Tadeusz JANIK, Jerzy KUDŁA, Michał TOKARZ Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Politechniki Śląskiej

SPOSOBY POŚREDNIEGO WYZNACZENIA MOMENTU ELEKTROMAGNETYCZNEGO SILNIKA INDUKCYJNEGO ZASILANEGO Z UKŁADU ŁAGODNEGO ROZRUCHU I ZATRZYMANIA ALTISTART 46

Streszczenie. W artykule rozpatrzono dwie metody pośredniego wyznaczenia składowej stałej momentu elektromagnetycznego silnika indukcyjnego zasilanego z tyrystorowego sterownika napięcia. W pierwszej metodzie wykorzystano relację na moment elektromagnetyczny wynikającą z modelu matematycznego monoharmonicznej maszyny indukcyjnej, natomiast w drugiej metodzie wykorzystano uproszczony bilans chwilowej mocy czynnej stojana maszyny. W obu metodach podstawą obliczeń są zarejestrowane wartości chwilowe napięć i prądów stojana silnika.

METHODS OF INDIRECT DETERMINATION OF ELECTROMAGNETIC TORQUE OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR SUPPLIED FROM SOFTSTART ALTISTART 46

Summary. In this paper two methods of indirect determination of the electromagnetic torque constant component of an asynchronous motor supplied from a thyristor bridge are considered. The first method uses the equation describing the electromagnetic torque resulting from the mathematical monoharmonic model of an asynchronous motor whereas in the other method the simplified balance of the stator instantaneous active power is applied. In the both methods calculations, are based on instantaneous values of the stator voltages and currents.

1. WPROWADZENIE

Układy łagodnego rozruchu i zatrzymania silników indukcyjnych zbudowane są na bazie tyrystorowych sterowników napięcia. Ze względu na swą prostotę, dużą niezawodność i stosunkowo niewygórowaną cenę znajdują zastosowanie w układach zasilania silników indukcyjnych służących do napędu pomp, sprężarek, młynów, przenośników taśmowych, wentylatorów w szerokim zakresie mocy znamionowych od kilku kW do kilkuset kW i napięć od 100 V do 600 V.

Właściwości statyczne i dynamiczne trójfazowych sterowników napięcia, w których do zmiany wartości napięcia wyjściowego wykorzystywane są połączone przeciwrównolegle tyrystory, są już dobrze poznane. Stanowiły one przedmiot badań naukowych w latach 70-tych i 80-tych, o czym świadczą liczne w tym okresie publikacje [2, 3, 6]. Znane są więc metody analizy takich układów, jak również rozpoznany jest ich wpływ na pracę silnika i sieci zasilającej.

Badania prowadzone obecnie skupiają się przede wszystkim na wykorzystaniu techniki mikroprocesorowej w przystosowaniu tych układów do wzrastających wymagań użytkowników. Dzięki zastosowaniu mikroprocesorów możliwe jest obecnie coraz lepsze dostosowanie procesu rozruchu i zatrzymania silnika do wymagań narzucanych także przez proces technologiczny.

Wśród nowych rozwiązań technicznych układów łagodnego rozruchu i zatrzymania na uwagę zasługuje układ Altistart 46 produkowany przez firmę Schneider Electric. W układzie tym wielkością zadawaną przez zadajnik i w konsekwencji wielkością sterowaną nie jest napięcie zasilania silnika, ale jego moment elektromagnetyczny, wyznaczony w pośredni sposób za pomocą pomiaru napięć i prądów stojana. Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych w wyniku współpracy z Schneider Electric Polska Sp. z o.o., została wyposażona w taki układ, co umożliwiło przeprowadzenie jego badań symulacyjnych i pomiarowych. Podstawowym celem tych badań było dokonanie oceny metod pośredniego wyznaczenia składowej stałej momentu elektromagnetycznego silnika indukcyjnego zasilanego z omawianego układu i przy wydłużonym czasie rozruchu pracującego w stanie quasi-ustalonym.

