

doi:10.15199/48.2017.01.50

Niskonapięciowy prostownik synchroniczny z wykorzystaniem nowoczesnych tranzystorów GaN

Streszczenie. W artykule opisano przykład zastosowania nowoczesnych tranzystorów z azotku galu do wykonania prostownika synchronicznego w rezonansowym zasilaczu impulsowym. Przedstawiono zalety nowoczesnych tranzystorów GaN w porównaniu do tranzystorów MOSFET oraz diod Schottky'ego. Zredukowano straty wynikające z przewodzenia oraz straty przełączeniowe

Abstract. Modern transistors made with gallium nitride in the application of synchronous rectifier in resonant switching mode power supply are described in this paper. Advantages of modern GaN transistors in comparison to the MOSFETs and Schottky diodes are shown. Conduction and switching power losses are significantly reduced (**Low-voltage synchronous rectifier with modern transistors GaN**)

Słowa kluczowe: tranzystory GaN, azotek galu, straty przełączeniowe, prostownik synchroniczny

Keywords: GaN FET, gallium nitride, switching power losses, synchronous rectifier

Wstęp

Prostownanie napięcia wyjściowego w zasilaczach impulsowych może być realizowane na kilka sposobów, przy użyciu różnego rodzaju elementów półprzewodnikowych.

Konstrukcje nowoczesnych zasilaczy impulsowych wymagają odprowadzania ciepła z elementów. W przypadku sieciowych zasilaczy impulsowych głównymi blokami wymagającymi chłodzenia są te zawierające półprzewodnikowe elementy mocy, czyli:

- prostowniki wejściowe,
- układy elektronicznych PFC,
- przekształtniki częstotliwości,
- prostowniki wyjściowe.

Straty mocy

W celu zmniejszenia strat mocy wynikających z przewodzenia prądu dąży się do zmniejszenia spadków napięcia na elementach prostowniczych. Straty mocy P_{dl} spowodowane przepływem prądu oraz spadkiem napięcia na złączu diody można w uproszczeniu opisać wzorem:

$$(1) \quad P_{dl} = \frac{1}{T_{sw}} \int_{t=0}^{T_{sw}} v_f(t) i_f(t) dt \approx V_f \cdot I_f$$

gdzie: T_{sw} oznacza okres przewodzenia diody, a I_f średnią wartość prądu.

W przypadku prostownika zbudowanego z tranzystorów FET straty mocy w uproszczeniu opisuje zależność:

$$(2) \quad P_{Fl} = \frac{1}{T_{sw}} \int_{t=0}^{T_{sw}} u_{DS}(t) i_f(t) dt \approx R_{DS(on)} \cdot I_f^2$$

Należy jednak zachować równowagę pomiędzy stratami przewodzenia, a stratami wynikającymi z przełączania. Wraz ze zmniejszaniem rezystancji kanału źródło-dren ($R_{DS(on)}$) następuje zwiększenie pojemności wyjściowej C_{oss} oraz zwiększenie ładunku Q_{rr} co bezpośrednio wpływa na wielkość strat przełączeniowych.

Istnieje zatem graniczna wartość prądu, powyżej której straty dla prostownika opartego o tranzystory MOSFET będą wyższe, niż dla prostownika zbudowanego z diod:

$$(3) \quad I_{lim} = V_f / R_{DS(on)}$$

Straty dynamiczne w układzie prostownika zależne są od zastosowanej topologii. Największe straty występują w układach o twardej komutacji. Mniejsze straty można osiągnąć w układach wykorzystujących dodatkowe obwody rezonansowe (np. rezonans szeregowy) lub wartości pasytywne elementów, np. ZVT (ang. Zero Voltage Transition). Statyczne straty mocy występujące na obu diodach prostownika w niżej opisywanym przypadku przedstawione w uproszczeniu mają postać:

$$(4) \quad P_{dl} = V_f \cdot I_f \approx 0,7 \cdot 12 \approx 8,4W$$

Napięcie przewodzenia diody MBRB20100CT dla prądu 12A wynosi około 0,7V.

