

Zasilacz sterowany cyfrowo z przetwornicą reverse buck

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów ilustrujących wpływ doboru tranzystora mocy wykonanego w technologii krzemowej (Si) oraz azotku galu (GaN) na właściwości zasilacza sterowanego cyfrowo z przetwornicą DC-DC typu reverse buck. Przedstawiono i krótko opisano najważniejsze bloki funkcjonalne skonstruowanego układu. Przedyskutowano wybrane zależności wielkości charakteryzujących badany zasilacz od prądu obciążenia.

Abstract. This paper presents the results of measurements illustrating the effect of selecting a power transistor made in silicon (Si) and gallium nitride (GaN) technology on the properties of a digitally controlled power supply with a reverse buck DC-DC converter. The main functional blocks of the developed system are presented and briefly described. Selected dependencies of quantities characterizing the studied power supply on load current are described. (**Digitally controlled power supply with reverse buck converter**)

Słowa kluczowe: Przetwornica DC-DC, topologia reverse buck, Si, GaN, MOSFET, JFET

Keywords: DC-DC converter, reverse buck topology, Si, GaN, MOSFET, JFET

Wprowadzenie

Przetwornica DC-DC typu buck należy do najpopularniejszych układów impulsowego przetwarzania energii elektrycznej [1, 2]. Przetwornica ta jest wykorzystywana w układach zasilania o mocy wyjściowej nie przekraczającej kilkuset watów [1, 3, 4]. Oprócz elementów biernych zawiera ona również półprzewodnikowe elementy kluczujące, które mogą być wykonane w różnych technologiach: krzemowej (Si), węgla krzemu (SiC) oraz azotku galu (GaN) [5, 6].

W ciągu kilku ostatnich lat pojawiły się dostępne komercyjnie półprzewodnikowe elementy mocy wykonane z azotku galu, charakteryzujące się większą wytrzymałością napięciową i krótszym czasem przełączania w porównaniu z elementami półprzewodnikowymi wykonanymi z krzemu [5]. W pracach [6, 7] przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dotyczących właściwości przetwornic tranzystorowych, w których tranzystory mocy zostały wykonane z krzemu oraz z węgla krzemu.

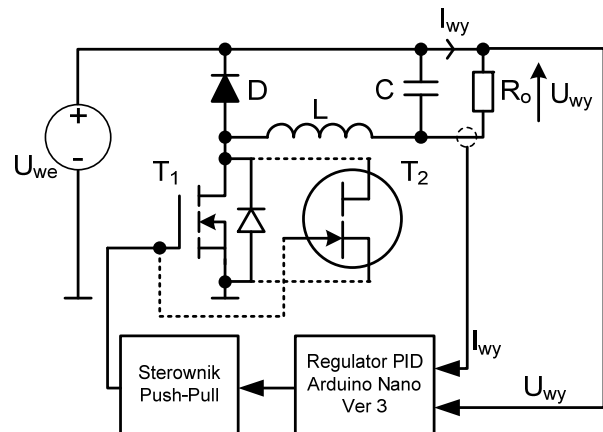
Przetwornica DC-DC typu reverse buck stanowi jedno z rozwinięć standardowej topologii buck, charakteryzującej się łatwością implementacji tranzystorów unipolarnych z kanałem typu N. Problem ten jest szczególnie istotny ze względu na polaryzację tranzystorów unipolarnych oraz spełnienie wymagania odpowiednio silnego wystereowania bramki tego tranzystora umożliwiającego przepływ prądu między drenem a źródłem [1, 3, 4].

Atutem zastosowania tranzystora mocy z kanałem typu N, są niższe koszty budowy przetwornicy DC-DC oraz możliwość zastosowania bardziej zaawansowanych przełączników wykonanych w technologii SiC oraz GaN. Prezentowana topologia posiada również istotną wadę. Masa badanej przetwornicy występuje na biegunie dodatnim źródła zasilania, co wymaga rozbudowanych układów zabezpieczeń. Zastosowanie topologii przetwornicy typu reverse buck pozwala na sterowanie tranzystora mocy za pomocą wyjść mikrokontrolera [1, 3, 4].

