

Andrzej Sikorski, Adam Ruszczyk
Politechnika Białostocka, Białystok

OCENA WŁAŚCIWOŚCI UKŁADÓW PRZEKSZTAŁTNIKOWYCH (FOC, DTC, DTC-SVM) ZASILAJĄCYCH MASZYNĘ INDUKCYJNĄ

EVALUATION OF THE PROPERTIES OF THE INVERTER (FOC, DTC, DTC-SVM) FED AC MOTOR

Abstract: The most articles presenting the new control method of DC/AC inverters feeding AC motors still exhibited their advantages are biased against another known methods. It is consequence a lack of complete knowledge concerning the competitive methods. The most objective are a reviewed articles but their limitations prevents authors from the exactly methods comparison. In the scientific papers the technical properties are the most frequently presented. For the system users additionally the economic aspect especially during exploitation process is very important. The economic effectiveness during exploitation depends on a repair costs connected with device reliability and on the energy conversion efficiency. The converter reliability to a large degree depends on producer experience and on the used method of control. The users often are looking on the devices technical properties and do not attach importance to a few percentage of efficiency, which during long-lasting operation has important economic aspect. Additionally, the converter efficiency has also influence its method of control. The technical aspects alternating with economical aspects, therefore the very important problem presents the comparison of well-known methods of control (DTC, DTC-SVM, FOC).