Dla porównania, straty mocy wynikające z rezesytancji kanału tranzystora GaN FET:

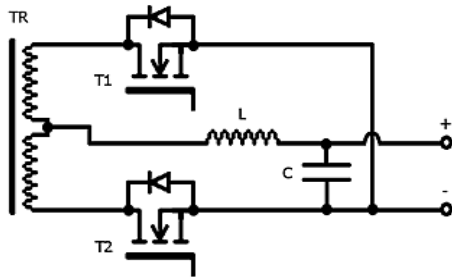
$$(5) \quad P_{Fl} = R_{DS(on)} \cdot I_f^2 \approx 0,007 \cdot 12^2 \approx 1,008W$$

Rezystancja kanału źródło-dren dla tranzystora GaN typu GS61008P wynosi około 7mΩ. Jak widać różnica strat mocy jest znaczna na korzyść tranzystorów GaN.

Prostownik synchroniczny

Prostowniki synchroniczne są stosowane jako alternatywa dla klasycznych prostowników diodowych. Zastąpienie prostownika diodowego, wykonanego z diod Schottky'ego, prostownikiem synchronicznym, daje w wielu aplikacjach (zwłaszcza niskonapięciowych) znaczną poprawę efektywności przetwarzania, a co za tym idzie zmniejszenie strat mocy i wymiarów radiatorów. W zastosowaniach niskonapięciowych, gdzie występują wysokie prądy, stosunek spadku napięcia na diodzie do napięcia wyjściowego zasilacza jest względnie wysoki. W przypadku zastosowania prostownika synchronicznego zbudowanego w oparciu o tranzystory o niskiej rezystancji kanału w stanie przewodzenia, można znacząco zredukować straty mocy. Na rysunku 1 pokazano schemat prostownika synchronicznego w topologii przeciwsobnej, natomiast w tabeli 1 parametry zasilacza z prostownikiem synchronicznym zbudowanym w oparciu o tranzystory GaN.

Na rysunku 2 pokazano Tranzystor GaN GS61008P firmy GaNSystems użyty do budowy układu, natomiast na rysunku 3 pokazano prototypy zasilaczy wykorzystanych do badań laboratoryjnych.



Rys. 1. Schemat prostownika synchronicznego w topologii przeciwsoobnej

Tabela 1. Parametry zasilacza rezonansowego z prostownikiem synchronicznym zbudowanym w oparciu o tranzystory GaN

Moc wyjściowa maksymalna	300W
Częstotliwość przełączania	1MHz
Napięcie wejściowe	320V
Napięcie wyjściowe	25V
Prąd wyjściowy	12A
Efektywność przetwarzania	97%



Rys. 2. Tranzystor GaN GS61008P firmy GaNSystems

Układy sterujące

Istnieje kilka koncepcji systemów sterujących prostownikiem synchronicznym, różniących się poziomem integralności.

Jedną z koncepcji jest sterowanie tranzystorami prostownika w oparciu o sygnały sterujące stroną pierwotną. Opóźnienie sygnałów i czasy martwe są odgórnie ustalone.

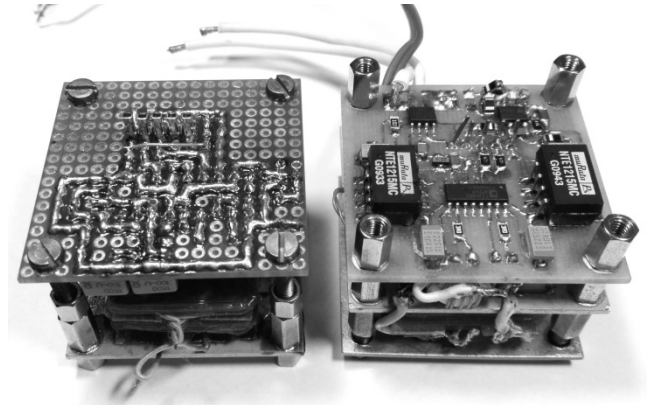
Ideą drugiego systemu sterowania jest monitorowanie napięcia na złączu źródło-dren na bieżąco podczas pracy układu. W momencie pojawienia się napięcia ujemnego na drenie tranzystora (wynikającego ze spadku napięcia na diodzie wewnętrznej tranzystora) zostaje on wysterowany. Gdy napięcie osiągnie wartość bliską zero, sterownik otwiera tranzystor i cykl zaczyna się dla przeciwnego tranzystora.

Kolejna koncepcja bazuje na pomiarze prądu w obwodzie tranzystora. Pomiar może być zrealizowany na boczniku lub przy zastosowaniu przekładnika prądowego. W momencie wykrycia przepływu prądu ze źródła do drenu tranzystor zostaje włączony. Otwarcie tranzystora następuje, gdy prąd przestaje płynąć w tym kierunku. Dzięki otwarciu tranzystora unika się zwarcia układu prostownika.

