

doi:10.15199/48.2018.07.45

## Badania quasi – rezonansowego dwufazowego przekształtnika typu boost z zaworami Si i SiC

**Streszczenie.** Artykuł opisuje badania sprawności dwufazowego przekształtnika DC/DC boost ZVS. W układzie zastosowano trzy warianty zaworów: tranzystorów i diod Si, wariant mieszany – tranzystory SiC MOSFET i diody Si, oraz wariant „full SiC” z tranzystorami SiC MOSFET i diodami SiC Schottky. Średnio uzyskano wzrost sprawności o około 7 punktów procentowych po zastosowaniu SiC MOSFET i wzrost o dalsze 0,9 p.p. po wprowadzeniu diod SiC.

**Abstract.** The paper presents results of efficiency measurement of a 600 kHz interleaved, zero-voltage switching, two-phase boost converter. Three sets of semiconductor devices were used: silicon MOSFETs and diodes, SiC MOSFETs and Si diodes, and a “full SiC” set with SiC MOSFETs and SiC diodes. On average efficiency had risen nearly 7 percentage points after implementing SiC MOSFETs and a further 0,9 p.p. increase was recorded after using SiC Schottky diodes. (*Interleaved quasi-resonant boost converter with Si and SiC devices*).

**Słowa kluczowe:** energoelektronika, przekształtnik boost, tranzystory SiC MOSFET, przekształtniki quasi - rezonansowe.

**Keywords:** power electronics, boost converter, SiC MOSFET, quasi – resonant converters.

### Wstęp

Dynamiczny rozwój technologii związanej z elementami półprzewodnikowymi z węgla krzemu (SiC) prowadzi do zastępowania nimi klasycznych krzemowych (Si) zaworów energoelektronicznych. Węgiel krzemu posiada szerszą przerwę energetyczną, wyższe krytyczne natężenie pola elektrycznego oraz wyższą przewodność cieplną niż krzem. Pozwala to na uzyskanie większej klasy napięciowej, wyższych częstotliwości przełączania i wyższej temperatury pracy [1, 2]. Ponadto, w wielu zastosowaniach, wyższy koszt tranzystorów SiC, w porównaniu z porównywalnymi tranzystorami Si, jest uzasadniony niższymi kosztami pracy układu [2].

Badania przeprowadzone w [3] wskazują na brak istotnego wpływu stosowania elementów półprzewodnikowych SiC na pracę falowników przełączanych z częstotliwością rzędu kilku kHz. Z kolei w niskonapięciowych przekształtnikach DC/DC zawory z węgla krzemu pozwalają na zmniejszenie rozmiarów układu przy tej samej sprawności [3]. W przypadku układów przekształtnikowych o wyższej mocy i wysokich częstotliwościach przełączania, w [3] i [4] wykazana została przewaga tranzystorów SiC nad Si w układach DC/DC i DC/AC. Tego typu przekształtniki mają zastosowanie w produkcji energii z odnawialnych źródeł. Autorzy [5] przeprowadzili badania możliwości pracy tranzystorów z węgla krzemu w wysokich temperaturach, wykazując, że tranzystory SiC MOSFET utrzymują bardzo dobre parametry elektryczne do 200 °C. W [5] opisano jednocześnie, że praca tranzystorów SiC MOSFET w wysokich temperaturach powoduje ich niższą niezawodność i skraca ich czas życia.

Niniejszy artykuł stanowi opis badań przeprowadzonych na tranzystorach i diodach Si i SiC w wysokoczęstotliwościowym dwufazowym przekształtniku DC/DC typu boost przełączanym w zerze napięcia (Zero-Voltage Switching – ZVS). Celem badań było określenie celowości stosowania zaworów energoelektronicznych SiC w przekształtniku o obniżonych w ten sposób stratach przełączania, przy wysokiej częstotliwości pracy (do 600 kHz).

