

Metoda optymalizacji parametrów falownika klasy E

Streszczenie. W artykule zaprezentowano metodę optymalizacji parametrów falownika rezonansowego klasy E przeprowadzoną z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS Simplorer. Dokonano opisu topologii podstawowej falownika rezonansowego, przedstawiono podstawowe zależności pozwalające wyznaczyć wartości elementów układu dla stanu ustalonego. Ponadto zaprezentowano nowatorski sposób poprawy własności energetycznych tego typu falowników wykorzystujący procedurę optymalizacyjną opartą o algorytm genetyczny. Przedstawiono zdefiniowaną na potrzeby analizy funkcję celu oraz zaprezentowano przebiegi czasowe przed i po optymalizacji modelu falownika klasy E.

Abstract. This paper presents a new method of selection and optimization class E inverter parameters. Optimization was made of using a Genetic algorithm built-in a ANSYS Simplorer software. These class E amplifiers have features such as incorporation of the transistor parasitic capacitance into the circuit, exact truly-switching time-domain solutions and allowance for Zero Voltage Switching (ZVS) operation. Experimental waveforms and characteristics measured at 1 MHz with an IXZ316N60 MOSFET are given for the amplifier that can operate under zero-voltage switching conditions for load resistances ranging from a short circuit to an open circuit. (**Optimization of class E inverter parameters**)

Słowa kluczowe: falownik rezonansowy, algorytm genetyczny, właściwości energetyczne, analiza.

Keywords: inverter, genetic algorithm, analysis, energy properties, optimization.

doi:10.12915/pe.2014.05.05

Wstęp

Artykuł przedstawia analizę oraz metodę doboru parametrów wysokoczęstotliwościowego falownika klasy E i jest kontynuacją prac badawczych prowadzonych w Katedrze Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki (KENER) Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

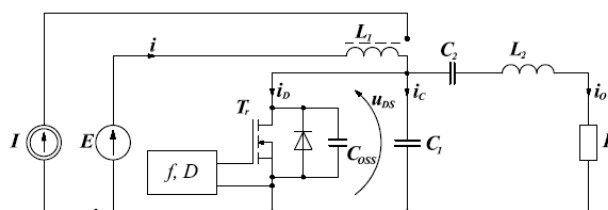
Falowniki wybranej klasy układów należą do dość licznej rodziny falowników rezonansowych. Podstawową cechą tych układów energoelektronicznych jest to, że mogą one pracować przy komutacji miękkiej, co umożliwia uzyskanie jednocześnie wysokiej częstotliwości pracy oraz wysokiej sprawności [2], [4], [5]. Do głównych zalet tego typu falowników rezonansowych zaliczyć można małe gabaryty uzyskane głównie dzięki wysokiej częstotliwości przełączeń zaworu energoelektronicznego, niski poziom emitowanych zakłóceń elektromagnetycznych, prostotę obwodów głównych falownika (tylko jeden tranzystor) oraz wymienioną już wcześniej komutację miękką.

W celu przeprowadzenia analizy właściwości energetycznych falownika rezonansowego postanowiono wybrać, zaprojektować komputerowo i zasymulować w oprogramowaniu ANSYS Simplorer układ energoelektroniczny klasy E. Do optymalizacji parametrów układu wykorzystano wbudowany mechanizm algorytmu genetycznego dostępnego wraz z wymienionym wcześniej oprogramowaniem.

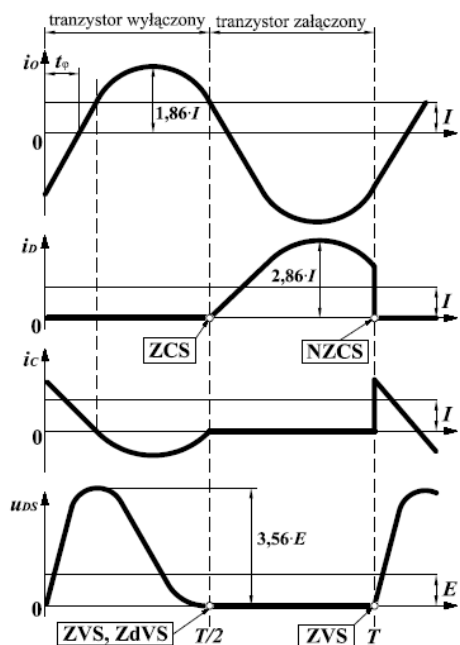
Falownik klasy E o topologii podstawowej

