

Tomasz BINKOWSKI
Kazimierz BUCZEK
Wiesława MALSKA
Dariusz SOBCZYŃSKI
Politechnika Rzeszowska

PRZEKSZTAŁTNIKI ENERGOELEKTRONICZNE ZASILAJĄCE ODBIORNIKI DC LUB AC Z SIECI O PODWYŻSZONEJ CZĘSTOTLIWOŚCI NAPIĘCIA

W sprzęcie, szczególnie wojskowym, stosowane są odbiorniki napięcia przemiennego 400 Hz i napięcia stałego. Dotychczas stosowane dwa generatory i dwie sieci zasilające (AC i DC) są rozwiązaniem nieekonomicznym (niskosprawnym) i trudnym technicznie. Praca niniejsza 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 zastosowania przekształtników dostosowujących.

1. Wstęp

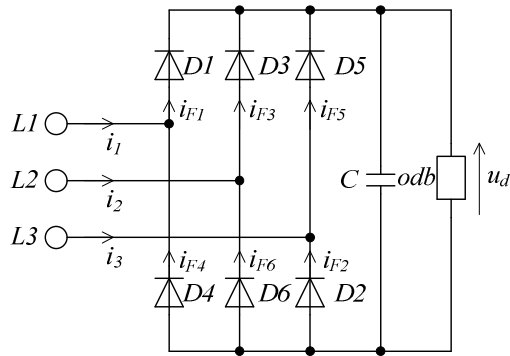
Sieci prądu przemiennego (AC) podwyższonej częstotliwości w przedziale 400-600 Hz są stosowane w obiektach uzbrojenia, lotnictwa i marynarki. Na ogół systemy są uzupełniane sieciami prądu stałego (DC) z napięciami o różnych wartościach, dopasowanych do odbiorników pracujących na pokładach. Obecny stan techniki, a zwłaszcza elektroniki i energoelektroniki, pozwala na zmniejszenie liczby systemów elektroenergetycznych do jednego, do sieci AC, pozostawiając awaryjne źródła zrealizowane na bazie baterii akumulatorów. Współczesne 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) [1, 3, 5, 17, 19].

Problem stworzenia jednolitego systemu elektroenergetycznego i wprowadzenie przekształtników półprzewodnikowych wymaga jednak badań dotyczących uzyskiwania w systemie współczynnika mocy (PF) i kształtu sygnałów (THD). Współczynnik mocy bowiem jest elementem efektów ekonomicznych, a kształt sygnałów elementem zachowania kompatybilności elektromagnetycznej [2, 4, 6, 8, 12-15].

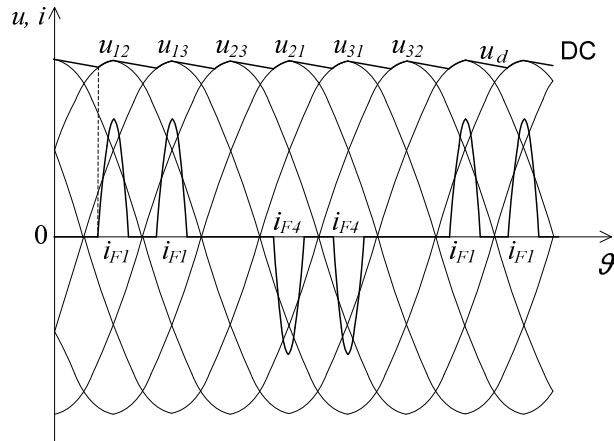
2. Możliwości rozwiązania problemu

Typowym rozwiązaniem sieci elektroenergetycznej w lotnictwie i obiektach uzbrojenia jest sieć zawierająca generator podwyższonej częstotliwości (400 Hz) napięcia przemiennego, generator lub generatory napięcia stałego i akumulator jako źródło rezerwowe (zasobnik energii). Wartości znamionowe napięć wymienionych źródeł (skuteczna AC i średnia DC) zwierają się na ogół w granicach do wartości napięcia znamionowego generatora AC, czyli U_{NAC} (najczęściej $U_{NAC} = 400 \text{ V}$) [5, 10, 11].

