

Sterowanie falownika klasy DE metodą PWM-FM

Streszczenie. W artykule opisano właściwości sterowania PWM-FM off-line przy założeniu, że przełączanie tranzystorów Mosfet falownika odbywa się przy komutacji optymalnej. Wyznaczono teoretyczne charakterystyki sterowania mocy wyjściowej. W oparciu o laboratoryjny model falownika idealnego klasy DE z tranzystorami Mosfet (10 kHz/500 W) wyznaczono charakterystyki sterowania dla komutacji optymalnej krótkiej i długiej. Zamieszczono niespotykane w literaturze oscylogramy pokazujące pracę falownika przy krótkiej i długiej komutacji optymalnej.

Abstract. PWM-FM off-line control properties of Class DE inverter are presented in the paper. Optimum commutation of Mosfets is assumed. Theoretical characteristics of output power control were calculated. Based on laboratory model of ideal Class DE Mosfet inverter (10 kHz/500 W), control characteristic of short and long commutation were measured. Oscillograms of short and long commutation processes in Class DE inverter that were not published before, are presented too. (PWM-FM control of Class DE inverter).

Słowa kluczowe: falownik klasy DE, PWM, Mosfet, komutacja optymalna.
Keywords: Class D inverter, Mosfet, PWM, optimum commutation.

doi:10.12915/pe.2014.06.16

Wstęp

Artykuł dotyczy falownika klasy DE sterowanego metodą PWM-FM w warunkach komutacji optymalnej i jest kontynuacją prac nad falownikami wielkiej częstotliwości, które prowadzone są w Katedrze Energoelektroniki Napędu Elektrycznego i Robotyki (KENER). Problematyce falowników klasy DE i ich zastosowaniu poświęconych jest wiele artykułów. Podstawy teoretyczne falownika klasy DE opisano np. w [1], [2] przy założeniu sinusoidalnego prądu odbiornika LRC (duża wartość dobroci Q odbiornika). Obecnie analizy właściwości falownika są bardziej złożone i uwzględniają skończoną wartość dobroci Q odbiornika oraz szeroką zmienność współczynnika wypełnienia załączenia tranzystora [3]. Najnowsze badania z zakresu falowników klasy DE uwzględniają nieliniowość pojemności wyjściowej C_{OSS} tranzystorów Mosfet i jej wpływ na proces komutacji optymalnej [4], [5], [6]. Częstotliwości pracy opisywanych w literaturze falowników klasy DE ograniczają się do 13,56 MHz.

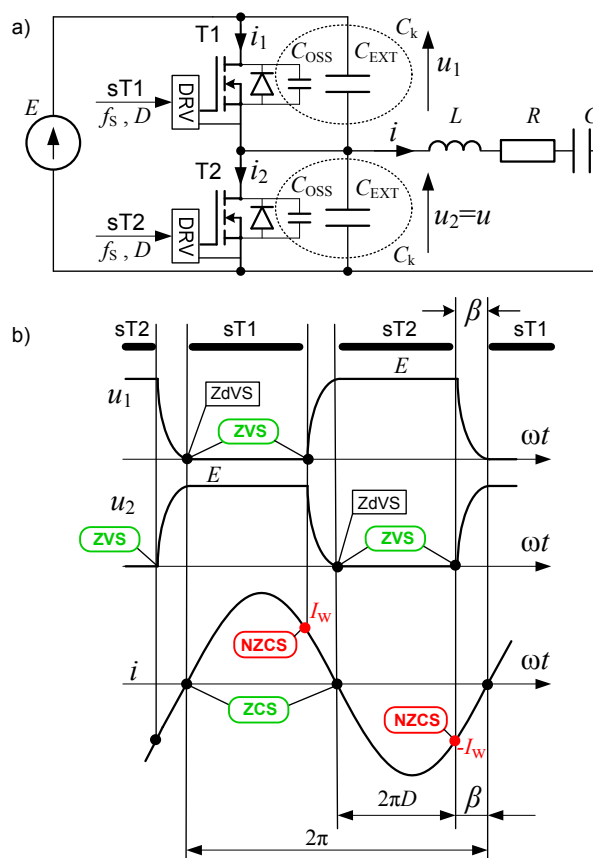
Celem artykułu jest pokazanie możliwości sterowania mocy wyjściowej falownika klasy DE metodą PWM-FM. Metoda ta wynika bezpośrednio z właściwości falownika klasy DE, tj. konieczności jednoczesnej zmiany częstotliwości sterowania f_s (FM) oraz współczynnika wypełnienia załączenia D (PWM) w celu dostrojenia do komutacji optymalnej.

