

1. Krzysztof KULIKOWSKI¹, 2. Piotr FALKOWSKI¹, 3. Andrzej SIKORSKI¹, 4. Mateusz WASILEWSKI¹,
5. Adam KUŻMA¹, 6. Krzysztof DMITRUK¹, 7. Agata GOGLEWSKA¹ 8. Krzysztof NOWASZEWSKI¹,
9. Hubert JAKUBOWSKI², 10. Grzegorz Stępień²

Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny (1), Wojskowe Centralne Biuro Konstrukcyjno-Technologiczne S.A. (2)
ORCID: 1. 0000-0002-6193-7660; 2. 0000-0001-9941-8834; 3. 0000-0002-7640-7830; 4. 0000-0001-5187-4072; 5. 0000-0002-2998-7385;
6. 0000-0001-5505-2826 7. 0000-0002-2266-054X; 8. 0000-0002-2390-4112

doi:10.15199/48.2023.05.38

Przekształtnik AC/DC/AC/DC do naziemnego zasilania statków powietrznych

Streszczenie. W artykule przedstawiono zasilacz statków powietrznych zbudowany z przekształtników energoelektronicznych AC/DC oraz DC/AC/DC z separacją transformatorową. Zasilacz może być zasilany z dwóch standardów napięcia 400V/50Hz oraz 200V/400Hz, a na wyjściu uzyskuje się separowane napięcia 2x28V DC. Przedstawiono badania laboratoryjne zasilacza obejmujące stany pracy statycznej i dynamicznej, a także THD prądów wejściowych i sprawność energetyczną urządzenia.

Abstract. The article presents an aircraft power supply made of AC / DC and DC / AC / DC power converters with transformer separation. The PSU can be powered from two voltage standards 400V / 50Hz and 200V / 400Hz, and the output has separate voltages of 2x28V DC. Laboratory tests of the power supply are presented, including static and dynamic operating states, as well as THD of input currents and device efficiency. (AC/DC/AC/DC converter power supply for aircraft).

Słowa kluczowe: Lotniskowy Zasilacz Energoelektroniczny (LZE), przekształtnik z separacją transformatorową, tranzystory SiC.
Keywords: ground power unit (GPU), converter with transformer separation, SiC transistors, More Electric Aircraft (MEA).

Wstęp

Statki powietrzne znajdujące się na lotnisku przed startem jak i po wylądowaniu wymagają wykonania obsługi naziemnej (*ground handling*) związanej z ich prawidłowym utrzymaniem. Zarówno w przypadku cywilnych jak i wojskowych statków powietrznych obsługa naziemna jest jedną z najbardziej istotnych czynności, które wykonuje się w porcie lotniczym. Jednym z najważniejszych urządzeń używanych podczas *ground handling* jest naziemny układ zasilania (*ground power unit* GPU). Podczas postoju na lotnisku energia elektryczna dostarczana przez GPU jest wykorzystywana do zasilania urządzeń pokładowych. Zasilanie niezbędne jest między innymi do kalibracji systemów awionicznych, sprawdzenia stanu urządzeń pokładowych oraz przy rozruchu silników statku powietrznego. Do obsługi naziemnej zdecydowanie bardziej preferowane jest używanie GPU, a nie dodatkowego generatora zainstalowanego na statku powietrznym (*auxiliary power unit* APU). Jest to zdecydowanie tańsze, ponieważ GPU nie wykorzystuje paliwa lotniczego oraz generuje mniej hałasu i zanieczyszczeń. Ponadto każde urządzenie zainstalowane na statku powietrznym ma ściśle określone czasy wykonywania kompleksowej kontroli stanu technicznego oraz ich ilość do całkowitej wymiany na nowe. Zatem częstsze przeglądy APU generują znacznie większe koszty niż obsługa naziemnych GPU.

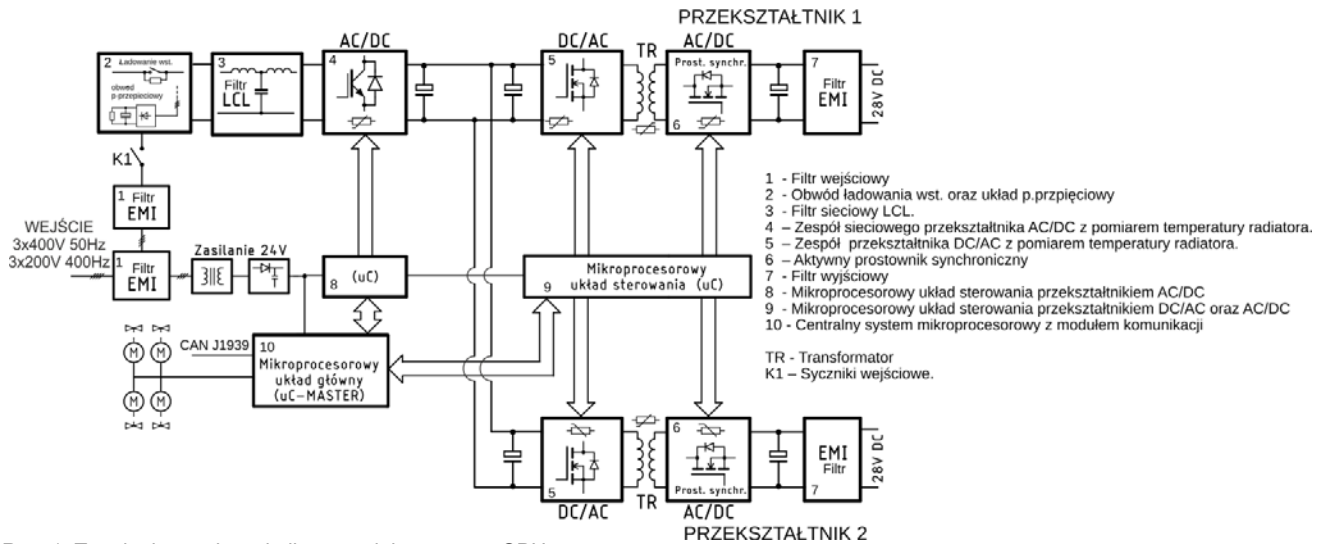
Zgodnie z ideą *More Electric Aircraft* (MEA) zawansowanie urządzeń elektrycznych i elektronicznych w tym również systemów awionicznych zainstalowanych na pokładzie współczesnego statku powietrznego wzrasta [1]. Jakość energii elektrycznej generowanej przez GPU ma bezpośredni wpływ między innymi na kalibrację systemów awionicznych statku powietrznego podczas przygotowania do lotu, co bezpośrednio przekłada się na bezpieczeństwo operacji powietrznych [2]. W związku z tym dostarczanie energii elektrycznej o odpowiedniej jakości, określonej stosownymi normami i regulacjami [3], jest bardzo istotne. W obecnie użytkowanych statkach powietrznych wykorzystywane są dwa główne standardy zasilania z poziomu GPU [4, 5, 6.]. Małe i średnie statki powietrzne używają napięcia stałego 28 V DC, natomiast duże statki powietrzne wykorzystują 3-fazowe napięcie przewodowe 200 V/400 Hz lub najnowsze konstrukcje – 270 V DC.