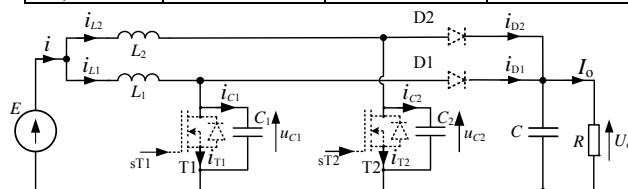
### Badany przekształtnik

Badania wykonane zostały w układzie przekształtnika o topologii przedstawionej na rysunku 1, opisanym w [6]. Topologia ta pozwala na uzyskanie załączeń tranzystorów w zerze napięcia, dzięki zjawisku rezonansu między

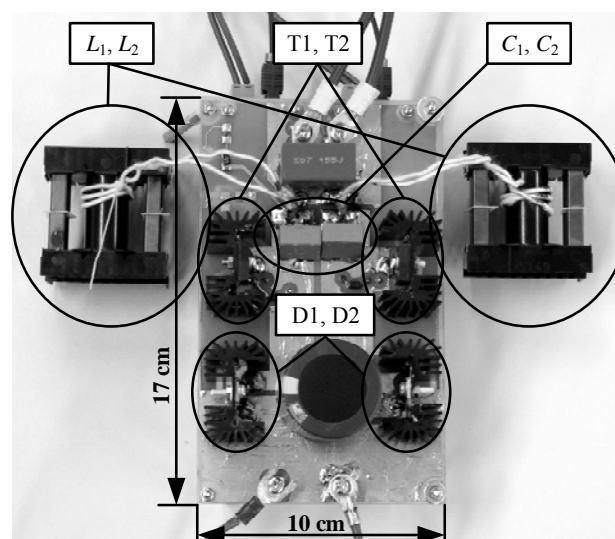
elementami  $L_1 - C_1$  i  $L_2 - C_2$ . Ponadto zastosowanie układu dwufazowego pozwala na obniżenie wartości prądów płynących przez zawory energoelektroniczne. Rysunek 2 przedstawia fotografię układu laboratoryjnego z oznaczeniem wybranych elementów. Przekształtnik został przebadany w trzech wariantach konfiguracji zaworów energoelektronicznych, przedstawionych w tabeli 1.

Tabela 1. Warianty konfiguracji elementów półprzewodnikowych układu laboratoryjnego

Element	Wariant 1 (Si MOSFET i diody Si)	Wariant 2 (SiC MOSFET i diody Si)	Wariant 3 (SiC MOSFET i diody SiC Schottky)
T1, T2	STW65N80K5	SCT30N120	SCT30N120
D1, D2	RURG3060	RURG3060	STPSC1006D



Rys.1. Topologia quasi – rezonansowego, dwufazowego przekształtnika podwyższającego napięcie z oznaczonymi elementami półprzewodnikowymi



Rys.2. Fotografia laboratoryjnego układu przekształtnika.

