

Tadeusz STEFAŃSKI, Łukasz ZAWARCZYŃSKIPOLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI,
ul. Tysiąclecia P. P. 7, 25-314 Kielce**Analiza porównawcza wybranych metod sterowania momentem i prędkością kątową silnika indukcyjnego****Dr hab. inż. Tadeusz STEFAŃSKI**

Pracuje na stanowisku profesora nadzwyczajnego w Katedrze Systemów Sterowania i Zarządzania na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Realizuje badania naukowe z zakresu metod identyfikacji i teorii sterowania.



e-mail: t.stefanski@tu.kielce.pl

Mgr inż. Łukasz ZAWARCZYŃSKI

Pracuje na stanowisku asystenta w Katedrze Systemów Sterowania i Zarządzania na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Realizuje badania naukowe z zakresu napędów elektrycznych i teorii sterowania.



e-mail: l.zawarczyński@tu.kielce.pl

Streszczenie

Analizowano problemy sterowania momentem i prędkością kątową silnika indukcyjnego z uwzględnieniem metod: skalarnej, bezpośredniego sterowania momentem i strumieniem (DTC) oraz połowo-zorientowanej (FOC). Analiza ta ma na celu porównanie wymienionych metod sterowania silnikami pod kątem jego zastosowania do napędu hydraulicznej stacji zasilającej z pompą o stałej wydajności. W układach regulacji zastosowano klasyczne regulatory typu PI. Badania laboratoryjne przeprowadzono dla napędu z silnikiem o mocy 2,2 kW.

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny, sterowanie prędkością kątową, sterowanie momentem silnika.

Comparative analysis of selected torque and angular velocity control methods for the induction motor**Abstract**

Controlling the torque or the force of a hydraulic system requires applying a pressure control valve. However, velocity control of a hydraulic actuator requires equipping the system with a throttle valve or a variable displacement pump (volumetric control system). Change of fluid flow can be achieved by change of geometric pump volume or its rotational speed. There are unique correlations (nearly proportional) between the torque and the pressure or between the flow and the pump angular velocity (electric motor). These relations can be used for the appropriate control of the electric motor torque or angular velocity. In the paper there is analysed the control of the angular velocity and torque of an induction motor by the following methods: scalar, Direct Torque Control (DTC) and Field-Oriented Control (FOC). Comparison of the mentioned control methods included use of this motor as a drive of the hydraulic station pump with constant working capacity. The conventional PI type controller was used in the control systems. For parametrical identification of the drive system mathematical model and selection of controller parameters, the Box's numerical static optimisation method was used. The tests were carried out for the drive with a 2,2 kW motor.

Keywords: induction motor, angular velocity control system, torque control system.

1. Wstęp

Jednym z popularniejszych sposobów sterowania siłą (lub momentem) w układzie hydraulicznym jest zastosowanie elementu dławiącego (zaworu redukcyjnego). Z kolei sterowanie prędkością hydraulicznego elementu wykonawczego odbywa się poprzez sterowanie przepływem czynnika roboczego. Zmianę przepływu można uzyskać poprzez: zmianę wydajności jednostkowej pompy (objętości geometrycznej), zmianę jej prędkości obrotowej lub poprzez dławienie przepływu [1]. Między momentem a ciśnieniem oraz między wydajnością pompy a prędkością elementu wykonawczego zachodzą jednoznaczne (w przybliżeniu proporcjonalne)

relacje. Wymienione zależności można wykorzystać do odpowiedniego sterowania momentem lub prędkością kątową silnika elektrycznego, napędzającego pompę hydrauliczną. Umożliwi to w przypadku układów sterowania ciśnieniem wyeliminowanie elementów dławiących, a w przypadku układów sterowania przepływem – eliminację kosztownych pomp o zmiennej objętości geometrycznej. Do napędu pomp hydraulicznych są zwykle stosowane silniki indukcyjne. Posiadają one dobre właściwości eksploatacyjne i regulacyjne [2, 3, 4].

