

doi:10.15199/48.2017.10.21

Przełącznik DC/DC podwyższający napięcie z wykorzystaniem tranzystora w technologii GaN

Streszczenie. W artykule zostały zaprezentowane przykładowe tranzystory wykonane w technologii azotku galu GaN do zastosowań energoelektronicznych. Opisano budowę i zasadę działania przełącznika DC/DC podwyższającego napięcie oraz przedstawiono podstawowe założenia projektowe wraz z problemami wynikającymi z wysokich częstotliwości kluczkowania i występowania znacznych prądów. Zostały również zaprezentowane wstępne wyniki badań zaprojektowanego układu.

Abstract. The article presents transistors made using gallium nitride GaN technology for power electronics applications. It describes the design and principle of operation of the step-up DC/DC converter and presents the basic design assumptions along with problems resulting from high switching frequencies and high currents of the inverter. It also presents preliminary results of the designed system. (**Step-up DC/DC converter using GaN transistor**).

Słowa kluczowe: azotek galu GaN, tranzystory GaN, przełącznik DC/DC podwyższający napięcie, energoelektronika.

Keywords: gallium nitride GaN, transistors GaN, step-up DC/DC converter, power electronics.

Wprowadzenie

Obecnie technologia półprzewodnikowa oparta jest o krzem (Si) jednak dalszy rozwój zaczyna być ograniczany przez właściwości materiałowe. Wymusza to poszukiwanie nowych materiałów półprzewodnikowych które pozwolą na konstruowanie doskonalszych elementów. Materiałami takimi są azotek galu GaN i węgiel krzemu SiC. Wykorzystując je do budowy przełączników energoelektronicznych uzyskujemy większą sprawność i mniejsze wymiary układu. Niewątpliwą zaletą tych łączników jest mały ładunek bramki, który musimy przeladować chcąc włączyć lub wyłączyć tranzystor. W efekcie możliwe są krótsze czasy przełączeń, a więc mniejsze straty łączeniowe i większe częstotliwości łączeń. Z punktu widzenia energoelektroniki najistotniejszymi parametrami nowych tranzystorów są: mniejsza rezystancja przewodzenia i większe częstotliwości łączeń, co pozwala na redukcję wymiarów całego przełącznika. Układy oparte o te technologie pozwalają uzyskać sprawność przekraczającą 95%. Zestawienie najważniejszych parametrów charakteryzujących materiały półprzewodnikowe przedstawiono w tabeli 1. Podstawowymi parametrami wyróżniającymi azotek galu oraz węgiel krzemu od pozostałych jest przerwa energetyczna W_G i pole krytyczne E_B . Wartość przerwy energetycznej dla azotku galu to 3,40eV, dla węgliku krzemu 3,25eV. Szersza przerwa energetyczna powoduje że elementy półprzewodnikowe posiadają mniejszy wewnętrzny prąd upływu i dopuszczalne wyższe temperatury pracy. Pole krytyczne E_B wynosi odpowiednio 3,5MV/cm dla GaN i 3,0MV/cm dla SiC. Pozwala to konstruować elementy o mniejszych rozmiarach na większe napięcia przebiecia, a więc także o mniejszej rezystancji otwartego kanału.

Tranzystory z azotku galu początkowo znajdowały zastosowanie głównie w technologii mikrofal, dlatego większość dostępnych rozwiązań to tranzystory normalnie otwarte. Lepsze parametry w stosunku do tranzystorów krzemowych zachęcają do zastosowania elementów z azotku galu w energoelektronice, a przede wszystkim w impulsowych przełącznikach DC/DC. W tym celu potrzebne są ze względów bezpieczeństwa, tranzystory normalnie zamknięte. Te są dostępne w coraz szerszym zakresie.