Sterowanie tranzystorami prostownika synchronicznego może bazować na specjalizowanych, pojedynczych układach scalonych lub może być wykonane w oparciu o osobne układy: pomiaru, sterowania oraz delivery bramek.

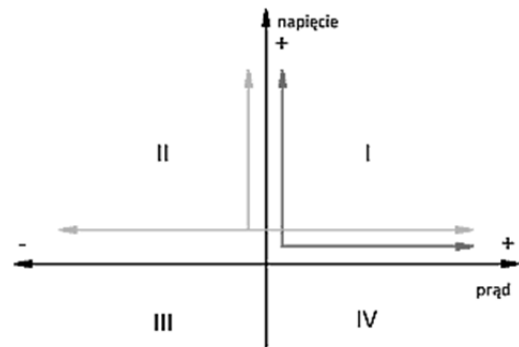
Praca dwukwadrantowa

Dwutranzystorowy prostownik synchroniczny w topologii przeciwsoobnej (rys.1.) dodatkowo, w pewnych warunkach, umożliwia pracę w trybie dwukwadrantowym, czyli dwukierunkowy przepływ energii.

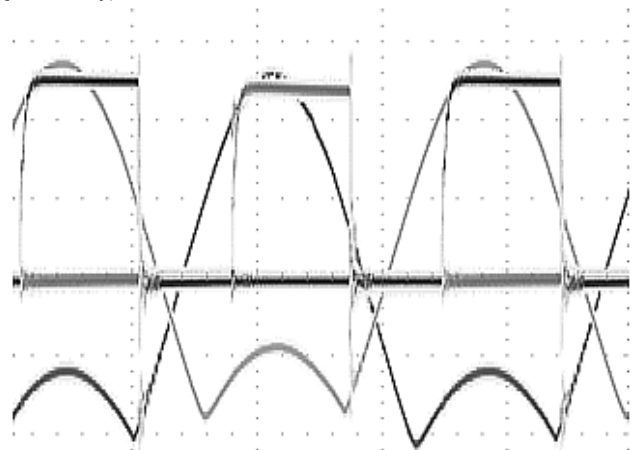


Rys. 3. Prototypy zasilaczy wykorzystane do badań

Jest to tryb pracy, w którym prostownik synchroniczny pracuje jako falownik, a falownik pracuje jako prostownik synchroniczny. Taka sytuacja może wystąpić np. w napędach z hamowaniem odzyskowym, dzięki czemu zwiększa się efektywność całego układu. Na rysunku 4 pokazano zakresy pracy jedno- i dwukwadrantowej przetwornicy.



Rys. 4. Porównanie zakresu działania przetwornicy jednokierunkowej (ciemnoszary) z przetwornicą dwukwadrantową (jasnoszary)



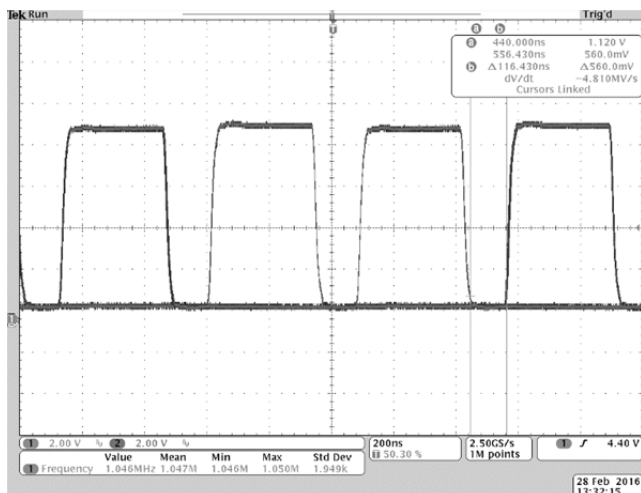
Rys. 5. Przebiegi charakterystyczne dla prostownika synchronicznego przy częstotliwości 1MHz

