

## BADANIA EWALUACYJNE TRANZYSTORA 650 V E-HEMT GAN DO ZASTOSOWAŃ W WYSOKOSPRAWNYCH PRZEKSZTAŁTNIKACH DC/DC

Piotr CZYŻ<sup>1</sup>, Artur CICHOWSKI<sup>2</sup>, Wojciech ŚLESZYŃSKI<sup>3</sup>

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

1. tel.: 58-347-25-47 e-mail: pioczzyz@student.pg.gda.pl
2. tel.: 58-348-63-09 e-mail: artur.cichowski@pg.gda.pl
3. tel.: 58-347-29-54 e-mail: wojciech.sleszynski@pg.gda.pl

**Streszczenie:** Tematem artykułu są badania wysokonapięciowego tranzystora z azotku galu typu E-HEMT w aplikacji przekształtnika obniżającego napięcie typu buck. W pracy przedstawiono krótką charakterystykę i zalety półprzewodników szerokoprzerwowych, a także opis tranzystora GS66508P-E03 w obudowie do montażu powierzchniowego (SMD). Następnie poruszono problem chłodzenia łącznika mocy SMD i przeprowadzono badanie porównawcze dwóch układów chłodzenia. Wykazano, że zaproponowany układ jest ponad dwa razy bardziej wydajny niż zalecany przez producenta. W głównej części opracowania zaprezentowano wyniki pomiarów sprawności przekształtnika. Osiągnięto sprawność > 92 % dla układu twardo przełączającego o częstotliwości pracy 200 kHz. Tym samym potwierdzono możliwość budowania wysokosprawnych przekształtników z tranzystorami GaN.

**Słowa kluczowe:** azotek galu (GaN), enhancement mode high electron mobility transistor (E-HEMT), przekształtnik obniżający napięcie, straty mocy.

### 1. WSTĘP

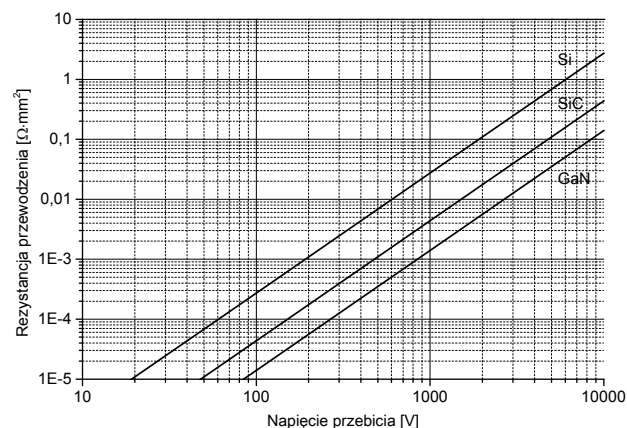
Postęp w technologii półprzewodników pozwala na wyprodukowanie tranzystorów o lepszych właściwościach niż tranzystory krzemowe. Do takich łączników zaliczamy elementy wykonane z półprzewodników szeroko- przerwowych, takich jak węgiel krzemu (SiC) oraz azotek galu (GaN).

Przerwą energetyczną półprzewodnika określamy siłę wiązań chemicznych pomiędzy atomami w jego sieci krystalicznej. Im silniejsze wiązania, tym trudniej elektronom przeskoczyć z jednego miejsca do innego. Energia potrzebna do pokonania przerwy może pochodzić od energii termicznej, pola elektrycznego lub fali świetlnej. W konsekwencji półprzewodniki o szerszej przerwie posiadają mniejszy wewnętrzny prąd upływu oraz wyższe dopuszczalne temperatury pracy.

Na rysunku 1 przedstawiono teoretyczne granice rezystancji przewodzenia w funkcji napięcia przebicia dla idealnej struktury wybranych półprzewodników. Porównując powyższe charakterystyki tranzystory GaN mogą osiągać mniejsze rezystancje przy tym samym napięciu przebicia, co czyni je potencjalną alternatywą dla Si, a nawet dla SiC w przetwarzaniu energii elektrycznej

Dodatkowo, tranzystory GaN charakteryzują krótsze czasy przełączeń, niska rezystancja przewodzenia oraz

mniejsze straty przełączeniowe w porównaniu do najbardziej zaawansowanych odpowiedników krzemowych.



