ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2004
Seria: ELEKTRYKA z.188 Nr kol. 1627

Aleksander ŻYWIEC
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych

SYNTEZA ALGORYTMÓW SKALARNEGO STEROWANIA CZĘSTOTLIWOŚCIOWEGO SILNIKA INDUKCYJNEGO

Streszczenie. Przedstawiono równania określające prądy i strumienie sprzężone uzwojeń oraz moment elektromagnetyczny maszyny indukcyjnej, zasilanej ze źródła napięcia sinusoidalnego, pracującej w stanie ustalonym. Wyznaczono zależności określające algorytmy skalarnego sterowania częstotliwościowego silnika indukcyjnego. W analizie uwzględniono szeroki zestaw kryteriów statycznej optymalizacji warunków pracy ustalonej maszyny. Przedstawiono porównanie różnych algorytmów skalarnego sterowania silnika indukcyjnego.

SYNTHESIS OF FREQUENCY SCALAR-CONTROL ALGORITHMS OF INDUCTION MACHINE

Summary. The equations determining the currents and flux linkages of the windings as well as the electromagnetic torque of an induction machine operating in steady state and supplied from a sinusoidal voltage source are presented in the paper. The relationships describing the frequency scalar-control algorithms of the induction motor are given, too. In the analysis the wide range of static optimization criteria of the machine steady-state operation is taken into account. There is also presented the comparison of different scalar-control algorithms of the induction machine.

1. UWAGI WSTĘPNE

Właściwości statyczne i dynamiczne silnika indukcyjnego mogą być kształtowane przez odpowiednią zmianę warunków zasilania uzwojenia stojana. W ogólnym przypadku takie kształtowanie właściwości silnika jest możliwe, gdy uzwojenie stojana jest zasilane ze źródła, którego przebieg (funkcja zmian w czasie) napięcia bądź prądu może być dowolnie ustalany przez sterowanie sygnałem zewnętrznym. Zwykle ten sygnał sterujący, ustalający warunki zasilania uzwojenia stojana silnika indukcyjnego, jest otrzymywany w układzie sterowania, realizującym zadany algorytm sterowania. Zastosowanie znajdują dwa zasadnicze rodzaje algorytmów sterowania silnika indukcyjnego [1, 2]:

- algorytmy sterowania wektorowego, w których przez zmianę przebiegu napięcia bądź prądu zasilania uzwojenia stojana jest utrzymywane optymalne położenie przestrzenne dwóch wybranych wektorów wielkości elektromagnetycznych silnika; są to tzw. „układy optymalizacji dynamicznej" [4, 5],
- algorytmy sterowania skalarnego, w których przez zmianę pulsacji i amplitudy sinusoidalnego przebiegu napięcia bądź prądu zasilania uzwojenia stojana jest utrzymywana stała wartość amplitudy wybranej wielkości elektrycznej, magnetycznej lub

mechanicznej silnika (przyjętej jako wielkość kryterialna); są to tzw. „układy optymalizacji statycznej" [2, 3].

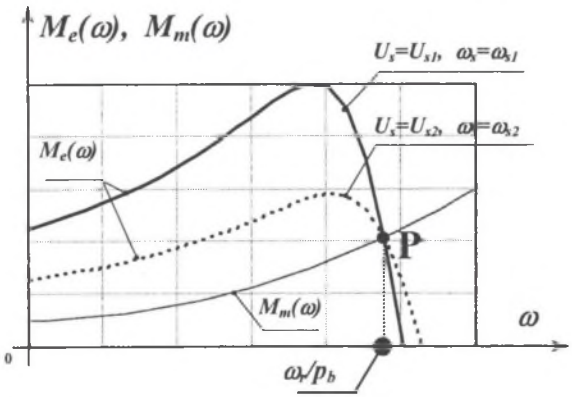
W obydwu rodzajach algorytmów sterowania można uwzględnić różne kryteria sterowania, charakteryzujące wielkości wewnętrzne silnika.

W celu realizacji wybranego algorytmu sterowania silnika indukcyjnego trzeba jego uzwojenie stojana zasilać ze źródła, umożliwiającego odpowiednie kształtowanie napięcia bądź prądu za pomocą sygnału wypracowanego w układzie sterowania, przy czym:

- w przypadku sterowania wektorowego źródło zasilania musi umożliwiać dowolne kształtowanie przebiegu napięcia $u_s(t)$ bądź prądu $i_s(t)$,
- w przypadku sterowania skalarnego źródło zasilania musi umożliwiać niezależne nastawianie pulsacji ω_s oraz amplitudy U_s sinusoidalnego przebiegu napięcia bądź amplitudy I_s sinusoidalnego przebiegu prądu.

Wynika stąd, że w układach sterowania wektorowego trzeba stosować bardziej rozbudowane źródła przekształtnikowe (wyposażone zwykle w mikroprocesorowy układ sterowania). Dlatego w wielu napędach przemysłowych są stosowane prostsze układy sterowania, do których są zaliczane układy sterowania skalarnego silnika indukcyjnego.

Zasada sterowania skalarnego silnika indukcyjnego wynika z możliwości wpływania na kształt charakterystyki mechanicznej $M_e(\omega)$ silnika, przez zmianę pulsacji ω_s przy równoczesnej odpowiedniej zmianie amplitudy sinusoidalnego przebiegu napięcia u_s bądź prądu i_s źródła zasilającego uzwojenie stojana. W stanie obciążenia silnika maszyną roboczą o charakterystyce mechanicznej $M_m(\omega)$ można otrzymać pożądany stabilny punkt **P** pracy ustalonej (wynikający z równania $M_e(\omega) = M_m(\omega)$) przy różnych warunkach zasilania uzwojenia stojana (rys. 1). Jednoznaczne ustalenie warunków zasilania jest możliwe przez narzucenie dodatkowego wymagania (dodatkowej wielkości kryterialnej), postawionego wybranym parametrom, charakteryzującym pracę ustaloną silnika obciążonego.



