

## Tranzystory GaN w falowniku mostkowym o wysokiej częstotliwości przełączeń (250kHz)

**Streszczenie.** W artykule omówiono zagadnienia związane z projektowaniem i budową falownika mostkowego wykorzystującego azotkowo-galowe (GaN) tranzystory typu Gate Injection Transistors (GIT). Przedstawione są podstawowe właściwości tych tranzystorów wraz z tematyką dotyczącą ich sterowników bramkowych. Następnie zaprezentowany jest model laboratoryjny falownika o mocy 2kVA pracującego z częstotliwością przełączeń równą 250kHz. Artykuł ilustrowany jest wynikami badań laboratoryjnych.

**Abstract.** The paper discusses issues related to design and construction of the H-bridge inverter using Gallium Nitride (GaN) Gate Injection Transistors (GIT). Basic features of the transistors are shown together with gate driver topics. Then, a laboratory model of the 2kVA inverter operating at switching frequency of 250 kHz is presented. The paper is illustrated with experimental results. **Design and construction of the H-bridge inverter using Gallium Nitride (GaN) Gate Injection Transistors**

**Słowa kluczowe:** azotek galu (GaN), falownik jednofazowy, sterowniki bramkowe.

**Keywords:** gallium nitride (GaN), single-phase inverter, gate drivers.

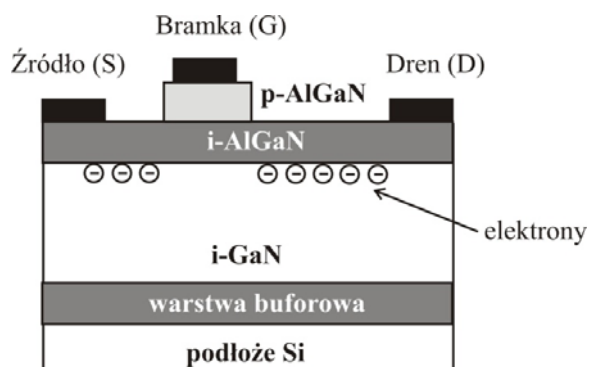
### Wstęp

Obok intensywnej ekspansji nowej technologii przyrządów półprzewodnikowych mocy z węgliku krzemiu (SiC) [1]-[4] następuje w ostatnim czasie także rozwój w zakresie elementów wykonanych z azotku galu (GaN) [5]-[19]. Pozytywne doświadczenia energoelektroników z diodami i tranzystorami SiC spowodowały, że kolejne przyrządy oparte na materiale o szerokim paśmie zabronionym (*wide band-gap*) przyjmowane są z dużym zainteresowaniem. Wydaje się, że ich droga do zastosowań praktycznych może być krótsza. Właściwości materiałowe GaN takie, jak prawie 3-krotnie szersze pasmo zabronione i 10-krotnie wyższa wartość krytycznego natężenia pola elektrycznego niż w krzemie (Si) [1] przy wyższej od 4H-SiC ruchliwości nośników, predysponują tranzystory azotkowo-galowe do pracy w obszarze wyższych częstotliwości. Gorsza przewodność termiczna powoduje, że elementy te są projektowane do pracy przy standardowych temperaturach złącz (do 150°C). Większość spotykanych przyrządów mocy wykonanych na bazie azotku galu ma strukturę HEMT (*High Electron Mobility Transistor*), przy czym są one wytwarzane w klasach napięciowych do 600V [4]-[9]. Przyrządy te wykorzystują zjawisko wytwarzania się na pograniczu między warstwami GaN i AlGaIn dwuwymiarowego gazu elektronowego o bardzo wysokiej ruchliwości, co pozwala uzyskać bardzo dobrą przewodność elektryczną. W połączeniu z niewielkimi rozmiarami struktur, przekładającymi się na niskie pojemności pasożytnicze, otrzymuje się przyrządy mocy o dużo lepszych właściwościach od krzemowych tranzystorów MOSFET o porównywalnych parametrach prądowo-napięciowych. Gdy zestawia się iloczyn rezystancji i ładunku bramkowego ( $r_{DS(on)} \times Q_G$ ) tranzystory HEMT wypadają znacznie korzystniej. Jednak podstawową wadą tych tranzystorów jest charakterystyka inwersyjna, bez polaryzacji bramki element jest w stanie przewodzenia. W większości zastosowań energoelektronicznych jest to cecha niekorzystna, co było przyczyną wyeliminowania z praktycznych zastosowań węglikowo-krzemowych tranzystorów JFET [2],[3]. W przypadku azotkowo-galowych tranzystorów HEMT sięga się po rozwiązania analogiczne jak w przypadku SiC JFET i stosuje się połączenie z szeregowym tranzystorem MOSFET (tzw. struktura kaskody) [9], co powoduje jednak pogorszenie właściwości statycznych i dynamicznych. Wydaje się, że to rozwiązanie może zniwelować znaczną część zalet wynikających z lepszych właściwości tranzystora wykonanego z azotku galu. Z drugiej strony stosuje się modyfikacje struktur tak,

