

Właściwości i badania laboratoryjne wysokoczęstotliwościowego falownika klasy EF z ćwierćfalową linią długą

Streszczenie. W artykule przedstawiono podstawowe właściwości i badania laboratoryjne wysokoczęstotliwościowego falownika klasy EF (20 MHz, 400 W, 91,2%) z ćwierćfalową linią długą dołączoną po stronie zasilania. Falownik ten zawiera jeden tranzystor, przebieg napięcia tranzystora zbliżony jest do prostokątnego oraz występuje przełączanie miękkie tranzystora typowe dla klasy E. Zastosowany tranzystor MOSFET serii DE sterowany jest za pomocą dedykowanego, niskostratnego sterownika bramkowego własnej konstrukcji. Wyjaśniono metodę optymalizacji parametrów falownika klasy EF ze względu na sprawność, którą zrealizowano z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS Simplorer i wbudowanego algorytmu genetycznego. Koncepcja falownika klasy EF została pozytywnie zweryfikowana laboratoryjnie. Zarejestrowano przykładowe przebiegi czasowe napięć tranzystora oraz wyznaczono wybrane parametry falownika.

Abstract. Some basic properties and laboratory tests of high-frequency Class EF inverter (20 MHz, 400 W, 91.2%) with quarter-wave transmission line on the supply side are presented in the article. The inverter contains one transistor, the transistor voltage waveform is close to a rectangular one and the soft-switching of the transistor is realized as typically in Class E. The applied DE-series MOSFET transistor was controlled by a dedicated, low-loss driver of its own design. The optimization method of the Class EF inverter parameters to maximize efficiency was explained. It was implemented using ANSYS Simplorer software and a built-in genetic algorithm. The concept of the Class EF inverter was positively verified in the laboratory. Examples of transistor voltage waveforms were recorded and selected inverter parameters were determined. (**Properties and laboratory tests of high-frequency Class EF inverter with quarter-wave transmission line**).

Słowa kluczowe: falownik rezonansowy, falownik klasy EF, nieskostratny sterownik bramkowy, algorytm genetyczny.

Keywords: resonant inverters, Class EF inverter, high-frequency, soft-switching, low-losses gate driver, genetic algorithm.

Wstęp

Realizacja specyficznych wymagań technologicznych oraz możliwość miniaturyzacji sprawia, że falowniki rezonansowe o megahercowych częstotliwościach pracy stają się coraz bardziej popularne i powszechne w użytkowaniu. Ich przykładowe zastosowania przemysłowe i medyczne to: nagrzewanie indukcyjne i pojemnościowe, indukcyjna generacja plazmy niskotemperaturowej, diagnostyka medyczna w postaci np. aparatury do rezonansu magnetycznego oraz zasilania układów implantowych [1].

Układy energoelektroniczne pracujące z częstotliwościami rzędu megaherców (MHz) i mocami wyjściowymi do kilku kilowatów wymagają stosowania wyspecjalizowanego obwodu rezonansowego oraz co najmniej jednego tranzystora MOSFET mocy sterowanego za pomocą sterownika bramkowego (ang. Gate Driver). Przedstawicielem tej grupy układów jest falownik klasy EF [2, 3, 4], który jest jednotranzystorowym odpowiednikiem mostkowego lub półmostkowego falownika klasy DE [3, 4, 5, 6]. Do zalet falownika klasy EF zaliczyć można:

- prostotę, gdyż w jego obwodzie głównym występuje tylko jeden tranzystor, którego źródło znajduje się na potencjale masy;
- małą wartość stosunku wartości szczytowej napięcia tranzystora do napięcia zasilania, nieprzekraczającą zwykle 2;
- uzyskiwaną komutację miękką tranzystora, identyczną jak w falowniku klasy E [4, 6, 8] – załączanie w warunkach zerowego napięcia (ZVS) i zerowego prądu (ZCS) oraz wyłączenie w warunkach zerowego napięcia (ZVS) i niezerowego prądu (NZCS);

Wynikiem miękkiej komutacji tranzystora jest względnie wysoka sprawność falownika klasy EF (przekraczająca 90% w zastosowaniach wysokoczęstotliwościowych) oraz niski poziom emitowanych zakłóceń elektromagnetycznych. Z kolei zasadniczą wadą opisywanego falownika jest jego wrażliwość na zmiany parametrów obwodu rezonansowego.

Falownik klasy EF wykorzystuje dołączoną po stronie zasilania ćwierćfalową linią długą, dzięki której uzyskuje się

korzystny, zbliżony do prostokątnego kształt przebiegu napięcia tranzystora. Dla danej wartości szczytowej napięcia tranzystora umożliwia to zwykle zasilanie falownika klasy EF napięciem około 1,8-krotnie wyższym w porównaniu z falownikiem klasy E [4, 6, 8] lub dla danego napięcia zasilania zastosowanie tranzystora o odpowiednio niższym napięciu dopuszczalnym.

W celu zapewnienia wymaganych krótkich czasów przełączeń tranzystora MOSFET (na poziomie kilku nanosekund) oraz uzyskania wysokiej sprawności konieczne staje się zastosowanie wyspecjalizowanego sterownika bramkowego [8, 10, 12]. Sterownik ten powinien zapewnić przełączanie bramki tranzystora przy ograniczonych stratach mocy z zadaną częstotliwością i wypełnieniem.

