

Tomasz BINKOWSKI¹
Kazimierz BUCZEK²
Wiesława MALSKA³
Dariusz SOBCZYŃSKI⁴

ANALIZA PRZEKSZTAŁTNIKÓW ZASILANYCH Z POKŁADOWYCH SIECI PODWYŻSZONEJ CZĘSTOTLIWOŚCI

W sprzęcie, szczególnie wojskowym i lotniczym, występują odbiorniki napięcia przemiennego 400 Hz i napięcia stałego. Dotychczas stosowane dwa generatory i dwie sieci zasilające (AC i DC) są rozwiązaniem nieekonomicznym i trudnym technicznie. Obecny stan techniki, a zwłaszcza elektroniki i energoelektroniki pozwala na zmniejszenie liczby systemów elektroenergetycznych do jednego systemu – do sieci AC, pozostawiając awaryjne źródła zrealizowane z wykorzystaniem baterii akumulatorów. Nowoczesne układy energoelektroniczne z powodzeniem pozwalają na budowę przekształtników dopasowujących jedną sieć prądu przemiennego do wszystkich odbiorników niezależnie od wartości i rodzaju napięcia (AC i DC). Wymaga to jednak badań dotyczących uzyskiwania w systemie odpowiednich wartości współczynnika mocy (PF) i kształtu sygnałów (THD). Niniejsza praca dotyczy badań zmierzających do wykorzystania tylko jednego generatora AC i jednej sieci prądu przemiennego 400 Hz do zasilania wszystkich urządzeń elektrycznych i elektronicznych. Zasilanie odbiorników pokładowych wymaga jednak zastosowania przekształtników dostosowujących.

Słowa kluczowe: generator AC, odbiornik pokładowy, przekształtnik energii

1. Wprowadzenie

Sieci prądu przemiennego (AC) podwyższonej częstotliwości w przedziale 400÷600 Hz są stosowane w obiektach uzbrojenia, lotnictwa i marynarki. Na ogół systemy są uzupełniane sieciami prądu stałego (DC) z napięciami o różnych wartościach, dopasowanych do odbiorników pracujących na pokładach. Obecny stan techniki, a zwłaszcza elektroniki i energoelektroniki pozwala na

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Tomasz Binkowski, Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, tel. (17) 8651974, e-mail: tbinkow@prz.edu.pl

² Kazimierz Buczek, kbuczek@prz.edu.pl

³ Wiesława Malska, wmalaska@prz.edu.pl

⁴ Dariusz Sobczyński, dsobczyn@prz.edu.pl

zmniejszenie liczby systemów elektroenergetycznych do jednego systemu – do sieci AC, pozostawiając awaryjne źródła zrealizowane z wykorzystaniem baterii akumulatorów. Współczesne układy energoelektroniczne z powodzeniem umożliwiają budowę przekształtników dopasowujących jedną sieć prądu przemiennego do wszystkich odbiorników niezależnie od wartości i rodzaju napięcia (AC i DC). Problem stworzenia jednolitego systemu elektroenergetycznego i wprowadzenia przekształtników półprzewodnikowych wymaga jednak badań dotyczących uzyskiwania w systemie odpowiednich wartości współczynnika mocy (PF) i kształtu sygnałów (THD). Współczynnik mocy jest bowiem elementem efektów ekonomicznych, a kształt sygnałów elementem zachowania kompatybilności elektromagnetycznej [1, 2].

2. Możliwości rozwiązania problemu

Typowym rozwiązaniem sieci elektroenergetycznej w lotnictwie i obiektach uzbrojenia jest sieć zawierająca generator podwyższonej częstotliwości (400 Hz) napięcia przemiennego, generator lub generatory napięcia stałego, akumulator jako źródło rezerwowe (zasobnik energii). Wartości znamionowe napięć wymienionych źródeł (skuteczna AC i średnia DC) zawierają się na ogół w granicach do wartości napięcia znamionowego generatora AC, czyli U_{NAC} (najczęściej $U_{NAC} = 400$ V) [3, 4]. Przekształcanie energii AC podwyższonej częstotliwości na napięcie stałe rozpoczyna się przez zastosowanie prostownika. Wartość średnia napięcia wyprostowanego, jaką można uzyskać w układzie trójfazowym dwukierunkowym (mostkowym) z filtrem pojemnościowym z kondensatorem o bardzo dużej pojemności, to wartość amplitudy napięcia międzyfazowego pomniejszona o spadki napięć na diodach, a także o $\frac{1}{2}$ amplitudy pulsacji napięcia wyjściowego [3, 4].