aby uzyskać przyrządy półprzewodnikowe będące w stanie wyłączenia bez polaryzacji bramki.

Przykładem takiego elementu jest tranzystor określany jako Gate Injection Transistor (GIT) [10], którego przekrój pokazano na rys.1. Zasada działania opiera się także na występowaniu gazu elektronowego pomiędzy warstwami GaN i AlGaIn, jednak dodatkowa warstwa półprzewodnika typu p pod bramką powoduje zablokowanie kanału tranzystora przy braku polaryzacji bramki. W ten sposób otrzymuje się tranzystor "normalnie wyłączony" i dopiero przyłożenie dodatniego napięcia do bramki powoduje odblokowanie jego kanału. Co więcej, po przekroczeniu napięcia progowego złącza pn utworzonego między bramką a źródłem następuje wstrzykiwanie do kanału dziur, co dodatkowo zmniejsza rezystancję przewodzenia.

Z perspektywy zastosowania GIT w układach energoelektronicznych można porównać ten tranzystor do "normalnie wyłączonego" SiC JFET lub, przy pominięciu właściwości dynamicznych, tranzystora bipolarnego ze względu na konieczność dostarczenia prądu do bramki w stanie przewodzenia. Wymagana amplituda tego prądu jest jednak niewielka, rzędu 50mA w przypadku tranzystora o prądzie znamionowym 15A (a więc stosunek  $I_D/I_G$  to ok. 300) i nie stanowi znaczącego wyzwania dla sterownika bramkowego. Można stosować sterowniki bazujące na obwodzie RC [18] lub też sięgnąć po bardziej wyrafinowane rozwiązania dwustopniowe [19]. Istotną cechą tego tranzystora jest także możliwość przewodzenia dwukierunkowego prądu, co eliminuje konieczność stosowania diod zwrotnych w przypadku pracy w gałęzi falownikowej.



Rys.1. Przekrój pojedynczej komórki tranzystora GIT [18].

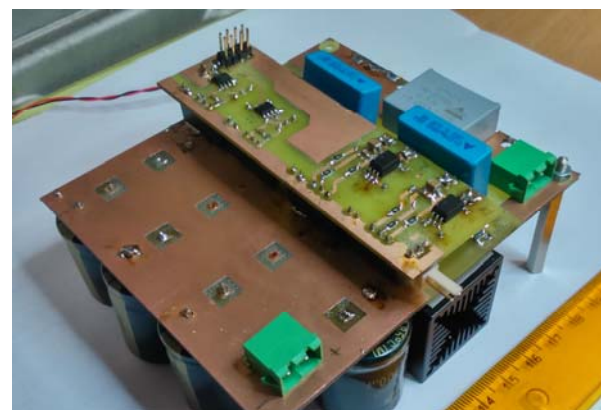
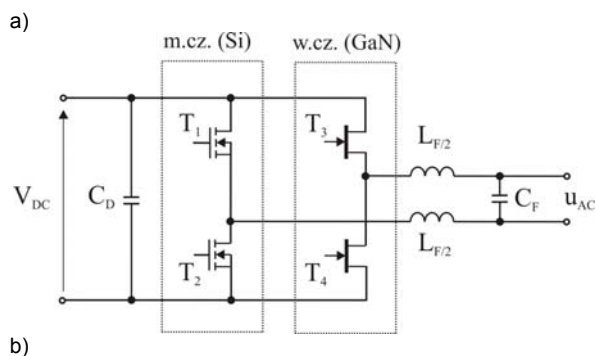
### Koncepcja falownika z mieszanym typem łączników

