

Piotr Chudzik, Andrzej Radecki
Politechnika Łódzka, Łódź

KOREKTA SYNTEZY KĄTA WEKTORA PRĄDU W UKŁADACH STEROWANIA NAPĘDAMI INDUKCYJNYMI

CURRENT VECTOR ANGLE CORRECTION IN INDUCTION DRIVE CONTROL

Abstract: Modern induction motor drive systems requires good quality of torque control. The lack of rotor speed and position measurement precision results in a lack of precise control of the electromagnetic torque of the motor. In industrial drive systems shaft encoder resolution sometimes does not exceed 16 pulses per revolution. This causes a low accuracy of measurements at small angular speed, which in classical vector control systems lead to a lack of precise control of the electromagnetic torque. In this article, a simple method to improve torque control quality due to low encoder resolution was shown. It is based on stator current angle synthesis decomposition in which a proper information about shaft position is used with estimated shaft angular speed information. This solution allow to achieve a proper control of both electromagnetic torque and rotor flux. A simulation and test-stand results was included to show a efficiency of proposed method.

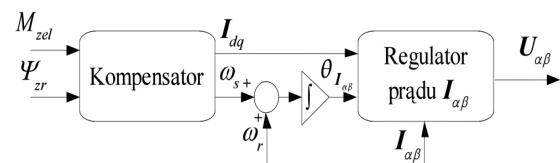
1. Wstęp

Współczesne układy sterowania indukcyjnymi napędami przekształtnikowymi wymagają, do osiągnięcia dobrej jakości regulacji, pomiaru położenia wału oraz obliczenia jego prędkości kątowej. Brak dostatecznej dokładności w określeniu tych zmiennych stanu skutkuje brakiem precyzyjnej kontroli nad momentem elektromagnetycznym silnika [1]. Ze względu na powszechne wykorzystanie dyskretnych czujników położenia wału, dokonanie pomiaru kąta jego położenia możliwe jest jedynie w chwilach impulsowania. Dokładność takiego pomiaru jest ograniczona i obciążona tym większym błędem im mniejsza jest prędkość kątowa wału oraz im mniejsza jest rozdzielczość impulsatora. W przemysłowych układach napędowych rozdzielczość impulsatorów niekiedy nie przekracza 16 impulsów na kąt elektryczny maszyny, co w klasycznych układach sterowania wektorowego może prowadzić do braku precyzyjnej kontroli momentu elektromagnetycznego.

2. Pośredni układ sterowania silnikiem indukcyjnym

W typowym układzie wektorowego sterowania pośredniego, kąt położenia zadanej wartości wektora prądu realizowany jest w oparciu o operację całkowania sumy prędkości wirnika i poślizgu (rys.1) [2]. Podstawową zaletą takiego podejścia jest prosta struktura układu re-

gulacji, pozbawiona konieczności estymacji wektora strumienia skojarzonego wirnika.



Rys. 1. Typowy układ regulacji napędu indukcyjnego z wykorzystaniem pośredniego sterowania wektorowego

Właściwa synteza kąta wektora prądu stojana wraz z precyzyjnym sterowaniem jego składowych jest bardzo ważna z punktu widzenia kontroli momentu elektromagnetycznego oraz strumienia skojarzonego wirnika. Istotnym czynnikiem, pozwalającym na poprawne wyznaczenie zadanego położenia wektora prądu jest precyzyjna znajomość prędkości kątowej ω_r . W sytuacji, gdy prędkość kątowa wału jest obliczana w chwilach dyskretnych, pojawia się konieczność estymacji kąta położenia wału pomiędzy chwilami impulsowania w celu osiągnięcia prawidłowej kontroli momentu elektromagnetycznego.

3. Estymacja prędkości kątowej wału napędowego

Najprostszą metodą wyznaczenia prędkości kątowej wirnika, w chwilach pomiędzy kolejnymi pomiarami jest jej ekstrapolacja. Najpo-

pularniejsze metody wykorzystują ekstrapolację zerowego rzędu

$$\hat{\omega}_r(t) = \omega_r(k) \text{ dla } kT_p \leq t < (k+1)T_p \quad (1)$$

lub ekstrapolację pierwszego rzędu

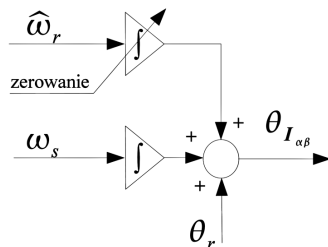
$$\hat{\omega}_r(t) = \omega_r(k) + \frac{t - kT_p}{T_p} (\omega_r(k) - \omega_r(k-1)) \quad (2)$$

