

Ryszard Porada, Michał Gwóźdź  
Politechnika Poznańska, Poznań

## BADANIA WPŁYWU ZASILANIA NA WŁAŚCIWOŚCI NAPEŁDU INDUKCYJNEGO PRZY ZASTOSOWANIU TYPOWEGO PRZEMIENNIKA CZĘSTOTLIWOŚCI ORAZ SZEROKOPASMOWEGO FALOWNIKA NAPIĘCIA

### RESEARCHES OF INFLUENCE OF THE POWER SUPPLY ON PROPRIETY OF INDUCTIVE DRIVE WITH APPLICATION OF TYPICAL FREQUENCY CONVERTER AND BROADBAND VOLTAGE INVERTER

**Abstract:** Over the recent years are performed researches concerning negative results of usage of frequency converters in electric drives. This refers among other things to influence of such manner on power supply of the engine, its durability, reliability, and also the all driving system on the environment. This is also connected with problems of the electromagnetic compatibility. Reasons causing the most negative influences of MSI inverters on electrical motor can be significantly reduced or even eliminated by use of the new generation MSI inverters with sinusoidal shape of the output voltage. Proposed by authors broadband power electronic voltage source uses the idea of closed loop system with negative voltage feedback, controlled in the MSI modulation with constant carrier frequency and with replacement of classical regulators broadband by digital filters. Presented in the article results clearly show that by applying in the electric drive the new generation inverters we can eliminate most problems resulting from usage of classical MSI inverters.

#### 1. Wstęp

W ostatnich latach prowadzone są badania związane z negatywnymi skutkami stosowania przemienników częstotliwości w napędzie elektrycznym. Dotyczy to m.in. wpływu takiego sposobu zasilania na silnik, jego trwałość, niezawodność, a także całego układu napędowego na otoczenie. Jest to także związane z problemami kompatybilności elektromagnetycznej oraz uciążliwością wytwarzanego hałasu na człowieka.

Cechą charakterystyczną dotychczas stosowanych przemienników częstotliwości, służących do regulacji napięć, prądów i/lub częstotliwości, jest szczególnie duże odkształcenie napięcia wyjściowego w stosunku do zadanego przebiegu sinusoidalnego. Dlatego stosowane są dodatkowe sposoby formowania napięcia wyjściowego (m.in. różne modyfikacje modulacji MSI). Mimo stosowanych środków, jakość tych sygnałów jest niewystarczająca, a możliwości regulacyjne znacznie ograniczone [5,10]. Zastosowanie typowych przemienników częstotliwości w napędzie elektrycznym powoduje szereg dodatkowych problemów, wywołanych głównie dużą szybkością narastania napięcia wyjściowego, np. 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 ujawnia się 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 ogólnoswiatowymi dążeniami do polepszenia warunków pracy obsługi. Przyczynia się to do poszukiwania nowych rozwiązań układowych.

#### 2. Charakterystyka zjawisk związanych z zasilaniem silnika z falownika MSI

Badania wpływu sposobu zasilania maszyny elektrycznej na parametry układu napędowego umożliwiają określenie niektórych istotnych wskaźników ilościowych oraz jakościowych, które charakteryzują pracę tych układów napędowych. Należą do nich m.in. sprawność energetyczna, przepięcia na zaciskach silnika i falownika oraz prądy upływowe przy zasilaniu kablowym, a także zakłócenia elektromagnetyczne czy poziom emitowanego hałasu.

Zjawisko fali odbitej występujące przy zasilaniu silnika za pośrednictwem linii kablowej może powodować przepięcia na zaciskach silnika, groźne dla izolacji silnika [11]. Przepięcia