Podstawowym problemem w zastosowaniu tranzystorów GaN, podobnie jak w przypadku SiC, jest wyższy koszt w stosunku do ich krzemowych odpowiedników. Elementy GaN zazwyczaj są wytwarzane na trudniejszym w przygotowaniu podłożu SiC, które jest jednak lepiej dopasowane z punktu widzenia współczynników rozszerzalności termicznej niż podłoże Si [11]. W przypadku tranzystora GIT, problemy z dopasowaniem rozszerzalności warstw GaN względem podłoża Si rozwiązano poprzez zastosowanie warstwy buforowej (rys. 1) [11]. Pomimo to wydaje się, że dodatkowe procesy produkcyjne powodują, że cena jednostkowa pozostanie wyższa niż porównywalnego MOSFETA z Si.

Zastosowanie tranzystorów GaN GIT w falowniku mostkowym w miejsce używanych dotychczas tranzystorów krzemowych daje możliwość podniesienia częstotliwości przełączeń i zmniejszenia rozmiarów elementów biernych filtru LC. Koszt takiego rozwiązania może okazać się jednak znaczący i nie zawsze uzasadniony biorąc pod uwagę typowe zastosowania tych układów (bezprzewagowe zasilanie, fotowoltaika). Stąd pomysł zbudowania falownika mostkowego z wykorzystaniem tylko jednej gałęzi tranzystorów GIT (rys. 2a). Koncepcja ta bazuje na znanych rozwiązaniach, gdzie jedna gałąź tranzystorów pracuje z częstotliwością składowej podstawowej napięcia wyjściowego (m.cz.) a druga gałąź jest dostosowana do pracy z wysoką częstotliwością (w.cz.), wynikającą z kompromisu między stratami mocy a rozmiarami niezbędnego filtru LC. W omawianym przypadku na gałąź m.cz. składają się dwa tranzystory Si MOSFET, których straty łączeniowe mogą być pominięte, istotna jest tylko ich niska rezystancja w stanie przewodzenia. Część w. cz. stanowią dwa tranzystory GaN GIT, które są w stanie pracować przy częstotliwościach znacznie powyżej 100 kHz [18].

### Model laboratoryjny falownika o mocy 2kVA

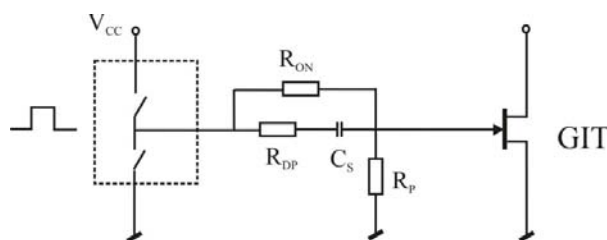
W celu sprawdzenia koncepcji falownika mostkowego o mieszanym typie łączników GaN i Si zaprojektowano i zbudowano model laboratoryjny o mocy znamionowej 2kVA (rys.2b). Przyjęto warunki znamionowe typowe dla zastosowań takiego falownika: napięcie zasilające do 400V, napięcie wyjściowe 230V RMS (50Hz). Na podstawie dotychczasowych doświadczeń z tranzystorami GaN [18] i analizy symulacyjnej dobrano częstotliwość pracy gałęzi w.cz. równą 250kHz, co pozwoliło zredukować indukcyjność dławika w filtrze wyjściowym do 100μH. W praktyce dławik ten został podzielony na dwa identyczne elementy po 50μH każdy (rys. 2a). W efekcie rozmiary filtru LC zostały istotnie zredukowane i stanowią mniej niż 20% objętości modelu (rys.2b). Niestety, wysoka częstotliwość pracy elementów półprzewodnikowych mocy wykonanych z azotku galu nie ma istotnego wpływu na wymaganą wartość pojemności kondensatora obwodu napięcia stałego  $C_D$ . Jest on dobierany ze względu na amplitudę prądu wyjściowego i przy mocy układu równej 2kVA (co odpowiada amplitudzie prądu  $I_M=12,3A$ ) zastosowano 7 równoległych kondensatorów elektrolitycznych 100μF/450V. Dlatego ta część układu zajmuje aż ok. 40% objętości falownika. Inne elementy składowe modelu laboratoryjnego to radiator typu LAM3 (30x30x100mm razem z wentylatorem), na którym umieszczono w rzędzie tranzystory GaN GIT (600V/15A) i krzemowe MOSFET. W celu uzyskania poprawnych procesów przełączeniowych zastosowano także kondensatory szybkie (100nF). Obwód mocy wykonano w formie płytki drukowanej, na której zamocowane są wszystkie elementy składowe (rys.2b), w tym obwody sterowników bramkowych.