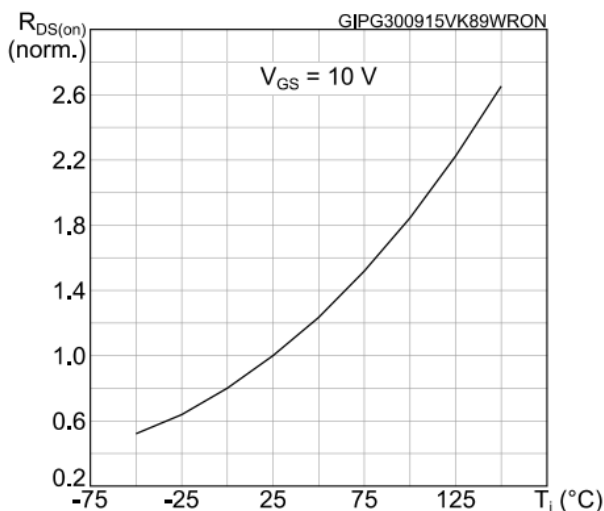
## Tranzystory MOSFET

W ramach przeprowadzonych badań zastosowano dwa modele tranzystorów MOSFET produkcji firmy STMicroelectronics – krzemowy STW65N80K5 [7] i wykonany z węgla krzemu SCT30N120 [8]. Porównanie ważniejszych parametrów zestawiono w tabeli 2. Widoczne są zalety tranzystora z węgla krzemu w postaci wyższej klasy napięciowej, przy podobnej klasie prądowej, oraz szerszym zakresie temperatur złącza. Jednocześnie widoczne są wady – wyższa wewnętrzna rezystancja bramki i całkowity ładunek bramkowy, co wpływa na straty w obwodzie bramkowym, oraz wyższa cena.

Tabela 2. Ważniejsze parametry badanych tranzystorów MOSFET [7], [8]

Parametr	STW65N80K5 (Si MOSFET)	SCT30N120 (SiC MOSFET)
$U_{DSMAX}$	800 V	1200 V
$I_{DMAX}$	46 A	45 A
$R_{DS(ON)}$	80 mΩ	90 mΩ
$U_{GS}$	±30 V	-10 ÷ +25 V
$R_G$	1,9 Ω	5 Ω
$Q_G$	92 nC	105 nC
$T_J$	-55 ÷ 150 °C	-55 ÷ 200 °C
Cena	\$13.08	\$18.02

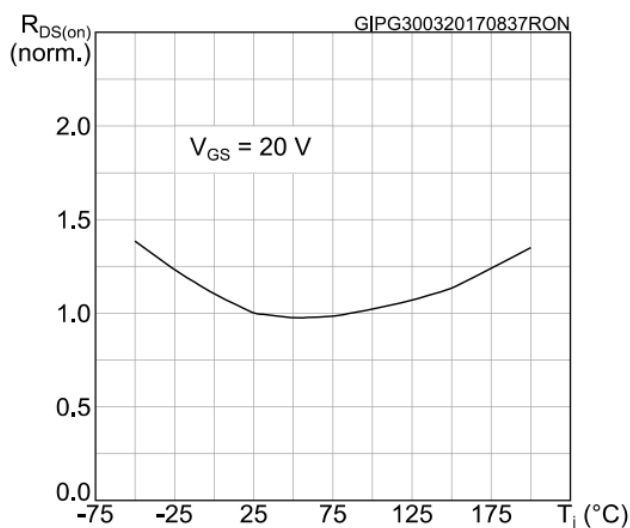
gdzie:  $U_{DSMAX}$  – maksymalne napięcie dren – źródło,  $I_{DMAX}$  – maksymalna wartość ciągłego prądu drenu,  $R_{DS(ON)}$  – rezystancja przewodzenia tranzystora w stanie załączenia,  $U_{GS}$  – zakres dopuszczalnych napięć bramka – źródło,  $R_G$  – wewnętrzna rezystancja bramki,  $Q_G$  – całkowity ładunek bramkowy,  $T_J$  – zakres dopuszczalnych temperatur pracy złącza, w tabeli podano cenę na dzień 03.12.2017.



Rys.3. Zależność rezystancji przewodzenia od temperatury złącza tranzystora STW65N80K5 [7].

Typowa, podawana przez producenta, wartość rezystancji przewodzenia w stanie załączenia jest niższa w przypadku tranzystora krzemowego. Jednakże, uwzględnienie zmiany tej rezystancji w funkcji temperatury złącza ujawnia korzyść z zastosowania tranzystorów SiC MOSFET. Podane przez producenta charakterystyki przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Widoczne jest, że rezystancja przewodzenia tranzystora SCT30N120 zmienia się, od wartości typowej (90 mΩ) w temperaturze 25 °C, do około 125% tej wartości w temperaturze 175 °C. Natomiast w przypadku tranzystora krzemowego rezystancja przewodzenia zmienia się od wartości typowej (80 mΩ) przy temperaturze złącza 25 °C do jej 260% w temperaturze 150 °C. Stąd spodziewane straty przewodzenia powinny

być niższe w układzie z tranzystorami SiC MOSFET, szczególnie w wypadku większych wartości prądu drenu, co za tym idzie wyższych temperatur złącza.



