

Lucjan Setlak, Rafał Kowalik

Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych, Wydział Lotnictwa, Dęblin

BADANIE WYBRANYCH PROSTOWNIKÓW WIELOIMPULSOWYCH, IMPLEMENTOWANYCH WE WSPÓŁCZESNYCH SAMOLOTACH KOMPATYBILNYCH Z KONCEPCJĄ SAMOLOTU BARDZIEJ ELEKTRYCZNEGO

STUDY OF SELECTED MULTI-PULSE RECTIFIERS, IMPLEMENTED IN MODERN AIRCRAFTS COMPATIBLE WITH THE MORE ELECTRIC AIRCRAFT CONCEPT

Streszczenie: We współczesnym lotnictwie (wojskowym, cywilnym), coraz częściej w projektowanych autonomicznych pokładowych systemach zasilania, można obserwować dynamiczny rozwój energoelektronicznych prostowników wieloimpulsowych, w szczególności na samolotach zgodnych z tendencją samolotu bardziej elektrycznego. Głównym celem tego artykułu jest przeprowadzenie badania (analiza, model matematyczny, symulacje) wybranych prostowników wieloimpulsowych, w tym prostowników (6-, 12- i 18-, 24-) pulsowych w zakresie system energoelektronicznego, który jest jednym z dwóch kluczowych systemów (z wyjątkiem systemu elektroenergetycznego) autonomicznego pokładowego systemu zasilania. Prostowniki te są używane, zarówno na wojskowych statkach powietrznych (*Lockheed Martin*) w zakresie samolotów (JSF F-35, F-22 Raptor), jak również w lotnictwie cywilnym (*Airbus, Boeing*) w zakresie samolotów (A-380 i A-350XWB, B-787), zgodnie z koncepcją samolotu bardziej elektrycznego. W oparciu o powyższe w końcowej części artykułu, na podstawie symulacji wybranych prostowników zasilania i analizy przebiegów symulacyjnych, przeprowadzonych w środowisku programistycznym Matlab/Simulink, przedstawiono praktyczne wnioski.

Abstract: In modern aviation (military, civilian), more and more often in designed autonomous on-board power supply systems, one can observe the dynamic development of energo-electronic multi-pulse rectifiers, in particular on aircrafts compatible with the trend of a more electric aircraft. The main purpose of this paper is to conduct the study (analysis, mathematical model, simulations) of selected multi-pulse rectifiers, including (6-, 12- and 18-, 24-) impulse rectifiers in the field of energo-electronic power system, which is one of two key systems (except electric power system) of the autonomous on-board power system. These rectifiers are used, both on military aircraft (*Lockheed Martin*) in the field of aircrafts (JSF F-35, F-22 Raptor), as well as in civil aviation (*Airbus, Boeing*) in the field of aircrafts (A-380 and A-350XWB, B-787), according to the concept of a more electric airplane. Based on the above in the final part of the paper, based on simulations of selected power rectifiers and analysis of simulation waveforms carried out in the Matlab/Simulink programming environment, practical conclusions were presented.

Słowa kluczowe: prostowniki wielopulsowe, pokładowe autonomiczne systemy zasilania, samolot bardziej elektryczny

Keywords: multi-pulse rectifiers, autonomous on-board power systems, more electric aircraft

1. Wprowadzenie

W myśl współczesnego trendu samolotu bardziej/w pełni elektrycznego MEA/AEA (*More/All Electric Aircraft*), dzisiejsze lotnictwo (cywilne, wojskowe) przeżywa duży rozkwit, zarówno w zakresie elektroenergetycznych systemów zasilania EPS (*Electric Power System*), jak też przede wszystkim w zakresie energoelektronicznych systemów zasilania PES (*Power Electronics Systems*). Powyższe systemy są głównymi komponentami składowymi zaawansowanego autonomicznego systemu za-

