

Jacek Listwan, Krzysztof Pieńkowski
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

ANALIZA STEROWANIA ŚLIZGOWEGO WIELOFAZOWYM SILNIKIEM INDUKCYJNYM

ANALYSIS OF SLIDING-MODE CONTROL OF MULTI-PHASE INDUCTION MOTOR

Streszczenie: Przedstawiono model matematyczny 5-fazowego silnika indukcyjnego klatkowego. Omówiono zasady transformacji równań modelu matematycznego silnika o zmiennych współczynnikach wyrażonych we współrzędnych fazowych, do równań o stałych współczynnikach, wyrażonych w przetransformowanych układach współrzędnych. Omówiono metody i układy sterowania wielofazowym silnikiem indukcyjnym z wielofazowym falownikiem napięcia z zastosowaniem metod sterowania ślizgowego. Przedstawiono strukturę bezpośredniego sterowania połowo-zorientowanego DFOC z wykorzystaniem regulatorów ślizgowych jako regulatorów nadrzędnych i podporządkowanych. W sposób szczegółowy omówiono wybrane struktury sterowania wektorowego z zastosowaniem algorytmu sterowania ślizgowego do bezpośredniego sterowania zaworami wielofazowego falownika napięcia. Przeprowadzono analizę porównawczą wyników badań symulacyjnych dla różnych metod sterowania silnikiem z zastosowaniem regulatorów ślizgowych.

Abstract: The mathematical model of a 5-phase squirrel-cage induction motor has been presented. The transformation of motor phase variables to the transformed systems of coordinates are discussed. The methods and control systems of the sliding mode control of five-phase induction motor with five-phase voltage source inverter are described. The structure of direct field-oriented control system DFOC with sliding-mode controllers in inner and outer control loops is described. The paper presents a detailed analysis of chosen vector control methods with sliding-mode algorithm of direct determination of the inverter switching states. The comparative analysis of the properties of various methods of sliding-mode control has been carried out.

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny wielofazowy, sterowanie ślizgowe, analiza, badania symulacyjne **Key-words:** multi-phase induction motor, sliding-mode control, analysis, simulation studies

1. Wstęp

Rozwój przekształtnikowych układów sterowania częstotliwościowego zapewnia możliwość zastosowań przemysłowych silników indukcyjnych o liczbie faz uzwojenia stojana większej od trzech. Energoelektroniczne przekształtniki częstotliwości mogą być budowane na większą od trzech liczbę faz napięcia wyjściowego przy zachowaniu zasilania z sieci trójfazowej [3, 4].

Wielofazowe silniki indukcyjne mają wiele zalet w porównaniu z konwencjonalnymi silnikami indukcyjnymi klatkowymi. Przy tej samej mocy znamionowej silnika wartości napięć i prądów fazowych silnika wielofazowego są znacznie mniejsze od wartości prądów i napięć w układzie trójfazowym. W przekształtnikach wielofazowych możliwe jest wtedy stosowanie zaworów energoelektronicznych o mniejszej obciążalności prądowej lub napięciowej. Ważną zaletą silników wielofazowych są mniejsze oscylacje momentu elektromagne-

tycznego oraz możliwość stosowania tych silników w układach napędowych wymagających dużej pewności i niezawodności działania, ponieważ silniki indukcyjne wielofazowe mogą warunkowo pracować w przypadku wystąpienia uszkodzenia w jednej lub kilku fazach uzwojenia stojana [1-5].

Rozwój silników wielofazowych jest związany z badaniami metod sterowania tych silników. W pracy tej przedstawiono analizę i wybrane wyniki badań symulacyjnych sterowania 5-fazowym silnikiem indukcyjnym klatkowym z zastosowaniem metod sterowania ślizgowego.

2. Model matematyczny silnika indukcyjnego wielofazowego

Model matematyczny wielofazowego silnika indukcyjnego klatkowego został sformułowany z uwzględnieniem następujących podstawowych założeń upraszczających [3, 4]: wielofazowe uzwojenie stojana i uzwojenie klatkowe wirnika rozpatruje się jako uzwojenia skupione o symetrycznych parametrach elektromagne-

tycznych, pomija się nieliniowość obwodu magnetycznego oraz wpływ prądów wirowych i strat w żelazie, parametry i wielkości elektromagnetyczne wirnika są sprowadzone na stronę stojana.

