

Emisja przewodzona na porcie wejściowym naziemnej jednostki zasilającej statki powietrzne w standardzie 28 V DC oraz 270 V DC

Streszczenie. W artykule przedstawiono badania konstruktorskie emisji przewodzonej zasilacza statków powietrznych zbudowanego z przekształtników energoelektronicznych AC/DC oraz DC/AC/DC z separacją transformatorową. Badana wersja zasilacza może być zasilana z dwóch standardów napięcia 400 V / 50 Hz albo 480 V / 60 Hz. Zasilacz na wyjściu wytwarza separowane napięcie 28 V DC oraz 270 V DC. Badania emisji przewodzonej wykonano na porcie zasilającym dla napięcia 400 V / 50 Hz w oparciu o procedurę CE102 normy MIL-STD-461G.

Abstract. The article presents conducted emission tests of an aircraft power supply unit built of AC/DC and DC/AC/DC power converters with transformer separation. The tested version of the power supply can be powered from two voltage standards: 400 V / 50 Hz or 480 V / 60 Hz. The power supply generates at the output a separated voltage of 28 V DC and 270 V DC. Conducted emission tests were performed on the power supply port for the voltage of 400 V / 50 Hz based on the CE102 procedure of the MIL-STD-461G standard. (**Conducted emission at the input port of the ground power supply unit for 28 V DC and 270 V DC aircrafts.**)

Słowa kluczowe: emisja przewodzona, zasilacz do obsługi naziemnej, przekształtnik z separacją transformatorową, kompatybilność elektromagnetyczna.

Keywords: conducted emission, ground power unit, converter with transformer separation, electromagnetic compatibility.

Wstęp

Umieszczenie oznaczenia CE (Conformité Européenne) na wyrobie przez producenta jest ostatnim etapem związanym z wystawieniem deklaracji WE (Wspólnota Europejska) potwierdzającej zgodność tego produktu z wymaganiami dyrektyw Unii europejskiej. Jedną z takich dyrektyw jest DYREKTYWA PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY 2014/30/UE z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do kompatybilności elektromagnetycznej, która dotyczy kompatybilności elektromagnetycznej (EMC – electromagnetic compatibility) [1].

Pomiar radioelektrycznych zaburzeń przewodzonych znanych powszechnie jako pomiar emisji przewodzonej jest jednym z podstawowych badań z zakresu EMC urządzeń elektrycznych i elektronicznych. Badanie te ma na celu zweryfikowanie czy poziom zakłóceń elektromagnetycznych wytwarzanych przez badane urządzenie (EUT – equipment under test) podłączone do sieci elektroenergetycznej jest poniżej dopuszczalnego limitu dzięki czemu ograniczy to zaburzanie pracy urządzeń pracujących w jego otoczeniu. Poziom tych zakłóceń oraz metodę badawczą określa norma przedmiotowa, która może obejmować konkretną grupę wyrobów (np. norma PN-EN 55032 dotyczy urządzeń multimedialnych) lub środowisko w którym dany wyrób docelowo ma się znajdować (np. norma PN-EN 61000-6-4 dotyczy środowiska przemysłowego). Metoda badawcza może być zawarta w odrębnej normie jak np. PN-EN 55016-2-1 albo znajdować się również w normie przedmiotowej jak w przypadku normy PN-EN 55032. Wymienione powyżej normy mają zastosowanie dla urządzeń cywilnych i są opracowywane przez Europejski Komitet Normalizacyjny Elektrotechniki (CENELEC). Urządzenia wojskowe podlegają innym normom, bądź rozporządzeniom ministerialnym danych krajów. Powszechnie stosowaną na świecie normą wojskową dotyczącą EMC jest MIL-STD-461G, która została opracowana przez Departament Obrony Stanów Zjednoczonych. Naziemna jednostka zasilająca statki powietrzne (GPU – ground power unit),

