

doi:10.15199/48.2025.03.39

## Modułowy synchroniczny przekształtnik DC/DC w technologii GaN o dużej obciążalności prądowej

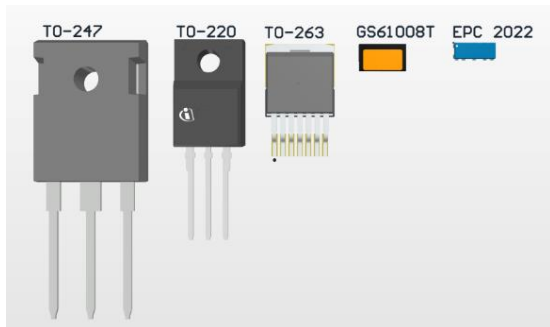
**Streszczenie.** Przedstawiony niżej tekst opisuje proces projektowania oraz wyniki badań eksperymentalnych modułowego przekształtnika synchronicznego o charakterystyce obniżającej napięcie, zbudowanego przy użyciu miniaturowych tranzystorów MOSFET z azotku galu. Praca ma na celu analizę możliwości zastosowania tranzystorów GaN w układzie modułowym o dużej obciążalności prądowej, który może być zastosowany np. w niskonapięciowych magazynach energii. W pracy zbadano układ eksperymentalny pracujący z mocą 4 kW przy prądzie wyjściowym blisko 150A i częstotliwości przełączania 300 kHz.

**Abstract.** The following text describes the design process and experimental results of a modular step-down synchronous DC/DC converter built using miniature gallium nitride MOSFETs. The work aims to analyze the possibility of using GaN transistors in a modular system with high current carrying capacity, which can be used, for example, in low-voltage energy storages. The paper presents the results of a prototype with an output power of over 4 kW and output current of 150A at a switching frequency of 300 kHz. (**Modular synchronous DC/DC converter with high current GaN MOSFETs**).

**Słowa kluczowe:** tranzystory GaN, układ DC obniżający napięcie, wielogłęziowy przekształtnik synchroniczny, badania eksperymentalne.  
**Keywords:** GaN transistors, DC/DC synchronous buck converter, interleaved DC/DC converter, experimental research.

### Wstęp

Mimo dużych oczekiwań wobec szerokopasmowej technologii półprzewodnikowej z azotku galu (GaN), która miała przynieść jeszcze większe korzyści niż opanowana już technologia węgla krzemu (SiC), na rynku dostępne są jedynie tranzystory polowe o napięciu przebicia nie przekraczającym 600-700 V [1]. Mimo wielu zalet, w tym bardzo dobrych parametrów dynamicznych oraz dużej przewodności cieplnej, ograniczona wytrzymałość napięciowa oraz niekorzystne parametry statyczne egzemplarzy wysokonapięciowych, technologia GaN na podłożach krzemowych (GaN-on-Si), nie jest w stanie konkurować z elementami z SiC, dlatego trudno mówić o oczekiwanej rewolucji [2]. Być może rozwój technologii czystego azotku galu (tzw. GaN-on-GaN [3]) pozwoli przełamać obecne ograniczenia, jednak póki co, dużo większe możliwości są związane z istniejącymi tranzystorami GaN niskonapięciowymi <200V. Ich obecne parametry statyczne są porównywalne do technologii krzemowej (Si), natomiast większa gęstość prądu oraz przewodność cieplna, a także dużo mniejsze pojemności złączowe, dają im przewagę w aplikacjach o bardzo dużych częstotliwościach przełączeń [4][5]. Dzięki temu możliwe jest użycie tych elementów w niskonapięciowych aplikacjach, o bardzo dużej gęstości mocy i wysokiej sprawności energetycznej, co pozwala na miniaturyzację gabarytów do najbardziej wymagających zastosowań, takich jak układy zasilania procesorów czy niskonapięciowe superkondensatorowe i litowo jonowe magazyny energii [6][7].