silania ASE (*Autonomous Electric Power Supply System*), który jest domeną współczesnych samolotów kompatybilnych z koncepcją samolotu bardziej elektrycznego, w którym dominującym źródłem energii jest energia elektryczna [1], [2], [3]. Trend samolotu zgodnego z koncepcją MEA/AEA dotyczy, zarówno samolotów cywilnych kluczowych koncernów lotniczych *Airbus* (A-380, A-350 XWB) oraz *Boeing* (B-787), jak też samolotów wojskowych wiodącego koncernu lotniczego *Lockheed Martin* w zakresie jego najbardziej zaawanso-

wanych produktów JSF (*Joint Strike Fighter*) F-35 oraz F-22 Raptor. W niniejszym referacie szczególna uwaga została poświęcona drugiemu ze składowych komponentów systemu ASE, mianowicie energoelektronicznemu systemowi zasilania PES, w tym w szczególności jego kluczowym podzespołom, jakim są prostowniki wielopulsowe. Wobec powyższego, dokonana odpowiednia charakterystyka porównawcza w zakresie rodzajów prostowników wielopulsowych, np. prostowniki (6-, 12- oraz 18-, 24-) pulsowe, a nawet 48- lub 60-pulsowe [4], [5]. Analiza prostowników na przykładzie 12- oraz 24-impulsowego prostownika, została przeprowadzona m.in. wg określonych kryteriów, do których można zaliczyć: rodzaje systemów wytwarzania/przetwarzania energii elektrycznej na pokładzie współczesnego samolotu, ich dynamicznego rozwoju oraz głównych źródeł w zakresie wytwarzanych przez nich mocy innowacyjnych systemów, zaimplementowanych na nowoczesnych samolotach cywilnych oraz wojskowych (rys. 1) W kontekście przedmiotu badań niniejszego artykułu, główna tendencja systemów ASE (EPS, PES), w tym w szczególności systemu PES, ukierunkowana jest na architekturze pokładowego napięcia prądu przemiennego AC jako wiodącego. Ponadto należy dodać, że w ramach stopniowo ewoluującego trendu "More Electric" w przemyśle samochodowym, morskim, w zastosowaniach związanych z odnawialnymi źródłami oraz przede wszystkim w lotnictwie oraz zastosowaniach dotyczących przestrzeni kosmicznej, określanego wspólnym pojęciem ESARS (*Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles*), główna jego idea sprowadza się do zamiany tradycyjnych rodzajów energii i komponentów z nią związanych (elektryczna, pneumatyczna, hydrauliczna oraz mechaniczna), jednym jej rodzajem – energią elektryczną, będącą domeną zaawansowanych samolotów i ich koncepcji (MEA, AEA oraz more AEA). Wobec tego, w myśl wprowadzanego trendu samolotu bardziej elektrycznego, pojawiły się określenia, takie jak: optymalizacja energii samolotu POA (*Power Optimized Aircraft*), a wraz z nim bardziej otwarta technologia w dziedzinie elektryczności MOET (*More Open Electrical Technology*), opracowany przez koncern lotniczy Airbus, a także w zakresie energoelektronicznych systemów zasilania – zaawansowana technologia PES (*Power Elec-*

tronic Systems). W dalszej części pracy została dokonana analiza oraz model matematyczny prostownika 12- oraz 24-impulsowego, będących przedstawicielami prostowników wielopulsowych, implementowanych na współczesnych samolotach, zgodnie z dynamicznie rozwijającym się trendem samolotu bardziej elektrycznego 'More Electric' lub bardziej elektrycznej technologii MET (*More Electrical Technology*) [6], [7].