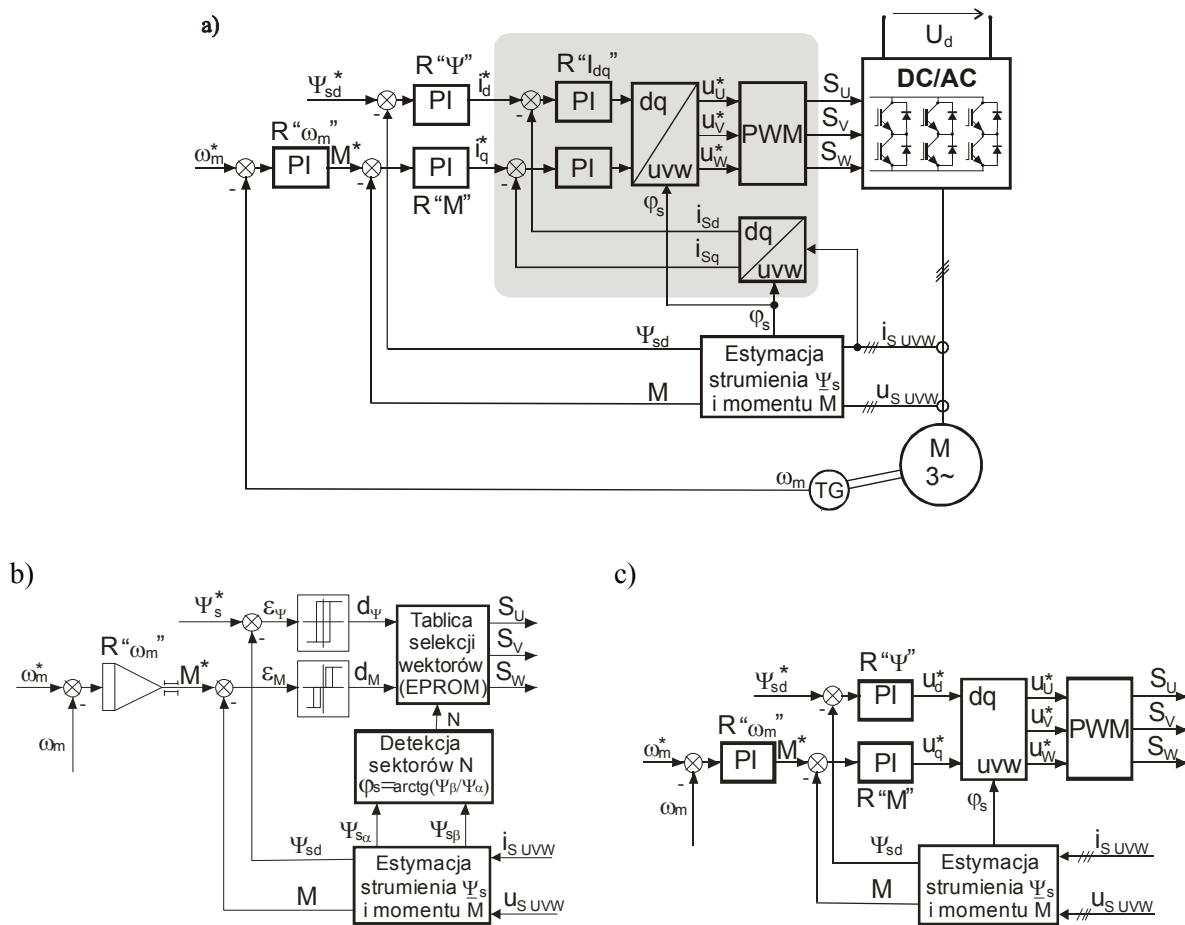
1. Wstęp

W artykułach naukowych dotyczących prezentacji nowych metod sterowania przekształtników DC/AC (falowników), zasilających silniki indukcyjne, dokonuje się zwykle porównania z innymi metodami w sposób tendencyjny, wykazujący zwykle wyższość proponowanej metody w stosunku do innych znanych. Niejednokrotnie ta tendencyjność nie jest zamierzona i wynika z braku pełnej wiedzy o właściwościach innych metod. Artykuły przeglądowe dotyczące sterowania są zwykle bardziej obiektywne, ale z kolei ich ograniczona objętość również nie pozwala na dokładne porównanie metod. Zwykle w artykułach naukowych porównanie metod dotyczy właściwości technicznych. Jednakże użytkowników z przemysłu interesują oprócz możliwości technicznych również aspekt ekonomiczny zwłaszcza w czasie eksploatacji. Na efektywność ekonomiczną podczas użytkowania mają wpływ koszty napraw związane z niezawodnością urządzenia (podczas pracy w warunkach, do których urządzenie zostało zaprojektowane) oraz od sprawności przetwarzania energii w urządzeniu. Niezawodność przekształtnika w dużej mierze zależy od producenta i wynika głównie z jego doświadczeń w wytwarzaniu urządzeń energoelektronicznych i właściwości zastosowanej

metody sterowania. Sprawność przekształtnika jest parametrem co najmniej lekceważonym przez zarówno producentów jak i użytkowników. Producenci przekształtników podają sprawność dla jednego punktu pracy, zwykle nie podając również warunków i sposobu jej pomiaru. Z kolei użytkownicy w zasadzie głównie kierują się właściwościami technicznymi nie przykładając większego znaczenia do pojedynczych procentów różnic w sprawności, które z punktu widzenia długotrwałej pracy mają istotny wpływ na ekonomiczny aspekt eksploatacji. Ponadto na sprawności przekształtnika wpływa również metoda sterowania. Właściwości techniczne przeplatają się więc z ekonomicznymi i stąd zamysł, aby przybliżyć różne, najczęściej spotykane metody sterowania [1,2,3].

2. Parametry techniczne

Rozważane będą jedynie metody wektorowego sterowania silnika indukcyjnego z uwagi na lepszą dynamikę napędu. Metody skalarne, jakkolwiek prostsze technicznie i tańsze w realizacji, z uwagi na brak kontroli nad wzajemnym położeniem wektorów strumienia i prądu stojana są nieporównywalnie gorsze w kształtowaniu momentu w stanach przejściowych np. podczas skokowych zmian momentu.



