, DE, E PRZY ZMIENNYCH PARAMETRACH OBCIĄŻENIA

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę zależności rodzaju pracy falowników klas D, DE oraz E od wartości ich parametrów obciążenia L, R. Analizy tej dokonano na podstawie płaszczyzny względnych parametrów (R/R_{opt}, L/L_{opt}) dla ustalonych pojemności falowników, skończonej wartości dobroci obwodu rezonansowego oraz zbadano wpływ parametrów sterowania falowników (częstotliwości i współczynnika wypełnienia wysterowania). Dla wybranych punktów z płaszczyzny parametrów falowników (R/R_{opt}, L/L_{opt}) dokonano odpowiednich symulacji komputerowych.

MAPS OF OPERATION OF CLASS D, DE, E INVERTERS WITH VARIABLE LOAD PARAMETERS

Summary. An influence of load parameters L, R on operation modes of Class D, DE and E inverters is presented and considered in this paper. It is made on the basis of the plane of relative parameters (R/R_{opt}, L/L_{opt}) for fixed values of capacitances and a finite quality factor Q of the inverters. Operating frequency and switch duty ratio are also taken into account. Some simulation results for selected points from the plane of relative parameters (R/R_{opt}, L/L_{opt}) are given as an illustration.

1. WPROWADZENIE

Falowniki klas D, DE oraz E są falownikami rezonansowymi, w których występuje komutacja miękka tranzystorów. W falowniku klasy D, popularnie nazywanym rezonansowym falownikiem napięcia, tranzystory mogą być przełączane przy zerowej wartości prądu (ZCS - zero-current-switching), natomiast w falownikach klas DE i E można uzyskać jeszcze bardziej korzystne warunki komutacji, tzw. komutację maksymalnie miękką. Polega ona na załączania tranzystorów przy zerowej wartości napięcia (ZVS - zero-voltage-switching) i zerowej wartości prądu (ZCS) oraz wyłączaniu przy zerowej wartości napięcia (ZVS) i niezerowej wartości prądu (NZCS). Poprawa warunków komutacji podwyższa możliwą do osiągnięcia częstotliwość pracy falowników i ich sprawność.

Wszystkie powyższe klasy falowników znajdują zastosowanie, m.in., w nowoczesnych przetwornicach napięcia DC/DC, układach nagrzewania indukcyjnego i dielektrycznego, radiokomunikacji oraz zasilaczach źródeł światła.

Zaprojektowanie falowników klas D, DE, E przy niezmiennych parametrach obciążenia jest względnie proste. Natomiast w celu uzyskania odpowiedzi na pytanie, jak będzie pracował dany falownik, gdy jego parametry ulegają zmianie (szczególnie, gdy zmieniają się podczas pracy), wymagane jest przeprowadzenie bardziej złożonej analizy. Wyniki takiej analizy są prezentowane poniżej.

Problematyka dotycząca falowników klas D, DE, E podejmowana w literaturze jest rozległa - np. [1-9]. Przykładowo, obejmuje ona zagadnienia: analizy oraz syntezy znanych i nowych topologii - [5-8], określenia wybranych właściwości - [1, 3, 5, 6], sprawności, maksymalizacji mocy oraz pracy z powielaniem częstotliwości. W niewielu pracach (np. [2, 3, 4, 9]) literatura próbuje wyjaśnić wpływ zmian wartości elementów obwodu głównego i sterowania na właściwości falowników oraz realizowany przez nie rodzaj pracy. Z reguły są to analizy uproszczone, prezentujące jedynie specyficzne właściwości wybranych falowników.

Celem poniższej pracy jest pogłębienie i usystematyzowanie problematyki zależności rodzajów pracy falowników klas D, DE, E od wartości parametrów R/R_{opt}, L/L_{opt} przy uwzględnieniu zmian współczynnika wypełnienia wysterowania tranzystora d. W pracy prezentowane są oryginalne mapy, ujmujące wszystkie rodzaje pracy falowników klas D, DE, E, a podejście takie stanowi wspólną bazę do analizy wszystkich tych klas. Prezentowane wyniki dotyczą jedynie analizy globalnej, a nie analizy specyficznych właściwości falowników.

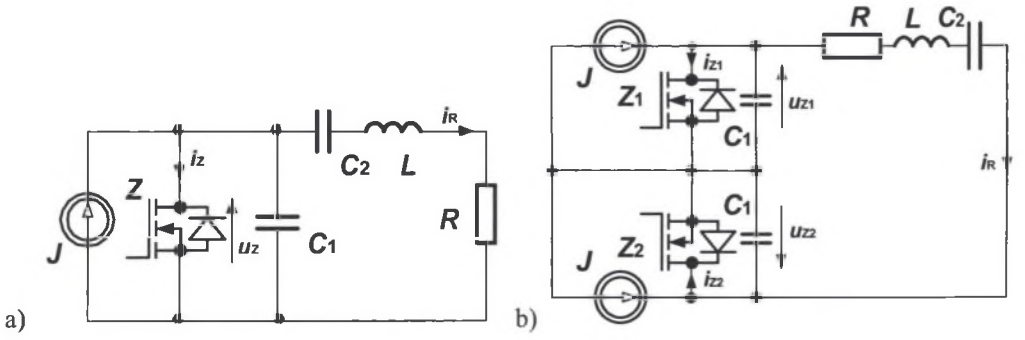
2. ZAŁOŻENIA

Przyjęto następujące założenia:

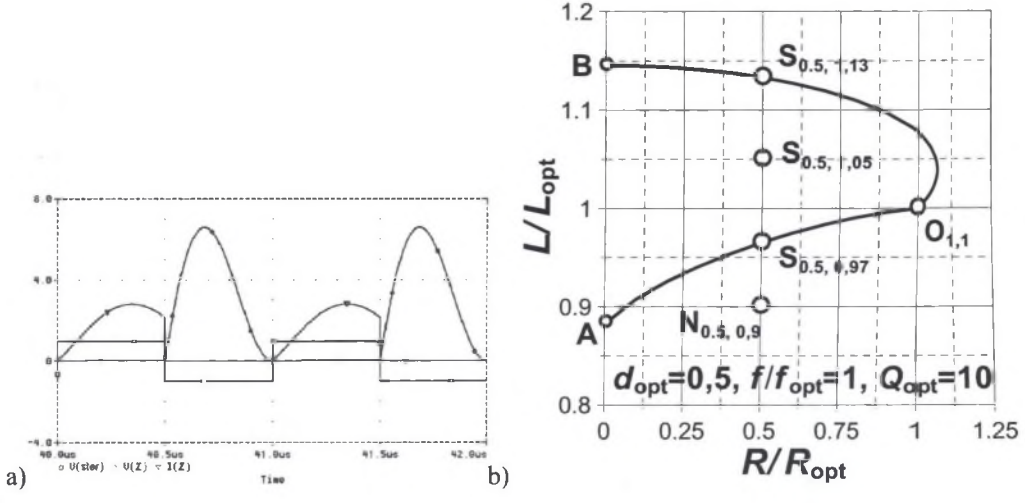
- brane są pod uwagę reprezentatywne topologie falowników klas D, DE, E,
- wartościami odniesienia są parametry optymalne (oznaczane indeksem *opt*), zapewniające w poszczególnych falownikach najkorzystniejsze warunki komutacji miękkiej (tzw. pracę optymalną), dla zadanych wartości Q_{opt} (dobroci wyjściowego obwodu rezonansowego) oraz d_{opt} (stosunku czasu wysterowania tranzystora do okresu jego przełączeń),
- parametrami ulegającymi zmianom są rezystancja obciążenia R oraz indukcyjność L, natomiast wszystkie pojemności falownika, wynikające z wartości d_{opt}, f_{opt}, R_{opt}, L_{opt}, pozostają niezmienne, tzn. $C_1=C_{1opt}$=const, $C_2=C_{2opt}$=const (założenie to przyjęto w celu zredukowania wymiaru przestrzeni parametrów),
- elementy obwodu głównego falownika są elementami idealnymi,
- tranzystory zastosowane w falownikach są zaworami dwukierunkowymi ze względu na prąd, tzn. posiadają diodę równoległą (np. tranzystory typu MOSFET).

3. FALOWNIK KLASY E

Na rys. 1 zamieszczono schematy zastępcze falowników klasy E. Początkowa analiza zostanie przeprowadzona na przykładzie falownika klasy E w układzie niesymetrycznym (rys. 1a). Zostaną omówione poszczególne rodzaje pracy oraz ich interpretacja geometryczna na płaszczyźnie parametrów (R/R_{opt}, L/L_{opt}). Na potrzeby symulacji komputerowej przyjęto następujące parametry falownika: J=1 A, d_{opt}=0,5, f_{opt}=1 MHz, C_{1opt}=31,3 nF, C_{2opt}=18,1 nF, L_{opt}=1,59 μH, R_{opt}=1 Ω ($Q_{opt}=2\pi f_{opt}L_{opt}/R_{opt}$=10).



Rys. 1. Falowniki klasy E: a) niesymetryczny; b) typu push-pull
Fig. 1. Class E inverters: a) asymmetrical; b) push-pull type



Rys. 2. a) Przebiegi prądów i napięć w falowniku klasy E (rys. 1a) dla punktu $O_{1,1}$;
b) płaszczyzna parametrów falownika klasy E
Fig. 2. a) Current and voltage waveforms in Class E inverter (fig. 1a) for point $O_{1,1}$;
b) plane of Class E inverter parameters