Rys. 1. Charakterystyki mechaniczne silnika indukcyjnego $M_e(\omega)$ i urządzenia obciążającego $M_m(\omega)$ oraz punkt **P** pracy zespołu wirującego, ($U_{s1} > U_{s2}$, $\omega_{s1} < \omega_{s2}$)

Fig. 1. Electromagnetic torqueof induction motor $M_e(\omega)$ and load $M_m(\omega)$ as well as the working point **P** of rotating unit ($U_{s1} > U_{s2}$, $\omega_{s1} < \omega_{s2}$)

Celem niniejszej publikacji jest synteza algorytmów skalarnego sterowania silnika indukcyjnego, przy uwzględnieniu szerokiego zestawu różnych kryteriów sterowania.

Układy sterowania silnika indukcyjnego przez zmianę warunków zasilania uzwojenia stojana napięciem bądź prądem sinusoidalnym są ogólnie znane w teorii maszyn elektrycznych [1], [2]. Z uwagi na ograniczone możliwości realizacji procedur obliczeniowych stosowane były jedynie te algorytmy skalarnego sterowania silnika, które opisywane były stosunkowo prostymi zależnościami, wynikającymi z przyjęcia stosunkowo prostych kryteriów sterowania. Obecnie technika mikroprocesorowa umożliwia realizację bardziej skomplikowanych algorytmów sterowania skalarnego silnika indukcyjnego, odpowiednich dla bardziej skomplikowanych kryteriów (wielkości kryterialnych) sterowania.

2. RÓWNANIA STANU USTALONEGO MASZYNY INDUKCYJNEJ

Synteza algorytmów skalarnego sterowania częstotliwościowego bazuje na modelu matematycznym (w ortogonalnym układzie współrzędnych) dla pracy ustalonej maszyny indukcyjnej. Na rys. 2 przedstawiono schemat zastępczy maszyny indukcyjnej pracującej przy poślizgu s:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}, \tag{1}$$

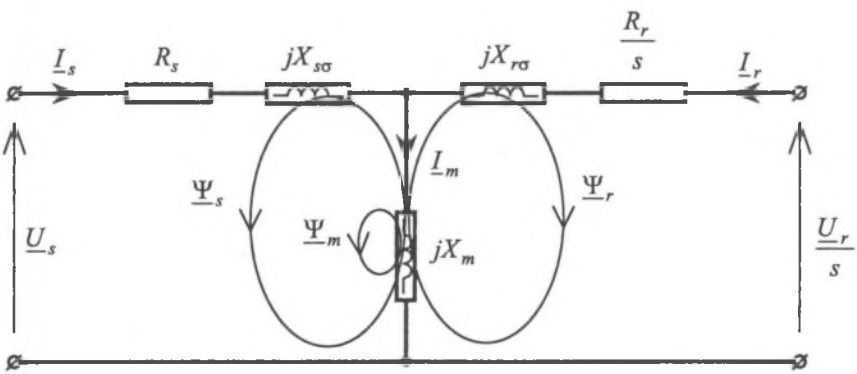
przy czym:

ω_s - pulsacja sieci zasilającej uzwojenie stojana maszyny,

$\omega_r = p_b\,\omega$ - elektryczna prędkość kątowa wirnika,

p_b - liczba par biegunów maszyny,

ω - mechaniczna prędkość kątowa wirnika.



Rys. 2. Schemat zastępczy maszyny indukcyjnej w stanie pracy ustalonej
Fig. 2. Equivalent circuit of induction machine in steady state

Jeśli zadane są warunki zasilania silnika, to z rozwiązania schematu zastępczego (rys. 2) można wyznaczyć zależności określające fazory (wektory uogólnione) wielkości elektromagnetycznych maszyny; przy zasilaniu maszyny ze źródła napięciowego od strony uzwojenia stojana (tzn. $\underline{U}_r = 0$) otrzymuje się:

$$\underline{I}_s = \frac{R_r + j\,s\,X_r}{(R_s + j\,X_s)(R_r + j\,s\,X_r) + s\,X_m^2}\,\underline{U}_s\,, \tag{2a}$$

$$\underline{I}_r = \frac{-j\,s\,X_m}{(R_s + j\,X_s)(R_r + j\,s\,X_r) + s\,X_m^2}\,\underline{U}_s\,, \tag{2b}$$

$$\underline{\Psi}_s = \frac{1}{\omega_s}\,\frac{X_s(R_r + j\,s\,X_r) - j\,s\,X_m^2}{(R_s + j\,X_s)(R_r + j\,s\,X_r) + s\,X_m^2}\,\underline{U}_s\,, \tag{2c}$$

$$\underline{\Psi}_r = \frac{1}{\omega_s}\,\frac{X_m\,R_r}{(R_s + j\,X_s)(R_r + j\,s\,X_r) + s\,X_m^2}\,\underline{U}_s\,, \tag{2d}$$

$$\underline{\Psi}_m = \frac{1}{\omega_s}\,\frac{X_m\left[(R_r + j\,s\,X_r) - j\,s\,X_m\right]}{(R_s + j\,X_s)(R_r + j\,s\,X_r) + s\,X_m^2}\,\underline{U}_s\,. \tag{2e}$$

