

*tranzystory GaN, straty łączeniowe,
wysoka częstotliwość,
grzanie indukcyjne, termografia*

Maciej SWADOWSKI*, Krzysztof ZYGOŃ*,
Andrzej JĄDERKO*

PRZEKSZTAŁTNIK WYSOKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI Z WYKORZYSTANIEM NOWOCZESNYCH TRANZYSTORÓW GaN

W artykule opisano przykład zastosowania nowoczesnych tranzystorów z azotku galu do wykonania przekształtnika napięcia w aplikacji nagrzewnicy indukcyjnej. Przedstawiono zalety nowoczesnych tranzystorów GaN w porównaniu do tranzystorów MOSFET. Znacznie zredukowano całkowite straty mocy oraz maksymalne temperatury pracy złącz tranzystorów przekształtnika. Pokazano wyniki porównawczej analizy termowizyjnej przekształtników zbudowanych na tranzystorach MOSFET oraz GaN. Pokazano również próby działania prototypu przekształtnika z nagrzewnicą indukcyjną.

1. WPROWADZENIE

W większości układów zasilających odchodzi się w ostatnich latach od zasilaczy liniowych w kierunku znacznie praktyczniejszych zasilaczy impulsowych. Przekształtniki impulsowe DC/DC dzieli się ogólnie na izolowane i nieizolowane, przy czym te pierwsze mają zastosowanie w większości urządzeń elektronicznych, gdzie wymagana jest separacja galwaniczna.

Przekształtniki izolowane mogą być wykonane jako asymetryczne: jednotaktowe (*forward converters*), albo dwutaktowe (*flyback converters*), bądź jako symetryczne: przetwornice push-pull, pół mostkowe (*half-bridge*) i pełno mostkowe (*full-bridge*). W większości aplikacji separacja galwaniczna realizowana jest przy użyciu transformatora impulsowego. Wśród przekształtników nieizolowanych rozróżniamy: obniżające napięcie, podwyższające napięcie, obniżająco-podwyższające napięcie i wielokwadrantowe.

* Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: maciej940@gmail.com, krzysztof.zygon@gmail.com, aj@el.pcz.czest.pl

Do wytworzenia napięcia przemiennego niezbędne jest zastosowanie przekształtników napięcia zbudowanych w oparciu o klucze elektroniczne. W historii rozwoju impulsowych układów zasilających w przekształtnikach stosowano różnego rodzaju klucze półprzewodnikowe, którymi były tranzystory bipolarne, później MOSFET oraz IGBT, wykonane w technologii krzemowej. Wraz z rosnącym zapotrzebowaniem urządzeń elektronicznych na energię, stało się konieczne zwiększenie mocy urządzeń zasilających, przy jednoczesnym zmniejszeniu ich wymiarów, co wymaga zwiększenia ich sprawności. W ostatnich latach opracowane zostały elementy przełączające o znacznie lepszych parametrach dynamicznych. Przykładem są tranzystory wykonane w technologii wykorzystującej azotek galu (GaN). Obecnie ta technologia jest intensywnie rozwijana, co daje szansę na opracowanie wysokosprawnych przekształtników o wyższej częstotliwości przetwarzania i mniejszych wymiarach [6, 9].

Ze względu na ochronę środowiska dąży się do zwiększenia sprawności urządzeń elektrycznych w celu zminimalizowania strat energii. Jednocześnie możliwe jest zmniejszenie wymiarów zewnętrznych urządzeń, jednak nakłada to szereg problemów technologicznych, takich jak zwiększenie częstotliwości pracy układów impulsowych w celu zmniejszenia wymiarów transformatorów i filtrów. Zmniejszanie wymiarów skutkuje zwiększeniem gęstości mocy przetwornicy, a więc straty mocy w postaci ciepła odprowadzane są do otoczenia mniejszą powierzchnią. Skutkuje to wzrostem temperatury elementów. Rozwiązaniem jest zmniejszenie strat mocy poprzez zwiększenie efektywności przetwarzania. Efektywność można zwiększyć stosując elementy elektroniczne nowej generacji oraz zaawansowane metody sterowania układów półprzewodnikowych wchodzących w skład przekształtników napięcia.