Najważniejszymi wymaganiami stawianymi nowoczesnym GPU z wyjściowym napięciem 28 V DC są przede wszystkim:

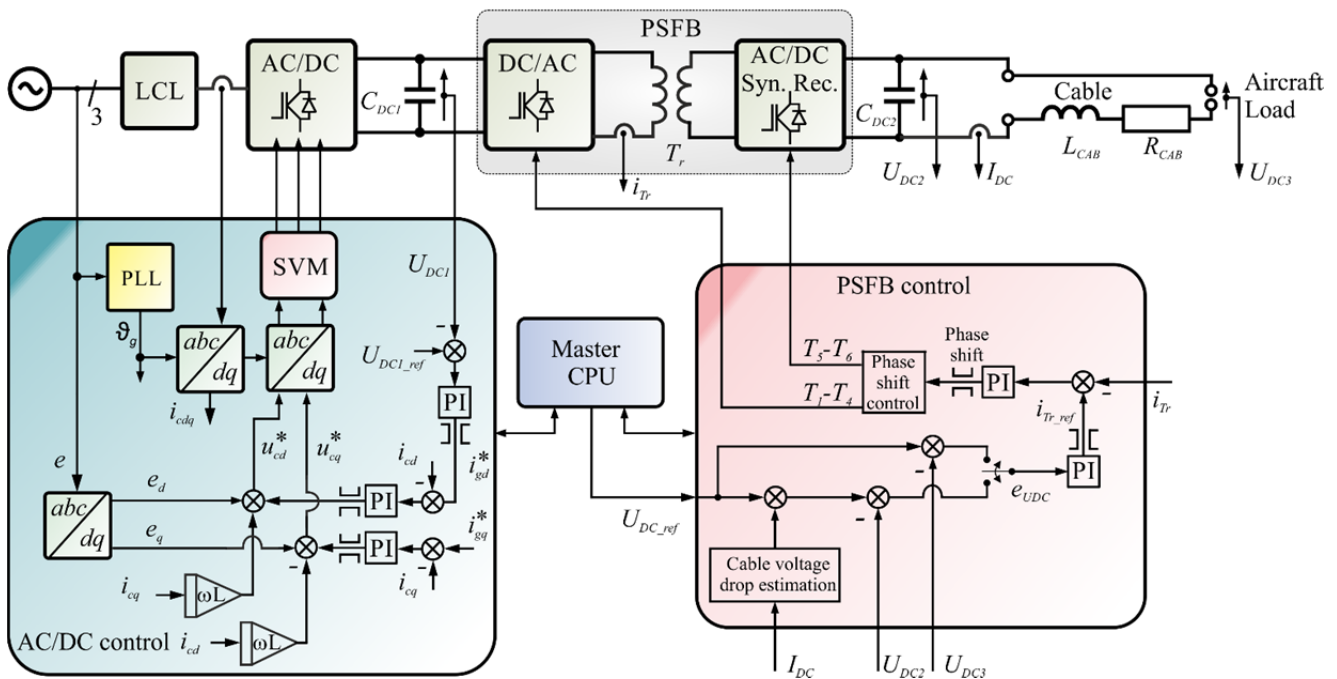
- zapewnienie wysokiej jakości napięcia 28 V niezależnie od obciążenia (do wartości znamionowej),
- precyzyjna kontrola prądu wyjściowego (ograniczenie do zadanej wartości),
- odporność na duże przeciążenia,
- odporność na skokowe zmiany obciążenia,
- duży współczynnik mocy pobieranej z sieci przemysłowej ze względu na minimalizację poboru mocy biernej,
- niskie THD prądów wejściowych, aby zminimalizować negatywny wpływ GPU na przemysłową sieć zasilającą,
- zachowanie izolacji galwanicznej statku powietrznego od zasilającej sieci przemysłowej
- wysoki poziom zagęszczenia energii w celu minimalizacji ciężaru i rozmiaru i kosztu urządzenia.