te są związane z niedopasowaniem impedancyjnym układu kabel-silnik, a ich wartość wzrasta wraz ze zwiększaniem częstotliwości nośnej modulacji MSI. Wartość tych przepięć zależy od długości kabla, a szybkość jej pojawiania jest zależna od pojemności i indukcyjności kabla: te parametry oraz czas przełączania zaworów falownika MSI określają odległość, przy której fala odbita osiąga największą wartość. Amplituda pojawiających się przepięć może być dwa do trzech razy większa niż napięcie DC falownika. Wartość szczytowa i czas narastania fali odbitej może niekorzystnie wpłynąć na izolację uzwojeń silnika, doprowadzając do zwarć wewnętrznych uzwojeń, szczególnie w przypadku występowania defektów izolacji. Zapobiega się temu m.in. przez instalowanie odpowiednio dobranych filtrów pasywnych, instalowanych blisko silnika, powodując dopasowanie impedancji silnika i kabla, co może skutkować powstawaniem spadków napięcia na zaciskach silnika, zmieniających moment obrotowy silnika. Stosuje się także filtr na wyjściu falownika szczególnie wtedy, gdy ze względów środowiskowych (np. zagrożenie wybuchem) nie ma możliwości montowania filtra blisko zacisków silnika. Można także zastosować silniki z bardziej wytrzymałą izolacją lub – jeżeli jest to możliwe – ograniczyć długości kabla zasilającego silnik.

Innym problemem jest dobór właściwego rodzaju kabla łączącego falownik z silnikiem [11]; należy to rozpatrywać w następujących aspektach:

- wpływu rodzaju kabla na wypadkowe obciążenie falownika,
- kompatybilności elektromagnetycznej kabla,
- odporności izolacji kabla na oddziaływanie impulsów napięcia o stromych zboczach,
- jakości i budowy żył przewodzących kabla.

Każdy kabel będący układem jednej lub wielu żył przewodzących w ewentualnym ekranie (również przewodzącym) charakteryzuje indukcyjność oraz pojemność pasożytnicze. Pojemność wynika z istnienia elementów przewodzących oddzielonych izolatorem. Impedancja ta maleje wraz ze wzrostem częstotliwości nośnej modulacji MSI, powodując zwiększenie prądu płynącego przez pojemności pasożytnicze (pojemność pasożytnicza składa się z sześciu połączonych równolegle kondensatorów międzyżyłowych oraz cztery zastępcze kondensatory żyła/ekran). Wartość tego prądu sumuje się z właściwym obciążeniem przekształtnika, co w

krytycznym przypadku prowadzi do konieczności przewymiarowania falownika w aplikacjach z długimi kablami.

Drugim istotnym aspektem zastosowania właściwych kabli jest potrzeba spełnienia wymogów kompatybilności elektromagnetycznej. Z tego punktu widzenia kable powinny być wyposażone w podwójny ekran, zapewniający „szczelność elektromagnetyczną” porównywalną z kablami sygnałowymi (kable z pojedynczym ekranem oraz tzw. kable opancerzone nie spełniają wymogów kompatybilności elektromagnetycznej). Ponadto ekran powinien być uziemiony na obu końcach, najlepiej na całym obwodzie oplotu.

Prądy upływowe wynikające z zasilania silników falownikami MSI utrudniają zapewnienie ochrony osób w instalacjach z przemiennikami. Uwarunkowania wynikające z konieczności zapewnienia kompatybilności elektromagnetycznej powodują, że prądy upływu są odprowadzane przez przewód ochronny (ziemię), co jest jednak niepożądane z punktu widzenia zabezpieczeń różnicowoprądowych. Prądy upływu mogą być bardzo duże, powodując nieuzasadnione, zbędne wyłączenia. Z tego powodu przy stosowaniu przemienników częstotliwości często rezygnuje się z ochrony wyłącznikiem różnicowoprądowym o znamionowym prądzie różnicowym 30 mA. Dodatkowo przy uszkodzeniu izolacji w przemienniku może pojawić się prąd różnicowy stały i spowodować nasycenie rdzenia przekładnika wyłącznika różnicowoprądowego. Wyłącznik ten staje się wtedy nieczuły na dodatkowy prąd różnicowy przemienny.

Prądy upływowe tworzą dwa widma częstotliwości. Dolne widmo częstotliwości jest wzbudzone przez prostownik wejściowy (główne pasmo częstotliwości od 50 Hz do 1 kHz). Górne widmo częstotliwości jest wywoływane przez częstotliwość przetwarzania napięcia w falowniku MSI (praktycznie 2 kHz do 16 kHz). Wartość prądów upływowych zależy od występujących pojemności względem przewodu ochronnego, przy czym obok przemiennika częstotliwości trzeba także uwzględnić silnik, a szczególnie przewody zasilające.