której dotyczy ten artykuł, zapewnia zasilanie niezbędne podczas rozruchu silników oraz do kalibracji systemów awionicznych, sprawdzenia stanu urządzeń pokładowych podczas postoju na lotnisku. Systemy zasilania prądem przemiennym wykorzystywane są głównie do zasilania cywilnych statków powietrznych [3, 4], zaś zasilanie prądem stałym najczęściej stosuje się w samolotach wojskowych [5]. Głównymi standardami napięć są 28 V DC oraz w przypadku nowoczesnych jednostek 270 V DC. Omawiana GPU wytwarza na swoim wyjściu oba napięcia. GPU poddana została badaniom konstruktorskim emisji przewodzonej na zaciskach zasilania 400 V / 50 Hz (możliwe jest również zasilanie GPU napięciem 480 V / 60 Hz, a w drugiej wersji z innym stopniem wejściowym z napięcia 200 V / 400 Hz) w oparciu o procedurę pomiarową CE102 normy MIL-STD-461G.

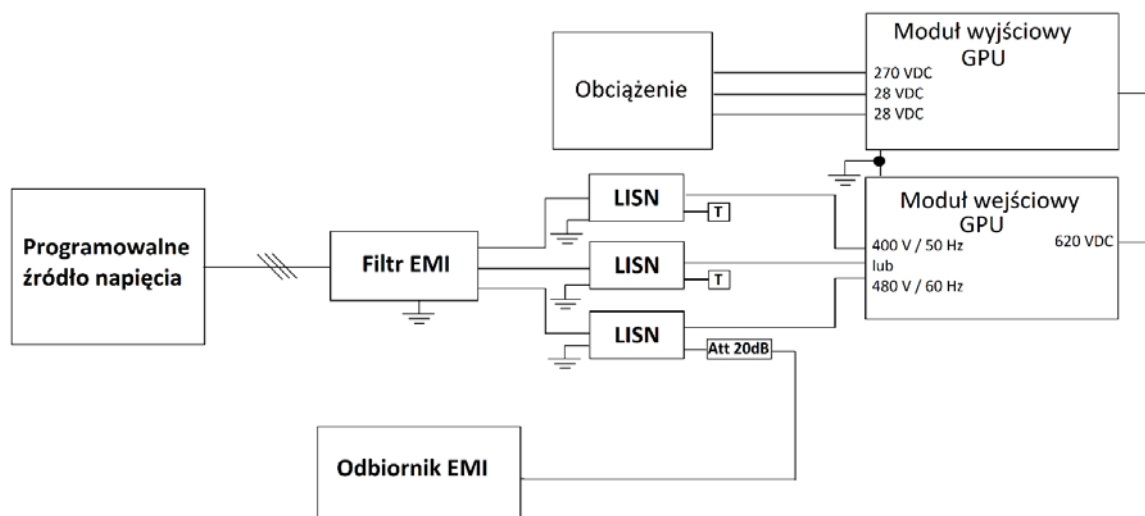
Stanowisko pomiarowe

Wybrana norma dość precyzyjnie określa sposób przygotowania stanowiska pomiarowego oraz wykonania badania emisji przewodzonej na wejściowych portach zasilających w zakresie częstotliwości od 10 kHz do 10 MHz (w przypadku standardu PN-EN 61000-6-4 oraz PN-EN 55032 pomiary wykonuje się w zakresie częstotliwości od 150 kHz do 30 MHz). Stanowisko pomiarowe musi znajdować się w pomieszczeniu ekranowanym absorberami, bądź płytami ferrytowymi z zachowaniem odpowiednich odległości od powierzchni pionowych. Jeżeli EUT nie jest przewidziane do montażu na podłodze powinno się je umieścić na stole 80 cm, na którym znajduje się niskoimpedancjnie uziemiona metalowa powierzchnia odniesienia (GRP – ground reference plane). EUT należy podłączyć do źródła zasilania przez sztuczną sieć zasilającą (AMN – artificial mains network), której celem jest zapewnienie znormalizowanej impedancji pomiędzy EUT a źródłem (skąd druga nazwa LISN – line impedance stabilization network), odizolowanie EUT od zaburzeń pochodzących ze źródła zasilania oraz dostarczenie zakłóceń wytwarzanych przez EUT do odbiornika pomiarowego (odbiornik EMI) poprzez