Możliwe są trzy rodzaje pracy falownika klasy E, są to: praca optymalna, praca suboptymalna oraz praca nieoptymalna - tabela 1. W literaturze wyróżnia się tylko pracę optymalną i suboptymalną - np. [5, 8]. Ta ostatnia obejmuje pracę suboptymlaną i nieoptymalną w ujęciu niniejszego artykułu. Podział taki jest naturalny, ponieważ praca nieoptymalna oznacza komutację twardą przy załączaniu tranzystora - tabela 1. Pracę optymalną cechuje komutacja maksymalnie miękka, ilustrują ją przebiegi napięcia sterującego u_{ster}, napięcia na zaworze u_Z i prądu zaworu i_Z z rys. 2a. Na przykładowej płaszczyźnie parametrów falownika (R/R_{opt}, L/L_{opt}) dla d_{opt}=0,5, f/f_{opt}=1, Q_{opt}=10 odpowiada jej punkt parametrów $O_{1,1}$ (rys. 2b). Praca suboptymalna falownika występuje, gdy załączenie tranzystora lub początek przewodzenia diody równoległej następuje dla napięcia u_Z równego zero, a prąd i_Z przyjmuje początkowo wartości ujemne. Ten rodzaj pracy pojawia się, gdy punkty parametrów są położone na krzywej A-$O_{1,1}$-B (rys. 2b), tzw. graniczna praca suboptymalna (np. punkty $S_{0,5,\ 1,13}$, $S_{0,5,\ 0,97}$ - rys. 2b, rys. 3a i c), oraz dla punktów położonych

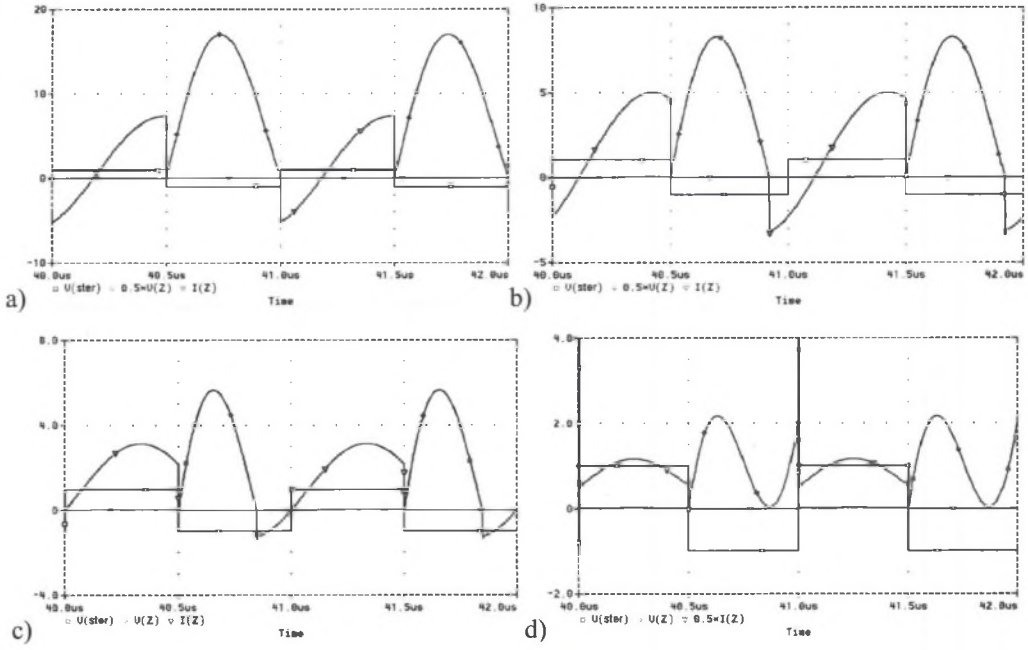
wewnątrz obszaru ograniczonego przez tą krzywą (np. $S_{0,5,\,1,05}$ - rys. 2b, rys. 3b). We wszystkich innych przypadkach zachodzi praca nieoptymalna (np. $N_{0,5,\,0,9}$ - rys. 2b, rys. 3d). Ten ostatni rodzaj pracy falownika jest z reguły niepożądany, gdyż wówczas tranzystor załączany jest przy niezerowej wartości napięcia i niezerowej wartości prądu - tabela 1.

Tabela 1

Rodzaje pracy falownika klasy E

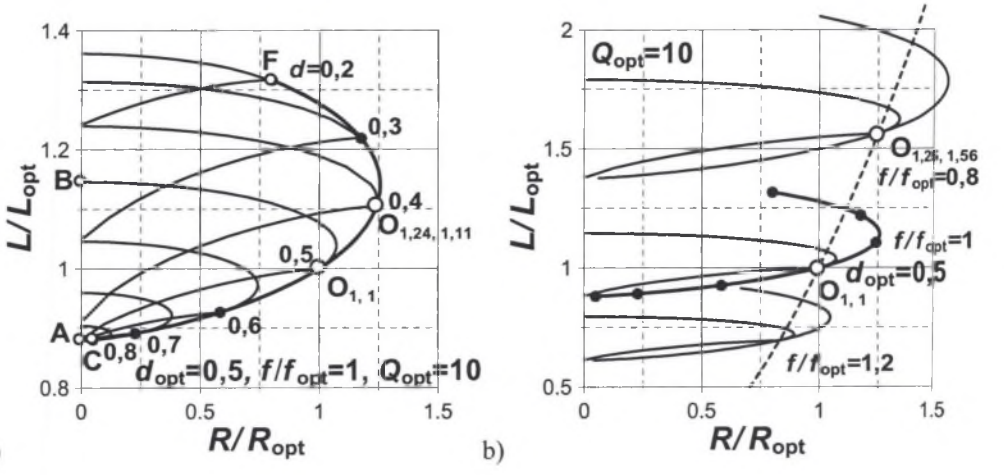
Rodzaj pracy	**Wartości prądu i napięcia tranzystora**	
	Załączanie	**Wyłączanie**
Praca optymalna	ZCS+ZVS	NZCS+ZVS
Praca suboptymalna	NZCS+ZVS	NZCS+ZVS
Praca nieoptymalna	NZCS+NZVS	NZCS+ZVS