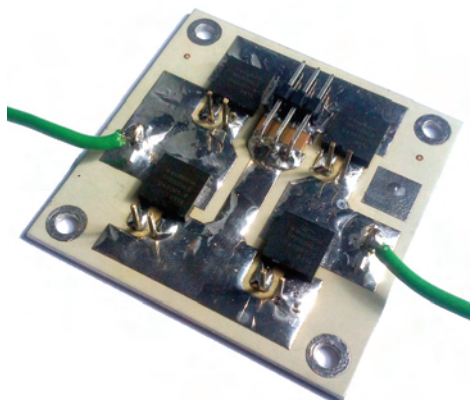
Autorzy pracują nad optymalizacją zasilaczy impulsowych pod względem maksymalizacji sprawności i minimalizacji wymiarów. Optymalizacja dotyczy w szczególności doboru elementów, zagospodarowania przestrzeni w celu zwiększenia gęstości mocy oraz zmniejszenia strat w elementach aktywnych zasilacza. Podjęto również działania w celu polepszenia wydajności chłodzenia. Autorzy w swojej pracy korzystali z podstawowej literatury dotyczącej zagadnień energoelektroniki [1, 2, 6].

W ciągu ostatnich lat autorzy zaprojektowali, wykonali i przetestowali kilkadziesiąt rozwiązań konstrukcyjnych przetwornic impulsowych w różnych topologiach i technologiach montażu [4, 5].

2. UKŁADY PRZEKSZTAŁTNIKÓW WYKONANYCH W TECHNOLOGIACH GaN i MOSFET

W artykule porównano straty mocy przekształtników napięcia do zasilania transformatora nagrzewnicy indukcyjnej wykonanych w technologiach GaN i MOSFET. Rezonansowy charakter obciążenia, jakim jest szeregowy obwód rezonansowy, pozwolił na wykonanie falowników z miękkim przełączaniem tranzystorów (*soft*

switching). Układ falownika wykonany jest w topologii pełnomostkowej (*full bridge*) z częstotliwością pracy powyżej częstotliwości rezonansowej obwodu wyjściowego. Zapewnia to przełączenia tranzystorów w korzystnych warunkach, co minimalizuje straty komutacyjne.



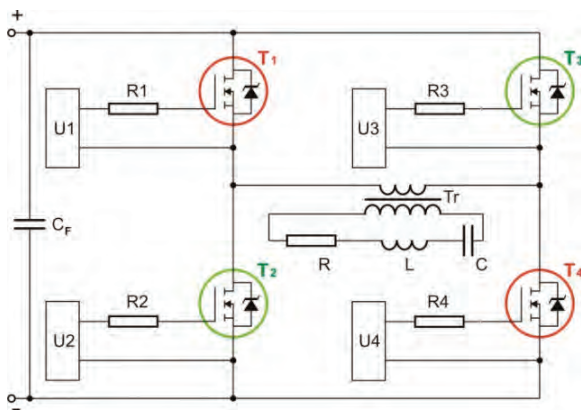
Rys. 1. Płytkę przekształtnika o wymiarach 50×50 mm z czterema tranzystorami z azotku galu

Układy modelowe zostały zaprojektowane do pracy z wysokimi częstotliwościami. W tym celu zminimalizowano odległości pomiędzy poszczególnymi elementami i obwodami sterowania. Działania te poskutkowały zmniejszeniem wymiarów zewnętrznego układu oraz wartości reaktancji pasożytniczych. Płytkę przekształtnika z tranzystorami GaN pokazano na rysunku 1, natomiast jego schemat ideowy na rysunku 2. W celu zapewnienia wydajnego odprowadzania energii cieplnej z elementów mocy autorzy użyli laminatu miedzianego o podłożu aluminiowym z dielektrykiem poliamidowym o dużej przewodności cieplnej. Aluminiowa płytkę PCB o wymiarach 50×50 mm stanowi radiator dla tranzystorów mocy, do którego może być przymocowany dodatkowy element zwiększający powierzchnię oddawania ciepła. Elementy przekształtnika zostały zamontowane w technologii montażu powierzchniowego SMD.