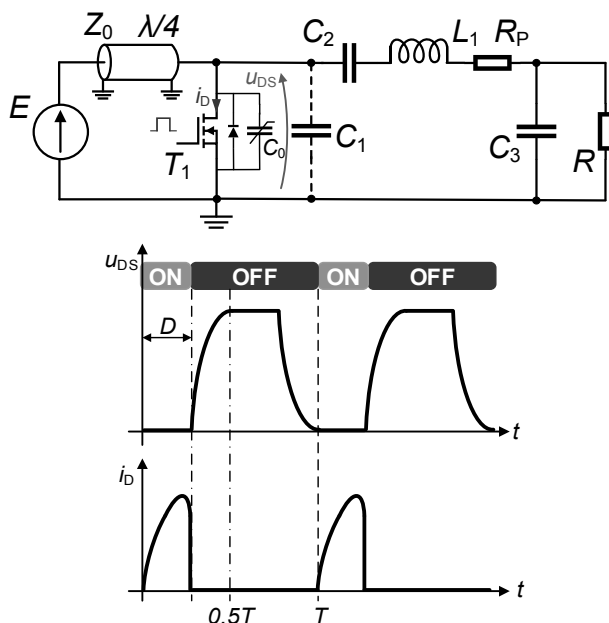
Głównym celem artykułu jest przedstawienie ogólnych właściwości wysokoczęstotliwościowego falownika klasy EF z ćwierćfalową linią długą dołączoną po stronie zasilania oraz zaprezentowanie efektywnej metody optymalizacji, wykorzystującej opracowany model komputerowy falownika i algorytm genetyczny wbudowany w oprogramowanie ANSYS Simplorer.

W ramach weryfikacji metody optymalizacji wykonano prototyp laboratoryjny falownika o częstotliwości pracy wynoszącej 20 MHz i mocy wyjściowej 400 W, w którym tranzystor MOSFET serii DE sterowany był za pomocą niskostratnego drajwera własnej konstrukcji. Opis właściwości falownika klasy EF, ćwierćfalowej linii długiej oraz niskostratnego drajwera przedstawiono w kolejnych rozdziałach niniejszego artykułu. W jego drugiej części zamieszczono opis opracowanego modelu komputerowego, zastosowanej metody optymalizacji oraz uzyskanych wyników badań laboratoryjnych.

Falowniki klasy EF podstawowe właściwości

Na rysunku 1 przedstawiono schemat falownika klasy EF wraz z typowymi przebiegami napięcia i prądu tranzystora. Falownik zasilany jest poprzez ćwierćfalową ($\lambda/4$) linią długą o impedancji charakterystycznej Z_0 . Charakterystyka częstotliwościowa modułu impedancji $|Z_0|$ i fazy θ

ćwierćfalowej linii długiej zwartej na jej końcu wykazuje naprzemienne rezonanse równoległe i szeregowe (rys. 2). Zastosowanie linii długiej w torze zasilania falownika powoduje uzyskanie quasi-prostokątnego kształtu przebiegu napięcia tranzystora [6, 8]. Tranzystor MOSFET przełączany jest ze współczynnikiem wypełnienia D mniejszym niż 0,5 (zwykle około 0,25). Załączanie tranzystora odbywa się w warunkach zerowego napięcia (ZVS) i zerowego prądu (ZCS), przy czym warunek ZCS równoważny jest warunkowi zerowej pochodnej napięcia (ZdVS). Spełnienie wspomnianych warunków oznacza optymalną pracę falownika klasy EF.



Rys. 1. Schemat laboratoryjnego falownika klasy EF wraz z przykładowymi przebiegami prądu i napięcia tranzystora

Na schemacie falownika klasy EF (rys. 1) wyróżnić można dodatkowe elementy:

- kondensator C_1 przyłączony równoległe do tranzystora, który dla odpowiednio wysokiej częstotliwości pracy falownika może zostać pominięty, a jego rolę przejmuje nieliniowa pojemność wyjściowa tranzystora MOSFET oznaczona jako C_0 ;
- kondensator C_2 , który pełni rolę kondensatora blokującego składową stałą napięcia, jego reaktancja jest pomijalnie mała dla składowej przemiennej;
- cewkę rezonansową L_1 z jej rezystancją pasożytniczą R_P ;
- kondensator rezonansowy C_3 , który jednocześnie umożliwia uzyskanie wymaganego dopasowania rezystancji obciążenia R ;
- rezystor R stanowiący obciążenie o standardowej wartości wynoszące 50Ω .

Zakładając, że prąd obwodu rezonansowego falownika jest sinusoidalny, tranzystor MOSFET jest bezstratny, jego pojemność wyjściowa jest liniowa i czasy przełączania są pomijalnie małe, a pozostałe elementy falownika klasy EF (rys. 1) są idealne ($R_P = 0 \Omega$), na bazie [6] uzyskuje się następujące uproszczone zależności projektowe:

$$(1) \quad L_1 = \left[\frac{\tau - \sin \tau \cdot \cos \tau}{\sin^2 \tau} + Q \right] \cdot \frac{R}{(1+Q^2)\omega}$$

$$(2) \quad C_3 = \frac{Q}{\omega \cdot R}$$

$$(3) \quad C_0 = \frac{\sin^2 \tau}{\pi} \cdot \frac{1+Q^2}{\omega \cdot R}$$

$$(4) \quad P = \frac{2 \cdot (1 + \cos \tau)^2}{\pi^2} \cdot \frac{E^2 \cdot (1 + Q^2)}{R}$$

gdzie: Q – dobroć wyjściowego obwodu rezonansowego, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – pulsacja przełączeń, f – częstotliwość przełączeń, P – moc czynna falownika, $\tau = 2 \cdot \pi \cdot (0,5 - D)$.