sprężenie pojemnościowe. Między wyjście radiowe a wejście odbiornika EMI umieszcza się tłumik 20 dB (wartość tego tłumienia musi być uwzględniona w wynikach), aby zabezpieczyć odbiornik przed przepięciami. LISN powinien mieć indukcyjność 50 μH , która odwzorowuje indukcyjność przewodu 50 m (przyjmuje się że 1 m przewodu umieszczonego na 5 cm izolacji nad GRP ma indukcyjność 1 μH). Norma jednak dopuszcza zastosowanie LISN o indukcyjności 5 μH i taki został wybrany do badań. Zarówno przewody zasilające oraz EUT należy umieścić na podstawie izolacyjnej o wysokości 5 cm. Schemat ogólny połączeń przedstawiony został na rysunku 1. Literą T oznaczono terminatory 50 Ω , które należy założyć na wyjście pomiarowe sztucznych sieci, które aktualnie nie są podłączone do odbiornika EMI. GPU zasilane jest z programowalnego źródła napięcia, które podłączone jest do LISN przez filtr EMI. W porównaniu do bezpośredniego zasilania napięciem sieciowym, takie

zasilanie zapewnia dużo lepszą powtarzalność pomiarów co jest jednym z podstawowych kryteriów przy tworzeniu stanowisk pomiarowych. Dzięki powtarzalności możemy w łatwy sposób odtworzyć setup i uzyskać zbliżone wyniki.

Przedstawione w normie limity emisji przewodzonej odnoszą się do wartości rejestrowanych przez detektor wartości szczytowych wyrażonych w dB μV . Detektor ten wykrywa wartość szczytową obwiedni modulacji w paśmie przepustowym odbiornika. Bazowy limit określony jest dla wartości skutecznej napięcia zasilającego EUT większej bądź równej 28 V (AC lub DC). Im wyższe napięcie tym, limit jest łagodniejszy i przykładowo dla napięć od 220 V do 270 V bazowego limit zwiększa się o 9 dB. W tabeli 1 przedstawiono przykładowe limity np. dla portu zasilającego o napięciu 230 V limit maleje liniowo z logarytmem częstotliwości od 103 dB μV do 66 dB μV w zakresie częstotliwości od 10 kHz do 500 kHz, a w zakresie częstotliwości od 0,5 MHz do 10 MHz wynosi 66 dB μV .



Rys. 1. Schemat ogólny stanowiska do pomiaru emisji przewodzonej na porcie zasilania AC naziemnej jednostki zasilającej

Tabela 1. Przykłady limitów emisji przewodzonej na portach zasilających

Zakres częstotliwości	Limit [dB μV]		
	$\geq 28 \text{ V}$	$\geq 115 \text{ V}$	$\geq 220 \text{ V}$
10 kHz ÷ 500 kHz	$94 \div 60^{1)}$	$100 \div 66^{1)}$	$103 \div 69^{1)}$
0,5 MHz ÷ 10 MHz	60	66	69

1) Poziom maleje liniowo z logarytmem częstotliwości

Warto wspomnieć, że oprócz detektorów szczytowych niektóre normy wymagają pomiarów detektorami quasi-szczytowymi czy detektorami wartości średniej. W takie detektory wyposażone są odbiorniki EMI, które najczęściej przystosowane są do pomiarów emisji przewodzonej oraz emisji promieniowanej. Odbiorniki EMI umożliwiają również nastawę szerokości pasma rozdzielczości 6 dB (RBW – resolution bandwidth), które w przypadku procedury CE102 powinna wynosić 1 kHz w zakresie częstotliwości od 10 kHz do 500 kHz, a w zakresie od 0,5 MHz do 10 MHz RBW powinno być równe 10 kHz.

