

## Jednofazowy mostkowy przekształtnik DC-AC z tranzystorami GaN GIT

**Streszczenie.** W niniejszym artykule przedstawiono jednofazowy mostkowy przekształtnik napięcia z tranzystorami GaN GIT. W pracy omówiono zastosowaną topologię przekształtnika oraz przedstawiono strukturę zaprojektowanych sterowników bramkowych. Na podstawie badań eksperymentalnych dokonano analizy sprawności układu dla wybranych częstotliwości przełączania oraz analizy częstotliwościowej wąskopasmowej oraz szerokopasmowej obejmującej badanie zawartości harmonicznych w odtwarzanym sygnale napięciowym dla częstotliwości przełączania 100 kHz, 200 kHz oraz 500 kHz.

**Abstract.** In this paper a single phase bridge voltage inverter with GaN GIT transistors is investigated. The article discusses the applied topology of the converter and presents the structure of the designed gate drivers. An analysis of the system efficiency for different switching frequencies (100 and 200 kHz) and harmonic analysis was carried out. Narrow and wideband harmonic analyzes were performed on the produced output voltage signal for switching frequencies at the level of 100,200 and 500 kHz. (**Single-phase DC-AC bridge converter with GaN GIT transistors**).

**Słowa kluczowe:** tranzystory GaN GIT, przekształtnik DC-AC, sprawność, analiza harmonicznych.

**Keywords:** GaN GIT transistors, DC-AC inverter, efficiency, harmonics analysis.

### Wstęp

W ostatnich latach można zauważyć znaczny wzrost zainteresowania materiałami o tzw. szerokim paśmie wzbronionym (z ang. *Wide Bandgap* - WBG) pod kątem ich zastosowania w technologii półprzewodnikowych przyrządów mocy [1-3]. Tendencja ta wynika z właściwości przyrządów półprzewodnikowych wytworzonych na bazie węgla krzemu (SiC) oraz azotku galu (GaN). Analizując przebieg rozwoju energoelektroniki można zauważyć ważną tendencję obejmującą redukcję: gabarytów urządzeń, strat mocy przekształtników, a także minimalizacji niepożądanego interakcji na linii: źródło zasilania-przekształtnik i przekształtnik-odbiornik [4]. Redukcję gabarytów urządzeń można uzyskać poprzez: stosowanie mniejszych elementów pasywnych, układów chłodzenia, a także eliminację pasożytniczych parametrów obwodów takich jak np. pojemności oraz indukcyjności. Podejście takie wymusza konieczność odpowiedniego projektowania obwodów mocy oraz zastosowania zaawansowanych elementów elektronicznych. Chcąc uzyskać redukcję gabarytów układów chłodzenia konieczne jest zmniejszenie całkowitych strat mocy urządzenia, co wiąże się z ograniczeniem emisji ciepła pochodzącego z elementów obwodu mocy uczestniczących w procesie przetwarzania energii elektrycznej. Zastosowanie przyrządów półprzewodnikowych na bazie GaN pod tym względem wydaje się być jak najbardziej zasadne, zważywszy na ich bardzo dobre parametry dynamiczne oraz statyczne. Elementy te cechują się niewielkimi pojemnościami pasożytniczymi, bardzo krótkimi czasami przełączania oraz dobrą przewodnością elektryczną - niewielka wartość rezystancji przewodzenia [1,2]. Kolejnym ich atutem jest bardzo mała energia załączania oraz wyłączenia [5,6], co dodatkowo wpływa pozytywnie na redukcję generowanych strat mocy. Taki stan rzeczy pozwala na osiągnięcie wysokiej sprawności przekształtnika. Ze względu na bardzo krótkie czasy przełączeń oraz niewielką energię przełączenia możliwe jest uzyskanie bardzo wysokich częstotliwości przełączania sięgających wartości setek kiloherców [7-9]. Zwiększanie szybkości przełączania tranzystorów z jednej strony powoduje jednoczesny wzrost strat mocy układu, jednak z drugiej strony pozwala na zastosowanie mniejszych elementów pasywnych [1,9], dlatego wybór częstotliwości przełączania jest pewnym

