

**Andrzej Sikorski**  
**Politechnika Białostocka, Białystok**

## **PORÓWNANIE WŁAŚCIWOŚCI WEKTOROWYCH METOD REGULACJI MOMENTU I STRUMIENIA MASZYNY INDUKCYJNEJ (DTC I FOC)**

### **COMPARISON OF THE PROPRIETIES OF THE AC MOTOR TORQUE AND FLUX VECTORIAL CONTROL METHODS ( THE DTC AND FOC)**

**Abstract:** Field oriented control (FOC) and direct torque control (DTC) are becoming the industrial standards for induction motors torque control. Direct torque control method proposed by Takahasi and Noguchi in 1985 in spite of its disadvantages (flux vector hexagonal in shape and distorted current for small motor speed) is competitive to the flux oriented methods of control (FOC). FOC and DTC method comparative analysis are performed to show the basic distinctness of the both. This paper is aimed to give a contribution for a detailed comparison between two control techniques, emphasizing advantages and disadvantages. The analyze performed in this article shows the likeness of the both methods in scope of scheme and properties. The comparison of the FOC method with linear PI controller, nonlinear delta-modulation controller or look up table method and standard DTC method were carry out. The performance of the two basic control schemes is evaluated in terms of torque and current ripple, and transient response to step variations of the torque command. The analysis has been carried out on the basis of the results obtained by laboratory investigation.

#### **1. Wstęp**

Metoda wektorowego sterowania silnika indukcyjnego z orientacją wektora pola (FOC – *field oriented control*) zaproponowana przez F. Blaschke w 1971 [1] roku jest powszechnie stosowaną w rozwiązaniach przemysłowych zaawansowaną metodą sterowania. Rosnące możliwości techniczne jej realizacji, a zwłaszcza wykorzystanie procesorów sygnałowych (DSP) umożliwiało ciągły rozwój struktur tej metody. Metoda FOC ewoluowała od metody z pośrednią orientacją wektora pola (IFOC – *indirect field oriented control*) do metody z bezpośrednią orientacją wektora pola (DFOC – *direct field oriented control*). Podstawowa różnica polega na sposobie wyznaczania kąta obrotu wirującego układu współrzędnych, w którym zorientowane są składowe zadawanych prądów: składowej  $i_{sd}^*$  - proporcjonalnej do strumienia oraz składowej  $i_{sq}^*$  - proporcjonalnej do momentu. W metodzie IFOC kąt ten wyznaczany jest poprzez całkowanie pulsacji poślizgu, natomiast w metodzie DFOC – ze składowych wektora strumienia w stacjonarnym układzie współrzędnych  $\alpha\beta$ . Składowe zadawanych prądów orientowane są bezpośrednio względem tego strumienia. W latach siedemdziesiątych podstawowe trudności jakie napotymano w praktycznej realizacji tej

metody polegały na konieczności dwukrotnej transformacji zmiennych: z trójfazowych do wirującego układu współrzędnych  $dq$  i odwrotnie oraz odtwarzania kąta obrotu układu współrzędnych (rys. 1a). Nowe możliwości realizacji sterowania (wydajne procesory DSP) umożliwiły odtwarzanie strumienia silnika (stojana  $\Psi_s$ , wirnika  $\Psi_r$ , głównego  $\Psi_m$ ) w formie przebiegów fazowych lub wektorów i realizację metody DFOC, która stała się standardem wektorowych metod sterowania. Odpowiedzią na zapotrzebowanie na sterowania o właściwościach zbliżonych do FOC bez konieczności stosowania transformacji współrzędnych była metoda DSC (*direct self control*) zaproponowana przez Depenbrocka [2] oraz metoda DTC (*direct torque control*) zaproponowana przez Takahashi i Noguchi [3] w roku 1985. W obu metodach w sposób bezpośredni kształtowane są strumień i moment silnika. Metoda DSC, jakkolwiek bardzo prosta w implementacji, nie znalazła szerszego zastosowania z uwagi na silne odkształcenia prądów i strumieni od przebiegu sinusoidalnego. Metoda DTC, pomimo swych wad tj. odkształcenia strumienia i prądu przy małych prędkościach pracy układu napędowego, stanowiła istotną konkurencję dla połowo zorientowanych metod sterowania (FOC). W większości publikacji np.