dla $kT_p \leq t < (k+1)T_p$

która w przypadku „gładkiego” przebiegu wejściowego prędkości kątowej wirnika umożliwia lepsze przybliżenie jego prędkości rzeczywistej. Bardziej skomplikowane metody związane są z wykorzystaniem modeli układów napędowych, w oparciu o które wyznaczana jest estymowana prędkość kątowa wału [3] [4]. Modele te często oparte są na równaniach Kovacza-Racza i wykorzystywane do sterowania bezczujnikowego. Sterowanie to nie zapewnia jednak precyzyjnej kontroli nad momentem elektromagnetycznym, stąd w licznych aplikacjach wymagany jest pomiar położenia lub prędkości wału napędowego.

4. Synteza zadanej prędkości kątowej wektora prądu stojana

Proponowana metoda syntezy kąta prądu stojana opiera się na dekompozycji prędkości kątowej prądu stojana na trzy składowe (rys.2).



Rys. 2. Dekompozycja kąta wektora prądu stojana

Składową zadanego poślizgu, składową położenia wału silnika i składową estymowanej prędkości kątowej napędu, której wartość całki zerowana jest przy aktualizacji położenia wału silnika. W odróżnieniu od klasycznej metody syntezy kąta wektora prądu stojana błędy estymacji prędkości kątowej napędu są w pełni kompensowane w chwilach aktualizacji informacji o położeniu wału silnika.

Korekta ta powoduje nieciągłość kąta wektora prądu stojana, która skutkuje wystąpieniem dużego zaburzenia w przebiegach regulacji prądów fazowych silnika. Zaburzenie to jest jed-

nak zamierzoną próbą skompensowania błędów w dotychczas realizowanym prądzie i przywrócenia pełnej kontroli nad strumieniem skojarzonym wirnika i momentem elektromagnetycznym silnika. Próba dokonania korekty kąta w sposób bardziej płynny, uniemożliwiłaby skuteczne skompensowanie błędów w sterowaniu zmiennymi stanu silnika.

5. Wyniki badań symulacyjnych

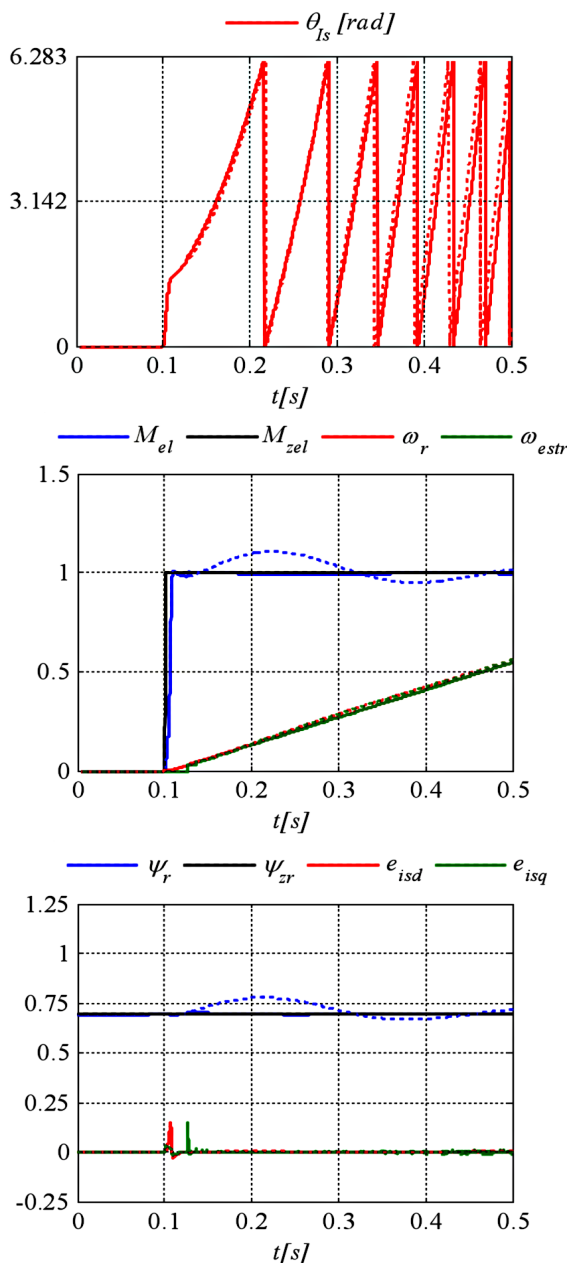
W celu weryfikacji proponowanej metody syntezy kąta zadawanego wektora prądu stojana został stworzony w środowisku obliczeniowym Matlab-Simulink 2009b model symulacyjny układu napędowego, który umożliwił obserwację wybranych wielkości elektrycznych, elektromagnetycznych i mechanicznych.