kompromisem pomiędzy gabarytami, a sprawnością urządzenia. Zastosowanie nowoczesnych tranzystorów na bazie GaN pozwala osiągnąć parametry przekształtników dotychczas nieosiągalnych dla przyrządów wykonanych w tradycyjnej technologii krzemowej [7,8]. Możliwe jest uzyskanie wysokiej sprawności osiągającej wartość >98% przy częstotliwościach przełączania przekraczających 100 kHz [1,5-9]. Taki stan rzeczy pozwala osiągnąć wysoką wartość współczynnika gęstości mocy (>6kW/dm<sup>3</sup>), dotychczas nieosiągalną w technologii krzemowej [5].

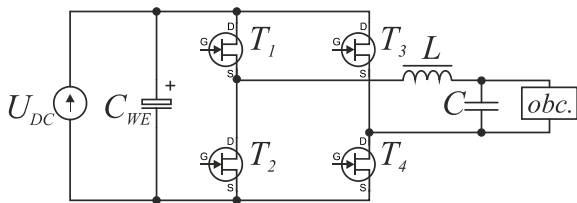
W niniejszym artykule przedstawiono jednofazowy mostkowy przekształtnik DC-AC na bazie tranzystorów opartych na azotku galu – GaN Gate Injection Transistors – firmy Panasonic. Pierwszy rozdział dotyczy topologii układu oraz sterowników bramkowych, w drugim rozdziale przedstawiono rozważania dotyczące sprawności układu dla dwóch częstotliwości przełączania 100 i 200 kHz. W trzecim rozdziale przedstawiono wąskopasmową oraz szerokopasmową analizę wyższych harmonicznych w odtwarzanym przebiegu napięciowym dla trzech różnych częstotliwości przełączania 100, 200 oraz 500 kHz.

### Topologia układu

Topologię rozważanego układu przekształtnika DC-AC przedstawiono na Rys. 1. Wejście układu stanowi źródło zasilania DC z kondensatorowym magazynem energii – kondensator elektrolityczny  $C_{WE}$  o pojemności 470  $\mu$ F/400 VDC. Półprzewodnikowy mostek mocy składa się z czterech tranzystorów  $T_1-T_4$  GaN. Zastosowano tranzystory PGA26C09DV firmy Panasonic (600V/15A), są to tzw. Gate Injection Transistors (GIT). Do realizacji wyjściowego filtra zastosowano dławik  $L$  o indukcyjności równej 68 $\mu$ H oraz kondensator foliowy  $C$  o pojemności 4,7  $\mu$ F/275 VAC. Wartość napięcia wejściowego DC to 200V, natomiast częstotliwość generowanego napięcia wyjściowego wynosiła 50 Hz.

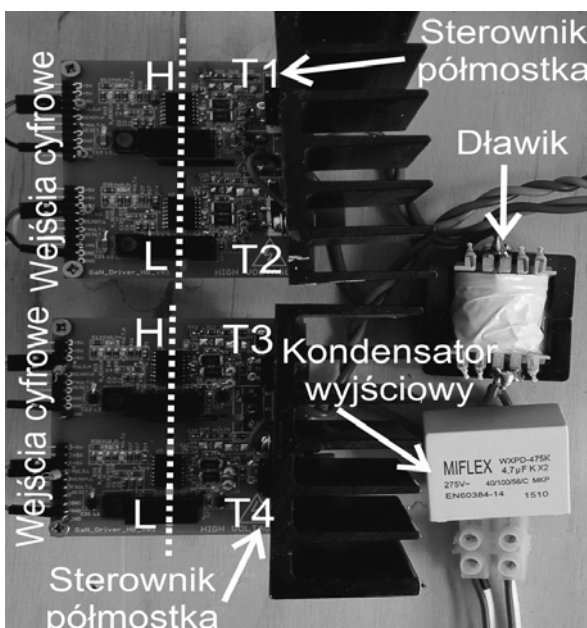
Układ sterowania tranzystorami zrealizowano przy pomocy mikrokontrolera STM32F407VGT6 firmy STMicroelectronics. Do generowania wyjściowego sygnału napięcia w postaci przebiegu sinusoidalnego zastosowano unipolarną odmianę metody modulacji szerokości impulsów (z ang. *Pulse Width Modulation*). Metoda ta polega na generowaniu impulsów prostokątnych o zmiennym wypełnieniu, które następnie podawane są na układ

