

Aleksander ŻYWIEC

WŁAŚCIWOŚCI STATYCZNE SPRZĘGŁA INDUKCYJNEGO WYDATNOBIEGUNOWEGO Z LITYM RDZENIEM I Z UZWOJENIEM ROBOCZYM W TWORNIKU

Streszczenie. W niniejszej pracy przedstawiono równania stanu ustalonego oraz odpowiadające im schematy zastępcze sprzęgła indukcyjnego obcowzbudnego, pracującego w stanie ustalonym. Uwzględniono wydatnobiegunowość wirnika wewnętrznego oraz oddziaływanie litego rdzenia i uzwojenia roboczego w tworniku. Przedstawiono równania określające zależność momentu elektromagnetycznego sprzęgła od parametrów schematu zastępczego i prędkości kątowych wirników sprzęgła. Wykreślono charakterystyki mechaniczne sprzęgieł indukcyjnych, różniących się parametrami schematu zastępczego.

STEADY STATES CHARACTERISTICS OF THE SALIENT - POLE INDUCTIVE CLUTCH WITH A SOLID CORE AND AN ARMATURE WINDING

Summary. The paper presents the equations at steady states and the equivalent circuits of the inductive separate - excited clutch. The salient - poling of the internal rotor and the influence of solid core and armature winding have been taken into account. The equations describing the relationship between the clutch electromagnetic torque and the equivalent circuit parameters as well as the rotor angular speed have been presented. The torque - speed characteristics of the inductive clutch for the various equivalent circuit parameters have been shown.

1. UWAGI WSTĘPNE

Sprzęgło indukcyjne umożliwia połączenie (sprzęgnięcie) ze sobą dwóch wirujących mechanizmów, które mają wirować współbieżnie. To połączenie następuje w wyniku występowania momentu elektromagnetycznego działającego na wzajemnie ułożyskowane wirniki sprzęgła. Dlatego sprzęgło indukcyjne umożliwia przenoszenie dowolnie dużego momentu obrotowego bez tarcia, a więc nie ulega zużyciu. Możliwa jest realizacja sprzęgnięcia bądź rozsprzęgnięcia wirujących mechanizmów przy dowolnych ich prędkościach wirowania przez wyłączenie zasilania uzwojenia wzbudzenia sprzęgła indukcyjnego.

W niniejszej pracy wykorzystuje się równania ogólne i osiowe schematy zastępcze sprzęgła indukcyjnego obcowzbudnego, przedstawione w publikacji [1]. Na podstawie tych równań zostaną wyprowadzone zależności opisujące właściwości sprzęgła indukcyjnego pracującego w stanie ustalonym. Przedstawiono równania stanu ustalonego i odpowiadające im schematy zastępcze sprzęgła indukcyjnego wydatnobiegunowego z litym rdzeniem i z uzwojeniem roboczym w tworniku. Przedstawiono również równania charakterystyk mechanicznych sprzęgła indukcyjnego, z których wynika wpływ parametrów schematu zastępczego oraz warunków zasilania uzwojenia wzbudzenia na moment elektromagnetyczny.

2. RÓWNANIA I SCHEMAT ZASTĘPCZY SPRZĘGŁA W STANIE USTALONYM

W stanie ustalonym sprzęgła, pracującego przy zasilaniu tylko uzwojenia wzbudzenia napięciem stałym $U_f(t) = U_f$, wszystkie osiowe wielkości elektromagnetyczne obwodów zastępczych sprzęgła są niezmiennie w czasie, a zatem ich pochodne względem czasu są zerowe. Wobec tego dla dowolnego i -tego obwodu zastępczego w stanie ustalonym

$$\frac{d\psi_i(t)}{dt} = \frac{d\psi_i}{dt} = 0,$$

co oznacza zwarcie ze sobą punktów 1-2-...-7 oraz punktów 8-9-...-13 zaznaczonych na osiowych schematach zastępczych (rys.1). W tych warunkach w obwodach wirnika wewnętrznego, reprezentujących oddziaływanie rdzenia ferromagnetycznego, prąd nie płynie

$$I_{1F1d}^* = I_{1F2d}^* = 0 \quad \text{oraz} \quad I_{1F1q}^* = I_{1F2q}^* = 0,$$