2. Analiza oraz model matematyczny wybranych komponentów systemu ASE w zakresie systemu PES

2.1. Analiza prostowników 12- oraz 24-pulsowego

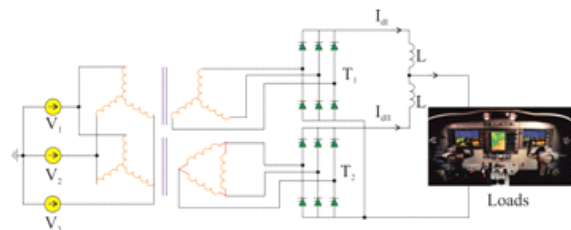
Głównymi komponentami w zakresie systemu PES są prostowniki wielopulsowe (6-, 12- oraz 18- i 24-) pulsowe, a nawet (48- i 60-) pulsowe, określane dla potrzeb m.in. problematyki lotniczej, jako tzw. urządzenia transformatorowo-prostownicze TRU. W dalszej części referatu szczególną uwagę poświęcono prostownikom 12- oraz 24-pulsowym, będącym przedstawicielami 3-fazowych prostowników wielopulsowych. Tego rodzaju urządzenia m.in. TRU, stanowią rodzaj (typ) energoelektronicznych przetworników (przekształtników), są one zasilane z pokładowych źródeł energii elektrycznej. Dodatkowo w przypadku, gdy ich funkcja sprowadza się do przetwarzania napięcia prądu przemiennego AC na napięcie prądu stałego DC, nazywane są prostownikami, zaś w sytuacji, gdy ich przeznaczeniem jest przetwarzanie napięcia prądu stałego DC na napięcie prądu przemiennego AC, definiowane są jako falowniki (*inverters*). Przekształtniki energoelektroniczne zaliczane są do urządzeń, przeznaczonych do przekazywania (dostarczania) energii elektrycznej o różnym charakterze prądu, przy wykorzystaniu zaworów elektrycznych. Innymi słowy są to urządzenia, których głównym przeznaczeniem jest bezpośrednie przekształcenie w funkcji czasu (przekształcenie czasowe) przebiegu prądu elektrycznego. Przykładowo, przekształtniki prądu przemiennego AC nazywane cyklokonwertorami (AC/AC) (*cycloconverter*) lub inaczej bezpośrednimi przemiennikami częstotliwości zaliczane są do grupy tzw. przekształtników napięcia przemiennego AC na napięcie przemiennie AC bez pośredniego obwodu prądu stałego. Cyklokonwertory tego rodzaju znalazły zastosowanie przede wszystkim

w zaawansowanych pokładowych systemach zasilania samolotów wojskowych w zakresie systemu *VSCS (Variable Speed Constant Frequency)*.

Z kolei, prostowniki są to układy energoelektroniczne, służące do przekształcania napięć przemiennych AC w napięcia stałe DC (jednokierunkowe). Zazwyczaj są one zasilane napięciami sinusoidalnymi jedno- lub trójfazowymi. W odniesieniu do przebiegu czasowego napięcia wyjściowego jednokierunkowego, zwanego inaczej napięciem wyprostowanym składają się z odpowiednich wycinków napięć sinusoidalnych zasilających prostownik. Określenia prostowników wywodzą się od liczby pulsów p napięcia i prądu wyprostowanego, przypadającej na okres napięcia przemiennego linii zasilającej prostownik. W przypadku rozpatrywanego w niniejszym referacie prostownika 48-pulsowego, którego napięcie wyprostowane zawiera w okresie napięcia linii zasilającej 12 pulsów ($p=12$) lub 24 pulsów ($p=24$), określany jest on jako *prostownik 12- lub 24-pulsowy* [8], [9].

2.2. Model matematyczny prostownika 12-pulsowego

Podczas procesu tworzenia modelu matematycznego prostownika, w pierwszej kolejności należy rozpatrzyć podstawowe jego parametry (napięcie, prąd). Dokonując analizy tych parametrów w zakresie procesu analizy numerycznej, opisującej sposób przekształcania napięcia i prądów przemiennych AC na ich odpowiedniki w postaci prądu stałego DC, na początku należy określić napięcia wejściowe w synchronicznej prądnicy trójfazowej PMSG (*Permanent Magnets Synchronous Generator*).