Moment elektromagnetyczny silnika indukcyjnego zasilanego ze sterownika napięcia w stanie quasi-ustalonym zawiera składową stałą oraz składowe przemienne. Składowa stała momentu elektromagnetycznego jest wielkością estymowaną w rozpatrywanym układzie łagodnego rozruchu i występuje w pętli sprzężenia zwrotnego. Wolno zmieniającą się składową stałą momentu elektromagnetycznego (uśredniony moment elektromagnetyczny) wyznaczono w pracy dwoma metodami:

- poprzez obliczenie oraz następnie filtrację chwilowego momentu elektromagnetycznego silnika,
- poprzez obliczenie chwilowej mocy czynnej pobieranej przez silnik i dokonanie uproszczonego jej bilansu.

W celu eliminacji z rozważań błędów pomiarowych, oraz błędów odwzorowania rzeczywistej maszyny indukcyjnej przez jej model matematyczny, podstawowe analizy

przeprowadzono korzystając z wyników badań symulacyjnych układu, a następnie uzyskane wyniki zweryfikowano na obiekcie rzeczywistym.

2. MODEL SYMULACYJNY UKŁADU ŁAGODNEGO ROZRUCHU I ZATRZYMANIA

W układach łagodnego rozruchu i zatrzymania, w których podczas obydwu procesów wymagane jest utrzymanie stałego momentu dynamicznego, zapewniającego linowe narastanie prędkości obrotowej silnika, konieczne jest zastosowanie pętli sprzężenia zwrotnego od prędkości obrotowej. Takie rozwiązanie komplikuje i podraża układ i nie jest obecnie stosowane. Wprowadzając jednak do układu pętlę sprzężenia zwrotnego od momentu elektromagnetycznego silnika można, kształtując sposób jego narastania lub obniżania, utrzymać w przybliżeniu stały moment dynamiczny silnika podczas rozruchu i zatrzymania. Schemat blokowy takiego układu przedstawiono na rys.1. W rozwiązaniach technicznych, nawiązując do klasycznych układów łagodnego rozruchu, stosuje się zwykle liniowe narastanie lub obniżanie momentu elektromagnetycznego silnika, co w przybliżeniu tylko zapewnia (w pewnym przedziale prędkości) stały moment dynamiczny.



- Rys.1. Schemat blokowy układu łagodnego rozruchu i zatrzymania z regulacją momentu: ZM-zadajnik momentu, RM-regulator momentu, EM-estymator momentu, OPogranicznik prądu, PP-przetwornik prądu, UWT-układ wyzwalania tyrystorów
- Fig.1. Block diagram of softstart with torque control: ZM-torque ramp, RM-torque controller, EM-torque estimator, OP-current limiter, PPcurrent converter, UWT-thyristor firing system

W celu dokonania analizy metod pośredniego wyznaczenia momentu elektromagnetycznego silnika przeprowadzono badania symulacyjne układu, wykorzystując w tym celu program komputerowy TCAD ver. 6.2.

Przyjmując strukturę układu sterowania silnika przedstawioną na rys.1, opracowano za pomocą programu TCAD (stworzonego specjalnie do symulacji napędów elektrycznych o zasilaniu przekształtnikowym) model symulacyjny układu łagodnego rozruchu silnika indukcyjnego. Schemat modelu symulacyjnego, stworzonego przy użyciu edytora graficznego programu TCAD, ilustruje rys.2. W modelu tym wyróżniono:

- 3-fazową symetryczną sieć zasilającą,

- tyrystorowy 3-fazowy sterownik napięcia,
- silnik wraz z obciążeniem,
- układ wyzwalania tyrystorów,
- regulator momentu,
- zadajnik momentu,
- układ pomiaru (estymacji) momentu elektromagnetycznego silnika,
- rejestratory wielkości elektrycznych i mechanicznych.