Rys.1. Schematy sterowania metodą FOC z liniowym regulatorem prąd (a), metodą DTC (b) i DTC-SVM (c)

Z technicznego punktu widzenia metody sterowania można scharakteryzować przez następujące parametry:

- właściwości dynamiczne napędu:
 - szybkość odpowiedzi na skokową zmianę momentu i prędkości,
- właściwości statyczne napędu:
 - kształt prądów i napięć wyjściowych przekształtnika oraz strumienia silnika w całym zakresie zmian prędkości (w tym THD),
 - kształt prądów i napięć wejściowych przekształtnika (w tym THD),
 - średnia częstotliwość łączeń zaworów przekształtnika,
 - możliwość „wzbudzenia” maszyny tj. wytworzenia w silniku znamionowego strumienia nawet przy zerowej prędkości zadanej.
- inne właściwości:
 - możliwości pracy bezczujnikowej,
 - odporność metody na zmianę parametrów silnika w trakcie pracy.

Oczywiście większości z tych parametrów producenci nie podają, stąd o właściwościach przekształtnika należy wnioskować na podstawie informacji o zastosowanej metodzie sterowania.

3. Układ sterowania

Przedstawiony w [2] podział metod sterowania wynika z warunków sterowania. Z punktu widzenia właściwości układu sterowania istotne znaczenie odgrywa typ regulatorów użytych w podrzędnych układach regulacji (momentu, strumienia, składowych prądu). Przedstawione na rysunku 1 metody sterowania wykorzystują regulatory liniowe (rys. 1ac), gdy ostatni stopień stanowi modulator PWM, lub regulatory nieliniowe (rys. 1b). Jednak powyższy podział nie jest ostateczny. Na przykład metoda z orientacją wektora pola (FOC - *field oriented control*) w wersji zaproponowanej przez F. Blaschke w 1971 [3] realizowana była z regulatorami liniowymi PI i modulatorem PWM. Jednakże możliwe jest zrealizowanie układów

regulacji prądów w postaci nieliniowych regulatorów histerezowych lub tablicowych [4] i właściwości metody diametralnie zmieniają się. Nieodłącznym atrybutem regulatora z PWM jest stała częstotliwość łączeń zaworów wynosząca $f_s = 6 \cdot f_{\text{PWM}}$ (sześć przełączeń zaworów w okresie wynikającym z częstotliwości modulowanej). W bardziej złożonych modulatorach PWM w pewnych zakresach regulacji występują 4 przełączenia w okresie $1/f_{\text{PWM}}$ [5]. Pozwala to na osiągnięcie lepszych wyników modulacji (zmniejszone THD prądów) przy mniejszej średniej częstotliwości łączeń zaworów zwłaszcza przy mniejszych częstotliwościach modulujących.

Regulatory nieliniowe są charakterystyczne dla metod predykcyjnych (gdzie w stopniu końcowym regulacji nie występuje PWM) lub tablicowych, których głównym przedstawicielem jest metoda z bezpośrednią regulacją momentu i strumienia DTC (opracowana przez Takahashi i Noguchi w roku 1985 [1]). Podobnie jak w przypadku metody FOC istnieją modyfikacje tej metody np. DTC-SVM (*Space Voltage Modulated*) (rys. 1c), które poprzez zastosowanie liniowych regulatorów prądu i strumienia (z modulacją PWM) upodobniają się właściwościami do metody FOC.

Procesorowa strategia sterowania związana jest ze stałym czasem próbkowania (odświeżania, *samplingu*) T_p , w którym dokonywane są operacje pomiaru i przetwarzania wielkości niezbędnych do sterowania, obliczeń i kończy się wyznaczeniem sygnału sterującego. Te sygnały mogą być bezpośrednio użyte do wypracowywania sygnałów załączających zawory przekształtnika w przypadku sterowania nieliniowego np. DTC. Oznacza to, że w czasie próbkowania T_p następuje jedna zmiana na kolejny wektor napięcia (przełączenie w jednej, lub dwóch fazach). Przy sterowaniu z wykorzystaniem modulatora PWM wypracowany w czasie T_p sygnał sterujący w dalszej kolejności służy do realizacji modulacji PWM. Modulator PWM może być zrealizowany na tym samym procesorze lub na innym dodatkowym co-procesorze. W czasie T_p modulator dokonuje więc pełnego cyklu odtwarzania zadanego wektora napięcia (z wykorzystaniem 2 wektorów aktywnych i zerowego) co wiąże się z 6 przełączeniami zaworów. Podsumowując, w pewnym uproszczeniu można stwierdzić, że sterowanie z czasem