[4, 5], które ukazały się na temat porównania obu metod (DTC i FOC) autorzy charakteryzując obie metody wykazują ich zalety i wady oraz różnice. Ten artykuł akcentuje przede wszystkim podobieństwa obu metod, a także ewoluowanie obu metod w tym samym kierunku.

## 2. Charakterystyka FOC i DTC

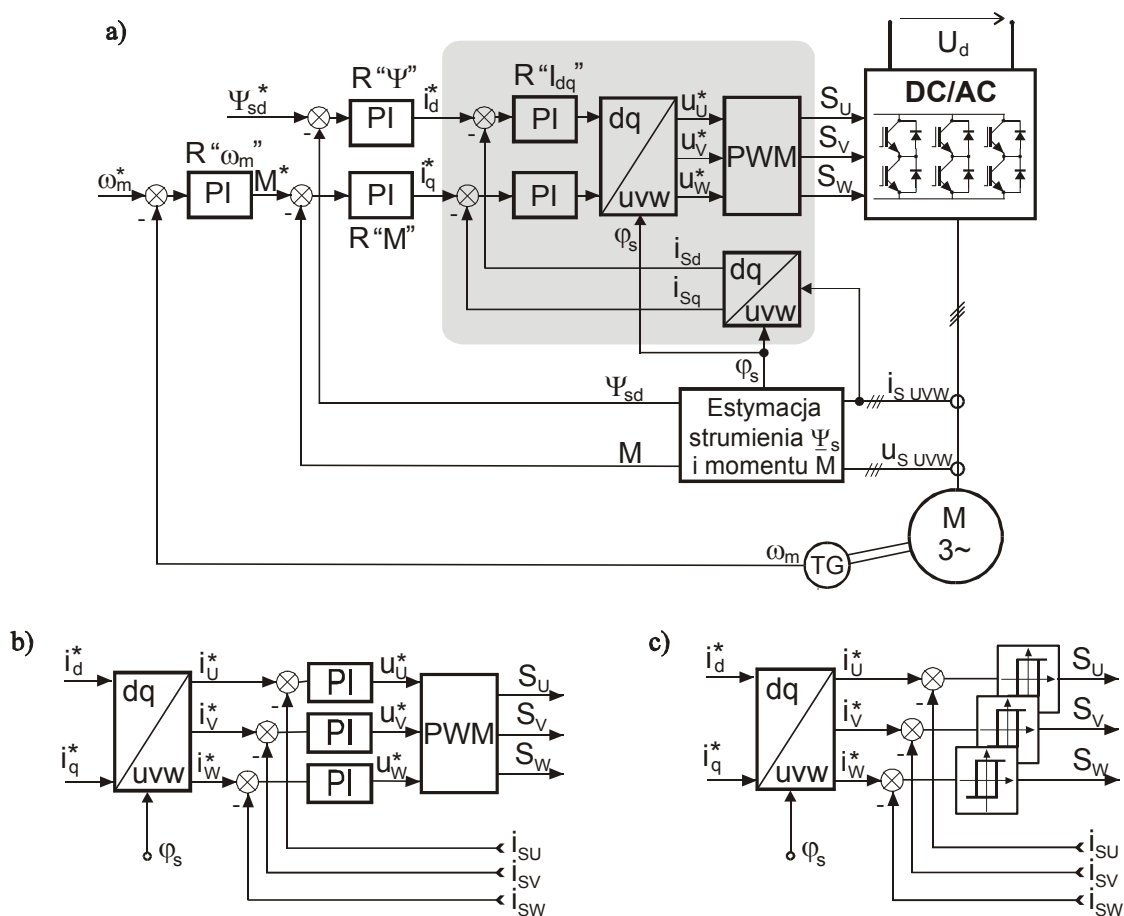
Metoda FOC w tradycyjnym, wynikającym z historycznych uwarunkowań ujęciu jest metodą z regulatorami prądu w układzie trójfazowym lub wirującym  $dq$ . W zależności od układu, jak widać na rysunkach 1a i 1b, wymaga jednego lub dwóch układów transformacji współrzędnych. Przy założeniu, że regulacji prądów dokonujemy w liniowych regulatorach prądu uznawano, że wadami metody FOC w porównaniu do metody DTC są:

- dwa (lub trzy) regulatory prądu i modulator PWM,
- dwa (lub jeden) układy transformacji współrzędnych (UVW/dq, dq/UVW),

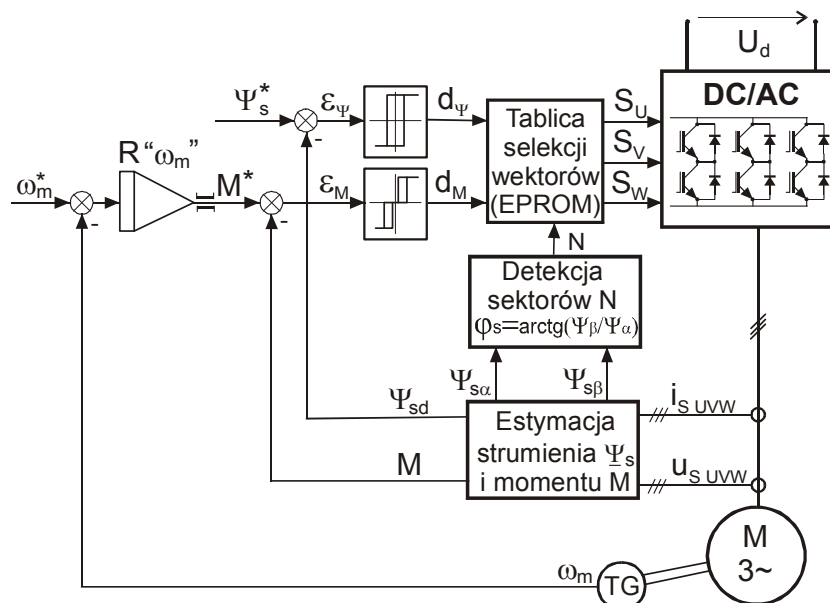
- wpływ zmiany parametrów maszyny na jakość regulacji (nastawy regulatorów prądu),
- gorsza dynamika kształtowania momentu wynikająca z użycia regulatorów typu PI, które wprowadzają opóźnienie w regulacji prądów, a w konsekwencji również i regulacji momentu,
- mała dokładność (błędy amplitudy i fazy) regulacji prądów w trójfazowym układzie regulacji w stanie statycznym i związane z tym błędy regulacji momentu i strumienia, a także konieczność odsprzęgnięcia obu torów regulacji prądów.

Jako zalety traktowano:

- możliwość kontroli prądu i jego sinusoidalny kształt,
- stała częstotliwość modulacji umożliwiającą łatwe filtrowanie napięcia wyjściowego,
- możliwość „wzbudzenia” maszyny tj. wytworzenia w silniku znamionowego strumienia nawet przy zerowej prędkości zadanej.