Rys.4. Zależność rezystancji przewodzenia od temperatury złącza tranzystora SCT30N120 [8].

## Diody półprzewodnikowe

W układzie laboratoryjnym porównywane były dwa modele diod – krzemowa RURG3060 [9] produkcji Fairchild Semiconductor oraz dioda Schottky'ego z węgla krzemu STPSC1006D [10], produkcji STMicroelectronics. W tabeli 3 zestawiono wybrane parametry badanych diod.

Obie diody, mimo tej samej klasy napięciowej, różnią się wyraźnie klasą prądową. Jednakże, dioda STPSC1006D występuje w obudowie TO-220, zaś dioda RURG3060 w obudowie TO-247, toteż dioda SiC ma mniejsze wymiary. Napięcie przewodzenia obu diod jest podobne, przy czym dla diody SiC jest ono o 0,2 V wyższe. Pozwala to spodziewać się podobnych wartości strat przewodzenia dla obu zaworów, lub nieco wyższych w przypadku diod STPSC1006D. Jednakże, w przypadku innych diod krzemowych podobnej klasy napięciowej i prądowej, napięcie przewodzenia może przyjmować wartości rzędu 1-1,2 V. W takim wypadku spodziewane straty przewodzenia są niższe dla diod krzemowych. Znacznie niższy ładunek odzyskiwania właściwości zaworowych ( $Q_{rr}$ ) diody wykonanej z węgla krzemu powinien skutkować niższymi stratami wyłączenia diod, względem diod krzemowych.

Wadą diod STPSC1006D SiC Schottky jest zdecydowanie (niemal dwukrotnie) wyższa cena, przy trzykrotnie niższej klasie prądowej.

Tabela 3. Ważniejsze parametry badanych diod Si i SiC [9], [10]

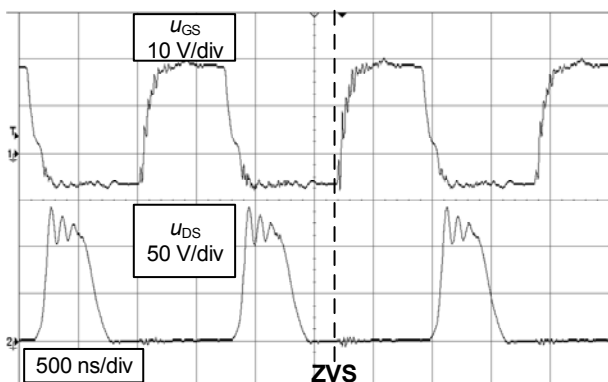
Parametr	RURG3060 (Dioda krzemowa)	STPSC1006D (Dioda SiC Schottky)
$U_{RRMMAX}$	600 V	600 V
$I_{FAV}$	30 A	10 A
$U_{FMAX}$	1,5 V	1,7 V
$Q_{rr}$	92 nC	12 nC
$T_J$	-65 ÷ 175 °C	-40 ÷ 175 °C
Cena	\$2.26	\$4.24

gdzie:  $U_{RRMMAX}$  – maksymalne napięcie wsteczne,  $I_{FAV}$  – maksymalna wartość średnia prądu przewodzonego,  $U_{FMAX}$  – maksymalna wartość napięcia przewodzenia,  $Q_{rr}$  – ładunek odzyskiwania właściwości zaworowych,  $T_J$  – zakres dopuszczalnych temperatur pracy złącza, w tabeli podano cenę na dzień 03.12.2017.