Przedmiotem badań są także problemy związane z uciążliwością hałasu wytwarzanego przez silnik zasilany w taki sposób. Problematyka hałasu wiąże się głównie z zastosowaną w danym przekształtniku metodą modulacji. Jednym ze źródeł hałasu są siły magnetyczne, któ-

rych charakter zależy od widma harmonicznych napięcia zasilającego silnik. Hałas magnetyczny ma swoje źródło w siłach magnetycznych powodujących odkształcenia sprężyste elementów konstrukcyjnych silnika i pobudzających w ten sposób fale akustyczne [2]. Ten rodzaj hałasu można także zmniejszać poprzez zmianę warunków pracy silnika (np. obniżenie strumienia).

W większości stosowanych w przemyśle falowników napięcia MSI, częstotliwość przełączeń zaworów jest stała dla stałej częstotliwości napięcia wyjściowego przekształtnika. Taki sposób modulacji powoduje, że w widmie napięcia i prądu silnika, oprócz podstawowej harmonicznej, pojawiają się wyższe harmoniczne, które układają się w wyraźne prążki wokół częstotliwości przełączeń i jej wielokrotności. W efekcie w silniku występują dodatkowe siły magnetyczne, powodujące wibracje i wytwarzanie dodatkowego hałasu o częstotliwościach zgodnych z częstotliwością przełączeń i jej wielokrotnościami.

Problem obniżenia hałaśliwości układu napędowego z przemiennikiem częstotliwości można rozwiązać poprzez zastosowanie ekranów dźwiękochłonnych, ale wymaga to dodatkowych nakładów i nie zawsze jest możliwe do zastosowania ze względów eksploatacyjnych. Inną drogą jest wykorzystanie przekształtników o bardzo wysokich częstotliwościach przełączeń (powyżej 15 kHz), które wprawdzie powodują wytwarzanie dodatkowego hałasu, ale niesłyszalnego dla człowieka. Jest to raczej rozwiązanie stosowane dla przekształtników małej mocy, a poza tym zwiększanie częstotliwości przełączeń powoduje wzrost problemów z kompatybilnością elektromagnetyczną urządzenia (większe źródło zakłóceń).

Zasadniczym problemem w tego typu układach napędowych jest przede wszystkim zmniejszenie uciążliwości hałasu. Drogą prowadzącą do tego celu może być rozmycie widma napięcia zasilającego silnik w taki sposób, aby nie pojawiały się tam wyraźne prążki pochodzące od częstotliwości przełączeń falownika i jej wielokrotności. Można to uzyskać przez zastosowanie, do sterowania zaworami falownika, modulacji stochastycznej [1].

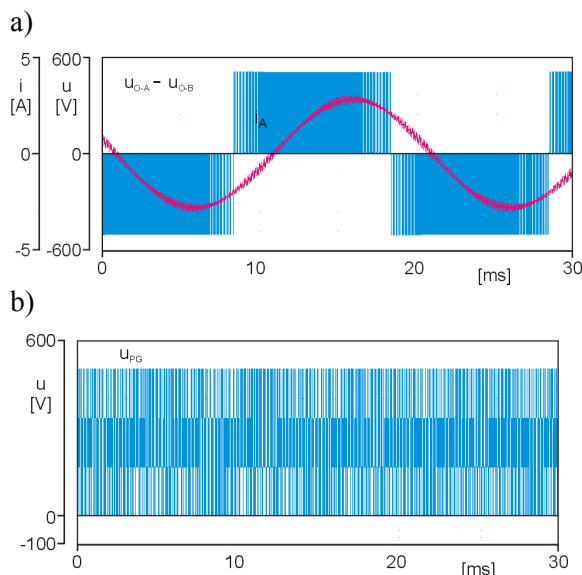
Problematyka uciążliwości hałasu w napędach częstotliwościowych MSI ujawnia się szczególnie w związku z pracami modernizacyjnymi – przemienniki są instalowane w układach z silnikami o przestarzałej konstrukcji, generują-

cymi bardziej uciążliwy hałas niż silniki współczesne. Potrzeba obniżenia uciążliwości hałasu tych napędów jest związana z ogólnosiłowymi dążeniami do polepszenia warunków pracy obsługi.