Z powyższych zależności można wyznaczyć funkcje $K(\omega_s, s)$, określające następujące wielkości K charakteryzujące pracę ustaloną maszyny indukcyjnej:

- moduły fazorów (wektorów uogólnionych) wielkości elektromagnetycznych:

$$W_k = |\underline{W}_k| \quad dla\ W = U,\ I,\ \Psi \quad oraz\ k = s,\ r, m \tag{3a}$$

- moc czynną pobieraną z sieci zasilającej uzwojenie stojana:

$$P_s = \mathrm{Re}\left\{\underline{U}_s\,\underline{I}_s^*\right\} \tag{3b}$$

- straty mocy czynnej w uzwojeniach maszyny:

$$\Delta P_u = \Delta P_{us} + \Delta P_{ur} = R_s\left\{\underline{I}_s\,\underline{I}_s^*\right\} + R_r\left\{\underline{I}_r\,\underline{I}_r^*\right\} \tag{3c}$$

- moment elektromagnetyczny:

$$M_e = \frac{p_b}{\omega_s}\,X_m\,\mathrm{Re}\left\{j\,\underline{I}_r\,\underline{I}_s^*\right\}, \tag{3d}$$

- moment elektromagnetyczny krytyczny:

$$M_{ek} = \max\{M_e\}, \tag{3e}$$

- moment elektromagnetyczny rozruchowy:

$$M_{e1} = (M_e)_{dla\ s=1}\,, \tag{3f}$$

- stosunek momentu elektromagnetycznego do prądu uzwojenia stojana:

$$\frac{M_e}{I_s} = \frac{p_b}{\omega_s}\,X_m\,\frac{\mathrm{Re}\left\{j\,\underline{I}_r\,\underline{I}_s^*\right\}}{|\underline{I}_s|}, \tag{3g}$$

- moc mechaniczną maszyny (zamienioną na pracę mechaniczną):

$$P_m = \frac{\omega_r}{p_b}\,M_e = \frac{\omega_r}{\omega_s}\,X_m\,\mathrm{Re}\left\{j\,\underline{I}_r\,\underline{I}_s^*\right\}. \tag{3h}$$

W zależnościach powyższych „gwiazdką" oznaczono sprzężone fazory (wektory uogólnione) prądów uzwojeń maszyny. Szczegółowa postać zależności (3a),..., (3h) jest przedstawiona w załączniku Z2, zaś w załączniku Z1 podano wykaz przyjętych oznaczeń parametrów elektromagnetycznych maszyny indukcyjnej.

Równania zestawione w załączniku Z2 umożliwiają wyznaczenie algorytmów skalarnego sterowania częstotliwościowego maszyny indukcyjnej, przy zadanej kryterialnej wielkości K_{zad} sterowania.

3. SYNTEZA ALGORYTMÓW SKALARNEGO STEROWANIA MASZYNY INDUKCYJNEJ

Synteza algorytmów skalarnego sterowania częstotliwościowego maszyny indukcyjnej polega na wyznaczeniu odpowiednich funkcji zmian amplitudy fazora (wektora uogólnionego) napięcia U_s zasilania uzwojenia stojana, przy zmianach pulsacji ω_s oraz poślizgu s. Funkcje te powinny być tak dobrane, aby w rozpatrywanym przedziale sterowania była utrzymywana określona wartość zadana K_{zad}, dowolna z wielkości K (charakteryzujących pracę ustaloną maszyny indukcyjnej), przyjęta jako kryterium sterowania.

Zadaną wielkością kryterialną K_{zad} sterowania skalarnego może być dowolna z wielkości elektrycznych $(U, I, P, \Delta P)$, magnetycznych (Ψ) i mechanicznych (M_e) maszyny, ale szczególnie uzasadnione jest, gdy wielkość kryterialna jest wybrana z następującego zestawu:

a) **Pierwsza grupa wielkości kryterialnych:**

- zadana amplituda fazora (wektora uogólnionego) napięcia uzwojenia stojana maszyny $K^{I}_{zad} = U_{s(zad)}$,
- zadany stosunek amplitudy fazora (wektora uogólnionego) do pulsacji napięcia uzwojenia stojana maszyny $K^{I}_{zad} = \left(U_s / \omega_s \right)_{(zad)}$,
- zadana amplituda fazora (wektora uogólnionego) prądu uzwojenia stojana maszyny $K^{I}_{zad} = I_{s(zad)}$,
- zadana amplituda fazora (wektora uogólnionego) strumienia sprzężonego uzwojenia stojana maszyny $K^{I}_{zad} = \Psi_{s(zad)}$,
- zadana amplituda fazora (wektora uogólnionego) strumienia sprzężonego uzwojenia wirnika maszyny $K^{I}_{zad} = \Psi_{r(zad)}$,
- zadana amplituda fazora (wektora uogólnionego) strumienia sprzężonego głównego maszyny $K^{I}_{zad} = \Psi_{m(zad)}$,
- zadany stosunek momentu elektromagnetycznego do amplitudy fazora (wektora uogólnionego) prądu uzwojenia stojana maszyny $K^{I}_{zad} = \left(M_e / I_s \right)_{(zad)}$.

b) **Druga grupa wielkości kryterialnych:**

- zadana moc czynna pobierana z sieci zasilającej uzwojenie stojana maszyny $K^{II}_{zad} = P_{s(zad)}$,

- zadane straty mocy czynnej w uzwojeniach stojana i wirnika maszyny $K_{zad}^{II} = \Delta P_{u(zad)}$,
- zadany moment elektromagnetyczny maszyny $K_{zad}^{II} = M_{e(zad)}$,
- zadany moment elektromagnetyczny krytyczny maszyny $K_{zad}^{II} = M_{ek(zad)}$,
- zadany moment elektromagnetyczny rozruchowy maszyny $K_{zad}^{II} = M_{el(zad)}$,
- zadana moc mechaniczna maszyny $K_{zad}^{II} = P_{m(zad)}$.