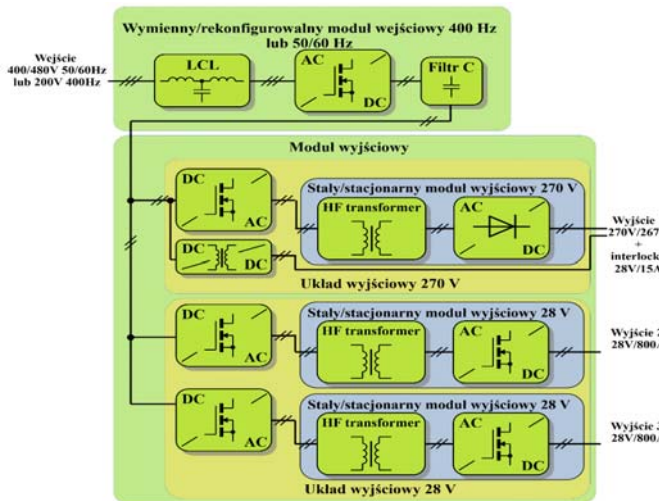
Proces walidacji stanowiska pomiarowego został również w normie szczegółowo przedstawiony. Generalnie polega on na wstrzykiwaniu znanego poziomu zaburzeń z generatora do LISN od strony EUT i obserwacja tego poziomu na odbiorniku pomiarowym. W ten sposób można skalibrować tor pomiarowy i w wynikach uwzględnić jego tłumienność. Oprócz tego również należy sprawdzić poziom tła (przy EUT wyłączonym i włączonym wyposażeniu pomocniczym), które powinno być co najmniej 6 dB pod limitem.

Norma MIL-STD-461 pierwszy raz ukazała się w 1967 r. i jest ciągle rozwijana. Aktualnie obowiązuje wersja MIL-STD-461G, która ukazała się w 2015 r. Najistotniejsze różnice pomiędzy poprzednią wersją przedstawione zostały w artykule [6]. W odniesieniu do procedury CE102 zmienia się proces kalibracji stanowiska.

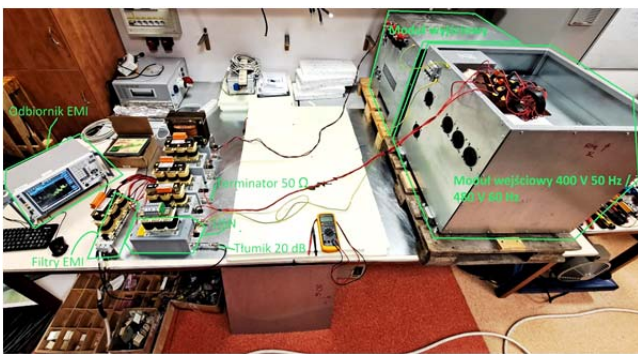
Budowa GPU

Zaproponowana topologia oraz metody sterowania GPU zostały szczegółowo omówione w [7]. Ogólną topologię GPU przedstawiono na rys. 2. Składa się ona z modułu wejściowego oraz wyjściowego. Moduł wejściowy jest przekształtnikiem AC/DC i jest modułem wymiennym. Jedna wersja umożliwia zasilanie jej napięciem 400 V 50 Hz oraz 480 V 60 Hz, druga wersja napięciem 200 V 400 Hz. Na wyjściu modułu wejściowego wytwarzane jest napięcie od 600 V do 800 V w zależności od napięcia zasilającego. Przekształtnik AC/DC jest również odpowiedzialny za kształtowanie prądów sieciowych tak aby uzyskać jak najniższy współczynnik THD i kompensować moc bierną.