Rys.2. Schemat symulacyjny układu ze sprzężeniem zwrotnym od momentu Fig.2. Simulation diagram of a system with torque feed-back

Badania symulacyjne przeprowadzono dla silnika indukcyjnego o następujących danych znamionowych:

$$P_n = 3 \ kW$$
, $U_{sn} = 380 \ V$, $I_{sn} = 6,7 \ A$,

 $n_n = 1430 \text{ obr/min},$ $\cos\varphi_n = 0.82$ oraz parametrach elektromagnetycznych:

| $R_s = 2, 1 \Omega$ | $R_r^* = 1,25 \ \Omega,$ | $L_{\sigma\sigma} = L_{\sigma\tau}^{*} = 0,000652 H,$ |
|---------------------|----------------------------|---|
| $L_m = 0,229 H,$ | $J = 0,34 \ kg \cdot m^2.$ | |

Otrzymane wyniki badań symulacyjnych w postaci przebiegów czasowych napięć i prądów stojana wykorzystano do pośredniego wyznaczenia składowej stałej momentu elektromagnetycznego silnika. Do oceny dokładności jej wyznaczenia wykorzystano przebieg czasowy momentu elektromagnetycznego uzyskany bezpośrednio z badań symulacyjnych, traktując ten przebieg oraz wyfiltrowaną z niego składową stałą jako przebiegi wzorcowe.

Wybrane wyniki symulacji przy liniowo narastającej wartości zadanej momentu elektromagnetycznego przedstawiono na rys.3.

Przyjęto następujące wartości:

- moment początkowy $T_p = 4 \text{ Nm},$ - moment końcowy $T_k = 20 \text{ N} \cdot \text{m}$ $t = 5 \, s$.





Rys.3. Wyniki symulacji uzyskanych przy użyciu programu TCAD: a) napięcie międzyprzewodowe stojana, b) prąd fazowy stojana, c) moment elektromagnetyczny, d) prędkość kątowa mechaniczna



3. SPOSOBY POŚREDNIEGO WYZNACZENIA SKŁADOWEJ STAŁEJ MOMENTU ELEKTROMAGNETYCZNEGO SILNIKA

Moment elektromagnetyczny silnika indukcyjnego można wyznaczyć w sposób pośredni, korzystając z równania określającego moment elektromagnetyczny w modelu matematycznym monoharmonicznej maszyny indukcyjnej [5]:

$$T_e = p \operatorname{Re} \{ j \underline{\Psi}_s I_s^* \}.$$
⁽¹⁾

Występujący w równaniu (1) wektor przestrzenny prądu stojana można wyznaczyć bezpośrednio dokonując pomiaru prądów stojana, natomiast wektor przestrzenny sprzężenia magnetycznego stojana można wyznaczyć w pośredni sposób korzystając z II prawa Kirchhoffa dla obwodu stojana, które w układzie współrzędnych 2-osiowych związanym ze stojanem przyjmuje postać:

$$\frac{d\underline{\Psi}_s}{dt} = \underline{U}_s - R_s \underline{I}_s.$$
(2)

Całkując równanie (2) otrzymuje się wektor przestrzenny sprzężenia magnetycznego stojana:

$$\underline{\Psi}_{s} = \int_{0}^{s} (\underline{U}_{s} - R_{s} \underline{I}_{s}) dt + \underline{\Psi}_{s} (0).$$
⁽³⁾

Z przedstawionych zależności (1) i (3) wynika, że moment elektromagnetyczny maszyny indukcyjnej w pośredni sposób można wyznaczyć dokonując pomiaru:

- wektorów przestrzennych napięcia i prądu stojana,
- rezystancji stojana.

Wektory przestrzenne napięcia i prądu stojana w przypadku uzwojeń maszyny połączonych w gwiazdę można wyznaczyć dokonując pomiaru wartości chwilowych dwóch napięć międzyprzewodowych oraz dwóch prądów fazowych. W wyniku tych pomiarów przeprowadzonych dla dyskretnych chwil czasu otrzymuje się relacje:

$$\underline{I}_{s}(t_{i}) = \sqrt{\frac{2}{3}} \Big[i_{sa}(t_{i}) + \underline{a} \ i_{sb}(t_{i}) + \underline{a}^{2} i_{sc}(t_{i}) \Big], \tag{4}$$

$$i_{sb}(t_i) = -[i_{sa}(t_i) + i_{sc}(t_i)],$$
⁽⁵⁾

$$\underline{U}_{s}(t_{i}) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{1}{1 - a^{2}} \Big[u_{sab}(t_{i}) + a u_{sbc}(t_{i}) + a^{2} u_{sca}(t_{i}) \Big], \tag{6}$$