Falownik klasy E jest wysokoczęstotliwościowym układem energoelektronicznym należącym do szerokiej rodziny falowników rezonansowych. Ponieważ, falownik ten był najszerzej analizowany i najczęściej opisywany w literaturze [2] ÷ [10], spośród wszystkich znanych falowników rezonansowych i znalazł on dość szerokie i powszechne zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, postanowiono na potrzeby niniejszej analizy przyjąć go, jako tzw. falownik wzorcowy lub falownik klasy podstawowej (o topologii podstawowej). Podstawową cechą tego falownika jest to, że może on pracować przy komutacji maksymalnie miękkiej [4], [5]. Taki tryb pracy układu rezonansowego pozwala mu na uzyskanie jednocześnie wysokiej częstotliwości pracy oraz wysokiej sprawności. Częstotliwość pracy falownika klasy E powinna być maksymalnie wysoka, gdyż umożliwia to zmniejszenie jego gabarytów oraz wagi, prowadząc przy tym do zwiększenia gęstości mocy. Na rysunku 1 został przedstawiony schemat falownika klasy E z równoległym kondensatorem C_1 , natomiast na rysunku 2 przedstawiono przykładowe

przebiegi czasowe prądu i napięcia falownika w stanie ustalonym. Równoległy kondensator oznaczony na rysunku 1 jako C_1 często jest uwzględniany jako składowa część pojemności pasozytniczej C_{OSS} tranzystora mocy T_1 .



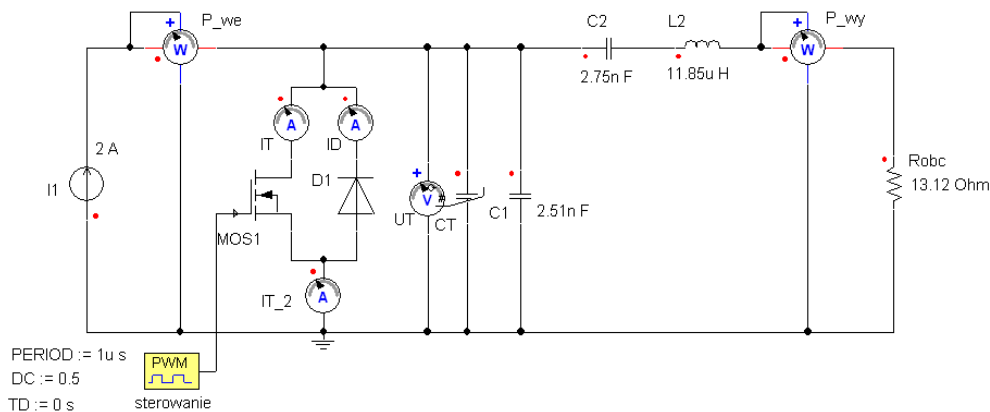
Rys.1. Podstawowa topologia falownika klasy E



Rys.2. Przebiegi czasowe prądu i napięcia falownika

W strukturze rozpatrywanego falownika rezonansowego możemy wyróżnić kilka elementów:

- źródło zasilania napięcia stałego E . W przypadku dużej indukcyjności dławika L_1 wpływającej na wygładzenie prądu zasilania i w stanie ustalonym można źródło napięcia zasilania E z dławikiem L_1 zastąpić równoważnym źródłem prądu I ;



Rys.3. Model obwodowy falownika klasy E

- drajwer, którego zadaniem jest sterowanie procesem przełączania tranzystora T_r z odpowiednią częstotliwością f oraz współczynnikiem wypełnienia D ;
- tranzystor T_r z wewnętrzną diodą przeciwrównoległą oraz pasywną pojemnością wyjściową C_{oss} ;
- rezystor obciążenia R ;
- obwód drenowy, który dla falownika klasy E jest złożony z elementów oznaczonych jako C_1 , C_2 , L_1 i L_2 .

Dobór parametrów falownika klasy E

Poniżej zestawiono najważniejsze zależności analityczne pozwalające wyznaczyć wartości elementów obwodu głównego falownika rezonansowego klasy E o topologii podstawowej w stanie ustalonym:

$$(1) \quad R = \frac{E^2}{I_{DC} \cdot P},$$

$$(2) \quad C_2 = \frac{1}{2 \cdot Q \cdot \omega_1 \cdot f \cdot R},$$

$$(3) \quad C_1 = C_2 \cdot \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2 - \omega_1^2},$$

$$(4) \quad L_2 = \frac{Q \cdot R}{2 \cdot \omega_1 \cdot f},$$

$$(5) \quad I = \frac{P}{E},$$

gdzie:

I_{DC} - wartość względna wejściowej rezystancji dla prądu stałego falownika;

ω_1, ω_2 - wartość względna pulsacji drgań swobodnych pomnożona przez $(T/2)$.