Rys. 1. Teoretyczna rezystancja przewodzenia w funkcji napięcia przebicia dla przyrządów półprzewodnikowych z Si, GaN i SiC

Wysokonapięciowe tranzystory mocy GaN (> 600 V) są najnowszą technologią w tej klasie przyrządów półprzewodnikowych. Wykorzystując te tranzystory można zwiększyć częstotliwość pracy przekształtników, jednocześnie zachowując wysoką sprawność przetwarzania energii. Zwiększenie częstotliwości pozwala na zastosowanie mniejszych elementów pasywnych w filtrach. W rezultacie możliwa jest miniaturyzacja urządzeń i osiąganie wyższych gęstości mocy, co jest aktualnym trendem w energoelektronice [1].

Aktualnie na rynku producenci oferują serie przedprodukcyjne lub próbki tranzystorów mocy GaN. Często są one dostępne krótkoterminowo i nie posiadają szczegółowej dokumentacji. W związku z tym przeprowadzane są liczne badania mające na celu przetestowanie ich właściwości i ocenę przydatności do zastosowania.

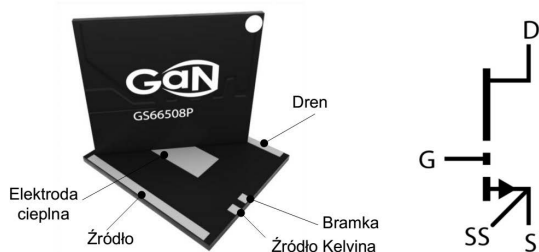
W pracy [2] przedstawiono wyniki badań nad przekształtnikiem obniżającym napięcie w konfiguracji półmostka z wykorzystaniem tranzystorów GaN GIT 600 V, 15 A firmy Panasonic. Prototyp przekształtnika podwyższającego napięcie i falownika jednofazowego został zbudowany z użyciem tranzystorów GaN HEMT firmy

Transphorm w pracy [3]. Te same tranzystory wykorzystano również w [4] w aplikacji przekształtnika LLC. Do tej pory, oprócz producenta, w literaturze przedstawiono całkowite straty mocy i charakterystyki statyczne tranzystora GaN E-HEMT GS66508P-E03 firmy GaN Systems tylko w [5].

Celem tej pracy jest przedstawienie wyników badań tranzystora GaN GS66508P-E03 do zastosowań w wysokosprawnych przekształtnikach DC/DC. W artykule zaprezentowano charakterystyki sprawności przekształtnika typu buck, pracującego z częstotliwością przełączeń do 200 kHz. Za istotny wkład uważa się także projekt układu chłodzenia tranzystora w obudowie GaNPX™ przeznaczonej do montażu powierzchniowego.

## 2. CHARAKTERYSTYKA TRANZYSTORA GAN E-HEMT GS66508P-E03

Tranzystor GS66508P-E03 jest normalnie wyłączonym tranzystorem typu *enhancement mode high electron mobility transistor* (E-HEMT). Na rysunku 2 przedstawiono jego poglądowe zdjęcie wraz z opisem elektrod oraz jego symbol zastępczy.



Rys. 2. Tranzystor GS66508P-E03 w obudowie GaNPX™ oraz jego symbol zastępczy

Strukturę E-HEMT charakteryzuje duża koncentracja elektronów o bardzo dużej ruchliwości. Struktura wzbogacenia bramki (*enhancement mode*) zapewnia, że przy zerowej polaryzacji bramki, przyrząd jest wyłączony. Pełne otwarcie kanału wymaga napięcia równego 7 V, natomiast maksymalne dopuszczalne napięcie bramki to 10 V. Pozostałe podstawowe parametry elektryczne tranzystora zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Podstawowe parametry tranzystora

Parametr	Jednostka	Wartość
Napięcie dren-źródło $V_{DS}$	[V]	650
Prąd ciągły drenu $I_D @ 25^\circ\text{C}$	[A]	30
Prąd ciągły drenu $I_D @ 100^\circ\text{C}$	[A]	20
$R_{DS(on)max} @ 25^\circ\text{C}$	[mΩ]	52
$R_{DS(on)max} @ 150^\circ\text{C}$	[mΩ]	130

GS66508P-E03 nie posiada wbudowanej diody zwrotnej, ale dzięki jego strukturze możliwe jest przewodzenie prądu w obu kierunkach. Brak diody zwrotnej oznacza również brak strat mocy na przeładowanie (*reverse recovery*).