Rys. 1. Schemat sterowania metodą FOC z liniową regulacją prądu w układzie  $dq$  (a), trójfazowym UVW (b), oraz nieliniowym regulatorem histerezy (c)



Rys. 2. Schemat sterowania metodą DTC

W powyższym ujęciu w metodzie DTC wady FOC są jej zaletami, a zalety – wadami. Należy podkreślić, że jako podstawową zaletę DTC uważano jej prostotę (brak przetworników współrzędnych, regulatorów). Ponadto z uwagi na bezpośrednie kształtowanie momentu dynamika jego kształtowania była bezkonkurencyjna w porównaniu do innych znanych metod sterowania. Schemat układu sterowania metodą bezpośredniej regulacji momentu i strumienia przedstawiono na rysunku 2. Zadane wartości strumienia stojana  $\Psi_s^*$  i momentu elektromagnetycznego  $M^*$  (wyjście regulatora prędkości) porównywane są z rzeczywistymi wartościami  $\Psi_s$  i  $M$  i podawane na regulatory nieliniowe (komparatory). Optymalne przełączenia tabelaryzowane są w pamięci adresowanej stanem dwupoziomowego komparatora regulacji strumienia stojana i trójpoziomowego komparatora momentu zależnie od sektora  $N$  ( $\pi/3$ ), w którym aktualnie znajduje się wektor strumienia  $\underline{\Psi}_s$  [3]. Główne wady metody DTC występują przy zerowej i niskiej (do 5%  $\omega_N$ ) prędkości kątowej napędu. Opisane w literaturze [4, 5, 6] niedoskonałości metod DTC to:

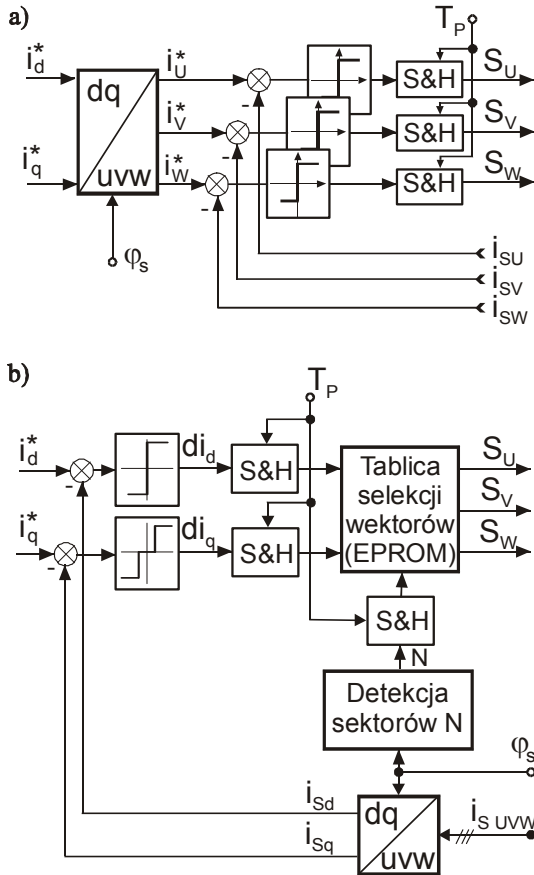
- odkształcenia strumienia i prądu,
- zmniejszenie strumienia przy niskich prędkościach,
- brak możliwości „wzbudzenia” maszyny przy zerowej prędkości, co pogarsza dynamikę kształtowania momentu podczas rozruchu.

W powyższych porównaniach nie uwzględniano właściwości układów FOC i DTC wynikające z potrzeby estymacji strumienia w obu metodach. Stopień złożoności estymatora decyduje o jego właściwościach zwłaszcza przy niskich prędkościach kątowych napędu. Zwykle realizowane praktycznie struktury estymatorów strumienia wymagają użycia składowych wektora prądu w wirującym układzie odniesienia. Oznacza to, że zaletą za jaką uważano brak układów transformacji współrzędnych w metodzie DTC nie występuje. Ponadto w sterowaniu mikroprocesorowym program realizujący przetwornik współrzędnych to niewielka część całego programu sterowania, gdzie np. estymacja strumienia zajmuje około 30% czasu realizacji pełnego algorytmu sterowania.