W niniejszej pracy przedstawiono i krótko opisano najważniejsze bloki funkcjonalne zaprojektowanego zasilacza z przetwornicą typu reverse buck. Zaprezentowano również wyniki badań eksperymentalnych ilustrujące wpływ prądu wyjściowego I_{wy} rozważanego zasilacza, w którym zastosowano tranzystor mocy wykonany z krzemu oraz azotku galu na wartość uzyskiwanej sprawności. Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych dotyczą procesu wstępnego uruchomienia zaprojektowanego układu.

Przetwornica DC-DC typu reverse buck

Wybrana topologia charakteryzuje się połączeniem zacisku dławika L do ujemnego zacisku wyjścia przetwornicy. Tranzystory mocy T_1 i T_2 są włączone pomiędzy punkt wspólny anody diody D z cewką L a masę układu. Takie rozwiązanie omija problem ze skomplikowanym sterowaniem tranzystora mocy w przetwornicy DC-DC typu reverse buck. Jest to szczególnie istotne w układach wysokoprądowych, gdzie główną przyczyną strat jest rezystancja włączonego kanału tranzystora mocy $R_{DS(on)}$. Do badań eksperymentalnych zasilacza z przetwornicą DC-DC reverse buck wybrano dwa tranzystory mocy wykonane w różnych technologiach oznaczone na schemacie jako T_1 oraz T_2 . Schemat badanego zasilacza z przetwornicą typu reverse buck pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy zasilacza z przetwornicą DC-DC reverse buck

Wadą przetwornicy reverse buck, oprócz wspólnego punktu na potencjale wysokim, jest problem sterowania przetwornicą. W przypadku sterowania przetwornicą w trybie stałonapięciowym, pomiar różnicy potencjałów na obciążeniu nie może zostać zrealizowany metodą bezpośrednią. Ponadto, w trybie stałoprądowym, do pomiaru różnicy napięć na boczniku pomiarowym należy zastosować wzmacniacze operacyjne mogące współpracować z wysokimi poziomami napięć wejściowych. W tym celu stosuje się wzmacniacze operacyjne typu HSCM (High Side Current Monitor) [1, 3, 4].

W układzie zastosowano dławik L wyprodukowany przez firmę FerroCore o numerze producenta COIL1016-

0.56 o indukcyjności 560 μH oraz kondensator filtrujący C o pojemności 100 μF . Jako element D zastosowano diodę Schottky'ego ES3J [8]. Parametry eksploatacyjne dławika L zostały przedstawione w Tabeli 1.

Tabela 1. Wartości wybranych parametrów eksploatacyjnych dławika COIL1016-0.56 [9]

Parametr	Wartość
Wartość prądu nasycenia I_{SAT} [A]	0,9
Maksymalna wartość skuteczna prądu I_{RMS} [A]	1,8
Rezystancja uzwojenia dławika R_L [Ω]	0,591
Indukcyjność dławika L [μH]	560 \pm 10 %

Tranzystory mocy w opracowanej przetwornicy są sterowane za pomocą dyskretnego sterownika w topologii push-pull, który jest zrealizowany za pomocą pary komplementarnych tranzystorów bipolarnych. Aby możliwe było zastosowanie tego sterownika do sterowania tranzystorem unipolarnym mocy zastosowano układ włączenia tranzystora mocy w obwód typu „low-side”. Takie rozwiązanie układowe pozwala na sterowanie bramką tranzystora mocy za pomocą sterowników niskonapięciowych sterowanych bezpośrednio z wyjść cyfrowych mikrokontrolera [1].