Tematyka wysokosprawnych przełączników opartych o tranzystory wykonane w technologii węgliku krzemu i azotku galu jest obecnie intensywnie badana. Przegląd elementów półprzewodnikowych z GaN i SiC z uwzględnieniem tranzystorów mocy przeprowadzono w [2]. W artykule [3] przedstawiono wyniki porównawcze strat

generowanych w przełączniku zbudowanym na diodach krzemowych i z węgliku krzemu. Publikacja [5] zawiera badania symulacyjne przełącznika wielogłęziowego wysokoczęstotliwościowego podwyższającego napięcie opartego o elementy z węgliku krzemu. W artykule [6] przedstawiono metodę doboru rdzenia do dławika wysokoczęstotliwościowego. Zaprezentowano również wyniki badań eksperymentalnych przełącznika DC/DC obniżającego napięcie o sprawności 96,5%. W publikacji [7] autorzy prezentują porównawczą analizę termowizyjną przełącznika opartego o tranzystory MOSFET i GaN. W [8] zaprezentowano wyniki badań przełącznika obniżającego napięcie opartego o tranzystory GaN, uzyskano sprawność przekraczającą 92%. Autorzy [8] przeanalizowali problem chłodzenia łączników z elektrodą cieplną umieszczoną na spodzie elementu i zaproponowali własne rozwiązanie oraz wykazali że jest wydajniejsze od zalecanego przez producenta.

Celem tej pracy jest przedstawienie rozważań projektowych oraz wstępnych wyników badań przełącznika DC/DC podwyższającego napięcie zbudowanego w oparciu o tranzystor w technologii GaN.

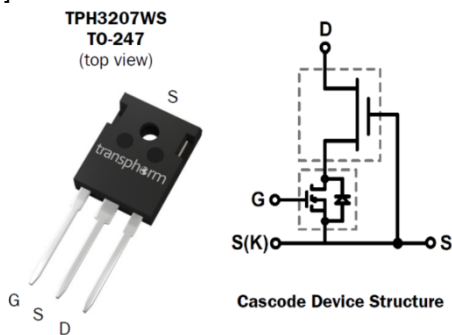
Tabela 1. Podstawowe parametry materiałów półprzewodnikowych

Parametr	Jednostka	Si	GaAs	4H-SiC	GaN
Przerwa energetyczna W_G	eV	1,12	1,42	3,25	3,40
Pole krytyczne E_B	MV/cm	0,25	0,4	3,0	3,5
Ruchliwość elektronów μ	cm ² /V·s	1350	8000	800	1300
Prędkość nasycenia v_s	10 ⁷ ·cm/s	1,0	2,0	2,0	3,0
Konduktywność cieplna λ	W/cm·K	1,5	0,5	4,9	1,3
Stała dielektryczna ϵ		11,8	12,8	9,7	9,0

Przegląd dostępnych tranzystorów

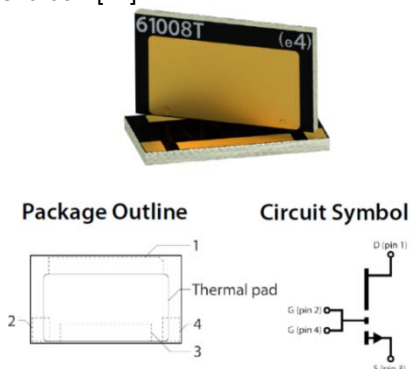
Tranzystory GaN do zastosowań energoelektronicznych dostępne są w standardowych obudowach oraz w postaci bardzo małych elementów do montażu powierzchniowego z wyprowadzeniami na spodzie elementu. Oferta tranzystorów mocy z azotku galu bardzo dynamicznie się powiększa. Na rysunkach 1 – 4 zamieszczono przykładowe tranzystory mocy z GaN od różnych producentów. Tranzystory te cechują się bardzo dobrymi parametrami, w żadnym z przedstawionych elementów rezystancja

otwartego kanału nie przekracza 50mΩ W obudowie TO-247 produkowany jest tranzystor o oznaczeniu TPH3207WS z oferty Transphorm Headquarters. Cechuje go napięcie przebicia 650V i rezystancja otwartego kanału 41mΩ [9].