Dla założonej częstotliwości pracy parametry Q oraz τ , umożliwiają pewną swobodę projektowania falownika klasy EF w zakresie pojemności wyjściowej C_0 tranzystora MOSFET (3) oraz napięcia zasilania E i mocy P (4). Pozostałe parametry falownika (L_1 , C_3) mogą zostać wyznaczone na podstawie zależności (1) i (2).

W dalszej części artykułu przedstawiono wybraną problematykę dotyczącą: ćwierćfalowej linii długiej, niskostratnego sterownika bramkowego, modelu komputerowego i metody optymalizacji parametrów falownika klasy EF oraz jego badań laboratoryjnych.

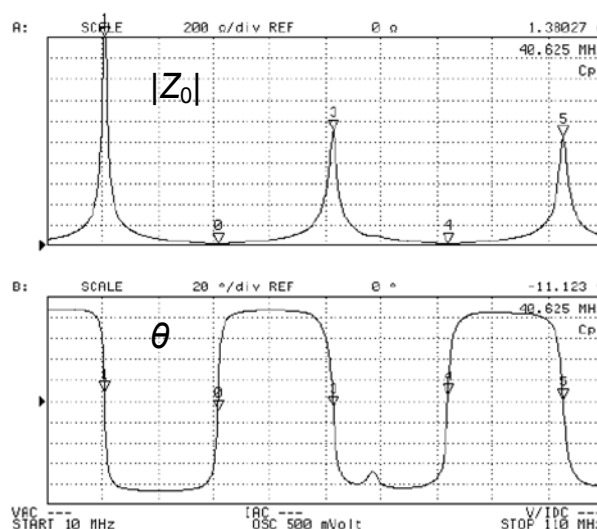
Ćwierćfalowa linia długa

Ćwierćfalowa linia długa zastosowana w falowniku klasy EF została wykonana z koncentrycznego kabla CNT400 o impedancji charakterystycznej Z_0 wynoszącej 50Ω , cynowanym miedzianym oplotem i żyłką miedzianą [9]. Przyjmując częstotliwość pracy $f = 20 \text{ MHz}$, ćwierćfalowa długość kabla ($\lambda/4$) może zostać obliczona na podstawie zależności:

$$(5) \quad \frac{\lambda}{4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{k \cdot c}{f} = \frac{1}{4} \cdot \frac{0,66 \cdot 3 \cdot 10^8}{20 \cdot 10^6} \approx 2,48 \text{ m},$$

gdzie: k – współczynnik skrócenia dla kabla, c – prędkość światła.

Charakterystyki częstotliwościowe modułu impedancji $|Z_0|$ i fazy θ zwartej ćwierćfalowej linii długiej, które zmierzono za pomocą precyzyjnego analizatora impedancji Agilent 4294A zamieszczono na rysunku 2.

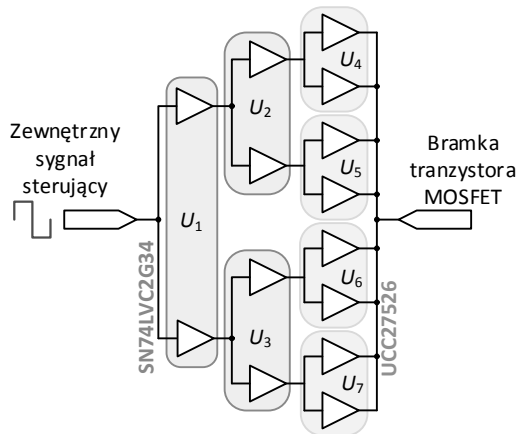


Rys. 2. Charakterystyka częstotliwościowa modułu impedancji $|Z_0|$ i fazy θ zwartej ćwierćfalowej linii długiej

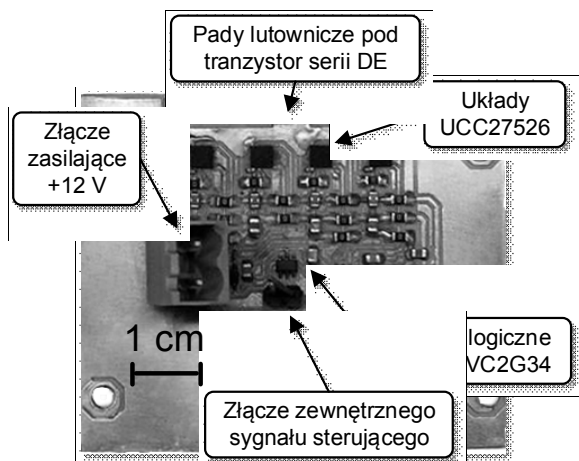
Widoczne są kolejne naprzemienne rezonanse równoległe i szeregowe przy częstotliwościach 20, 40, 60, 80 i 100 MHz. Okno pomiarowe ustawiono dla przedziału częstotliwości od 10 MHz do 110 MHz. Na przykładzie częstotliwości 40 MHz i 80 MHz potwierdza to eliminację harmonicznych parzystych z obwodu wyjściowego falownika klasy EF.