## 2. Charakterystyka FOC i DTC

Istotą metody FOC jest sposób formowania zadanych wartości składowych prądu w wirującym układzie odniesienia i sposób odtwarzania kąta obrotu układu współrzędnych. Tak więc sposób regulacji prądu w podrzędnej strukturze nie jest atrybutem charakteryzującym zasadę działania metody FOC. Większość podnoszonych wad metody FOC wynikała z użycia liniowych regulatorów prądu. Wprowadzenie nieliniowej regulacji np. poprzez trzy histerezyowe regulatory prądu (rys. 1c) eliminuje częściowo wady poprawiając dynamikę kształtowania momentu. Jednocześnie regulatory te wprowadzają wady związane z właściwościami

regulatorów histerezowych tj. zdwojenie histerezy (powoduje wzrost pulsacji momentu) oraz tzw. „szybkie” przełączenia (powodują wzrost strat łączeniowych) przy niskich pulsacjach kątowych napędu. Ponieważ realizacja mikroprocesorowa modulatorów z histerezą jest trudna rozważona będzie odmiana nieliniowego regulatora prądu tzw.  $\Delta$ -modulacja (rys. 3a)



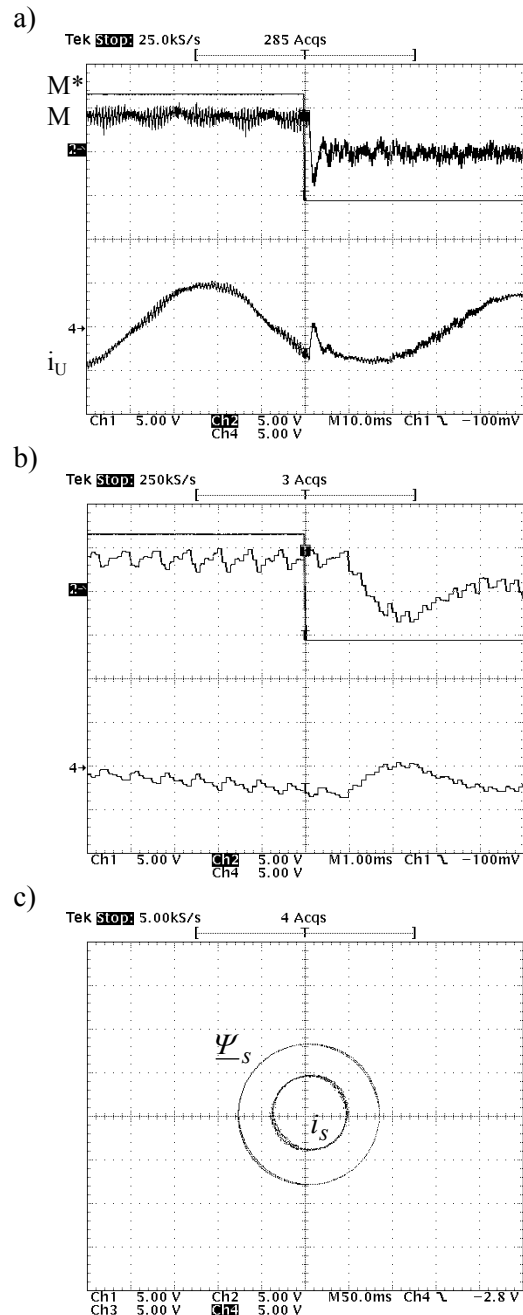
Rys. 3. Nieliniowe regulatory prądu: a)  $\Delta$ -modulacja, b) modulator z tablicą przełączeń

Kolejną rozważaną wersją nieliniowego regulatora prądu jest regulator z tabelaryzacją przełączeń. Sposób adresowania tablicy oraz jej zawartość została zaczerpnięta z metody DTC. W ten sposób struktury obu metod sterowania (FOC i DTC) upodobniły się do siebie.