Rys. 1. Porównanie wielkości popularnych obudów niskonapięciowych tranzystorów MOSFET

Producenci tranzystorów z GaN odeszli od wytwarzania ich w tradycyjnych obudowach (TO247, TO220 czy TO263) popularnych dla przyrządów z Si oraz SiC, idąc w kierunku minimalizacji powierzchni, a tym samym ograniczenia indukcyjności i pojemności pasożytniczych obwodów, które są kluczowe w układach o wysokiej częstotliwości przełączania [8][9]. Na rysunku 1 przedstawiono w tej samej skali różne popularne obudowy tranzystorów Si i SiC oraz dla porównania nowe miniaturowe obudowy tranzystorów GaN. Zdecydowaną zaletą tych ostatnich jest łatwość miniaturyzacji obwodów PCB oraz poprawa warunków dynamicznych w układach bardzo dużych częstotliwości, ale z drugiej strony prowadzi to do ograniczonych możliwości odbierania ciepła ze struktur półprzewodnikowych a także skomplikowany montaż i serwis tych układów.

W celu weryfikacji najnowszych rozwiązań wśród dostępnych przyrządów półprzewodnikowych w urządzeniach średniej mocy zdecydowano się zaprojektować i zbudować prototyp przekształtnika prądu stałego w technologii GaN o bardzo dużej obciążalności prądowej i dużej gęstości mocy. Parametry projektowe przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zakładane parametry projektowe

Lp.	Parametry	Wartości
1	Napięcie wejściowe nominalne - $U_{IN}$	48 V
2	Napięcie wyjściowe nominalne - $U_{OUT}$	24 V
3	Moc wyjściowa maksymalna - $P_{OUT}$	5 kW
4	Prąd wyjściowy maksymalny - $I_{OUT\ MAX}$	200 A
5	Częstotliwość przełączeń - $f_{SW}$	300 kHz
6	Zakres regulacji napięcia wejściowego	-20/+10 %
7	Zakres regulacji napięcia wyjściowego	-25/+25 %

### Badania symulacyjne

Wstępne studium symulacyjne pozwoliło wytypować najbardziej korzystną topologię przekształtnika dla podanych założeń. Zdecydowano się na wielogłęziowy przekształtnik synchroniczny [10]. W ramach badań symulacyjnych przygotowano model z idealnymi łącznikami tranzystorowymi, do określenia wstępnych wymagań wobec elementów aktywnych i biernych. Ponadto model umożliwił późniejsze testy algorytmu sterowania przekształtnikiem.

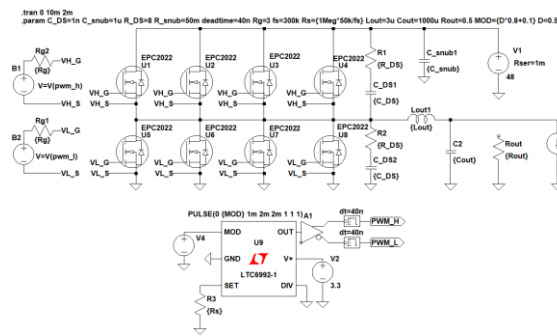
Następnie dokonano wyboru tranzystorów, w ramach którego analizowano m.in. elementy o parametrach

zestawionych w tabeli 2. Badania symulacyjne miały pomóc w precyzyjnym oszacowaniu źródeł strat w układzie, co z kolei pozwoliło na bardziej świadome porównanie elementów Si i GaN. Aby maksymalnie urealnić analizy teoretyczne, użyto przy tym dostępnych modeli łączników w języku SPICE: tranzystorów GaN EPC2022 [11] oraz krzemowego BSC070N10NS3 [12]. Przeprowadzona została analiza porównawcza rozkładu strat mocy tranzystorów GaN EPC oraz Si w odniesieniu do jednej gałęzi, zgodnie z modelem w LTspice (Rys.2).

Tabela 2. Porównanie parametrów rozpatrywanych tranzystorów

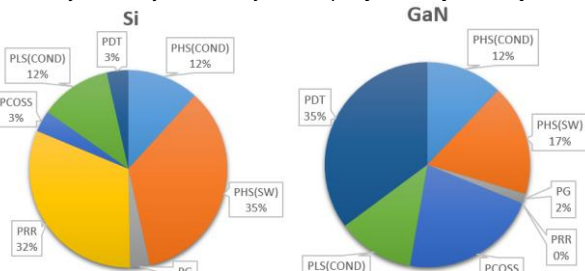
Lp.	Parametry	EPC2022 (GaN)	GS61008T (GaN)	BSC070N10NS3 (Si)
1	$U_{DS}$ [V]	100	100	100
2	$I_D$ [A]	90	90	92
3	$R_{DS(on)}$ [ $\Omega$ ]	2,4	7	7
4	$Q_G$ [nC]	13	8	42
5	$R_{TH-c}$ [K/W]	0,4	0,55	1,1