sterownika bramkowego. W odróżnieniu od metody bipolarnej zastosowana metoda bazuje na czterech kombinacjach załączonych tranzystorów, dopuszczalne są następujące stany załączenia:  $T_1$  i  $T_3$ ,  $T_2$  i  $T_4$ ,  $T_1$  i  $T_4$ ,  $T_2$  i  $T_3$ .



Rys.1. Topologia przekształtnika DC-AC

Ze względu na sposób generowania sygnałów sterujących tętnienia prądu oraz napięcia wyjściowego charakteryzują się dwukrotnie większą częstotliwością od częstotliwości przełączania. Na rysunku 2 przedstawiono obwód mocy i sterowania zaprojektowanego przekształtnika napięcia.

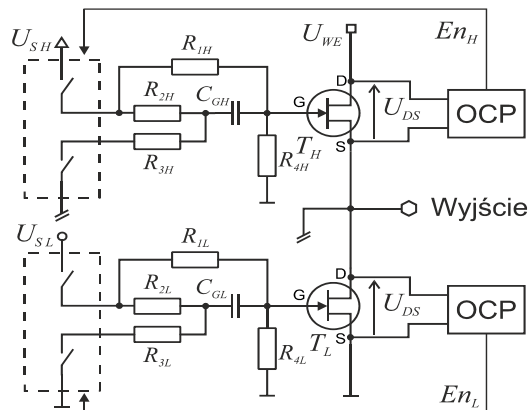


Rys.2. Zdjęcie obwodu mocy jednofazowego przekształtnika napięcia

### Sterownik bramkowy półmostka

Ważnym elementem w konstrukcji falownika jest obwód sterowników bramkowych odpowiedzialnych za przełączanie tranzystorów (Rys. 2). Dodatkowo budowa sterownika powinna zapewniać możliwie wysoki stopień bezawaryjności pracy oraz zabezpieczać tranzystory przed uszkodzeniem. Dlatego też wyposażony został on w obwód ochrony nadprądowej (OCP), chroniący tranzystory przed przepływem prądu o zbyt dużych wartościach, w efekcie minimalizując możliwość ich uszkodzenia w przypadku zwarcia, albo przeciążenia prądowego. Obwód zrealizowany jest na podstawie monitorowania napięcia między źródłem tranzystora a drenem. W przypadku normalnej pracy tranzystora, w zakresie wartości prądu nieprzekraczających dopuszczalnej wartości, napięcie  $U_{DS}$  nie przekracza pewnej progowej wartości. Jednak w przypadku pojawienia się zwarcia, albo przeciążenia prądowego wartość prądu narasta bardzo szybko w efekcie czego wartość napięcia  $U_{DS}$  wykracza poza dopuszczalną wartość, następnie układ generuje sygnał błędny i następuje wyłączenie tranzystora.

Każdy z nich posiada własny obwód OCP, a w przypadku wystąpienia awarii na którymkolwiek tranzystorze informacja przekazywana jest do mikrokontrolera, w efekcie czego wyłączony zostaje sterownik dla całej gałęzi, skutkując zatrzymaniem przełączania półmostka. Takie zabezpieczenie pozwala na uniknięcie wielu awarii układu.