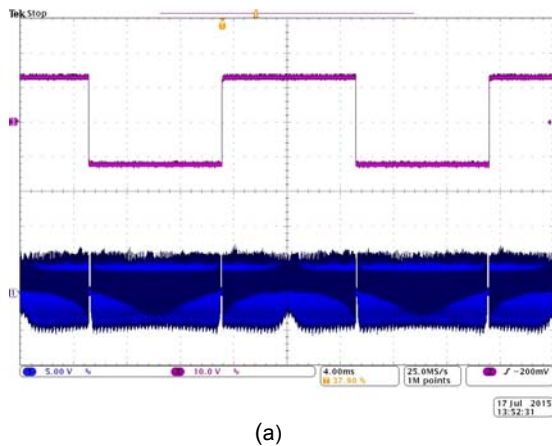
Rys.2. Schemat (a) i zdjęcie modelu (b) falownika mostkowego z mieszanym typem łączników GaN i Si.

### Sterowniki bramkowe

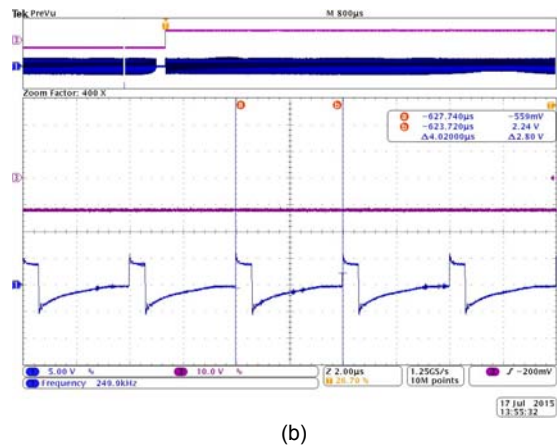
Sterowniki bramkowe są istotną częścią modelu falownika 2kVA, ponieważ umożliwiają bardzo szybkie przełączanie tranzystorów GaN a przez to ich pracę przy wysokiej częstotliwości. Podobnie jak w przypadku falownika półmostkowego opisanego w [18] sięgnięto po proste rozwiązanie sterownika z obwodem RC (rys.3). Dodatkowy kondensator  $C_S$  zapewnia impulsy prądu bramki o dużej dynamice, co powoduje szybkie przeładowanie pojemności tranzystora. Z uwagi na indukcyjności pasożytnicze i tworzące się obwody rezonansowe konieczne jest zastosowanie rezystora tłumiącego  $R_{DP}$ . Z kolei rezystor  $R_{ON}$  zapewnia przepływ niewielkiego prądu bramki w stanie przewodzenia. W praktycznej realizacji sterownika bramkowego dla GaN GIT sięgnięto po szybki sterownik typu UCC27524, którego wyjścia pracowały równolegle. Izolacją od obwodu sterowania zapewniali ADUM3210 a całość obwodu sterownika była zasilana z TMH2405D (izolator cyfrowy napięciem 5V a UCC27524 napięciem 10V). Parametry poszczególnych elementów to  $C_S=2nF$ ,  $R_{DP}=5\Omega$ ,  $R_{ON}=560\Omega$  i  $R_P=10k\Omega$ .



Rys.3. Schemat sterownika bramkowego dla tranzystorów GIT.



(a)



(b)

Rys.4. Sygnały bramkowe tranzystora MOSFET (górny) i GIT (dolny) pokazane w skali czasowej 4ms/działkę (a) i 2μs/działkę (b).