Rys. 1. Schemat blokowy prostownika 12-impulsowego, zastosowanego w urządzeniu TRU z włączonym obciążeniem

Na rys. 1 zilustrowano klasyczny schemat 3-fazowego prostownika wielopulsowego, wykorzystywanego w pokładowych sieciach elektrycznych nowoczesnych samolotów kompatybilnych z trendem samolotu bardziej elektrycz-

nego.

-matematyczny zapis napięcia dla poszczególnych faz przedstawia się następująco [10], [11]:

$$\begin{aligned} u_A &= U_{mp} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \\ u_B &= U_{mp} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \\ u_C &= U_{mp} \sin\left(\omega t - \frac{5\pi}{6}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie: U_{mp} - jest maksymalną wartością amplitudy sygnału pędu w analizowanym układzie poszczególnych fal harmonicznnych napięcia wytwarzanych lokalnie w prostowniku 12-impulsowym. Zakładając, że współczynnik sprawności maszyny elektrycznej jest równy jedności, w dalszej kolejności przyjmując, że prostownik przekształca napięcia, zarówno od dolnej, jak też górnej wartości napięcia wszystkich harmonicznnych, co określić można jako: dla maszyny elektrycznej pracującej w układzie gwiazdy, równania przyjmują postać:

$$\begin{aligned} u_{Y-1} &= u_{f1} = U_{mp} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \\ u_{Y-2} &= u_{f2} = U_{mp} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \\ u_{Y-3} &= u_{f3} = U_{mp} \sin\left(\omega t - \frac{5\pi}{6}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

Z kolei, dla maszyny elektrycznej pracującej w układzie trójkąta, równania można zapisać w poniższej formie:

$$\begin{aligned} u_{\Delta-1} &= U_{mp} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{6}\right) = U_{mp} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_{\Delta-2} &= U_{mp} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{6}\right) = U_{mp} \sin(\omega t) \\ u_{\Delta-3} &= U_{mp} \sin\left(\omega t - \frac{5\pi}{6} + \frac{\pi}{6}\right) = U_{mp} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

Prąd w układzie opisano zależnościami matematycznymi:

$$\begin{aligned} L_{ac} \frac{di_{\Delta-1}}{dt} &= -R_{ac} i_{\Delta-1} + u_{\Delta-1} - V_n \\ L_{ac} \frac{di_{\Delta-2}}{dt} &= -R_{ac} i_{\Delta-2} + u_{\Delta-2} - V_n \\ L_{ac} \frac{di_{\Delta-3}}{dt} &= -R_{ac} i_{\Delta-3} + u_{\Delta-3} - V_n \\ L_{ac} \frac{di_{Y-1}}{dt} &= -R_{ac} i_{Y-1} + u_{Y-1} - V_p \\ L_{ac} \frac{di_{Y-2}}{dt} &= -R_{ac} i_{Y-2} + u_{Y-2} - V_p \end{aligned} \quad (4)$$

Dalej uzyskano [12], [13]:

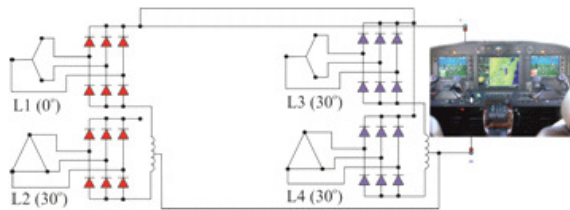
$$\begin{aligned} i_{\Delta-1} &= -(i_{\Delta-2} + i_{\Delta-3}) \\ i_{Y-1} &= -i_{Y-2} \\ i_{Y-3} &= 0 \\ i_{Y-1} + i_{\Delta-1} &= I_{DC} \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie: $\theta = \omega t$, α - jest to kąt fazowy początko-

wego sygnału napięcia zmiennego, i_{Δ} , i_Y - prąd zmienny zmierzony na wejściu prostownika, $L_{\alpha c}$ oraz $R_{\alpha c}$ - oznaczają odpowiednio indukcyjność oraz rezystancję, występujące w układzie prostownika. Z kolei przez V_p oraz V_n - oznaczono ujemną lub dodatnią wartość węzły napięciowe prądu stałego DC.