Na rysunku 3 zaprezentowano w sposób graficzny otrzymane wartości strat mocy łączników, wynikających z różnych właściwości. Wyznaczono także straty mocy łączników dla jednej gałęzi, w zależności od współczynnika wypełnienia, a więc w funkcji napięcia wyjściowego układu, przy stałym prądzie wyjściowym 50A i częstotliwości przełączania 300 kHz (Rys.4.). Zaprezentowane wyniki porównawcze jednoznacznie wskazują na dużą przewagę technologii GaN w przypadku górnego łącznika (HS), który pracuje w trybie twardego przełączania, przy porównywalnych wynikach GaN i Si dla dolnego łącznika (LS). Ciekawie wygląda również analiza poszczególnych składowych sumarycznych strat mocy jednego modułu dla obydwu technologii dla wypełnienia równego 50%.

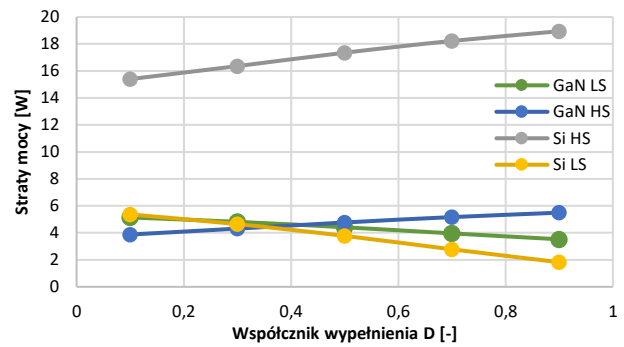


Rys.2. Model symulacyjny gałęzi z równoległym połączeniem czterech tranzystorów mocy na łącznik

W przypadku tranzystora GaN widoczny jest duży wpływ strat związanych z przewodzeniem wstecznym tranzystora, który nie ma w strukturze typowej dla MOSFET z krzemu diody zwrotnej, oznaczony jako PDT, wynika to również z faktu, że pozostałe parametry łącznika są bardzo dobre. W przypadku łącznika Si, zdecydowanie dominują łączeniowe straty mocy PHS(SW) oraz straty związane z ładunkiem wstecznym diody zwrotnej PRR, przy twardym załączeniu.



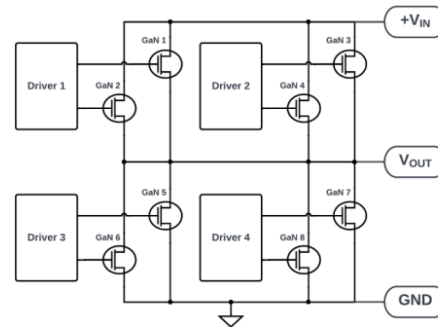
Rys.3. Analiza i porównanie strat mocy łączników Si ( $P_{loss}=21,1W$ ) i GaN ( $P_{loss}=9,2W$ ) dla  $U_{IN} = 48V, D = 0,5, I_{OUT} = 50A, f_{SW} = 300kHz$



Rys.4. Porównanie strat mocy łączników Si i GaN w funkcji współczynnika wypełnienia D ( $U_{IN} = 48V, D = var, f_{SW} = 300kHz$ )

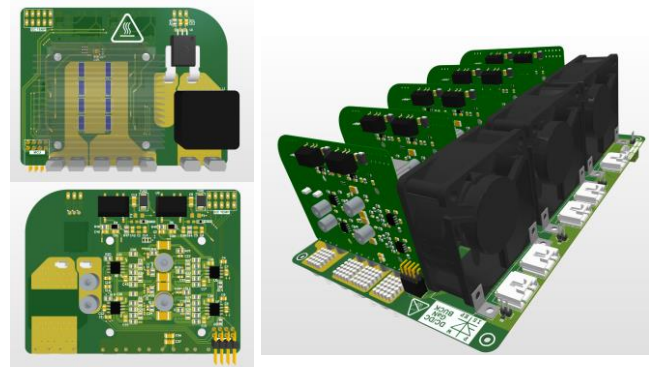
### Projekt przekształtnika wielogałęziowego