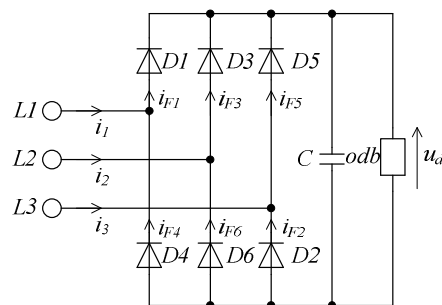
$$U_{d0} \approx \sqrt{2}U_{NAC} \quad (1)$$

Zastosowanie filtra pojemnościowego z kondensatorem o bardzo dużej pojemności na wyjściu prostownika wywołuje przebieg impulsowy prądu z sieci zasilającej, a więc generację wyższych harmonicznnych nieparzystych (harmoniczna podstawowa ma częstotliwość 400 Hz) (rys. 1., 2.). W rzeczywistych warunkach wartość średnia tego napięcia wyprostowanego jest mniejsza o spadek napięcia na przewodzących przyrządach półprzewodnikowych (diodach). Spadek stanowi ułamek procenta i w analizach obliczeniowych przeważnie się go pomija. Wartość ta jest także mniejsza z powodu występujących tętnień napięcia wyjściowego, wywołanych impulsowym ładowaniem i rozładowaniem kondensatora wyjściowego. Dla stanu jałowego przy napięciu zasilania (wartość skuteczna) $U_{NAC} = 400$ V napięcie wyprostowane układu wynosi $U_{d0} = 540$ V. Napięcie 540 V jest na ogół znacznie większe od napięć znamionowych odbiorników, powinno zatem być zredukowane (obniżane) za pomocą impulsowych

przekształtników napięcia stałego DC/DC typu buck. W systemach elektroenergetycznych uzbrojenia i lotnictwa mogą pracować odbiorniki DC o różnych napięciach. Zasilanie tych odbiorników jest możliwe także przez prostowniki sterowane bezpośrednio z sieci prądu przemiennego AC. W tym przypadku w zależności od mocy można zastosować prostowniki zarówno jedno-, jak i trójfazowe. Jednak optymalne wydaje się zastosowanie prostownika tyrystorowego mostkowego 6T lub tyrystorowo-diodowego 3T-3D. Należy wziąć pod uwagę występowanie w prostownikach zasilanych z sieci 400 Hz zwiększonych spadków napięcia na wyjściu w związku z procesem komutacji (większa reakcja komutacyjna) oraz odkształcenie prądu sieci płynącego do prostownika. Niezależnie systemy te posiadają zasobniki (magazyny) energii DC – akumulatory. Rozwiązanie systemu elektroenergetycznego 400 Hz w rozważanym przypadku pokazano na rys. 3. Jeżeli odbiorniki AC i/lub DC wymagają regulacji lub stabilizacji napięcia, układ musi ulec rozbudowie o kolejne przekształtniki regulacyjne. Znacznie mniej skomplikowany jest ten problem dla odbiorników DC, ponieważ po wyprostowaniu napięcia przemiennego można bezpośrednio wykonać operację regulacji napięcia stałego za pomocą przekształtnika DC/DC buck, który jest sterowany systemem modulacji szerokości impulsu PWM (rys. 4.).

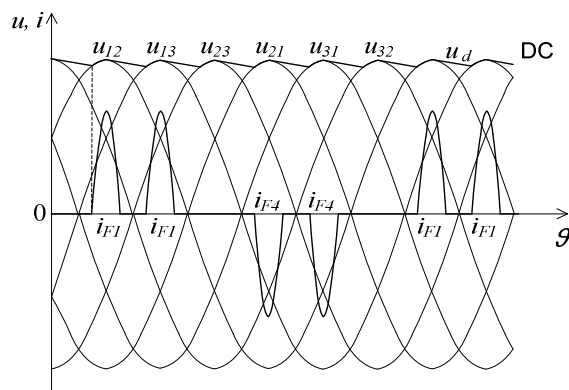
Rys. 1. Schemat ideowy prostownika mostkowego 6D z filtrem pojemnościowym C