Moduł wyjściowy jest wspólny dla obu wersji. Jest to przekształtnik DC/AC/DC z izolacją galwaniczną tzw. *phase-shifted full bridge (PSFB) converter*. Separację galwaniczną zapewniają transformatory w.cz., które pracuje przy częstotliwości około 40 kHz zarówno dla wyjść 28 V oraz 270 V



Rys. 2. Topologia części siłowej zasilacza GPU



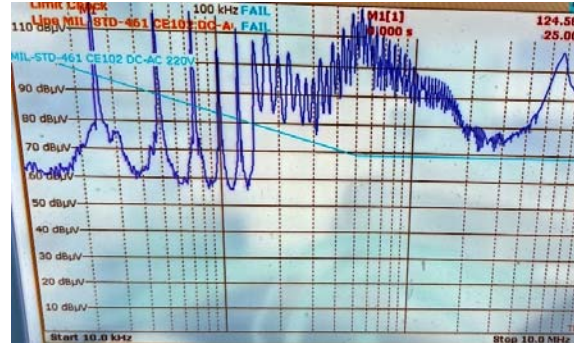
Rys. 3. Widok stanowiska do konstruktorskich badań emisji przewodzonej

Badania laboratoryjne

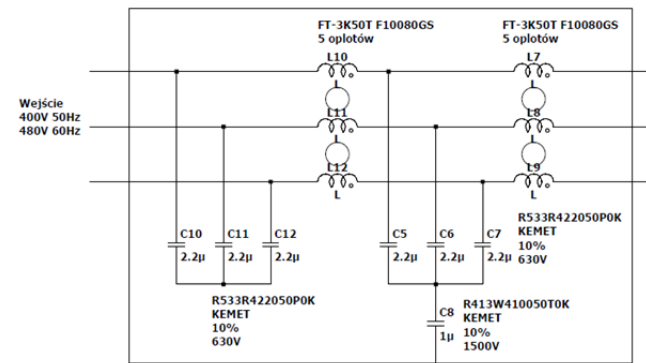
Opisane powyżej ogólne wymagania odnośnie stanowiska testowego według normy MIL-STD-461G są kosztowne do uzyskania przez firmy niedziałające komercyjnie w tej branży ze względu na koszty zakupu, utrzymania aparatury czy uzyskania akredytacji. Nie brakuje jednostek, które posiadają odpowiednią infrastrukturę i kwalifikacje. Jednak w zależności od posiadanej aparatury można wykonać wstępne testy konstruktorskie, które pozwolą poznać źródła zakłóceń oraz możliwości ich ograniczenia jeszcze przed testami w zewnętrznych jednostkach akredytowanych. Przykład uproszczonego stanowiska przedstawiono na rys. 3. na którym jako EUT znajduje się GPU z modułem wejściowym 400 V 50 Hz. Przekształtnik badano bez obciążenia przy załączonym wyjściu 270 V. Do pomiarów użyto odbiornika EMI ESRP3 oraz sztuczną sieć ESH3-Z6. Odbiornik bez opcji B-29 ma możliwość ustawienia RBW tylko na 200 Hz, 9 kHz, 120 kHz oraz 1 MHz dlatego w zakresie częstotliwości od 10 kHz do 500 kHz ustawiono RBW na 200 Hz, a od 500 kHz do 10 MHz RBW było równe 9 kHz. Wyniki pomiaru emisji przewodzonej na fazie L1 przedstawione zostały na rys. 4. Z uzyskanego pomiaru widać, że limit przekroczony jest prawie w całym paśmie pomiarowym, a w najgorszym przypadku przekroczenie wynosi około 40 dB μ V. Bardzo zbliżone wyniki uzyskano na pozostałych dwóch fazach.

W celu ograniczenia emisji wykonano liczne badania eksperymentalne z zastosowaniem różnych rdzeni ferrytowych, nanokrystalicznych oraz kondensatorów. W wyniku tych doświadczeń najlepsze rezultaty uzyskano dla konfiguracji filtra przedstawionej na rys. 5. Filtr ten składa się z dwóch stopni rdzeni nanokrystalicznych FT-3K50T

F10080GS nawiniętych w trybie common-mode (CM) (po 5 oplotów na fazę). W skład filtra wchodzi również dwa stopnie kondensatorów o pojemności 2,2 μ F klasy X2 oraz kondensator klasy Y2 o pojemności 1 μ F. Kondensator typu Y podłączono również pomiędzy punktem środkowym kondensatorów wchodzących w skład filtra wejściowego LCL przekształtnika AC/DC. W celu wstępnego doboru parametrów filtra wykonano badania symulacyjne w środowisku Simulink z uwzględnieniem sztucznych sieci.