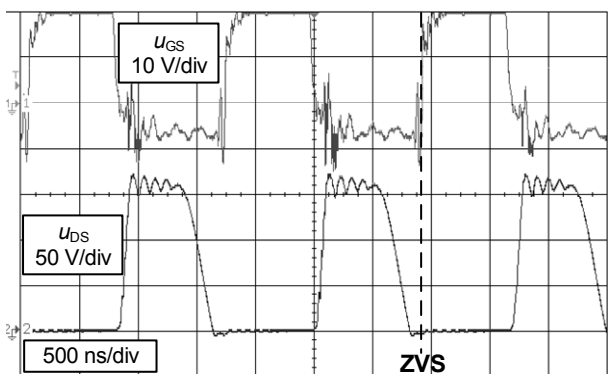
## Wyniki badań

Trzy warianty zaworów energoelektronicznych przebadano w układzie laboratoryjnym, rejestrując przebiegi czasowe napięć bramkowych i dren – źródło. W każdym z przypadków korzystano ze sterowników bramkowych IXDN609, zmieniając jedynie poziom napięcia zasilania układu. Odpowiednio dla tranzystorów Si stosowano napięcia +19/-4 V, a dla tranzystorów SiC +21/-6 V. Zarejestrowane przebiegi przedstawiono na rysunkach 5 – 7, wraz z oznaczonym załączeniem w zerze napięcia (ZVS). Zmierzono również sprawność przekształtnika w funkcji prądu wyjściowego  $I_o$ , w każdym z wariantów. Wyniki tych pomiarów prezentuje rysunek 8.

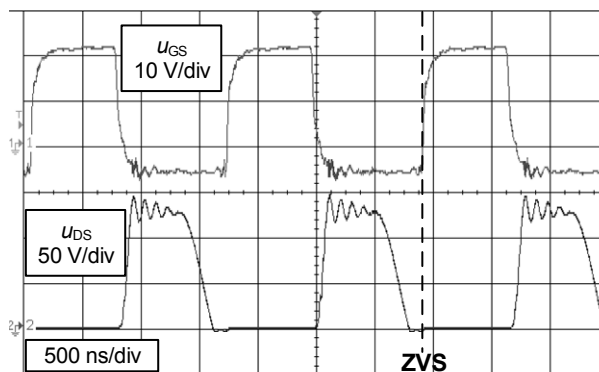
Przebiegi zostały zarejestrowane w zbliżonych warunkach pracy – napięcie wyjściowe około 130 V, prąd wyjściowy około 2,25 A, rezystancja obciążenia równa 50  $\Omega$ , częstotliwość sygnału sterującego 600 kHz, wypełnienie sygnału sterującego 43%. W przebiegach napięcia bramkowego widoczne są zaburzenia, pochodzące od przełączeń drugiego z tranzystorów. Zwłaszcza są one wyraźne w przypadku tranzystorów SiC MOSFET i diod Si. Ponadto w przebiegach napięcia dren – źródło występuje rezonans pasozytny. Pomiarowo stwierdzono, że częstotliwość rezonansowa wynosi około 10 MHz oraz, że rezonans pochodzi od indukcyjności wyprowadzeń tranzystorów i ich pojemności wyjściowych. Na przebiegach czasowych zaznaczono chwile załączenia tranzystorów w zerze napięcia, oznaczone jako ZVS. Widoczne jest, że zmiana tranzystorów z krzemowych na SiC MOSFET powoduje zmianę w czasie rozładowania pojemności  $C_1$  i  $C_2$ . Spowodowane jest to inną pojemnością wyjściową tranzystorów wykonanych z węgla krzemu. W związku z tym zostały również zmienione kondensatory  $C_1$  i  $C_2$ , w celu utrzymania stałej częstotliwości rezonansowej.