Sterownik bramkowy 8xUCC27526

Opracowano niskostratny sterownik bramkowy własnej konstrukcji dedykowany do tranzystorów MOSFET serii DE. Bazuje on na układzie scalonym UCC27526 firmy Texas Instruments, który zawiera dwa sterowniki bramkowe tranzystorów MOSFET o mniejszych mocach. Czasy przełączeń każdego z nich są krótsze niż 6 ns, a impulsowe prądy wyjściowe rzędu 5 A [11]. Zastosowana obudowa WSON-8 o wymiarach 3,15×3,15 mm umożliwia dość efektywne odprowadzenie ciepła dzięki wprowadzeniu metalizowanego podłoża (ang. Thermal Pad).



Rys. 3. Schemat sterownika bramkowego 8xUCC27526



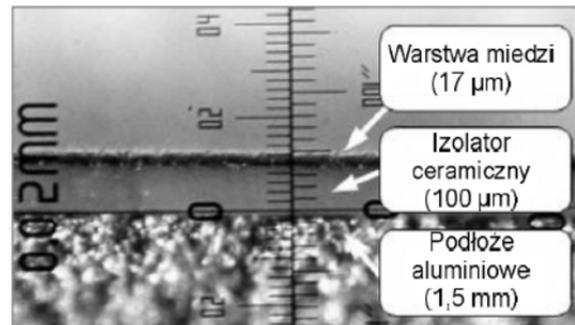
Rys. 4. Zdjęcie sterownika bramkowego 8xUCC27526

Opracowany sterownik bramkowy 8xUCC27526 (rys. 3) zawiera cztery połączone równolegle układy UCC27526, czyli łącznie osiem drajwerów małej mocy ($U_4 \div U_7$). W rezultacie uzyskano zwiększenie wydajności prądowej całego sterownika bramkowego i możliwość jego zastosowania do tranzystorów mocy MOSFET. Dodatkowo, ze względu na ograniczoną obciążalność wyjściową generatora zewnętrznego sygnału sterującego, jego sygnał jest dwustopniowo wzmacniany za pomocą buforów logicznych SN74LVC2G34 (U_1, U_2, U_3).

Zdjęcie sterownika bramkowego wraz z zaznaczonymi podstawowymi elementami zamieszczono na rysunku 4.

Prezentowany drajwer został wykonany w postaci obwodu PCB na specjalnym trójwarstwowym laminacie IMS w technologii platerowania (ang. Thermal Clad) [12, 13]. Przykładową strukturę laminatu przedstawiono na rysunku 5. Wymiary zewnętrzne sterownika z rysunku 4 wynoszą 50×60 mm, zapewniając zwartą konstrukcję całego falownika EF. Umożliwia to redukcję wpływu szkodliwych pasożytniczych pojemności oraz indukcyjności przy megahercowych (MHz) częstotliwościach pracy. Ponieważ

opisany sterownik dla swojej maksymalnej częstotliwości pracy wynoszącej 30 MHz charakteryzuje się stratami mocy na poziomie 18 W [12] (straty mocy dedykowanego sterownika bramkowego DEIC420 są rzędu 55 W), dlatego wykorzystano go na potrzeby badań laboratoryjnych falownika klasy EF.



Rys. 5. Struktura materiału IMS powiększona mikroskopowo

Model komputerowy

Model falownika klasy EF został opracowany w oprogramowaniu ANSYS Simpler. W modelu pominięto zewnętrzny kondensator C_1 przyłączony równolegle do tranzystora, zakładając że ze względu na odpowiednio wysoką częstotliwość pracy jego rola zostanie całkowicie przejęta przez pojemność wyjściową C_0 (rys. 1). Model posłużył do:

- dostarczenia informacji o napięciach, prądach i stratach mocy poszczególnych elementów falownika;
- doboru parametrów falownika dzięki zastosowanej metodzie optymalizacji.

Pełny model komputerowy składa się z modelu obwodowego falownika klasy EF (rys. 6), bloków sterujących (rys. 7) i bloków pomiarowych (rys. 8). Model obwodowy falownika zawiera dodatkowo uproszczony model tranzystora MOSFET serii DE o oznaczeniu DE275-501N16A o parametrach zestawionych w tabeli 1. Na podstawie danych katalogowych [14, 15] w modelu tranzystora odzwierciedlono:

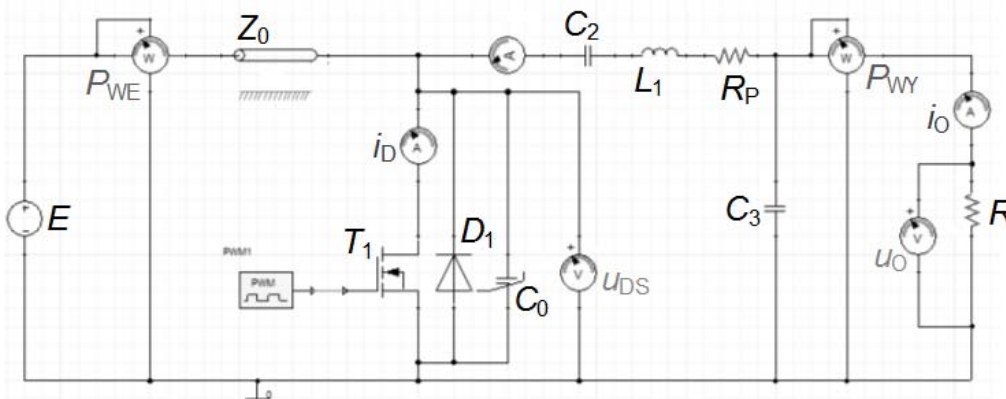
- nieliniową pojemność wyjściową tranzystora C_0 ;
- rezystancję przewodzenia tranzystora $R_{DS(on)}$;
- wewnętrzną, przeciwrównoległą diodę tranzystora D_1 .