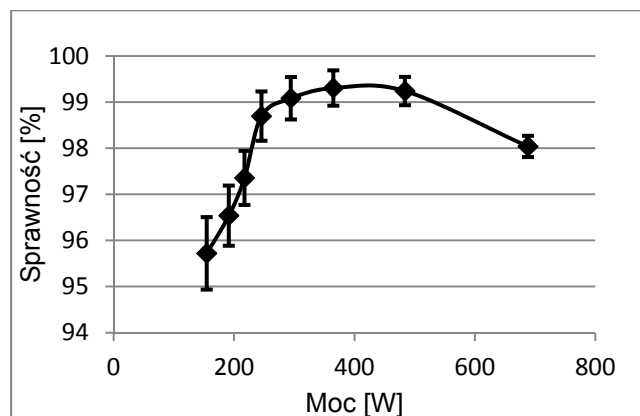


Rys.3. Schemat sterownika bramkowego

Sygnal na bramki tranzystorów podawany jest za pośrednictwem dwóch bliźniaczych obwodów elektrycznych składających się z elementów pojemnościowych oraz rezystancyjnych. W każdej gałęzi znajdują się cztery rezystory oraz jeden kondensator o następujących parametrach:  $R_1 = 470 \Omega$ ,  $R_2 = 56 \Omega$ ,  $R_3 = 4.3 \Omega$ ,  $R_4 = 4.7k \Omega$ ,  $C_G = 3.3 nF$ . Pomiędzy obwodem elektrycznym układu cyfrowego oraz obwodu mocy zastosowano izolację galwaniczną separując układ sterowania od układu mocy. Zasilanie układów elektronicznych w części mocy sterownika zrealizowano przy pomocy izolowanych przetwornic napięcia po jednej dla każdego z tranzystorów.

### Badania sprawności energetycznej

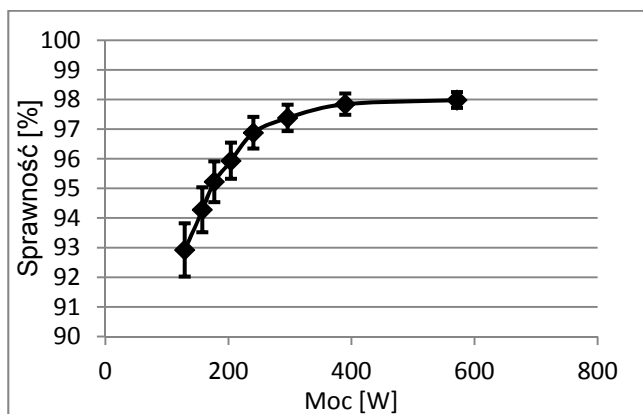
W ramach badań eksperymentalnych przeprowadzono serię pomiarów sprawności układu dla różnych częstotliwości przełączania (100 oraz 200kHz). Sprawność wyznaczona została w sposób pośredni na podstawie pomiaru wartości wejściowych i wyjściowych prądów oraz napięć. Testy sprawności urządzenia przeprowadzono dla kilku wariantów obciążenia rezystancyjnego podłączonego do wyjścia układu. Poniżej przedstawiono wyniki dokonanych pomiarów sprawności. Rysunek 3 przedstawia pomiar dla częstotliwości przełączania 100 kHz. Analizując przedstawiony wykres można zauważyć, że maksymalna wartość sprawności przekracza 99%.



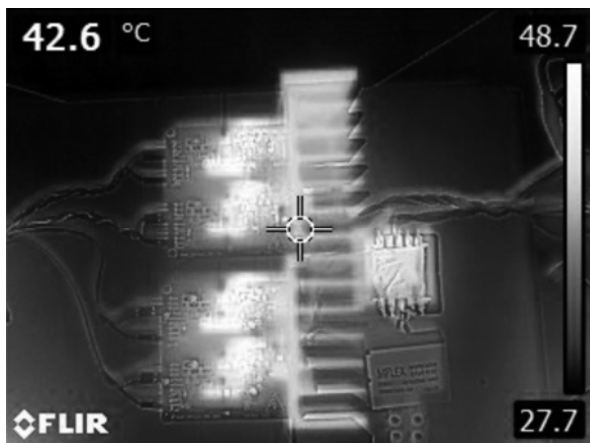
Rys.4. Sprawność dla częstotliwości przełączania 100kHz

Taki stan rzeczy powoduje, że wartość energii przełączenia tranzystora jest niska w porównaniu do analogicznych tranzystorów krzemowych.