Gdzie poszczególne skróty oznaczają:
ZCS - przełączanie przy zerowej wartości prądu,
ZVS - przełączanie przy zerowej wartości napięcia,
NZCS - przełączanie przy niezerowej wartości prądu,
NZVS - przełączanie przy niezerowej wartości napięcia.



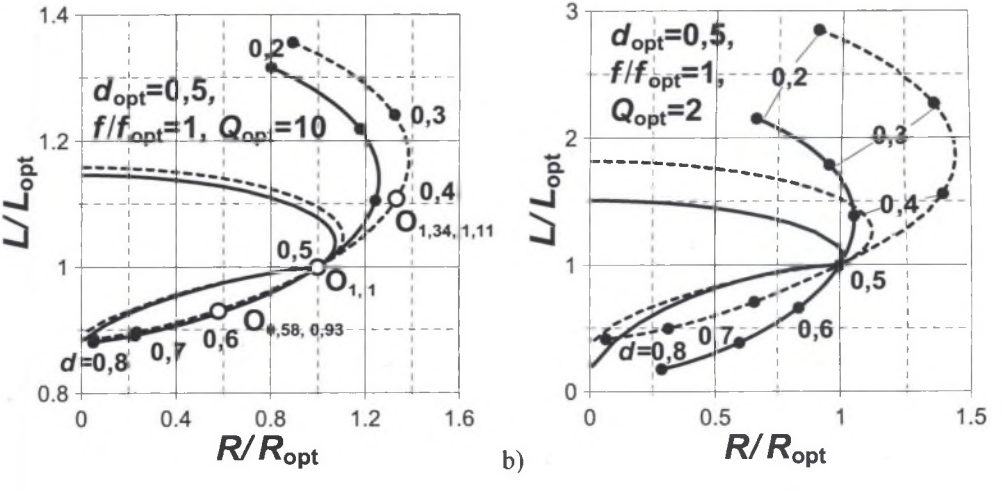
Rys. 3. Przebiegi prądów i napięć w falowniku klasy E (rys. 1a) dla punktów: a) $S_{0,5,\,1,13}$; b) $S_{0,5,\,1,05}$; c) $S_{0,5,\,0,97}$; d) $N_{0,5,\,0,9}$

Fig. 3. Current and voltage waveforms in Class E inverter (fig. 1a) for points: a) $S_{0,5,\,1,13}$; b) $S_{0,5,\,1,05}$; c) $S_{0,5,\,0,97}$; d) $N_{0,5,\,0,9}$



Rys. 4. Płaszczyzna parametrów falownika klasy E dla: a) zmiennego wypełnienie d=0,2÷0,8; b) zmiennej częstotliwości f/f_{opt}=0,8, 1, 1,2 (linia przerywana wyznacza d=d_{opt}=0,5)

Fig. 4. Plane of Class E inverter parameters for: a) variable switch duty ratio d=0,2÷0,8; b) variable frequency f/f_{opt}=0,8, 1, 1,2 (dashed line marks d=d_{opt}=0,5)



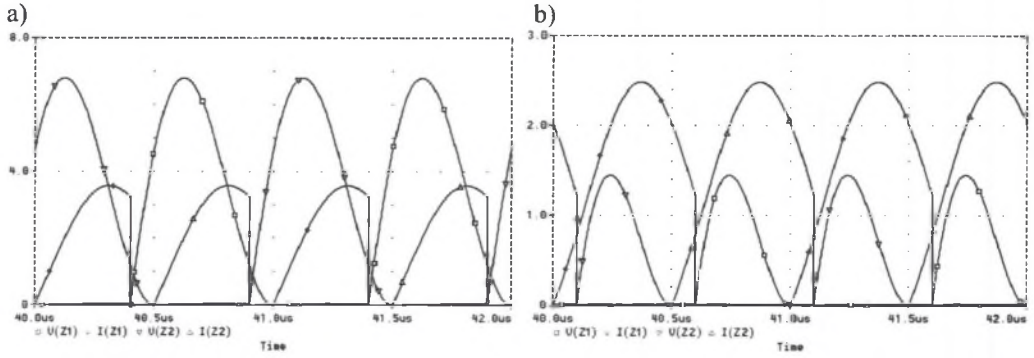
Rys. 5. Płaszczyzna parametrów falownika klasy E niesymetrycznego (linie ciągłe) oraz typu push-pull (linie przerywane) dla dobroci: a) Q_{opt}=10; b) Q_{opt}=2

Fig. 5. Plane of parameters of asymmetrical Class E inverter (solid lines) and push-pull type (dashed lines) for: a) Q_{opt}=10; Q_{opt}=2

Zmiana współczynnika wysterowania d ($d \neq d_{opt}$) powoduje, że krzywa granicznej pracy suboptymalnej falownika A-$O_{1,1}$-B dla d_{opt}=0,5 (rys. 4a) ulega transformacji. Odpowiednie wierzchołki nowo obliczonych krzywych granicznych przesuwają się po krzywej C-$O_{1,1}$-F (rys. 4a). Występuje dla nich praca optymalna, przykładowo, dla punktu parametrów $O_{1,24,1,11}$ jest to praca optymalna falownika z wypełnieniem d=0,4.

