

Ryszard Porada, Michał Gwóźdź
Politechnika Poznańska, Poznań

SZEROKOPASMOWE FALOWNIKI ENERGOELEKTRONICZNE NAPIĘCIA I PRĄDU

BROAD-BAND POWER ELECTRONIC INVERTERS OF VOLTAGE AND CURRENT

Abstract: Dynamic changes of parameters of energy sources and receivers are reasons that decrease exactitude of static and dynamic output signals towards reference signals. To improve these parameters, more advanced solutions of power electronics inverters are necessary. One of them are controlled voltage (current) sources. These special inverters may find many applications: as part of active compensation systems of voltage deformations in power network, in systems with power flow controllers, power electronics voltage reference generators as well as in modern electrical drives. Proposed by the authors structure of voltage (current) source is based on work of these systems in closed loop of negative feedback, controlled in PWM system with constant carrier frequency, where classical regulators are replaced by wide band filters. In the present work authors undertook test of use of adaptive digital filters for enlargements of exactitude work of these systems. The paper presents characteristics of system working in closed loop of feedback and shows basic quantities describing such system. Authors placed practical researches results of systems for different reference signals and conditions, where power electronic source has been tested as the power reference voltage (current) generator.

1. Wstęp

Zadaniem układów energoelektronicznych jest przekształcanie energii elektrycznej pobieranej z dostępnych technicznie źródeł energii o określonych wartościach napięcia/prądu i częstotliwości, na napięcie/prąd i częstotliwość wymagane przez odbiorniki energii elektrycznej, a także sterowanie przepływem tej energii. Zgodnie z obecnymi tendencjami związanymi z polepszaniem jakości energii, a także zwiększonymi wymaganiami technicznymi dotyczącymi dokładności sterowania, szybkości reakcji oraz odporności na zakłócenia ze strony odbiornika i/lub zasilania, czy potrzebą dokładnego odwzorowywania sygnałów zadanych (w określonym paśmie częstotliwości, zarówno w stanach statycznych, jak i dynamicznych) powodują, że wzrasta zapotrzebowanie na układy energoelektroniczne małej i dużej mocy, liniowe ze względu na wejście i wyjście, działające w czasie rzeczywistym [1,4,5,7]. Układy takie mogą znaleźć zastosowanie m.in. w elektroenergetyce do budowy filtrów aktywnych ograniczających harmoniczne napięcia i prądu w sieciach elektroenergetycznych, w elektroakustyce (jako wzmacniacze o szerokich pasmach przenoszonych częstotliwości) oraz w wielu dziedzinach specjalnych (m.in. różnego rodzaju generatory przebiegów energetycznych wielkości wzorcowych), a także jako układy realizujące np. optymalne sterowanie napędów

elektrycznych. W ostatnich latach prowadzone są, zakrojone na szeroką skalę, badania związane ze zjawiskami, jakie wywołuje zastosowanie energoelektronicznych falowników w napędzie elektrycznym. Dotyczy to m.in. wpływu takiego sposobu zasilania na silnik, jego trwałość, niezawodność, a także całego układu napędowego na otoczenie. Zagadnienia te obejmują m.in. problemy kompatybilności elektromagnetycznej oraz wpływ wytwarzanego hałasu na człowieka.

Cechą charakterystyczną dotychczas proponowanych falowników, służących do regulacji napięć, prądów czy częstotliwości, jest duża zawartość harmonicznych w stosunku do przebiegu zadanego. Dlatego proponowane są dodatkowe sposoby formowania napięcia wyjściowego (np. modulacja MSI). Mimo tego, zastosowanie typowych falowników MSI, szczególnie w napędzie elektrycznym powoduje szereg dodatkowych problemów, wywołanych głównie dużą szybkością narastania napięcia wyjściowego, tzn. zwiększenie poziomu zakłóceń przewodzonych i emitowanych, błędne działanie zabezpieczeń upływnościowych, możliwość powstawania napięcia na obudowie silnika, przepięcia na zaciskach silnika w układach z kablem zasilającym czy elektroerozja łożysk. Problematyka ta jest istotna także ze względu na to, że w pracach modernizacyjnych

falowniki są instalowane w układach z silnikami o przestarzałej konstrukcji. Potrzeba obniżenia uciążliwości hałasu tych napędów jest związana z dążeniami do polepszenia warunków pracy obsługi. Przyczynia się to do poszukiwania nowych rozwiązań układowych oraz metod sterowania przekształtników.