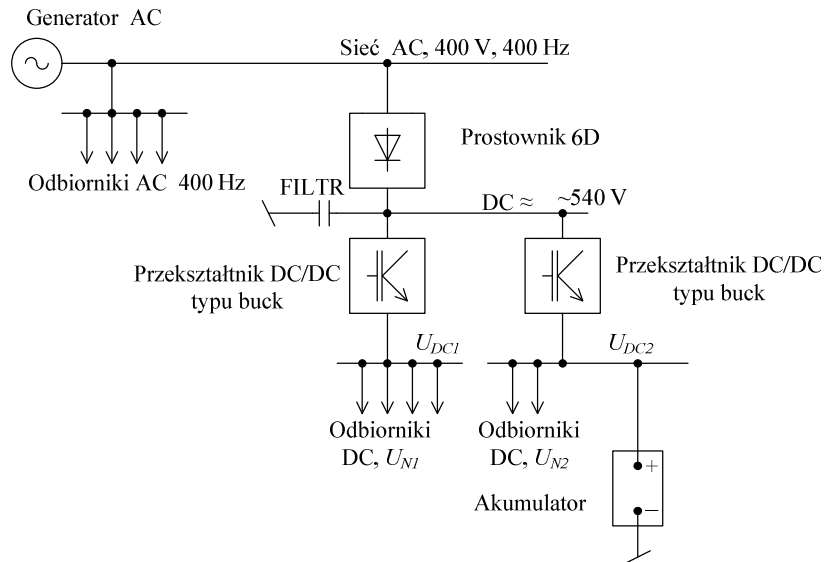
Fig. 1. Schematic diagram of the bridge rectifier 6D with capacitive filter C



Rys. 2. Charakterystyczne przebiegi prądu jednej fazy w układzie prostownika mostkowego 6D z filtrem pojemnościowym C, $i_1 = i_{F1} - i_{F4}$

Fig. 2. Characteristic courses of single-phase current by the bridge rectifier 6D with capacitive filter C, $i_1 = i_{F1} - i_{F4}$



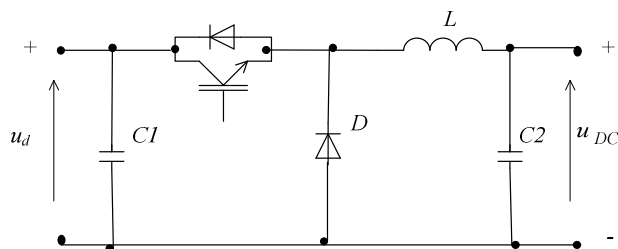


Rys. 3. Schemat blokowy sieci elektrycznej 400 Hz z odbiornikami prądu przemiennego, prądu stałego i zasobnikiem energii DC (akumulatorem), $DC \approx$ – napięcie stałe niestabilizowane zawierające składową zmienną

Fig. 3. Block diagram of 400 Hz power supply network with AC/DC loads and DC energy accumulator, $DC \approx$ – direct non-stabilised voltage including variable component

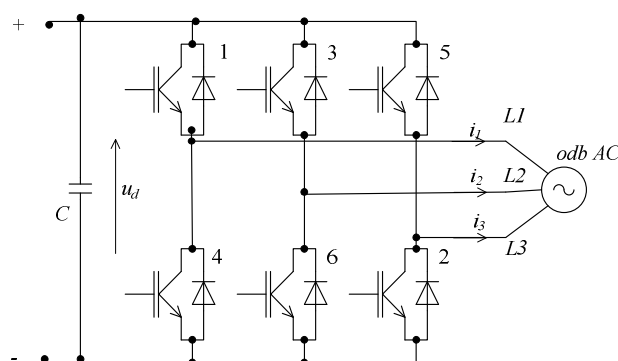
W przypadku odbiorników AC wymagających regulacji parametrów elektrycznych (napięcie, prąd, częstotliwość) możliwy jest do zastosowania układ bardziej złożony. Podobnie jak dla układów AC z częstotliwością 50 Hz, należy zastosować przekształcenie napięcia AC na napięcie DC za pomocą prostownika, najlepiej diodowego z filtrem pojemnościowym C, a następnie przekształcenie z powrotem na napięcie AC za pomocą falownika napięcia w układzie trójfazowym mostkowym sześciotranzystorowym sterowanym systemem modulacji szerokości impulsów PWM (rys. 5.). Akumulator spełnia rolę zasobnika energii i jest wykorzystywany przede wszystkim w sytuacjach awaryjnych, np. w przypadku awarii generatora AC. Wówczas wprost do akumulatora mogą być podłączone tylko odbiorniki o napięciu znamionowym równym lub zbliżonym do napięcia znamionowego akumulatora. Pozostałe odbiorniki napięcia stałego muszą otrzymać napięcie dostosowane otrzymywane przez przekształtnik impulsowy DC/DC typu boost podwyższający napięcie. Rozwiązanie układowe tego typu pokazano na rys. 6.