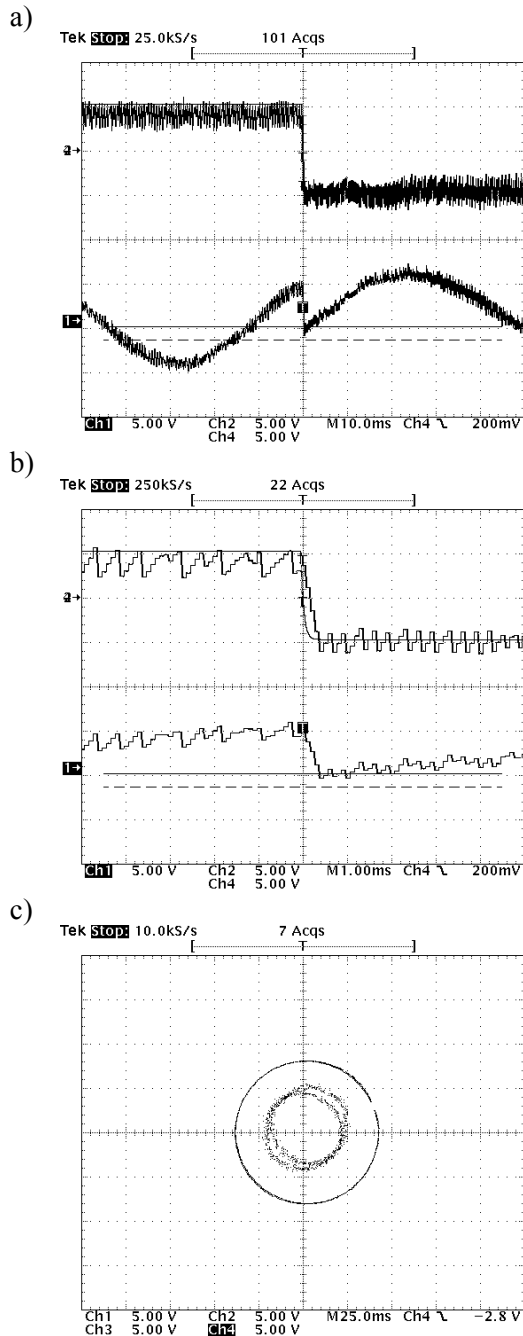
### 3. Wyniki badań eksperymentalnych

Badania laboratoryjne przeprowadzono w układzie z silnikiem klatkowym o parametrach:  $P_N=3,7$  kW,  $I_N=10$  A,  $U_N=350$  V,  $f_N=51,6$  Hz,  $n_N=1500$  obr/min,  $M_N=24$  Nm, zasilanym z falownika napięcia ( $U_{DC}=200$  V) sterowanego z pakietu dSPACE (wieloprocusorowy system czasu rzeczywistego dedykowany do sterowa-

nia złożonych układów energoelektronicznych). Poniżej na rysunkach a przedstawiono oscylogramy w stanie przejściowym zadanej  $M^*$  i mierzonej  $M$  wartości momentu elektromagnetycznego oraz mierzonego prądu jednej fazy silnika podczas skokowej zmiany momentu z  $-10$  Nm na  $+10$  Nm, a na rys. b te same przebiegi – z rozszerzoną 10-krotnie skalą czasu.