Na rysunku 1a pokazano schemat falownika klasy DE z tranzystorami Mosfet. Kondensator komutacyjny C_k reprezentuje łączną pojemność wyjściową C_{OSS} tranzystora a kondensator C_{EXT} reprezentuje opcjonalnie dołączony kondensator dodatkowy oraz pojemność pasywną, np. pojemność między warstwami obwodu drukowanego. Zasadę działania falownika opisuje się wykorzystując model falownika z tranzystorami idealnymi [6], o zerowych czasach przełączania, przy komutacji optymalnej. Pojemność $C_k = C_{OSS} + C_{EXT}$ jest liniowa. Działanie falownika (rys.1b) ilustrują przebiegi napięć u_1 , u_2 tranzystorów, prądu i odbiornika oraz sygnały $sT1$ i $sT2$ sterowania tranzystorów. Zastosowanie sterowania z odpowiednio dobranym współczynnikiem wypełnienia D umożliwia takie przeładowanie kondensatorów C_k , że uzyskuje się przełączanie tranzystorów, które jest nazywane optymalnym: wyłączenie ZVS+NZCS przy prądzie tranzystora/odbiornika oznaczonym jako I_w , załączenie ZVS+ZCS z dodatkowym warunkiem zerowej wartości pochodnej napięcia tranzystora określane jako $ZdVS$. Kąt β nazywa się kątem komutacji optymalnej i spełnia on zależność $\beta = 2\pi(0,5-D) = \omega t_k$, natomiast czas t_k , to czas komutacji optymalnej.

Możliwości sterowania mocy wyjściowej falownika klasy DE

Przy założeniu, że w falowniku realizowana jest komutacja optymalna a sterowanie odbywa się w trakcie pracy falownika (on-line), to możliwości sterowania mocy wyjściowej są ograniczone do dwóch metod: AM i PDM.

Metoda Amplitudowa (AM) polega na zmianie napięcia zasilania E falownika ($f_s, D = \text{const}$) przy czym komutacja optymalna jest możliwa przy założeniu liniowych i stacjonarnych parametrów odbiornika LRC i pojemności C_k . W rzeczywistości nieliniowa pojemność C_{OSS} tranzystora ma wpływ na proces komutacji optymalnej i wymagane parametry sterowania (f_s, D) co autor opisał w [5].



Rys.1. Falownik klasy DE: a) schemat falownika, b) przebiegi sterowania $sT1$ i $sT2$, napięć u_1 i u_2 tranzystorów oraz prądu i odbiornika dla modelu idealnego w stanie komutacji optymalnej