W tym przypadku wartość średnia napięcia na wyjściu przekształtnika jest znacznie większa od wartości średniej napięcia zasilania ($U_{DC} \gg U_d$). Awaryjnie zasilane z akumulatora odbiorników AC wymaga także zastosowania przekształtnika DC/DC podwyższającego napięcie, a następnie przekształtnika



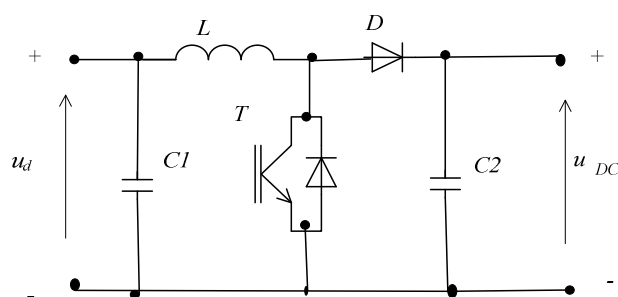
Rys. 4. Schemat ideowy przekształtnika DC/DC typu buck obniżającego napięcie stałe (sterowanie PWM)

Fig. 4. Schematic diagram of the DC/DC buck type converter reducing direct voltage (PWM control)



Rys. 5. Schemat blokowy układu z przekształtnikiem DC/AC i falownikiem PWM

Fig. 5. Block diagram of the system with DC/AC converter and the PWM inverter



Rys. 6. Schemat ideowy przekształtnika DC/DC typu boost podwyższającego napięcie stałe (sterowanie PWM)

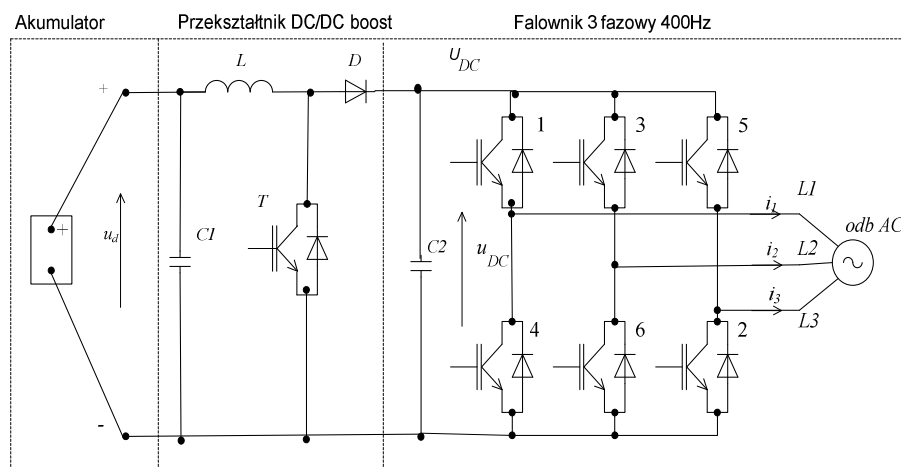
Fig. 6. Schematic diagram of the DC/DC boost type converter increasing direct voltage (PWM control)

DC/AC – falownika sterowanego systemem PWM dopasowującego parametry elektryczne (napięcie, prąd) do wymagań danego odbiornika. Rozwiązanie to zaprezentowano na rys. 7. Zastosowanie regulatora impulsowego DC/DC boost jest rozwiązaniem wymagającym zastosowania dodatkowego dławika (L). Wartość średnia napięcia U_{DC} zależy od współczynnika wypełnienia impulsu δ i można ją określić z zależności [2-4]:

$$U_{DC} \cong \frac{1}{1-\delta} U_d, \quad \delta = \frac{t_z}{t_c} \quad (2)$$

gdzie: t_z – czas załączenia tranzystora T ,
 t_c – czas trwania cyklu.

Przekształtnik DC/DC boost pełni rolę analogiczną do transformatora, który podwyższa napięcie DC i powinien zabezpieczać odpowiednią wartość napięcia stałego na wejściu falownika U_{DC} , aby ten z kolei mógł generować znamionowe napięcie i prąd odbiornika lub odbiorników prądu przemiennego. Niestety przekształtniki impulsowe DC/DC boost charakteryzują się nieco mniejszą sprawnością energetyczną w porównaniu z innymi przekształtnikami impulsowymi.