Szczegółowy opis wyznaczenia zależności przedstawionych za pomocą wzorów (1) ÷ (5) oraz wartości względne współczynników I_{DC} , ω_1 , ω_2 można znaleźć w literaturze [4], [5], [6].

Model symulacyjny falownika klasy E

Zaproponowany model symulacyjny falownika ma za zadanie pełnić dwie podstawowe funkcje:

- dostarczać informacji o napięciach, prądach i stratach mocy poszczególnych elementów układu;
- razem z procedurą optymalizacyjną stosowany jest do doboru parametrów układu.

Parametry modelu mają wpływ na jego dokładność, dlatego procedura optymalizująca może być przeprowadzana kilkakrotnie, np. gdy w falowniku użyty zostanie inny model tranzystora mocy. Model symulacyjny składa się z modelu obwodowego falownika klasy E (rys.3), bloków sterujących (rys.4) i bloków pomiarowych (rys.5). Dodatkowo model

obwodowy falownika klasy E (rys.3) zawiera w swej strukturze:

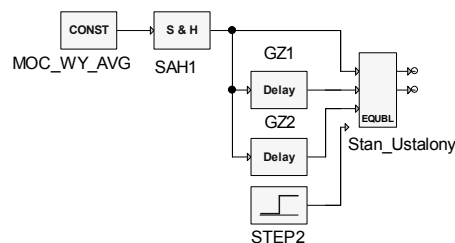
- uproszczony model tranzystora mocy (MOS1) serii DE o oznaczeniu IXZ316N60 charakteryzujący się następującymi parametrami:

Tabela 1. Parametry modelu tranzystora IXZ316N60

Parametr	Wartość katalogowa
U_{DSS}	600 V
I_b	18 A
Q_G	42,6 nC
C_{OZ}	235 nF
L_s	0,3 nH
L_G	2,7 nH
$R_{DS(on)}$	0,34 Ω
$t_{d(on)}$	4 ns
t_r	4 ns
$t_{d(off)}$	4 ns
R_G	0,62 Ω

O wyborze tego typu tranzystora mocy zdecydowała analiza porównawcza, która została przeprowadzona w pracy [4];

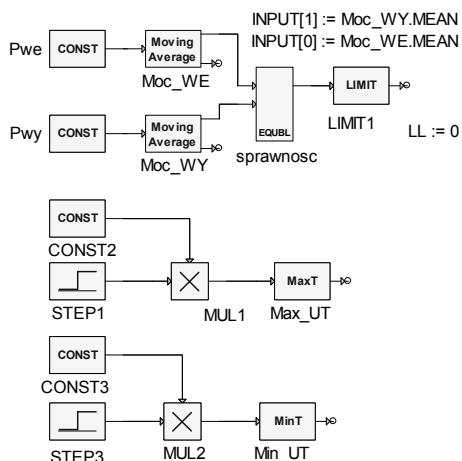
- nieliniową pojemność wyjściową tranzystora MOS1 oznaczoną na rysunku 3 jako CT, która została zamodelowana zgodnie z charakterystyką podaną w nocie katalogowej tranzystora mocy serii DE o oznaczeniu IXZ316N60 [11];
- rezystancję załączenia R_{DS} tranzystora MOS1, której wartość została odczytana z noty katalogowej producenta [11];
- wewnętrzną, przeciwrównoległą diodę oznaczoną na rysunku 3 jako D1 będącą elementem wewnętrznej struktury tranzystora MOSFET.



Rys.4. Bloki sterujące zaproponowanego modelu komputerowego

Realizacja bloku sterującego (rys.4) składa się z układu wykrywającego stan ustalony symulacji (SAH1, GZ1, GZ2, STEP2, EQUABL) oraz układu odpowiedzialnego za przechowywanie i gromadzenie danych symulacji. Wykrycie stanu ustalonego symulacji polega na ustaleniu się wartości średniej mocy wyjściowej układu (MOC_WY_AVG) za okres sygnału sterującego przełączaniem tranzystora MOS1. Warunek osiągnięcia stanu ustalonego (blok EQUABL) jest

spełniony wówczas, gdy różnica względna między spróbkowaną wartością średniej mocy wyjściowej sprzed 2- (blok GZ1) i 25- (blok GZ2) okresów nie przekracza wartości 0,2 %.