2.3. Model matematyczny prostownika 24-impulsowego

Na kolejnym rys. 2 przedstawiono schemat blokowy 3-fazowego prostownika wielopulsowego zgodnie z koncepcją MEA.



Rys. 2. Schemat blokowy prostownika 24-impulsowego, zasilanego z transformatora 3-fazowego

Układ zasilany jest z synchronicznej trójfazowej prądnicy PMSG, zaś prąd na wejściu 24-impulsowego prostownika można opisać jako:

$$i_{\alpha 1} = \sum_{n=1,3,5} \hat{i}_n \cdot \sin n(\omega t + \varphi) = \sum_{n=1,3,5} \left[\frac{4I_{DC}}{n\pi} \cdot \cos \frac{n\pi}{6} \right] \sin n \left(\omega t + \frac{\pi}{24} \right) \quad (6)$$

Przykład poszczególnych harmonicznych

$$\begin{aligned} i_{\alpha 2} &= \sum_{n=1,3,5} \left[\frac{4I_{DC}}{n\pi} \cdot \cos \frac{n\pi}{6} \right] \sin n \left(\omega t + \frac{\pi}{8} \right) \\ i_{\alpha 3} &= \sum_{n=1,3,5} \left[\frac{4I_{DC}}{n\pi} \cdot \cos \frac{n\pi}{6} \right] \sin n \left(\omega t - \frac{\pi}{24} \right) \\ i_{\alpha 4} &= \sum_{n=1,3,5} \left[\frac{4I_{DC}}{n\pi} \cdot \cos \frac{n\pi}{6} \right] \sin n \left(\omega t - \frac{\pi}{8} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

Dla przeciwnej strony

$$\begin{aligned} i_{\alpha 1} &= \sum_{n=1,3,5} \left[\frac{4I_{DC}}{n\pi} \cdot \cos \frac{n\pi}{6} \right] \sin n \left(\omega t + \frac{17\pi}{24} \right) \\ i_{\alpha 2} &= \sum_{n=1,3,5} \left[\frac{4I_{DC}}{n\pi} \cdot \cos \frac{n\pi}{6} \right] \sin n \left(\omega t + \frac{19\pi}{24} \right) \\ i_{\alpha 4} &= \sum_{n=1,3,5} \left[\frac{4I_{DC}}{n\pi} \cdot \cos \frac{n\pi}{6} \right] \sin n \left(\omega t - \frac{19\pi}{24} \right) \\ i_{\alpha 3} &= \sum_{n=1,3,5} \left[\frac{4I_{DC}}{n\pi} \cdot \cos \frac{n\pi}{6} \right] \sin n \left(\omega t - \frac{17\pi}{24} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

Dalej dokonując transformaty Fouriera dla zależności (3) otrzymano [14], [15]:

$$\begin{aligned} i_{\alpha} &= 2 \cdot \sum_{n=1,3,5} \left[\frac{4I_{DC}}{n\pi} \cdot \cos \frac{n\pi}{6} \right] \sin(n\omega t) \\ &\quad \cdot \left[\cos \frac{1}{24} n\pi k_1 \cdot \cos \frac{\pi}{24} + \cos \frac{1}{8} n\pi k_2 \cdot \cos \frac{3\pi}{24} - \cos \frac{17}{24} n\pi k_2 \right. \\ &\quad \cdot \left. \cos \frac{7\pi}{24} - \cos \frac{19}{24} n\pi k_4 \cdot \cos \frac{5\pi}{24} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