Inne problemy związane z negatywnymi skutkami zastosowanie falowników MSI są związane z miejscem i sposobem zainstalowania (podłączenia, rodzaj kabli itd.) oraz jakością uziomów lokalnych. Praktycznie zdarza się, że zakłócenia elektromagnetyczne stają się najważniejszym problemem eksploatacyjnym. Sytuację taką spotyka się najczęściej w pompowniach osiedlowych [4], gdy przemiennik częstotliwości i zasilający go transformator znajdują się w jednym pomieszczeniu, i gdy dodatkowo, oddzielenie przewodu zerowego i uziomu sieci jest niemożliwe. Wówczas środki techniczne służące eliminacji zakłóceń elektromagnetycznych mogą okazać się droższe od samego układu sterowania, i często uzasadniona jest rezygnacja ze stosowania przemiennika częstotliwości.

### 3. Główne przyczyny negatywnego oddziaływania falownika MSI

Główną przyczyną niekorzystnego oddziaływania falownika MSI na maszynę elektryczną jest bardzo duża stromość zmian napięcia na jego wyjściu – rzędu kilku kV/ $\mu$ s.



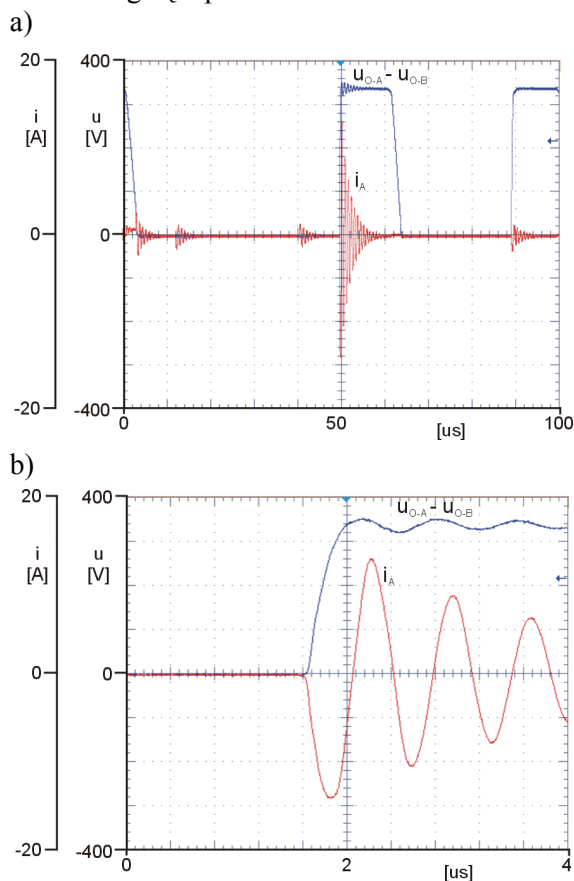
Rys. 1. Przebiegi napięcia międzyfazowego i prądu fazowego (a) oraz napięcia punktu gwiazdowego (b) silnika małej mocy zasilanego ze standardowego falownika MSI

Wpływ na to mają lepsze parametry dynamiczne zaworów półprzewodnikowych mocy

(IGBT, MOS) które, z jednej strony pozwalają na zwiększenie jakości sterowania i sprawności energetycznej samego przekształtnika, z drugiej przyczyniają się do powstania nowych problemów techniczno-eksploatacyjnych.

Rysunek 1 przedstawia przebiegi napięcia międzyfazowego, prądu fazy oraz napięcia punktu gwiazdowego silnika klatkowego małej mocy zasilanego ze standardowego falownika MSI. Przebieg prądu zawiera widoczne składowe MSI (rys. 1a), a potencjał punktu gwiazdowego (rys. 1b) podlega bardzo dużym i szybkim zmianom – w następstwie zmian napięć na wyjściach poszczególnych gałęzi 3-fazowego mostka.