Podobnie jak w poprzednim przypadku dla częstotliwości przełączania 200 kHz możliwe jest uzyskanie wysokiej sprawności układu. Maksymalna sprawność sięga tutaj wartości 98%. Mniejsza wartość sprawności wynika z wyższej częstotliwości przełączania. W takim przypadku średnia wartość strat mocy przełączy wzrasta, przez co całkowita sprawność układu ulega niewielkiemu obniżeniu. Z jednej strony przełączanie z wyższymi częstotliwościami pozwala na zastosowanie mniejszych elementów pasywnych, jednak z drugiej strony powoduje wzrost strat przełączy, przez co ma negatywny wpływ na wydajność przetwarzania energii. W związku z tym wybór częstotliwości przełączania łączników mocy jest pewnego rodzaju kompromisem pomiędzy rozmiarem urządzenia, a jego sprawnością.



Rys.5. Sprawność dla częstotliwości przełączania 200kHz



Rys.6. Zdjęcie obwodu mocy wykonane kamerą termowizyjną

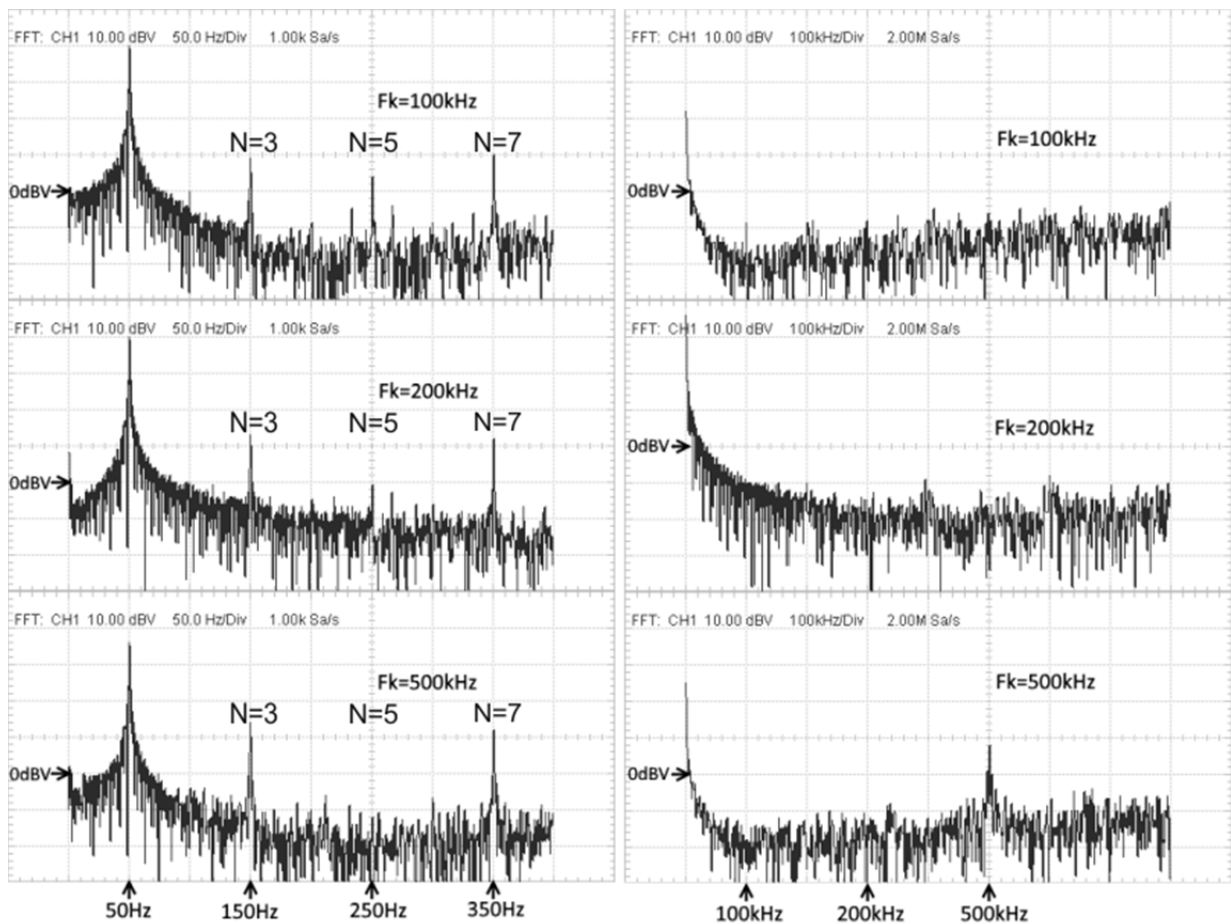
Podczas badań eksperymentalnych dotyczących sprawności układu, wykonano zdjęcie jego otoczenia przy pomocy kamery termowizyjnej. Na obrazie przedstawiono temperaturę poszczególnych elementów przekształtnika podczas jego pracy przy częstotliwości przełączania 200 kHz (Rys. 6). Podczas pomiarów układ został obciążony i pracował aż do momentu ustabilizowania się temperatury otoczenia. Analizując temperaturę otoczenia falownika można zauważyć, że maksymalna temperatura elementów obwodu mocy nie przekracza poziomu ok. 48.7°C przy temperaturze otoczenia na poziomie ok. 27.7°C. Zarejestrowana temperatura zastosowanych tranzystorów GaN GIT ustabilizowała się na poziomie ok. 42.6°C. Jest to temperatura nieco niższa od maksymalnej