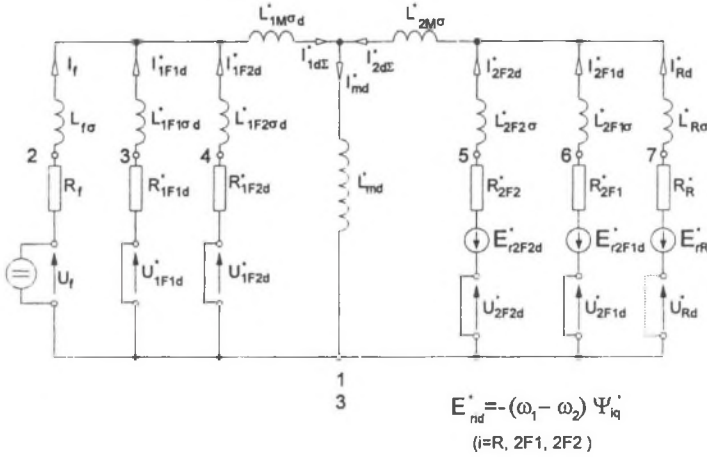
gdź obwody te nie są zasilane i nie występuje w nich siła elektromotoryczna rotacji. Uwzględniając powyższe uwagi otrzymuje się, na podstawie równań osiowych przedstawionych w pracy [1], następujący zestaw równań stanu ustalonego sprzęgła, którego

wirniki wirują zgodnie z prędkościami kątowymi elektrycznymi odpowiednio: $\omega_1 = p_b \omega_{1m}$ - wirnik wewnętrzny, oraz $\omega_2 = p_b \omega_{2m}$ - wirnik zewnętrzny:

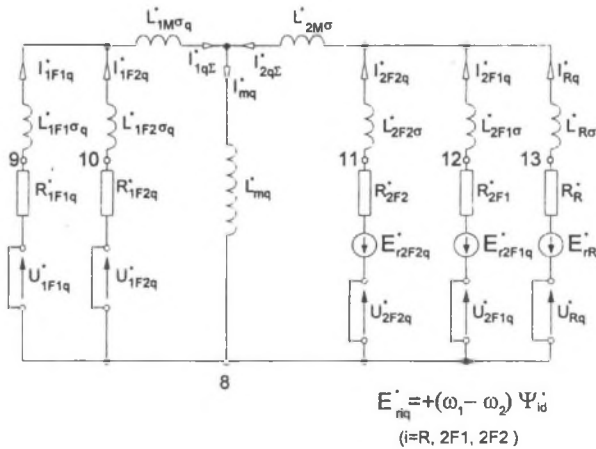
- równanie Kirchhoffa dla uzwojeń wirnika wewnętrznego

$$U_f = R_f I_f, \tag{1}$$

• W osi wzdłużnej d



• W osi poprzecznej q



Rys.1. Schematy zastępcze sprzęgła indukcyjnego we współrzędnych 2-osiowych d-q
 Fig. 1. Equivalent circuits of the inductive clutch in the 2-axis coordinates d-q

– równania Kirchhoffa dla uzwojeń wirnika zewnętrznego

- w osi wzdłużnej d

$$[0] = [R_2^*] [I_{2d}^*] - (\omega_1 - \omega_2) [\psi_{2q}^*], \quad (2a)$$

- w osi poprzecznej q

$$[0] = [R_2^*] [I_{2q}^*] + (\omega_1 - \omega_2) [\psi_{2d}^*], \quad (2b)$$

– równanie równowagi mechanicznej

$$M_s = M_m = M_{e1} = M_{e2} = M_e, \quad (3a)$$

– równanie określające moment elektromagnetyczny

$$M_e = p_b \left([\psi_{2d}^*]^T [I_{2q}^*] - [\psi_{2q}^*]^T [I_{2d}^*] \right), \quad (3b)$$