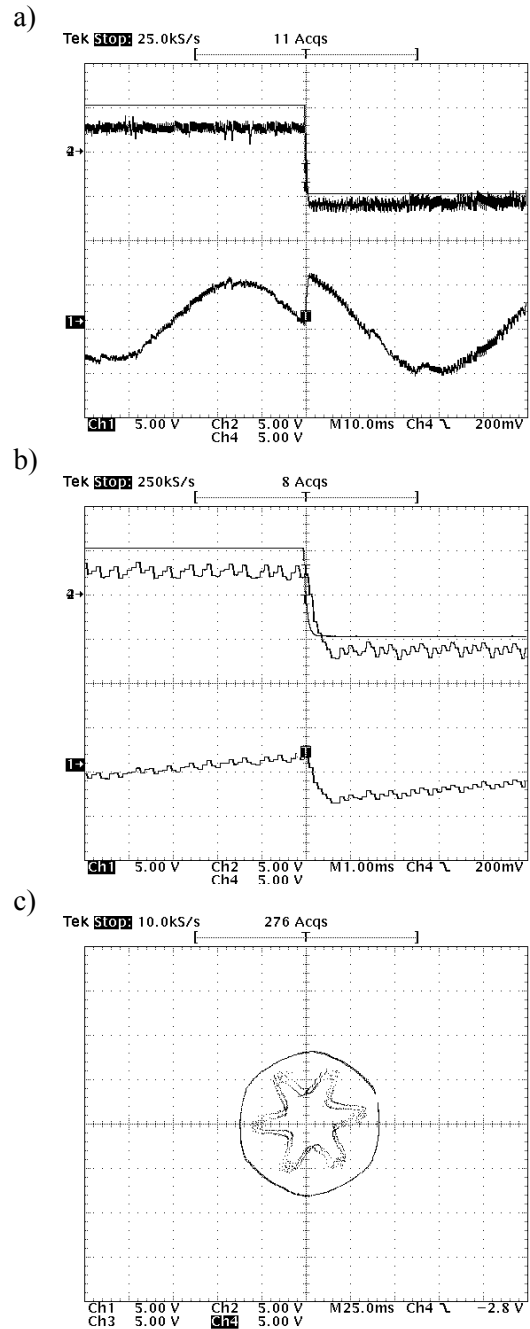
Rys. 4. Oscylogramy i trajektorie metody FOC z liniowym regulatorem prądu



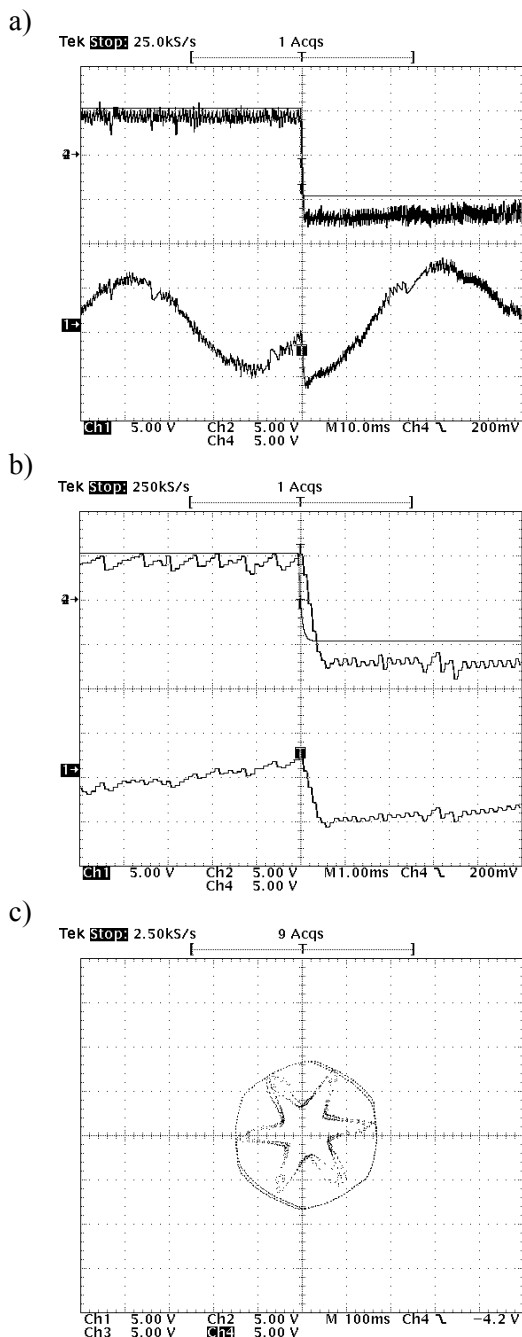
Rys. 5. Oscylogramy i trajektorie metody FOC z regulatorem prądu typu  $\Delta$