O wyborze tranzystora DE275-501N16A zdecydowała analiza porównawcza przeprowadzona w pracy [14].

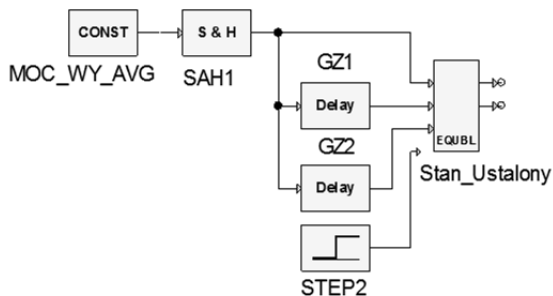
Tabela 1. Parametry modelu tranzystora DE275-501N16A

Parametr	Wartość katalogowa
U_{DSS}	500 V
I_D	16 A
Q_G	50 nC
C_0	176 pF (dla 320 V)
L_S	0,3 nH
L_G	5,6 nH
$R_{DS(on)}$	0,4 Ω
R_G	0,3 Ω

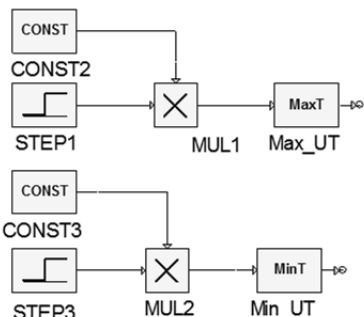
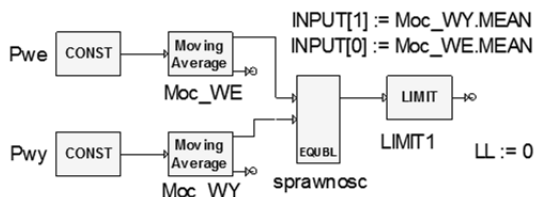
Bloki sterujące (rys. 7) służą do wykrywania stanu ustalonego symulacji, sprawdzając ustalenie się wartości średniej mocy wyjściowej falownika (MOC_WY_AVG) za okres sygnału sterującego przełączeniem tranzystora. Warunek osiągnięcia stanu ustalonego jest spełniony wówczas, gdy różnica względna między spróbkowaną wartością średnią mocy wyjściowej sprzed 2- i 25- okresów nie przekracza wartości 0,2%. Na rysunku 8 przedstawiono bloki pomiarowe opracowanego modelu komputerowego. Pierwsza grupa bloków oblicza moce wejściowe, wyjściowe i sprawność całego falownika. Pozostałe dwie grupy bloków służą do wyznaczania maksymalnego i minimalnego napięcia tranzystora.



Rys. 6. Model obwodowy falownika klasy EF



Rys. 7. Bloki sterujące zaproponowanego modelu komputerowego



Rys. 8. Schematy blokowe torów pomiarowych modelu komputerowego

Metoda optymalizacji

Metoda optymalizacji parametrów falownika klasy EF z ćwierćfalową linią długą (rys. 6) polegał na wielokrotnej symulacji modelu pod kontrolą odpowiedniej funkcji celu. Wartości części parametrów falownika zakłada się, natomiast wartości dwóch parametrów (L_2 , C_3) są obliczane w rezultacie przeprowadzonej optymalizacji, przy czym również ich wartości muszą zostać wstępnie przyjęte. Wartości parametrów falownika określono na podstawie zależności (1) ÷ (4). Przyjęto następujące wartości: napięcie zasilania $E = 200$ V, moc falownika $P = 400$ W, częstotliwość pracy układu $f = 20$ MHz oraz $D = 0,25$, $C_2 = 5$ nF, $R_p = 0,2$ Ω , $R = 50$ Ω . Zgodnie z zależnością (4) obliczono $Q = 1,21$ a następnie stosując (1) i (2), odpowiednio $L_1 = 449$ nH, $C_3 = 193$ pF. Wyznaczając z (3) pojemność C_0 , uzyskano kontrolnie wartość 125 pF. Ponieważ, dla zastosowanego tranzystora serii DE275-

501N16A wartość ta znajduje się w zakresie charakterystyki pojemności wyjściowej odpowiadającej napięciom większym od 200 V, możliwe jest całkowite pominięcie zewnętrznego kondensatora C_1 oraz uwzględnienie jedynie pojemności C_0 .

W przypadku niższych częstotliwości pracy lub większych mocy falownika koniecznym może być dołączenie kondensatora zewnętrznego i nieznaczące zmodyfikowanie metody optymalizacji. Pojemność C_0 odwzorowuje nieliniową charakterystykę katalogową pojemności wyjściowej tranzystora.