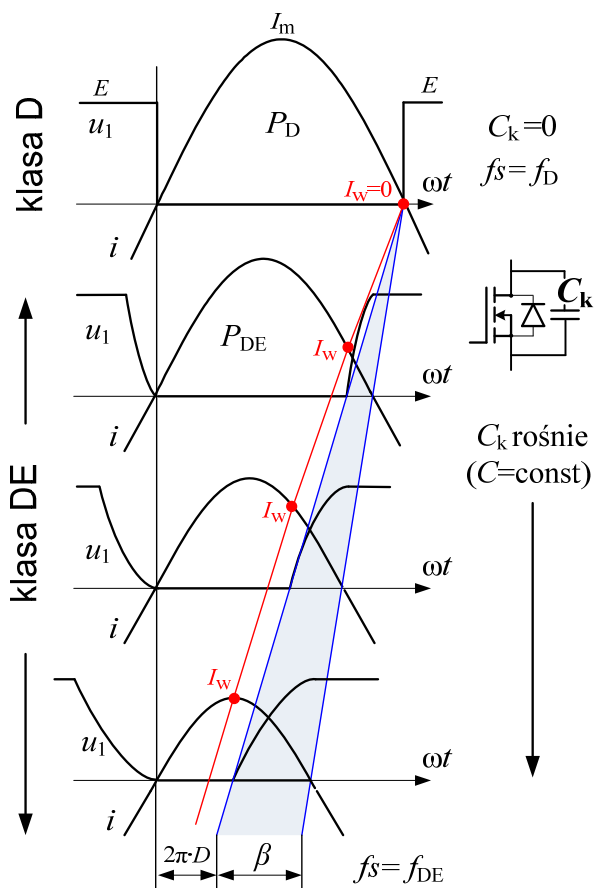
Metoda Modulacji Gęstości Impulsów (PDM) została opisana m.in. w [7] gdzie nazywana jest „thinned-out method” (przerzedzanie impulsów). Należy jednak zwrócić uwagę, że w metodzie tej co okres sterowania występują krótkotrwałe stany nieustalone i komutacje inne niż optymalna. Ponadto w metodzie tej uzyskuje się dyskretne wartości mocy wyjściowej.

W literaturze opisano również inne, znane metody sterowania mocy wyjściowej w zastosowaniu do falowników klasy DE: Metodę Częstotliwościową (FM) [8] oraz metody mieszane PWM/FM [9], [10] stosowane do sterowania falownika w trakcie jego pracy (on line). Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że sterowanie on-line falownika DE metodami FM lub PWM zawsze wiąże się z odstępianiem od komutacji optymalnej. Wynika to z właściwości falownika klasy DE dla którego istnieje jedna para parametrów sterowania (f_s, D) która zapewnia uzyskanie komutacji optymalnej (tzw. komutacji krótkiej KK lub pierwszej [6], [8]).

Na podstawie szczegółowych badań falownika klasy DE prowadzonych przez autora, opisuje się właściwości sterowania określonego jako PWM-FM które wraz z doбором pojemności C_k ustala punkt pracy i moc wyjściową falownika przy zachowaniu komutacji optymalnej.

Właściwości sterowania PWM-FM przy komutacji optymalnej

Na rysunku 2 w sposób poglądowy pokazano przebiegi napięcia u_1 tranzystora na tle prądu i odbiornika przy zmianie wartości pojemności C_k i niezmiennych parametrach odbiornika LRC. Przebieg górny ilustruje pracę falownika klasy D ($C_k=0$) przy częstotliwości rezonansowej (ZCS) – przypadkowi temu odpowiada maksymalna



Rys.2. Przebiegi napięcia u_1 tranzystora na tle prądu i odbiornika przy zmianie wartości pojemności C_k i niezmiennych parametrach odbiornika LRC przy zachowaniu komutacji optymalnej

moc wyjściowa P_D oraz częstotliwość pracy $f_s=f_D$, gdzie f_D to częstotliwość drgań własnych (tłumionych) szeregowego odbiornika LRC. Amplituda prądu odbiornika I_m przyjmuje wartość maksymalną. Współczynnik wypełnienia załączenia tranzystora $D=0,5$. Przypadki dla falownika klasy DE ($C_k>0$) wskazują na konieczność zmniejszenia współczynnika D (modulacja PWM, $D<0,5$) i zwiększenia częstotliwości przełączania (modulacja FM, $f_s>f_D$). W efekcie prowadzi to do zmniejszenia mocy wyjściowej ($P_{DE}<P_D$) i wzrostu prądu wyłączania tranzystora ($I_w>0$).