Przekształcanie energii AC podwyższonej częstotliwości na napięcie stałe rozpoczyna się przez zastosowanie prostownika.



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



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

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

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

pomniejszona o spadki napięć na diodach, a także o ½ amplitudy pulsacji napięcia wyjściowego [5, 8, 10].

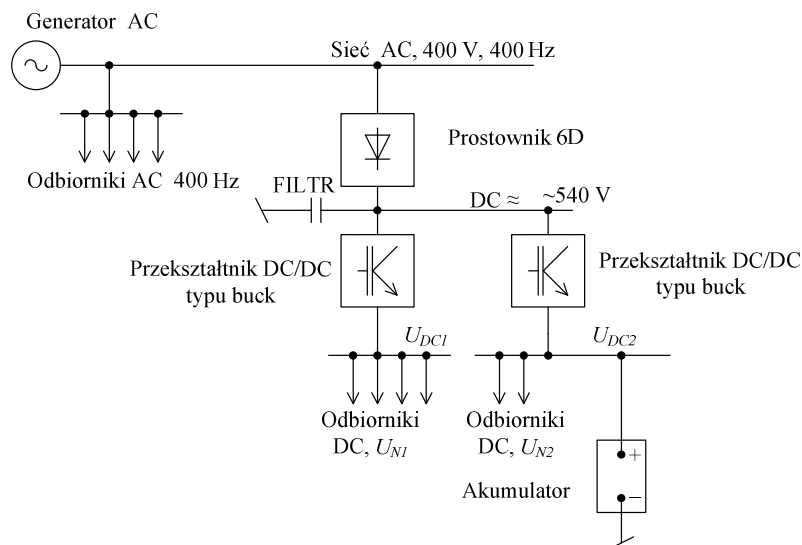
Zastosowanie filtru pojemnościowego z kondensatorem o bardzo dużej pojemności na wyjściu prostownika wywołuje przebieg impulsowy prądu z sieci zasilającej, a więc generację wyższych harmonicznnych nieparzystych (harmoniczna podstawowa ma częstotliwość 400 Hz) (rys. 1., 2.).

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 występującej pulsacji napięcia wyjściowego wywołanej impulsowym ładowaniem i rozładowaniem kondensatora wyjściowego. Dla stanu jałowego przy napięciu zasilania (wartość skuteczna) $U_{NAC} = 400$ V, wówczas 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.

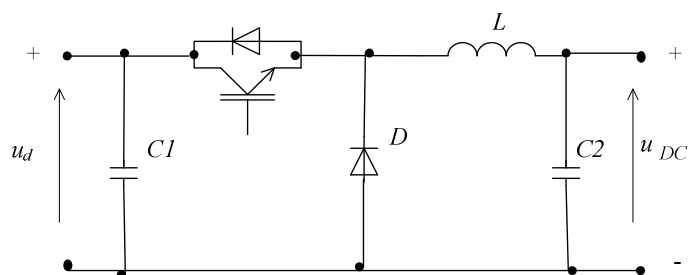
W systemach elektroenergetycznych uzbrojenia i lotnictwa mogą pracować odbiorniki DC o różnych napięciach. Zasilanie tych odbiorników jest możliwe także przez prostowniki sterowane bezpośrednio z sieci prądu przemiennego AC. W zależności od mocy można w tym przypadku zastosować prostowniki zarówno jedno- jak i trójfazowe. Jednak optymalne wydaje się zastosowanie prostownika tyrystorowego mostkowego 6T lub tyrystorowo-diodowego 3T-3D. Należy w takim przypadku wziąć pod uwagę występowanie w prostownikach zasilanych z sieci 400 Hz zwiększone spadki napięcia na wyjściu związane z procesem komutacji (większa reaktancja komutacyjna) oraz odkształcenie prądu sieci płynącego do prostownika.

Niezależnie systemy te mają zasobniki (magazyny) energii DC – akumulatory. Rozwiązanie systemu elektroenergetycznego 400 Hz dla tego przypadku pokazano na rys. 3.