2. Ogólna struktura szerokopasmowego źródła energii

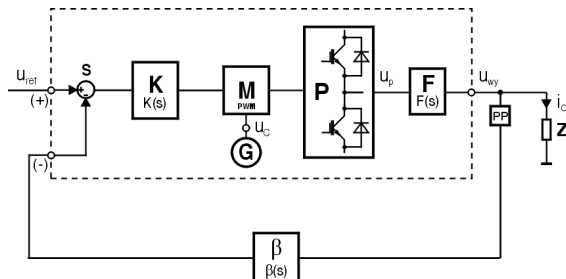
Uzyskanie liniowego przenoszenia sygnałów napięcia lub prądu (w określonym paśmie częstotliwości, przy założonym poziomie błędów odwzorowania oraz dobrych właściwościach statycznych i dynamicznych) przez układy przekształtnikowe jest jednym z istotnych zadań energoelektroniki.

Cechą charakterystyczną dotychczas proponowanych falowników [2], służących do regulacji parametrów sygnałów wyjściowych (napięć, prądów i/lub częstotliwości) przekształtników energii elektrycznej, jest duża zawartość harmonicznych w stosunku do zadanego przebiegu wyjściowego. Dlatego proponowane są nowe metody odpowiedniego formowania napięcia wyjściowego (np. różne odmiany modulacji MSI), łączone często z zastosowaniem dodatkowych filtrów pasywnych na wyjściu układu. Mimo stosowanych środków jakość tych sygnałów jest niewystarczająca, a możliwości regulacyjne, tzn. jednoczesna zmiana w szerokim zakresie wartości częstotliwości oraz amplitudy i kształtu sygnałów wyjściowych – znacznie ograniczone.

Proponowana przez autorów struktura szerokopasmowych energoelektronicznych źródeł napięcia i prądu oparta jest na pracy tych układów jako układów zamkniętych, z wykorzystaniem modulacji MSI przy stałej częstotliwości nośnej, sterowanych filtrami cyfrowymi [1,4,5,6]. Sprzężenia zwrotne spełniają odpowiednią rolę (zależnie od przeznaczenia układu) w kształtowaniu sygnałów wyjściowych o zadanych właściwościach. Umożliwia to znaczne podniesienie jakości sygnałów napięcia/prądu na wyjściu energetycznym układów w stosunku do sygnałów zadanych (wzorcowych), a także dobre właściwości statyczne i dynamiczne.

Ogólną strukturę układu (rysunek 1) tworzą: sumator (S), filtr w torze sterowania K z ogranicznikiem amplitudy, modulator MSI (M), przekształtnik energoelektroniczny (P) z układem sterowania i zabezpieczeń, filtr wyjściowy F o strukturze zależnej od zastosowań, prze-

tworniki pomiarowe sygnałów (PP) wymaganych dla realizacji odpowiednich sprzężeń zwrotnych, filtr β w torze sprzężenia kształtujący pożądaną charakterystykę częstotliwościową układu oraz odbiornik Z_o .



Rys. 1. Ogólny schemat ideowy energoelektronicznego, niezależnego sterowanego źródła energii

Układ ten zawiera człony silnie nieliniowe, jakimi są modulator (M) oraz przekształtnik (P). Wpływa to niekorzystnie na stabilność układu zamkniętego. Nieliniowości te muszą być kompensowane w sposób optymalny dla uzyskania możliwie najlepszej jakości sygnałów wyjściowych, za pomocą układu dwóch filtrów: wejściowego (w torze sterowania) K i wyjściowego filtru pasywnego F .