$$u_{sca}(t_i) = -\left[u_{sab}(t_i) + u_{sbc}(t_i)\right].$$
⁽⁷⁾

Rezystancję stojana można natomiast wyznaczyć metodą techniczną, pomijając jej zmianę w wyniku wzrostu temperatury. Jedną z trudności w wyznaczeniu momentu elektromagnetycznego jest prawidłowe wyznaczenie całki występującej w relacji (3), którą można wyznaczyć korzystając z metody Eulera (metoda prostokątów) lub z metody trapezów. W wyniku całkow i dla dyskretnych chwil czasu otrzymuje się następujące zależności:

dla metody prostokątów:

$$\underline{\Psi}_{s}(t_{i}) = (\underline{U}_{s}(t_{i}) - R_{s}L_{s}(t_{i}))\Delta T + \underline{\Psi}_{s}(t_{i-1}), \qquad (8)$$

- dla metody trapezów:

$$\underline{\Psi}_{s}(t_{i}) = \frac{1}{2} \left[\left(\underline{U}_{s}(t_{i}) + \underline{U}_{s}(t_{i-1}) \right) - R_{s} \left(\underline{I}_{s}(t_{i}) + \underline{I}_{s}(t_{i-1}) \right) \right] \varDelta T + \underline{\Psi}_{s}(t_{i-1}).$$

$$\tag{9}$$

Przyjęte procedury całkowania obarczone są błędem. Błąd ten zależy zarówno od przyjętego kroku całkowania (zależnego od częstotliwości próbkowania mierzonych sygnałów), jak i charakteru zmian mierzonych wielkości. Ponadto na jego wartość wpływają także błędy wnoszone przez system pomiarowy [4]. Stosunkowo niewielki błąd w obliczeniu wektora przestrzennego sprzężenia magnetycznego, wynikający z relacji (3), ma znaczący wpływ na przebieg czasowy momentu elektromagnetycznego. W celu zbadania wpływu częstotliwości próbkowania mierzonych sygnałów na przebiegi czasowe wektora przestrzennego stojana oraz na przebieg czasowy momentu elektromagnetycznego maszyny przeprowadzono ich obliczenia korzystając z wyników symulacji, eliminując w ten sposób wpływ błędów pomiarowych na wyniki. Przykładowe wyniki obliczeń dla częstotliwości próbkowania f = 100 kHz i f = 10 kHz przedstawiono na rys.4.

Z przeprowadzonych badań wynika, że szybkie zmiany napięć chwilowych stojana spowodowane zmianami stanu przewodzenia tyrystorów powodują szybkie zmiany pochodnych składowych osiowych wektora przestrzennego sprzężenia magnetycznego stojana (rys.4a,b), co w konsekwencji przy małej częstotliwości próbkowania prowadzi do błędów wyznaczenia tych składowych (rys 4c,d). Stosunkowo mały błąd w wyznaczeniu tych składowych powoduje znaczące zniekształcenie przebiegu czasowego momentu elektromagnetycznego (rys.4e,f). Przeprowadzone badania pokazały, że w celu pośredniego wyznaczenia chwilowego momentu elektromagnetycznego przebiegi czasowe napięć i prądów stojana powinny być próbkowane z częstotliwości f = 100 kHz.



- Rys.4. Wyniki obliczeń pochodnych składowych osiowych wektora przestrzennego sprzężenia magnetycznego stojana i składowych osiowych tego wektora oraz chwilowego momentu elektromagnetycznego
- Fig.4. Calculation results of derivatives of the axis components of the stator flux linkage space vector and of the axis component of this vector as well as of the instantaneous electromagnetic torque

Przeprowadzając filtrację składowej stałej momentu pokazano również, że pomimo znaczących różnic w przebiegach czasowych momentu elektromagnetycznego (rys.3c i rys.4f) jego uśredniona wartość praktycznie jest taka sama, co wynika z następujących rozważań.

Składowa stała momentu elektromagnetycznego w monoharmonicznej maszynie indukcyjnej zasilanej ze sterownika napięcia przemiennego wytworzona jest zarówno przez

podstawową, jak i wyższe harmoniczne czasowe wektorów przestrzennych prądu i sprzężenia magnetycznego stojana.