Budowa i sterowanie zaproponowanego układu GPU

Głównym zadaniem GPU jest przetworzenie zasilającego napięcia przemiennego na napięcie stałe o wartości 28 V DC z zachowaniem izolacji galwanicznej. Odpowiadając na aktualne wymagania stawiane nowoczesnym GPU zaprojektowano dwie wersje układów o tej samej topologii różniące się napięciem zasilania. Jedna wersja zasilana jest z trójfazowej sieci prądu przemiennego o parametrach napięcia międzyfazowego 400 V/50 Hz, druga zasilana z sieci 200 V/400 Hz. Układy te różnią się parametrami części bloków, ale struktura części silnopiętowej (rys. 1) i sterującej jest ta sama. Schemat blokowy GPU przedstawiony został na rysunku 1. Charakterystyczną cechą zaprojektowanego urządzenia jest to, że składa się z dwóch niezależnych i izolowanych względem siebie bloków wyjściowych o napięciu wyjściowym 28 VDC i wydajności prądowej równej 800 A. Bloki te mogą pracować niezależnie, szeregowo lub równolegle. Każdy z bloków zasilany jest z sieci prądu przemiennego i posiada niezależne filtry EMI ograniczające zakłócenia przewodzone. Ze względu na wymaganą przez użytkowników GPU niską wartość współczynnika THD prądu sieciowego oraz wysoką wartość współczynnika mocy zamiast wymienionych we wstępie prostowników diodowych, bądź SCR, zastosowano przekształtnik AC/DC.



Rys. 1. Topologia przekształtnika zaprojektowanego GPU



Rys. 2. Schemat sterowanie jednym torem przekształtnika GPU

W projekcie wykorzystano dwupoziomowy przekształtnik AC/DC zbudowany z tranzystorów SiC. Oprócz wymienionych zalet układ ten charakteryzuje się małymi tętnieniami napięcia na szynie DC [1]. Nie mniej ważną zaletą jest możliwość utrzymywania zadanej wartości napięcia na szynie DC pomimo występowania zakłóceń w napięciu sieci np. zapadów i niesymetrii napięcia [2]. To z kolei znacznie zwiększa stabilność zasilania kolejnych przekształtników przetwarzających napięcie. W celu zmniejszenia gabarytów i kosztów przekształtnik AC/DC połączony został z siecią za pośrednictwem filtra LCL. Zaletą filtra LCL w porównaniu do konwencjonalnego filtra L jest wysoka wartość tłumienia częstotliwości łączy.

W dalszej kolejności napięcie na szynie DC przekształtnika AC/DC zasila izolowany przekształtnik DC/AC/DC wykonany jako *Phase-Shifted Full Bridge (PSFB) converter* [7]. Układ ten składa się z mostkowego przekształtnika DC/AC, transformatora wysoko-częstotliwościowego obniżającego napięcie i zapewniającego izolację galwaniczną T_r oraz prostownika synchronicznego (przekształtnik AC/DC). Przekształtnik

PSFB był zaprojektowany w sposób zapewniający wysoką niezawodność pracy oraz wysoką sprawność przekształcania energii. W tym celu przekształtnik DC/AC zbudowano z tranzystorów z węglika krzemu SiC, co pozwoliło również na pracę z wyższymi częstotliwościami łączy (40 kHz) w odniesieniu do układów wykorzystujących tranzystory IGBT. Wyższa częstotliwość pracy przekształtnika umożliwiła ograniczenie gabarytów transformatora. Transformator wykonany w tej technologii pozwala na znaczące ograniczenie długości wyprowadzeń, co jest szczególnie istotne po stronie niskiego napięcia. Prostownik synchroniczny składa się z kilkunastu tranzystorów typu MOSFET połączonych równolegle załączanych w czasie przewodzenia diod prostowniczych. Ze względu na to, że spadek napięcia przewodzącej diody przy prądach znamionowych jest znacznie większy niż spadek napięcia przewodzącego tranzystora, takie rozwiązanie znacząco ogranicza straty przewodzenia. Cały układ wysokoczęstotliwościowy, a zwłaszcza część niskonapięciową/wysokoprądową zaprojektowano pod kątem uzyskania jak najmniejszej indukcyjności oraz

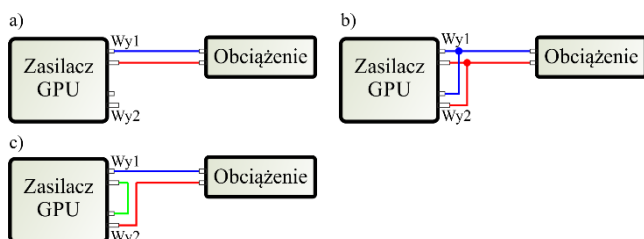
rezystancji przewodów i szyn. Przy tym szczególnie zwrócono uwagę na odcinek między transformatorem, a prostownikiem synchronicznym. Pozwoliło to uzyskać wysoką sprawność energetyczną, ograniczyć czasy narastania prądu w prostownikach synchronicznych, równomierność obciążenia tranzystorów oraz zmniejszać emisję zakłóceń. Wysoka częstotliwość przekształcania energii pozwoliła także na ograniczenie gabarytów filtrów wyjściowych.

Każdy z przekształtników AC/DC oraz PSFB posiada indywidualną część sterującą z odpowiednim opomiarowaniem oraz modułem komunikacji. Za nadzorowanie pracy układu GPU odpowiada blok „ μ C Master”. Komunikacja pomiędzy podrzędnymi procesorami odbywa się za pomocą magistrali CAN.

Zasada działania i sterowania jednego toru GPU przedstawiono na rysunku 2. Zasilające napięcie przemienne jest prostowane przez przekształtnik AC/DC. Przekształtnik ten utrzymuje na wyjściu zadaną wartość napięcia stałego U_{DC1} na poziomie (600-650V) kilkuset woltów, pobierając przy tym z sieci sinusoidalny prąd współfazowy z napięciem sieci. Następnie napięcie to musi być obniżone do wymaganego poziomu 28 V DC. W tym celu użyto do tego przekształtnik PSFBz izolacją galwaniczną wykorzystując transformator wysokoczęstotliwościowy Tr. Napięcie po stronie wtórnej transformatora prostowane jest przez prostownik synchroniczny (przekształtnik AC/DC). Układ sterowania przekształtnika PSFB, aby utrzymać zadaną wartość wyjściowego napięcia stałego, reguluje wartość prądu zadanego strony pierwotnej transformatora Tr.