Algorytmami sterowania skalarnego maszyny indukcyjnej dla zadanej wielkości kryterialnej K_{zad} są funkcje $U_s(\omega_s, s, K_{zad})$, określające, jak - przy zmianach pulsacji sieci zasilającej ω_s oraz poślizgu s maszyny - należy zmieniać amplitudę fazora (wektora uogólnionego) napięcia U_s źródła zasilającego uzwojenie stojana maszyny. Zależności określające algorytmy sterowania skalarnego maszyny indukcyjnej, wynikają z przyrównania odpowiedniej wielkości K maszyny (określonej równaniami zestawionymi w załączniku Z2), z jej zadaną wartością kryterialną K_{zad}:

$$K = K_{zad} \quad \Rightarrow \quad U_s = U_s(\omega_s, s, K_{zad}) = \ldots\ldots\ldots \tag{4}$$

Tak wyznaczone (z równania (4)) algorytmy skalarnego sterowania maszyny indukcyjnej przyjmują następującą postać ogólną:

- dla pierwszej grupy wielkości kryterialnych:

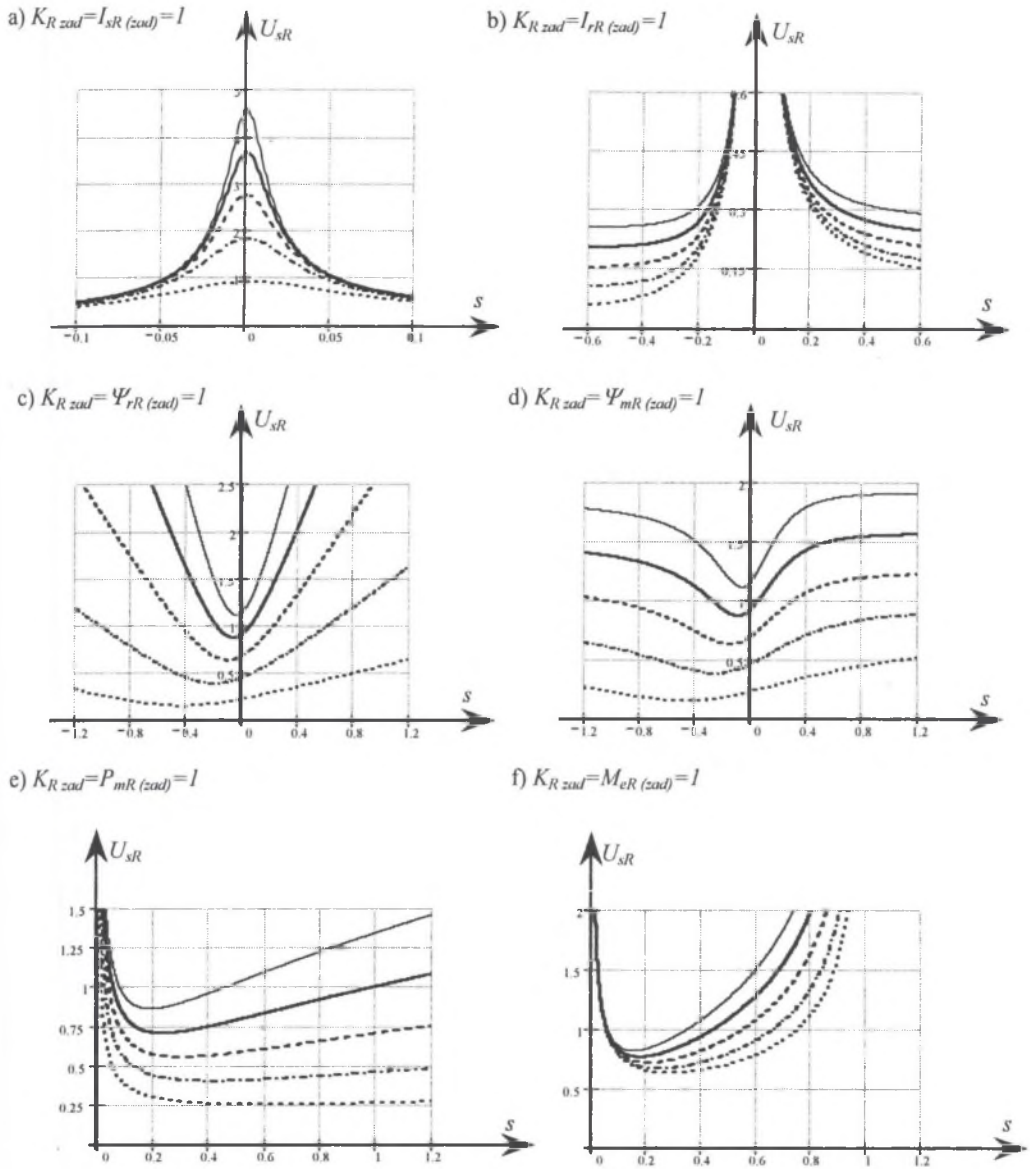
$$U_s = \left[k_u^I(\omega_s, s)\right] K_{zad}^I, \tag{5a}$$