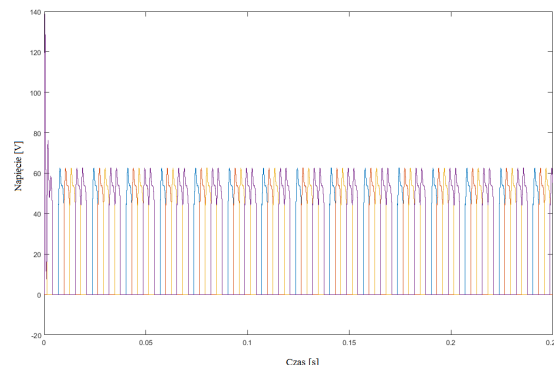
gdzie: I_{DC} - jest prądem stałym w 6-impulsowym prostowniku i wynosi $I_{DC} = \frac{I_{DC24}}{4}$, gdzie I_{DC24} - to prąd na wyjściu 24-impulsowego prostownika.

Amplituda n-tego sygnału harmonicznego zdefiniowana została jako:

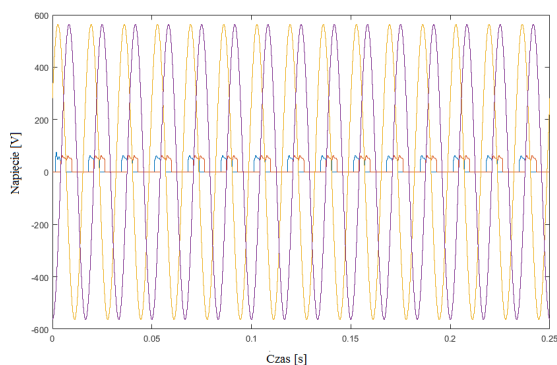
$$A_n = \frac{2I_{DC24}}{n\pi} \cdot \left(\cos \frac{n\pi}{6} \right) \cdot \left[\cos \frac{1}{24} n\pi k_1 + \cos \frac{1}{8} n\pi k_2 - \cos \frac{17}{24} n\pi k_2 - \cos \frac{19}{24} n\pi k_4 \right] \quad (10)$$

3. Wyniki badań symulacyjnych prostowników 12 - oraz 24-impulsowego zgodnie z koncepcją MEA

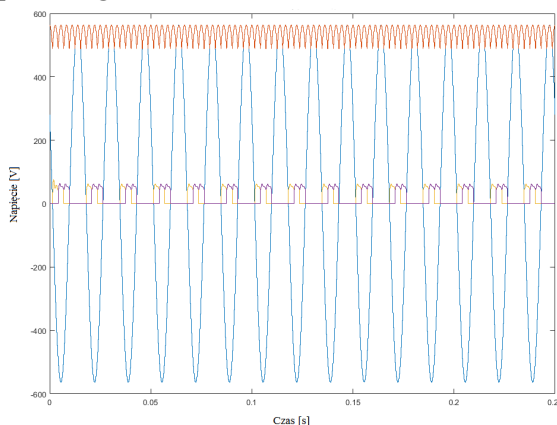
W oparciu o dokonaną analizę oraz przeprowadzone badania symulacyjne przykładowych prostowników 12- oraz 24-pulsowego, uzyskano wyniki badań przedstawione na rysunkach 3-5. Należy zauważyć, że podstawowym, a zarazem najważniejszym zadaniem w modelowaniu 3-fazowego układu prostowniczego i jego elementów składowych (prostowników) w środowisku Matlab/Simulink jest właściwy dobór transformatora, który musi uwzględniać wiele czynników, mających wpływ na pracę zasilacza, m.in. zakres zmian napięcia, spadek napięcia na prostowniku, itp. Szczegółowa analiza powyższych zagadnień została zawarta w artykule [6].