W pracy dokonano porównania podstawowych metod sterowania napędem elektrycznym z silnikiem indukcyjnym, biorąc pod uwagę następujące jego właściwości użytkowe: możliwość niemal bezinercyjnego sterowania momentem, małą wartość pulsacji momentu, szybkie uzyskiwanie zadanej prędkości, małe wymagania pomiarowe, odporność układu regulacji na zmiany wartości parametrów silnika i obciążenia oraz niedokładny dobór wartości parametrów regulatora. Do analizy wybrano metody: skalarną, bezpośredniego sterowania strumieniem i momentem silnika indukcyjnego (DTC) oraz połowo-zorientowaną (FOC).

2. Model matematyczny silnika

Model matematyczny silnika indukcyjnego przedstawiono w układzie współrzędnych d - q , zorientowanym zgodnie z wektorem napięcia stojana [3]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \phi_d(t) &= \phi_q(t) \omega_s(t) - R_s I_d(t) + v(t) \\ \frac{d}{dt} \phi_q(t) &= -\phi_d(t) \omega_s(t) - R_s I_q(t) \\ \frac{d}{dt} I_d(t) &= a_1 \phi_d(t) + a_3 \phi_q(t) \omega_e(t) - a_2 I_d(t) + I_q(t) \omega_s(t) + \\ &\quad - I_q(t) \omega_e(t) + a_3 v(t) \\ \frac{d}{dt} I_q(t) &= -a_3 \phi_d(t) \omega_e(t) + a_1 \phi_q(t) - I_d(t) \omega_s(t) + \\ &\quad + I_d(t) \omega_e(t) - a_2 I_q(t) \\ \frac{d}{dt} \omega_e(t) &= \frac{3p^2}{2J} (\phi_d(t) I_q(t) - \phi_q(t) I_d(t)) - \frac{P}{J} M_o(t) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{gdzie: } \sigma = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s L_r}, \quad a_1 = \frac{R_r}{\sigma L_s L_r}, \quad a_2 = \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r},$$

$$a_3 = \frac{1}{\sigma L_s}, \text{ oraz: } I_d, I_q \text{ i } \phi_d, \phi_q - \text{odpowiednio składowe wektora}$$

prądu i strumienia stojana w układzie współrzędnych związanym z wektorem napięcia stojana; ω_s – pulsacja synchroniczna; ω_e – elektryczna prędkość kątowna; R_s i L_s – rezystancja i indukcyjność stojana; R_r i L_r – rezystancja i indukcyjność wirnika;

L_m – indukcyjność główna; p – liczba par biegunów; J – moment bezwładności; M_o – moment obciążenia; v – amplituda napięcia stojana.

Parametry modelu matematycznego silnika wyznaczono na podstawie minimalizacji (metodą Box'a) następującego błędu średniokwadratowego [3]

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I(i) - \hat{I}(i))^2 + \frac{w}{N} \sum_{i=1}^N (\omega(i) - \hat{\omega}(i))^2, \quad (2)$$

przy czym w jest wyznaczanym eksperymentalnie współczynnikiem wagi, N – liczbą pomiarów, a symbolem $\hat{}$ oznaczono rozwiązanie modelu matematycznego silnika. W procesie identyfikacji wyznaczano parametry modelu matematycznego (1) oraz parametry schematu zastępczego silnika. Rezystancję stojana R_s wyznaczono za pomocą bezpośredniego pomiaru. Zgodność trajektorii czasowych prądu i prędkości kątowej silnika oraz jego modelu matematycznego oceniano za pomocą współczynnika korelacji R .

W tabelach 1 i 2 zestawiono wartości identyfikowanych parametrów i współczynników korelacji R , wyznaczonych przy zasilaniu silnika z sieci trójfazowej.