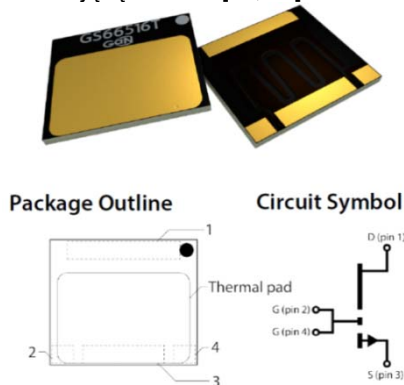
Rys.1. Tranzystor TPH3207WS oferowany przez Transphorm Headquarters [9]

Wymiary tranzystorów do montażu powierzchniowego są wyjątkowo małe w porównaniu do typowych tranzystorów mocy. Ułatwia to minimalizację przekształtnika. Jednak czasem wymaga specyficznego układu chłodzenia. Z oferty GaN Systems tranzystor GS61008T (rysunek 2) posiada rezystancję przewodzenia 7mΩ przy napięciu przebicia 100V i dopuszczalnym ciągłym prądzie 90A [10]. Element GS66516T przedstawiony na rysunku 3 cechuje się napięciem przebicia równym 650V, rezystancją otwartego kanału 25mΩ i dopuszczalnym prądem drenu 60A [11].



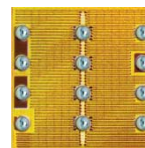
Rys.2. Tranzystor GS61008T z oferty GaN Systems [10]

W przypadku tranzystorów oferowanych przez GaN Systems (rysunek 2 i 3) schemat zamieszczony w karcie katalogowej nie zawiera diody zabezpieczającej. Jednak budowa tych elementów pozwala na przepływ prądów wstecznych zależnych odysterowania tranzystora. Producent podaje natomiast dopuszczalną częstotliwość łączeń przekraczającą 100MHz[10, 11].



Rys.3. Tranzystor GS66516T z oferty GaN Systems [11]

Z oferty EPC tranzystor o napięciu przebicia równym 300V to EPC2025 (rysunek 4). Interesujące są wymiary tego elementu: 1,95mm x 1,95mm [12].

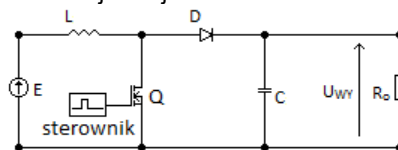


Rys.4. Tranzystory EPC2025 od EPC [12]

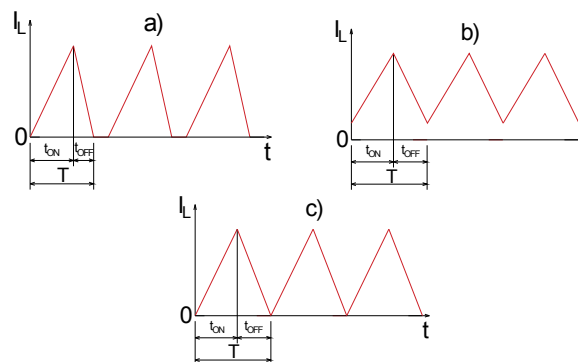
Możliwości materiałowe GaN nie są w pełni wykorzystywane ze względu na ograniczenia technologiczne. Większość tranzystorów GaN wykonanych jest na podłożu z SiC, które jest tańsze do uzyskania. Skutkiem czego jest niedopasowanie sieci krystalicznych obu materiałów oraz różnica współczynników rozszerzalności cieplnej. Może powodować to powstawanie naprężeń i defektów [4].