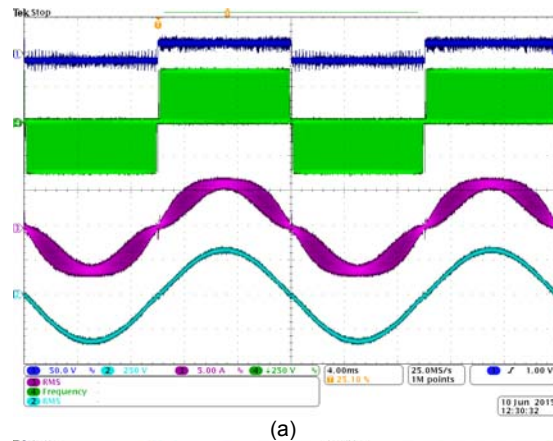
### Badania laboratoryjne

Serię badań laboratoryjnych rozpoczęto od sprawdzenia funkcjonalności sterowników bramkowych - wyniki pokazano na rys. 4. Sygnały sterujące dla tranzystorów T<sub>1</sub>-T<sub>4</sub> zostały wygenerowane przy pomocy procesora sygnałowego TMS320F28335. Zgodnie z przyjętą zasadą pracy falownika tranzystory MOSFET pracują z częstotliwością 50Hz a tranzystory GIT 250kHz. Przy tym widoczny jest na rys. 4b charakterystyczny przebieg napięcia na bramce GIT wynikający z przeładowywania kondensatora C<sub>S</sub>.

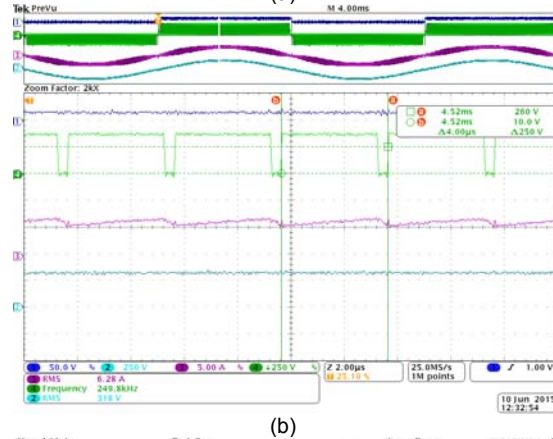
W dalszej części badań przeprowadzono testy układu zasilanego z regulowanego zasilacza napięcia stałego przy obciążeniu rezystancyjnym R=52Ω, co odpowiada mocy na wyjściu falownika do 1kVA. Zmieniano częstotliwość przełączeń tranzystorów GIT od 150 do 250kHz i dokonywano pomiarów oscyloskopowych oraz strat mocy przy pomocy analizatora. Wyniki badań pokazano na rys. 5 i 6. Przebiegi wartości chwilowych charakterystycznych wielkości napięć i prądów w obwodzie falownika widoczne są na rys. 5 a i b. Ilustrują one poprawną pracę falownika i zadowalającą jakość przebiegów przy f<sub>s</sub>=250kHz oraz mocy wyjściowej równej ok. 1kVA. Obserwacje te potwierdzają rejestracje z analizatora mocy, które dodatkowo wskazują na stosunkowo wysoką sprawność rzędu 98%. Oznacza to, że moc strat wydzielana we wszystkich elementach aktywnych i biernych falownika równa jest ok. 20W (rys.5c).

Zagadnienie strat mocy było dokładniej zbadane poprzez serię rejestracji przy pomocy analizatora mocy dla różnych częstotliwości i wartości mocy wejściowej. Wyniki zestawione na rys. 6 pokazują procentowy udział strat mocy ΔP dla różnych punktów pracy. Widać wyraźnie, po uwzględnieniu niedokładności pomiarowych, że przyrost względnych strat z częstotliwością jest w przybliżeniu stały (ok. 0,25-0,3%/50kHz). Wydaje się, że jest to wartość stosunkowo niewielka, wynikająca przede wszystkim z szybkiego przełączania i niskich wartości energii traconej w tym czasie w tranzystorach GaN.

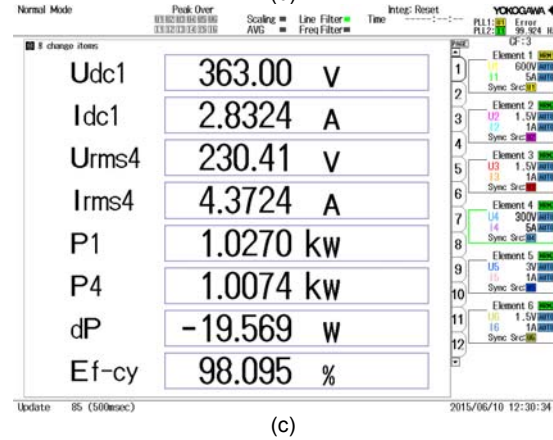
Dalsze badania prowadzono dla znamionowej częstotliwości przełączeń i zwiększonej mocy obciążenia (R=26Ω). Niestety, z uwagi na problemy z obwodem sterowników bramkowych nie udało się uzyskać mocy znamionowej, osiągnięto ok. 80% tej wartości przy napięciu ok. 350V. Przedstawione na rys. 7a wyniki rejestracji oscyloskopowych pokazują poprawną jakość przebiegów prądów i napięć. Z kolei analizator pokazał nadal wysoką sprawność bliską 98% (ok. 34W strat mocy). Uzyskane wyniki dają podstawę do przypuszczenia, że falownik zachowa swoje właściwości także przy mocy nominalnej.