Jeżeli odbiorniki AC i/lub DC wymagają regulacji lub stabilizacji napięcia, układ musi ulec rozbudowie o kolejne przekształtniki regulacyjne (rys. 4.).



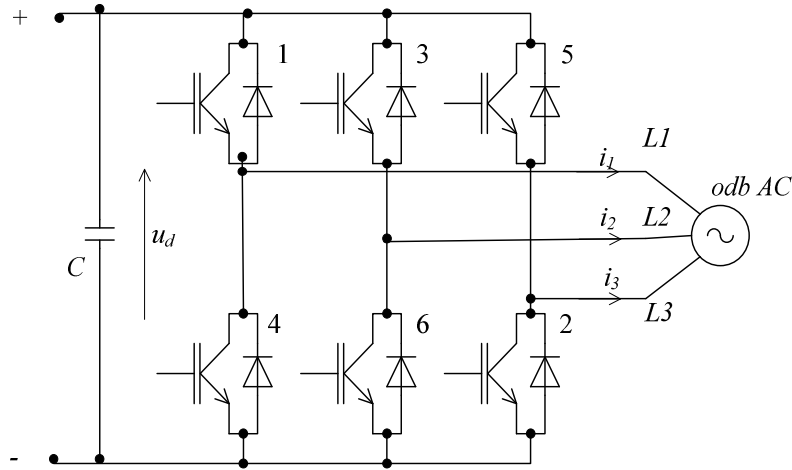
Rys. 3. Schemat blokowy sieci elektrycznej 400 Hz z odbiornikami prądu przemiennego, prądu stałego i zasobnikiem energii DC (akumulatorem), DC \approx – oznaczono napięcie stałe niestabilizowane, zawierające składową zmienną



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

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 sterowanego systemem modulacji szerokości impulsu PWM.

W przypadku odbiorników AC wymagających regulacji parametrów elektrycznych (napięcie, prąd, częstotliwość) układ możliwy do zastosowania jest bardziej złożony. W tym przypadku, 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, sterowanych systemem modulacji szerokości impulsów PWM (rys. 5.).



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

Akumulator spełnia rolę zasobnika energii i jest wykorzystywany przede wszystkim w sytuacjach awaryjnych, np. w przypadku awarii generatora AC. W takim przypadku 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 takiego problemu pokazano na rys. 6.

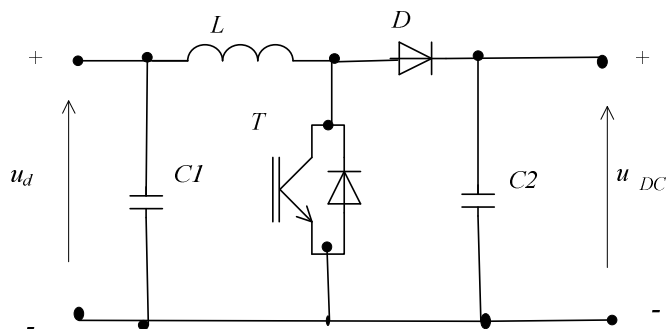
W tym przypadku wartość średnia napięcia na wyjściu przekształtnika jest znacznie większa od wartości średniej napięcia zasilania; $U_{DC} \gg U_d$.

Awaryjnie zasilane z akumulatora odbiorników AC wymaga także zastosowania przekształtnika DC/DC podwyższającego napięcie, a następnie przekształtnika DC/AC falownika sterowanego systemem PWM, dopasowującego parametry elektryczne (napięcie, prąd) do wymagań danego odbiornika. Rozwiązanie zaprezentowano na rys. 7.