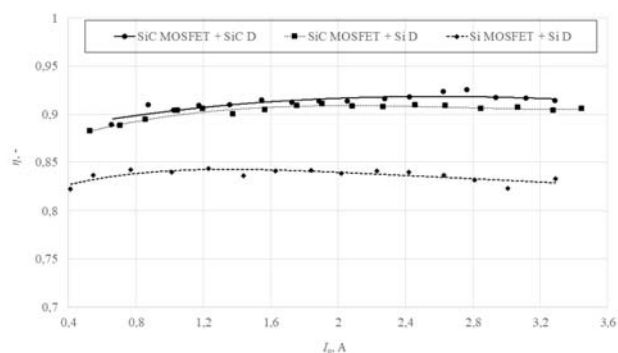
Rys.5. Przebiegi napięć bramka – źródło i dren źródło jednego z tranzystorów, w układzie laboratoryjnym z zaworami krzemowymi.



Rys.6. Przebiegi napięć bramka – źródło i dren źródło jednego z tranzystorów, w układzie laboratoryjnym z tranzystorami SiC MOSFET i diodami Si.



Rys.7. Przebiegi napięć bramka – źródło i dren źródło jednego z tranzystorów, w układzie laboratoryjnym z tranzystorami SiC MOSFET i diodami SiC Schottky.



Rys.8. Sprawność przekształtnika w funkcji prądu wyjściowego, dla każdego z badanych wariantów zaworów energoelektronicznych.

Rysunek 8 przedstawia sprawność przekształtnika w funkcji prądu wyjściowego, w każdym z badanych wariantów zaworów. Sprawność układu zmierzono, mierząc prąd i napięcie zasilania, oraz prąd i napięcie wyjściowe, przyrządami cyfrowymi SANWA PC5000A. Tabela 4 prezentuje ważone średnie sprawności układów oraz niepewności pomiarowe tych średnich. Zauważalna jest wyraźna różnica między sprawnością układu laboratoryjnego z tranzystorami i diodami krzemowymi, a sprawnościami układów z tranzystorami SiC MOSFET. Różnica w sprawności po zastosowaniu diod z węgla krzemu nie jest tak znaczna, jednakże następuje dalsze jej podwyższenie. Średnio sprawność przekształtnika po zastosowaniu tranzystorów z węgla krzemu wzrosła o niemal 7 punktów procentowych. Wymiana diod na elementy wykonane z węgla krzemu skutkowałą dalszym wzrostem średniej sprawności – o około 0,9 punktu procentowego.

Tabela 4. Ważone średnie sprawności trzech badanych wariantów układu laboratoryjnego.

Wariant	Średnia sprawność, %	Niepewność pomiarowa średniej, %
Si MOSFET + Si D	83,60	0,16
SiC MOSFET + Si D	90,42	0,20
SiC MOSFET + SiC D	91,30	0,19

## Podsumowanie

Przeprowadzono badania trzech różnych zestawów zaworów energoelektronicznych (tranzystorów MOSFET i diod) w układzie przekształtnika DC/DC typu boost ZVS. W ramach badań zarejestrowano przebiegi i zbadano

sprawność układu w funkcji prądu wyjściowego. Badania wykonano przy stałej częstotliwości przełączania, wypełnieniu sygnału sterującego i rezystancji obciążenia. Przebadano następujące warianty zaworów energoelektronicznych:

- tranzystory krzemowe STW65N80K5 i diody krzemowe RURG3060
- tranzystory SiC MOSFET SCT30N120 i diody krzemowe RURG3060
- tranzystory SiC MOSFET SCT30N120 i diody SiC Schottky STPSC1006D.

Wyniki pozwalają wnioskować, że znaczny udział w mocy strat mają straty przewodzenia tranzystorów, stąd znaczna poprawa po zastosowaniu tranzystorów SiC MOSFET. Ich rezystancja przewodzenia ( $R_{DS(ON)}$ ) nie różni tak drastycznie wraz z temperaturą złącza (rysunki 3 i 4), jak w przypadku tranzystorów krzemowych, toteż występują niższe straty przewodzenia. Sprawność układu po zastosowaniu tranzystorów SiC MOSFET wzrosła średnio o około 6,8 punktu procentowego.