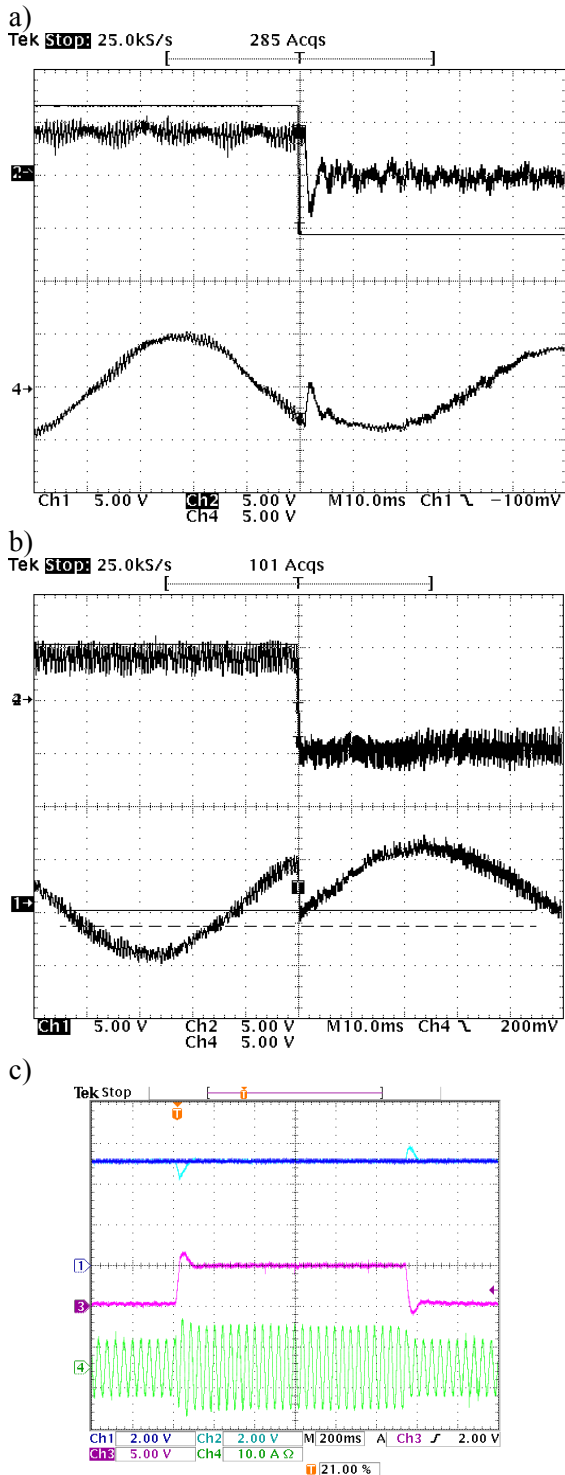
próbkowania T_p zapewnia możliwość 6-krotnie większej częstotliwości łączeń w metodach wykorzystujących PWM. Oznacza to, że zastosowanie procesora o określonej mocy obliczeniowej (działającego z określonym czasem T_p) pozwala przy zwiększonej częstotliwości łączeń osiągnąć większą dokładność odwzorowania wielkości sterowanych (moment, prąd). Z drugiej strony należy pamiętać, że 6-krotnie większa częstotliwość łączeń zwiększa tyle samo straty łączeniowe, które stanowią główny składnik strat mocy w przekształtniku, decydujący o jego sprawności.