Generator sygnału prostokątnego PWM (Pulse Width Modulation) został opracowany na podstawie regulatora PID zaimplementowanego w układzie Arduino Nano ver 3 [10]. Częstotliwość sygnału prostokątnego podczas badań eksperymentalnych była równa 31,75 kHz. Sterowanie za pomocą mikrokontrolera badanej przetwornicy umożliwia łatwy wybór między trybami pracy zasilacza, tryb stałoprądowy CC (Constant Current) oraz tryb stałonapięciowy CV (Constant Voltage). Tryb CC cechuje się szybkim działaniem algorytmu sterującego, tak aby w wąskim zakresie napięcia wyjściowego sterować zadanym prądem obciążenia. Do tego celu wykorzystano algorytm PID, który dobrze skalibrowany szybko przeciwdziała uchybom od wartości zadanej [11]. Układ sprzężenia zwrotnego dla wspomnianego algorytmu PID, musi cechować się dokładnymi pomiarami parametrów wyjściowych badanej przetwornicy. Do realizacji tej funkcji wykorzystano wbudowany w mikrokontroler ATMEGA328P przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC).

Regulator PID zrealizowany za pomocą układu Arduino Nano ver 3 jest kalibrowany za pomocą współczynnika wzmocnienia proporcjonalnego $K_P = 75$, wzmocnienia całkującego $K_I = 2$ oraz wzmocnienia pochodnej $K_D = 300$. Współczynniki te zostały dobrane empirycznie na podstawie testów i badań eksperymentalnych podczas uruchamiania układu badanej przetwornicy. Zauważono również, że wprowadzenie dzielnika uchybu $K_{DIV} = 1100$ pozwala uzyskać wyższą stabilność algorytmu sterowania kosztem szybkości działania i reakcji na zmiany parametrów wejściowych i wyjściowych regulatora PID.

Jako układ sprzężenia zwrotnego zastosowano wzmacniacz operacyjny typu HSCM ZXCT1087 mogący współpracować z wysokimi napięciami wejściowymi. Układ wzmacniacza operacyjnego jest skonfigurowany do pomiaru prądu wejściowego przetwornicy poprzez wzmocnienie napięcia z rezystorów pomiarowych i translację poziomu odczytanego napięcia na poziom akceptowalny przez mikrokontroler. Ponadto omawiany wzmacniacz zawiera także wbudowane rezystory określające wzmocnienie napięciowe na poziomie 25 V/V oraz zabezpieczenie przed przekroczeniem napięcia zasilania o wartości + 5 V_{DC} . Wobec tego, poprzez odpowiedni algorytm zaimplementowany w mikrokontrolerze układ jest w stanie mierzyć prąd wyjściowy I_{wy} do wartości maksymalnej równej 1,5 A.

Istotną wadą mikrokontrolerów ATMEGA 328P, a w szczególności wbudowanych w nie przetworników

analogowo-cyfrowych jest silne uzależnienie ich dokładności od napięcia zasilania. Elementy te nie posiadają w swojej strukturze wewnętrznej precyzyjnych układów napięcia odniesienia. Powoduje to problemy z dokładnością pomiaru napięcia, która zmienia się w zależności od warunków środowiskowych i stabilności napięcia zasilania. Dokładność pomiaru napięcia nie wpłynęła na stabilność układu, ale miała wpływ na różnice zmierzonych wartości skutecznych napięcia wyjściowego.

Opis wybranych elementów kluczujących

W badaniach eksperymentalnych przestawionego układu zasilacza z przetwornicą typu reverse buck rozpatrywano dwa różne tranzystory mocy oznaczone w pracy jako MOSFET Si (WML26N60C2) [12] oraz JFET GaN (IGT60R190D1S) [13]. Wspomniane tranzystory zostały wyprodukowane odpowiednio przez firmy CYGWayon oraz Infineon.