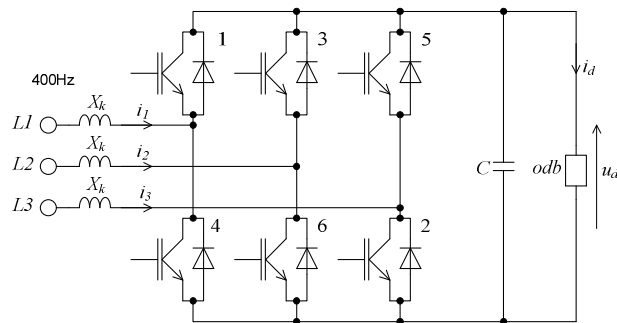


Rys. 7. Schemat układu zasilania odbiorników AC z akumulatora

Fig. 7. The diagram of the system of AC loads supplied by the accumulator

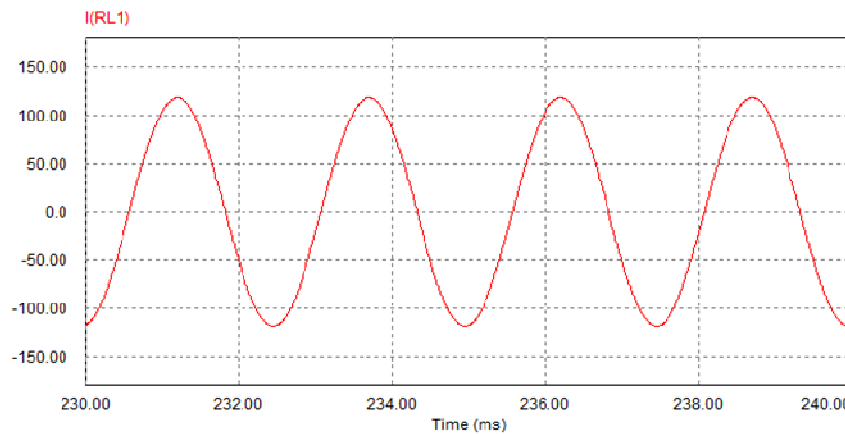
Dokonano pomiarów sprawności energetycznej przekształtników DC/DC boost przy obciążeniu $I_{DC} = 50$ A, napięciu $U_{DC} = 540$ V, częstotliwości impulsowania tranzystora T (rys. 6., 7.) $f = 7500$ Hz ($t_c = 13,3$ μ s) i napięciu $U_d = 24$ V. Uzyskana w takich warunkach sprawność $\eta = 0,982$. Problemem energetycznym prezentowanego rozwiązania jest praca prostownika diodowego

6D z pojemnościowym filtrem wyjściowym C użytego do prostowania napięcia przemiennego 400 Hz na napięcie stałe (rys. 1.). Prąd płynący z sieci ma przebieg impulsowy (rys. 2.), generujący wyższe harmoniczne. Na ogół przebieg ten jest symetryczny względem osi czasu, dlatego występujące harmoniczne są rzędów nieparzystych $n = 3, 5 \dots$



Rys. 8. Konwerter AC/DC z obciążeniem C dołączony do sieci AC 400Hz

Fig. 8. AC/DC converter with capacitive filter C in AC 400 Hz supply network



Rys. 9. Oscylogram prądu jednej fazy płynącego z sieci 400 Hz wyliczony przy obciążeniu $I_{d(AV)} = 50$ A i indukcyjności sieci $L_s = 5 \cdot 10^{-5}$ H

Fig. 9. Oscillogram of single-phase current flowed through the 400 Hz power network evaluated under loading $I_{d(AV)} = 50$ A and network inductance $L_s = 5 \cdot 10^{-5}$ H

Podstawowa harmoniczna posiada częstotliwość 400 Hz, zatem filtrowanie wyższych harmonicznych o częstotliwościach 3×400 Hz, 5×400 Hz itd. jest o wiele łatwiejsze niż przy podobnych odkształceniach w klasycznych sieciach

energetycznych 50 Hz. Ograniczenie zatem wyższych harmoniczných jest tu możliwe przez zastosowanie filtrów biernych LC lub filtrów aktywnych z wykorzystaniem techniki impulsowej. Najkorzystniejszym rozwiązaniem wydaje się więc zastosowanie konwertera AC/DC sterowanego w systemie modulacji PWM z sześcioma zespółami „tranzystor – dioda zwrotna” w układzie mostkowym, jak to pokazano na rys. 8. Konwerter AC/DC sterowany z częstotliwością 7500 Hz umożliwia uzyskanie przebiegów prądów sieci zbliżonych do kształtów sinusoidalnych. Oscylogram przebiegu prądu w jednej fazie sieci 400 Hz przedstawia rys. 9.