Czasy martwe

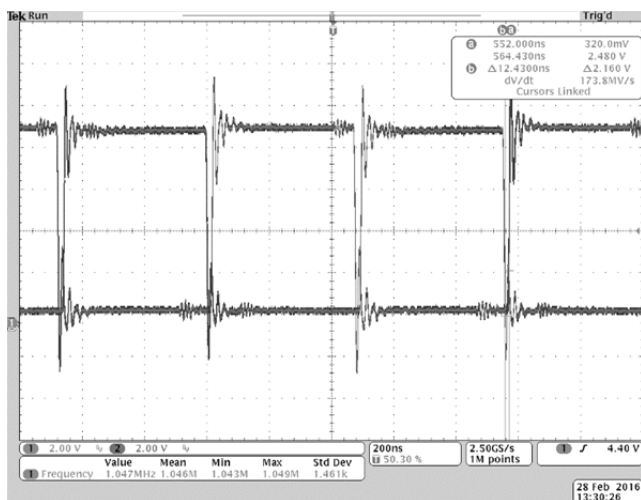
W trakcie czasu martwego, gdy tranzystor nie jest wysterowany, prąd wyjściowy przewodzony jest przez wewnętrzną diodę tranzystora. Dioda ta ma o wiele gorsze parametry, niż jej odpowiednik w postaci diody Schottky'ego. Zmniejszenie czasów martwych, przy włączeniu oraz wyłączeniu, ma istotny wpływ na maksymalizację sprawności prostownika synchronicznego.

Należy jednak zachować rozsądek w zmniejszaniu czasów martwych. Zbytne ich zmniejszenie może powodować występowanie zwarcí skrośnych prostownika. Powodują one straty mocy, a także narażają tranzystory na uszkodzenie spowodowane wysokimi prądami udarowymi. Na rysunku 5 pokazano charakterystyczne przebiegi prostownika przy pracy z częstotliwością 1 MHz.

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono porównanie przebiegów bramkowych występujących w obwodzie prostownika synchronicznego dla różnych czasów martwych.



Rys. 6. Przebiegi bramkowe prostownika synchronicznego, czas martwy zaznaczony kursorami wynosi 116ns



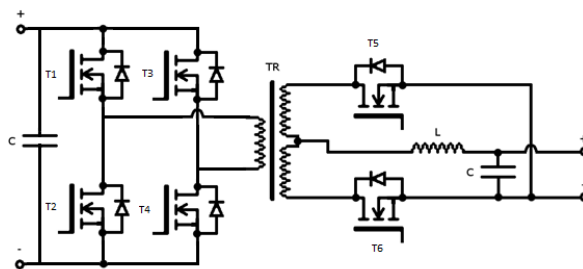
Rys. 7. Przebiegi bramkowe prostownika synchronicznego, czas martwy zaznaczony kursorami wynosi 12ns

Jak pokazano na rysunku 7 niewystarczający czas martwy pomiędzy włączeniami tranzystorów skutkuje pojawieniem się przepięć, które mogą być powodem obniżenia efektywności układu oraz znacznym wzrostem zakłóceń elektromagnetycznych. Ponadto takie przepięcia są niebezpieczne dla półprzewodników i mogą powodować ich awarię.

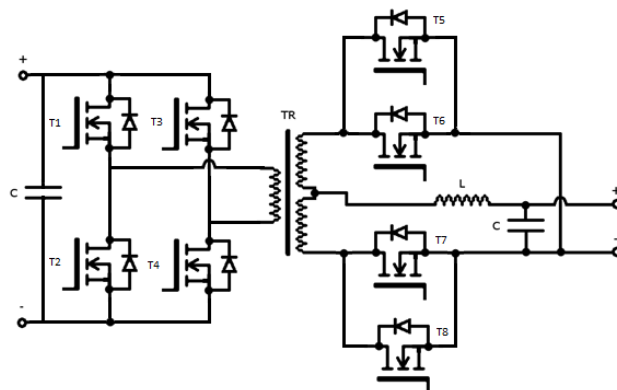
Łączenie równoległe tranzystorów

Tranzystory MOSFET charakteryzują się wzrostem rezystancji kanału wraz ze wzrostem temperatury złącza, przez co ich łączenie równoległe może prowadzić do przeciążania jednej ze struktur i uszkodzenia elementu. Przy projektowaniu układu należy zwrócić uwagę na małą odległość między tranzystorami i równomierność chłodzenia. W praktyce, różnice parametrów tranzystorów