Właściwości opisane powyżej przeanalizowano przyjmując model idealny tranzystora oraz odbiornik LRC bez uproszczeń [6]. Model numeryczny sformułowano w taki sposób, że danymi wejściowymi są następujące parametry falownika: $b=C/C_k$ oraz dobroć odbiornika $Q=\omega L/R$. W wyniku wyznaczonego parametry sterowania PWM-FM wymagane do uzyskania komutacji optymalnej:

- współczynnik wypełnienia załączenia D tranzystora,
- względną częstotliwość przełączeń $\omega_D=f_s/f_D$

oraz względną moc wyjściową P_{DE}/P_D .

Wymienione powyżej parametry zamieszczono w postaci wykresów na rysunku 3, jako funkcję współczynnika b i dobroci Q . Na wykresach zaznaczono punkty (ozn. G), które wyznaczają granicę realizowalności komutacji optymalnej [6]. Poniżej skomentowano ww. wykresy:

- Współczynnik wypełnienia załączenia D tranzystora (rys.3a) maleje gdy maleje wartość parametru b . W praktyce, przy założeniu stałej wartości C , malenie wartości b oznacza wzrost wartości pojemności C_k i tym samym większy kąt komutacji optymalnej β . Ma to swoje uzasadnienie w wielkości ładunku niesionego przez prąd odbiornika, który musi przeładować większe pojemności C_k .

- Względna częstotliwość przełączeń $\omega_D=f_s/f_D$ (rys.3b) - odniesieniem jest częstotliwość drgań własnych f_D odbiornika LRC. Częstotliwość pracy f_s rośnie wraz ze wzrostem pojemności C_k , ponieważ rośnie kąt komutacji β w którym obowiązuje obwód komutacyjny LRC- $2C_k$. Obwód ten charakteryzuje się większą częstotliwością drgań własnych w stosunku do częstotliwości obwodu LRC.

- Względną moc wyjściową P_{DE}/P_D (rys.3c) uzyskano odnosząc moc wyjściową falownika DE do mocy falownika klasy D ($C_k=0, b\rightarrow\infty, ZCS, D=0,5$). Z wykresu wynika, że moc maleje wraz ze zmniejszeniem parametru b . Jest to spowodowane dwoma czynnikami: a) wydłużaniem komutacji (kąt β), w czasie której ze źródła E nie jest dostarczana energia, b) zwiększaniem częstotliwości f_s i odstrajaniem od rezonansu.