Zmiana częstotliwości przełączeń f/f_{opt} powoduje odpowiednie przeskalowanie krzywej granicznej A-$O_{1,1}$-B oraz krzywej pracy optymalnej C-$O_{1,1}$-F (rys. 4). Poszczególne punkty tych krzywych są przeliczane wg zależności: $(R/R_{opt})|_{f/f_{opt}\neq 1}=(R/R_{opt})|_{f/f_{opt}=1}/(f/f_{opt})$ oraz $(L/L_{opt})|_{f/f_{opt}\neq 1}=(L/L_{opt})|_{f/f_{opt}=1}/(f/f_{opt})^2$, [3]. Przykładowo dla punktu parametrów $O_{1,25,\,1,56}$ (f/f_{opt}=0,8, d_{opt}=0,5) z rys. 4b falownik pracuje optymalnie.

Rys. 5 przedstawia krzywe granicznej pracy suboptymalnej oraz krzywe pracy optymalnej falowników klasy E (niesymetrycznego i push-pull - rys. 1) dla dwóch wartości dobroci, Q_{opt}=10, 2. Przykładowe wyniki symulacji (napięcia i prądy tranzystorów) falownika typu push-pull dla punktów parametrów $O_{1,34,\,1,11}$ (d=0,4) i $O_{0,58,\,0,93}$ (d=0,6) z rys. 5a zamieszczono na rys. 6. W pierwszym przypadku przewodzenie tranzystorów falownika rozdzielone jest przez tzw. czas martwy, natomiast w drugim przypadku tranzystory pracują na „zakładkę". Dla pracy optymalnej z wypełnieniem d_{opt}=0,5 falownik miał następujące parametry: f_{opt}=1 MHz, C_{1opt}=57,4 nF, C_{2opt}=18 nF, L_{opt}=1,59 μH, R_{opt}=1 Ω, (Q_{opt}=10), a prąd zasilania J wynosił 1 A.

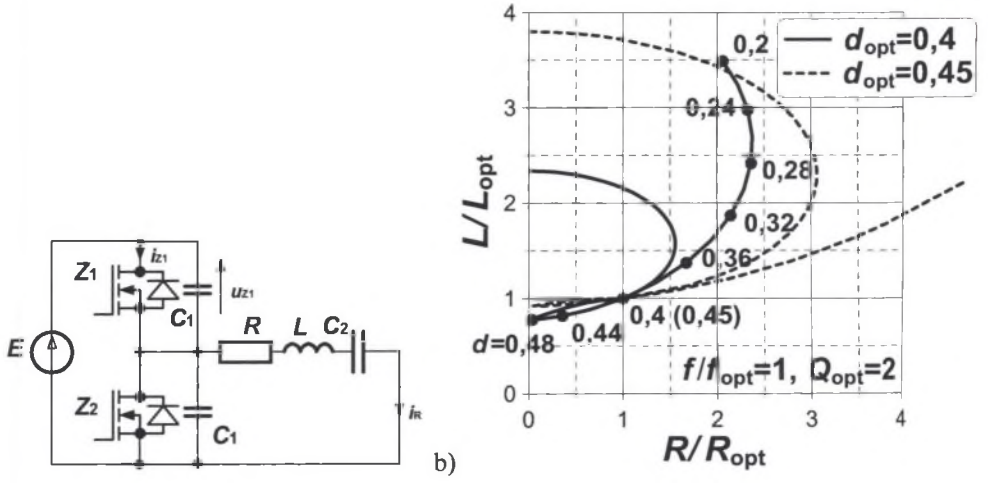


Rys. 6. Przebiegi prądów i napięć w falowniku typu push-pull (rys. 1b) dla punktów: a) $O_{1,34,\,1,11}$ (d=0,4); b) $O_{0,58,\,0,93}$ (d=0,6)