Projekt przekształtnika podwyższającego napięcie

Zaprezentowane tranzystory z azotku galu otwierają nowe możliwości budowy przekształtników DC/DC. Wysoka częstotliwość łączeń pozwala na zmniejszenie rozmiarów filtrów. Jednak konstrukcja przekształtnika podwyższającego napięcie opartego o tę technologię stawia nam nowe wyzwania, np. projekt dławika, który przy wysokich częstotliwościach musi przenieść znaczną energię. Występujący efekt naskórkowości wymusza stosowanie licy. W przekształtnikach DC/DC najczęściej stosuje się dławiki z zamkniętym obwodem magnetycznym. Użyty rdzeń nie może ulegać nasyceniu w skutek znacznych prądów o składowej stałej.



Rys.5. Schemat przekształtnika DC/DC podwyższającego napięcie



Rys.6. Tryby pracy przekształtnika DC/DC impulsowa a), ciągła b), graniczna c)

Schemat układu przekształtnika DC/DC podwyższającego napięcie o podstawowej topologii został przedstawiony na rysunku 5. Przekształtnik ten wykorzystywany jest do przetwarzania napięcia stałego na napięcie stałe o podwyższonej wartości i tej samej polaryzacji co napięcie zasilające. Transformacja energii realizowana jest w dwóch cyklach. W pierwszym przy włączonym tranzystorze Q, dławik L gromadzi pewną energię. W drugim cyklu poprzez wyłączenie tranzystora narastanie prądu dławika zostaje przerwane. Natomiast zgromadzona energia w cewce zostaje przekazana do

układu obciążenia. Napięcie U_{WY} na kondensatorze C (pełniącym rolę filtru) i obciążeniu R_O pochodzi od źródła zasilania i dławika. Dioda D zapobiega prądom wstecznym z obwodu obciążenia. W pracy przekształtnika możemy wyróżnić trzy tryby: impulsową, ciągłą i graniczną. Zależne są one od prądu płynącego przez dławik, zostało to zobrazowane na rysunku 6.

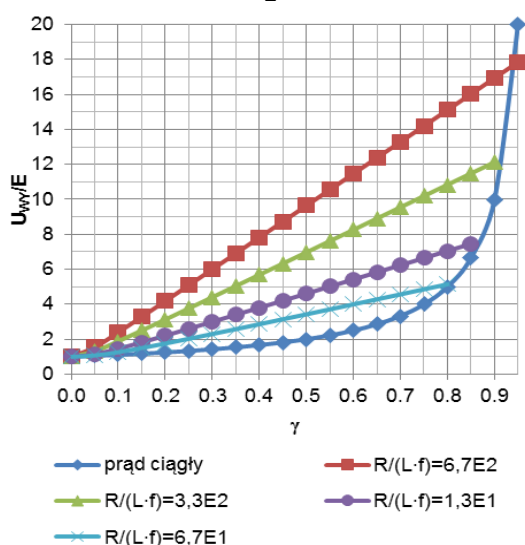
Praca na granicy ciągłej i impulsowej zachodzi dla współczynnika wypełnienia równego [1]:

$$(1) \quad \gamma_{gr} = 1 - \sqrt{\frac{2 \cdot L}{R_O \cdot T}}$$

Nie uwzględniając spadków napięć na tranzystorze i diodzie zależność na napięcie wyjściowe możemy zapisać w postaci zależności 2 dla pracy ciągłej i 3 dla impulsowej [1].

$$(2) \quad U_{WY} = \frac{E}{1 - \gamma}$$

$$(3) \quad U_{WY} = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot \gamma^2 \cdot R_O \cdot T}{L}}}{2} \cdot E$$



Rys.7. Charakterystyki sterowania przekształtnikiem DC/DC podwyższającym napięcie

Rysunek przedstawia charakterystyki sterowania przekształtnikiem DC/DC podwyższającym napięcie przy pracy ciągłej oraz impulsowej dla czterech przykładowych obciążeń zależnych od indukcyjności dławika i częstotliwości łączy.