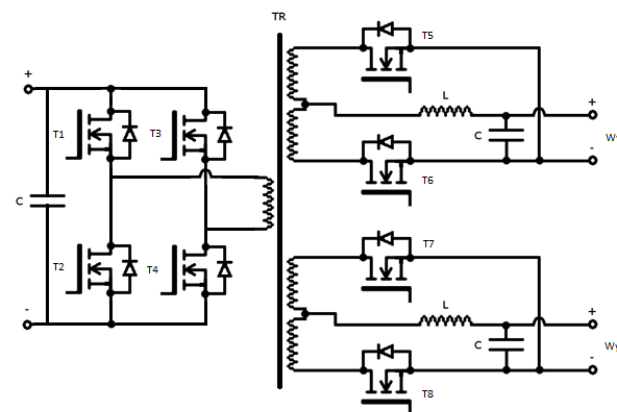
z jednej serii produkcyjnej są na tyle małe, że problem jest pomijalny.



Rys. 8. Schemat połączeń układu z pojedynczą parą tranzystorów w prostowniku synchronicznym



Rys. 9. Schemat połączeń układu z dwiema parami równoległo połączonych tranzystorów w prostowniku synchronicznym



Rys. 10. Schemat połączeń układu z podwójnym prostownikiem synchronicznym

Rysunek 8 przedstawia klasyczny sposób budowy układu prostownika synchronicznego z dzielonym uzwojeniem wtórnym, oparty o dwa pojedyncze tranzystory. Taki sposób wykonania jest efektywny, zwłaszcza w zastosowaniach niskonapięciowych.

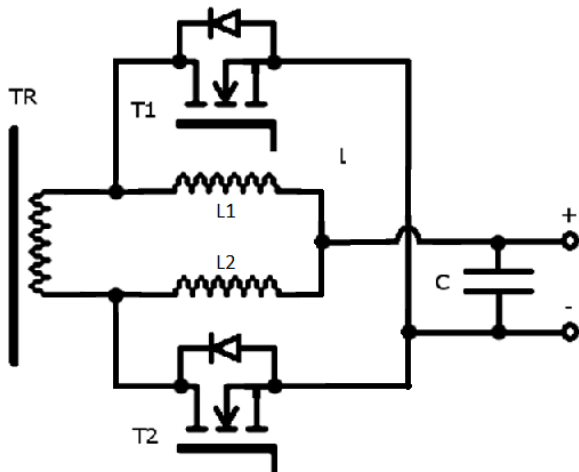
W przypadku większych prądów wyjściowych, możliwe jest łączenie tranzystorów równoległo (rys. 9), co zmniejsza prądy płynące w poszczególnych tranzystorach. Zmniejszona zostaje także moc wydzielana na danym tranzystorze, co ułatwia chłodzenie. Obniża to jego temperaturę oraz sumaryczną moc strat wynikającą z przepływu prądu w całym prostowniku. Pomijając aspekty finansowe i projektowe, wadą tego rozwiązania jest zwiększenie ilości elementów w obwodzie, co skutkuje wzrostem parametrów pasożytniczych, w szczególności indukcyjności.

Kolejnym sposobem wykonania prostownika synchronicznego jest zwielokrotnienie całego obwodu prostownika wraz z uzwojeniami wtórnymi transformatora głównego (rys. 10). Takie rozwiązanie pozwala na równomierne rozłożenie strat na większej powierzchni. Zostaje poprawiony rozkład temperatur obwodu. Zaletą tego rozwiązania jest również możliwość łączenia równolegle lub szeregowo wyjść poszczególnych modułów, co zwiększa uniwersalność układu.

W przypadku łączenia szeregowego istnieje możliwość osiągnięcia wyższego napięcia wyjściowego stosując niskonapięciowe tranzystory. Nie występuje także sumowanie się indukcyjności uzwojeń wtórnych, ze względu na to, że na wyjściu łączone są napięcia stałe.

Stosując transformatory planarne, których uzwojenia wykonane są na płytkach PCB, osiąga się wysoką gęstość mocy.