Model matematyczny wielofazowego silnika indukcyjnego dla zmiennych fazowych jest opisany przez równania różniczkowe o współczynnikach zmiennych w funkcji kąta obrotu wirnika. Równania o stałych współczynnikach otrzymuje się przez zastosowanie odpowiednich transformacji zmiennych fazowych.

Transformacja napięć fazowych stojana silnika 5-fazowego do współrzędnych przetransformowanych jest wyrażona przez następujące zależności wektorowe [2-5]:

$$u_{sx, sy} = \frac{2}{5} \cdot [u_{s1} + \alpha \cdot u_{s2} + \alpha^2 \cdot u_{s3} + \alpha^3 \cdot u_{s4} + \alpha^4 \cdot u_{s5}] \cdot e^{-j\gamma_k} \quad (1)$$

$$u_{sz1, sz2} = \frac{2}{5} \cdot [u_{s1} + \alpha^2 \cdot u_{s2} + \alpha^4 \cdot u_{s3} + \alpha^6 \cdot u_{s4} + \alpha^8 \cdot u_{s5}] \quad (2)$$

$$u_{s0} = \frac{1}{5} \cdot [u_{s1} + u_{s2} + u_{s3} + u_{s4} + u_{s5}] \quad (3)$$

gdzie: $\alpha = e^{j2\pi/n}$, γ_k - kąt położenia osi x układu współrzędnych (x, y) względem fazy l stojana.

W podobny sposób dokonuje się transformacji prądów fazowych i strumieni sprzężonych stojana i wirnika silnika. Dla rozpatrywanego silnika zmienne fazowe 5-fazowego stojana i wirnika są transformowane do 2 zmiennych określonych w układzie współrzędnych $x-y$ wirującym z dowolną zadaną prędkością kątową ω_k względem stojana, do 2 zmiennych w układzie współrzędnych $z1-z2$ oraz do 1 składowej zerowej. Przy rozpatrywaniu układu $x-y$ nieruchomego względem stojana zastosowano oznaczenia osi układu jako $\alpha-\beta$.

Równania 5-fazowego silnika indukcyjnego dla zmiennych wyrażonych w przetransformowanych układach współrzędnych przyjmują następującą postać [2, 3, 4, 5]:

- równania napięciowe stojana i wirnika w układzie współrzędnych $x-y$:

$$u_{sx} = R_s i_{sx} - \omega_k \psi_{sy} + \frac{d}{dt} \psi_{sx} \quad (4)$$

$$u_{sy} = R_s i_{sy} + \omega_k \psi_{sx} + \frac{d}{dt} \psi_{sy} \quad (5)$$

$$0 = R_r i_{rx} - (\omega_k - \omega_e) \psi_{ry} + \frac{d}{dt} \psi_{rx} \quad (6)$$

$$0 = R_r i_{ry} + (\omega_k - \omega_e) \psi_{rx} + \frac{d}{dt} \psi_{ry} \quad (7)$$

- równania napięciowe stojana w układzie współrzędnych dodatkowych $z1-z2$:

$$u_{sz1} = R_s i_{sz1} + \frac{d}{dt} \psi_{sz1} \quad (8)$$

$$u_{sz2} = R_s i_{sz2} + \frac{d}{dt} \psi_{sz2} \quad (9)$$

- równanie na moment elektromagnetyczny:

$$M_e = \frac{5}{2} p_b (\psi_{sy} i_{rx} - \psi_{sx} i_{ry}) \quad (10)$$

gdzie: $u_{sx}, u_{sy}, u_{sz1}, u_{sz2}$ - składowe wektorów napięć stojana; $i_{sx}, i_{sy}, i_{sz1}, i_{sz2}$ - składowe wektorów prądów stojana; i_{rx}, i_{ry} - składowe wektora prądów wirnika; $\psi_{sx}, \psi_{sy}, \psi_{sz1}, \psi_{sz2}$ - składowe wektorów strumienia sprzężonego stojana; ψ_{rx}, ψ_{ry} - składowe wektora strumienia sprzężonego wirnika; M_e - moment elektromagnetyczny silnika; R_s, R_r - rezystancja fazowa stojana i wirnika; p_b - liczba par biegunów silnika; $x-y, z1-z2$ - indeksy dla oznaczenia osi przetransformowanych układów współrzędnych.