3. ZASTOSOWANE TRANZYSTORY

Po analizie parametrów dostępnych tranzystorów typu GaN i MOSFET, użyto tranzystorów firmy Transphorm typu TPH3006LD [7] w obudowie 8x8 PQFN oraz tranzystorów firmy ST typu STB26NM60N [8] w obudowie TO-263. Wybrane parametry zastosowanych tranzystorów pokazano w tabeli 1. Główne różnice pomiędzy tranzystorami dotyczą parametrów dynamicznych, co zostało uczynione celowo, dla porównania ich pracy przy dużych częstotliwościach przełączania. Reszta paramet-

trów, takich jak rezystancja kanału w czasie przewodzenia, dopuszczalny prąd dren-źródło oraz powierzchnia oddawania ciepła jest porównywalna.



Rys. 2. Schemat ideowy przekształtnika:

U1, U2, U3, U4 – separowane sterowniki tranzystorów; R1, R2, R3, R4 – rezystory bramkowe;

C_F – pojemność filtrująca, T_r – transformator;

R L C – szeregowy obwód rezonansowy stanowiący układ nagrzewnicy indukcyjnej

Tabela 1. Porównanie podstawowych parametrów tranzystorów

Parameter	TPH3006LD	STB20NM60N	Unit
	Limit Value	Limit Value	
Continuous Drain Current	17	20	A
Drain to Source Voltage	600	600	V
Maximum Power Dissipation	96	140	W
Operating Temperature	-55 to 175	-55 to 150	°C
Drain-Source On-Resistance ($T_J = 25\text{ °C}$)	0.15	0.135	Ω
Input Capacitance	740	1800	pF
Output Capacitance	133	115	pF
Reverse Transfer Capacitance	3.6	1.1	pF
Total Gate Charge	6.2	60	nC
Gate-Source Charge	2.1	8.5	nC
Gate-Drain Charge	2.2	30	nC
Reverse Recovery Time	30	370	ns

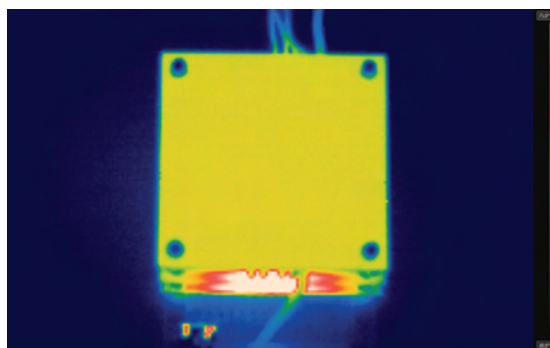
Układy modelowe zostały uruchomione i przetestowane z mocą 600 W, przy częstotliwości przełączania 330 kHz z obciążeniem rezonansowym (nagrzewnica indukcyjna). Wartość 600 W na wyjściu falownika mierzono jako średnią moc z wartości chwilowych prądu i napięcia (Cycle Mean), za pomocą oscyloskopu.

Przeprowadzono dwa rodzaje badań (bez obciążenia i z obciążeniem) z rejestracją wyników kamerą termowizyjną. Pierwsza próba obejmowała analizę strat wynikają-

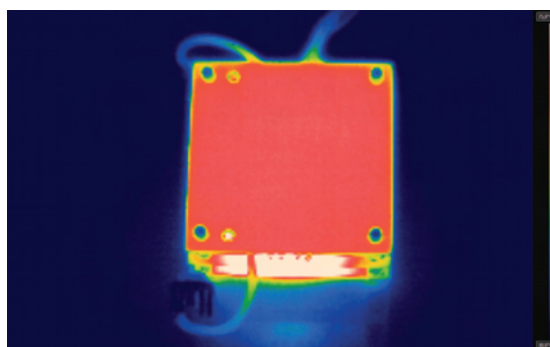
cych z przeładowań pojemności bramkowych tranzystorów. Obserwowano temperaturę płytki PCB z elementami mocy w trakcie pracy w trybie jałowym (zasilając wyłącznie część sterującą). Po ustaleniu się temperatury wykonano dwa termogramy (rys. 3 i 4). Przyjęto liniową skalę temperatur w zakresie 30–75 °C. Temperatura otoczenia wynosiła stale 25 °C.