Uwzględniając, że w stanie ustalonym (quasi-ustalonym) zachodzi [6]:

$$\underline{\Psi}_{s} = \sum_{k=0,\pm l,\pm 2} \underline{\Psi}_{skm} e^{j(6k+l)\omega_{s}t} , \qquad (10)$$

$$\underline{I}_{s} = \sum_{k=0,\pm l,\pm 2} \underline{I}_{skm} e^{j(6k+l)\omega_{S}l} ,$$
(11)

składowa stała momentu elektromagnetycznego wynosi:

$$T_{e0} = p \operatorname{Re}\left\{\sum_{k=0,\pm 1,\pm 2} \underline{\Psi}_{skm} \underline{I}_{skm}^*\right\}.$$
(12)

Przyjmując, że tylko kilka harmonicznych w przebiegach czasowych napięcia, prądu i w konsekwencji sprzężenia magnetycznego stojana jest dominujących (rys.8,10), można przyjąć, że do wyznaczenia składowej stałej (uśrednionej) momentu elektromagnetycznego próbkowanie przebiegów czasowych z częstotliwością rzędu kilku kHz jest wystarczające, co potwierdza rys.5.





Fig.5. Average electromagnetic torque calculated at sampling frequency: a) $f = 100 \ kHz$, b) $f = 3.3 \ kHz$

Drugim rozpatrywanym sposobem pośredniego wyznaczenia składowej stałej momentu elektromagnetycznego silnika jest wykorzystanie pomiarów chwilowej mocy czynnej stojana.

Chwilową moc czynną pobieraną przez uzwojenia stojana połączone w gwiazdę można wyznaczyć na podstawie następującej zależności:

$$p_s = u_{sab}i_{sa} + u_{scb}i_{sc} = \operatorname{Re}(\underline{U}_s I_s), \qquad (13)$$

zaś chwilową moc p_{Ψ} nazwaną umownie chwilową mocą pola wirującego silnika wyznacza się na podstawie wyrażenia, w którym pominięto chwilowe starty mocy czynnej w rdzeniu stojana:

$$p_{\Psi} = p_s - R_s \left| \underline{I}_s \right|^2. \tag{14}$$

W stanie quasi-ustalonym obie moce zawierają składową stałą oraz składową przemienną. Przeprowadzając bilans chwilowej mocy czynnej w stojanie można wykazać, że składowa stała mocy pola wirującego wynosi:

$$P_{\psi 0} = \operatorname{Re}\left\{\sum_{k=0,\pm 1,\pm 2} j(6k+1)\omega_{s} \underline{\Psi}_{skm} \underline{I}_{skm}^{*}\right\} = \sum_{k=0,\pm 1,\pm 2} \frac{(6k+1)}{p}\omega_{s} T_{ek0} .$$
(15)

Przyjmując założenia, że składowa stała momentu wytworzona przez podstawową harmoniczną sprzężenia magnetycznego i prądu stojana jest dominująca, można napisać następującą przybliżoną relację:

$$T_{e0} \approx p \frac{P_{\Psi 0}}{\omega_s}.$$
(16)

Z zależności (16) wynika, że składową stałą momentu elektromagnetycznego można wyznaczyć mierząc chwilową moc pola wirującego i filtrując jej składową stałą. Przeprowadzając powyższe obliczenia wyznaczono składową stałą momentu przedstawioną na rys. 6. Porównując ze sobą wyniki obliczeń przedstawionych na rys.6b można zauważyć, iż oba sposoby wyznaczania składowej stałej momentu elektromagnetycznego silnika indukcyjnego zasilanego z układu łagodnego rozruchu i zatrzymania są równoważne.