Tab. 1. Wyniki identyfikacji parametrów modelu matematycznego (1)
Tab. 1. Identification results of the mathematical model (1)

| Wartości identyfikowanych parametrów | | | | Wsp. korelacji | |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|----------------|------------|
| J [kg·m ²] | a_1 | a_2 | a_3 | R_I | R_ω |
| 0.081 | 523.4 | 281.1 | 53.8 | 0.979 | 0.993 |

Tab. 2. Wyniki identyfikacji parametrów schematu zastępczego
Tab. 2. Identification results of the equivalent circuit parameters

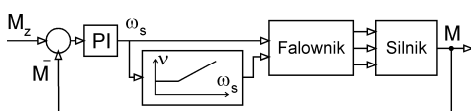
| Wartości identyfikowanych parametrów | | | | | Wsp. korelacji | |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|------------|
| J [kg·m ²] | R_r [Ω] | L_s [H] | L_r [H] | L_m [H] | R_I | R_ω |
| 0.08 | 2.41 | 0.232 | 0.251 | 0.223 | 0.985 | 0.993 |

3. Metoda skalarna

Sterowanie momentem może odbywać się w układzie otwartym lub zamkniętym. W układzie otwartym struktura układu sterowania momentem silnika zależy od strefy prędkości kątowej, w której aktualnie znajduje się napęd. Sterowanie momentem lub prędkością kątową może odbywać się przy stałej wartości pulsacji poślizgu (pierwsza strefa) lub przy stałym stosunku v/ω_s [3].

Wadą pierwszej metody jest dość wolne i oscylacyjne osiągnięcie stanu ustalonego, konieczność pomiaru prędkości kątowej oraz napięć i prądów fazowych silnika, natomiast zaletą – mała wrażliwość trajektorii czasowej momentu na zmiany wartości parametrów silnika oraz momentu obciążenia.

Ponieważ pomiar lub estymacja momentu silnika nie stanowi większego problemu, można zastosować bezpośrednią jego regulację. Wówczas w znacznym stopniu zostaną wyeliminowane wady otwartego układu sterowania, polegające głównie na występowaniu oscylacji momentu. Na uwagę zasługuje tu regulacja momentu M_z przy warunku $v/\omega_s = \text{const}$ (rys. 1).



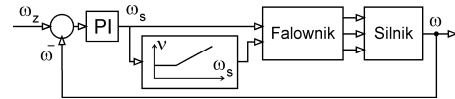
Rys. 1. Schemat blokowy układu regulacji momentu
Fig. 1. Block diagram of the torque control system

Parametry regulatora wyznaczono na podstawie iteracyjnej minimalizacji (metodą Box'a) wskaźnika jakości

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N iT (M_z(i) - M(i))^2, \quad (3)$$

gdzie T jest okresem próbkowania.

Schemat układu regulacji prędkości zamieszczono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat blokowy układu regulacji prędkości kątowej
Fig. 2. Block diagram of angular velocity control system

Wrażliwość trajektorii czasowej wielkości regulowanej (momentu lub prędkości kątowej) oceniano na podstawie jej względnej zmiany S , którą zdefiniowano następująco

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N e(i)^2 - \sum_{i=1}^N e_m(i)^2}{\sum_{i=1}^N e(i)^2} \cdot 100\%, \quad (4)$$

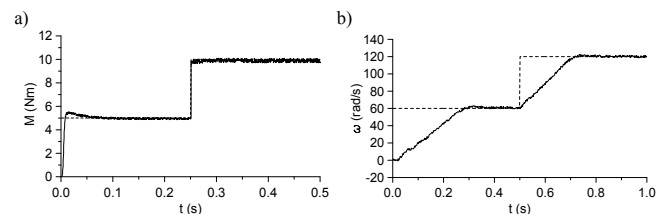
gdzie: e – wielkość wyjściowa silnika (moment lub prędkość kątoowa) przed zmianą wartości identyfikowanego parametru; e_m – wielkość wyjściowa silnika po 10% zmianie wartości analizowanego parametru silnika lub regulatora.

Wpływ zmiany wartości parametrów silnika i regulatora na wartość współczynnika wrażliwości S przedstawiono w tabeli 3. Z przedstawionych wartości wskaźnika wrażliwości wynika, że indukcyjności stojana i wirnika silnie wpływają na jego wartość (dla układu regulacji prędkości), pozostałe parametry wykazują znacznie mniejszy wpływ.