Na przebiegach symulacyjnych przedstawiono wyniki badań porównawczych procesu regulacji momentu elektromagnetycznego z wykorzystaniem wartości kąta wektora prądu stojana obliczanego zgodnie z dwoma rozpatrywanymi przypadkami (rys.3, rys.4).

Linia przerywana reprezentuje efekt wykorzystania algorytmu syntezy kąta bazujący na całce sumy prędkości kątowej wirnika z ekstrapolatorem zerowego rzędu i pulsacji poślizgu. Linia ciągła odpowiada syntezie kąta uwzględniającej stosowną korektę.

Na rys.3 został przedstawiony przypadek wykorzystania enkodera o 64 impulsach przypadających na pełny kąt elektryczny maszyny. Przy takiej rozdzielczości impulsatora zaburzenie momentu elektromagnetycznego i strumienia skojarzonego wirnika pozostaje na względnie małym poziomie przy braku korekty kąta i praktycznie nie występuje przy uwzględnieniu tej korekty. Zmniejszenie rozdzielczości enkodera do 16 impulsów powoduje istotne pogorszenie jakości procesu regulacji (rys.4).

W chwilach dokonywania korekty kąta wprowadzane jest w układzie istotne zaburzenie w procesie regulacji prądu stojana. Zaburzenie to związane jest z koniecznością przeprowadzenia wektora prądu w nowe położenie. Warunkiem koniecznym na skuteczne dokonanie korekty kąta jest zatem wykorzystanie dobrego regulatora prądu stojana, dla którego zapewniony zostanie właściwy zapas napięcia sterującego. Ponieważ opisywane zjawiska dotyczą rozruchu układu napędowego lub jego niskiej prędkości kątowej nie występuje zagrożenie braku zapasu napięcia falownika do skutecznej regulacji prądów stojana.



Rys. 3. Przebiegi symulacyjne sterowania momentem elektromagnetycznym z wykorzystaniem enkodera położenia wału o rozdzielczości 64 impulsów na kąt elektryczny z wykorzystaniem algorytmu korekty kąta (linia ciągła) i bez korekty kąta prądu stojana (linia przerywana)

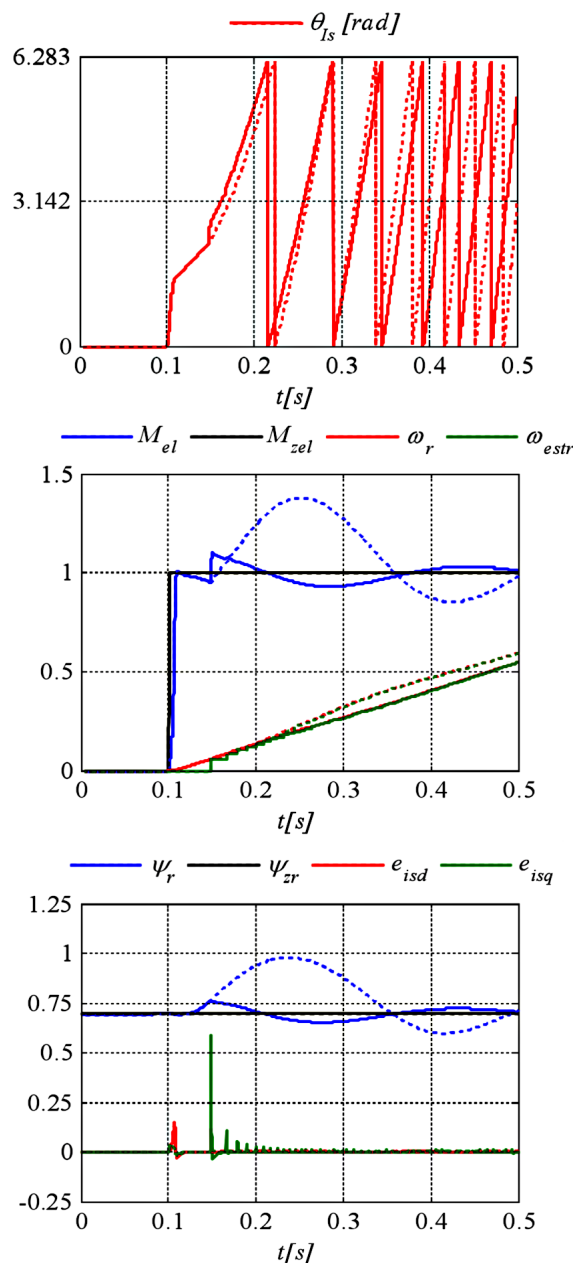
θ_{Is} – kąt wektora prądu stojana,

ω_r, ω_{estr} – rzeczywista i estymowana prędkość kątowa wirnika,

e_{isd}, e_{isq} – uchyby wektorowego regulatora prądu,

M_{zel}, M_{el} – moment elektromagnetyczny, wartość zadana i realizowana,

Ψ_{zr}, Ψ_r – moduł strumienia skojarzonego wirnika, wartość zadana i realizowania.