4. ANALIZA TERMOWIZYJNA STRAT

Na rysunku 3 i rysunku 4 pokazano termogramy dla pracy jałowej przekształtników. Na termogramach widać wyraźną różnicę temperatur modułów mocy przekształtników. Maksymalna temperatura modułu z tranzystorami typu GaN wynosiła 54 °C, czyli 29 °C powyżej temperatury otoczenia. Prąd pobierany przez moduł sterowania wynosił 320 mA, przy 12 V napięcia zasilania.

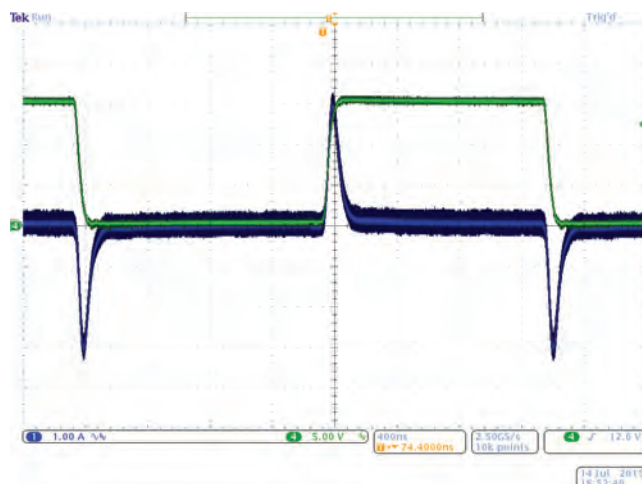


Rys. 3. Termogram przekształtnika wykonanego w technologii GaN w trakcie pracy jałowej, skala: 30–75 °C

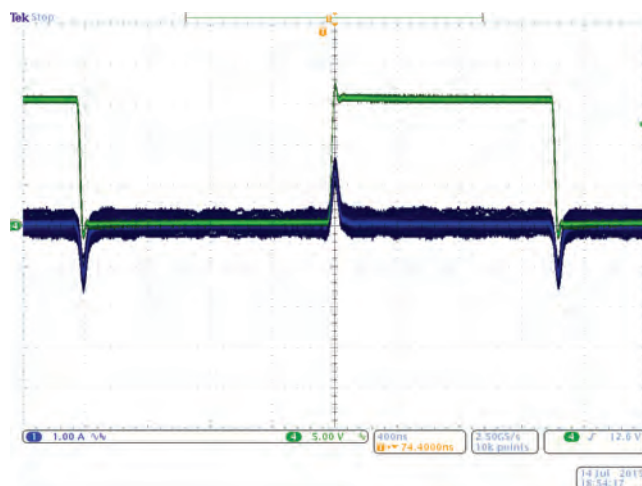


Rys. 4. Termogram przekształtnika wykonanego w technologii MOSFET w trakcie pracy jałowej, skala: 30–75 °C

Maksymalna temperatura modułu z tranzystorami typu MOSFET wynosiła 69 °C, czyli 44 °C powyżej temperatury otoczenia. Prąd pobierany przez moduł sterowania wynosił 430 mA, przy 12 V napięcia zasilania. Jak widać, straty mocy przy pracy jałowej są jedynie nieznacznie niższe dla tranzystora GaN. Znaczące różnice pojawiają się dopiero przy pracy przekształtników z obciążeniem.



Rys. 5. Przebieg napięcia i prądu bramkowego dla tranzystorów MOSFET



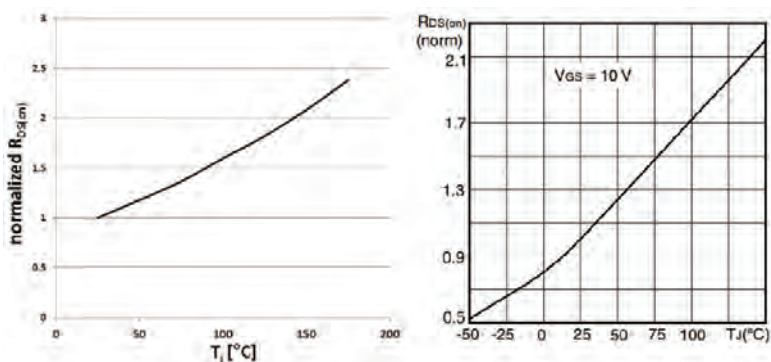
Rys. 6. Przebieg napięcia i prądu bramkowego dla tranzystorów GaN