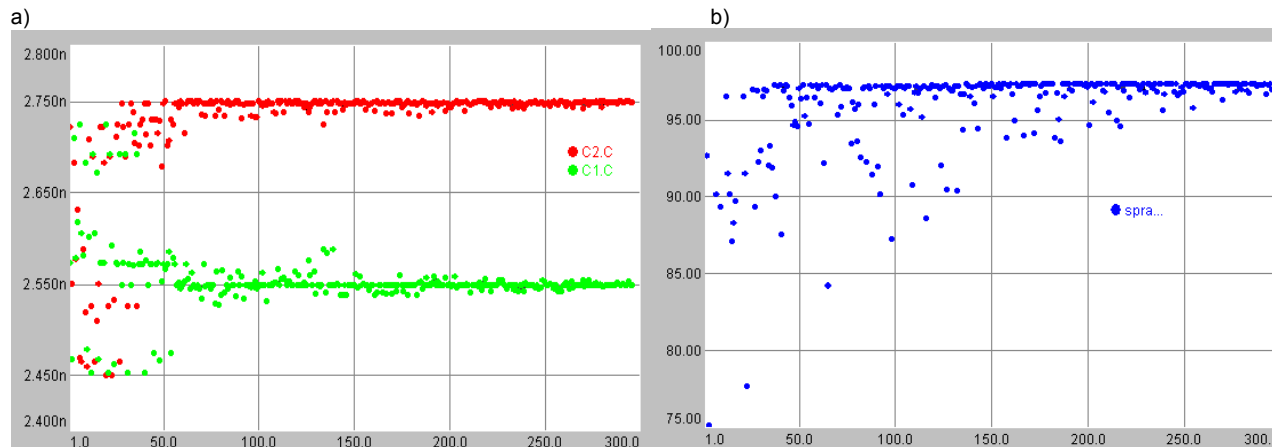


Rys.5. Bloki pomiarowe zaproponowanego modelu komputerowego

Na rysunku 5 przedstawiono schematy blokowe torów pomiarowych zaproponowanego modelu komputerowego. Pierwszy blok oblicza moce wejściowe (blok Moc_WE), wyjściowe (Moc_WY) i sprawność (sprawnosć) całego układu falownika. Pozostałe dwa układy służą do wyznaczenia maksymalnego (CONST2, STEP1, MUL1, Max_UT) i minimalnego (CONST3, STEP3, MUL2, Min_UT) napięcia tranzystora w pierwszej fazie symulacji.

Procedura optymalizacyjna

W pierwszym etapie optymalizacji został przesyłowany układ falownika klasy E (rys.3) z wartościami elementów obwodu obliczonymi na podstawie wzorów analitycznych (1) ÷ (5) - pojemność pasywna CT nie była brana pod uwagę. Jednym z założeń modelu było utrzymywanie stałych parametrów wejściowych falownika takich jak: napięcie zasilania $E = 50$ V, moc wejściowa falownika $P = 100$ W, założona wartość dobroci obwodu głównego falownika $Q1 = 5$, częstotliwość pracy układu $f = 1$ MHz ($D = 0,5$). Dodatkowo dla założonej wartości dobroci obwodu głównego $Q1$ przyjęto następujące wartości współczynników: $\zeta_{DC} = 1,905$; $w_1 = 2,769$; $w_2 = 4,01$ zgodnie z tabelami dostępnymi w literaturze [4], [5], [6]. Podstawiając odpowiednie wartości do wzorów (1) ÷ (5) otrzymano wartości elementów obwodu głównego falownika klasy E, które wyniosły: $R = 13,12\Omega$; $C2 = 2,7nF$; $C1 = 2,41nF$; $L2 = 11,85\mu H$; $J = 2A$.