Zadaniem filtru pasywnego F jest skuteczne tłumienie składowych o wyższych częstotliwościach w przebiegu sygnałów wyjściowych. Struktura i charakterystyka częstotliwościowa tego filtru jest zależna od zastosowania układu w charakterze źródła prądu lub napięcia. W przypadku źródła prądu wystarczający jest najczęściej filtr dolnoprzepustowy pierwszego rzędu (w postaci szeregowej indukcyjności). Dla pracy układu jako źródła napięcia niezbędny jest filtr dolnoprzepustowy co najmniej rzędu drugiego (np. o najprostszej strukturze gamma). Stosowanie możliwie najprostszych struktur filtru F ma swoje uzasadnienie praktyczne, gdyż zmniejsza jego wymiary i ciężar. Impedancja odbiornika Z_o wpływa również na charakterystykę częstotliwościową filtru F , zmieniając jego częstotliwość rezonansową oraz dobroć. Jest to typową wadą tego typu filtrów, gdyż znacząco wpływa na transmitancję całego układu, powodując ograniczenie pasma przenoszenia oraz niestabilność pracy.

Dla zapewnienia szerokiego pasma przenoszenia, przekształtnik jako struktura zamknięta powinien mieć charakterystykę zbliżoną do charakterystyki idealnego filtru dolnoprze-

stowego o maksymalnie dużej częstotliwości granicznej [5]. Jedną z możliwych transmitancji o zbliżonych właściwościach, uwzględniającą opóźnienie wnoszone przez przekształtnik (P) ma postać:

$$T(s) = \frac{\exp(-sT_c)}{(1 + s\tau) + \beta(s)\exp(-sT_c)} \quad (1)$$

przy czym: τ – stała czasowa układu, T_c – okres przebiegu nośnego MSI. Dla zapewnienia stabilności układu graniczna wartość stałej czasowej powinna spełniać relację $\tau < 4T_c$. Narzuca to jednocześnie wartość częstotliwości rezonansu własnego filtra wyjściowego F . Okres T_c ma zasadniczy wpływ na pasmo przenoszenia, natomiast stała czasowa τ – na kształt charakterystyki częstotliwościowej. Uwzględniając strukturę (rys. 1) oraz pożądaną transmitancję układu (1), transmitancja filtra wejściowego K ostatecznie przyjmuje postać ogólną:

$$K(s) = \frac{1}{1 + s\tau} \frac{1}{F(s)} \quad (2)$$

Zadaniem filtra K jest kompensacja wpływu opóźnienia wnoszonego przez przekształtnik (P), a także pasywnego filtra wyjściowego F i obciążenia (w ogólnym przypadku nieliniowego i niestacjonarnego), na transmitancję układu zamkniętego. Parametry tego filtra powinny zatem zmieniać się w taki sposób, aby odpowiednio kształtować charakterystykę amplitudowo-fazową układu, dla zapewnienia jak najszerszego pasma przenoszenia częstotliwości przy możliwie dużej wartości współczynnika wzmocnienia i odpowiednim marginesie stabilności układu zamkniętego. Wpływa to zasadniczo na zdolność układu do kształtowania odpowiedzi układu. Można to uzyskać przez zastosowanie metod adaptacyjnych [1,3,4,5,6,9].

Układ szerokopasmowego energoelektronicznego źródła energii jest sterowany za pomocą układu cyfrowego. Podstawowym problemem w takim przypadku jest dobór właściwej częstotliwości próbkowania (szczególnie przy pracy w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego) w stosunku do częstotliwości nośnej MSI. Zbyt mała częstotliwość ogranicza wzmocnienie układu zamkniętego, co niekorzystnie wpływa na dokładność odwzorowania sygnałów wzorcowych na wyjściu energetycznym układu. Optymalizacja pracy tych układów powinna być także związana z zagadnieniami kompatybilności elektromagnetycznej. W przypadku