4. Właściwości dynamiczne

O właściwościach dynamicznych układu przy założeniu, że układy regulacji prędkości czy położenia są zbliżone, decydują możliwości kształtowania momentu w stanach statycznych i dynamicznych. Odpowiedź układu na skokową zmianę zadanego momentu decyduje o szybkości i dokładności nadrzędnych pętli regulacji prędkości czy położenia. We wszystkich omawianych układach regulacji mogą (FOC) lub z zasady muszą (DTC, DTC-SVM) występować wydzielone pętle regulacji momentu. W zasadzie moment w metodzie FOC kształtowany jest w sposób pośredni poprzez składową prądu i_q (gdy regulacja prądu odbywa się w wirującym układzie współrzędnych dq), ale dodatkowa pętla regulacji momentu może poprawić dynamikę regulatora prądu typu PI przez forsowanie zadanej wartości prądu. Przedstawione na rysunku 2 odpowiedzi układów regulacji momentu jednoznacznie wskazują na dokładniejsze (uchyby w stanie przejściowym zależne od strojenia regulatora momentu i /lub prądu) odwzorowanie zadanego momentu w stanie przejściowym w metodach z nieliniową regulacją momentu (DTC, FOC z regulatorem nieliniowym prądu [5]). Regulatory nieliniowe charakteryzują się w zasadzie przejściem do nowej wartości zadanej przy jednym przełączeniu (jeden wektor napięcia) i pozwalają na ekstremalnie szybkie osiągnięcie wartości zadanej.

W stanach statycznych dokładność odtwarzania momentu we wszystkich metodach jest zbliżona, przy czym pewne odstępstwa od wartości zadanej wykazuje metoda DTC. Sterowanie to ma wpisane w zasadę działania, poprzez komparator trójpołożeniowy, uchyb ustalony związany z przesunięciem poziomu komparacji re-

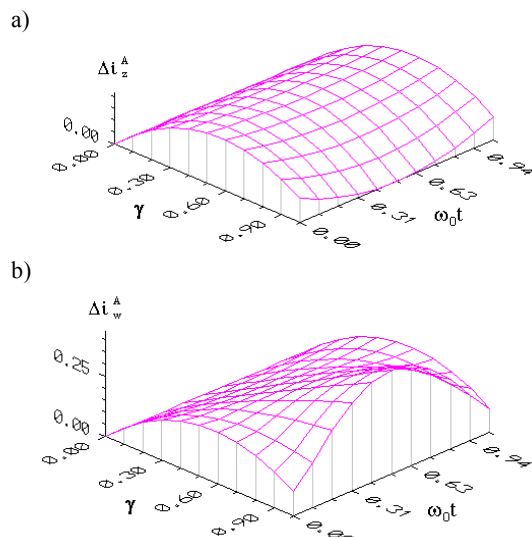
gulatora momentu względem początku układu współrzędnych.



Rys.2. Oscylogramy momentu i prądu fazowego przy sterowaniu metody FOC z liniowym regulatorem prąd (a), metodą DTC (b) i DTC-SVM (c)

W zasadzie nie ma to większego znaczenia, gdyż zwykle nadrzędny układ regulacji prędkości likwiduje (minimalizuje) tę wadę. Z punktu