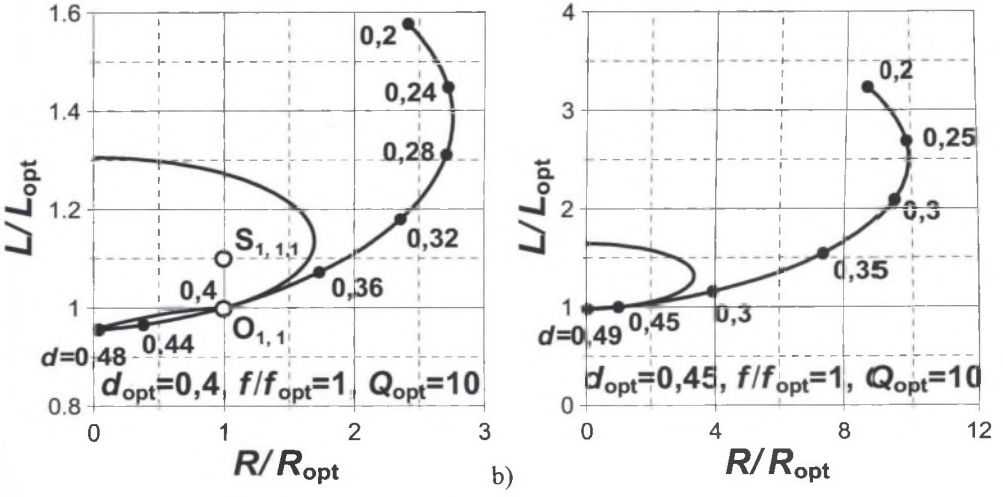
Fig. 6. Current and voltage waveforms in push-pull type inverter (fig. 1b) for points: a) $O_{1,34,\,1,11}$ (d=0,4); b) $O_{0,58,\,0,93}$ (d=0,6)

4. FALOWNIK KLASY DE

Falownik klasy DE (rys. 7) jest falownikiem, w którym może być zrealizowana komutacja maksymalnie miękka (jak w falowniku klasy E) oraz jednocześnie przebieg napięcia na tranzystorze jest zbliżony kształtem do przebiegu prostokątnego (jak w falowniku klasy D). Falownik klasy DE, podobnie jak falownik klasy E, może pracować optymalnie, suboptymalnie oraz nieoptymalnie - tabela 1. Analiza rodzajów pracy falownika została przeprowadzona na płaszczyźnie parametrów (R/R_{opt}, L/L_{opt}). Odpowiednia interpretacja geometryczna zależności rodzaju pracy od wartości parametrów została przedstawiona na kolejnych rysunkach. Wzięto pod uwagę dwa przypadki dobroci Q_{opt}=2 (rys. 7b) i Q_{opt}=10 (rys. 8) oraz dwa przypadki współczynnika wypełnienia d_{opt}=0,4 (rys. 7b, 8a) i d_{opt}=0,45 (rys. 7b, 8b).

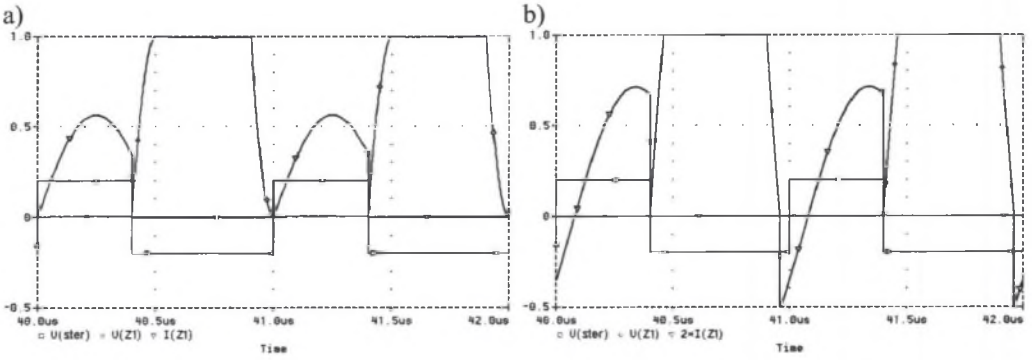


Rys. 7. a) Falownik klasy DE; b) płaszczyzna parametrów falownika dla Q_{opt}=2 (d_{opt}=0,4, 0,45)
Fig. 7. a) Class DE inverter; b) plane of inverter parameters for Q_{opt}=2 (d_{opt}=0,4, 0,45)



Rys. 8. Płaszczyzna parametrów falownika klasy DE (Q_{opt}=10) dla: a) d_{opt}=0,4; b) d_{opt}=0,45
Fig. 8. Plane of Class DE inverter parameters (Q_{opt}=10) for: a) d_{opt}=0,4; b) d_{opt}=0,45