Z uwagi na wybraną topologię układu oraz poprawę warunków termicznych łączników GaN, zdecydowano się na realizację prototypu w wersji modułowej, gdzie każda gałąź będzie osobnym i samodzielnym układem jednogałęziowym. Każdy łącznik w gałęzi składa się z czterech tranzystorów EPC2022, sterowanych przy pomocy dwóch sterowników bramkowych (Rys.5.). Dobrano także miniaturowy dławik o wartości 2,5  $\mu H$ , o znamionowym prądzie 54 A, którego wymiary to zaledwie 22.5x20x13 mm. Ważnym elementem modułu jest radiator, który z chłodzeniem wymuszonym o przepływie 200LFM, ma rezystancję termiczną równą 1,75 K/W (wymiary to 45x45x22 mm).



Rys.5. Schemat ideowy stopnia mocy testowego modułu DC/DC

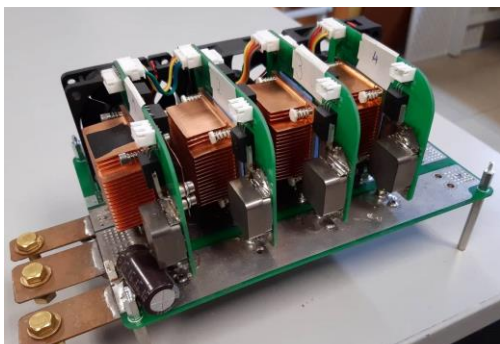
Całkowite wymiary jednogałęziowego modułu z tranzystorami GaN o zakładanej mocy 1,25 kW to 89x68x30 mm (co daje gęstość mocy ponad 6,6 kW/dm<sup>3</sup>). Pełny 4-modułowy przekształtnik DC/DC, wraz z dedykowaną płytą mocy, integrującą pozostałe moduły, oraz wentylatorami chłodzącymi, charakteryzuje się również компактowymi wymiarami i gęstością mocy na poziomie blisko 2 kW/dm<sup>3</sup>, co w tego typu konstrukcjach jest bardzo dobrym rezultatem. Wizualizacja całego projektu jest widoczna na rysunku 6.



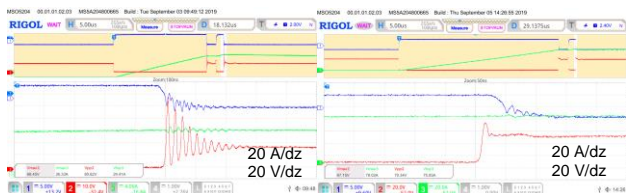
Rys.6. Wizualizacja trójwymiarowego projektu modułów mocy i kompletnego wielogałęziowego przekształtnika DC/DC

## Badania eksperymentalne

Finalną wersję prototypu projektowanego przekształtnika wielogłęziowego DC/DC o obciążalności prądowej 200 A, zaprezentowano na rysunku 7. W celu ograniczenia rezystancji obwodów drukowanych na ścieżkach zasilających i odbiorczych, zrównoleglono je przy pomocy miedzianych płaskowników o grubości 1 mm. Badania eksperymentalne rozpoczęto od obserwacji procesów łączeniowych pojedynczej gałęzi. Na rys. 8a widoczny jest oscylogram wyłączenia tranzystorów GaN w układzie bez obwodów odciążających. Dodając elementy RC równoległe do łączników, osiągnięto znaczącą poprawę procesów łączeniowych, co pokazano na rysunku 8b. Ograniczono stromości przebiegów napięcia oraz praktycznie wyeliminowano przepięcia i oscylacje napięcia na łączniku. Osiągnięte efekty wiążą się niestety z wzrostem łączeniowych strat energii oraz dodatkowymi stratami w szeregowej rezystancji obwodów odciążających[13].