Zastosowanie regulatora impulsowego DC/DC boost jest rozwiązaniem wymagającym zastosowania dodatkowo dławika (L). Wartość średnia napięcia U_{DC} zależy od współczynnika wypełnienia impulsu δ i można ją określić z zależności [4, 5, 7, 9, 10, 16, 18, 20-22]:

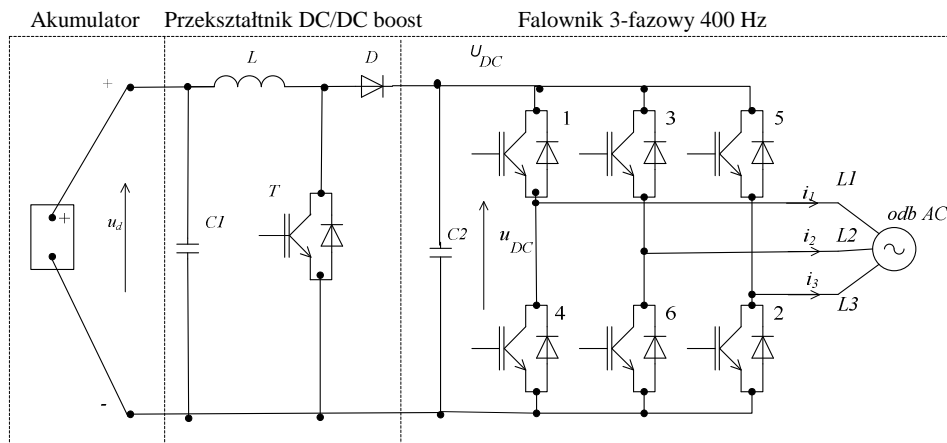
$$U_{DC} \cong \frac{1}{1-\delta} U_d, \quad \delta = \frac{t_z}{t_c} \quad (2)$$

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



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

Przekształtnik DC/DC boost jest jakby transformatorem podwyższającym DC i powinien zabezpieczyć odpowiednią wartość napięcia stałego na wejściu falownika U_{DC} , aby ten z kolei mógł generować znamionowe napięcie i prąd odbiorników lub odbiorników prądu przemiennego. Niestety przekształtniki impulsowe DC/DC boost charakteryzują się nieco mniejszą sprawnością energetyczną w porównaniu z innymi przekształtnikami impulsowymi.