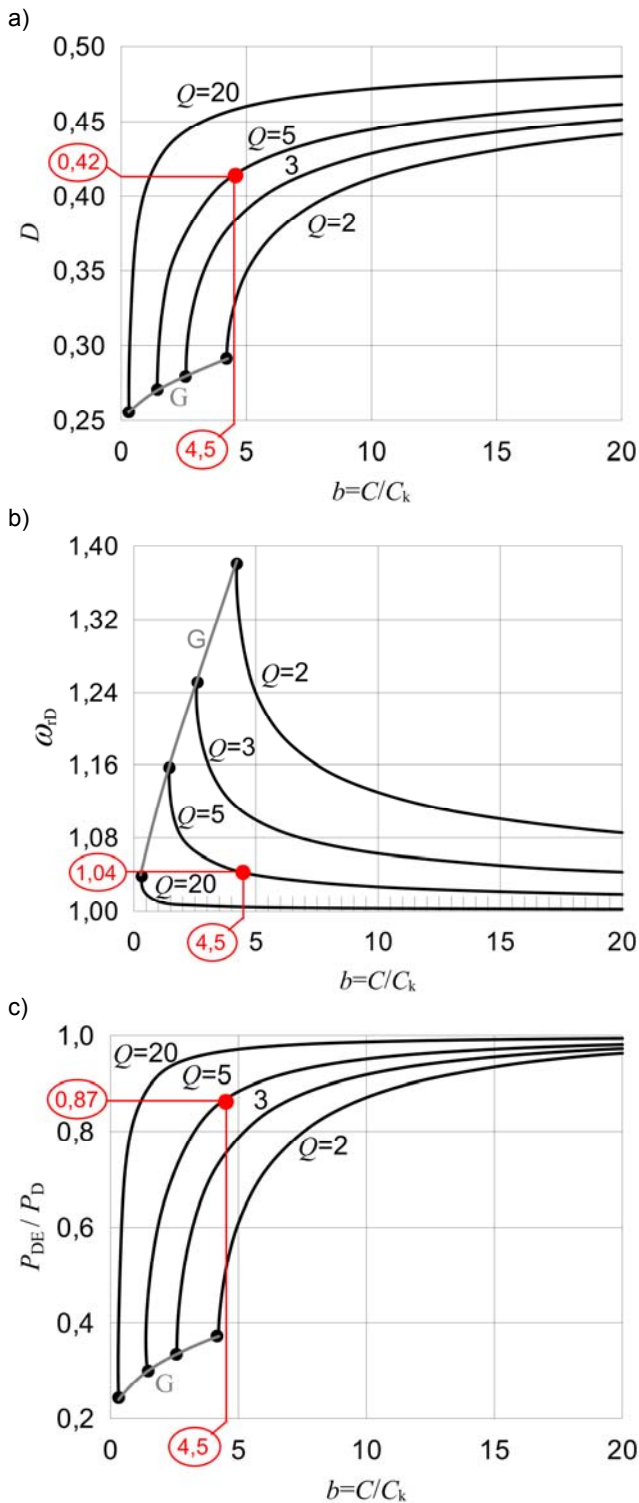
Przykładowo, dla parametru $b=C/C_k=4,5$ i odbiornika o dobroci $Q=5$, uzyskuje się: względną moc wyjściową $P_{DE}/P_D=0,87$ (rys.3c), współczynnik $D=0,42$ (rys.3a) oraz względną częstotliwość przełączeń $\omega_D=f_s/f_D=1,04$ (rys.3b), co odpowiada wynikom eksperymentu laboratoryjnego.

Krótką i długą komutacja optymalna

Analizując właściwości falownika klasy DE przy sterowaniu PWM-FM i komutacji optymalnej, można wykazać [6], [8], że komutacja optymalna może być zrealizowana na dwa sposoby:

- komutacja krótka KK (podstawowa, mały kąt komutacji optymalnej β),
- komutacja długa KD (duży kąt komutacji optymalnej β).

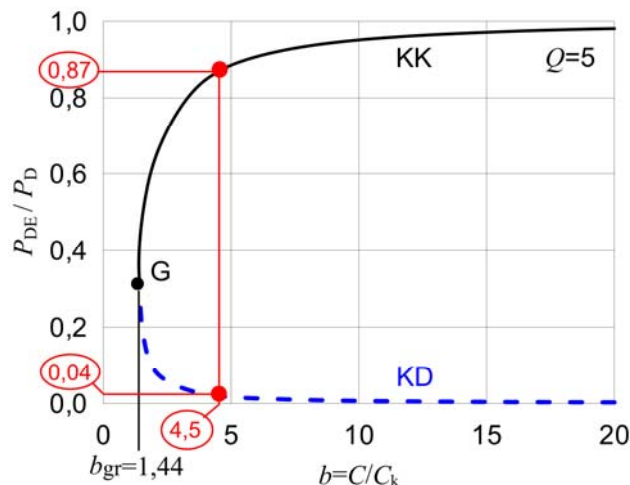
W literaturze fakt istnienia komutacji długiej KD jest pomijany, głównie ze względu na panujący pogląd, że moc wyjściowa falownika jest bardzo niska i wynosi kilka procent w odniesieniu do mocy falownika przy komutacji krótkiej KK. W artykule przedstawione zostaną tylko charakterystyki mocy P_{DE}/P_D dla komutacji: KK i KD. Pozostałe charakterystyki i szerszy opis zagadnienia zamieszczono w [6].