GPU może pracować w 3 następujących trybach pracy.

- K1. Praca niezależna, w której każde z wyjść może mieć zadawane napięcie niezależnie, regulatory napięcia pracują niezależnie, długotrwały prąd wyjściowy każdego z obu wyjść wynosi 800 A, napięcie znamionowe wynosi 28V, a maksymalny prąd wyjściowy 2500A (w czasie 4s). Ten tryb pracy został przewidziany w celu umożliwienia jednoczesnego wykonywania obsługi naziemnej dwóch statków powietrznych (para dyżurna).
- K2. Praca równoległa, w której długotrwały prąd wyjściowy wynosi 1600 A, napięcie znamionowe - 28V, a maksymalny prąd wyjściowy - 5000A (w czasie 4s), Regulatory napięć pracują w trybie umożliwiającym równomierne obciążenie obu wyjść zasilacza.
- K3. Praca szeregową, przewidziana z myślą o statkach powietrznych wymagających zasilania ze źródła o napięciu 56 V DC. W tym trybie pracy długotrwały prąd wyjściowy wynosi 800 A, napięcie znamionowe - 56V, a maksymalny prąd wyjściowy 2500A (w czasie 4s);



Rys. 3. Schematy połączeń układów w konfiguracjach: K1 (a), K2 (b), K3 (c).

Nadrzędną pętlą regulacji algorytmu sterowania przekształtnika AC/DC jest utrzymywanie zdanego napięcia U_{DC1} . Na tej podstawie obliczany jest zadany prąd sieci i_{gdq}^* . Jak wspomniano wyżej jako obwód sprzęgający przekształtnik AC/DC z siecią wykorzystano filtr LCL. Wadą

tego typu rozwiązania jest jednak występowanie częstotliwości rezonansowej. Przy stosunkowo dużych odstępach pomiędzy częstotliwością sieci, częstotliwością rezonansową i częstotliwością modulacji SVM, które dla przekształtnika AC/DC 400V/50 Hz wynoszą odpowiednio 50 Hz/2,8 kHz/25 kHz, a dla przekształtnika 200V/400Hz odpowiednio 400 Hz/4,1 kHz/25 kHz, wystarczające tłumienie zapewniają straty dławików i rezystancja $0,1 \Omega$ podłączona szeregowo do kondensatora filtra. Sterowanie przekształtnika AC/DC zrealizowano w formie VOC (*voltage oriented control*) z modulatorem SVM. Zadany wektor prądu sieci i_{gdq}^* regulowany jest w dwóch torach regulacji PI wirującego z pulsacją synchroniczną sieci układu współrzędnych dq. Wejściowy sygnał modulatora u_{gdq}^* jest sygnałem z regulatora prądów uzupełnionym o sygnały kompensujące napięcie sieci e_{dq} i spadek napięcia na indukcyjnościach filtra LCL.

Nadrzędną pętlą regulacji przekształtnika PSFB jest regulator napięcia U_{DC3} . W zależności od trybu pracy i konfiguracji wyjść układ sterowania wykorzystuje sprzężenie zwrotne od napięcia U_{DC3} bądź od U_{DC2} wraz z napięciem kompensującym spadek napięcia na rezystancji kabla proporcjonalny do prądu I_{DC} . Dla połączeń podstawowych, czyli pracy niezależnej oraz pracy równoległej napięciowe sprzężenie zwrotne pochodzi od napięcia U_{DC3} mierzonego na końcu przewodu wydawczego. Pozwala to na uzyskanie dużej dynamiki regulacji oraz utrzymanie wartości zadanych napięć niezależnie od zmian rezystancji przewodu wydawczego. Temperatura przewodu wydawczego podczas obsługi może wzrosnąć nawet o 60°C , co wpływa na wzrost rezystancji przewodu. Sprzężenie zwrotne od napięcia U_{DC2} jest wykorzystywane w trybie pracy szeregowej. Pętlą podrzędną regulatora napięcia jest regulator prądu transformatora i_{tr} , charakteryzujący się znacznie większą dynamiką niż regulator napięcia. Wartość wyjściowa regulatora prądu i_{tr} wpływa na przesunięcie fazowe między gałęziami przekształtnika DC/AC [7].

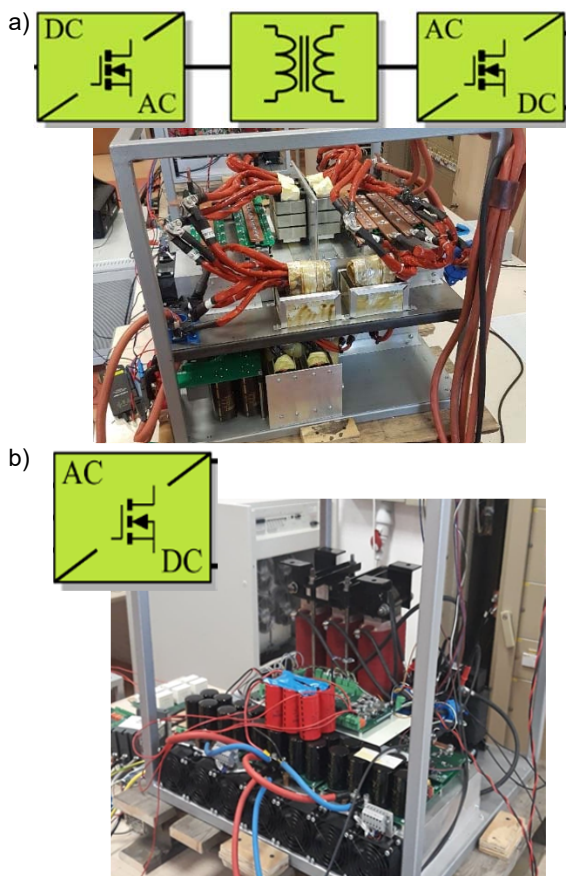
Odpowiednio dobrane nastawy regulatorów przekształtnika PSFB oraz praca przy dużych częstotliwościach łączy i próbkowania pozwoliła na stworzenie układu o dużej dynamice, zapewniającego znacznie wyższe parametry niż narzucone przez normę ISO 6858. Czasy przejściowe w zaprojektowanym układzie są o ponad rząd wielkości krótsze niż przewiduje norma.