Metoda optymalizacji zapewnia wyszukanie wartości parametrów L_1 i C_3 obwodu głównego falownika klasy EF przy zachowaniu wartości pozostałych parametrów poprzez maksymalizację funkcji celu (6). Funkcja celu F jest sumą trzech składników, związanych z oceną mocy wyjściowej, sprawności i maksymalnego napięcia na tranzystorze w stanie ustalonym. W programie ANSYS SImplorer, należy dla każdego składnika funkcji celu (6) określić tzw. funkcję przynależności oraz jej przedział zmienności.

$$(6) \quad F = f(\text{sprawnosć}) + f(\text{max}U_{DS}) + f(P_{WY})$$

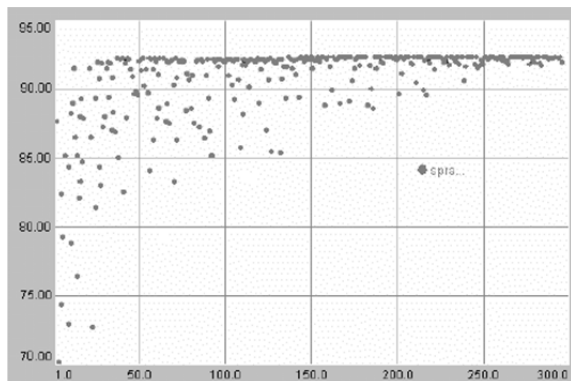
Przyjęto następujące przedziały zmienności poszczególnych funkcji: *sprawność* $\in <50; 99>\%$, $\text{max}U_{DS} \in <300; 400>$ V, $P_{WY} \in <390; 410>$ W.

Przykładowa funkcja przynależności sprawności dla jej przedziału zmienności przedstawiona została na rysunku 9.

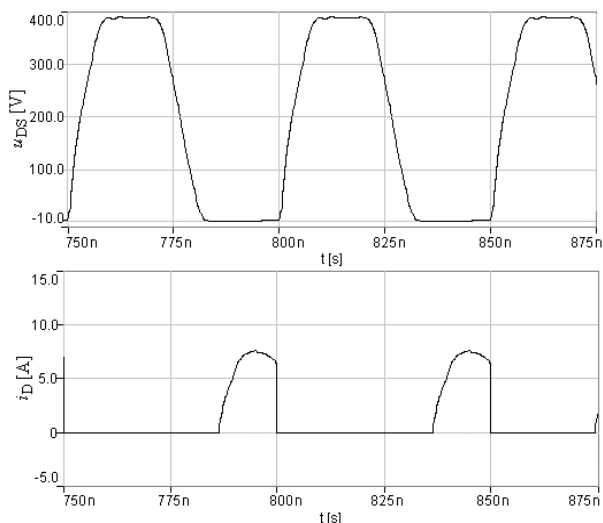


Rys. 9. Funkcja przynależności sprawności dla przedziału zmienności $<50; 99>$ %

Do maksymalizacji wartości funkcji celu (6) zastosowano algorytm genetyczny wbudowany w oprogramowanie ANSYS SImplorer. Algorytm ten przeszukuje przestrzeń alternatywnych rozwiązań, wykorzystując funkcje znane z ewolucji biologicznej np. mutację i krzyżowania [16, 17, 18]. Na rysunku 10 przedstawiono przebieg optymalizacji dla zadanej funkcji maksymalizacji sprawności. Oś odciętych odpowiada aktualnemu krokowi symulacji, natomiast oś rzędnych przedstawia wartości sprawności falownika.



Rys. 10. Przebieg optymalizacji dla funkcji sprawności



Rys. 11. Przebiegi czasowe napięcia i prądu tranzystora MOSFET po optymalizacji modelu

Na rysunku 11 przedstawiono dodatkowo przebiegi napięcia i prądu tranzystora uzyskane po zakończeniu optymalizacji, dla $L_2 = 284$ nH oraz $C_3 = 355$ pF. W tabeli 2 zestawiono obliczone parametry falownika klasy EF.

Tabela 2. Parametry energetyczne modelu falownika EF

Parametr	Wartość
E	200 V
I_{WE}	2,15 A
P_{WE}	431 W
P_{WY}	400 W
η_D	92,8%

gdzie:

P_{WE} – moc wejściowa, P_{WY} – moc wyjściowa, η_D – sprawność drenowa falownika obliczona wg zależności (7).

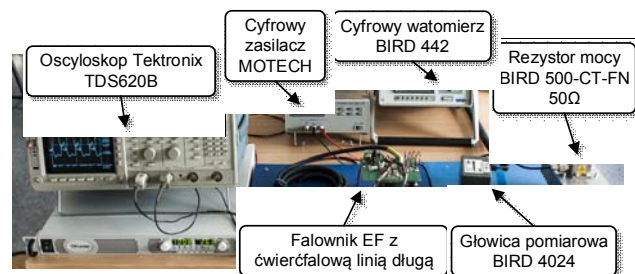
$$(7) \quad \eta_D = \frac{P_{WY}}{P_{WE}} \cdot 100\%$$

Badania laboratoryjne

Zdjęcia stanowiska laboratoryjnego i falownika klasy EF z ćwierćfalową linią długą oraz opracowanym sterownikiem bramkowym zamieszczono na rysunkach 12 i 13. Starano się uzyskać zgodność parametrów konstruowanego falownika z parametrami przyjętymi w modelu i uzyskanymi na podstawie optymalizacji.