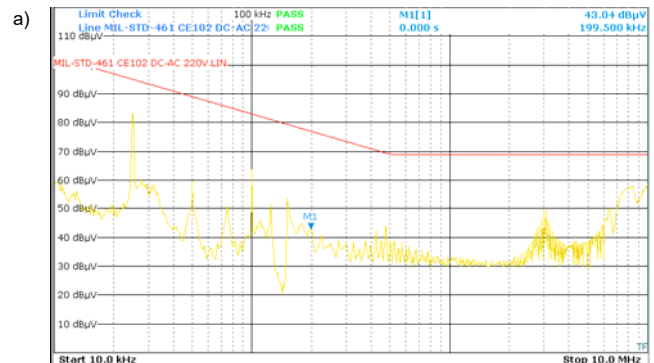


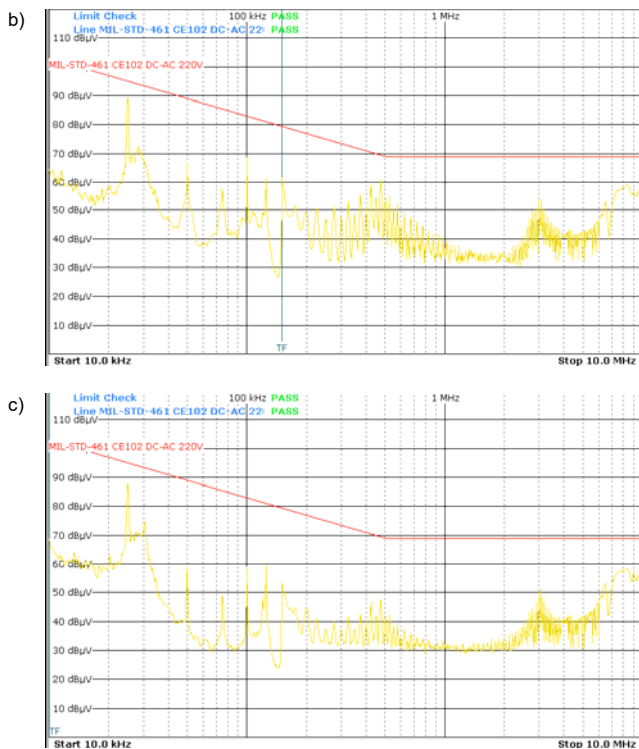
Rys. 4. Wynik pomiaru emisji przewodzonej na fazie L1 GPU (bez filtra EMI) zasilanego napięciem 400 V 50 Hz



Rys. 5. Schemat zastosowanego filtra EMI

Wyniki pomiaru emisji przewodzonej GPU w tym samym trybie pracy lecz z zaimplementowanym filtrem EMI dla każdej z faz przedstawiono na rys. 6. Na każdej fazie uzyskany został wynik pozytywny. W najgorszym przypadku tj. na częstotliwości około 25 kHz (jest to częstotliwość łączeń przekształtnika AC/DC modułu wejściowego) zapas do limitu wynosi około 7 dB μ V. Warto zwrócić uwagę, że dla niektórych częstotliwości emisja została obniżona nawet o około 60 dB μ V. Oprócz dodania samego filtra bardzo duży efekt dało uszczelnienie obudowy modułów oraz umieszczenie filtrów EMI w metalowej obudowie stanowiącej ekran części przekształtnika.