Tranzystory prostownika synchronicznego AC/DC są załączane w chwili przewodzenia diod, gdy napięcie dren źródła tranzystora jest niewielkie. Zapewnia to, że starty łączeniowe tranzystorów MOSFET są pomijalnie małe w stosunku do start diod. Wstępne badania przeprowadzone na etapie projektowania układu wykazały, że użycie prostownika synchronicznego pozwala na podwyższenie sprawności nawet o 2 punkty procentowe w odniesieniu do zastosowania diod prostowniczych. Łączenie równoległe wielu tranzystorów wymagało zaprojektowania układu w sposób zapewniający jak największą równomierność wartości rezystancji oraz indukcyjności przewodów prowadzących do każdego z tranzystorów. Specjalny projekt szyn i rozmieszczenia poszczególnych elementów prostownika synchronicznego pozwolił na uzyskanie dużej równomierności rozkładu prądów poszczególnych tranzystorów. Dwa niezależne separowane galwanicznie wyjścia pozwalają na elastyczną konfigurację układu.

Badania laboratoryjne

Badaniom poddano dwa zasilacze lotniskowe, jeden zasilany z sieci przemysłowej 50Hz/400V (rys. 4), drugi zasilany z generatora prądotwórczego 200 V/400Hz (napędzanego silnikiem diesla) wchodzącego w skład Lotniskowego Urzędu Zasilania Elektroenergetycznego

Samolotów LUZES V/D seria V. Zasilacze obciążano urządzeniami obciążającymi - pomiarowym LUK-4 oraz LUK-5 umożliwiającym pracę przy prądach do 2.5 kA. Niektóre badania wymagały użycia dwóch równolegle połączonych urządzeń obciążających - pomiarowych.



Rys. 4. Zasilacz lotniskowy: przekształtnik DC/AC/DC z separacją transformatorową (a) oraz przekształtnik AC/DC (b) zasilany napięciem 400 V/50 Hz

W stanach ustalonych dokonywano pomiarów:

- wartości tętnienia napięcia wyjściowego pik-pik V_{pp} dla 0, 50% oraz 100% wartości obciążenia znamionowego;
- wartości napięcia wyjściowego V_{out} dla 0, 100%, 200% oraz 312% wartości obciążenia znamionowego;
- zawartości wyższych harmonicznych THDi dla 100% wartości obciążenia znamionowego;
- współczynnika mocy PF dla 50% oraz 100% wartości obciążenia znamionowego;
- sprawności dla obciążenia znamionowego.

Wyniki pomiarów w stanach ustalonych zostały przedstawione w Tabeli 1.

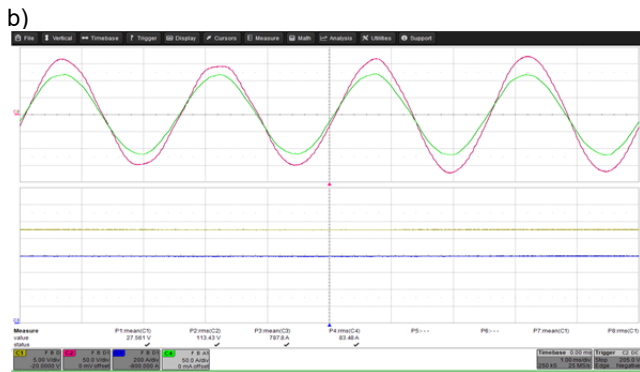
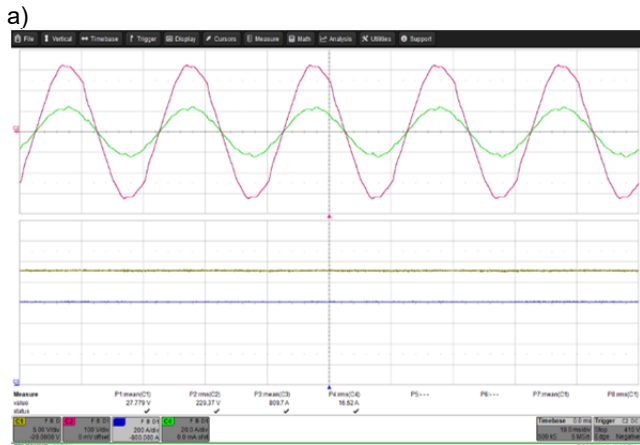
Tabela 1. Wyniki badań GPU

Obciążenie [%]	V_{pp} [V]			AC/DC THDi [%]	PF [-]	η [%]
	0	50	100	100	100	100
(K1) zasilanie 400Hz GPU	0,2	0,2	0,2	3,2	0,99	91,9
(K1) zasilanie 50Hz	0,1	0,2	0,2	2,4	0,99	95,1