Założono napięcie zasilające 30V oraz maksymalny prąd szczytowy w dławiku 20A. Przyjęto dwie częstotliwości łączy 300kHz i 100kHz. Ze względu na występowanie zjawiska naskórkowości konieczne jest zastosowanie licy – użyto splotu 630x0,10mm, o łącznym przekroju czynnym równym 4,97mm². Parametry użytej licy są wystarczające gdyż dla częstotliwości 300kHz głębokość wnikania prądu wynosi w przybliżeniu 0,12mm.



Rys.8. Toroidalne rdzenie RTMSS [14]

W przekształtnikach impulsowych najczęściej stosuje się dławiki na rdzeniach toroidalnych z rozproszoną szczeliną powietrzną. W projekcie przyjęto rdzeń typu RTMSS firmy Micrometals Arnold z materiału SMSS (rysunek 8). Parametry dławika zostały wyznaczone za pomocą arkusza Arnold Magnetics służącego do projektowania dławików zbudowanych na rdzeniach proszkowych oferowanych przez ww. firmę. Dobór wartości indukcyjności dławika możliwy jest na podstawie wzorów szacunkowych:

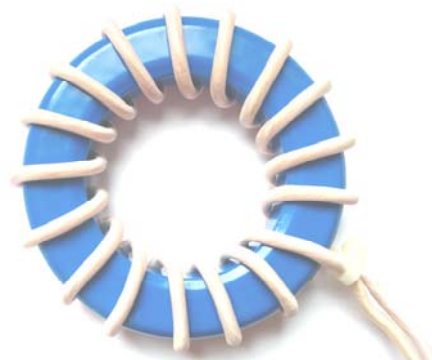
$$(4) \quad I_{Lmax} = 2 \cdot I_{omax} \cdot \frac{U_{WY}}{E}$$

$$(5) \quad L_{min} = \left(\frac{E_{min} - U_s}{I_{Lmax} \cdot f} \right) \left(1 - \frac{E_{min}}{U_{WY}} \right)$$

gdzie: I_{Lmax} - szczytowa wartość prądu w dławiku, I_{omax} - maksymalny prąd odbiornika, L_{min} - minimalna wartość indukcyjności dławika, E_{min} - minimalna wartość napięcia zasilającego, U_s - spadek napięcia na łączniku, f - częstotliwość łączy.

Dla założonych prądów w dławiku dla częstotliwości 300kHz przyjęto indukcyjność równą 5μH. Natomiast dla częstotliwości 100kHz założono wartość dławika 14μH. Dobrano rdzeń typu MS-300014 dla 300kHz. Dla wybranego toroidu przenikalność referencyjna wynosi 14μ, efektywna długość toru magnetycznego $L_e=19,612cm$, efektywna objętość rdzenia $V_e=1,7729cm^3$ i współczynnik $A_l=16nH/N^2$ [14]. Dla częstotliwości 100kHz dobrano MS-225026, o parametrach: przenikalność referencyjna 26μ, $L_e=14,296cm$, $V_e=1,444cm^3$, $A_l=33nH/N^2$ [14]. Aby uzyskać konieczną do nawinięcia liczbę zwojów dla przyjętych indukcyjności należy posłużyć się zależnością 6. Rysunek 9 przedstawia nawinięty dławik dla częstotliwości 300kHz.

$$(6) \quad N = \sqrt{\frac{L}{A_l}}$$



Rys.9. Wykonanie dławika wysokoczęstotliwościowego do przetwornicy DC/DC podwyższającej napięcie