(a)



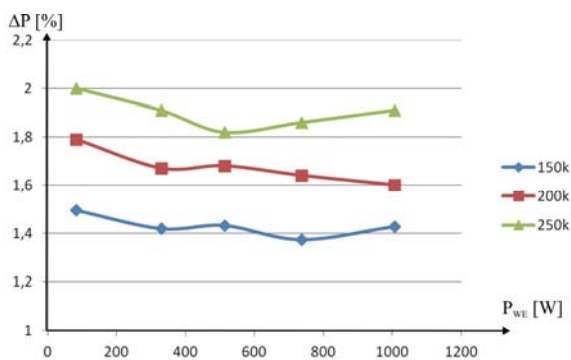
(b)



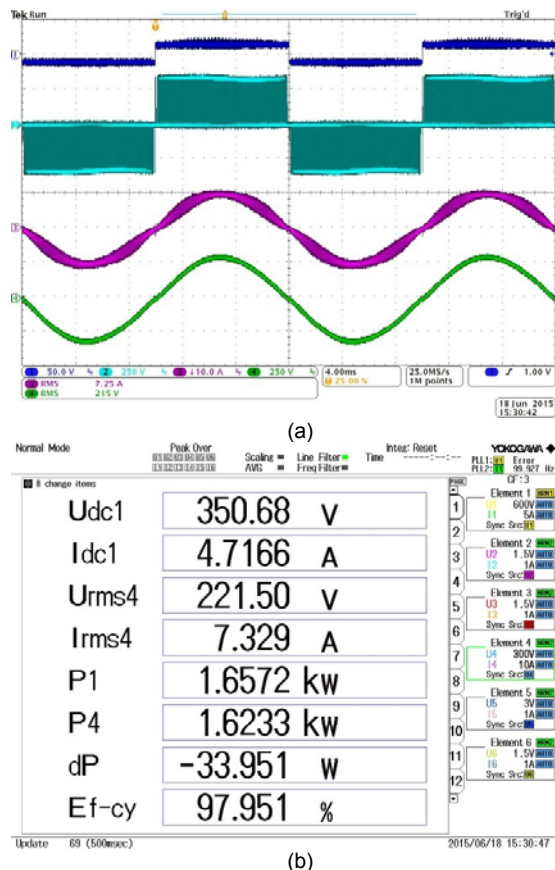
(c)

Rys.5. Praca falownika przy częstotliwości 250kHz i mocy ok. 1kVA: rejestracje oscyloskopowe (a), (b) i przy pomocy analizatora mocy (c).





Rys. 6. Procentowy udział straty mocy w funkcji mocy wejściowej dla różnych częstotliwości przełączeń.



Rys. 7. Praca falownika przy częstotliwości 250kHz i mocy ok. 1,6kVA: rejestracje oscyloskopowe (a) i przy pomocy analizatora mocy (b).

### Podsumowanie

Przedstawiony model laboratoryjny i jego wyniki badań laboratoryjnych dowodzą, że przedstawiona koncepcja falownika mostkowego z mieszanymi elementami GaN i Si została pozytywnie zweryfikowana. Układ, w którym tylko połowa tranzystorów pracuje z wysoką częstotliwością cechuje się istotnie zredukowanymi wymiarami filtru wyjściowego LC. Zaprezentowane rejestracje wskazują na zadowalającą jakość uzyskanych przebiegów w dławiku filtru oraz na jego wyjściu. Przy tym układ cechuje się dosyć wysoką, jak na częstotliwość przełączeń 250kHz, sprawnością rzędu 98%. Niski poziom strat mocy pozwala na ograniczenie rozmiarów radiatora i dalsze poprawienie wskaźnika gęstości mocy. Gdyby to jednak sprawność

energetyczna była zakładanym celem projektu wydaje się, że po obniżeniu częstotliwości do ok. 100kHz realnie jest uzyskanie sprawności ok. 99%.