Na rysunku 2 pokazano przebieg prądu fazowego związanego z chwilami przełączenia zaworów w gałęzi przekształtnika.



Rys.2. Przebieg prądu fazowego związanego z chwilą przełączenia zaworów w jednej z gałęzi przekształtnika (a), rysunek (b) – szczegóły obu przebiegów

Rejestracji dokonano w krótkim przedziale czasu, co pozwala ocenić szczegóły zachodzących zjawisk. Przepływ prądu ma tutaj charakter udarowy (periodyczny – o częstotliwości ponad 1 MHz i długim czasie zaniku drgań)

i spowodowany jest pasożytniczymi pojemnościowymi sprzężeniami międzyfazowymi oraz faz z uziemionym korpusem maszyny.

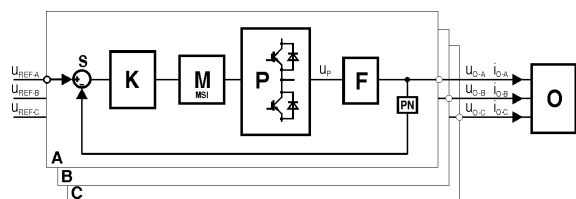
Źródłem pogorszenia sprawności energetycznej układu napędowego są starty w obwodach magnetycznych maszyny – związane z przepływem prądów wirowych oraz histerezą, wynikające z dużych wartości wysokoczęstotliwościowych (do kilku MHz) składowych napięcia zasilającego.

#### 4. Ogólna struktura szerokopasmowego źródła napięcia

Przyczyny powodujące większość negatywnych oddziaływań falowników MSI na silnik może być znacząco zredukowane lub nawet wyeliminowane w przypadku zastosowania nowej generacji falowników MSI o sinusoidalnym przebiegu napięcia wyjściowego.

Proponowane przez autorów szerokopasmowe energoelektroniczne źródło napięcia wykorzystuje koncepcję układów zamkniętych (pracujących w pętli ujemnego, napięciowego sprzężenia zwrotnego), czasowo-dyskretnych, sterowanych w systemie MSI (przy stałej wartości częstotliwości nośnej) oraz jednoczesnym zastąpieniem klasycznych regulatorów z szerokopasmowymi przestrajalnymi filtrami cyfrowymi [6,9]. Dzięki temu możliwy jest znaczący wzrost jakości sygnałów napięcia na wyjściu energetycznym układów w stosunku do sygnałów zadanych (tzn. wierności odwzorowania sygnałów) [3,7,8].

Schemat blokowy energoelektronicznego, niezależnego, sterowanego 3-fazowego źródła napięcia pokazano na rys. 3.



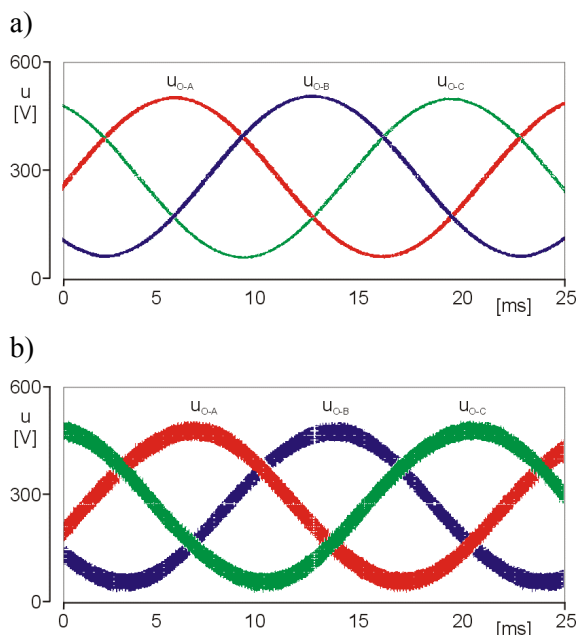
Rys.3. Schemat blokowy energoelektronicznego sterowanego 3-fazowego źródła napięcia

Układ składa się z następujących bloków funkcjonalnych, działające niezależnie dla każdej fazy: układ sumacyjny (S), regulator szerokopasmowy (K), modulator szerokości impulsów (M), falownik energoelektroniczny (P), pasywny filtr wyjściowy (F), przetwornik pomiarowy napięcia (PN).