Badania wykazały, że najwyższe tętnienia napięcia V_{pp} po stronie 28V DC dla obu badanych GPU wstępowały przy pełnym obciążeniu. Ich wartości były poniżej 1% w odniesieniu do wartości napięcia wyjściowego. Można zauważyć niewielką ustępliwość napięcia wyjściowego zasilaczy. Ustępliwość napięcia wyjściowego zasilaczy jest wprowadzona w celu zwiększenia równomierności obciążenia w przypadku połączeń równoległych. Powyżej obciążenia znamionowego ustępliwość napięcia wyjściowego zasilaczy znacząco wzrasta i jest nieliniowa. Zabieg ten ma na celu ograniczenie mocy wyjściowej zasilacza do wartości bezpiecznych przy jednoczesnym zapewnieniu spełnienia wymogów określonych w normie ISO 6858. Zasilacze charakteryzują się małymi wartościami współczynnika odkształceń prądu wyjściowego THD. W przypadku GPU zasilanego z sieci 400 V/50 Hz wartość THD prądu sieci dla konfiguracji K1 tj. pracy niezależnej jednego wyjścia zasilacza przy pełnym obciążeniu wynosi 2,4%. W przypadku zasilacza zasilanego z sieci 200 V/400 Hz współczynnik THD prądu sieci wzrasta do 3,2%. Wynika to z zastosowania tej samej częstotliwości modulacji, która jest znacznie bliższa częstotliwości pierwszej harmonicznej (400 Hz) w przypadku przekształtnika zasilanego napięciem 200V/400Hz. Ponadto należy zauważyć, że znamionowe obciążenie przekształtnika AC/DC jednym wyjściem (tryb K1) stanowi jego obciążenie w 50%. Oznacza to, że GPU (który posiada 2 wyjścia 28 V) przy pracy w trybie K2 lub K3 (obciążenie 2 wyjść) można osiągnąć znacznie niższe wartości współczynników THD. Ponadto w przekształtniku AC/DC 200V/400Hz użyto dławików o relatywnie mniejszej indukcyjności w celu zminimalizowania strat mocy. Oba zasilacze GPU pracują z dużym współczynnikiem mocy PF równym 0,99 przy obciążeniu znamionowym. Oba zasilacze wykazywały się wysoką sprawnością, która dla w zależności od konfiguracji zmieniała się w granicach od 91,4% (zasilacz 200V/400Hz) do 95,1% (zasilacz 400V/50Hz). Niższa sprawność energetyczna wynika z większych strat zwłaszcza w dławikach wejściowych przekształtnika AC/DC. Poszukiwania optimum sprawności w części przekształtnika AC/DC, w określonej konfiguracji, wynika między innymi z poszukiwania optymalnej częstotliwości modulacji tego przekształtnika. Upraszczając, wzrost częstotliwości modulacji prowadzi do zmniejszenia strat w dławikach filtra wejściowego i wzrostu strat w tranzystorach przekształtnika.

Na kolejnych rysunkach przedstawiono oscylogramy napięć i prądów w stanie statycznym i dynamicznym obu zasilaczy (400V/50Hz, 200V/400Hz). Na rysunek 5 można zauważyć, że zasilacze pobierają z sieci prąd o kształcie bliskim sinusoidalnemu. Można zauważyć, że napięcie zasilające 50 Hz posiadało widoczne odkształcenie (THD = 2,4%) a przy zasilaniu z generatora 400 Hz można zauważyć wahania amplitudy napięcia. Obserwowane zakłócenia napięć zasilających w obu przypadkach nie wpływają na jakość prądu wyjściowego GPU.

Badania w stanach przejściowych wykazały bardzo dobre właściwości regulacyjne zastosowanych metod sterowania. Przy skokach obciążenia z 3% do 40% oraz z 40% do 3% czas uzyskania wartości określonych w normie ISO 6858 jako stan ustalony (napięcie między 26 V, a 29 V) powinien nastąpić najpóźniej po 200ms. W przypadku badanego urządzenia czas ten był krótszy od 1 ms, czyli ponad 200 razy krótszy niż przewiduje norma. Oznacza to, że układ sterowania pracuje na tyle szybko, że po przejściu procesów komutacyjnych układ sterowania w bardzo krótkim czasie powraca do stanu ustalonego.



Rys. 5. Przebiegi prądu i napięcia wejściowego jednej fazy (odpowiednio kanał C2, C4) oraz prądu i napięcia wyjściowego (odpowiednio kanał C1, C3) podczas stanu ustalonego oraz przy konfiguracji K3 oraz obciążeniu znamionowym dla GPU zasilanego z napięcia 400 V/50 Hz (a) oraz z napięcia 200 V/400 Hz (b).

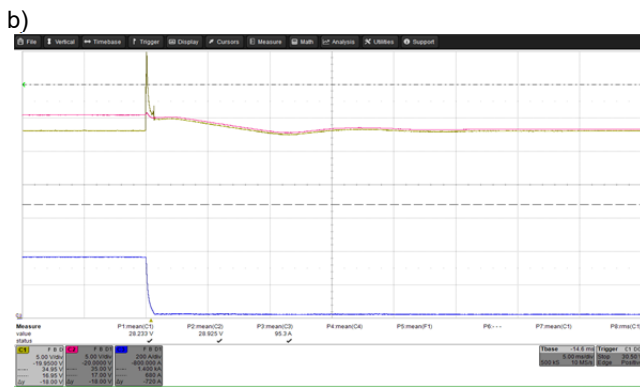
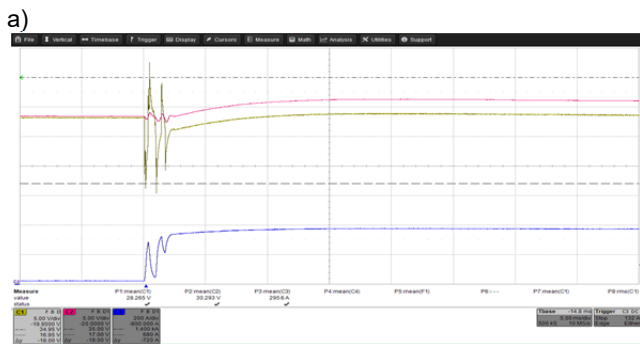


Fig. 6. Przebiegi napięcia wyjściowego na zaciskach przekształtnika (fioletowy) oraz na końcu przewodu (żółty) podczas skokowej zmiany obciążenia z 3% do 40% (a) oraz z 40% do 3% (b) obciążenia znamionowego dla przekształtnika zasilanego z napięcia 400 V/50 Hz i konfiguracji K1.