widzenia oceny właściwości w stanie statycznym istotne są tętnienia momentu. Przekładają się one bezpośrednio na zmiany prędkości (szczególnie w układach napędowych o niewielkiej wartości momentu bezwładności J). Nadrzędny układ regulacji prędkości nie jest w stanie ich zlikwidować, a ponadto pulsacje takie ograniczają wartość wzmocnienia tej i nadrzędnych pętli regulacji ograniczając w ten sposób dokładność sterowania. Ocena metod z punktu widzenia tętnień momentu jest trudna. W tym względzie pojawia się w literaturze dużo błędnych porównań świadczących o niezrozumieniu tematu. Podstawowym problemem przy porównywaniu tętnień momentu różnych metod jest ustawienie zbliżonych warunków, w których dokonuje się oceny. Należy pamiętać, że wszystkie porównywane metody (jeśli są poprawnie zrealizowane), przy wykorzystaniu przekształtnika 2-poziomowego, mają do dyspozycji te same wektory napięcia (6 aktywnych i dwa zerowe). Stąd możliwości odtworzenia określonej wartości momentu są we wszystkich metodach sterowania zbliżone. Tętnienia momentu zależą więc przede wszystkim od częstotliwości przełączeń i strategii zmian wektorów napięcia. Metody sterowania wykorzystujące PWM charakteryzują się stałą częstotliwością łączeń zaworów (wynikająca z czasu próbkowania) niezależną od poziomu zadawanej prędkości.



Rys.3. Bezwzględne tętnienia prądu w osi działania wektora „zerowego” (a) i wektorów aktywnych napięcia (b) w przedziale $\omega_0 t = \pi/3$ i względnym współczynnikiem amplitudy napięcia γ

Tętnienia momentu, przy stałej wartości strumienia, są proporcjonalne do tętnień prądu. Z kolei tętnienia prądu, przy stałej częstotliwości łążeń, zależą od poziomu zadanej prędkości, a więc od wartości odtwarzanego napięcia stojana. Tętnienia prądu rosną wraz ze zmniejszaniem się napięcia (rys. 3). Spowodowane to jest rosnącymi pochodnymi prądu odpowiadającymi aktywnym wektora napięcia. Pulsacje prądu i momentu przy nieliniowym sterowaniu zależą od czasu T_p i przede wszystkim od strategii sterowania. Pamiętając, że w każdym kroku T_p zachodzi tylko jedno przełączenie, aby osiągnąć podobną średnią częstotliwość łążeń jak w metodach z PWM, należy blisko 6-krotnie zmniejszyć czas próbkowania T_p . Oznacza to konieczność wykorzystania szybszego procesora w porównaniu do stosowanego w metodzie z PWM. Jest to wada metod z regulacją nieliniową, przy czym zwykle do sterowania wystarcza jeden procesor, podczas gdy w metodach z PWM zwykle wykorzystywany jest dodatkowy co-procesor do realizacji PWM (lub jeden „silniejszy” procesor realizujący zadania dwóch „słabszych”). Zaletą metod nieliniowych jest natomiast możliwość zmniejszenia liczby przełączeń w stosunku do stałej częstotliwości, charakteryzującej metody z PWM. Modyfikacje algorytmu sterowania umożliwiają zmniejszenie częstotliwości łążeń bez pogorszenia innych istotnych właściwości np. tętnień momentu czy też kształtu i współczynnika THD prądu. W układach napędowych, zależnie od parametrów układu oraz warunków pracy, ograniczanie tętnień jest istotne do pewnej wartości. Dalsze zmniejszanie, związane zwykle z podnoszeniem częstotliwości łążeń (zmniejszeniem sprawności), nie wpływa na jakość pracy napędu. Nieliniowe układy sterowania umożliwiają zmianę częstotliwości łążeń (np. przez określenie histerezy zmian momentu, strumienia) i dopasowanie jej do potrzeb użytkownika.