Współczynnik odkształcenia tych prądów dla podanych warunków sterowania, indukcyjności sieci $L_s = 5 \cdot 10^{-5}$ H i obciążenia $I_{d(AV)} = 50$ A wynosi zaledwie $THD_i = 0,005$. Odbiorniki wymagające regulacji napięcia DC, np. napędy z silnikami DC o regulowanej prędkości wirowania, mogą być zasilane z wytworzonej sieci DC (przez prostownik 6D z filtrem C lub przez prostownik tyrystorowy 6T lub tyrystorowo-diodowy 3T-3D) bezpośrednio z sieci AC. W takim rozwiązaniu należy zwrócić uwagę na większą ustępliwość charakterystyki obciążenia za sprawą większego spadku napięcia w wyniku komutacji zaworów (tyrystorów, diod) przy podwyższonej częstotliwości [3].

$$\Delta U_d = \frac{q}{2\pi} X_k I_d \quad (3)$$

gdzie: q – liczba pulsów,

I_d – wartość średnia prądu odbiornika,

$X_k = 2\pi f L$ – reaktancja sieci,

$f = 400$ Hz.

3. Podsumowanie

Zastosowanie jednego generatora (AC) w sprzęcie (np. zbrojeniowym) posiadającym systemowo odbiorniki AC 400 Hz i odbiorniki DC o różnych poziomach wartości znamionowej (U_{DC1} , U_{DC2}) jest możliwe z wykorzystaniem współczesnych rozwiązań układów energoelektronicznych pracujących impulsowo. Dostosowanie do poziomów napięć DC w systemie jest realizowane przez przekształtniki DC/DC buck w procesie obniżania napięcia oraz przekształtniki DC/DC boost w procesie podwyższania napięcia DC. Podwyższanie napięcia za pomocą przekształtnika DC/DC boost należy stosować tylko w stanach awaryjnych (brak głównego napięcia 400 Hz). W sieci 400 Hz jest ułatwiona filtracja wyższych harmoniczných w procesie zamiany napięcia AC na napięcie DC (prostowanie) ze względu na ośmiokrotnie wyższą częstotliwość napięcia zasilania i wyższą częstotliwość wyższych harmoniczných generowanych przez przekształtnik AC/DC.

Literatura

- [1] Malska W., Supronowicz H.: Patent nr P-355324. Prostownik 6-pulsowy o poprawionym kształcie prądu wejściowego. Urząd Patentowy RP, Warszawa 2009.
- [2] Buczek K., Malska W.: Energoelektronika, materiały pomocnicze do wykładu. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2011.
- [3] Tunia H., Winiarski B.: Energoelektronika. WNT, Warszawa 1994.
- [4] Piróg S.: Energoelektronika. UWN-D, Kraków 2006.

ANALYSIS OF THE POWER CONVERTERS SUPPLIED FROM ON-BOARD NETWORKS OF HIGH FREQUENCY

Abstract

In hardware, particularly the military and the aircraft, there are receivers of alternating voltage 400 Hz, and DC voltage. The up to now used two generators and two power supply networks (AC and DC) are non-economic (low efficiency) and technically difficult. The present state of the art, especially electronics and power electronics allows reducing the number of power electronic systems to one AC power supply and remaining emergency energy sources based on accumulator batteries. Modern electric systems successfully allow building power converters which adjust the AC power supply network for all AC and DC voltage receivers. However, it demands the investigations about obtaining in the system appropriate values of power factor (PF) and total harmonic distortion (THD). This work concerns on the research aimed at the use only one AC generator and one AC power supply of 400 Hz to supply all of the electrical and electronic equipments. In that case power supply on-board receivers require adjustable converters.

Keywords: AC generator, on-board receiver, power converter

DOI:10.7862/rm.2013.34

Otrzymano/received: 15.09.2013 r.

Zaakceptowano/accepted: 22.11.2013 r.