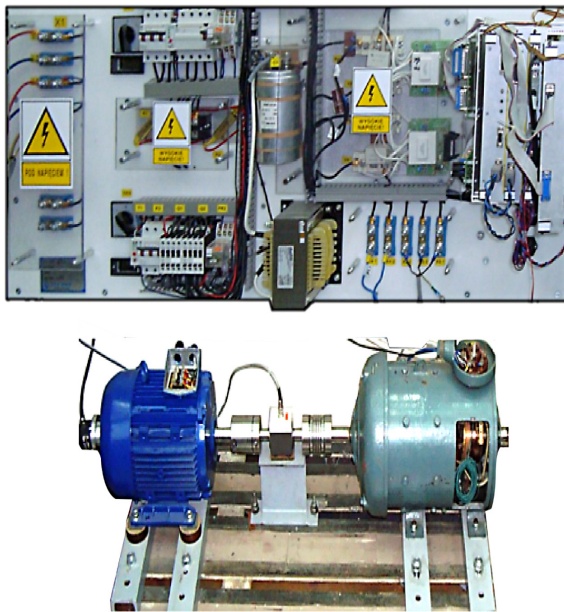
Rys. 4. Przebiegi symulacyjne sterowania momentem elektromagnetycznym z wykorzystaniem enkodera położenia wału o rozdzielczości 16 impulsów na kąt elektryczny z wykorzystaniem algorytmu korekty kąta (linia ciągła) i bez korekty kąta prądu stojana (linia przerywana)

Należy zwrócić uwagę, iż zaburzenie regulacji momentu elektromagnetycznego i strumienia skojarzonego wynika z nieprawidłowej syntezy kąta wektora prądu stojana, podczas gdy regulacja prądu stojana przebiegała w sposób prawidłowy. W każdym z przypadków, brak precyzji wyznaczenia kąta wektora prądu powodował zaburzenie momentu elektrodynamicznego

o charakterze przejściowym zanikającym do zera.

6. Wyniki badań eksperymentalnych

Algorytm sterowania silnikiem indukcyjnym z proponowaną metodą syntezy kąta wektora stojana został zaimplementowany w sterowniku mikroprocesorowym z mikrokontrolerem sygnałowym TMS320F2812 i wykorzystany do sterowania falownikowego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym Sg132-S4 firmy BOBRME Komel o mocy nominalnej 5kW (rys.5).



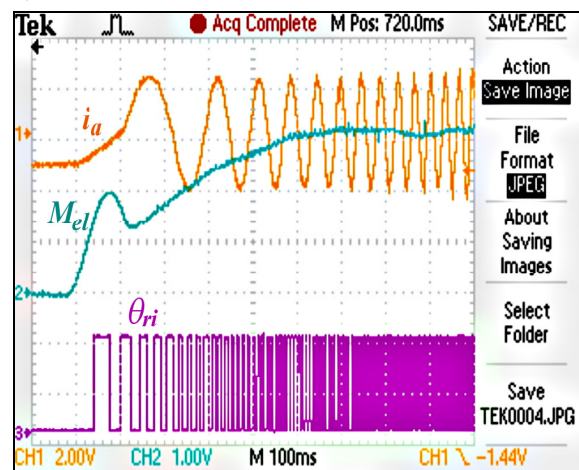
Rys. 5. Stanowisko laboratoryjne z falownikowym układem napędowym wykorzystane do badań eksperymentalnych

Wyniki badań laboratoryjnych przedstawione na rys.6 zostały uzyskane w eksperymencie laboratoryjnym, w którym wykorzystano enkoder położenia wału o 8 impulsach na kąt elektryczny maszyny indukcyjnej. Pomimo tak małej rozdzielczości enkodera została uzyskana wysoka jakość regulacji momentu elektromagnetycznego (rys.6b) w odniesieniu do klasycznego układu sterowania nie uwzględniającego korekty kąta prądu stojana.