Omawiany tranzystor posiada bardzo małą rezystancję przewodzenia (52 mΩ w temperaturze 25 °C) oraz niewielki całkowity ładunek bramki (6,5 nC). Oba parametry przekładają się na bardzo korzystny współczynnik dobroci, definiowany jako ich iloczyn. Współczynnik ten jest nawet

10 razy lepszy niż w przypadku MOSFETów opartych na krzemie [6].

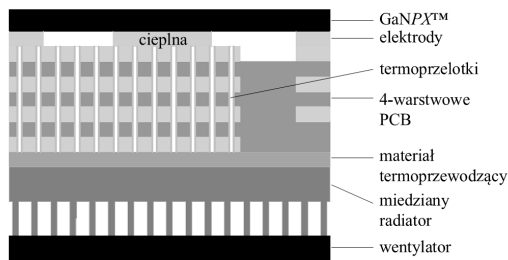
Technologia wykonania tranzystora znacznie się różni od standardowej obudowy TO-220/247. Jest to dyskretny łącznik wbudowany w konstrukcję z laminatu. Wykonany jest on z materiału epoksydowego podobnego do FR4 i montuje się go do obwodu drukowanego powierzchniowo. Dzięki płaskim elektrodom zminimalizowane są indukcje doprowadzeń tranzystora.

## 3. PROJEKT UKŁADU CHŁODZENIA I BADANIA TERMICZNE

Nietypowa obudowa tranzystora wymaga dedykowanego projektu układu chłodzenia. Podstawowym układem dla GS66508P-E03 jest odprowadzanie ciepła od elektrody cieplnej przez PCB do radiatora. Niestety, osiągnięcie dużej przewodności cieplnej takiego układu chłodzenia wiąże się z dodatkowymi nakładami ze względu na niestandardowe wykonanie PCB (wiele warstw, grubsza warstwa miedzi, cienki laminat, dodatkowe otwory metalizowane). Wypadkowo o rezystancji termicznej i tak decydują słabe właściwości materiału rdzenia. Dla porównania najpopularniejszy materiał rdzenia FR-4 posiada ponad 100-krotnie gorszą przewodność cieplną niż miedź. Z tego powodu zdecydowano się wykonać, oprócz układu chłodzenia zalecanego przez producenta, układ z miedzianym przewodnikiem montowanym bezpośrednio do elektrody cieplnej. W tym celu wykonano 4-warstwową płytkę prototypową o standardowej grubości 1,6 mm i o grubości warstw miedzi 35 μm.

### 3.1. Zalecany układ z otworami metalizowanymi

Układ pól lutowniczych zaprojektowano na podstawie noty aplikacyjnej producenta [7]. Pola pod elektrodę cieplną i źródło zostały połączone, a na ich powierzchni wykonano 206 otworów metalizowanych. Przekrój poprzeczny układu przedstawiono na rysunku 3.



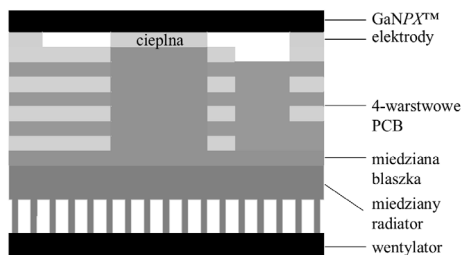
Rys. 3. Przekrój poprzeczny przez układ chłodzenia z dodatkowymi otworami metalizowanymi [8]

Miedziane pola dodano również w warstwach wewnętrznych PCB. Wymiary średnicy otworów metalizowanych oraz odległości między ich środkami, odpowiednio 0,2 mm i 0,8 mm, zostały podyktowane możliwościami technologicznymi wykonawcy płytki. Otwory posiadają standardową grubość metalizacji i nie zastosowano wypełnienia.