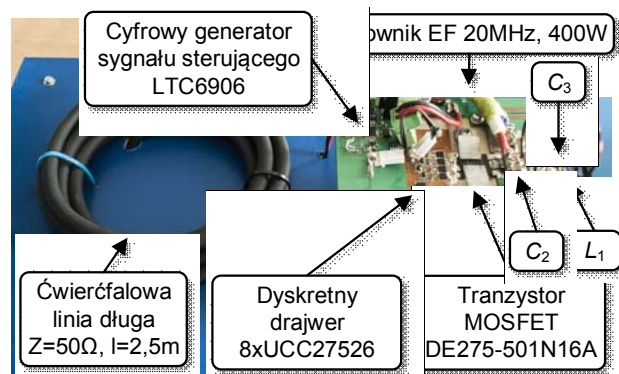
Tranzystor mocy MOSFET serii DE275-501N16A wraz ze sterownikiem 8xUCC27526 został umieszczony na radiatorze z wymuszonym przepływem powietrza. Sygnał sterujący o regulowanej częstotliwości jest generowany przez układ LTC6906. Cyfrowa linia opóźniająca MC100EP196 umożliwia wprowadzenie opóźnień

wymaganych do zadania czasu załączenia tranzystora – współczynnika wypełnienia D . Cewkę rezonansową L_1 wykonano jako cewkę powietrzną o średnicy zewnętrznej 25 mm, formując 4 zwoje z drutu miedzianego o średnicy 1,5 mm. Pojemności C_2 i C_3 uzyskano łącząc równolegle kondensatory mikowe serii MC22. Ćwierćfalowa linia długa wykonana została z kabla koncentrycznego CNT400 o impedancji charakterystycznej wynoszącej 50 Ω .



Rys. 12. Zdjęcie stanowiska laboratoryjnego wraz z opisem

Ponadto, falownik klasy EF został obciążony za pomocą niskoindukcyjnego rezystora mocy Bird 500-CT-FN o rezystancji 50 Ω i mocy dopuszczalnej 500 W. Moc wyjściową falownika mierzono za pomocą dedykowanego watomierza wysokoczęstotliwościowego Bird 4421 z głowicą typu 4024 (1,5 – 32 MHz, 3 W – 10 kW) [19]. Moc wejściową mierzono była multimetrami cyfrowymi SANWA PC5000. Przebiegi napięć zarejestrowano za pomocą oscyloskopu cyfrowego Tektronix TDS620B. W tabeli 3 zestawiono wartości poszczególnych elementów falownika klasy EF.

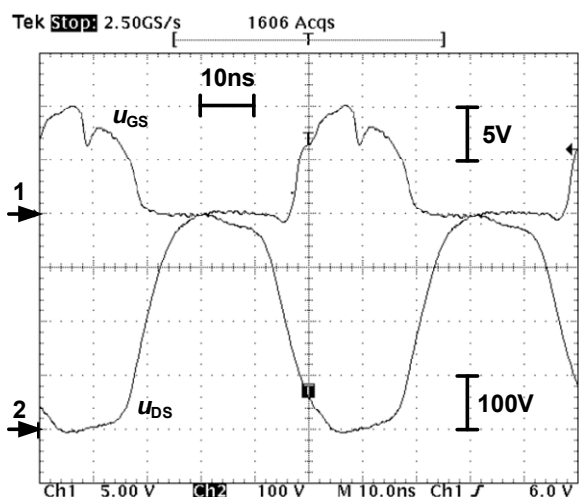


Rys. 13. Zdjęcie laboratoryjnego falownika klasy EF z ćwierćfalową linią długą i niskostratnym drajwerm 8xUCC27526

Tabela 3. Parametry elementów laboratoryjnego falownika klasy EF

Element	Wartość / Oznaczenie
C_2	5 nF
L_1	285 nH
R_p	270 m Ω
C_3	360 pF
R	50 Ω

Na rysunku 14 widoczne są przebiegi oscyloskopowe napięć bramka-źródło u_{GS} i dren-źródło u_{DS} tranzystora. Załączanie tranzystora odbywa się w warunkach zerowego napięcia (ZVS) i zerowego prądu (ZCS), czyli falownik klasy EF pracuje optymalnie. Z kolei w tabeli 4 zestawiono wybrane parametry falownika EF zmierzone w ramach badań laboratoryjnych. Uwzględniono również moc niezbędną do zasilania układu sterowania P_{DR} , w tym sterownika bramkowego oraz sprawność całkowitą η falownika (8).



Rys. 14. Przebiegi czasowe napięć tranzystora falownika klasy EF

Tabela 4. Parametry laboratoryjnego falownika EF

Parametr	Wartość
E	200 V
I_{WE}	2,19 A
P_{WE}	438,7 W
P_{WY}	400 W
η_D	91,2%
P_{DR}	11,5 W
η	88,85%
I_{WY}	2,82 A

gdzie:

P_{WE} – moc wejściowa, P_{WY} – moc wyjściowa, P_{DR} – moc strat drajwera, η_D – sprawność drenowa falownika obliczona wg zależności (7), η – sprawność całkowita falownika EF obliczona wg zależności (8).

$$(8) \quad \eta = \frac{P_{WY}}{P_{WE} + P_{DR}} \cdot 100\%$$

Uzyskane wyniki badań laboratoryjnych potwierdzają poprawność opracowanego modelu komputerowego falownika oraz pozytywnie weryfikują zaproponowaną na jego podstawie metodę optymalizacji parametrów falownika klasy EF.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono metodę optymalizacji parametrów wysokoczęstotliwościowego falownika klasy EF wykorzystującą jego model komputerowy w oprogramowaniu ANSYS Simplorer oraz wbudowany algorytm genetyczny. Opisana koncepcja może w łatwy sposób zostać adoptowana do różnorodnych, złożonych układów energoelektronicznych. Jej wadą jest brak możliwości bardziej ogólnego przeanalizowania właściwości badanego układu.