temperatury występującej w obwodzie sterownika bramkowego. Najbardziej rozgrzały się elementy wchodzące w skład obwodu elektrycznego sterownika bramkowego po stronie mocy, są to: przetwornice napięcia, układ scalony sterownika oraz rezystory. Dodatkowo można zauważyć, że temperatura diawika ustaliła się na poziomie zbliżonym do temperatury tranzystorów. Wzrost jego temperatury związany jest ze stratami przewodzenia oraz przemagnesowywania rdzenia. Wyższa temperatura elementów składowych sterownika bramkowego spowodowana jest brakiem układu chłodzenia w postaci radiatora oraz niewielką powierzchnią ograniczającą możliwość odprowadzenia ciepła.

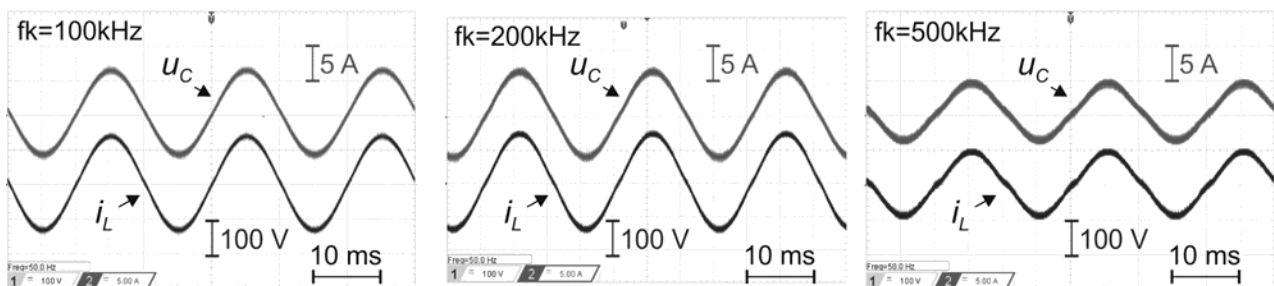
#### Analiza harmonicznych

Podczas wykonanych badań analizie poddano również zawartość harmonicznych w generowanym przez przekształtnik napięciu wyjściowym. Analizy dokonano dla różnych częstotliwości przełączania (100 kHz, 200 kHz i 500 kHz). W obydwóch przypadkach analizy dokonano w zakresie wąskopasmowym oraz szerokopasmowym. Pierwszy z analizowanych przypadków dotyczył wąskopasmowego widma częstotliwościowego dla różnych częstotliwości przełączania (Rys. 7). Dla zadanej częstotliwości wyjściowej 50Hz, w widmie wąskopasmowym (lewa kolumna), można zauważyć nieparzyste składowe harmoniczne. Jednak wartość amplitud składowych nieparzystych nie przekraczają poziomu 10dBV, co w praktyce oznacza, iż ich wkład w generowanym sygnale wyjściowym jest nieznaczny. Dodatkowo dla częstotliwości przełączania o wartości 200 i 500 kHz można zauważyć znaczną redukcję piątej składowej harmonicznej (250 Hz). Wynika stąd, że wysoka częstotliwość przełączania pozwala na redukcję zawartości składowych harmonicznych w generowanym sygnale wyjściowym.