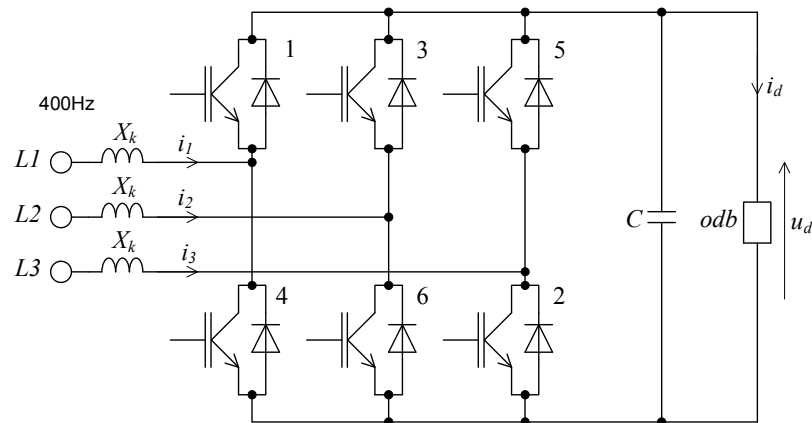


Rys. 7. Schemat układu zasilania odbiorników AC z akumulatora

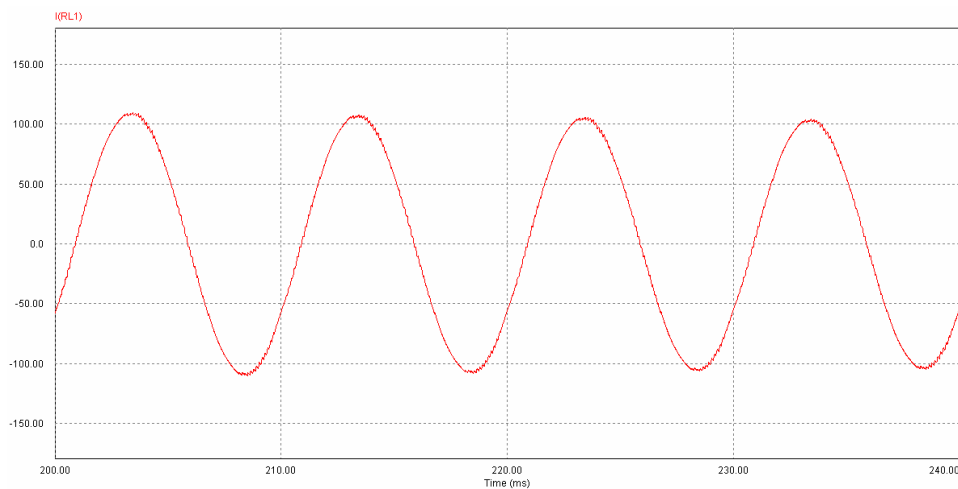
Dokonano pomiarów sprawności energetycznej przekształtników DC/DC boost przy obciążeniu $I_{DC} = 50$ A, napięciu $U_{DC} = 540$ V, częstotliwości impulsowania tranzystora T (rys. 6., 7.) $f = 7500$ Hz ($t_C = 13,3$ μ s) i napięciu $U_d = 24$ V. Uzyskana w takich warunkach sprawność to $\eta = 0,982$.

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.), generując wyższe harmoniczne.

Na ogół przebieg ten jest symetryczny względem osi czasu, dlatego występujące harmoniczne są rzędów nieparzystych $n = 3, 5, \dots$. Podstawowa harmoniczna ma 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 harmonicznych jest tu możliwe przez zastosowanie filtrów biernych LC lub filtrów aktywnych z wykorzystaniem techniki impulsowej. Najkorzystniejszym rozwiązaniem wydaje się tutaj zastosowanie konwertera AC/DC sterowanego w systemie modulacji PWM z 6 zespołami „tranzystor – dioda zwrotna” w układzie mostkowym jak na rys. 8.



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



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

Konwerter AC/DC sterowany z częstotliwością 7500 Hz daje możliwość uzyskania 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. Przy takim rozwiązaniu należy zwrócić uwagę na większą ustepliwość charakterystyki obciążenia za sprawą większego spadku napięcia w wyniku komutacji zaworów (tyrystorów, diod) przy podwyższonej częstotliwości [10].

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

gdzie: q – liczba pulsów,

I_d – wartość średnia prądu odbiornika,

X_k – reaktancja sieci; $X_k = 2\pi f$, $f = 400$ 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 dzięki wykorzystaniu 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 ułatwiona jest filtracja wyższych harmonicznnych w procesie zamiany napięcia AC na napięcie DC (prostowanie) z uwagi na ośmiokrotnie wyższą częstotliwość napięcia zasilania i wyższą częstotliwość wyższych harmonicznnych generowanych przez przekształtnik AC/DC.

Literatura

1. Binkowski T., *Modulatory w układach sterowania trójgłęziowego falownika napięcia*, Przegląd Elektrotechniczny, 2/2007, 6-8-LF.
2. Binkowski T., *Nadmodulacja w falowniku napięcia sterowanym układem z modulatorami szerokości i fazy impulsu*, Zeszyty Naukowe PRz 2007, z. 30, 5-13.