rys.3. Charakterystyki sterowania PWM-FM falownika klasy DE przy komutacji optymalnej: a) współczynnik wypełnienia załączenia D tranzystora, b) względna częstotliwość przełączania $\omega_D=f_s/f_D$, c) względna moc wyjściowa P_{DE}/P_D

Na rysunku 4 pokazano wykresy mocy wyjściowej P_{DE}/P_D w obszarach obu komutacji: KK i KD. Podobnie jak wcześniejsze charakterystyki, są one funkcją parametru $b=C/C_k$ oraz dobroci Q odbiornika. Wykreślono je tylko dla $Q=5$, ale są wystarczające do pokazania właściwości sterowania mocy wyjściowej. Wykres jest dwuczęściowy: linią przerywaną zaznaczono charakterystyki komutacji długiej KD. Linią ciągłą zaznaczono charakterystyki komutacji krótkiej KK, które wcześniej zamieszczono na

rysunku 3c. Charakterystyki komutacji KD są kontynuacją charakterystyk KK. Punktem podziału jest punkt G komutacji granicznej, dla którego jest możliwy tylko jeden typ komutacji (KK=KD). Charakterystyki potwierdzają istnienie dwóch komutacji optymalnych dla $b>b_{gr}$. Najważniejszym wnioskiem dla komutacji KD jest to, że względna moc wyjściowa P_{DE}/P_D (rys.4) maleje ze wzrostem wartości b , osiągając wartości poniżej 1% dla $b>6$. Maksymalna moc względna wynosi ok. 30% dla granicy komutacji optymalnej (punkt G na wykresie, $b_{gr}=1,44$).



Rys.4. Wykres względnej mocy P_{DE}/P_D przy sterowaniu PWM-FM dla komutacji krótkiej KK (linia ciągła) oraz komutacji długiej KD (linia przerywana)