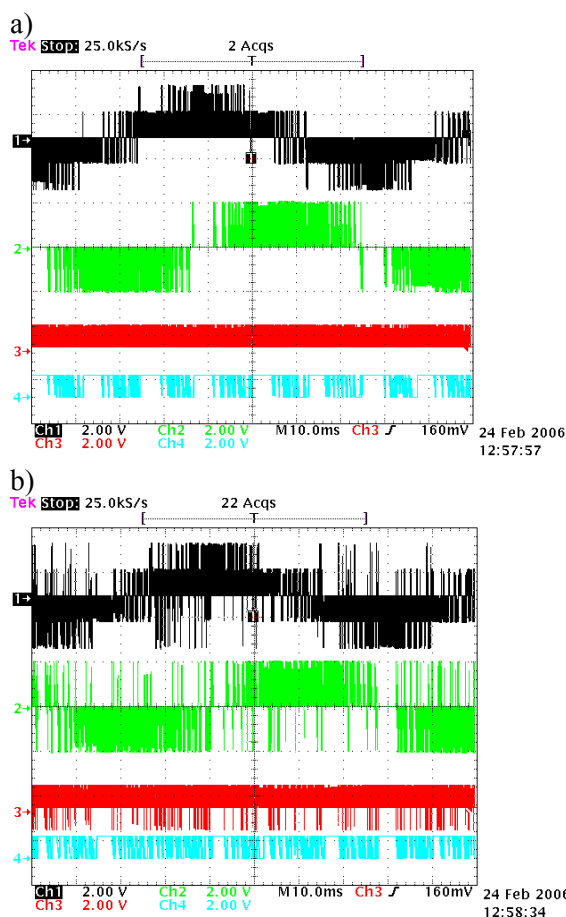
5. Sprawność przekształtnika

Techniczny parametr, jakim jest sprawność przekształtnika, jest najistotniejszym parametrem charakteryzującym ekonomiczność eksploatacji przekształtnika. Główne składniki straty przekształtnika to:

- straty łązeniowe, przewodzenia i blokowania tranzystorów przekształtnika,

- straty w elementach filtru w obwodzie pośredniczącym prądu stałego (kondensatory elektrolityczne, dławiki),
- zasilacze, wentylatory i układ sterowania.

Największym składnikiem strat mocy, decydującym o sprawności, są straty przyłączeniowe, które sięgają 70% całkowitych strat mocy przy częstotliwości modulacji PWM na poziomie 7 - 10 kHz [6]. Z kolei straty łązeniowe tj. iloczyn chwilowej wartości napięcia i prądu zaworu (tranzystora) zależą od poziomu obu tych wielkości. Sterowanie (niezależnie PWM czy też nieliniowe) powinno zapewniać przełączenia na kolejne wektory napięci przez przełączenie tylko w jednej fazie. Minimalizuje to liczbę przełączeń ograniczając straty łązeniowe. Problemy takie nie występują w modulacji PWM.



Rys.4. Napięcie wyjściowe w układzie $\alpha\beta$ (ch1, ch2) komparator momentu (ch3) i strumienia (ch4) poprawnie (a) i błędnie (b) zestrojonego układu regulacji momentu

Natomiast regulatory nieliniowe źle zestrojone mogą mieć takie niekorzystne przełączenia. Taką wadę można w prosty sposób wykryć obserwując przełączenia w napięciu wyjściowym

(rys. 4). Przykład źle zestrojonego regulatora histerezy w metodzie DTC (zbyt mała histereza poziomu wektorów zerowych w komparatorze momentu) powoduje przełączenia napięcia od $+U_d$ do $-U_d$ (rys. 4b). Oznacza to, że nastąpiło przełączenie w dwóch fazach, wzrosły straty łączeniowe oraz dU_d/dt napięcia fazowego. Stromość narastania napięcia ma dodatkowo negatywny wpływ na starzenie się izolacji w silniku i zmniejsza jego żywotność. Stąd korzystne jest zastosowanie nawet niewielkich wyjściowych filtrów LC ograniczających pochodną napięcia (pomimo pogorszenia sprawności). Sprawność pracy przekształtnika jest wielkością zmienną zależną od punktu pracy przekształtnika (stopień obciążenia, prędkość kątowna napędu, napięcie sieci zasilającej) i częstotliwości łączeń zaworów. Układy z modulacją PWM charakteryzują się stałą częstotliwością przełączeń, chociaż czasami producenci umożliwiają zmianę częstotliwości modulacji. Jeśli istnieje taka możliwość to należy stosować możliwie niską częstotliwość modulacji, zapewniającą uzyskanie zadawalających pulsacji momentu (prądu), co pozwala pracować przy większym współczynniku sprawności. Sprawność przekształtników jest trudna do wyznaczenia, stąd producenci podają zwykle jej wartość w znamionowym punkcie pracy napędu gdzie osiąga maksymalną wartość. Sprawność w układach z regulacją PWM maleje wraz ze zmniejszaniem prędkości napędu (ze względu na zmniejszającą się moc wyjściową - $P=M_N\omega_m$ i prawie stałe straty). Układy nieliniowe (DTC), umożliwiając zmniejszenie częstotliwości łączeń przy niskich prędkościach kątowych, pozwalają na zmniejszenie strat łączeniowych i zwiększenie sprawności.