- dla drugiej grupy wielkości kryterialnych:

$$U_s = \sqrt{\left[k_u^{II}(\omega_s, s)\right] K_{zad}^{II}}. \tag{5b}$$

Szczegółowe postacie równań, określających funkcje $k_u^I(\omega_s, s)$ oraz $k_u^{II}(\omega_s, s)$ dla poszczególnych kryteriów sterowania skalarnego, zestawiono w załączniku Z3. Jest oczywiste, że równania te obowiązują w takim zakresie zmian wartości pulsacji ω_s, poślizgu s i wielkości kryterialnej K_{zad}, przy której otrzymuje się (z zależności (5a, b)) dodatnie (i rzeczywiste) wartości napięcia U_s zasilania uzwojenia stojana maszyny.

Wykresy ilustrujące algorytmy sterowania skalarnego, dla wybranych kryteriów sterowania częstotliwościowego maszyny indukcyjnej małej mocy (8,1 kW), przedstawiono na rys. 3 i na rys. 4. Na tych wykresach dodatkowy indeks „R" oznacza wielkości relatywne, przy czym wielkościami odniesienia są znamionowe wartości odpowiednich wielkości.

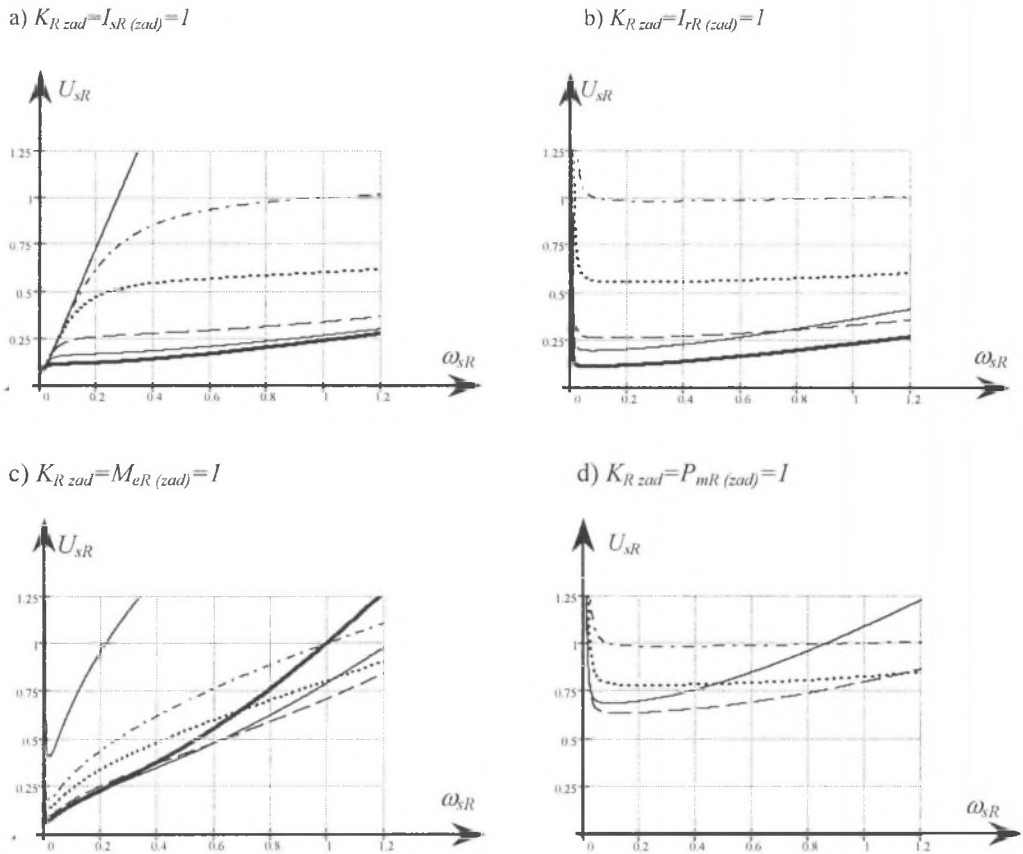


Rys. 3. Zależność napięcia U_{sR} od poślizgu s maszyny indukcyjnej małej mocy, zasilanej ze źródła napięcia sinusoidalnego o stałej pulsacji $\omega_{sR}=const$, dla wybranych kryteriów K_{zad} sterowania skalarnego:

——— ω_{sR}=1,25 ——— ω_{sR}=1,00 – – – ω_{sR}=0,75

– · – · ω_{sR}=0,50 ····· ω_{sR}=0,25

Fig. 3. Dependence of voltage U_{sR} on slip s of low-power induction machine fed from sinusoidal voltage source of constant pulsation $\omega_{sR}=const$ for selected criteria K_{zad} of scalar control



Rys 4. Zależność napięcia U_{sR} od pulsacji ω_{sR} zasilania silnika indukcyjnego małej mocy ze źródła napięcia sinusoidalnego dla wybranych kryteriów K_{zad} sterowania skalarnego, przy stałym poślizgu $s=const$:

s=1,00 — s=0,50 — s=0,25 — ω_{sR}=0,10 — s=s_N — s= 0,01

Fig. 4. Dependence of voltage U_{sR} on pulsation ω_{sR} of low-power induction motor supply from sinusoidal voltage source for selected criteria K_{zad} of scalar control at constant slip $s=const$

4. UWAGI KOŃCOWE

Z równań zestawionych w załączniku Z3 oraz z przedstawionych charakterystyk (rys. 3 oraz rys. 4) wynika, że przy skalarnym sterowaniu częstotliwościowym, algorytm zmian wartości napięcia zasilania maszyny indukcyjnej jest jednoznacznie zależny od przyjętego kryterium sterowania. Na podstawie tych równań można (dla zadanej wielkości kryterialnej) określić zakres sterowania częstotliwościowego, przy którym nie zostaną przekroczone dopuszczalne wartości napięcia zasilania uzwojenia stojana maszyny.