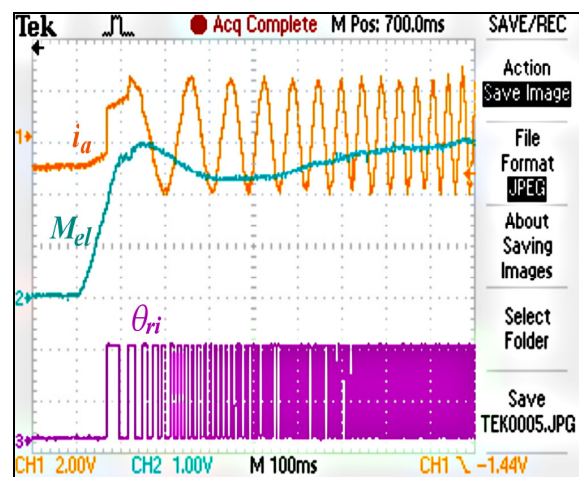
Należy zaznaczyć, że wprowadzenie znaczącej i szybkiej korekty na prądach fazowych stojana wymaga istotnego zapasu napięcia sterującego. Ponieważ jednak korekta ta dokonywana jest szczególnie intensywnie przy rozruchu silnika i niskich prędkościach kątowych wału, siła elektromotoryczna maszyny nie ogranicza zdolności regulacyjnych układu.

Ze względu na odbiegający od sinusoidalnego kształt prądu stojana realizowanego w trakcie dokonywania korekty jego kąta syntezy, proponowana metoda powinna być ograniczona do klasy przekształtnikowych układów napędowych umożliwiających realizację takich prądów. W szczególności dotyczy to częstotliwości pracy kluczy energoelektronicznych w układach przekształtnikowych, która nie powinna być niższa od kilku kiloherców.

a)



b)



Rys. 6. Przebiegi przejściowe w układzie sterowania rzeczywistym falownikowym układem napędowym z wykorzystaniem enkodera położenia wału o rozdzielczości 8 impulsów na kąt elektryczny a) bez zastosowanej korekty syntezy kąta prądu stojana, b) z uwzględnieniem korekty syntezy kąta prądu stojana

7. Podsumowanie

Przedstawiona metoda korekty syntezy kąta prądu bazująca na dekompozycji zadanego położenia wektora prądu stojana na składową

całki poślizgu, składową całki ekstrapolowanej prędkości kątowej wału oraz wykorzystująca korygującą informacje o położeniu wału napędowego jest prostym i skutecznym sposobem na poprawę jakości regulacji momentu elektromagnetycznego w układach wykorzystujących enkodery położenia wału o małej rozdzielczości. Poprawa ta dotyczy w głównej mierze rozruchu silnika oraz jego pracy przy niskiej prędkości kątowej. Skuteczność zaprezentowanej metody została potwierdzona zarówno wynikami badań symulacyjnych, jak i wynikami praktycznymi, zarejestrowanymi w trakcie badań eksperymentalnych.

tut Automatyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, email:andrzej.radecki@p.lodz.pl

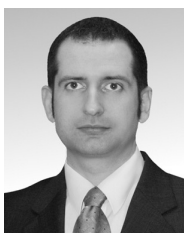
8. Literatura

- [1]. Brock S., Deskur J.: *Problem pomiaru i regulacji prędkości w układzie z niedokładnym przetwornikiem pomiarowym położenia*, Krajowa Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym, SENE 2007, Łódź, 2007.
- [2]. Dębowski A.: *Pośrednie sterowanie w napędzie elektrycznym przy wykorzystaniu stymulatora stanu*. Rozprawy Naukowe z.111, Zeszyty Naukowe Nr 552, Politechnika Łódzka, 1991.
- [3]. Hori Y.: *Robust and adaptive control of a servomotor using low precision shaft encoder*, Proceedings of the IECON '93, pp.73-78 vol.1, Nov 1993.
- [4]. Taeg-Joon Kweon, Dong-Seok Hyun: *High-performance speed control of electric machine using low-precision shaft encoder*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol.14, no.5, pp. 838 - 849, vol.14, Sep 1999.

Autorzy



dr inż. Piotr Chudzik,
Politechnika Łódzka,
Instytut Automatyki,
ul. Stefanowskiego 18/22,
90-924 Łódź,
email:piotr.chudzik@p.lodz.pl



dr inż. Andrzej Radecki
Stypendysta projektu „Innowacyjna dydaktyka bez ograniczeń - zintegrowany rozwój Politechniki Łódzkiej – zarządzanie uczelnią, nowoczesna oferta edukacyjna i wzmacnianie zdolności do zatrudniania, także osób niepełnosprawnych” współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego. Politechnika Łódzka, Insty-