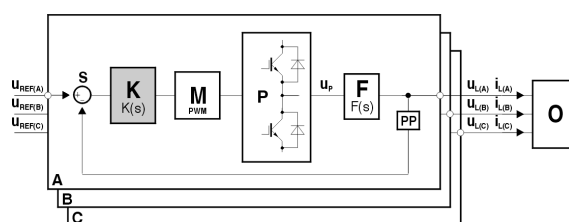
omawianych źródeł energii nieskompensowane produkty modulacji MSI są stosunkowo niewielkie, jednak mimo to mogą one oddziaływać niekorzystnie na środowisko i zasilany odbiornik. Możliwa jest minimalizacja tego oddziaływania przez wybór odpowiedniego sterowania zaworami przekształtnika (P) [5].

3. Struktura sprzętowa układów

Prototyp szerokopasmowego układu źródła energii (napiecia i prądu) – rys. 2, 3, wykonano wykorzystując moduły tranzystorowe IPM (zasilanie za pomocą mostka prostownikowego, przekształtnik w klasycznej konfiguracji 3-fazowej, 3-gałęziowej, z autonomicznymi układami sterowania dla każdej fazy) oraz system uruchomieniowy trzeciej generacji (rysunek 4) ALS-G3-262 ze zmiennoprzecinkowym procesorem sygnałowym Analog Devices ADSP-21262S SHARC™.



Rys. 2. Widok ogólny prototypu szerokopasmowego źródła energii



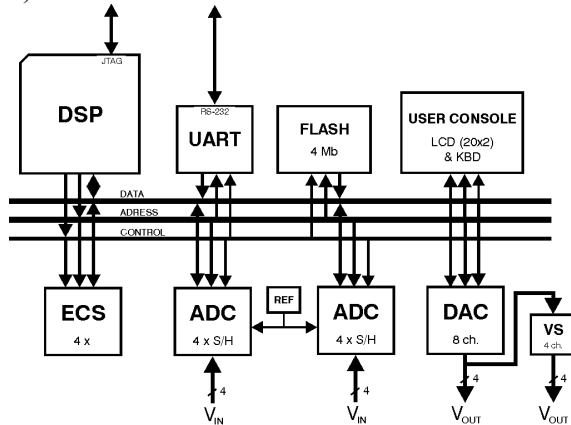
Rys. 3. Schemat blokowy prototypu szerokopasmowego źródła energii

Układ szerokopasmowego źródła energii, którego schemat blokowy pokazano na rysunku 3, składa się z następujących modułów funkcjonalnych i elementów:

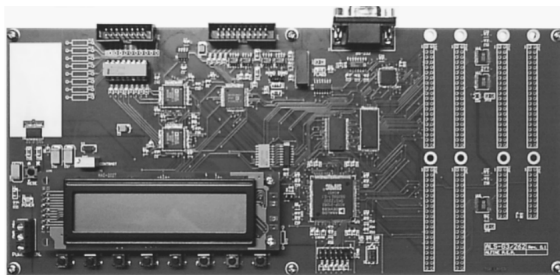
- modułu sterowania (K) w postaci systemu mikrokomputerowego,
- modulatora MSI (M) w postaci opracowanego przez autorów energoelektronicznego źródła prądu,

- przekształtnika tranzystorowego IPM (P),
- analogowego filtra pasywnego LC o najprostszej strukturze Γ ,
- przetworników pomiarowych (PP) napięcia lub prądu.

a)



b)



Rys. 4. System uruchomieniowy ALS-G3-262:
a) schemat blokowy; b) widok ogólny

W skład struktury prototypu oraz systemu uruchomieniowego wchodzi następujące elementy:

- zmiennoprzecinkowy procesor sygnałowy Analog Devices ADSP-21262S SHARC™ (400 MIPS, 1200 MFLOPS, 2 Mb SRAM),
- blok analogowo-cyfrowy oraz cyfrowo-analogowy (A/C: 14 bit, 8 kan., 8xS/H, 100-250 kSps, +/- 2,5 V; C/A: 10 bit, $t_H=4$ us, 4 kan., 0-5 V, 4 kan. +/- 2,5 V),
- interfejsy komunikacyjne: RS-232, SPORT (DSP), JTAG,
- zintegrowany wyświetlacz LCD oraz klawiatura.