Rys. 3. Przebiegi napięcia DC na wyjściu układu TRU przy częstotliwości 400 Hz dla prostownika 12-pulsowego



Rys. 4. Przebiegi napięcia wejściowego AC układu TRU oraz napięcia DC na wyjściu prostownika przy częstotliwości zmiennej w zakresie 100-400 Hz dla prostownika 12-pulsowego



Rys. 5. Przebiegi napięcia wejściowego AC układu TRU oraz napięcia DC na wyjściu prostownika przy częstotliwości zmiennej w zakresie 100-400 Hz dla prostownika 24-pulsowego

4. Podsumowanie i wnioski

Uzyskane wyniki badań symulacyjnych potwierdzają pozytywne cechy, zarówno analizowanych 12- oraz 24-prostowników wielopulsowych w zakresie wzrostu napięcia wyjściowego, jak też sprawności energetycznej układu. Analiza oraz wybrane badania symulacyjne w zakresie prostowników wieloimpulsowych, w oparciu o prostownik 12- i 24-pulsowy wykazały, że wyjściowe napięcia trójfazowych układów prostowniczych są tym bardziej ustabilizowane w zakresie wymagań technicznych (WT), im większa jest liczba impulsów p danego układu prostowniczego. Przyjmując założenie, że jednym z kryteriów oceny prostownika, jest jego struktura w kontekście jego rozwiązania konstrukcyjnego, tj. zaczynając analizę od budowy transformatora, a kończąc na liczbie zastosowanych 3-fazowych prostowników 6-pulsowych, jako bazowych, można

zaznaczyć, że duże znaczenie w tym zakresie odgrywa konstrukcja 3-fazowego układu prostowniczego. Na tej podstawie można wywnioskować, że 3-fazowe układy prostownicze o wyższej liczbie pulsów, np. 12-, 24-pulsowe układy posiadają o wiele bardziej złożoną strukturę oraz składają się z dużo większej liczby elementów, w porównaniu z układami o mniejszej liczbie impulsów p . Ponadto, skomplikowana i złożona konstrukcja powiązana jest ze zwiększoną podatnością na wszelkiego rodzaju uszkodzenia i niesprawności układu, a także wiąże się z ponoszeniem znacznych kosztów eksploatacyjnych, co jest uznawane za wady tych układów. Z drugiej strony przetworniki wielopulsowe, w tym w szczególności przetworniki o wyższej liczbie pulsów charakteryzują się znacznie niższym poziomem tętnień, zaś prąd po wyprostowaniu jest bardziej podatny na regulację. Wymienione cechy układów prostowniczych 12- i 24-pulsowych w znacznej mierze przekładają się na dużą ich efektywność w zakresie przekształcania 3-fazowego prądu przemiennego AC na prąd stały DC, a co się z tym bezpośrednio wiąże, również na wysoką sprawność przetwornika. Wymienione cechy przetworników są jego kluczowymi zaletami. Podsumowując, najprostszy układ prostowniczy 6-pulsowy, złożony z 6 diod prostowniczych, wytwarza duże zniekształcenia harmoniczne. Z kolei, klasyczny prostownik 12-pulsowy w układzie równoległym, np. w przypadku transformatora prostownika ATRU (*Auto-Transformer Rectifier Unit*) zbudowano z 2 układów 6-pulsowych połączonych szeregowo oraz wejścia napięcia prądu przemiennego AC połączonego z transformatorem, który posiada przesunięcie fazowe pomiędzy wyjściami wynoszące 30° , co zostało zilustrowane na rys. 1-2. Należy dodać, że tego rodzaju rozwiązanie konstrukcyjne 3-fazowego układu prostowniczego zapewnia obniżenie poziomu zniekształceń napięcia wyprostowanego na wyjściu układu. Z kolei, np. układy 24-pulsowe, implementowane w zaawansowanych sieciach pokładowych nowoczesnych samolotów, kompatybilnych z trendem MEA, wykazują zdecydowanie mniejsze wartości tętnienia. Na podstawie dokonanej analizy oraz stworzonych modeli i symulacji prostowników wielopulsowych można przypuszczać, że dynamika rozwoju pokładowych autonomicznych systemów zasilania ASE, zarówno w zakresie systemu EPS, jak też przede wszystkim w oparciu

o system EPS i jego główne komponenty, w znacznym stopniu przyczyni się do ewolucji koncepcji MEA/AEA i obejmie wiele typów nowo-czesnych samolotów (cywilne, wojskowe).