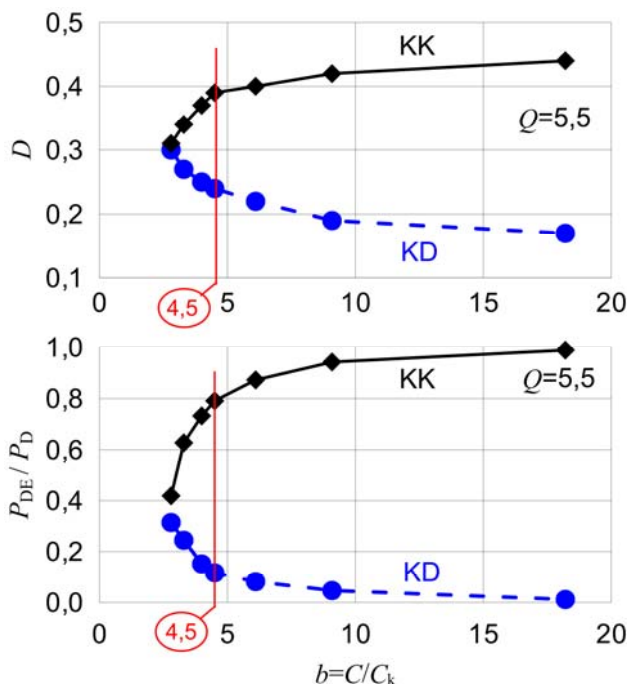
Weryfikacja laboratoryjna wyników

Wyniki analiz numerycznych zweryfikowano laboratoryjnie wykorzystując zaprojektowany w tym celu dydaktyczny falownik klasy DE o częstotliwości pracy ok. (5-10) kHz [11]. Zastosowanie falownika o tak niskiej częstotliwości pracy z tranzystorami Mosfet o małej rezystancji przewodzenia ($0,2 \Omega$) i małej pojemności wyjściowej ($C_{OSS}=450$ pF) miało na celu zbliżenie parametrów falownika do modelu idealnego, w którym czas przełączania tranzystora można uznać za pomijalny w porównaniu do okresu pracy ($t_R/t_F=33/30$ ns, $T=100$ μ s). Parametry falownika są następujące: Tranzystory Mosfet: IXFH26N50, $V_{DSS}=500$ V, $I_D=26$ A, $R_{DS(on)25}=0,2 \Omega$, $t_R/t_F=33/30$ ns, $C_{OSS}=450$ pF, diodę IR2110, $E=100$ V, $L=2,12$ mH, $R=13,2 \Omega$ (konfigurowane co $2,2 \Omega$), $C=400$ nF, C_{EXT} - konfigurowane z kondensatorów 2×100 nF i 4×22 nF, $Q=5,5$, $f_D=5,46$ kHz, $P_D=300$ W.

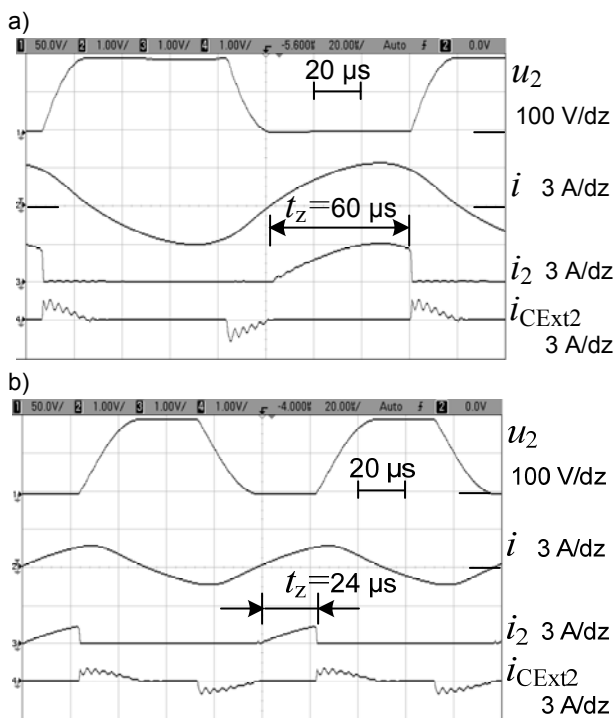
Na rysunku 5 zamieszczono zmierzone charakterystyki współczynnika D oraz względnej mocy wyjściowej P_{DE}/P_D dla komutacji KK i KD. Ich kształt jest zgodny z charakterystykami wyznaczonymi teoretycznie dla $Q=5$ (rys.4), chociaż zmierzono je dla $Q=5,5$ ze względu na dyskretne wartości rezystancji R odbiornika. Na rysunku 6 zamieszczono przebiegi oscyloskopowe dla komutacji KK i KD a odpowiadające im parametry pracy zamieszczono w tabeli 1. Dodatkowo punkty te zaznaczono na wykresach z rysunku 5 dla $b=4,5$. Współczynnik b wyznaczono według zależności: $b=C/C_k=C/(C_{EXT}+C_{OSS})=400\text{nF}/(88\text{nF}+0,45\text{nF})=4,5$.

Tabela 1. Parametry pracy falownika dla oscylogramów z rysunku 6

Komut.	D	f_s , kHz	$\omega_D=f_s/f_D$	P_{DE} , W	P_{DE}/P_D
KK rys.6a	0,39	6,56	1,20	240	0,8
KD rys.6b	0,24	10	1,83	30	0,1
$Q=5,5$, $b=4,5$, $f_D=5,46$ kHz, $P_D=300$ W, $E=100$ V, $R=13,2 \Omega$					



Rys.5. Zmierzone charakterystyki sterowania PWM-FM falownika klasy DE przy komutacji optymalnej krótkiej KK i długiej KD



Rys.6. Przebiegi czasowe w falowniku klasy DE: a) komutacja optymalna krótka KK, b) komutacja optymalna długa KD; t_z – czas załączenia tranzystora odpowiadający współczynnikowi $D=t_z/T_s$