Zadaniem filtra wyjściowego, szczególnie

istotnego dla działania całego układu, jest tłumienie w przebiegu wyjściowym prądów i napięć o wysokiej częstotliwości, niepożądanych przy sterowaniu dyskretnym w czasie [7]. Struktura filtra jest zależna od struktury źródła sterowanego oraz, w pewnej mierze, rodzaju odbiornika. Jest to najczęściej filtr dolnoprzepustowy o strukturze  $\Gamma$ .

Przykładowe przebiegi napięcia wyjściowego prototypu laboratoryjnego energoelektronicznego źródła sterowanego pokazano na rys. 4.



Rys.4. Przebieg napięcia wyjściowego 3-fazowego źródła sterowanego pracującego w układzie dla sinusoidalnego sygnału zadanego o częstotliwości 50 Hz i częstotliwości granicznej filtra ( $F$ ) 2,7 kHz (a) oraz 7,1 kHz (b); częstotliwość nośna MSI: 16 kHz

Praktyczne pasmo przenoszenia układu zależne jest od wartości częstotliwości nośnej MSI oraz częstotliwości granicznej filtra ( $F$ ) i wynosi ok. 15 – 20 % wartości pierwszej z nich (dla nośnej 16 kHz użyteczne pasmo przenoszenia sięga 3 kHz). Zbytne zwiększanie częstotliwości granicznej filtra prowadzi do większych pulsacji w napięciu wyjściowym (rys. 4 b) – związanych ze składową nośną MSI.

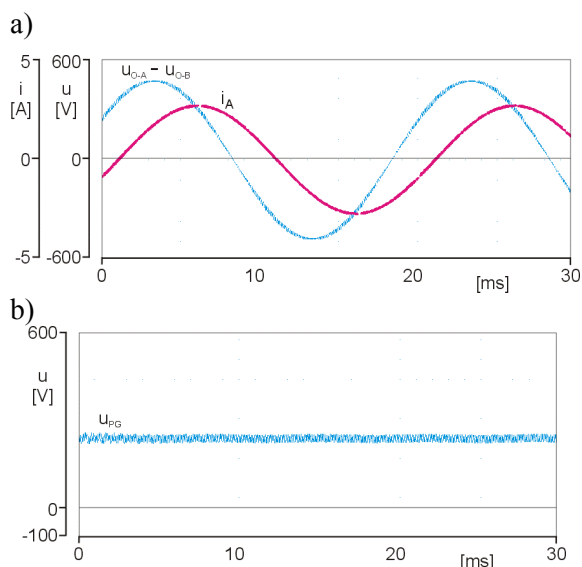
Współczynnik zniekształceń nieliniowych (THD) przebiegu wyjściowego (dla sinusoidalnego sygnału zadanego o częstotliwości 50 Hz) nie przekracza 0,5 % w paśmie 1 kHz. Oznacza to, że jakość napięcia zasilającego odbiornik jest wyższa [5,6] niż przy zasilaniu go bezpośrednio z przemysłowej sieci energetycznej,

gdzie wartość współczynnika THD jest na ogół znacznie większa – sięga poziomu nawet kilku procent.

Przedstawione sterowane źródło napięcia może, w zakresie swojego pasma przenoszenia, generować przebiegi o dowolnym (zadanym) kształcie (w tym składową stałą).

## 5. Przekształtniki energoelektroniczne SINVERTER

Przekształtniki SINVERTER [12] zrealizowane we współpracy z Zakładem Energoelektroniki i Sterowania Politechniki Poznańskiej realizują koncepcję energoelektronicznego sterowanego źródła napięcia, którego przebieg wyjściowy odwzorowuje przebieg sterujący (zadany). Wykorzystują one technologię cyfrowych procesorów sygnałowych (DSP) oraz nowoczesnych zaworów IGBT (zintegrowanych z lokalnymi układami sterowania i zabezpieczeń w moduły IPM).