5. Literatura

- [1]. Moir I., Seabridge A., *"Aircraft Systems: Mechanical, Electrical, and Avionics Subsystems Integration."* Third Edition, 2008 John Wiley & Sons.
- [2]. Setlak L., Kowalik R., *"IAENG Transactions On Engineering Sciences: Special Issue For The International Association Of Engineers Conference's 2016 Volume II,"* Model Study and Simulation of Selected Components of On-board Power Supply System ASE in the Range of EPS and PES Systems of a Modern Aircraft, Compatible with the Concept of More Electric Aircraft, pp. 344-359, 2018.
- [3]. H. Abu-Rub H., M. Malinowski M., K. Al-Haddad K., *"Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation, and Industrial Applications,"* First Edition, 2014 John Wiley & Sons.
- [4]. Gong G., Drogenik U., Kolar J.W., *"12-Pulse Rectifier for More Electric Aircraft Applications."* ETH Zurich, Power Electronic Systems Laboratory, ICIT 2003.
- [5]. Raghuvanshi S., Singh N., *"Comparative analysis of 36, 48, 60 pulse AC-DC Controlled Multipulse Converter for Harmonic Mitigation,"* International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET) Volume 3 Issue 4, April 2014.
- [6]. Setlak L., Kowalik R., Redo W., *"Mathematical Models and Simulation of key Multi-Pulse Rectifiers in field of Autonomous Electric Power Supply System, using Matlab/Simulink Programming Environment Compatible with the Concept of a More Electric Aircraft (MEA),"* IEEE, pp. 1-6, 2017.
- [7]. Emandi K., Ehsani M., *"Aircraft power systems: technology state of the art, and the future trends,"* Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, 2000.
- [8]. Kazmierkowski M.P., Blaabjerg F., Krishnan R., *"Control in Power Electronics,"* Academic Press Series in Engineering, Elsevier Science 2002.
- [9]. Setlak L., Ruda E., *"Review, Analysis and Simulation of Advanced Technology Solutions in Power Electronics Systems (PES) of More Electric Aircraft,"* World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol: 9, No: 10, 2015.
- [10]. Skvarenina T. L., *"The power electronics handbook."* CRC Press LLC, 2002.
- [11]. Latawiec K.J., Stanisławski R., Łukaniszyn M., Czuczvara W., Rydel M., *"Fractional-order modeling of electric circuits: modern empiricism vs. classical science,"* 2017 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE), pp. 1-4, IEEE, 2017.
- [12]. Bozhko S., Wu T., Tao Y., and M. A.G., *"More-Electric Aircraft Electrical Power System*

Accelerated Functional Modeling," in International Power Electronics and Motion Control Conference, Ohrid, Republic of Macedonia, 2010.

[13]. Ronkowski M., Michna M., Kostro G., Kutt F., *"Maszyny elektryczne wokół nas".* Politechnika Gdańska 2009/2010.

[14]. Setlak L., Kowalik R., *"Components of Variable Frequency of Power Supply System ASE of Modern Aircraft in Accordance with the Concept of a More Electric Aircraft MEA,"* Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The World Congress on Engineering and Computer Science, pp. 243-248, San Francisco, USA 2017.

[15]. Monroy A. O., Le-Huy H., Lavoie C., *"Modeling and Simulation of a 24-pulse Transformer Rectifier Unit for More Electric Aircraft Power System:, Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS),"* 2012.

Autorzy

1. ppłk dr inż. L. Setlak, WSOSP, Wydział Lotnictwa, Katedra Awioniki i Systemów Sterowania, Dęblin, e-mail: l.setlak@wsosp.pl
2. dr inż. R. Kowalik, WSOSP, Wydział Lotnictwa, Katedra Awioniki i Systemów Sterowania, Dęblin, e-mail: r.kowalik@wsosp.pl