System uruchomieniowy ALS-G3-262 jest przeznaczony do wdrażania zaawansowanych algorytmów sterowania oraz zastosowań w technice pomiarowej. System charakteryzuje bardzo duża moc obliczeniowa dzięki zastosowaniu zmiennoprzecinkowego procesora sygnałowego Analog Devices SHARC™ 3-generacji.

Zastosowany interfejs analogowy, wyposażony w 14-bitowe przetworniki analogowo-cyfrowe z jednoczesnym próbkowaniem 8 kanałów

analogowych (prądowych lub napięciowych, bipolarnych) oraz wysokostabilne źródło napięcia odniesienia, zapewnia dokładność wystarczającą dla zaawansowanych technik pomiarowych. Ośmiokanałowy przetwornik C/A z wyjściami napięciowymi (4 kanały unipolarne, 4 kanały bipolarne) ułatwia śledzenie przebiegów wielkości cyfrowych.

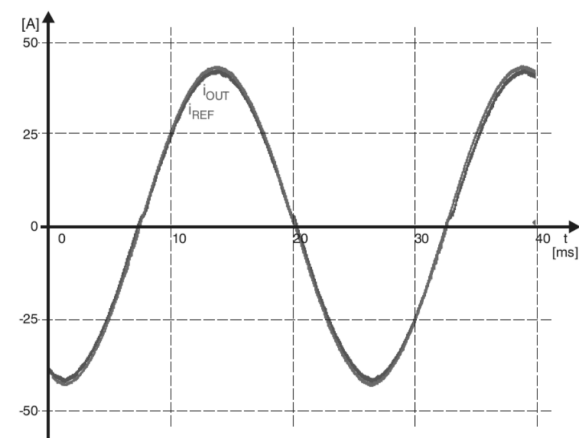
System wyposażono w szereg interfejsów komunikacyjnych, jak: SPORT, UART oraz JTAG oraz gniazda dla kart rozszerzających, pracujących w standardzie TTL 3,3 oraz 5 V.

Zintegrowana konsola operatorska umożliwia bezpośrednie wprowadzanie parametrów algorytmów cyfrowych, a pamięć FLASH rejestruje wyniki ich działania.