Oba tranzystory mocy charakteryzują się maksymalnym dopuszczalnym napięciem pomiędzy drenem a źródłem V_{DSS} równym 600 V. Wartość maksymalnego dopuszczalnego prądu drenu I_D dla obu tranzystorów jest podobna i wynosi odpowiednio 12 A dla tranzystora MOSFET Si oraz 12,5 A dla tranzystora JFET GaN. Maksymalne dopuszczalne napięcie pomiędzy bramką a źródłem V_{GS} obu tranzystorów jest różne. Dla tranzystora MOSFET Si jest równe ± 30 V, natomiast dla tranzystora JFET GaN jest równe -10 V. Rezystancja włączonego kanału $R_{\text{DS(on)}}$ ma mniejszą wartość dla tranzystora JFET GaN i wynosi 0,14 Ω . Ładunek potrzebny do przeładowania bramki Q_G tranzystora JFET GaN jest około 10 razy mniejszy niż dla tranzystora MOSFET Si i wynosi tylko 3,2 nC. Napięcie przewodzenia diody antyrównoległej V_D jest około dwa razy większe dla tranzystora JFET GaN i wynosi 2,5 V. Maksymalna temperatura złącza T_{jmax} jest w obu przypadkach taka sama i wynosi 150 $^{\circ}\text{C}$. Wartości parametrów eksploatacyjnych tranzystorów MOSFET Si oraz JFET GaN zostały zebrane w Tabeli 2.

Tabela 2. Wartości wybranych parametrów eksploatacyjnych tranzystorów MOSFET Si oraz JFET GaN [12, 13]

Parametr	MOSFET Si	JFET GaN
Maksymalne napięcie dren-źródło V_{DSS} [V]	600	600
Maksymalny prąd drenu I_D [A] @ $T_C = 100$ $^{\circ}\text{C}$	12	12,5
Maksymalne dopuszczalne napięcie bramka-źródło V_{GS} [V]	± 30	-10
Rezystancja włączonego kanału $R_{\text{DS(on)}}$ [Ω]	0,16	0,14
Ładunek bramki Q_G [nC]	34,5	3,2
Napięcie przewodzenia diody V_D [V]	1,2 @ $I_F = 8\text{A}$	2,5 @ $I_F = 5\text{A}$
Maksymalna dopuszczalna temperatura złącza T_{jmax} [$^{\circ}\text{C}$]	150	150

Układ pomiarowy

Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy układu pomiarowego do badania charakterystyk zasilacza z przetwornicą reverse buck. Podczas badań eksperymentalnych zmierzono zależności wybranych parametrów eksploatacyjnych w funkcji prądu wyjściowego I_{wy} przy zmianach wartości rezystancji obciążenia R_o w zakresie od 22 Ω do 2 k Ω . Zasilacz NDNTRP6010S pracował w układzie pomiarowym jako źródło zasilania U_{we} .



Rys. 2. Układ pomiarowy zasilacza z przetwornicą reverse buck

Do badań eksperymentalnych wybrano trzy wartości napięcia zasilania równe odpowiednio 42, 48 oraz 54 V. Za pomocą multimetru DM 3068 zmierzono wartości średnie prądu wyjściowego I_{wy} oraz napięcia wyjściowego U_{wy} i napięcia wejściowego U_{we} , a także wartość skuteczną prądu wejściowego I_{we} .

Wyniki pomiarów

Wykorzystując opisane w poprzednim rozdziale stanowisko pomiarowe zmierzono wybrane parametry eksploatacyjne badanej przetwornicy DC-DC w funkcji prądu wyjściowego I_{wy} . Na rysunkach od 3 do 5 punktami zaznaczono wyniki pomiarów sprawności energetycznej, natomiast linią przerywaną zaznaczono aproksymację tych wyników. Na poszczególnych rysunkach tranzystor WML26N60C2 był oznaczony jako MOSFET Si, natomiast tranzystor IGT60R190D1S jako JFET GaN.