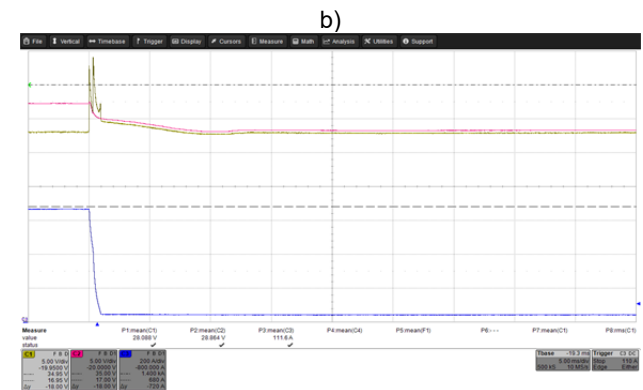
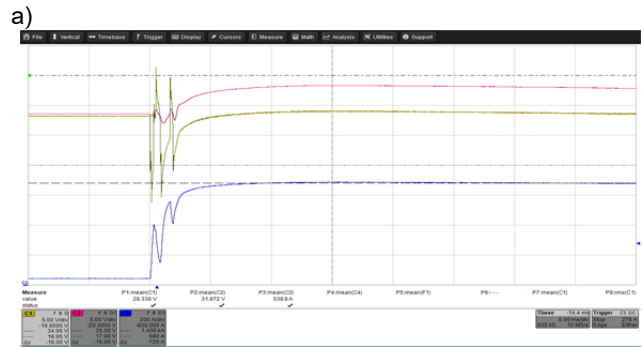


Fig. 7. Przebiegi napięcia wyjściowego na końcu przewodu (żółty) podczas skokowej zmiany obciążenia z 3% do 40% (lewa) oraz z 40% do 3% (prawa) obciążenia znamionowego dla przekształtnika zasilanego z napięcia 400 V/50 Hz i konfiguracji K2.

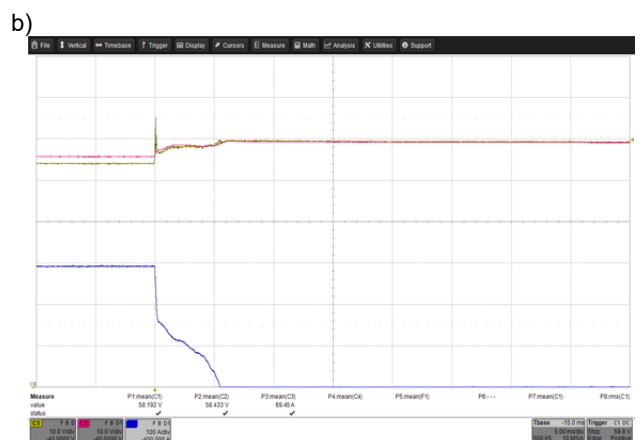
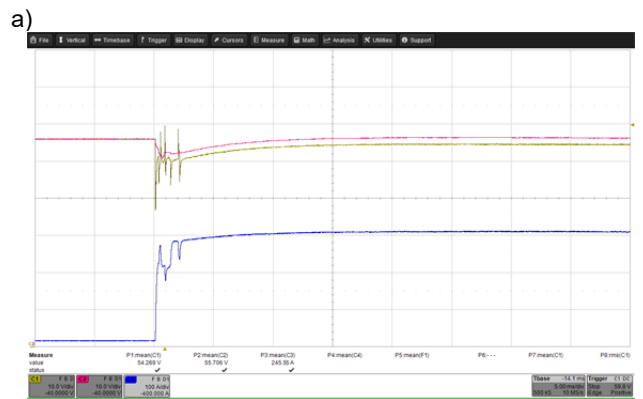


Fig. 8. Przebiegi napięcia wyjściowego na końcu przewodu (żółty) podczas skokowej zmiany obciążenia z 3% do 40% (a) oraz z 40% do 0% (b) obciążenia znamionowego dla przekształtnika zasilanego z napięcia 400 V/50 Hz i konfiguracji K3.

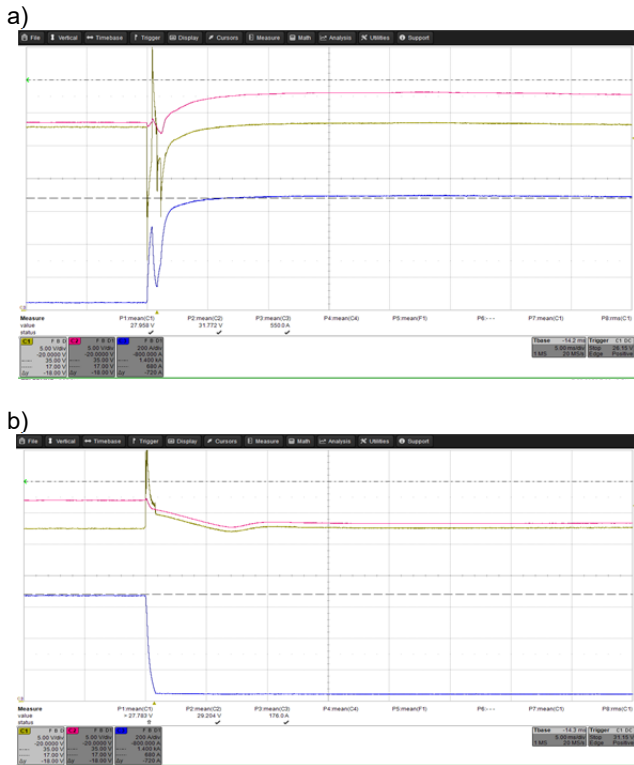


Fig. 9. Przebiegi napięcia wyjściowego na końcu przewodu (żółty) podczas skokowej zmiany obciążenia z 3% do 40% (a) oraz z 40% do 3% (b) obciążenia znamionowego dla przekształtnika zasilanego z napięcia 200 V/400 Hz i konfiguracji K2.