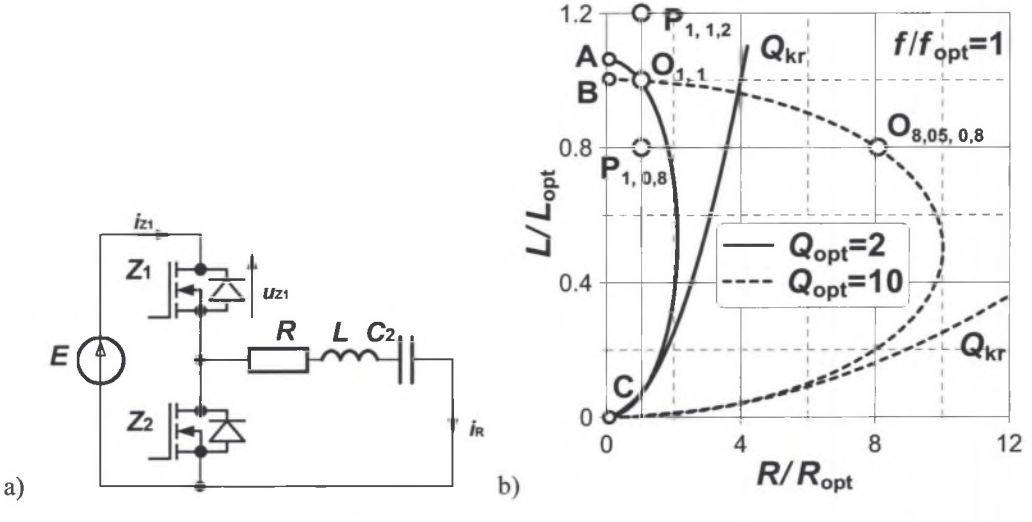
Przykładowe wyniki symulacji dla punktów parametrów $O_{1,1}$ (praca optymalna) i $S_{1,1,1}$ (praca suboptymalna) z rys. 8a zamieszczono na rys. 9. Wymagane parametry do pracy optymalnej falownika klasy DE z wypełnieniem d_{opt}=0,4 wynosiły: f_{opt}=1 MHz, C_{1opt}=9,05 nF, C_{2opt}=16,7 nF, L_{opt}=1,59 μH, R_{opt}=1 Ω, (Q_{opt}=10). Napięcie zasilania falownika E było równe 1 V.



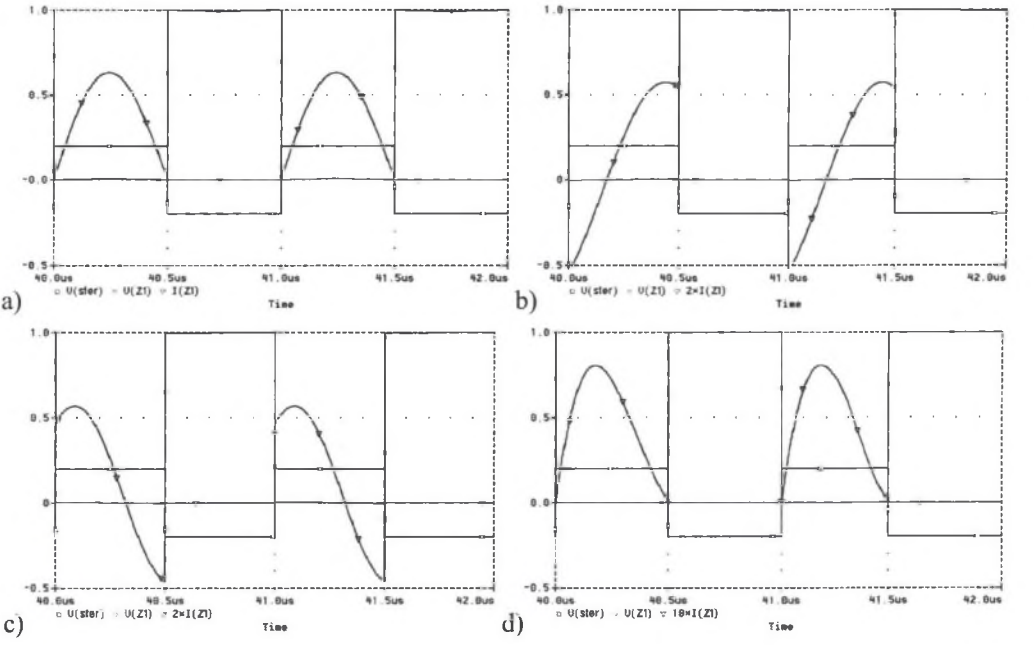
Rys. 9. Przebiegi prądów i napięć w falowniku klasy DE (rys. 7a) dla punktów: a) $O_{1,1}$; b) $S_{1,1,1}$
Fig. 9. Current and voltage waveforms in Class DE inverter (fig. 7a) for points: a) $O_{1,1}$; b) $S_{1,1,1}$

5. FALOWNIK KLASY D

W falowniku klasy D (rys. 10a) można co najwyżej uzyskać przełączanie tranzystorów przy zerowej wartości prądu (ZCS) oraz niezerowej wartości napięcia (NZVS) - praca optymalna tego falownika. Praca ta występuje dla punktów parametrów położonych na krzywych A-$O_{1,1}$-C (Q_{opt}=2) oraz B-$O_{1,1}$-C (Q_{opt}=10) (rys. 10b). Przykładowe wyniki symulacji napięcia sterującego, napięcia i prądu jednego z zaworów dla punktu $O_{1,1}$ oraz $O_{8,05,0,8}$ znajdują się, odpowiednio, na rys. 11a i rys. 11d. Dla punktów znajdujących się na zewnątrz krzywej pracy optymalnej, np. $P_{1,1,2}$ - rys. 10b, falownik pracuje tak, jak zilustrowano to na rys. 11b. Wówczas początkowy prąd tranzystora, z uwzględnieniem prądu diody,



Rys. 10. a) Falownik klasy D; b) płaszczyzna parametrów falownika dla Q_{opt}=2 oraz Q_{opt}=10
Fig. 10. a) Class D inverter; b) plane of inverter parameters for Q_{opt}=2 and Q_{opt}=10