Na temperaturę modułu mocy wpływa także ciepło wydzielane z układów sterowania umieszczonych poniżej niego. W przypadku tranzystorów typu MOSFET straty są

większe, ponieważ większe pojemności bramkowe wywołują większe wartości prądów impulsowych w trakcie ich przeładowań, co powoduje wzrost wartości prądów średnich w obwodach sterowania. Na rysunku 5 i rysunku 6 pokazano przebiegi prądów bramkowych.

Tranzystory typu MOSFET przeładowywane były prądem szczytowym o wartości 3,2 A, a tranzystory typu GaN prądem o wartości 1,6 A.

Dzięki zastosowaniu techniki rezonansowej możliwe było ograniczenie strat wynikających z przełączania tranzystorów. Największa część strat powodujących nagrzewanie się półprzewodników pochodziła z energii wydzielanej na rezystancji wewnętrznej dren-źródło (R_{ds}), której wartość wzrasta wraz ze wzrostem temperatury złącza. Zależności te przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Zależność rezystancji dren-źródło od temperatury złącza: z lewej dla GaN [7], z prawej dla MOSFET [8]

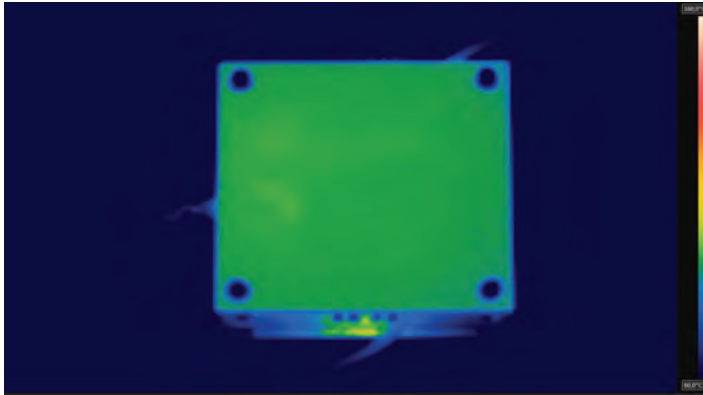
Rezystancja dren-źródło tranzystora MOSFET w temperaturze 25 °C przy prądzie 2 A wynosi około 0,13 Ω . Przy temperaturze 150 °C wzrasta ponad dwukrotnie, do wartości około 0,29 Ω . Rezystancja dren-źródło tranzystora GaN w temperaturze 25 °C przy prądzie 2 A wynosi nie więcej niż 0,15 Ω . Przy temperaturze 100 °C wzrasta około 1,6 razy, do wartości nie większej niż 0,24 Ω .

Wykonano próbę obejmującą analizę strat całkowitych pod obciążeniem równym 600W w postaci nagrzewnicy indukcyjnej. Po ustaleniu się temperatury, wykonano termogramy pokazane na rysunku 8 i rysunku 9. Przyjęto liniową skalę temperatury w zakresie 60–160 °C. Temperatura otoczenia wynosiła stale 25 °C.

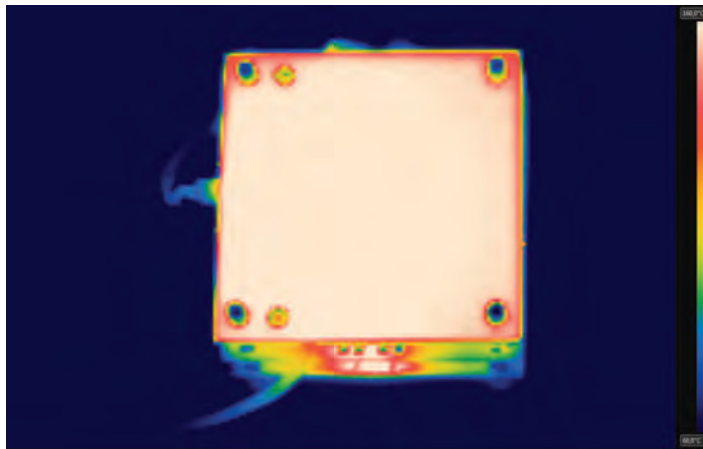
Na załączonych termogramach ponownie widać różnicę temperatur modułów mocy przekształtników. Maksymalna temperatura modułu z tranzystorami typu GaN wynosi 100 °C, czyli 75 °C powyżej temperatury otoczenia.