Badania w stanach przejściowych wykazały bardzo dobre właściwości regulacyjne zastosowanych metod sterowania. Przy skokach obciążenia z 3% do 40% oraz z 40% do 3% czas uzyskania wartości określonych w normie ISO 6858 jako stan ustalony (napięcie między 26 V, a 29 V) powinien nastąpić najpóźniej po 200ms. W przypadku badanego urządzenia czas ten był krótszy od 1 ms, czyli ponad 200 razy krótszy niż przewiduje norma. Oznacza to, że układ sterowania pracuje na tyle szybko, że po zakończeniu procesów komutacyjnych układ sterowania w bardzo krótkim czasie powraca do stanu ustalonego. Na przebiegach 6, 7 oraz 8 można zauważyć, że dynamika układu jest zachowana dla wszystkich trybów pracy układu zasilacza (K1 - K3). Na przebiegu 8b można zauważyć odstępstwo od wcześniejszych pomiarów, a mianowicie prąd obciążenia spadł do 0 zamiast do 3%. Pomimo tak skrajnej zmiany układ sterowania zareagował na tyle szybko, by wartość napięcia wyjściowego po komutacji nie przekroczyła 60 V (dla znamionowego napięcia 56 V). Na rysunku 9 można zauważyć, że GPU zasilany z napięcia 400 Hz również charakteryzuje się wysoką dynamiką sterowania.

Wszystkie otrzymane wyniki badań spełniają kryteria opisane w normie ISO 6858.

Podsumowanie

Ze względu na zawansowanie urządzeń elektrycznych i elektronicznych w tym również systemów awionicznych zainstalowanych na pokładzie współczesnego statku powietrznego niezbędne jest dostarczanie energii elektrycznej o odpowiedniej jakości określonej stosownymi

normami i regulacjami. Przedstawione w artykule zasilacze spełniają te uwarunkowania. Przedstawione w tabeli 1 istotne parametry charakteryzujące przekształtnik są sprawność energetyczna wieloprzekształtnikowego zasilacza z separacją transformatorową na poziomie 95% (przy zasilaniu 400 V/50 Hz) jest istotnym osiągnięciem technicznym wynikającym nie tylko z użycia do budowy elementów półprzewodnikowych SiC, ale również użytych metod sterowania. Na podkreślenie zasługują również osiągnięty mały poziom zniekształceń prąd wejściowego THD równy 2,4%. Uzyskano również niski poziom tętnienia napięcia wyjściowego, nie większy od 1%. Przebiegi przejściowe podczas skokowych zmian obciążenia są blisko 200 razy krótsze niż przewiduje to norma. Nieco gorsze osiągnięcia w przypadku stanów statycznych uzyskano w przypadku GPU zasilanego napięciem 200 V/400Hz. Ze względu na konieczność wykorzystania zbliżonej wartości napięcia w obwodzie pośredniczącym (ok. 600-650 V) uzyskanie zbliżonych wartości THD prądu wejściowego wymagało zastosowania wyższych wartości indukcyjności filtra wejściowego. To wpłynęło na wyższe straty filtra i niższą sprawność energetyczną GPU.

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

Author: prof. dr hab. inż. Andrzej Sikorski, dr inż. Krzysztof Kulikowski, dr inż. Piotr Falkowski, dr inż. Adam Kuźma, mgr inż. Mateusz Wasilewski, mgr inż. Krzysztof Dmítruk, mgr inż. Agata Godlewska, mgr inż. Krzysztof Nowaszewski, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Wiejska 45D, 15-351 Białystok,
 E-mail: a.sikorski@pb.edu.pl, k.kulikowski@pb.edu.pl, p.falkowski@pb.edu.pl, a.kuzma@pb.edu.pl, m.wasilewski@pb.edu.pl, k.dmitruk@pb.edu.pl, a.godlewska@pb.edu.pl, k.nowaszewski@pb.edu.pl,
 mgr inż. Hubert Jakubowski, inż. Grzegorz Stępień Wojskowe Centralne Biuro Konstrukcyjno-Technologiczne S.A., ul. Radiowa 13, 01-485 Warszawa
 E-mail: h.jakubowski@wcbkt.pl, g.stepien@wcbkt.pl

LITERATURA

- [1] S. Gunter, G. Buticchi, G. De Carne, C. Gu, M. Liserre, H. Zhang, C. Gerada; „Load Control for the DC Electrical Power Distribution System of the More Electric Aircraft” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, (2019) no. 4, 3937- 3947
- [2] Fiszer, R., Matuszczak, Z., Jakubowski, H., Jaskowiak, S. Electrical supply of aircraft during parking, Journal of KONBIN. (2018) 48, 359-370
- [3] Standard ISO 6858:2017
- [4] AXA 2400-Series, 30 - 90 kVA, Main Circuit and Instrumentation.
- [5] Jensen U. B., Blaabjerg F., Pedersen J. K., "A new control method for 400-Hz ground power units for airplanes," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, (2000) no. 1, 180-187
- [6] Brombach J., Lücken A., Nya B., Johannsen M., Schulz D. „Comparison of Different Electrical HVDC Architectures for Aircraft Application” 2012
- [7] L. Hua, J. Guo, X. Jing, N. Mi, R. Chung and S. Luo, "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