Sprawność badanego zasilacza z przetwornicą reverse buck została wyznaczona ze wzoru:

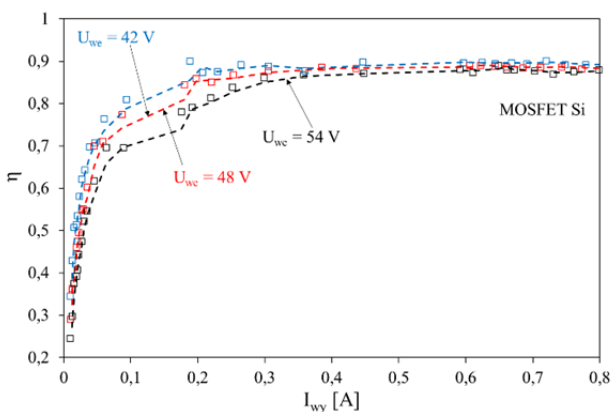
$$(1) \quad \eta = \frac{U_{wy} \cdot I_{wy}}{U_{we} \cdot I_{we}}$$

gdzie U_{wy} , I_{wy} to odpowiednio wartości napięcia wyjściowego oraz prądu wyjściowego, a U_{we} i I_{we} wartości napięcia wejściowego oraz prądu wejściowego.

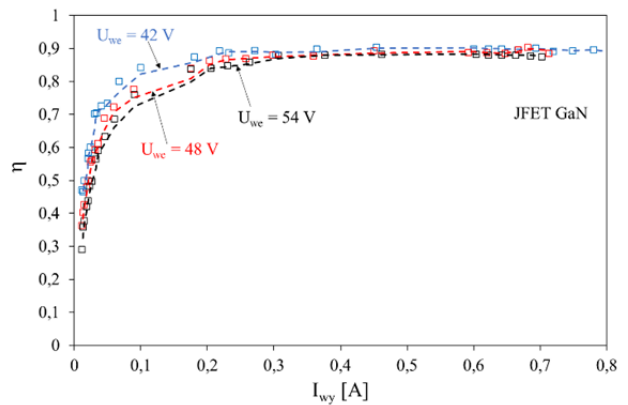
Na rysunkach 3 oraz 4 przedstawiono obliczone wartości sprawności badanego zasilacza w zależności od prądu wyjściowego I_{wy} dla trzech wybranych wartości napięcia zasilającego.

Analizując rysunki 3 oraz 4 można zauważyć, że największe wartości sprawności uzyskuje się dla napięcia zasilającego $U_{we} = 42$ V, a najmniejsze dla $U_{we} = 54$ V, bez względu na zastosowany tranzystor mocy. Zależność sprawności energetycznej η w całym zakresie zmian wartości tego prądu ma charakter funkcji rosnącej eksponencjalnie, a wartość sprawności nie przekracza 90 %.

Analizując rysunek 5 można zauważyć, że nieznacznie większe wartości sprawności uzyskuje się dla tranzystora mocy JFET GaN. Tak małe różnice, nieprzekraczające kilku procent są, spowodowane tym, że przetwornica po uruchomieniu, podczas pierwszej serii badań eksperymentalnych, pracowała z częstotliwością sygnału kluczującego równą 31,75 kHz.

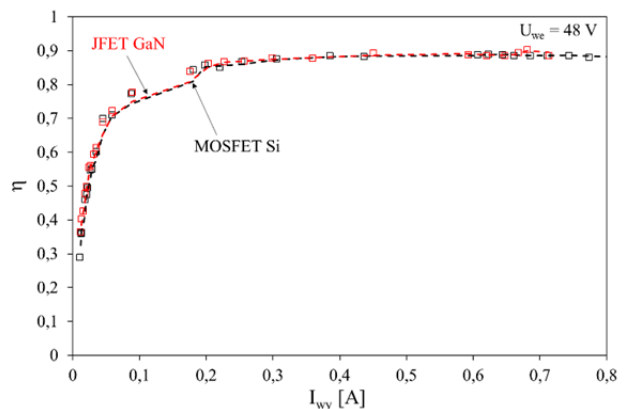


Rys. 3. Zależność sprawności energetycznej η od prądu wyjściowego I_{wy} dla badanego zasilacza z tranzystorem mocy MOSFET Si