Równania określające wielkości elektryczne, magnetyczne i mechaniczne maszyny, które zestawiono w załączniku Z2, są przydatne do analizy właściwości maszyny indukcyjnej,

pracującej przy różnych kryteriach skalarnego sterowania częstotliwościowego. Ponadto, dla zadanej wielkości kryterialnej można na ich podstawie określić zakres skalarnego sterowania częstotliwościowego, przy którym (w stanie pracy ustalonej) nie zostaną przekroczone dopuszczalne wartości wybranych wielkości elektromagnetycznych i mechanicznych maszyny.

Przedstawione zależności stanowią podstawę syntezy układów skalarnego sterowania częstotliwościowego maszyny indukcyjnej, przy różnych kryteriach sterowania. W szczególności zależności te mogą być bezpośrednio wykorzystane do programowania pracy różnych mikroprocesorowych układów skalarnego sterowania silnika indukcyjnego.

5. ZAŁĄCZNIKI

Z1. WYKAZ OZNACZEŃ PARAMETRÓW MASZYNY INDUKCYJNEJ

Przyjęto następujące oznaczenia parametrów elektromagnetycznych (reaktancji uzwojeń, współczynnika rozproszenia i stałych czasowych) maszyny indukcyjnej:

$\sigma = 1 - \dfrac{X_m^2}{X_s\, X_r}$ - współczynnik rozproszenia maszyny,

$X_s = X_{s\sigma} + X_m$ - reaktancja uzwojenia stojana dla pulsacji równej ω_s,

$X_r = X_{r\sigma} + X_m$ - reaktancja uzwojenia wirnika dla pulsacji równej ω_s,

$T_{s\sigma} = \dfrac{X_{s\sigma}}{\omega_s\, R_s} = \dfrac{X_s - X_m}{\omega_s\, R_s}$ - stała czasowa dla strumienia magnetycznego rozproszenia uzwojenia stojana,

$T_{s0} = \dfrac{X_s}{\omega_s\, R_s}$ - stała czasowa dla strumienia magnetycznego uzwojenia stojana przy rozwartym uzwojeniu wirnika,

$T_{r\sigma} = \dfrac{X_{r\sigma}}{\omega_s\, R_r} \dfrac{X_r - X_m}{\omega_s\, R_r^{\bullet}}$ - stała czasowa dla strumienia magnetycznego rozproszenia uzwojenia wirnika,

$T_{r0} = \dfrac{X_r}{\omega_s\, R_r}$ - stała czasowa dla strumienia magnetycznego uzwojenia wirnika przy rozwartym uzwojeniu stojana,

$A_u(\omega_s, s) = \sqrt{\left[1 - \omega_s^2 (\sigma\, T_{s0}\, T_{r0})\, s\right]^2 + \omega_s^2 (T_{s0} + s\, T_{r0})^2}$ - funkcja pomocnicza.

Z2. RÓWNANIA OKREŚLAJĄCE WIELKOŚCI CHARAKTERYZUJĄCE PRACĘ USTALONĄ MASZYNY INDUKCYJNEJ

Przy zasilaniu maszyny ze źródła napięciowego o pulsacji ω_s i amplitudzie fazora (wektora uogólnionego) napięcia równej U_s, na podstawie zależności (2a),..., (2e) oraz (3a),..., (3h), otrzymuje się następującą postać równań, określających poszczególne wielkości K charakteryzujące pracę ustaloną:

- prąd uzwojenia stojana:
$$I_s = \frac{\sqrt{1+\omega_s^2\, T_{r0}^2\, s^2}}{R_s\, A_u(\omega_s, s)}\, U_s, \tag{Z2.1a}$$

- prąd uzwojenia wirnika:
$$I_r = \frac{s\,\omega_s\,(T_{r0} - T_{r\sigma})}{R_s\, A_u(\omega_s, s)}\, U_s \tag{Z2.1b}$$

- strumień sprzężony uzwojenia stojana:
$$\Psi_s = \frac{T_{s0}\sqrt{1+\omega_s^2\,(\sigma\, T_{r0})^2\, s^2}}{A_u(\omega_s, s)}\, U_s, \tag{Z2.1c}$$

- strumień sprzężony uzwojenia wirnika:
$$\Psi_r = \frac{T_{s0} - T_{s\sigma}}{A_u(\omega_s, s)}\, U_s, \tag{Z2.1d}$$

- strumień sprzężony główny:
$$\Psi_m = \frac{(T_{s0} - T_{s\sigma})\sqrt{1+\omega_s^2\, T_{r\sigma}^2\, s^2}}{A_u(\omega_s, s)}\, U_s, \tag{Z2.1e}$$

- moc czynna pobierana z sieci zasilającej:
$$P_s = \frac{1 + s\,\omega_s^2\,(1-\sigma)\,T_{s0}\,T_{r0} + s^2\,\omega_s^2\,T_{r0}^2}{R_s\,[\,A_u(\omega_s, s)\,]^2}\,(U_s)^2, \tag{Z2.1f}$$