Tab. 3. Wartości współczynnika wrażliwości S [%]
Tab. 3. Values of sensitivity coefficient S [%]

| Układ regulacji: | R_s | R_r | L_s | L_r | J | M_o | k_p | T_i |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| momentu M | 0,007 | 0,051 | -0,19 | -0,25 | -0,26 | 0,13 | -0,29 | -0,28 |
| prędkości ω | -0,65 | 0,53 | 64,32 | 64,18 | -1,23 | 0,13 | -5,27 | -5,33 |

Zastosowanie regulatora PI poprawiło efektywność sterowania momentem i prędkością kątową w zakresie małych wartości prędkości kątowej ω oraz zmniejszyło oscylacje momentu silnika. Przykład odpowiedzi skokowych napędu falownikowego (linie ciągłe) na zadane skokowe zmiany momentu oraz prędkości kątowej (linie przerywane) przedstawia rys. 3.



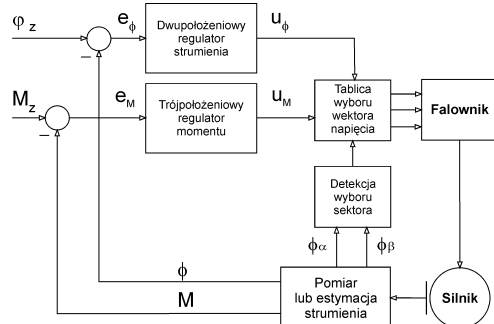
Rys. 3. Odpowiedzi czasowe układu regulacji: a) momentu (układ z rys. 1), b) prędkości kątowej (układ z rys. 2)

Fig. 3. Time responses of: a) torque control system (of Fig. 1), b) angular velocity control system (of Fig. 2)

4. Metoda DTC

W metodzie bezpośredniego sterowania momentem (*Direct Torque Control*) wykorzystano zasadę kształtowania wartości chwilowej momentu poprzez odpowiednią orientację wektora strumienia stojana w stosunku do wektora strumienia wirnika [1, 3,

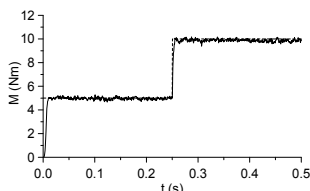
4, 5, 6,]. Schemat blokowy napędu ze sterowaniem DTC przedstawiono na rys. 4. Wartości zadane strumienia stojana ϕ_z i momentu M_z są porównywane z odpowiednimi wartościami mierzonymi.



Rys. 4. Schemat blokowy układu sterowania
Fig. 4. Block diagram of the control system

Wybór wektora napięcia odbywa się na podstawie sygnałów wyjściowych regulatorów momentu i strumienia oraz położenia wektora strumienia. Zmiany położenia wektora strumienia podzielono na 6 sektorów. Na podstawie omówionych powyżej zasad zbudowano tablicę stanów wektora napięcia stojana, według której steruje się tranzystorami falownika.

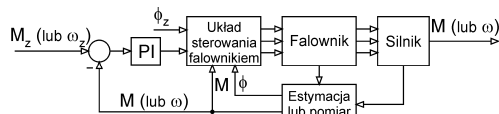
Rysunek 5 przedstawia odpowiedź czasową momentu M (linia ciągła) na zadaną trajektorię M_z (linia przerywana). Analizowana metoda wykazuje dobre właściwości regulacyjne strumienia i momentu.



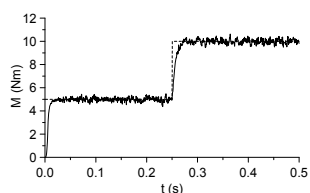
Rys. 5. Odpowiedź czasowa napędu falownikowego (metoda DTC)
Fig. 5. Time response of the inverter drive system (DTC method)

Bezpośrednia metoda sterowania momentem i strumieniem zapewnia prawie bezinercyjne sterowanie momentem. Zamiast pomiaru strumienia i momentu można zastosować estymację tych wielkości. Jednak w tym przypadku jakość regulacji zależy będzie od dokładności identyfikacji modelu matematycznego silnika.