Ponadto na rysunkach *c* przedstawiono trajektorie wektorów strumienia stojana  $\underline{\Psi}_s$  (zewnątrzna figura) i prądu stojana  $\underline{i}_s$  (wewnętrzna figura) w stacjonarnym układzie współrzędnych  $\alpha\beta$  w stanie statycznym przy częstotliwości synchronicznej około 4 Hz. We wszystkich metodach sterowania FOC z regulatorami nieliniowymi oraz DTC procesor pracował z krokiem  $100\mu\text{s}$ , natomiast w metodzie FOC-PWM, z częstotliwością 2,4 kHz, co od-

powiadało częstotliwością przełączeń zaworów równej 14,4 kHz. Oscylogramy dotyczące metody FOC-PWM (rys. 4) potwierdzają ogólnie znane jej wady tj. najgorszą ze wszystkich prezentowanych metod dynamikę kształtowania momentu zarówno w stanach statycznych jak i dynamicznych (rys. 4ab). Oznacza to potencjalnie gorsze właściwości nadrzędnych układów regulacji prędkości czy też położenia.



Rys. 6. Oscylogramy i trajektorie metody FOC z regulatorem z tabelaryzacją przełączeń



Rys. 7. Oscylogramy i trajektorie metody DTC

Metody FOC z nieliniowymi regulatorami prądu i DTC charakteryzują się zbliżonymi dobrymi właściwościami regulacji momentu w stanach przejściowych. W stanach statycznych przy niskiej prędkości kątowej w metodzie DTC oraz FOC z tabelaryzacją przełączeń występują charakterystyczne dla DTC odkształcenia strumienia i prądu stojana [7]. Najlepszymi właściwościami, biorąc pod uwagę szybkość kształtowania momentu (rys. 5ab) oraz brak odkształceń prądu i strumienia (rys. 5c) charakteryzuje się metoda FOC z regulatorem typu  $\Delta$ .

#### 4. Podsumowanie

Trudno jest przesądzać o właściwościach metody FOC, jeśli nie sprecyzujemy dokładnie struktury obwodu regulacji prądu. To właśnie regulator prądu decyduje o właściwościach metody, a w skrajnych przypadkach można stwierdzić, że upodabnia ją do metody DTC. Jak wykazano w pracach [6], [7] można poprzez zbliżone formalnie zabiegi, odpowiednio w metodzie FOC z tabelaryzacją przełączeń i w metodzie DTC zlikwidować wady związane z odkształceniem strumienia i prądu przy niskich prędkościach obrotowych.

#### 5. Literatura

- [1]. Blaschke F.: *Das Verfahren der Feldorientierung zur Regleung der Asynchronmaschine*. Siemens Forschungs und Entwicklungsberichte, 184-193 (1972).
- [2]. Depenbrock M.: *Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine*. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. PE-3, no. 4, Oct. 1988, s. 420-429.
- [3]. 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.
- [4]. Kaźmierkowski M. P., Krishnan R., Blaabjerg F.: *Control In Power Electronics*. Academic Press. 2002.
- [5]. Casadei D., Profumo F., Serra G., Tani A.: *FOC and DTC: Two Viable Schemes for Induction Motors Torque Control*. IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 17, No. 5, September 2002, s. 779-787.
- [6]. Ruszczyk A.: *Nowe algorytmy predykcyjnych metod regulacji prądów przekształtników AC/DC i DC/AC*, rozprawa doktorska, Politechnika Białostocka, Białystok 2005,
- [7]. Sikorski A., Korzeniewski M.: *Improvement of torque and flux control in DTC method*, 11th International Conference EPE-PEMC 2004, Riga, Latvia, 2004, CD.

Pracę wykonano w ramach badań własnych Politechniki Białostockiej

#### Autor

Andrzej SIKORSKI  
 Politechnika Białostocka,  
 Wydział Elektryczny,  
 15-351 Białystok, ul. Wiejska 45D,  
 e-mail: sikorski@pb.bialystok.pl