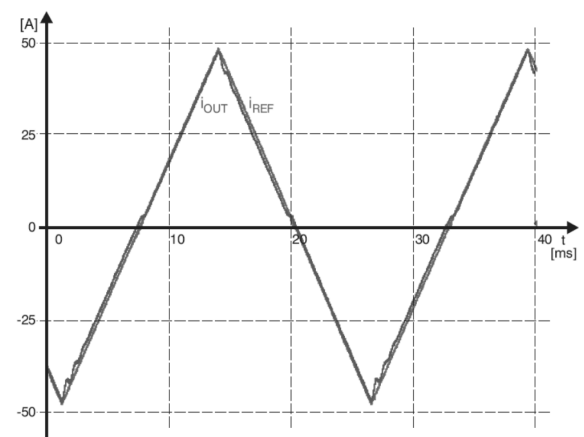
4. Wyniki badań układów prototypowych

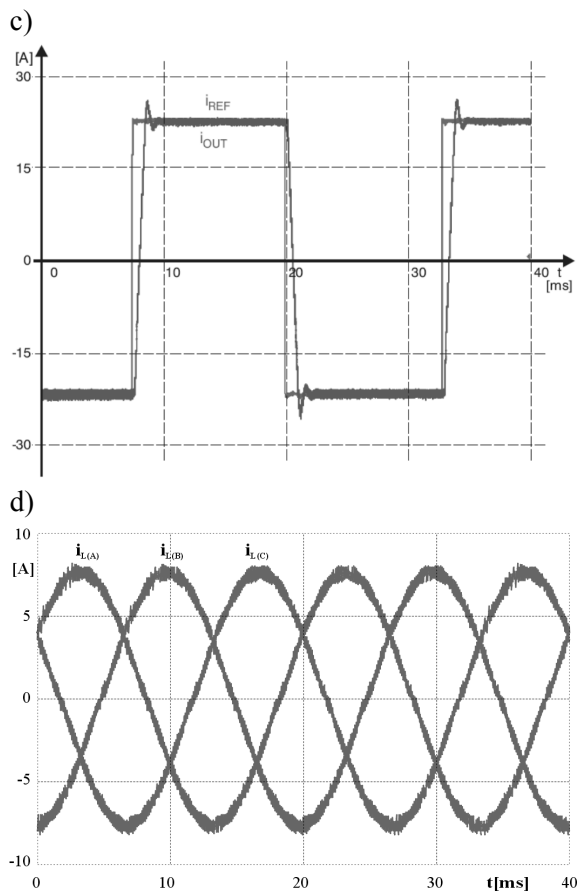
Przeprowadzono szerokie badania prezentowanych układów dla weryfikacji założeń teoretycznych. Wybrane wyniki badań prototypu w postaci przebiegów charakterystycznych wielkości pokazano na rysunkach 5 i 6, odpowiednio: dla źródła prądu – rysunek 5 oraz dla źródła napięcia – rysunek 6.

a)



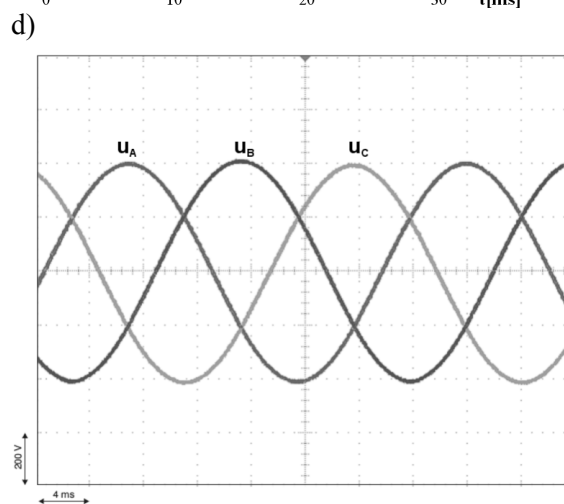
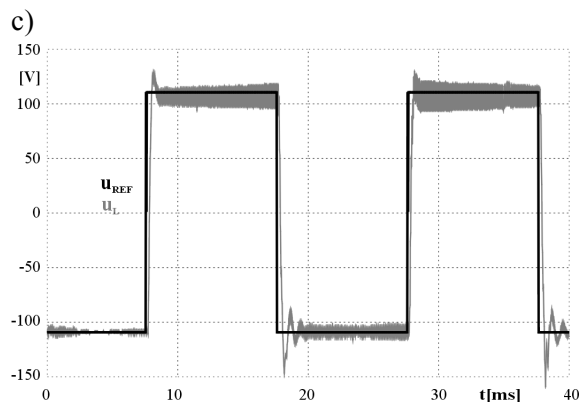
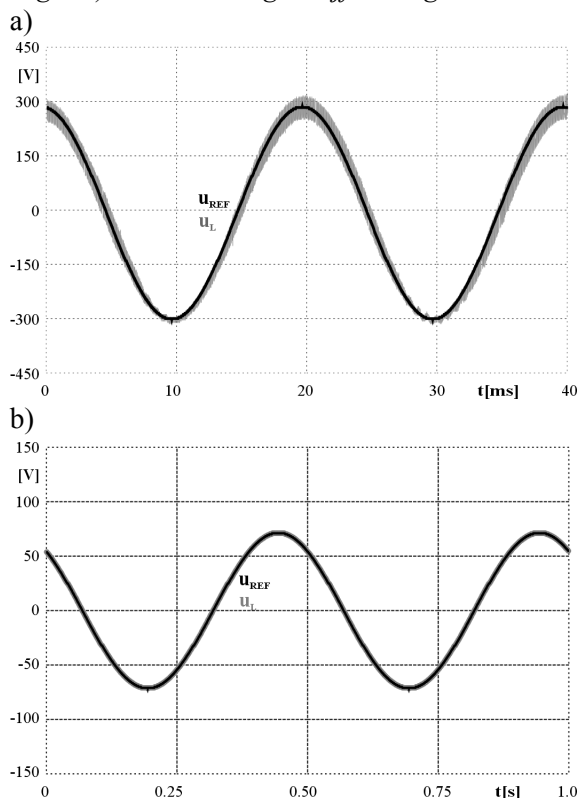
b)