Z równania na moment elektromagnetyczny wynika, że przetwarzanie energii elektromechanicznej w silniku wielofazowym jest określone tylko przez oddziaływanie wielkości elektromagnetycznych stojana i wirnika wyrażonych w podstawowym układzie współrzędnych $x-y$. Wielkości elektromagnetyczne wyrażone w dodatkowym układzie współrzędnych $z1-z2$ nie uczestniczą w przekształcaniu energii elektromechanicznej. Wielkości te powinny być jednak wyznaczone, ponieważ ich znajomość jest konieczna do określenia rzeczywistych wartości prądów fazowych stojana silnika. W algorytmach i układach sterowania wielofazowymi silnikami indukcyjnymi należy dążyć do minimalizacji tych wielkości, ponieważ powodują one zwiększenie strat mocy silnika [3, 4].

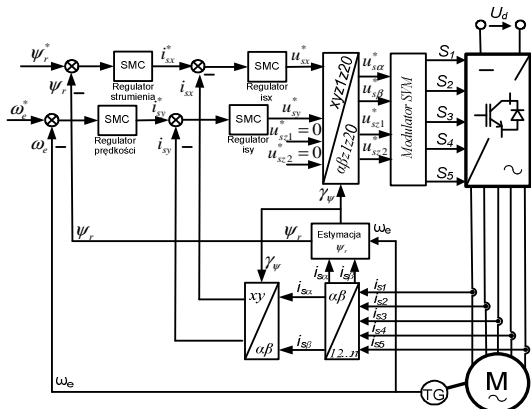
3. Układy sterowania ślizgowego silnikiem indukcyjnym wielofazowym

W artykule przeanalizowano możliwość sterowania 5-fazowego silnika indukcyjnego klatkowego z zastosowaniem metod sterowania ślizgowego. Do badań została wybrana metoda bezpośredniego sterowania połowo-zorientowanego DFOC z wykorzystaniem nadrzędnych i podrzędnych regulatorów ślizgowych oraz

metody sterowania ślizgowego z zastosowaniem algorytmów bezpośredniego sterowania zaworami falownika [6].

Na podstawie analizy tych metod sterowania ślizgowego opracowano algorytmy sterowania, zamodelowano struktury układów sterowania, oraz wykonano badania symulacyjne.

Schemat układu wektorowego sterowania silnikiem indukcyjnym 5-fazowym z zastosowaniem metody bezpośredniego sterowania polowo-zorientowanego DFOC [3, 4] z zastosowaniem regulatorów ślizgowych został przedstawiony na rysunku 1.



Rys.1. Schemat układu wektorowego sterowania DFOC 5-fazowym silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem regulatorów ślizgowych

W układzie sterowania zastosowano dwie nadrzędne pętle regulacji z regulatorami ślizgowymi: regulacji prędkości kątovej silnika i regulacji modułu wektora strumienia sprzężonego wirnika. Regulator prędkości wyznacza zadaną wartość składowej i_{sy}^* wektora prądu stojana, sterującą momentem elektromagnetycznym silnika, a regulator strumienia zadaną wartość składowej i_{sx}^* wektora prądu stojana, sterującą wartością modułu wektora strumienia sprzężonego wirnika. Wprowadzając zdefiniowane poniżej proste przełączające [6]:

$$s_1 = c_1(\omega_e^* - \omega_e) + \frac{d}{dt}(\omega_e^* - \omega_e) \quad (11)$$