Rys.7. Przebieg zadania optymalizującego funkcję celu (6) dla pojemności C1 i C2 (a) i sprawności (b)

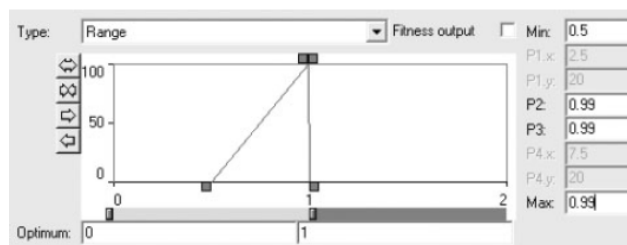
Drugi etap symulacji polegał na odnalezieniu wartości elementów (C1, C2, L2) obwodu głównego falownika poprzez maksymalizację wartości odpowiednio zdefiniowanej funkcji celu (6) przy założonych warunkach optymalizacji (parametry wejściowe bez zmian, występuje pojemność pasywna CT, rezystancja obciążenia bez zmian). Zastosowana funkcja celu F opisana wzorem (6), jest sumą czterech składowych o tej samej wadze. Składowe te związane są z oceną mocy wejściowej i wyjściowej, sprawności i maksymalnego napięcia na zaworze w stanie ustalonym.

W programie ANSYS Simplorer, należy dla każdej składowej funkcji celu (6) tzn. funkcji przynależności, określić jej przedział zmienności.

$$(6) \quad F = f(P_{we}) + f(P_{wy}) + g(\text{sprawnosć}) + h(\max U_{DS})$$

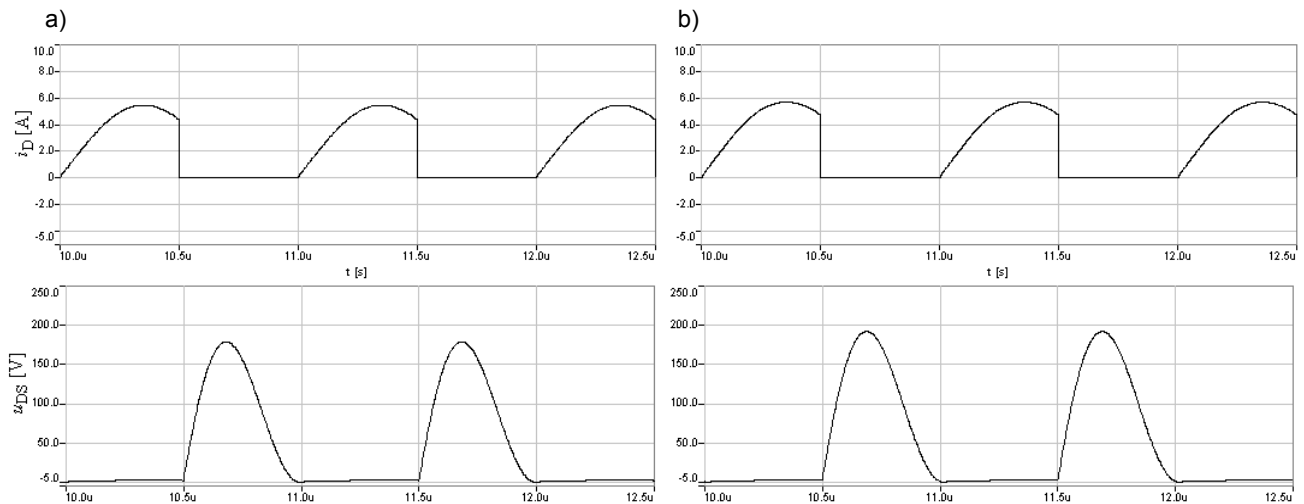
Przyjęto następujące przedziały zmienności funkcji: $P_{we}, P_{wy} \in <90; 110>$ W, $\max U_{DS} \in <100; 200>$ V, $\text{sprawnosć} \in <50; 99>$ %.

Na rysunku 6 została przedstawiona funkcja przynależności g dla przedziału zmienności sprawności (sprawnosć) modelu komputerowego falownika.



Rys.6. Zdefiniowana funkcja przynależności g dla przedziału zmienności $<50; 99>$ %

Zadanie optymalizacyjne polegało na maksymalizacji poszczególnych wartości funkcji celu (6) z zastosowaniem algorytmu genetycznego wbudowanego w program ANSYS Simplorer. Algorytm ten maksymalizuje zadaną funkcję celu przeszukując przestrzeń alternatywnych rozwiązań wykorzystując funkcje znane z ewolucji biologicznej, np. krzyżowania i mutacji [1]. Na rysunku 7 przedstawiono wybrane przebiegi zadania optymalizacyjnego dla zadanej funkcji celu (6) – oś X odpowiada aktualnemu krokowi symulacji, natomiast oś Y zawiera wartości kondensatorów C2 i C1 (rys.7a) oraz wynik sprawności układu falownika (rys.7b). Na rysunku 8 przedstawiono przebiegi czasowe napięcia i prądu tranzystora mocy MOSFET przed (rys.8a) i po (rys.8b) optymalizacji układu.