Aby zmniejszyć rezystancję przejścia między PCB i radiatorem użyto materiału termoprzewodzącego KU-EGF20 o grubości 0,2 mm i przewodności cieplnej 4,5 W/m·K. Dobór złego materiału termoprzewodzącego może znacznie pogorszyć warunki odprowadzania ciepła, ponieważ jego rezystancja może stanowić nawet do 30 % całkowitej rezystancji przejścia.

### 3.2. Zaproponowany układ z miedzianym przewodnikiem

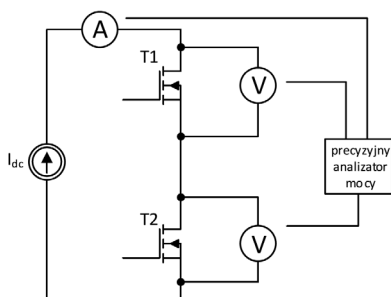
Alternatywnie wykonano drugi układ chłodzenia, którego przekrój przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Przekrój poprzeczny przez układ chłodzenia z miedzianym przewodnikiem [8]

W zaproponowanym rozwiązaniu zamiast otworów metalizowanych zamontowano bezpośrednio do elektrody ciepłej miedziany przewodnik. W tym celu wyfrezowano otwór w płytce, tak aby przewodnik dolegał do elektrody ciepłej. Z drugiej strony przewodnika zamontowano miedziany radiator i wentylator. Powierzchnie styku przewodnika pokryto pastą termoprzewodząca.

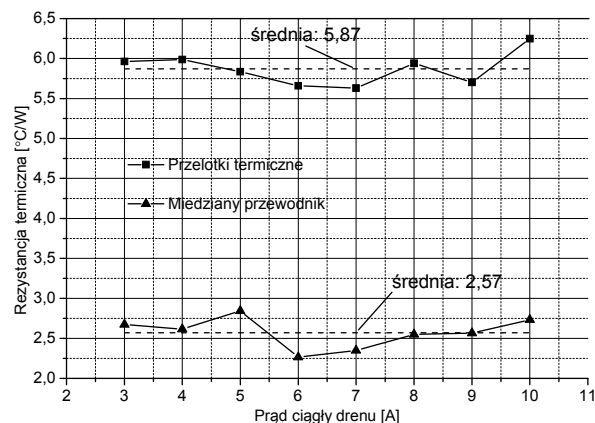
Na rysunku 5 przedstawiono układ pomiarowy do badań termicznych. Rezystancję termiczną obu układów wyznaczono na podstawie pomiaru strat mocy tranzystorów oraz różnicy temperatur między obudową a radiatorem.



Rys. 5. Schemat układu do badań termicznych [8]

Tranzystory połączone szeregowo przyłączono do źródła prądu DC. Pomiar przeprowadzono dla różnych wartości prądu w przedziale 3-10 A. W warunkach statycznych przez oba tranzystory płynie prąd o tej samej wartości, co pozwala na porównanie obu układów chłodzenia. Do pomiaru prądu tranzystorów oraz spadków napięć użyto precyzyjny analizator mocy firmy ZES Zimmer LMG670. Pomiar temperatury dokonano za pomocą szybkiej sondy powierzchniowej termometru Testo 845.

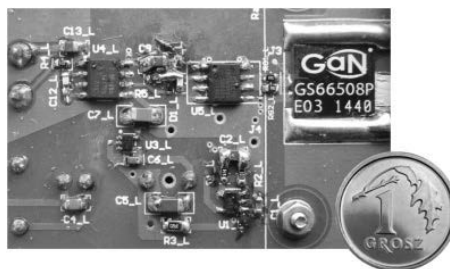
Obliczone wartości rezystancji termicznej zamieszczono na rysunku 6. Z przeprowadzonych badań wynika, że zaproponowany przez autorów układ ma ponad dwa razy mniejszą rezystancję termiczną (2,57 °C/W) w porównaniu do układu wykonanego w technologii zalecanej przez producenta (5,87 °C/W).