- straty mocy czynnej w uzwojeniach:
$$\Delta P_u = \frac{1 + s^2\,\omega_s^2\,T_{r0}\left[T_{r0} + (1-\sigma)\,T_{s0}\right]}{R_s\,[\,A_u(\omega_s, s)\,]^2}\,(U_s)^2, \tag{Z2.1g}$$

- moment elektromagnetyczny:
$$M_e = p_b\,\frac{(1-\sigma)\,T_{s0}\,T_{r0}}{R_s}\,\frac{s\,\omega_s}{[\,A_u(\omega_s, s)\,]^2}\,(U_s)^2, \tag{Z2.1h}$$

- moment elektromagnetyczny krytyczny:
$$M_{ek} = \frac{p_b\,(1-\sigma)\,T_{s0}}{2\,R_s\left\{\sqrt{\left[1+(\omega_s\,T_{s0})^2\right]\left[1+(\omega_s\,T_{s0}\,\sigma)^2\right]} + \omega_s\,T_{s0}\,(1-\sigma)\right\}}\,(U_s)^2, \tag{Z2.1j}$$

- moment elektromagnetyczny rozruchowy:

$$M_{el} = p_b \frac{(1-\sigma)T_{s0}\,T_{r0}}{\sqrt{1+(\omega_s\,T_{r0})^2}} \frac{\omega_s}{[\,A_u(\omega_s, s=1)\,]^2} (U_s)^2, \tag{Z2.1k}$$

- stosunek momentu elektromagnetycznego do prądu uzwojenia stojana:

$$\frac{M_e}{I_s} = p_b \frac{(1-\sigma)T_{s0}\,T_{r0}}{\sqrt{1+\omega_s^2\,T_{r0}^2\,s^2}} \frac{s\,\omega_s}{A_u(\omega_s, s)} U_s, \tag{Z2.1l}$$

- moc mechaniczna:

$$P_{in} = \frac{(1-\sigma)T_{s0}\,T_{r0}}{R_s} \frac{s\,(1-s)\omega_s^2}{[\,A_u(\omega_s, s)\,]^2} (U_s)^2, \tag{Z2.1m}$$

w których:

$$A_u(\omega_s, s) = \sqrt{\left[1-\omega_s^2(\sigma\,T_{s0}\,T_{r0})s\right]^2 + \omega_s^2(T_{s0}+s\,T_{r0})^2}. \tag{Z2.1n}$$

Z3. RÓWNANIA FUNKCJI OKREŚLAJĄCYCH ALGORYTMY STEROWANIA SKALARNEGO MASZYNY INDUKCYJNEJ

Funkcje $k_u(\omega_s, s)$, określające algorytm sterowania skalarnego (wg równania (Z3.5a) i (Z3.5b)) maszyny indukcyjnej sterowanej skalarnie, dla poszczególnych wielkości kryterialnych mają następującą postać:

a) **dla pierwszej grupy wielkości kryterialnych:**

- Przy sterowaniu skalarnym wg kryterium $K^I_{zad} = U_{s\,(zad)}$:

$$k_u^I(\omega_s, s) = 1. \tag{Z3.1}$$

- Przy sterowaniu skalarnym wg kryterium $K^I_{zad} = \left(U_s/\omega_s\right)_{(zad)}$:

$$k_u^I(\omega_s, s) = \omega_s. \tag{Z3.2}$$

- Przy sterowaniu skalarnym wg kryterium $K^I_{zad} = I_{s\,(zad)}$:

$$k_u^I(\omega_s, s) = \frac{R_s\,A_u(\omega_s, s)}{\sqrt{1+(\omega_s\,s\,T_{r0})^2}}. \tag{Z3.3}$$

- Przy sterowaniu skalarnym wg kryterium $K^I_{zad} = I_{r\,(zad)}$:

$$k_u^I(\omega_s, s) = \frac{R_s\,A_u(\omega_s, s)}{\omega_s\,(T_{r0}-T_{r\sigma})\sqrt{s^2}}. \tag{Z3.4}$$

- Przy sterowaniu skalarnym wg kryterium $K^{I}_{zad} = \Psi_{s(zad)}$:

$$k^{I}_{u}(\omega_s, s) = \frac{A_u(\omega_s, s)}{T_{s0}\sqrt{1+(\omega_s\, s\, \sigma\, T_{r0})^2}} . \tag{Z3.5}$$

- Przy sterowaniu skalarnym wg kryterium $K^{I}_{zad} = \Psi_{r(zad)}$:

$$k^{I}_{u}(\omega_s, s) = \frac{A_u(\omega_s, s)}{T_{s0} - T_{s\sigma}} . \tag{Z3.6}$$

- Przy sterowaniu skalarnym wg kryterium $K^{I}_{zad} = \Psi_{m(zad)}$:

$$k^{I}_{u}(\omega_s, s) = \frac{A_u(\omega_s, s)}{(T_{s0} - T_{s\sigma})\sqrt{1+(\omega_s\, s\, T_{r\sigma})^2}} . \tag{Z3.7}$$