Rys. 6. Wyniki pomiaru emisji przewodzonej na fazie L1 (a), L2 (b) oraz L3 (c) GPU (z filtrem EMI) zasilanego napięciem 400 V 50 Hz

Podsumowanie

Pomiar emisji przewodzonej jest tylko jednym z badań kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń elektrycznych. Przejście tego badania z wynikiem pozytywnym jest często problematyczne i nie w każdym przypadku zastosowanie filtra EMI wystarczy. Trzeba wtedy szukać źródła emisji i je ograniczyć poprzez ekranowanie, dlatego warto się do badań końcowych wcześniej przygotować poprzez wykonanie badań konstruktorskich. Filtr EMI oraz odpowiednio ekranowanie dodatkowo zabezpiecza urządzenie przed zakłóceniami elektromagnetycznymi pochodzącymi z otoczenia, a nie tylko przed emisją zakłóceń pochodzących z EUT. W przypadku urządzeń wysokiej mocy takich jak testowana GPU (znamionowa moc to 78 kW, a w przeciążeniach ponad 150 kW), bardzo trudno jest znaleźć dostępne w większych ilościach filtry EMI. Zaprojektowanie takich filtrów również jest bardzo trudne. Duże przekroje przewodów (a przy wyższych prądach stosowanie szyn miedzianych) ograniczają możliwość nawinięcia ich na rdzenie, przez co trzeba stosować większą ilość rdzeni co z kolei zwiększa gabaryty i koszt urządzenia. Znalezienie optymalnego rozwiązania pod względem kosztu oraz tłumienności jest

niezwykle trudne i czasochłonne. Konstruktorskie pomiary emisji przewodzonej można wykonać nawet korzystając z analizatora widmowego, czy oscyloskopu posiadającego funkcje FFT.

Artykuł jest wynikiem prac realizowanych przez Wojskowe Centralne Biuro Konstrukcyjno-Technologiczne S.A. i Politechnikę Białostocką w ramach projektu NCBiR POIR.01.01.01-00-1440/20-00.

Autorzy: mgr inż. Krzysztof Nowaszewski, dr inż. Krzysztof Kulikowski, prof. dr hab. inż. Andrzej Sikorski, mgr inż. Mateusz Wasilewski, dr inż. Adam Kuźma, dr inż. Krzysztof Dmitruk, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Wiejska 45D, 15-351 Białystok,

E-mail: krzysztof.nowaszewski@pb.edu.pl, k.kulikowski@pb.edu.pl, a.sikorski@pb.edu.pl, m.wasilewski@pb.edu.pl, a.kuzma@pb.edu.pl, k.dmitruk@pb.edu.pl,

mgr inż. Hubert Jakubowski, Wojskowe Centralne Biuro Konstrukcyjno-Technologiczne S.A., ul. Radiowa 13, 01-485 Warszawa

E-mail: h.jakubowski@wcbkt.pl

LITERATURA

- [1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/30/UE z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do kompatybilności elektromagnetycznej
- [2] Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment, MIL-STD-461G, Dec. 10, 2015
- [3] Yang C.-W., Lu M.-Z., Liaw C.-M., *Development of an Aircraft Electric Power Architecture With Integrated Ground Power Unit*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, (2022), Vol. 58, , 3426-3446
- [4] Rivera M., Faundez D., Kolar J., Wheeler P., Riveros J. A., Toledo S., *An Integral Design of Ground Power Unit Supply for Aircraft Applications*, IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), (2018), 1-6
- [5] Hua L., Guo J., Jing X., Mi N., Chung R., Luo S., *Design considerations for secondary side synchronous rectifier MOSFETs in Phase Shifted Full Bridge Converter*, Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, (2013), 526-531
- [6] Chaluvadi M., Vincentraj G., George Thomas K., *An Insight into Mil-Std-461G: A Study Report*, IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCS), (2017)
- [7] Kulikowski K., Falkowski P., Sikorski A., Wasilewski M., Kuźma A., Dmitruk K., Godlewska A., Nowaszewski K., Jakubowski H., Stępień G., *Przekształtnik AC/DC/AC/DC do naziemnego zasilania statków powietrznych*, Przegląd Elektrotechniczny, 99 (2023), nr 5, 225-230