Ze względu na korzystniejszy kształt przebiegu napięcia tranzystora falowniki klasy EF charakteryzują się lepszymi właściwościami energetycznymi niż klasyczne falowniki klasy E – dla danej mocy wyjściowej ich straty mocy są mniejsze, lub dla danych strat mocy ich moc wyjściowa jest większa. Ponadto, dzięki zastosowaniu niskostratnego drajwera 8xUCC27526 można zmniejszyć straty mocy związane ze sterowaniem tranzystora MOSFET mocy.

Zaproponowana metoda optymalizacji parametrów falownika klasy EF została pozytywnie zweryfikowana na stanowisku laboratoryjnym, uzyskując dla częstotliwości pracy 20 MHz i mocy wyjściowej falownika równej 400 W jego sprawność i sprawność całkowitą odpowiednio 91,2% i 88,9%.

Dalszy etap badań dotyczący tematyki falowników klasy EF będzie dotyczył zagadnień strat mocy w zasilającej linii długiej oraz opracowania prostej metody ich identyfikacji.

Badania zostały sfinansowane ze środków własnych Katedry Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach

Autorzy: dr inż. Piotr Legutko, dr hab. inż. Zbigniew Kaczmarczyk, prof. Pol. Śl., Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice,
E-mail: Piotr.Legutko@polsl.pl, Zbigniew.Kaczmarczyk@polsl.pl

LITERATURA

- [1] Citko T., Tunia H., Winiarski B., Układy rezonansowe w energoelektronice. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej. Tom 1. 2001 r.
- [2] Grebennikov A., High-Efficiency Class-FE Tuned Power Amplifiers, *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, 55 (2008), no. 10, 3284-3292
- [3] Kee S.: The Class EF Family of Harmonic – Tuned Switching Power Amplifiers. Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena 2001.
- [4] Kee S., Aoki I., Hajimiri A., Rutledge D.: The Class EF Family of ZVS Switching. *IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques*, vol. 51, No. 6, June 2003. pp. 1677 – 1690.
- [5] Iwadare M., Mori S.: Even Harmonic Resonant Class E Tuned Power Amplifier without RF Choke. *Japan January 1995*, 79–85
- [6] Kaczmarczyk Z., Wysokoczęstotliwościowy falownik klasy EF, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 4b, 110-115
- [7] Sokal N. O., Redl R., Power Transistor Output Port Model for Analyzing a Switching-Mode RF Power Amplifier or Resonant Converter, *RF Design*, June 1987, 45-53
- [8] Kaczmarczyk Z., Poprawa właściwości energetycznych falowników klasy E przez maksymalizację wykorzystania tranzystora, *Rozprawa habilitacyjna*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2007
- [9] Dokumentacja techniczna kabla koncentrycznego CNT400 dostępna pod adresem: www.dipol.com.pl (03.12.2019)
- [10] Balogh L., Design and Application Guide For High Speed MOSFET Gate Driver Circuit, International Rectifier, Dokumentacja techniczna
- [11] Dokumentacja techniczna układu scalonego UCC27526 dostępna pod adresem: www.ti.com (03.12.2019)
- [12] Legutko P. Analiza wysokoczęstotliwościowych drajwerów tranzystorów MOSFET mocy stosowanych w falownikach rezonansowych. Praca doktorska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, Politechnika Śląska, Gliwice 2017.
- [13] Dokumentacja techniczna technologii Thermal Clad dostępna pod adresem: <https://www.henkel-adhesives.com> (03.12.2019)
- [14] Jurczak W.: Analiza właściwości falownika klasy E przy maksymalnych częstotliwościach przełączania tranzystorów mocy MOSFET. Praca doktorska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, Politechnika Śląska, Gliwice 2010.
- [15] Dokumentacja techniczna tranzystora DE275-501N16A dostępna pod adresem: <http://www.ixys.com> (03.12.2019)
- [16] Chua L. O., Lin P. M., Komputerowa analiza układów elektronicznych (Algorytmy i metody obliczeniowe), WNT, Warszawa 1981
- [17] Legutko P., Dobór i optymalizacja parametrów falownika klasy E/F₂, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 12, 129-132
- [18] Buła D., Pasko M.: Zastosowanie algorytmów genetycznych do syntezy kompensatorów RLC w układach z przebiegami okresowymi odształconymi. *Śląskie Wiadomości Elektryczne*, nr. 2/2005, s. 13 – 16.
- [19] Dokumentacja techniczna cyfrowego watomierza BIRD 4421 wraz z głowicami pomiarowymi 4024 dostępna pod adresem: www.bird-technologies.com (03.12.2019)