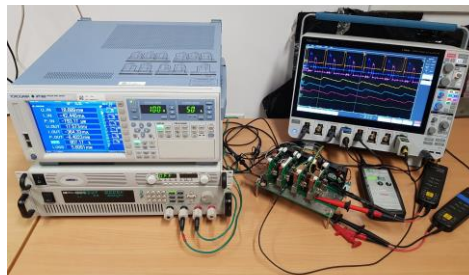
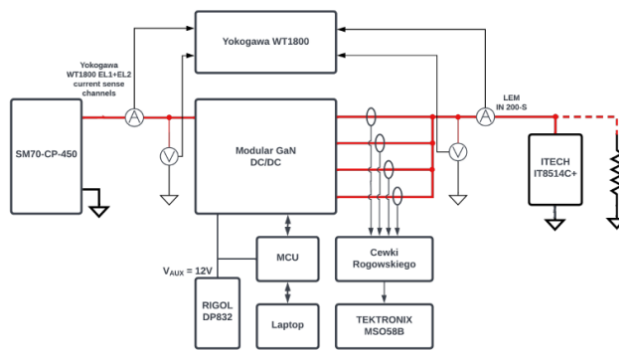
Rys.7. Zdjęcie prototypu synchronicznego przekształtnika DC/DC o wydajności prądowej ponad 200 A



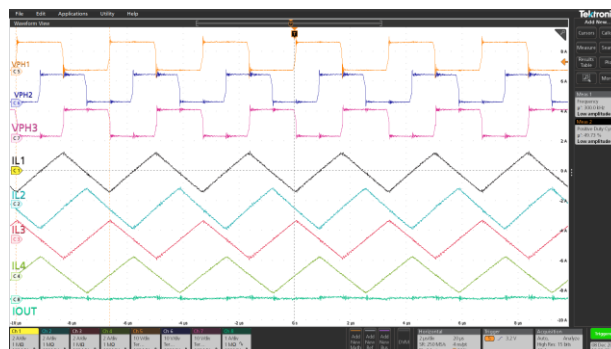
Rys.8: Rejestracje procesów łączeniowych tranzystorów GaN: a) bez obwodów odciążających, b) z obwodami RC

Kolejnym badaniem były testy układu wielogłęziowego, które były realizowane na specjalnie przygotowanym stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w sondy z cewkami Rogowskiego, ośmiokanałowy oscyloskop i precyzyjny analizator mocy YOKOGAWA WT1800 oraz obciążenie elektroniczne ITECH i rezystancyjne. Schemat ideowy stanowiska z zaznaczonymi punktami pomiarowymi oraz zdjęcie tego stanowiska zaprezentowano na rys.9. Na rysunku 10 zaprezentowano przebiegi czasowe prądów ( $I_{L1}$ - $I_{L4}$ ) oraz napięć  $V_{PH1}$ - $V_{PH3}$  wyjściowych i składowej przemiennej prądu wyjściowego  $I_{OUT}$ , modułów pracujących z przesunięciem fazowym, przy współczynniku wypełnienia  $D=0,5$ . W takim układzie efektywna częstotliwość prądu i napięcia wyjściowego wynosi 1,2 MHz, dzięki czemu tętnienia w tych przebiegach są właściwie pomijalne.

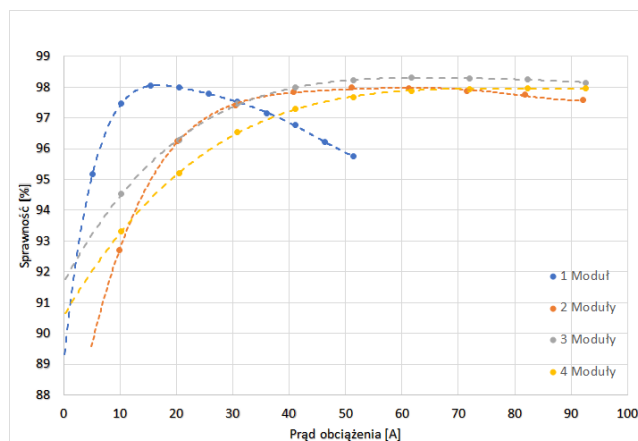
W kolejnych badaniach rejestrowano sprawność układu w różnych konfiguracjach w funkcji prądu wyjściowego. Wykresy na rysunku 11 prezentują wyniki badań w układzie 1-,2-,3- i 4-modułowym, w zakresie prądu wyjściowego ograniczonego do 100 A. Widać przy tym, że powyżej 50A na moduł, sprawność energetyczna układu jest wyraźnie niższa, co wskazuje na pewną granicę efektywności pojedynczego modułu.