Rys. 11. Przebiegi prądów i napięć w falowniku klasy D (rys. 10a) dla punktów: a) $O_{1,1}$; b) $P_{1,1,2}$; c) $P_{1,0,8}$; d) $O_{8,05,0,8}$

Fig. 11. Current and voltage waveforms in Class D inverter (fig. 10a) for points: a) $O_{1,1}$; b) $P_{1,1,2}$; c) $P_{1,0,8}$; d) $O_{8,05,0,8}$

jest ujemny. Dla pozostałych punktów parametrów falownik realizuje wszystkie inne możliwe przypadki pracy, np. dla $P_{1,0.8}$ jak na rys. 11c. Wtedy również może wystąpić praca z powielaniem częstotliwości. Wyniki symulacji uzyskano dla falownika o parametrach: E=1 V, d=0,5, f_{opt}=1 MHz, C_{2opt}=15,9 nF, L_{opt}=1,59 μH, R_{opt}=1 Ω, (Q_{opt}=10). Na rys. 10b zaznaczono również krzywe krytycznej dobroci obwodu rezonansowego Q_{kr}=0,5.

6. WNIOSKI

Różnice pomiędzy właściwościami falowników klasy E niesymetrycznym i typu push-pull pogłębiają się w miarę zmniejszania dobroci Q_{opt}. Jest to wynik różnych kształtów prądów obciążenia. W falowniku push-pull prąd obciążenia nie zawiera harmonicznych parzystych.

Na płaszczyźnie parametrów (R/R_{opt}, L/L_{opt}) falowniki klas E i DE wykazują podobne właściwości. Obydwa falowniki mogą pracować optymalnie, suboptymalnie i nieoptymalnie.

Zwiększenie dobroci obwodu rezonansowego Q_{opt} falowników klas E i DE powoduje zmniejszenie obszaru ograniczonego przez krzywe pracy optymalnej oraz suboptymalnej.

Zakres dopuszczalnych zmian parametrów względnych L/L_{opt} oraz R/R_{opt} dla pracy optymalnej i suboptymalnej falownika klasy DE jest zależny od wartości współczynnika wysterowania d_{opt}.

Prezentowane w pracy płaszczyzny parametrów (R/R_{opt}, L/L_{opt}) obowiązują również dla falownika klasy E z szeregowym kondensatorem (rys. 4, 5) oraz falowników mostkowych klas DE (rys. 7b, 8) i D (rys. 10b).

Poszerzenie zakresu dopuszczalnego zmian parametrów dla pracy optymalnej i sub-optymalnej można uzyskać przez zastosowanie sterowania częstotliwości i/lub sterowania współczynnika wypełnienia wysterowania. Zamieszczone w pracy charakterystyki mogą być podstawą skonstruowania i określenia właściwości odpowiednich układów sterowania.

Analogicznej analizie może być poddana praca z powielaniem częstotliwości falowników klas D, DE, E.

Wybrane punkty parametrów z płaszczyzn (R/R_{opt}, L/L_{opt}) falowników klas D, DE, E zostały poddane symulacji komputerowej. Ponadto, właściwości falownika klasy E były wielokrotnie weryfikowane eksperymentalnie - np. [3]. Uzyskane wyniki potwierdzają przydatność zastosowanych metod obliczeniowych.

LITERATURA

1. 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.
2. Hamill D.C.: *Impedance plane analysis of class DE amplifier*, Electronics Letters, vol. 30, no. 23, 10th November 1994.
3. Kaczmarczyk Z.: *Analiza energoelektronicznych falowników klasy E wysokiej częstotliwości*, praca sdoktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1996.
4. Kazimierczuk M. K., Puczko K.: *Class E tuned power amplifier with antiparallel diode or series diode at switch, with any loaded Q and switch duty cycle,* IEEE Transactions on Circuits and Systems, vol. 36, no. 9, September 1989, pp. 1201-1209.
5. Kazimierczuk M. K., Czarkowski K.: *Resonant power converters*, J. Wiley & Sons, Ltd. New York 1995.
6. Kazimierczuk M. K., Puczko K.: *Exact Analysis of Class E tuned power amplifier at any Q and switch duty cycle*, IEEE Trans. on Circ. and Sys., vol.CAS-34, no.2, II 1987, 149-159.
7. Sokal N. O., Sokal A. D.: Class E - a new class of high-efficiency tuned single-ended switching power amplifiers, IEEE J. Solid-State Circ., vol. SC-10, no.3, VI 1975, 168-176.
8. Raab F. H.: Idealized operation of the Class E tuned power amplifier, IEEE Transactions on Circuits and Systems, vol. CAS-24, no. 12, December 1977, pp. 725-735.
9. Raab F. H.: *Effects of circuit variations on the Class E tuned power amplifier,* IEEE J. Solid-State Circuits, vol. SC-13, no. 2, April 1978, pp. 239-247.

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

Recenzent: Dr hab. inż. Marek Hartman, prof. AM

Wpłynęło do Redakcji: 17 maja 2004 r.