Rys. 5. Przebiegi prądów wyjściowych dla przebiegów zadanych o częstotliwości 50 Hz:

a) sinusoidalnego, b) trójkątnego; c) prostokątnego; d) sinusoidalnego trójfazowego



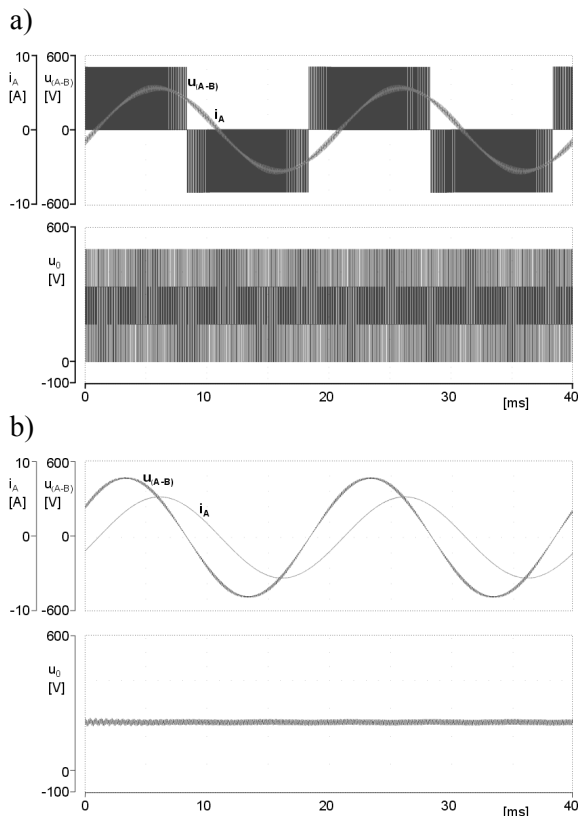
Rys. 6. Przebiegi napięć: wzorcowego u_{REF} oraz wyjściowego u_L dla sygnałów zadanych:

a) sinusoidalnego – 50 Hz; b) sinusoidalnego – 2 Hz; c) prostokątnego – 50 Hz; d) sinusoidalnego trójfazowego

Z przeprowadzonych badań wynika, że możliwe jest generowanie sygnałów napięcia i prądu o zadanych kształtach (sinusoidalny, trapezowy, trójkątny wraz ze składową stałą). Przy zastosowanej częstotliwości nośnej MSI 12 kHz i częstotliwości próbkowania 48 kHz, użyteczne pasmo przenoszenia wynosiło ok. 2,5 kHz; zniekształcenia nieliniowe przebiegów wyjściowych były nie większe niż 0,7 % w paśmie 1 kHz oraz ok. 1,5 % w paśmie 2,5 kHz, błąd statyczny (DC) ok. 0,3 %, przy zachowaniu dobrej dynamiki i stabilności odwzorowania wielkości zadanych. Zakres regulacji częstotliwości mieścił się w przedziale 0-150 Hz, zakres regulacji amplitudy – w przedziale (0,01-1) znamionowej wartości wyjściowej, zarówno dla źródła napięcia jak i prądu.