W przypadku większych wymagań odnośnie jakości i dokładności sterowania momentem lub prędkością kątową, a także zwiększenia odporności układu na zmiany wartości parametrów silnika, należy zastosować układ z regulatorem, np. typu PI (rys. 6). Odpowiedź czasową układu regulacji momentu silnika zamieszczono na rys. 7 (moment zadany – linia przerywana).

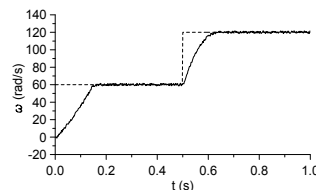


Rys. 6. Schemat blokowy układu sterowania
Fig. 6. Block diagram of the control system



Rys. 7. Odpowiedź czasowa momentu silnika (układ z rys. 6)
Fig. 7. Time response of the motor torque (system of Fig. 6)

Rysunek 8 ilustruje przykład odpowiedzi skokowej prędkości kątowej silnika. Na wejście badanego układu wprowadzono skokowe wartości prędkości 60 i 120 rad/s (linia przerywana).



Rys. 8. Odpowiedź czasowa prędkości kątowej silnika (układ z rys. 6)
Fig. 8. Time response of the motor angular velocity (system of Fig. 6)

Wartości współczynnika wrażliwości S przedstawiono w tabeli 4. Z przedstawionych wartości tego współczynnika wynika, że indukcyjność stojana i wirnika silnie wpływają na jego wartość, pozostałe parametry wykazują znikomy wpływ. Należy zauważyć, że zwiększając zadaną wartość strumienia ϕ_z stojana zmniejsza się wrażliwość układu na zmianę wartości indukcyjności.

Tab. 4. Wartości współczynnika wrażliwości S [%] – układ z rys. 4
Tab. 4. Values of sensitivity coefficient S [%] – system of Fig. 4

| Wartość ϕ_z [H] | R_s | R_r | L_s | L_r | J | M_o |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1,0 | 0,09 | -0,12 | 54,15 | 53,72 | -0,36 | -0,35 |
| 1,3 | 0,07 | 0,11 | -4,16 | -3,75 | -0,71 | -0,87 |

Z kolei w tabeli 5 zestawiono wartości współczynnika wrażliwości dla układu regulacji momentu z regulatorem typu PI (k_p – wzmacnienie, a T_i – stała całkowania). Tu uzyskuje się dobrą odporność układu dla zwiększonej wartości strumienia ϕ_z .

Tab. 5. Wartości współczynnika wrażliwości S [%] – układ z rys. 6
Tab. 5. Values of sensitivity coefficient S [%] – system of Fig. 6

| Wartość ϕ_z [H] | R_s | R_r | L_s | L_r | J | M_o | k_p | T_i |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1,0 | 0,06 | 0,04 | 55,84 | 55,43 | -0,04 | -0,02 | -0,27 | -0,25 |
| 1,3 | -0,09 | 0,16 | -0,61 | -0,52 | -0,06 | 0,11 | -0,21 | -0,28 |

Wyniki analizy wpływu zmiany wartości parametrów silnika na wartość współczynnika wrażliwości S układu regulacji prędkości kątowej przedstawiono w tabeli 6. W tym przypadku również indukcyjności stojana i wirnika silnie wpływają na jego wartość, pozostałe parametry wykazują znikomy wpływ. Również zwiększając zadaną wartość strumienia ϕ_z stojana zmniejsza się wrażliwość układu na zmianę wartości indukcyjności.