Rys.9. Schemat ideowy i zdjęcie stanowiska do testów eksperymentalnych modułowego przekształtnika DC/DC



Rys.10. Napięcia wyjściowe gałęzi ( $V_{PH1}$ - $V_{PH3}$ ), składowa AC prądów modułów ( $I_{L1}$ - $I_{L4}$ ) oraz składowa AC prądu wyjściowego ( $I_{OUT}$ ) dla  $D = 0.5$ , 4 moduły



Rys.11. Wykresy zmierzonej sprawności energetycznej przekształtnika w różnych konfiguracjach pracy układu w funkcji wartości średniej prądu obciążenia

Na rysunku 12 zaprezentowano wyniki pomiarów przy maksymalnej wydajności prądowej osiągniętej na stanowisku eksperymentalnym, tj. przy mocy ponad 4 kW i prądzie wyjściowym blisko 150 A. Osiągnięto wtedy sprawność energetyczną na poziomie 99 %. Dalsze zwiększanie prądu wyjściowego powodowało coraz bardziej widoczne nierównomierne obciążanie się poszczególnych

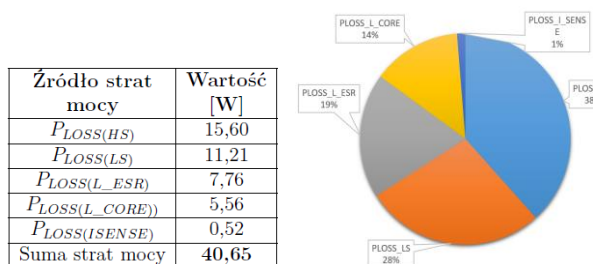


modułów, co widać na załączonym obrazie z kamery termowizyjnej, gdzie moduł najbliższy zacisków wejściowych i wyjściowych ma najwyższą temperaturę. Jak widać po wartości temperatury maksymalnej (65 °C), w układzie tym jest jeszcze spory zapas mocy, jednak wymaga on zmiany obrotu bazowego, który pozwoliłby na bardziej równomierne obciążenie wszystkich modułów mocy.



Rys.12. Wyniki badań eksperymentalnych czterogłęziowego przekształtnika GaN przy maksymalnym obciążeniu, realizowanym w testach laboratoryjnych: a) wynik z analizatora mocy, b) zdjęcie przekształtnika zrobione kamerą termowizyjną

Dla tego punktu pracy dokonano ponownej analizy teoretycznej w środowisku symulacyjnym LTSpice, aby lepiej zobrazować źródła strat mocy przekształtnika, oraz zweryfikować poprawność modelu symulacyjnego, uwzględniającego również obwody odciążające. Wyniki tej analizy w postaci liczbowej i graficznej zaprezentowano na rysunku 13.



Rys.13. Wyniki analizy teoretycznej strat mocy w punkcie pracy z rysunku 12

Porównując otrzymaną całkowitą wartość strat mocy z rysunków 12 (wyniki eksperymentalne) i 13 (analiza symulacyjna), widać dość dużą zbieżność. Niewielka różnica może wynikać z faktu, że model symulacyjny obejmował również moc traconą w obwodach sterowników bramkowych, natomiast w pomiarach eksperymentalnych nie było to uwzględnione.

Analizując rozkład mocy strat w poszczególnych elementach, można zauważyć, że największy udział mają straty w górnych łącznikach przekształtnika, co wynika bezpośrednio z współczynnika wypełnienia dla tego punktu pracy ( $D = 0,7$ ), a tym samym z proporcji wartości skutecznej prądu przewodzonego przez łączniki górny i dolny i dużego udziału mocy strat na przewodzenie.