Na rysunku 7 pokazano przebiegi: napięcia międzyfazowego, prądu fazowego i napięcia w punkcie neutralnym uzwojenia stojana silnika indukcyjnego przy zasilaniu z falownika kla-

sycznego oraz proponowanego niezależnego źródła napięcia.



Rys. 7. Przebiegi: napięcia międzyfazowego, prądu fazowego i napięcia w punkcie neutralnym uzwojenia stojana silnika indukcyjnego przy zasilaniu z: a) falownika klasycznego, b) szerokopasmowego źródła napięcia

Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, że wykorzystanie w napędzie elektrycznym falowników o przedstawionej strukturze może wyeliminować szereg problemów wynikających ze stosowania falowników klasycznych, ze względu na:

- praktycznie sinusoidalne, regulowane napięcie wyjściowe, a tym samym wzrost sprawności energetycznej silnika,
- praktycznie stały poziom napięcia w punkcie neutralnym,
- możliwość stosowania w układzie napędowym standardowego (a więc tańszego) silnika,
- minimalizację poziomu zakłóceń elektromagnetycznych emitowanych przez przekształtnik,
- redukcję hałasu oraz wibracji wytwarzanych przez silnik, co daje wzrost trwałości mechanicznej napędu.

Wyniki badań pokazały, że zakładany cel pracy, polegający na opracowaniu szerokopasmowego energoelektronicznego źródła energii, sterowa-

nego w systemie MSI, mającego cechy układu liniowego (ze względu na wejście i wyjście), przy możliwych do zaakceptowania wartościach błędów, został osiągnięty.

Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, że wykorzystanie w napędzie elektrycznym (a także w innych zastosowaniach) falowników o przedstawionych przez autorów właściwościach może wyeliminować szereg problemów wynikających z zasilania odbiorników przez falowniki klasyczne.

5. Literatura

- [1]. Gwóźdź M., Porada R.: *Adaptacyjne sterowanie energoelektronicznym źródłem napięcia*. Mat. Konf. IC-SPETO'01, Gliwice-Ustroń, 23-26 maja 2001, t. 2, s. 2.383-2.386
- [2]. Mohan N.: *Power electronics*. John Wiley&Sons, New York 1989
- [3]. Niederliński A., Mościński J., Ogonowski Z.: *Regulacja adaptacyjna*. PWN, Warszawa, 1995
- [4]. Porada R., Gwóźdź M.: *Zastosowanie adaptacyjnych filtrów cyfrowych w układach sterowania energoelektronicznych źródeł napięcia i prądu*. Mat. Konf. IC-SPETO'00, Gliwice-Ustroń, 24-27 maja 2000, s. 329-332
- [5]. Porada R., Gwóźdź M.: *Optymalizacja czasowo-częstotliwościowych parametrów niezależnych źródeł energii w strukturach zamkniętych*. Mat. Konf. IC-SPETO'04, Gliwice-Niedzica, 26-29 maj 2004, t. 2, s. 293-296
- [6]. Rutkowski L.: *Filtry adaptacyjne i adaptacyjne przetwarzanie sygnałów*. WNT, Warszawa 1994
- [7]. Seliga R., Koczara W.: *High Quality Sinusoidal Voltage Inverter for Variable Speed AC Drive Systems*. EPE-PEMC2002 Cavtat & Dubrovnik, 9-11 September 2002
- [8]. Szabat J.: *Podstawy teorii sygnałów*. WKŁ, Warszawa 2000
- [9]. Treichler C.R., Johnson J.R., Larimore M.G.: *Theory and Design of Adaptive Filters*. New York, J. Wiley, 1987

Dane o autorach

dr hab. inż. Ryszard Porada
 e-mail: Ryszard.Porada@put.poznan.pl
 dr inż. Michał Gwóźdź
 e-mail: Michal.Gwozdz@eranet.pl
 Politechnika Poznańska
 Instytut Elektrotechniki Przemysłowej
 ul Piotrowo 3a
 60-965 Poznań