Maksymalna temperatura modułu z tranzystorami typu MOSFET wynosi 165 °C, czyli 140 °C powyżej temperatury otoczenia. Tranzystory MOSFET pracowały przez wiele godzin bezawaryjnie przy temperaturze złącza powyżej 150 °C.

Należy przy tym zwrócić uwagę, że, zgodnie z prawem Stefana–Boltzmana, całkowita moc promieniowania w całym zakresie długości fali jest wprost proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury ciała, które to promieniowanie emituje.

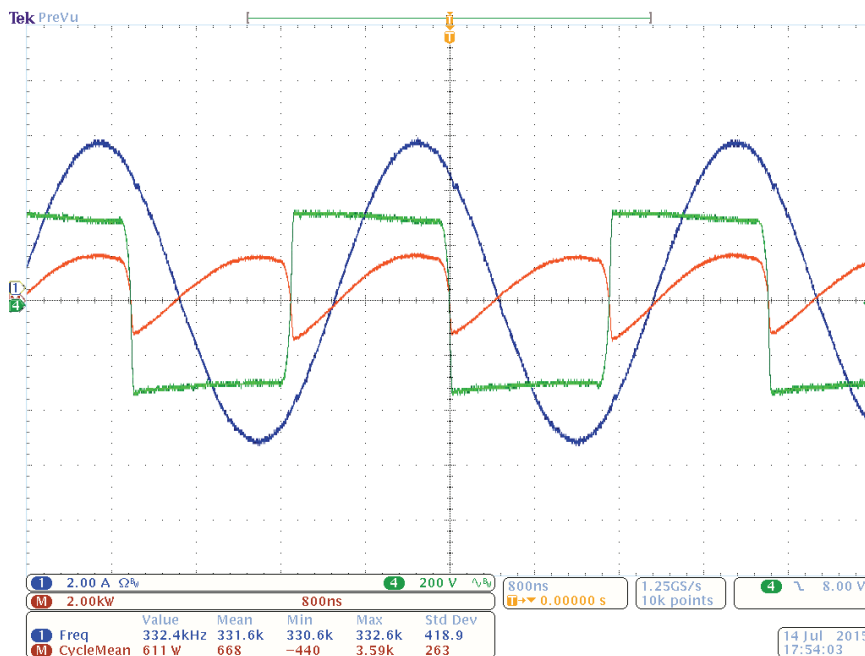


Rys. 8. Termogram modułu przekształtnika wykonanego w technologii GaN w trakcie pracy z obciążeniem 600 W, skala: 60–160 °C



Rys. 9. Termogram modułu przekształtnika wykonanego w technologii MOSFET w trakcie pracy z obciążeniem 600 W, skala: 60–160 °C

Rysunek 10 przedstawia przebiegi wielkości wyjściowych przekształtnika podczas pracy nagrzewnicy z przekształtnikiem w technologii GaN. Moc na wyjściu falownika mierzono jako średnią z wartości chwilowych prądu i napięcia (Cycle Mean), za pomocą oscyloskopu.



Rys. 10. Przebiegi wyjściowe przekształtnika podczas pracy nagrzewnicy z przekształtnikiem w technologii GaN:
 zielony – napięcie, niebieski – prąd, czerwony – moc

5. PODSUMOWANIE

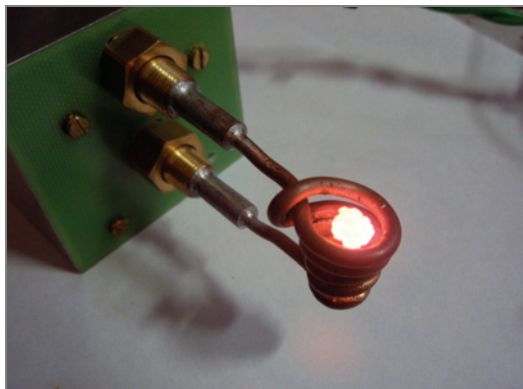
Zastosowanie szybkich tranzystorów typu GaN daje możliwości konstruowania coraz mniejszych i bardziej wydajnych przekształtników. Zwiększenie częstotliwości pracy urządzeń impulsowych, umożliwi zmniejszenie ich wymiarów.