## Podsumowanie

W niniejszej pracy opisano wybrane zagadnienia projektowania niskonapięciowego cztero-modułowego synchronicznego przekształtnika DC/DC o charakterystyce obniżającej napięcie, który służył do sprawdzenia możliwości technologii niskonapięciowych tranzystorów GaN oraz ich właściwości dynamicznych i termicznych. Dla przyjętych założeń, przez badania symulacyjne, dokonano analizy źródeł strat w układzie i porównania strat mocy tranzystorów Si i GaN. W rezultacie tych działań opracowano i zbudowano prototypową wersję modułowego

przekształtnika DC/DC z wykorzystaniem tranzystorów GaN o częstotliwości  $f_{sw} = 300\text{kHz}$ . Przedstawiono wybrane wyniki badań eksperymentalnych wykonanego układu, które pozwoliły potwierdzić bardzo dobre właściwości dynamiczne, ale także pewne trudności z odprowadzaniem ciepła z miniaturowych obudów tych przyrządów.

Otrzymane parametry przekształtnika pozwalają na stosowanie tego typu układu w aplikacjach bateryjnych i mobilnych, gdzie bardzo wysoka sprawność energetyczna i miniaturyzacja gabarytów są kluczowe.

*Badania współfinansowane ze środków przeznaczonych na działalność statutową Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej.*

**Autorzy:** dr inż. Piotr Grzejszczak, mgr inż. Bartosz Nowatkiewicz Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: piotr.grzejszczak@pw.edu.pl; bartosz.nowatkiewicz.stud@pw.edu.pl

## LITERATURA

- [1] A. A. Sima Dimitrijević, "Power-switching applications beyond silicon: Status and future prospects of SiC and GaN devices", *Materials Research Society (MRS) BULLETIN*, vol. 40, 2015
- [2] M. Meneghini et al., "GaN-based power devices: Physics reliability and perspectives", *J. Appl. Phys.*, vol. 130, no. 18, Nov. 2021.
- [3] A. Taube et al., "High Breakdown Voltage and High Current Injection Vertical GaN-on-GaN p-n Diodes With Extremely Low On-Resistance Fabricated on Ammonothermally Grown Bulk GaN Substrates," in *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 69, no. 11, pp. 6255-6259, Nov. 2022, doi: 10.1109/TED.2022.3208851.
- [4] M. Cacciato et al., "Interleaved Bidirectional Buck Converter for Mild Hybrid Applications adopting Monolithic GaN technology," 2021 AEIT International Conference on Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE), Torino, Italy, 2021, pp. 1-6, doi: 10.23919/AEITAUTOMOTIVE52815.2021.9662773.
- [5] Reliability, Applications and Challenges of GaN HEMT Technology for Modern Power Devices: A Review" Islam, N.; Mohamed, M.F.P.; Khan, M.F.A.J.; Falina, S.; Kawarada, H.; Syamsul, M., 2022
- [6] Koszel M., Grzejszczak P., Nowatkiewicz B., i Wolski K., Design, Analysis and Comparison of Si- and GaN-Based DC-DC Wide-Input-Voltage-Range Buck-Boost Converters, *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 2021, s. 337-343.
- [7] H. Chong, H. Chen, K. Sun, J. Lin, S. Mu and Y. Zhou, "Efficiency Evaluation of Si-based and GaN-based Interleaved Buck/Boost Converters for Energy Storage Systems," 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Harbin, China, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICEMS.2019.8921923.
- [8] M. K. Kazimierczuk, *Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters*, Wiley&Sons, 2015
- [9] Chen Z., Boroyevich D., Burgos R., Experimental Parametric Study of the Parasitic Inductance Influence on MOSFET Switching Characteristics, Proc. of the International Power Electronics Conference, Singapore, 27-29.10.2010, 164-169
- [10] Y. -S. Roh, Y. -J. Moon, J. Park, M. -G. Jeong and C. Yoo, "A Multiphase Synchronous Buck Converter With a Fully Integrated Current Balancing Scheme," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 9, pp. 5159-5169, Sept. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2368130.
- [11] EPC2022 Datasheet, <https://epc-co.com/epc/>, 2022
- [12] BSC070N10NS3 Datasheet, <https://www.infineon.com/cms/en/>, 2022
- [13] P. Grzejszczak, et al. "Wpływ obwodów odciążających na łącznikowe straty energii w przekształtnikach wysokiej częstotliwości." *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 96, 6, 2020, pp. 93-97, <https://doi.org/10.15199/48.2020.06.17>