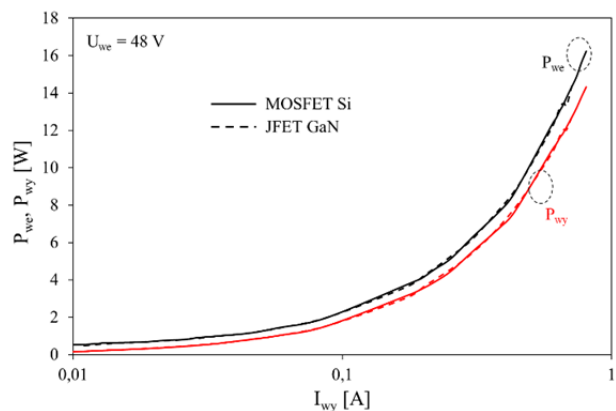


Rys. 4. Zależność sprawności energetycznej η od prądu wyjściowego I_{wy} dla badanego zasilacza z tranzystorem mocy JFET GaN

Na rysunku 5 porównano obliczone wartości sprawności energetycznej η w zależności od prądu wyjściowego I_{wy} dla dwóch różnych elementów kluczujących i dla napięcia zasilającego $U_{we} = 48$ V.



Rys. 5. Zależność sprawności energetycznej η od prądu wyjściowego I_{wy} dla badanej przetwornicy z tranzystorami mocy MOSFET Si oraz JFET GaN



Rys. 6. Zależność mocy wejściowej P_{we} i wyjściowej P_{wy} od prądu wyjściowego I_{wy} dla badanej przetwornicy z tranzystorami mocy MOSFET Si oraz JFET GaN

Na rysunku 6 przedstawiono obliczone wartości mocy wejściowej P_{we} i wyjściowej P_{wy} w zależności od wartości prądu wyjściowego I_{wy} dla ustalonej wartości napięcia zasilającego równej 48 V. Linią przerywaną zaznaczono wartości zmierzone dla tranzystora mocy JFET GaN, a linią ciągłą dla tranzystora mocy MOSFET Si. Moc wejściowa P_{we} jest iloczynem wartości napięcia wejściowego U_{we} oraz prądu wejściowego I_{we} , natomiast moc wyjściowa P_{wy} jest

iloczynem wartości napięcia wyjściowego U_{wy} oraz prądu wyjściowego I_{wy} .

Analizując rysunek 6 widać, że moc wejściowa P_{we} i wyjściowa P_{wy} są funkcją rosnącą prądu wyjściowego I_{wy} w całym zakresie zmian tego prądu. Przebiegi $P_{we}(I_{wy})$ oraz $P_{wy}(I_{wy})$ mogą być opisane funkcją eksponencjalną. Moc elektryczna nie zmienia się wraz ze zmianą technologii wykonania tranzystora mocy.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono krótki opis bloków funkcjonalnych oraz wyniki badań eksperymentalnych właściwości zasilacza z przetwornicą reverse buck. Przeanalizowano wpływ doboru tranzystora mocy na wybrane parametry zasilacza z tą przetwornicą.

Przeanalizowano również wpływ wartości napięcia zasilającego U_{we} badanej przetwornicy DC-DC na wartość uzyskiwanej sprawności energetycznej η badanej przetwornicy DC-DC. Zauważono, że największe wartości sprawności energetycznej η uzyskuje się dla napięcia zasilania $U_{we} = 42$ V, bez względu na zastosowany tranzystor mocy. Można również zauważyć brak wpływu tranzystora mocy na wartość η badanego zasilacza. Ten brak wpływu jest spowodowany niską wartością częstotliwości kluczowania, która podczas testów uruchomieniowych przetwornicy wynosiła 31,75 kHz. Przy takiej wartości częstotliwości kluczowania dominują straty statyczne związane z wartością rezystancji włączonego kanału tranzystora mocy. W rozważanym przypadku rezystancja ta dla obu tranzystorów mocy ma zbliżone wartości.

Wartość mocy elektrycznej wejściowej P_{we} i wyjściowej P_{wy} nie ulega zmianie wraz ze zmianą technologii wykonania tranzystora mocy, a zależności tych mocy są funkcjami rosnącymi eksponencjalnie. Podczas uruchamiania przetwornicy DC-DC zarejestrowano fluktuacje napięcia w całym zakresie zmian prądu wyjściowego I_{wy} . Najmniejsze wartości fluktuacji uzyskuje się dla tranzystora mocy JFET GaN i wynoszą one jedynie 0,71 V.