$$s_2 = c_2(\psi_r^* - \psi_r) + \frac{d}{dt}(\psi_r^* - \psi_r) \quad (12)$$

wartości zadane składowych wektora prądu stojana są określone przez następujące funkcje przełączające [6]:

$$i_{sx}^* = K_{x1} \operatorname{sgn}(s_1) \quad (13)$$

$$i_{sy}^* = K_{y1} \operatorname{sgn}(s_2) \quad (14)$$

Regulatory ślizgowe zastosowane w podporządkowanych pętlach regulacji sterują składowymi wektora napięcia stojana w osiach x-y. W

regulatorach tych dokonuje się porównania zadanych wartości składowych wektora prądu stojana i_{sx}^* i i_{sy}^* z odpowiednimi przetransformowanymi wartościami mierzonych prądów fazowych stojana.

Dla tych regulatorów przyjęto następujące proste przełączające i funkcje przełączające:

$$s_3 = i_{sx}^* - i_{sx} \quad (15)$$

$$u_{sx}^* = K_{x2} \operatorname{sgn}(s_3) \quad (16)$$

$$s_4 = i_{sy}^* - i_{sy} \quad (17)$$

$$u_{sy}^* = K_{y2} \operatorname{sgn}(s_4) \quad (18)$$

Wartości funkcji przełączających u_{sx}^* i u_{sy}^* wektora napięcia stojana są transformowane do układu współrzędnych α - β , a następnie podawane na blok modulatora wektorowego SVM, który wyznacza stany załączeń zaworów w poszczególnych fazach falownika napięcia.

W układzie sterowania DFOC został zastosowany blok estymacji wektora strumienia sprzężonego wirnika. Blok ten na podstawie sygnałów pomiarowych i modelu matematycznego silnika wyznacza chwilową wartość modułu i kąta położenia wektora strumienia sprzężonego wirnika. Wartość tego kąta jest wykorzystywana do transformacji zadanych składowych wektora prądu stojana z układu x-y do układu α - β .

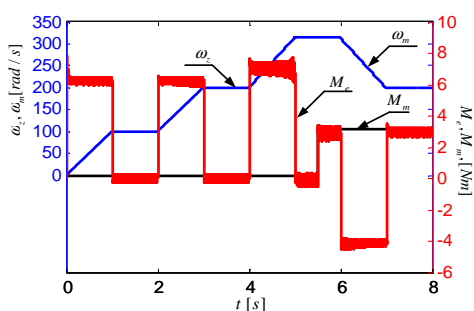
Autorzy artykułu opracowali nowe algorytmy sterowania ślizgowego silnikiem indukcyjnym wielofazowym. Algorytmy te zostały oparte na wykorzystaniu sterowania ślizgowego do bezpośredniego sterowania zaworami falownika napięcia bez konieczności stosowania złożonego modulatora. Opracowano dwie szczegółowe metody realizacji algorytmu bezpośredniego sterowania ślizgowego:

- Metoda I – z algorytmem sterowania ślizgowego opartym na zastosowaniu prostych przełączeń wyznaczonych przez odchyłki napięć fazowych wielofazowego stojana silnika;
- Metoda II – z algorytmem sterowania ślizgowego opartym na zastosowaniu prostych przełączeń wyznaczonych przez odchyłki prądów fazowych wielofazowego stojana silnika.

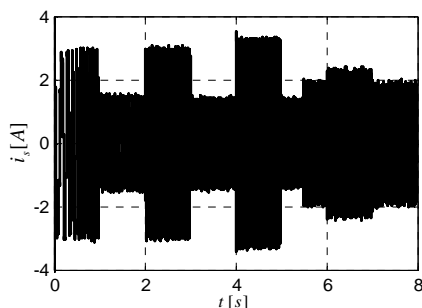
Schemat układu sterowania ślizgowego silnikiem 5-fazowym z zastosowaniem Metody I przedstawiono na rysunku 2. W układzie sterowania występują dwie nadrzędne pętle regulacji: prędkości kątovej silnika i modułu wektora strumienia wirnika. W tej części układu sterowania zastosowano klasyczne regulatory PI, które generują zadane wartości składowych

kich układów i metod sterowania zostały wykonane dla takiego samego założonego przebiegu zmian chwilowej prędkości kątowej silnika. W badaniach w określonych przedziałach czasu wymuszano skokowe zmiany obciążenia silnika momentem mechanicznym.