Rys.6. Przebieg chwilowej mocy pola wirującego (a) oraz porównanie otrzymanych wyników uśrednionego momentu elektromagnetycznego (b) ((1) – wynik z mocy pola wirującego maszyny, (2) – dokładny wynik)

Fig.6. Waveform of the instantaneous electromagnetic power (a) and comparison of the obtained average electromagnetic torque waveforms (b) ((1) - result from the electromagnetic power, (2) - accurate result)

4. WERYFIKACJA POMIAROWA POŚREDNICH SPOSOBÓW WYZNACZANIA SKŁADOWEJ STAŁEJ MOMENTU ELEKTROMAGNETYCZNEGO SILNIKA

W celu dokonania weryfikacji pomiarowej omówionych w rozdziale 3 metod, przeprowadzono badania laboratoryjne. W badaniach wykorzystano stanowisko laboratoryjne, w którym poprzez powiększenie momentu bezwładności na wale silnika można wydłużyć czas rozruchu silnika i tym samym zbliżyć się do zakładanego stanu quasiustalonego. Badania przeprowadzono dla silnika o mocy 3 kW zasilanego przez układu Altistart ATS-46D17N z sieci 380 V. Do pomiarów wykorzystano trójfazowy analizator mocy NORMA D6100 sterowany za pomocą komputera z poziomu programu opracowanego w środowisku LabVIEW. Do obróbki i analizy sygnałów pomiarowych wykorzystano programy Mathcad i Matlab.

Badania laboratoryjne przeprowadzono dla kilku wartości nastaw rampy narastania momentu elektromagnetycznego silnika. W czasie pomiarów dokonano rejestracji przebiegów czasowych prądów i napięć stojana. W celu oceny zawartości wyższych harmonicznych w mierzonych przebiegach przeprowadzono dodatkowo ich analizę zarówno w dziedzinie częstotliwości, jak i czasu, stosując tak zwaną krótkoczasową transformację Fouriera STFT (Short Time Fourier Transformation).

Definicja tej transformacji jest podobna do definicji transformacji Fouriera, przy czym transformowany przebieg czasowy dodatkowo jest mnożony przez funkcję okna w(t-h):

$$F(f,h) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) w^* (t-h) e^{-j2\pi f t} dt.$$
 (17)

Do analizy STFT wykorzystano przybornik Matlaba – Signal Processing Toolbox. Wybrane wyniki pomiarów i analiz przedstawiono na rys. 8 i rys. 10. Za pomocą zmierzonych przebiegów czasowych napięć i prądów stojana wyznaczono w pośredni sposób chwilowy moment elektromagnetyczny oraz jego składową stała (rys.12b,c), a także chwilową moc czynną stojana (rys.11) oraz moc p_{Ψ} (rys.12a). Filtracje składowych stałych wyznaczonych przebiegów czasowych dokonano za pomocą filtru dolnoprzepustowego Buttewortha. Porównując ze sobą składowe stałe momentu elektromagnetycznego wyznaczone obiema metodami, można zauważyć, że są one zbliżone do siebie.







Rys.8. Wyniki analizy STFT napięcia międzyprzewodowego stojana Fig.8. Results of STFT analysis of the stator line-to-line voltage



Rys.9. Przebiegi czasowe prądu stojana podczas rozruchu Fig.9. Waveforms of the stator current during motor start up



Rys.10. Wyniki analizy STFT pradu fazowego stojana Fig.10. Results of STFT analysis of the stator phase current



Rys.11. Przebiegi czasowe mocy chwilowej stojana podczas rozruchu Fig.11. Waveforms of the stator instantaneous active power during motor start up



Rys.12. Przebieg czasowy chwilowej mocy pola wirującego (a), chwilowego momentu elektromagnetycznego (b) i uśrednionego momentu elektromagnetycznego (c) podczas rozruchu

Fig.12. Waveforms of the instantaneous electromagnetic power (a), the instantaneous electromagnetic torque (b) and average electromagnetic torque (c) during motor start up

5. ZAKOŃCZENIE

Przeprowadzone badania symulacyjne pokazały, że wartości chwilowe momentu elektromagnetycznego silnika indukcyjnego zasilanego z układu łagodnego rozruchu można wyznaczyć w sposób pośredni dokonując pomiaru prądu i napięcia stojana z częstotliwością próbkowania równą około 100 kHz.

Dokonując pomiarów przebiegów czasowych z mniejszą częstotliwością (2-3 kHz) wyznacza się zniekształcony przebieg chwilowego momentu elektromagnetycznego, którego składowa stała niewiele różni się od przebiegu wzorcowego. Składową stałą momentu można także z dostateczną dokładnością wyznaczyć dokonując pomiaru chwilowej mocy czynnej stojana i przeprowadzając uproszczony bilans mocy dla stojana.