Dalsza modyfikacja, polegająca na zastosowaniu diod wykonanych z węgla krzemu zamiast diod krzemowych, skutkowałą dalszym wzrostem sprawności przekształtnika, średnio o około 0,9 punktu procentowego. Przyczyną przypuszczalnie są niższe straty wynikające z odzyskiwania właściwości zaworowych. Jednakże, zbadane diody mają podobne wartości napięcia przewodzenia. Dostępne są diody krzemowe mocy o napięciu przewodzenia rzędu 1 V, tymczasem diody SiC Schottky o podobnych klasach napięciowej i prądowej typowo mają napięcie przewodzenia rzędu 1,5 V. Toteż w innych przypadkach możliwe są znacznie niższe straty przewodzenia w przypadku stosowania diod krzemowych.

Pomimo wyższej o około 50% ceny badanych tranzystorów SiC MOSFET, względem tranzystorów krzemowych, uzyskany wzrost sprawności przekształtnika po ich wprowadzeniu, uzasadnia, w opinii autora, ich stosowanie w tego typu układach. Szczególnie w przekształtnikach o wysokiej częstotliwości przełączania, jak badany układ. Jednakże, w przypadku wyżej opisanych diod półprzewodnikowych, średni wzrost sprawności o około 0,9 punktu procentowego, przy niemal dwukrotnie wyższej cenie diod SiC Schottky i niższej klasie prądowej, zdaniem autora nie uzasadnia stosowania tego typu zaworów energoelektronicznych, w badanym

przekształtniku, o ile priorytetem nie jest uzyskanie maksymalnej sprawności.

Przewidywane są dalsze badania, mające na celu rozszerzenie prac na inne topologie przekształtników DC/DC wysokiej częstotliwości oraz o tranzystory wykonane z azotku galu (GaN).

*Badania sfinansowane z funduszu przeznaczonego na badania młodych naukowców Politechniki Śląskiej, w ramach projektu BKM-553/RE5/2017.*

**Autor:** mgr inż. Piotr Zimoch, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: [Piotr.Zimoch@polsl.pl](mailto:Piotr.Zimoch@polsl.pl).

#### LITERATURA

- [1] Elasser A., Chow T.P., Silicon Carbide Benefits and Advantages for Power Electronics Circuits and Systems, *Proc. of the IEEE*, 90 (2002), n.6, 969-986
- [2] Rąbkowski J., Pefitsis D., Nee H.P., Silicon Carbide Power Transistors: A New Era in Power Electronics Is Initiated, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 6 (2012), n.2, 17-26
- [3] Biela J., Schweizer M., Waffler S., Kolar J.W., SiC versus Si – Evaluation of Potentials for Performance Improvement of Inverter and DC/DC Converter Systems by SiC Power Semiconductors, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (2011), n.7, 2872-2882
- [4] Hazra S., Madhusoodhanan S., Bhattacharya S., Moghaddam, G.K., Hatua K., Design considerations and performance evaluation of 1200 V, 100 A SiC MOSFET based converter for high power density application, *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 15-19 Sept. 2013, Denver, USA
- [5] Zheng C., Yiyang Y., Danilovic M., Boroyevich D., Performance evaluation of SiC power MOSFETs for high-temperature applications, *2012 15<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, 4-6 Sept. 2012, Novi Sad, Serbia
- [6] Zimoch P., Quasi – rezonansowy dwufazowy przekształtnik DC/DC podwyższający napięcie, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94 (2018), n.3, 116-119
- [7] STMicroelectronics, STW65N80K5 Power MOSFET Datasheet
- [8] STMicroelectronics, SCT30N120 SiC Power MOSFET Datasheet
- [9] Fairchild Semiconductor, RURG3060 Ultrafast Diode Datasheet
- [10] STMicroelectronics, STPSC1006 Power Schottky SiC Diode Datasheet