Rys. 6. Wyniki badań cieplnych: rezystancja termiczna dwóch układów chłodzenia

## 4. BADANIA EKSPERYMANTALNE

Ważną częścią przekształtnika jest obwód sterownika bramkowego. Do przełączania tranzystora z dużą częstotliwością (200 kHz) zaprojektowano sterownik z układem scalonym IXDN609SI. Krótki czas propagacji i krótkie czasy narastania i opadania napięcia pozwalają na użycie go w układach dużej mocy. Aby pokazać skalę integracji na rysunku 7 przedstawiono sterownik bramkowy i tranzystor na tle monety jednogroszowej.

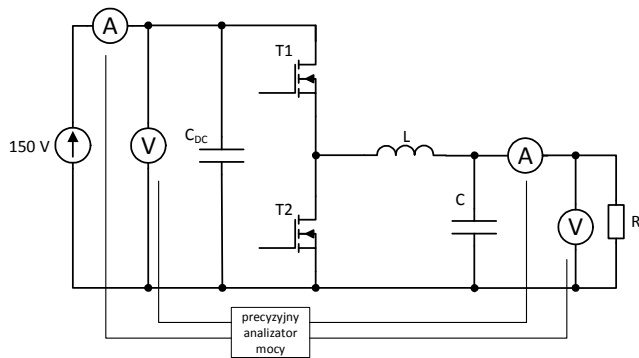


Rys. 7. Widok sterownika bramkowego i tranzystora GS66508P-E03 (w skali)

Do zbudowania przekształtnika obniżającego napięcie wykonano płytkę prototypową, w której można testować konfigurację synchroniczną. Oba tranzystory wyposażono w układ chłodzenia z miedzianym przewodnikiem. Na rysunku 8 zaprezentowano schemat przekształtnika wraz z aparaturą pomiarową do wyznaczenia sprawności.

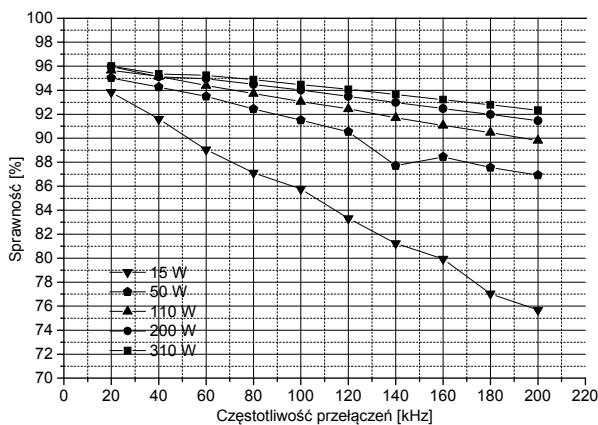
Precyzyjny analizator mocy posłużył do pomiaru mocy prądu stałego na wejściu i wyjściu układu. Do środka gałęzi fazowej przyłączono dławik o indukcyjności 17,76 mH oraz kondensator wyjściowy o pojemności 2,2 μF. Charakterystyki sprawności (rysunek 9) uzyskano poprzez pomiary mocy przekształtnika, pracującego z częstotliwością w zakresie 20-200 kHz oraz dla prądu wyjściowego w zakresie 1-5 A.

Największą sprawność osiągnięto dla częstotliwości 20 kHz: 96 % przy prądzie 5 A. Zgodnie z oczekiwaniami dla każdej częstotliwości przełączeń największa sprawność jest osiągnięta dla najwyższych obciążen. Jest to spowodowane dużym udziałem strat przełączania w całkowitych stratach przy małym obciążeniu.



Rys. 8. Schemat przekształtnika obniżającego napięcie – układ do pomiaru sprawności

Z rysunku 9 można odczytać, że właśnie dla dużych obciążeń (5 A) straty na przełączanie stanowią mały procent strat całkowitych. Nawet dla częstotliwości 200 kHz osiągnięta została sprawność ponad 92 % przy mocy wyjściowej 310 W.