Rys.8. Przebiegi czasowe napięcia i prądu tranzystora przed (a) i po (b) optymalizacji parametrów układu

W tabeli 2 zestawiono najważniejsze parametry energetyczne modelu falownika klasy E przed i po optymalizacji układu.

Tabela 2. Zestawienie parametrów energetycznych modelu

Parametr	Przed optymalizacją	Po optymalizacji
η	96 %	98 %
U_{DSmax}	168 V	192 V
$P_{we(AVG)}$	93 W	102 W
$P_{ww(AVG)}$	89 W	99 W
$I_O(RMS)$	2,6 A	2,85 A
$I_D(RMS)$	3 A	3,1 A

Wartości poszczególnych elementów modelu falownika klasy E po optymalizacji wyniosły: $R = 13,12\Omega$; $C2 = 2,75nF$; $C1 = 2,55nF$; $L = 12\mu H$; $J = 2A$.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono sposób doboru parametrów falownika rezonansowego klasy E oraz zaprezentowano nową metodę optymalizacji właściwości energetycznych tego typu układów energoelektronicznych. Symulacje komputerowe potwierdziły pełną przydatność tej metody w projektowaniu i analizie wysokosprawnych falowników rezonansowych. Uniwersalność tej metody, jak i samego oprogramowania ANSYS Simplorer umożliwia jej zastosowanie w analizie innych układów falowników rezonansowych dowolnej klasy. Zaproponowana metoda optymalizacji parametrów falowników rezonansowych, w tym wykorzystanie algorytmu genetycznego, pozwala w prosty sposób projektować tego typu układy (dla pracy optymalnej) bez konieczności układania i rozwiązywania równań różniczkowych.

Zaproponowany model symulacyjny falownika klasy E zostanie w najbliższym czasie rozszerzony o dodatkowe elementy pasytywne układu falownika. Metoda doboru parametrów układu falownika klasy E, w tym modele komputerowe zostaną w najbliższym czasie zweryfikowane laboratoryjnie na rzeczywistym układzie.

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

LITERATURA

- [1] Buła D., Pasko M., Zastosowanie algorytmów genetycznych do syntezy kompensatorów RLC w układach z przebiegami okresowymi odkształconymi. *Śląskie Wiadomości Elektryczne*, (2005), nr 2, 13 – 16
- [2] Citko T., Tunia H., Winiarski B., Układy rezonansowe w energoelektronice. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej. Tom 1. 2001.
- [3] Iwadare M., Mori S.: Even Harmonic Resonant Class E Tuned Power Amplifier without RF Choke. Japan January 1995, 79 – 85
- [4] 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
- [5] Kaczmarczyk Z., Analiza energoelektronicznych falowników rezonansowych klasy E wysokiej częstotliwości. Praca doktorska, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej, Politechnika Śląska, Gliwice 1996
- [6] Kaczmarczyk Z., Poprawa właściwości energetycznych falowników klasy E przez maksymalizację wykorzystania tranzystora. Monografia habilitacyjna, Prace Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Elektryka z. 200, Gliwice 2007
- [7] Kaczmarczyk Z., Jurczak W., Falownik klasy E 27 MHz, 500 W o podwyższonej sprawności *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010) nr 2
- [8] Kazimierzczuk M., Puczek K.: Exact Analysis of Class E Tuned Power Amplifier at any Q and Switch Duty Cycle. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, CAS-34 (February 1987) n. 2, 149 – 159
- [9] Kendir G.A., Liu W., Wang G., Sivaprakasam M., Bashirullah R., Humayun M.S., Weiland J.D., An optimal design methodology for inductive power link with Class-E amplifier. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*. Regular papers, 52 (May 2005), n.5, 857 – 866
- [10] Mediano A., Molina-Gaudó P., Bernal C., Design technique for class E RF/MW amplifiers with linear equivalent of transistor's output capacitance. *IEEE Transactions on Circuits and Systems – Fundamental Theory and Applications*, 05 (2005), n.1
- [11] <http://www.ixys.com/> - dane z dnia 10 maja 2013 r.

Autorzy: mgr inż. Piotr Legutko, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Piotr.Legutko@polsl.pl