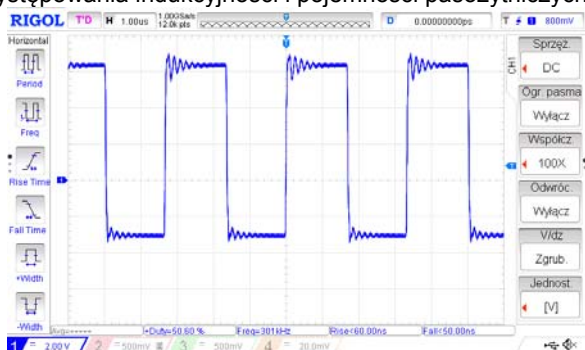
Jako łącznik użyto tranzystor z oferty GaN Systems o oznaczeniu GS66516T (rysunek 3). W elemencie tym elektroda cieplna jest na wierzchniej stronie, co zdecydowanie ułatwia odprowadzenie ciepła. W tym celu użyto mosiężnego radiatora. Napięcie przebicia użytego łącznika wynosi 650V, maksymalny prąd przy 25C to 60A, natomiast przy 100C wynosi 47A. Rezystancja otwartego kanału to 25mΩ przy 25C i 65mΩ przy 100C [11]. Doysterowania tranzystora użyto sterownik z oferty Texas Instruments LM5114, jest on dedykowany do łączników w technologii GaN. Zasilanie układu sterowania zrealizowano za pomocą zewnętrznego zasilacza laboratoryjnego. Rozwiązanie takie wymusza uwzględnienie energii sygnałów sterujących w bilansie strat mocy urządzenia.

Jako diody blokujące prąd wsteczny użyto szybkiej diody Schotky'ego IDW30G65C5, o dopuszczalnym prądzie ciągłym 30A i napięciu przebicia 650V [13]. W celu ograniczenia prądów filtra wyjściowego układu, zastosowano połączenie równoległe kilku kondensatorów o mniejszych pojemnościach, co umożliwia równomierne rozłożenie sumarycznego prądu. Na wejściu układu zastosowano kondensatory celem filtracji napięcia zasilającego. Ze względu na wysokie częstotliwości łączy użyto kondensatory foliowe.

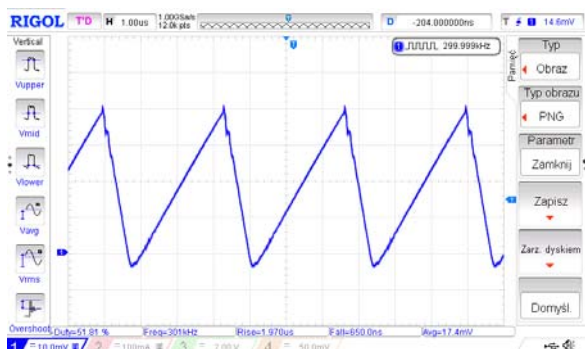
Wyniki

Pomiary prądu zostały zrealizowane za pomocą bezindukcyjnego bocznika o przekładni 13,5mV na 1A umożliwiające pomiar wysokoczęstotliwościowych przebiegów.

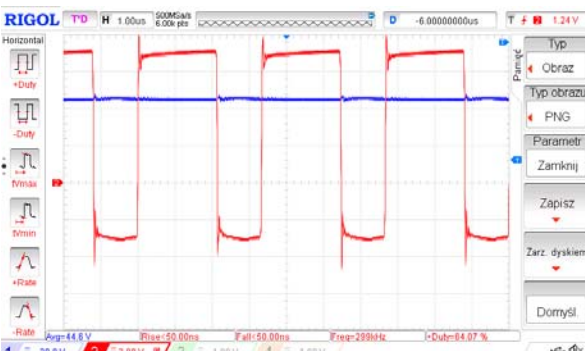
Układ sterowania zasilany jest napięciami -3V, +6 V z zasilacza laboratoryjnego. Rysunek 10 przedstawia przebiegi sterujące przy współczynniku wypełnienia równym 50% i częstotliwości 300kHz. W zaprezentowanym przebiegu widoczne są niewielkie oscylacje tłumione, wynikające z występowania indukcyjności i pojemności pasożytniczych.



Rys.10. Przebieg sygnału sterującego bramką tranzystora, częstotliwość 300kHz, współczynnik wypełnienia 50%



Rys.11. Przebieg prądu dławika, częstotliwość 300kHz, współczynnik wypełnienia 60%



Rys.12. Przebieg sygnału sterującego, po optymalizacji układu sterowania, częstotliwość 300kHz, współczynnik wypełnienia 60%

Dla małych prądów i założonych częstotliwości kluczowania układ działa poprawnie. Na rysunku 11

zamieszczono przebieg prądu dławika, dla częstotliwości kluczowania 300kHz i współczynnika wypełnienia sygnału sterującego 60% przy obniżonym napięciu zasilania.