Rys. 9. Sprawność przekształtnika w funkcji częstotliwości dla różnej mocy wyjściowej

## 5. WNIOSKI KOŃCOWE

Z przeprowadzonych prac wynika, że tranzystory GaN E-HEMT nadają się do budowania wysokosprawnych przekształtników DC/DC. Efektem pracy jest przekształtnik obniżający napięcie o mocy 310 W i sprawności powyżej 92 % przy częstotliwości pracy 200 kHz. W wyniku badań

nad przekształtnikiem wyznaczono charakterystyki sprawności w funkcji częstotliwości oraz obciążenia. Warto nadmienić, iż wykorzystana technologia jest najnowszą technologią tranzystorów, co wiąże się z licznymi wyzwaniami projektowymi. Ważnym osiągnięciem autorów jest projekt układu chłodzenia tranzystora, dzięki któremu rezystancja termiczna na drodze chłodzenia tranzystora jest ponad dwa razy mniejsza niż w rozwiązaniu zalecanym przez producenta.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Kolar J., Drofenik U., Biela J., Heldwein M., Ertl H., Friedli T. and Round S.: PWM converter power density barriers. Proc. Power Convers. Conf., Nagoya, Japan, Apr. 2007, s. 9–29.
2. Tuysuz A., Bosshard R. and J. Kolar: Performance comparison of a GaN GIT and a Si IGBT for high-speed drive applications. Proc. International Power Electronics Conf., Hiroshima, Japan, May 2014, s. 1904–1911.
3. Mitova R., Ghosh R., Mhaskar U., Klikic D., Wang M. and Dentella A.: Investigations of 600-V GaN HEMT and GaN diode for power converter applications. IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, s. 2441–2452, May 2014.
4. Huang X., Liu Z., Li Q. and Lee F.: Evaluation and application of 600V GaN HEMT in cascode structure. Proc. Applied Power Electronics Conference and Exposition, Long Beach, USA, Mar. 2013, s. 1279–1286.
5. Czyż P.: Performance Evaluation of a 650V E-HEMT GaN Power Switch. Proc. of IEEE Industrial Electronics Society Conference (IECON), Yokohama, Japan, Nov. 2015, s.7-12.
6. Roberts J., Klowak G., Yushyna L. and Renaud-Bezot N.: Thermal modeling of large embedded GaN transistors. Proc. International Symposium on Microelectronics, San Diego, USA, Oct. 2014.
7. Thermal Analysis and PCB Design Guidelines for GaN Enhancement Mode Power Switching Transistors, GaN Sytems Inc. GN005 Application Note, Rev. 2014-11-04.
8. Czyż P.: Zastosowanie tranzystorów GaN w wysokosprawnych przekształtnikach DC/DC. Praca dyplomowa, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2015.

## EVALUATION OF A 650 V E-HEMT GAN TRANSISTOR FOR HIGH-EFFICIENCY DC/DC CONVERTERS

In this paper a brief description of wide-bandgap semiconductors is given. Particularly, advantages of a 650 V GaN E-HEMT transistor GS66508P-E03 are shown. This power switch is experimentally evaluated in a synchronous buck with two transistors in a half bridge configuration. The experimental results show that GaN transistors have very low total losses even when operating at high frequencies. The efficiency over 92% is achieved at the frequency of 200 kHz with 5 A output current and output power at a rate of 310 W.

Additionally, in this work two different cooling systems for surface mounted transistor are compared. In a prototype for thermal evaluation one transistor has the cooling system with thermal vias through the PCB and alternatively the second one has the cooling system with the copper stud. The proposed cooling system with the copper stud is proven to have the twice smaller thermal resistance than the system with thermal vias. Another advantage is that in the same conditions the transistor is cooler and has lower on-resistance, what decreases the power losses.

**Keywords:** gallium nitride (GaN), enhancement mode high electron mobility transistor (E-HEMT), DC/DC converters, power losses.