### Podziękowania

Autor dziękuje Panasonic Corporation za dostarczenie próbek tranzystorów GIT do badań.

**Autor:** dr hab. inż. Jacek Rąbkowski, prof. PW, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: [jacek.rabkowski@isep.pw.edu.pl](mailto:jacek.rabkowski@isep.pw.edu.pl)

### LITERATURA

- [1] Barlik R., Rąbkowski J., Nowak M., Przyrządy mocy z węgla krzemu (SiC) i ich zastosowanie w energoelektronice, *Przegląd Elektrotechniczny*, 82 (2006), nr 11, 1-8
- [2] Rąbkowski J., Peftitsis D., Nee H.P., SiC power transistors – a new era in power electronics is initiated, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 6 (2012), n.2, 17-26
- [4] Kaminski N., State of the art and future of wide band-gap devices, *Proc. of European Conference on Power Electronics and Applications EPE*, 2009, 1-9
- [5] Kikkawa T. et al., Commercialization and reliability of 600 V GaN power switches, *IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)*, 2015
- [6] Y.-F. Wu et al, Performance and Robustness of First Generation 600-V GaN-on-Si Power Transistors, *The 1st IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*, 2013, S1-002.
- [7] -, GaN Technology Overview, *Efficient Power Conversion*, 2012 ([epc-co.com/epc/](http://epc-co.com/epc/))
- [8] Reusch D., Strydom J., Evaluation of Gallium Nitride Transistors in High Frequency Resonant and Soft-Switching DC-DC Converters, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30 (2015), n. 9, 5151-5158.
- [9] Huang X., Liu Z., Li Q., Lee F.C., Evaluation and Application of 600V GaN HEMT in Cascode Structure, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29 (2015), n.5, 2453-2461
- [10] Uemoto Y. et al., Gate Injection Transistor (GIT) - A normally-Off AlGaIn/GaN Power Transistor Using Conductivity Modulation, *IEEE Transaction on Electron Devices*, 54 (2007), n.12, 3393-3399
- [11] Ishida M., Ueda T., Tanaka T., Ueda D., GaN on Si Technologies for Power Switching Devices, *IEEE Trans. On Electron Devices*, 60 (2013), n.10, 3053-3059
- [12] Ueda T., Recent Advances and Future Prospects on GaN-based Power Devices, *Proc. of the International Power Electronics Conference - ECCE Asia*, 2014, 2075-20178
- [13] Ueda D., Fukuda T., Nagai S., Sakai H., Otsuka N., Morita T., Negoro N., Ueda T., Tanaka T., Present and Future of GaN Power Devices, *Proc. of 8th Conference on Integrated Power Systems CIPS 2014*, 1-5.
- [14] Morita T., Tamura S., Anda Y., Ishida M., Uemoto T., Ueda T., Tanaka D., Ueda D., 99,3% efficiency of Three-Phase Inverter for Motor Drive Using GaN-based Gate Injection Transistors, *26th IEEE Applied Power Electronics Conference*, 2011, pp. 481-484.
- [15] Yifeng Wu, Kebort D., Guerrero J., Yea S., Honea J., High Frequency GaN Diode-free Motor Drive Inverter with Pure Sine-wave Output, *Proceedings of PCIM 2012, Nurnberg*
- [16] Hensel A., Wilhelm C., Kranzer D., Application of a new 600V GaN Transistor in Power Electronics for PV Systems, *15th Int. Power Electronics and Motion Control Conference*, 2012
- [17] Tuysuz A., Bosshard R., Kolar J.W., Performance Comparison of a GaN GIT and a Si IGBT for High-speed Drive Applications, *Proc. of Int. Power Electronics Conference*, 2014, 1904-1911
- [18] Rąbkowski J., Barlik R., Experimental evaluation of GaN gate Injection Transistors, *Przegląd Elektrotechniczny* 91 (2015), nr 3, 9-12
- [19] Brueske S., Fuchs F.W, Analysis of the Switching Behaviour of 650 V GaN Semiconductors and Design of a Two-Step Gate Voltage Driver, *Proc. of PCIM Europe*, 2015, 1369-1376.