Dla większych prądów przekształtnika pojawiają się znaczne zakłócenia sygnałów sterujących uniemożliwiające poprawną pracę układu. Konieczne było zastosowanie dodatkowych kondensatorów odsprężających elementy układu sterowania oraz zasilenie napięciami -3V, +6,5 V. Na rysunku 12 zamieszczono przebiegi sterujące po optymalizacji. Zmodernizowano również projekt płytki drukowanej oraz układy kondensatorów filtrujących stosując dodatkowo kondensatory elektrolityczne.

Wnioski i podsumowanie

Tranzystory mocy w technologii azotku galu są w stanie kluczować z dużymi częstotliwościami znaczne prądy. Pozwala to na konstruowanie przekształtników energoelektronicznych o zmniejszonych rozmiarach i dużej gęstości mocy. Coraz większa dostępność tych elementów świadczy o korzystnych parametrach i szybkim rozwoju technologii ich wytwarzania. Z powodzeniem można je sto-sować w typowych układach celem poprawy parametrów pracy.

Trudności może sprawiać odprowadzanie ciepła ze względu na miniaturowość elementów. Podczas projektowania przekształtnika dużych mocy działającego na wysokich częstotliwościach również pojawiają się problemy z odciążaniem sygnałów sterujących oraz z zjawiskiem naskórkowości w uzwojeniu dławika. Przedstawione wyniki są wstępne, praca wymaga dalszych badań eksperymentalnych.

Autorzy: mgr inż. Piotr Paziewski, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, E-mail: piotr.paziewski@wat.edu.pl, prof. dr hab. inż. Henryk Supronowicz, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, E-mail: henryk.supronowicz@wat.edu.pl, dr inż. Marek Suproniuk, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, E-mail: marek.suproniuk@wat.edu.pl

LITERATURA

- [1] Musznicki P., Racewicz Sz., Turzyński M., Przekształtniki energoelektroniczne DC-DC, Gdańsk 2012
- [2] Górecki P., Nowoczesne tranzystory mocy, czyli długa droga do SiC i GaN, Elektronika Praktyczna 3/2014, 46-61
- [3] Michalski A., Zymmer K., Przynajdy półprzewodnikowe z węgla krzemu w przekształtnikach energoelektronicznych, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 248, 2010
- [4] Janke W., Wojtasiak W., Właściwości i zastosowania tranzystorów HEMT na bazie azotku galu, Przegląd Elektrotechniczny, nr 9/2015, str. 65-73
- [5] Zdanowski M., Rąbkowski J., Barlik R., Wysokoczęstotliwościowy przekształtnik DC/DC z elementami z węgla krzemu – analiza symulacyjna, Przegląd Elektrotechniczny, nr 2/2014
- [6] Czyż P., Reinke A., Michna M., Zastosowanie tranzystorów GaN w wysokoczęstotliwościowych przekształtnikach DC/DC, Przegląd Elektrotechniczny, nr 1/2017, str. 333-338
- [7] Swadowski M., Zygoń K., Jąderko A., Przekształtnik wysokiej częstotliwości z wykorzystaniem nowoczesnych tranzystorów GaN, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 71, Studia i Materiały, Nr 35, 2015
- [8] Czyż P., Cichowski A., Śleszyński W., Badania ewaluacyjne tranzystora 650 V E-HEMT GaN do zastosowań w wysokosprawnych przekształtnikach DC/DC, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 47, Gdańsk 2015
- [9] TPH3207WS Datasheet
- [10] GS61008T Datasheet
- [11] GS66516T Datasheet
- [12] EPC2025 Datasheet
- [13] IDW30G65C5 Datasheet
- [14] www.feryster.pl (2014)