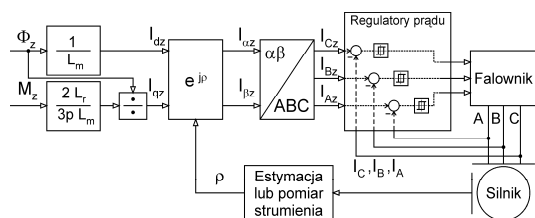
Tab. 6. Wartości współczynnika wrażliwości S [%] – układ z rys. 6
Tab. 6. Values of sensitivity coefficient S [%] – system of Fig. 6

| Wartość ϕ_z [H] | R_s | R_r | L_s | L_r | J | M_o | k_p | T_i |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 1,3 | 0,08 | -1,08 | 25,57 | 25,13 | 1,73 | 1,12 | -0,09 | -0,02 |

5. Sterowanie polowo-zorientowane

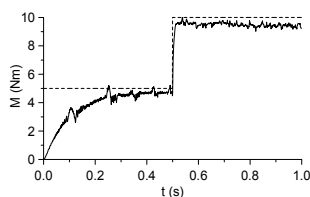
Do najpopularniejszych metod, umożliwiających niezależne sterowanie strumieniem i momentem silnika, zalicza się metodę polowo-zorientowaną (FOC, *Field-Oriented Control*) [2, 3, 4]. Idea tej metody polega na regulacji składowych prądu stojana I_d i I_q , przedstawionych w polowo-zorientowanym układzie współrzędnych, tj. w układzie wirującym zgodnie z wektorem strumienia silnika. Położenie polowo-zorientowanego układu współrzędnych określa się na podstawie pomiaru lub estymacji strumienia (metoda bezpośrednia) lub estymacji poślizgu (metoda pośrednia). Wówczas strumień silnika jest proporcjonalny do składowej prądu stojana I_d , a moment – do składowej I_q .

Podstawowy schemat blokowy układu napędowego z bezpośrednią orientacją wektora pola przedstawiono na rys. 9. Kąt wektora pola ρ wyznaczono na podstawie bezpośredniego pomiaru strumienia (dodatkowe uzwojenia w stojanie).



Rys. 9. Schemat blokowy – metoda bezpośredniej orientacji wektora pola
Fig. 9. Block diagram – the direct field-oriented control method

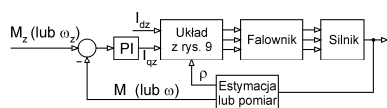
Zadawanie wartości strumienia i momentu w układzie otwartym upraszcza strukturę układu sterowania, ale zwiększa wrażliwość układu na zmiany parametrów silnika. Rysunek 10 przedstawia odpowiedzi czasowe momentu M na zadaną trajektorię M_z (linia przerywana).



Rys. 10. Odpowiedź czasowa momentu silnika (układ z rys. 9)
Fig. 10. Time response of the motor torque (system of Fig. 9)

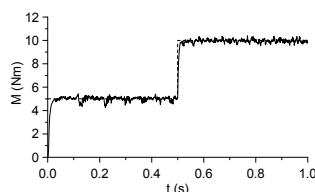
Sterowanie momentem silnika w układzie otwartym (bez regulatora PI) cechuje się dość wolnym osiągnięciem stanu ustalonego w zakresie małych prędkości kątowych, natomiast dla większych wartości prędkości – zmiana momentu następuje w sposób prawie bezinercyjny. Ponadto analizowana metoda wykazuje odchylenie momentu od wartości zadanej. Wady te eliminuje zastosowanie regulatora typu PI.

Schemat blokowy układu regulacji momentu silnika z regulatorem PI oraz z bezpośrednim pomiarem strumienia i momentu zamieszczono na rys. 11.



Rys. 11. Schemat blokowy układu regulacji momentu
Fig. 11. Block diagram of the torque control system

Układ regulacji momentu cechuje się bardzo dobrą dynamiką. Rysunek 12 przedstawia odpowiedź czasową momentu M na zadaną trajektorię M_z (linia przerywana). Analizowana metoda wykazuje dobre właściwości regulacyjne strumienia i momentu.