Dla omawianego przypadku dokonano także szerokopasmowej analizy częstotliwościowej napięcia wyjściowego (Rys. 7 prawa kolumna) dla częstotliwości przełączania równych: 100 kHz, 200 kHz oraz 500 kHz. Dokonując analizy widma można łatwo zauważyć, że dla omawianych przypadków jedynie przy częstotliwości przełączania na poziomie 500 kHz pojawia się widoczna składowa w widmie częstotliwościowym. Dla dwóch pozostałych częstotliwości składowe harmoniczne pochodzące od przełączania są niewielkie, a ich amplituda nie wyróżnia się na tle pozostałych składowych. Taki stan rzeczy znajduje swoje odzwierciedlenie w odtwarzanym przebiegu napięcia wyjściowego (Rys. 8). Widać tutaj, że odtwarzane przebiegi napięciowe w pierwszych dwóch przypadkach są kształtu sinusoidalnego bez większych zniekształceń, w trzecim natomiast widać drobne odkształcenia w okolicy zerowej wartości napięcia, dodatkowo mniejsza jest amplituda napięcia. Zjawisko to wynika z dwojakich przyczyn. Pierwsza z nich wynika ze sposobu modulacji opartej o modulację szerokości impulsu, wraz ze wzrostem częstotliwości przełączania spada rozdzielczość generowanego sygnału wyjściowego, taki stan rzeczy wpływa negatywnie na jakość odtwarzanego sygnału wyjściowego. Druga przyczyna wynika z konieczności uwzględniania czasów martwych podczas przełączania tranzystorów. Podczas zwiększania częstotliwości przełączania czas jednego okresu przełączenia ulega skróceniu. W takim przypadku stosunek wartości czasów martwych do okresu ulega zwiększeniu, przez co pojawiać się mogą zniekształcenia w odtwarzanym sygnale co ma negatywny wpływ na kształt napięcia wyjściowego.



Rys.7. Widmo częstotliwościowe wyjściowego sygnału napięcia: lewa kolumna - wąskopasmowe, prawa kolumna – szerokopasmowe



Rys.8. Sygnały prądów (górny) oraz napięć wyjściowych (dolny) dla różnych częstotliwości przełączania

### Wnioski

W niniejszym artykule przedstawiono jednofazowy mostkowy przekształtnik napięcia oparty o tranzystory GaN GIT. Przeprowadzone badanie dotyczyło sprawności układu dla różnych częstotliwości przełączania oraz analizę składowych harmonicznych odtwarzanego napięcia. Dzięki zastosowaniu nowoczesnych półprzewodnikowych łączników mocy możliwe jest uzyskanie stosunkowo wysokich częstotliwości przełączania przy zachowaniu wysokiej sprawności układu. Wyższa częstotliwość przełączania pozwala na zastosowanie mniejszych elementów pasywnych, co niesie za sobą możliwość redukcji gabarytów urządzenia, zwiększając gęstość mocy. Dla częstotliwości przełączania 100 kHz uzyskana sprawność przekracza 99%, natomiast dla 200 kHz wartość ta oscyluje w okolicach 98%. Wysoka wartość sprawności oznacza, iż niewielka ilość energii jest tracona w postaci

ciepła, co pozwala dodatkowo na zastosowanie mniejszych elementów odpowiedzialnych za odprowadzanie ciepła, co ma także przełożenie na redukcję rozmiaru urządzenia. Przeprowadzona analiza termiczna pozwala stwierdzić, iż dzięki zastosowaniu tranzystorów GaN GIT możliwe jest zmniejszenie temperatury pracy obwodu mocy. Niestety ze względu na duże upakowanie elementów obwodu elektrycznego sterownika bramkowego przy wysokiej częstotliwości przełączania można zauważyć wyższą temperaturę ich pracy.