- Przy sterowaniu skalarnym wg kryterium $K^{I}_{zad} = \left(M_e / I_s \right)_{(zad)}$:

$$k^{I}_{u}(\omega_s, s) = \frac{\sqrt{1+(\omega_s\, s\, T_{r0})^2}}{p_b\,(1-\sigma)\,T_{s0}\,T_{r0}}\,\frac{A_u(\omega_s, s)}{s\,\omega_s} . \tag{Z3.8}$$

b) **dla drugiej grupy wielkości kryterialnych:**

- Przy sterowaniu skalarnym wg kryterium $K^{II}_{zad} = P_{s(zad)}$:

$$k^{II}_{u}(\omega_s, s) = \frac{R_s\, A_u^2(\omega_s, s)}{1+(\omega_s)^2\, T_{r0}\, s\left[s\, T_{r0} + (1-\sigma)\,T_{s0}\right]} . \tag{Z3.9}$$

-Przy sterowaniu skalarnym wg kryterium $K^{II}_{zad} = \Delta P_{u(zad)}$:

$$k^{II}_{u}(\omega_s, s) = \frac{R_s\, A_u^2(\omega_s, s)}{1+(\omega_s\, s)^2\, T_{r0}\left[T_{r0} + (1-\sigma)\,T_{s0}\right]} . \tag{Z3.10}$$

- Przy sterowaniu skalarnym wg kryterium $K^{II}_{zad} = M_{e(zad)}$:

$$k^{II}_{u}(\omega_s, s) = \frac{R_s}{p_b\,(1-\sigma)\,T_{s0}\,T_{r0}}\,\frac{A_u^2(\omega_s, s)}{s\,\omega_s} . \tag{Z3.11}$$

- Przy sterowaniu skalarnym wg kryterium $K^{II}_{zad} = M_{ek(zad)}$:

$$k^{II}_{u}(\omega_s, s) = \frac{2\,R_s\left\{\sqrt{\left[1+(\omega_s\, T_{s0})^2\right]\left[1+(\omega_s\, T_{s0}\,\sigma)^2\right]} + \omega_s\, T_{s0}\,(1-\sigma)\right\}}{p_b\,(1-\sigma)\,T_{s0}} . \tag{Z3.12}$$

- Przy sterowaniu skalarnym wg kryterium $K_{zad}^{II} = M_{el(zad)}$:

$$k_u^{II}(\omega_s, s) = \frac{R_s}{p_b(1-\sigma)T_{s0}T_{r0}} \frac{A_u^2(\omega_s, s=1)}{\omega_s} . \tag{Z3.13}$$

- Przy sterowaniu skalarnym wg kryterium $K_{zad}^{II} = P_{m(zad)}$:

$$k_u^{II}(\omega_s, s) = \frac{R_s}{(1-\sigma)T_{s0}T_{r0}} \frac{A_u^2(\omega_s, s)}{s(1-s)\omega_s^2} . \tag{Z3.14}$$

LITERATURA

1. Paszek W.: Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego. HELION, Gliwice 1998, s. 684.
2. Tunia H., Kaźmierkowski M.: Automatyka napędu przekształtnikowego. WNT, Warszawa 1987, s. 572.
3. Gruszczyński P.: Optymalizacja statyczna sterowania silnika indukcyjnego. Materiały V Sympozjum Podstawowe Problemy Energoelektroniki, Gliwice-Ustroń 1993, s. 317-326.
4. Żywiec A.: Frequency scalar-control algorithms of induction motor. The IX. International Workshop of Electric Machines in Prague, Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering, Prague 2001, p. 34-45.
5. Żywiec A.: Steady-State Properties of Induction Motor with Scalar Control. Proceedings of the X. International Symposium on Electric Machinery in Prague "ISEM 2002", 11-12 Sept. 2002, p. 118-129.
6. Żywiec A.: Electromagnetic Torque of Scalar Controlled Induction Machine. Proceedings of the XI. International Symposium on Electric Machinery in Prague "ISEM 2003", 10-11 Sept. 2003, p. 53-64.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Piotr Wach

Wpłynęło do Redakcji dnia 30 października 2003 r.

Abstract

The purpose of this paper is to perform the synthesis of scalar-control algorithms of the induction motor when taking into account the wide range of control criteria.

Section 1 (Chapter 1) presents possibilities of influencing the induction machine properties by changing in the stator winding supply conditions. Two basic algorithms of induction motor control, namely: vector and scalar one are characterized. The requirements for the supply system of the machine stator winding are given for the both control algorithms.

Section 2 (Chapter 2) presents the steady-state equations of the induction machine supplied from a sinusoidal voltage source. They are used for the synthesis of scalar-control algorithms. The machine electromagnetic parameters assumed in the work are defined by the relationships given in Appendix Z1. Basing on the equivalent circuit (Fig.2) the quations (3a, ..., h) are derived. They determine electrical, magnetic and mechanical quantities of the induction machine. The detailed forms of these equations are given in Appendix Z2.

Section 3 (Chapter 3) is the main part of the presented work. It starts with an overview of the criterion quantities K_{zad} that can be assumed to be the given quantities in frequency scalar-control systems of the induction machine supplied from a sinusoidal voltage source. For these criterion quantities the

appropriate relationships (5a, b) determining the scalar-control algorithms of the induction motor are derived using equation (4). The detailed forms of these relationships are given in Appendix Z3. In Figs. 3 and 4 there are shown the dependencies of the voltage U_s on the supply source pulsation ω_s and the slip s of the induction motor for the selected criterion quantities. The differences between the particular scalar-control algorithms can be seen in there.

Section 4 (Chapter 4) emphasizes the possibility of application of the derived relationships to the analysis of properties of the induction machine operating at different criteria of frequency scalar control as well as to programming microprocessor scalar-control systems of the induction motor