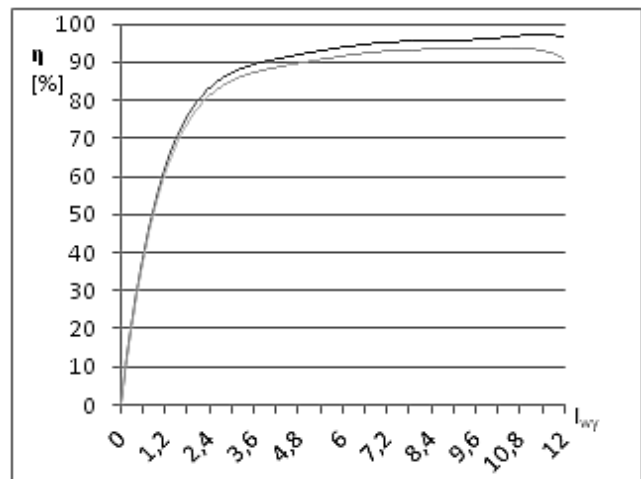
Jednym z rozwiązań prostownika jest tzw. current doubler (rys. 11), którego najważniejszą zaletą jest podwojenie częstotliwości pulsacji prądu wraz ze zmniejszeniem jej amplitudy. Takie rozwiązanie umożliwia zastosowanie filtrów i kondensatorów wyjściowych o mniejszych rozmiarach. Ma to istotne znaczenie w układach wymagających wysokiej integracji montażu. Brak odczepu pośrodku uzwojenia wtórnego ułatwia wykonanie transformatora głównego, upraszczając konstrukcję zwłaszcza w przypadku transformatorów planarnych. Sterowanie takim rodzajem prostownika odbywa się identycznie, jak w klasycznym rozwiązaniu.



Rys. 11. Schemat połączeń układu z zewnętrznymi diodami (tzw. current doubler)

Sprawność

W celu przeprowadzenia badań laboratoryjnych wykonano układy prototypowe zasilaczy impulsowych o napięciu pierwotnym 320V i napięciu wtórnym 25V. Porównano całkowite sprawności zasilacza z prostownikiem synchronicznym i zasilacza z prostownikiem diodowym. Oba prostowniki zostały wykonane w technologii przeciwobnej z odczepem pośrodku uzwojenia wtórnego transformatora. Pomiar wykazał różnicę sprawności prostowników wynoszącą około 2% w punkcie maksymalnej sprawności. W trakcie pomiarów nie uwzględniono mocy pobieranej przez pomocnicze obwody sterowania. Wykresy sprawności zasilaczy impulsowych z prostownikiem synchronicznym oraz z prostownikiem diodowym pokazano na rysunku 12.



Rys. 12. Wykresy sprawności zasilaczy impulsowych z prostownikiem synchronicznym (ciemnoszary) oraz z prostownikiem diodowym (jasnoszary)

Podsumowanie

Z uwagi na stale rozwijającą się technologię produkcji tranzystorów mocy zasadnym jest stosowanie prostowników synchronicznych w zasilaczach wysokoprądowych. Obecnie nie jest technologicznie możliwe zmniejszenie napięcia przewodzenia złącza diody. Rezystancja kanału źródło-dren jest natomiast zmniejszana w coraz nowszych wykonaniach tranzystorów, dzięki czemu straty mocy w prostownikach synchronicznych systematycznie maleją.

Autorzy:

mgr inż. Maciej Swadowski, student III stopnia, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: maciej940@gmail.com

mgr inż. Krzysztof Zygoń, student III stopnia, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: krzysztof.zygon@gmail.com

dr inż. Andrzej Jąderko, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: aj@el.pcz.czest.pl

LITERATURA

- [1] Y. Wu, M. Jacob-Mitos, M. L. Moore, and S. Heikman: A 97.8% efficient GaN HEMT boost converter with 300-W output power at 1 MHz, *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 29, No. 8, pp. 824-826, Aug. 2008
- [2] J. Yang: Efficiency improvement with GaN-based SSFET as synchronous rectifier in PFC boost converter, in *Proc. PCIM Europe*, pp. 1-6, May 2014.
- [3] A. Lidow, J. Strydom, M. de Rooij, D. Reusch: *GaN Transistors for Efficient Power Conversion*, 2nd Edition, Wiley, ISBN: 978-1-118-84476-2, Sept. 2014
- [4] U. K. Mishra, L. Shen, T. E. Kazior, and Y.-F. Wu.: *GaN-based RF power devices and amplifiers*, *Proc. IEEE*, Vol. 96, No. 2, pp. 287-305, Feb. 2008.
- [5] Kang I. *Electrical characteristics of enhancement-mode n-channel vertical GaN MOSFETs and the effects of sidewall slope*, *J. Electr. Eng. Tech.* 10 (3) 1131 - 1137
- [6] Jąderko A., Swadowski M., Zygoń K.: *Optymalizacja nowoczesnych zasilaczy impulsowych*, (2015), *Przegląd Elektrotechniczny* 1/2015, ss. 152-155