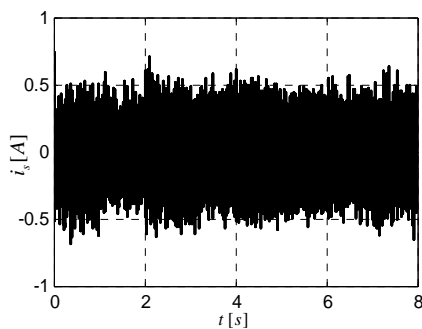
Na rys. 4-7 przedstawiono przebiegi chwilowe zadanej i mierzonej prędkości kątowej silnika, momentu elektromagnetycznego silnika, momentu obciążenia, prądu fazowego stojana, składowej prądu i_{sz1} w układzie z1-z2 oraz trajektorię wektora strumienia wirnika przy sterowaniu wektorowym DFOC z regulatorami ślizgowymi.



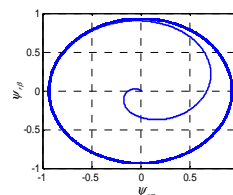
Rys.4. Przebieg zadanej i mierzonej prędkości silnika, momentu elektromagnetycznego i momentu obciążenia przy sterowaniu DFOC



Rys.5. Przebieg prądu fazowego stojana przy sterowaniu DFOC

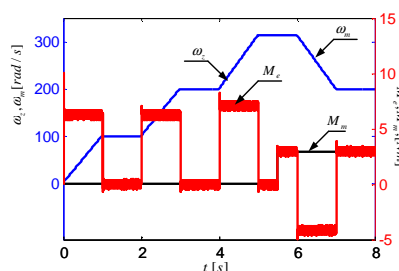


Rys.6. Przebieg składowej prądu fazowego stojana w układzie z1-z2 przy sterowaniu DFOC

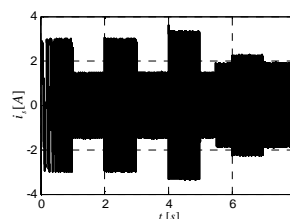


Rys.7. Trajektoria wektora strumienia sprzężonego wirnika przy sterowaniu DFOC

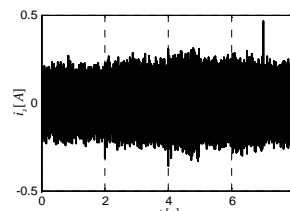
Rys. 8-11 przedstawiają wyniki badań symulacyjnych sterowania silnikiem indukcyjnym 5-fazowym z zastosowaniem Metody I bezpośredniego sterowania ślizgowego zaworami falownika.



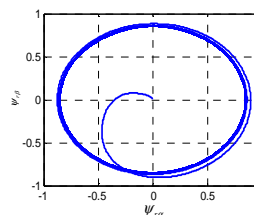
Rys.8. Przebieg zadanej i mierzonej prędkości silnika, momentu elektromagnetycznego i momentu obciążenia przy sterowaniu ślizgowym z zastosowaniem Metody I



Rys.9. Przebieg prądu fazowego stojana przy sterowaniu z zastosowaniem Metody I

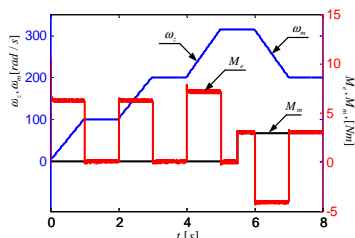


Rys.10. Przebieg składowej prądu fazowego stojana w układzie z1-z2 przy sterowaniu z zastosowaniem Metody I

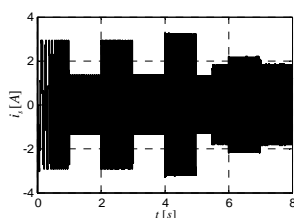


Rys.11. Trajektoria wektora strumienia wirnika przy sterowaniu z zastosowaniem Metody I

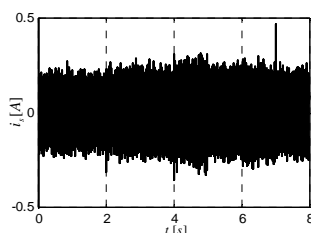
Na rys. 12-15 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych układu sterowania 5-fazowym silnikiem indukcyjnym z wykorzystaniem Metody II bezpośredniego sterowania ślizgowego zaworami falownika.