Rys. 12. Odpowiedź czasowa momentu silnika (układ z rys. 11)
Fig. 12. Time response of the motor torque (system of Fig. 11)

Orientację wektora pola można również wyznaczyć sumując pulsację poślizgu

$$\omega_r = \frac{R_r I_{qz}}{L_r I_{dz}} \quad (5)$$

z elektryczną prędkością kątową wirnika, uzyskując w ten sposób pulsację synchroniczną, a po skalowaniu – kąt ρ wektora pola.

Objęmac pętlą sprzężenia zwrotnego prędkości kątowej z regulatorem PI, otrzyma się układ regulacji prędkości kątowej. Charakter odpowiedzi czasowe prędkości kątowej ω na zadaną trajektorię ω_z jest zbliżony do metody DTC.

Wartości współczynnika wrażliwości S zestawiono w tabeli 7. Metoda FOC wykazuje dużą odporność na zmiany wartości parametrów silnika.

Tab. 7. Wartości współczynników wrażliwości S [%]
Tab. 7. Values of sensitivity coefficients S [%]

| Układ: | R_s | R_r | L_s | L_r | J | M_o | k_p | T_i |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| sterowania momentem | 0,67 | -2,69 | -0,87 | 1,02 | -0,36 | 0,26 | --- | --- |
| regulacji momentu | -0,46 | 0,13 | 3,45 | 3,41 | 0,15 | 0,12 | -0,32 | -0,45 |
| regulacji prędkości ω | 0,15 | -0,58 | -1,15 | 0,36 | 0,98 | 0,62 | -1,58 | -0,07 |

6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono problem sterowania momentem i strumieniem silnika indukcyjnego, zasilanego z falownika napięcia. Układy te analizowano pod kątem zastosowania do napędu hydraulicznej stacji zasilającej. W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono że:

- Analizowane metody sterowania zapewniają praktycznie bezinercyjne sterowanie momentem, a regulację prędkości kątowej o zbliżonym czasie regulacji. Nieco gorsze własności dynamiczne sterowania momentem wykazuje metoda FOC (bez regulatora), a w przypadku regulacji prędkości kątowej – metoda skalarna.
- Najprostszą strukturę oraz najmniejsze wymagania pomiarowe posiada metoda skalarna. Do jej realizacji niezbędny jest tylko pomiar (lub estymacja, np. za pomocą obserwatora) momentu (regulacja momentu) lub prędkości kątowej (regulacja prędkości). Metody DTC i FOC wymagają dodatkowo pomiaru lub estymacji strumienia stojana lub wirnika.
- Spośród analizowanych układów sterowania momentem największą odporność na zmiany jego parametrów wykazuje metoda skalarna i metoda FOC. W metodzie DTC odporność zwiększa się wraz ze wzrostem strumienia stojana.
- Spośród analizowanych układów regulacji prędkości kątowej największą odporność na zmiany jego parametrów wykazuje metoda FOC.

7. Literatura

- [1] Stefański T.: Problemy identyfikacji i sterowania napędami elektrohydraulicznymi. Fluid Power Net Publication, Kraków 1999, str. 113-161.
- [2] Boldea I., Nasar S.A.: Electric drives. CRC Press LLC, 1999.
- [3] Stefański T.: Synteza adaptacyjnych algorytmów sterowania momentem falownikowego napędu samochodu elektrycznego z silnikiem indukcyjnym. Z. N. Politechniki Świętokrzyskiej "Monografie, Studia, Rozprawy", nr 4, Kielce 1995, ss. 1-174.
- [4] Vas P.: Sensorless vector and direct torque control. Oxford University Press, 1998.
- [5] Depenbrock M.: Direct self control of inverter-fed induction machine. IEEE trans. On Power Electr., 1988, No. 4., str. 420-429.
- [6] Korzeniowski M.: Wpływ czasów martwych oraz wektora zerowego napięcia na kształtowanie strumienia i właściwości metody DTC. Materiały VIII Konf. Naukowej SENE. Łódź 2007, str. 241-246.

otrzymano / received: 25.09.2010

przyjęto do druku / accepted: 01.11.2010

artykuł recenzowany