Wnioski

- Z przeprowadzonej analizy możliwych metod sterowania mocy wyjściowej falowników klasy DE wynika, że jedynie metody AM i IPDM mogą zapewnić uzyskanie komutacji optymalnej przy sterowaniu on-line.
- Opisane sterowanie PWM-FM jest typu off-line, tzn. że dla uzyskania określonej mocy wyjściowej odbiornika LRC, należy dobrać wartość parametru b (pojemność C_k) oraz parametry sterowania (f_s , D) odpowiednio w celu uzyskania komutacji krótkiej KK lub długiej KD. Sterowanie PWM-FM

podczas pracy falownika (on-line) prowadzi do odstrojenia od komutacji optymalnej.

- Główną cechą sterowania PWM-FM przy komutacji krótkiej KK jest to, że moc wyjściowa maleje wraz ze zwiększaniem pojemności C_k (przy stałej wartości C), rośnie częstotliwość sterowania f_s oraz maleje współczynnik wypełnienia D tranzystora.
- Istotnym problemem komutacji długiej KD jest spadek względnej mocy wyjściowej P_{DE}/P_D poniżej 1% dla parametrów $b>6$. Upatruje się jednak możliwość zastosowania komutacji KD dla małych wartości parametru $b=(2-5)$ oraz dobroci $Q=(2-5)$, dla których moce wyjściowe osiągają wartości ok. (20-35)% mocy maksymalnej P_D .
- Problematykę komutacji krótkiej KK i długiej KD przedstawiono w sposób szerszy niż spotykany w literaturze. Nowością są wyznaczone pomiarowo charakterystyki współczynnika D i względnej mocy wyjściowej P_{DE}/P_D w zakresie komutacji krótkiej KK i długiej KD. Ponadto w dostępnej literaturze nie publikowano przebiegów obrazujących komutację długą KD, ograniczając się jedynie do teoretycznego wykazania takiej możliwości pracy.

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*, 43 (1996), n.1, 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, vol. 5, (1994), 105-108
- [3] Oshikawa S., Sekiya H., Lu J., Yahagi T., Design of Class DE Amplifier with Any Output Q, Any Duty Ratio and Switch on Resistance, *Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS 2003*, Vol. 3, 280-283
- [4] Sekiya H., Watanabe T., Suetsugu T., Kazimierzczuk M.K., Analysis and Design of Class DE Amplifier With Nonlinear Shunt Capacitances, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 56 (2009), n.10, 2362-2371
- [5] Kasprzak M., Falownik klasy DE 13,56 MHz / 450 W – wpływ nieliniowej pojemności wyjściowej tranzystora MOSFET na sterowanie metodą AM, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, 88 (2012), nr 4b, 123-127
- [6] Kasprzak M., Falowniki rezonansowe klasy D i DE o częstotliwościach pracy do 13,56 MHz, monografia habilitacyjna, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, ISBN 978-83-7880-037-8, Gliwice 2013
- [7] Sekiya H., Matsuo M., Koizumi H., Suetsugu T., Mori S., Sasase I.: New Control Method of Class DE Inverter-Class DE Thinning-out Inverter, *Twentieth International Telecommunications Energy Conference, INTELEC 1998*, 237-242
- [8] Modzelewski J., Mikołajewski 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, 1423-1428
- [9] 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*, 51 (2004), n.7, 1250 – 1260
- [10] Sekiya H., Sasase I., Mori S., Exact Analysis of Class DE Amplifier with FM and PWM Control, *IEICE Trans. on Communication*, E1-B (2003), n.1, 1-12
- [11] Cenacewicz K., Stec D., Schombera P., Tomaszczyk T., Stanowisko do badania właściwości falownika rezonansowego klasy DE, *Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki Napędu Elektrycznego i Robotyki*, Gliwice 2013

Autorzy: dr inż. Marcin Kasprzak, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: marcin.kasprzak@polsl.pl