W opisywanym w artykule przykładzie konstrukcji przekształtników wykonanych w różnych technologiach półprzewodnikowych skupiono się głównie na obniżeniu strat mocy. Zmniejszenie przez to temperatury urządzenia pozwala na zastosowanie mniejszych indukcyjności przy zachowaniu podobnego poziomu pulsacji napięcia.

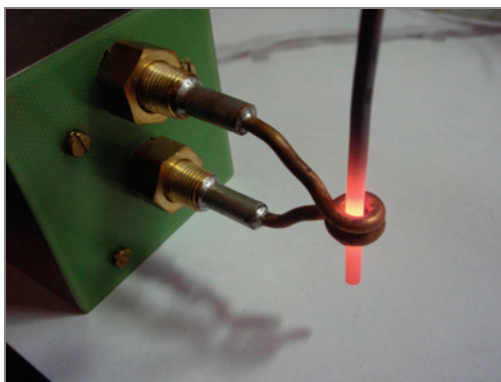
Autorzy planują dalsze rozwijanie koncepcji przekształtników opartych o tranzystory GaN z wykorzystaniem laminatu z podłożem aluminiowym, co pozwoli na konstruowanie urządzeń o większych mocach i mniejszych wymiarach.

W ramach podsumowania swoich dotychczasowych prac autorzy wykonali demonstrator technologii w postaci przekształtnika do nagrzewania indukcyjnego. Przekształtnik pracuje z mocą 1kW przy częstotliwości 330 kHz i zasila nagrzewnicę indukcyjną chłodzoną wodą. Efekty działania urządzenia pokazano na rysunkach poniżej. Na rysunku 11 pokazano efekt lewitacyjnego topienia kulki wykonanej

z aluminium, natomiast na rysunku 12 pokazano efekt nagrzewania drutu miedzianego o przekroju 4 mm^2 .



Rys. 11. Lewitacyjne topienie kulki z aluminium



Rys. 12. Nagrzewanie drutu miedzianego o przekroju 4 mm^2

LITERATURA

- [1] BARANOWSKI J., CZAJKOWSKI G., *Układy elektroniczne, cz. II, Układy analogowe nieliniowe i impulsowe*, WNT, Warszawa 2004.
- [2] BARLIK R., NOWAK M. i in., *Układy energoelektroniczne*, PWN, Warszawa 1982.
- [3] GÓRECKI P., *Nowoczesne tranzystory mocy, czyli długa droga do SiC i GaN*, *Elektronika Praktyczna*, 2014, 3, 46–61.
- [4] JĄDERKO A., SWADOWSKI M., ZYGOŃ K., *Wydajne metody chłodzenia małowabarytowych przekształtników o wysokiej gęstości mocy*, *Materiały XXV Sympozjum Środowiskowego PTZE, Wieliczka, 28 czerwca–1 lipca 2015*, 129–131.
- [5] JĄDERKO A., SWADOWSKI M., ZYGOŃ K., *Optymalizacja nowoczesnych zasilaczy impulsowych*, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2015, Vol. 91, nr 1, 152–155.

- [6] TUNIA M., BARLIK R., *Teoria przekształtników*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2003.
- [7] www.transphormusa.com/products [dostęp: 07.2015].
- [8] http://www.st.com/web/catalog/sense_power [dostęp: 07.2015].
- [9] http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Presentation_GalliumNitride_GaNApplications_SeminarAPEC2015-AP-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d4624bcaebcf014c2c265e69007e [dostęp: 07.2015].

HIGH-FREQUENCY POWER CONVERTER USING MODERN GaN TRANSISTORS

Modern transistors made with gallium nitride in the application of induction heater voltage converter are described in this paper. Advantages of modern GaN transistors in comparison to the MOSFETs are shown. Total power losses and maximum junctions temperature are significantly reduced.