Rys.5. Charakterystyczne przebiegi wyjściowe przekształtnika SINVERTER: napięcie międzyfazowe i prądu fazowy (a) oraz napięcie punktu gwiazdowego (b) silnika małej mocy dla częstotliwości granicznej filtra wyjściowego 2,8 kHz; częstotliwość nośna MSI: 12,8 kHz

Przekształtniki SINVERTER przeznaczone są do stosowania w układach napędowych oraz urządzeniach energoelektronicznych specjalnego przeznaczenia, jak generatory przebiegów wzorcowych dużej mocy. Mogą być także wykorzystane jako elementy wykonawcze w układach kompensacji aktywnej szeregowej i równoległej. Zapewniają one praktycznie sinusoidalne, regulowane napięcie wyjściowe o dużej

dokładności odwzorowania sygnałów zadanych. Typowe przebiegi napięcia i prądu fazowego przekształtnika pokazano na rys. 5. Wynika z niego, że przebiegi w układzie, przy zastosowaniu filtru wyjściowego o odpowiednio małej częstotliwości granicznej (rys. 5a oraz 5b) praktycznie pozbawione są wysokoczęstotliwościowych składowych MSI. Współczynnik THD nie przekracza wartości 1,0 % (w paśmie 1 kHz dla współczynnika głębokości modulacji o wartości ponad 0,9).

## 6. Podsumowanie

Przedstawione wyniki jednoznacznie wskazują, że wykorzystanie w napędzie elektrycznym falowników o proponowanej 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.

Wszystkie wymienione elementy wnoszą szereg istotnych korzyści ekonomicznych, wynikających z: ograniczenia zużycia energii elektrycznej, skrócenia czasu napraw oraz konserwacji (wzrost trwałości mechanicznej napędu), wydłużenie czasu eksploatacji urządzeń, ograniczenie niekorzystnego oddziaływania układu napędowego na środowisko oraz możliwość zastosowania w układzie napędowym standardowego (a więc tańszego) silnika.

Poszerzone omówienie uzyskanych wyników badań i pomiarów zostanie zaprezentowane na Konferencji

## 7. Literatura

- [1]. Biskup T., Teluk J.: *Idea i zastosowanie modulacji stochastycznej do sterowania 3-fazowego falownika napięcia – część 1*, ZN. Pol. Śl., ser. Elektryka. z. 170, Gliwice, 1999, s. 102-114.
- [2]. Frydrychowicz-Jastrzębska G.: *Modelowe badania diagnostyczne przyczyn nadmiernego hałasu silników indukcyjnych*, VII Sympozjum „Podstawowe Problemy Energoelektroniki i Elektromechaniki”, PPEE'97, Ustroń-Jaszowiec, 1997.

- [3]. 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.
- [4]. Kołodziej H., Kulesza A.: *Układy sterowania pomp*. Mat. Konf. Naukowo-Technicznej „Energoelektronika-Technologia”, Enel-Tech'03, Gliwice, 9-10 października 2003, s. 185-194.
- [5]. Mohan N.: *Power electronics*. John Wiley&Sons, New York 1989
- [6]. Niederliński A., Mościński J., Ogonowski Z.: *Regulacja adaptacyjna*. PWN, Warszawa, 1995
- [7]. 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
- [8]. 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
- [9]. Rutkowski L.: *Filtry adaptacyjne i adaptacyjne przetwarzanie sygnałów*. WNT, Warszawa 1994
- [10]. Seliga R., Koczara W.: *High Quality Sinusoidal Voltage Inverter for Variable Speed AC Drive Systems*. EPE-PEMC2002 Cavtat & Dubrovnik, 9-11 September 2002
- [11]. Woltersdorf G.: *Reflected wave phenomenon in AC adjustable speed drive*. Rockwell Automation, W&WI, August 2003
- [12]. Przekształtniki energoelektroniczne SINVERTER. Nota techniczna, ALFINE p.e.p, Poznań 2003

## Autorzy

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