3. Binkowski T., *Ograniczanie składowych odkształceń w napięciach wyjściowych trójfazowego falownika napięcia z zastosowaniem wnioskowania rozmytego*, „Modelowanie i Symulacja” MiS-4, t. I, 2006, 105-113.
4. Binkowski T., *The fuzzy logic system in voltage inverter control with a distortion reduction*, Zeszyty Naukowe PRz 2007, z. 30, 15-23.
5. Buczek K., *Examination of high-speed induction motor fed by voltage inverter*, Komitet Elektrotechniki PAN, Archives of Electrical Engineering 2005, Vol. LIV, No. 3, 361-378.
6. Buczek K., *Simplified matrix converter control method*, Komitet Elektrotechniki PAN, Archives of Electrical Engineering 2006, Vol. LV, No. 1, 75-90.
7. Buczek K., Malska W., *Energoelektronika*, Materiały pomocnicze, 2011, 125.
8. Buczek K., Malska W., *Wykorzystanie energoelektroniki w odnawialnych źródłach energii*, Technical News 2010, 1(31), Lviv, Ukraine, 86-89.
9. Buczek K., Sobczyński D., *Analysis of Induction Motor and 330 Hz Inverter Drive System*, 13th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics, EDPE, 1999, 64-68.
10. Buczek K., Ziemiański W., *Badania możliwości i wykonanie podzespołów elektronicznych wchodzących w skład układów regulacyjnych przetwornic typu AZ-30R i PSCz-15*, zlec. WZU-3 w Żurawicy, spr. U-903/82, 86.
11. Buczek K., Knott M., Jurek B., *Opracowanie i badania elektronicznych regulatorów napędu posuwu drążarek typu EDA-16 i EDA-36 w Łańcuckiej Fabryce Śrub*, spr. U-1763/87, 56.
12. Malska W., *Prostownik diodowy o małym współczynniku THD prądów zasilających*, Przegląd Elektrotechniczny 2007, nr 2, 49-52.
13. Malska W., *Trójfazowy prostownik mostkowy 6T o małym współczynniku THD prądów zasilających*, IV Ogólnopolska Konferencja: „Modelowanie i Symulacja” MiS-4, Oddział Warszawski Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej, Kościelisko 2006, 65-72.
14. Malska W., *Układ przekształtnika AC/DC o zmniejszonym negatywnym oddziaływaniu na sieć zasilającą*, Wyd. SIGMA NOT, Wiadomości Elektrotechniczne 2005, t. LXXIII, z. 7-8, 49-50.
15. Malska W., Supronowicz H., Patent nr P-355324 pt. *Prostownik 6-pulsowy o poprawionym kształcie prądu wejściowego*, Urząd Patentowy RP, Warszawa 2009.
16. Piróg S., *Energoelektronika*, UWN-D, Kraków 2006.
17. Sobczyński D., *Design of inverter for high-speed motor*, 4th International Conference of PHD Students, University of Miskolc, Hungary, 2003, 207-211.
18. Sobczyński D., *Metoda modulacji wektorowej w falowniku dwufazowym*, Przegląd Elektrotechniczny 2007, nr 2, 71-74-LF.
19. Sobczyński D., *The analysis of properties of induction motor supplied from 300 Hz output voltage inverter*, 4th International Symposium on Microelectronic Technologies and Microsystems, Zwickau 2000, 58-65.
20. Sobczyński D., *Układ napędowy z dwufazowym wysokoobrotowym silnikiem indukcyjnym*, „Modelowanie i Symulacja” MiS-4, 2006, 37-40.

21. Sobczyński D., *Wysokoobrotowy układ napędowy z silnikiem indukcyjnym zasilanym z falownika*, Przegląd Elektrotechniczny 2006, nr 7-8, 24-31-LF.
22. Tunia H., Winiarski B., *Energoelektronika*, WNT, Warszawa 1994.

POWER ELECTRONIC CONVERTERS SUPPLYING AC OR DC LOADS FROM HIGH FREQUENCY GRID

Summary

In electrical equipments, especially in military range, the 400 Hz AC or DC load were used. Two generators and two power grids used recently are not economical (low efficiency) and difficult at technical range. This paper refers to the investigations that lead to the only one AC generator and 400 Hz AC grid usage for the supplying of all electrical and electronic equipments. The deck equipments supply needs the fitting converters usage.

Złożono w redakcji w lipcu 2011 r.

Autorzy:

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Buczek, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, 35-959 Rzeszów, e-mail: kbuczek@prz.edu.pl

Dr inż. Tomasz Binkowski, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, 35-959 Rzeszów, e-mail: tbinkow@prz.edu.pl

Dr inż. Wiesława Malska, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, 35-959 Rzeszów, e-mail: wmalska@prz.edu.pl

Dr inż. Dariusz Sobczyński, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, 35-959 Rzeszów, e-mail: dsobczyn@prz.edu.pl