6. Podsumowanie

Zadaniem tego artykułu było zwrócenie uwagi na istotne punkty i warunki porównania różnych metod sterowania. Szczegółowe porównanie różnych metod sterowania jest trudnym i pracochłonnym zadaniem. Z technicznego punktu widzenia najistotniejsze właściwości przekształtnika to dynamika kształtowania momentu i jego tętnienia. Decydują one o możliwościach i dokładności zewnętrznych sprzężeń takich jak regulacja prędkości czy położenia. Z tego punktu widzenia najkorzystniejsze właściwości posiadają metody z regulatorami nieliniowymi momentu (DTC) czy też prądu (DTC, FOC z nieliniowymi regulatorami prądu). Nie-

wiele gorsze właściwości posiadają metody DTC-SVM i FOC-PWM. Metody regulacji z PWM (FOC, DTC-SVM) są zwykle prostsze i tańsze w realizacji z uwagi na prostszą strukturę regulacji i tańszy niezbędny procesor sterujący. Ze względu na możliwość zmiany częstotliwości łączeń w metodach nieliniowych (DTC, FOC-NL) można spodziewać się wyższej średniej sprawności przekształtnika (w pełnym zakresie regulacji prędkości kątownej napędu). Niestety zmienna częstotliwość łączeń utrudnia filtrację napięcia wyjściowego w sytuacji, gdy jest to konieczne.

6. Literatura

- [1]. Takahashi I., Noguchi T.: *A new quick response and high efficiency control strategy of an induction motor*. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-22, no. 5, Sep/Oct 1986, s. 820-827.
- [2]. Kaźmierkowski M. P., Krishnan R., Blaabjerg F.: *Control In Power Electronics*. Academic Press. 2002.
- [3]. Blaschke F.: *Das Verfahren der Feldorientierung zur Regelung der Asynchronmaschine*. Siemens Forschungs und Entwicklungsberichte, (1972) 184-193.
- [4]. Sikorski A.: *Porównanie właściwości wektorowych metod regulacji momentu i strumienia maszyny indukcyjnej (DTC i FOC)*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 72/2005, BOBRME Komel, 2005, Katowice, s. 219-224.
- [5]. Aleksandrowicz S., Sikorski A.: *The Properties of the PWM vectorial control algorithms of the three phase voltage inverter*. International Conference on Electrical Drives and Power Electronics, Vol. 2, Košice, Slovakia, 1996, s. 577-582.
- [6]. Sikorski A., Sołbut A.: *Ocena sprawności kluczy tranzystorowych*. Zeszyty Naukowe PB, Nauki Techniczne Nr 96, Elektryka, z. 13, (1994), s. 113-124.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005-2007 jako projekt badawczy 3 T 10A 016 29.

Autorzy

Andrzej SIKORSKI, Adam RUSZCZYK
 Politechnika Białostocka,
 Wydział Elektryczny,
 Katedra Energoelektroniki i Napędów
 Elektrycznych
 15-351 Białystok, ul. Wiejska 45D,
 e-mail: sikorski@pb.bialystok.pl
 ruszczyk@pb.bialystok.pl