Wyższa częstotliwość przełączania w pewnym zakresie ma pozytywny wpływ na jakość odtwarzanego przebiegu napięciowego. Zawartość wyższych składowych harmonicznych w napięciu wyjściowym jest niewielka, dodatkowo dla częstotliwości przełączania 200 oraz 500 kHz składowa o wartości 250 Hz jest znacznie zredukowana. Niestety zwiększanie częstotliwości przełączania może mieć

negatywny wpływ na odtwarzany sygnał wyjściowy, ze względu na ograniczoną rozdzielczość generowanego sygnału PWM oraz występowanie czasów martwych podczas przełączania tranzystorów. Zjawisko to widoczne jest dla częstotliwości przełączania na poziomie 500 kHz w postaci odkształceń wyjściowego sygnału napięcia w okolicach zerowego napięcia oraz częściowej redukcji jego amplitudy.

W dalszym etapie prac badawczych planowane jest opracowanie oraz implementacja algorytmu regulacji napięcia wyjściowego.

**Autorzy:** dr Leszek Wydźgowski, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Katedra Automatyki i Systemów Pomiarowych, ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń, E-mail: [lehu@fizyka.umk.pl](mailto:lehu@fizyka.umk.pl); mgr inż. Łukasz J. Niewiara, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Katedra Automatyki i Systemów Pomiarowych, ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń, E-mail: [lukniewiara@fizyka.umk.pl](mailto:lukniewiara@fizyka.umk.pl); dr inż. Tomasz Tarczewski, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Katedra Automatyki i Systemów Pomiarowych, ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń, E-mail: [ttarczewski@fizyka.umk.pl](mailto:ttarczewski@fizyka.umk.pl); prof. dr hab. inż. Lech M. Grzesiak, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: [l.grzesiak@isep.pw.edu.pl](mailto:l.grzesiak@isep.pw.edu.pl); prof. dr hab. inż. Marek Zieliński, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Katedra Automatyki i Systemów Pomiarowych, ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń, E-mail: [marziel@fizyka.umk.pl](mailto:marziel@fizyka.umk.pl)

## LITERATURA

- [1] Rąbkowski J., Tranzystory GaN w falowniku mostkowym o wysokiej częstotliwości przełączeń (250kHz), *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr 5, 45-48
- [2] Rąbkowski J., Barlik R., Experimental evaluation of GaN Gate Injection Transistors, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr 3, 9-12
- [3] Bortis D., Knecht O., Neumar D, Kolar J. W., Comprehensive evaluation of GaN GIT in low- and high-frequency bridge leg applications, Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), 2016 IEEE 8th International, (2016), 1-10
- [4] Wyk J. D., Lee F. C., On a Future for Power Electronics, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, no. 2, (2013), 59-72
- [5] Zhao C. et al., Design and Implementation of a GaN-Based, 100-kHz, 102-W/in<sup>3</sup> Single-Phase Inverter, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 3, (2016), 824-840
- [6] Mitova R., Ghosh R., Mhaskar U., Klikic D., Wang M. X., Dantella A., *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 5, (2014), 2441-2452
- [7] Gurpinar E., Yang Y., Iannuzzo F., Castellazzi A., Blaabjerg F., Reliability-Driven Assessment of GaN HEMTs and Si IGBTs in 3L-ANPC PV Inverters, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no.3, (2016) 956-969
- [8] Gurpinar E, Castellazzi A., Single-Phase T-Type Inverter Performance Benchmark Using Si IGBTs, SiC MOSFETs, and GaN HEMTs, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no.10, (2016), 7148-7160,
- [9] Wydźgowski L., Niewiara L. J., Tarczewski T, Grzesiak L. M., DC-DC Power Converter with Gallium Nitride Gate Injection Transistors, Proceedings of 19<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE), (2017), 1-8