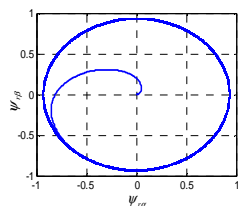
Rys.12. Przebieg zadanej i mierzonej prędkości silnika, momentu elektromagnetycznego i momentu obciążenia przy sterowaniu z zastosowaniem Metody II



Rys.13. Przebieg prądu fazowego stojana przy sterowaniu z zastosowaniem Metody II



Rys.14. Przebieg składowej prądu fazowego stojana w układzie z1-z2 przy sterowaniu z zastosowaniem Metody II



Rys.15. Trajektoria wektora strumienia wirnika z zastosowaniem Metody II

Wyniki badań symulacyjnych wskazują, że rozpatrywane metody sterowania ślizgowego silnikiem indukcyjnym wielofazowym pozwalają na uzyskanie dużej dokładności regulacji zmiennych stanu silnika indukcyjnego wielofazowego. Układy sterowania ze ślizgowym algorytmem bezpośredniego sterowania zawo-

rami falownika pozwalają na zmniejszenie złożoności układów sterowania oraz zminimalizowanie niekorzystnego działania składowych wektora prądu stojana, określonych w innych układach współrzędnych (określonych indeksami z).

5. Podsumowanie

Zastosowanie metod i algorytmów sterowania ślizgowego do sterowania silnikiem indukcyjnym wielofazowym pozwala na uzyskanie dokładnej regulacji zmiennych stanu silnika. Przy zastosowaniu metod sterowania ślizgowego z wykorzystaniem algorytmów bezpośredniego sterowania zaworami falownika nie jest konieczne stosowanie modulatora wektorowego do sterowania zaworami przekształtnika. Przy stosowaniu Metody II bezpośredniego sterowania ślizgowego uzyskano mniejsze pulsacje momentu elektromagnetycznego silnika oraz mniejsze wartości składowych wektora prądu stojana określonych w dodatkowym układzie współrzędnych z1-z2.

6. Literatura

- [1] Drozdowski P.: *Multiphase cage induction motors for controlled drives*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 93, 2011, s. 7-12.
- [2] Levi E., Bojoi R., Profumo F., Toliyat H.A., Williamson S.: *Multiphase induction motor drives – a technology status review*. IET Electr. Power Appl., 2007, V.1, Iss.4, pp. 489–516.
- [3] Listwan J., Pieńkowski K.: *Analiza układów sterowania wektorowego wielofazowym silnikiem indukcyjnym*. Zeszyty Problemowe-Maszyny Elektryczne (Komel) nr 3, 2014, s. 235-240,
- [4] Pieńkowski K.: *Analiza i sterowanie wielofazowego silnika indukcyjnego klatkowego*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 65, 2011 s. 305-319.
- [5] Sowmiya M., Renukadevi G, Rajambal K.: *IFOC of Five-Phase Induction Motor Drive*. Proc. of Internat. Conf. on Power Energy and Control (ICPEC), 2013, pp.304-309.
- [6] Utkin V.I., Guldner J., Shi J.X., *Sliding mode control in electromechanical systems*, Taylor and Francis, New York (1999).

Autorzy

Mgr inż. Jacek Listwan, doktorant PWR,
e-mail: jacek.listwan@pwr.edu.pl
Dr hab. inż. Krzysztof Pieńkowski, prof. PWR,
e-mail: krzysztof.pienkowski@pwr.edu.pl
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych,
Politechnika Wroclawska.