Układ badanego zasilacza z przetwornicą reverse buck zaprojektowano w celu zasilania modułów LED z magazynów energii elektrycznej o napięciu znamionowym 48 V. Kolejnym krokiem będą badania eksperymentalne dotyczące sterowania tranzystorów mocy z większą częstotliwością, która będzie równa około 1 MHz.

Wyniki badań eksperymentalnych mogą być wykorzystywane przez projektantów układów przetwarzania energii elektrycznej, a w szczególności przetwornic jednotranzystorowych wykorzystywanych do zasilania półprzewodnikowych źródeł światła z magazynów energii elektrycznej.

Autorzy: dr hab. inż. Przemysław Ptak, prof. UMG, prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81 - 87, 81-225 Gdynia, mgr inż. Dawid Klewer, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, E-mail: p.ptak@we.umg.edu.pl, k.gorecki@we.umg.edu.pl, dawidklewer@gmail.com

LITERATURA

- [1] Rashid M. H.: Power Electronics Handbook, 3rd edition, Elsevier, 2011.
- [2] Górecki K., Zarębski J.: The method of a fast electrothermal transient analysis of single-inductance DC-DC converters, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, No 9, 2012, pp. 4005-4012, doi: 10.1109/TPEL.2012.2188546.
- [3] Winder, S.: Power Supplies for LED Driving, 2nd ed.; Elsevier BV: Aalborg, Denmark, 2017.
- [4] Pollock A., Pollock H., Pollock C.: High efficiency LED power supply, IEEE Jour. of Emerg. and Selec. Top. in Pow. Elec., 3 (2015), n.3, 617-623.
- [5] Meneghini M., Meneghesso G., Zanoni E.: Power GaN Devices. Materials, Applications and Reliability, Springer, 2017.
- [6] Zarębski J., Górecki K., Posobkiewicz K.: Wpływ zastosowania elementów półprzewodnikowych z węgla krzemu na charakterystyki przetwornicy buck. Przegląd Elektrotechniczny, R. 86, Nr 11a, 2010, s. 229-231.
- [7] Wang B., Dong S., Jiang S., He C., Hu J., Ye H., Ding X.: A comparative study on the switching performance of GaN and Si power devices for bipolar complementary modulated converter legs. Energies, Vol. 12, 1146, 2019, doi: 10.3390/en12061146.
- [8] Nota katalogowa diody Schottky'ego ES3J: https://octopart.com/diode-general+instrument-6942612?gclid=Cj0KCQjwmtGjBhDhARIsAEqfDEe-vcaNoXjXpTykl-Dc2t6qTT Uegn LX16tk0auW4gTr2o0zpo0m0wY aAr mBE AL w_wcB, (dostępna online 29.05.2023 r.)
- [9] Nota katalogowa dławika COIL1016-0.56: <https://www.tme.eu/Document/aa6da82728e94d34587df85ab24b3b55/COIL1016-0.56.pdf> (dostęp online 2.06.2023 r.)
- [10] Nota katalogowa tranzystora typu JFET IGT60R190D1S: <https://www.digikey.fr/htmldatasheets/production/3446988/0/0/1/igt60r190d1s.html>, (dostęp online 29.05.2023 r.)
- [11] Lisowski J.: Podstawy Automatyki, wydanie pierwsze, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, 2015.
- [12] Nota katalogowa tranzystora typu MOSFET WML26N60C2: „<https://www.tme.eu/en/details/wml26n60c2-cyg/tht-n-channel-transistors/wayon/wml26n60c2/>”, (dostęp online 29.05.2023 r.)
- [13] Nota katalogowa modułu Arduino Nano v3: <https://www.microchip.com/en-us/tools/resources/configure/mplab-harmony>, (dostęp online 29.05.2023 r.)