Wykonane pomiary laboratoryjne potwierdziły powyższe wnioski oraz pokazały, że badany układ łagodnego rozruchu i zatrzymania Altistart 46 steruje momentem elektromagnetycznym silnika podczas rozruchu. Dzięki takiemu rozwiązaniu układ ten może spełniać dodatkowe wymagania stawiane coraz częściej przez użytkowników, a wynikające z procesu technologicznego.

LITERATURA

- Kudła J., Tokarz M.: Badania laboratoryjne układu łagodnego rozruchu i zatrzymania Altistart 46 firmy Schneider Electric. Zeszyty problemowe: Maszyny elektryczne, nr 61/2000, Materiały konferencyjne IX Sympozjum Komel 2000, str. 71-76.
- 2. Lipo T. A.: The analysis of induction motors with voltage control by symmetrically triggered thyristors. IEEE Trans on Power Apparatus and System, Vol.PAS-90, No 2, March/April 1971, pp. 515-525.
- Murthy S.S., Berg G.J.: A new approach to dynamic modeling and transient analysis of SCR-controlled induction motors. IEEE Trans on Power Apparatus and System, Vol.PAS-101, No 9, September 1982, pp. 3141-3150.
- Nykliński A., Rams W.: The indirect method to determine starting torque of induction motors, also for non-sinusoidal supply. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej "Elektryka", nr 92, Łódź 1998, s. 65-70.
- 5. Paszek W.: Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego. Wyd. Helion, Gliwice 1998.
- Potapow W.: Silnik indukcyjny z komutatorem tyrystorowym w obwodzie stojana w układzie regulacji prędkości obrotowej. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1974.
- 7. Vas P.: Parameter Estimation, Condition Monitoring and Diagnosis of Electrical Machines. Clarendon Press, Oxford 1993.

Recenzent: Dr hab. inż. Jerzy Hickiewicz prof. Politechniki Opolskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 5 maja 2000 r.

Abstract

In this paper two methods of indirect determination of the electromagnetic torque constant component of an asynchronous motor supplied from a thyristor bridge are presented. Analysis is based on the simulation model (Fig.2) uses TCAD ver. 6.2 program. The results of simulation (Fig.3) are presented in Chapter 2.

In Chapter 3 the methods of indirect determination of the electromagnetic torque constant component are discussed in detail. The first method uses the equation (1) resulting from the mathematical monoharmonic model of an asynchronous motor. Influence of the sampling frequency on the electromagnetic torque waveform (Fig.4) is presented. In Fig.5 the average electromagnetic torque for two values of sampling frequency $f = 100 \ kHz$ and $f = 3,3 \ kHz$ is shown. In the other method the relationship (16) describing the simplified balance of the stator instantaneous active power is applied. The calculation results are presented in Fig.6.

In Chapter 4 the laboratory test results of ATS-46D17N softstart Altistart are given and verification of the considered methods is performed. On the basis of measurements the analysis of the stator voltage and current waveforms (Fig.7 - 10) is made. The waveform of the average electromagnetic torque during motor start up (Fig.12c) is calculated from the equations (1) and (16).

SPIS WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- p_s moc chwilowa dostarczana do silnika
- $P_{\Psi 0}$ składowa stała chwilowej mocy pola wirującego,
- $R_s, R_t, L_{\sigma s}, L_{\sigma r}, L_m, J$ parametry elektromagnetyczne silnika,
- p -liczba par biegunów,
- T_e moment elektromagnetyczny,
- T_{e0} składowa stała momentu elektromagnetycznego,
- L- wektor przestrzenny prądu stojana,

- \underline{U}_s wektor przestrzenny napięcia stojana,
- $\underline{\Psi}_{s}$ wektor przestrzenny sprzężenia magnetycznego stojana,
- I_{skm} amplitudy zespolone wyższych harmonicznych czasowych wektora przestrzennego prądu stojana,
- Ψ_{skm} amplitudy zespolone wyższych harmonicznych czasowych wektora przestrzennego sprzężenia magnetycznego.