– równania określające osiowe wektory strumieni sprzężonych wirnika zewnętrznego:

- w osi wzdłużnej d

$$[\psi_{2d}^*] = [L_{md}^*]^T [I_f, 0, 0]^T + \left([L_{2\sigma}^*] + [L_{2M\sigma}^*] + [L_{22md}^*] \right) [I_{2d}^*], \quad (4a)$$

- w osi poprzecznej q

$$[\psi_{2q}^*] = \left([L_{2\sigma}^*] + [L_{2M\sigma}^*] + [L_{22mq}^*] \right) [I_{2q}^*]. \quad (4b)$$

W równaniach (2a,b), (3b) i (4a,b) wektory (macierze kolumnowe) napięć, prądów i strumieni sprzężonych wirnika zewnętrznego mają postać [1]:

- dla osi wzdłużnej d

$$[W_{2d}^*] = [W_{Rd}^*, W_{2F1d}^*, W_{2F2d}^*]^T, \quad (5a)$$

- dla osi poprzecznej q

$$[W_{2q}^*] = [W_{Rq}^*, W_{2F1q}^*, W_{2F2q}^*]^T, \quad (5b)$$

natomiast macierze rezystancji i indukcyjności osiowych wirnika zewnętrznego, zgodnie z[1], są zdefiniowane następująco (rys.1):

- macierz rezystancji uzwojeń

$$[R_2^*] = \text{diag}\{R_R^*, R_{2F1}^*, R_{2F2}^*\}, \quad (6a)$$

- macierze indukcyjności rozproszenia

$$[L_{2\sigma}^*] = \text{diag}\{L_{R\sigma}^*, L_{2F1\sigma}^*, L_{2F2\sigma}^*\} \quad \text{oraz} \quad [L_{2M\sigma}^*] = L_{2M\sigma}^* [1]_{3 \times 3}, \quad (6b,c)$$

- macierze indukcyjności głównych

$$[L_{md}^*] = [L_{22md}^*] = L_{md}^* [1]_{3 \times 3} \quad \text{oraz} \quad [L_{22mq}^*] = L_{mq}^* [1]_{3 \times 3}. \quad (6d,e)$$

Wprowadzając kompleksory (wektory uogólnione) zdefiniowane następująco:

$$\underline{W}_2 = W_{2d} + j W_{2q}, \quad \text{a więc również} \quad [\underline{W}_2] = [W_{2d}] + j[W_{2q}], \quad (7a,b)$$

równania (2a,b) dla uzwojeń wirnika zewnętrznego przyjmują postać:

$$[R_2^*] [\underline{I}_2^*] + j(\omega_1 - \omega_2) [\underline{\psi}_2^*] = [0], \quad (8a)$$

w której

$$[\underline{\psi}_2^*] = [L_{md}^*] [I_f, 0, 0] + [L_{2\sigma}^*] [\underline{I}_2^*] + ([L_{md}^*] + [L_{2M\sigma}^*]) [I_{2d}^*] + j([L_{mq}^*] + [L_{2M\sigma}^*]) [I_{2q}^*]. \quad (8b)$$

Równanie kompleksorowe (8a) napięć wirnika zewnętrznego, po wprowadzeniu zależności (8b) i po rozpisaniu macierzy, można przedstawić w postaci następującego układu równań:

$$\left(\frac{R_R^*}{s} + j X_{R\sigma}^* \right) (-\underline{I}_R^*) = \underline{E}_{2\Sigma}^*, \quad (9a)$$

$$\left(\frac{R_{2F1}^*}{s} + j X_{2F1\sigma}^* \right) (-\underline{I}_{2F1}^*) = \underline{E}_{2\Sigma}^*, \quad (9b)$$

$$\left(\frac{R_{2F2}^*}{s} + j X_{2F2\sigma}^* \right) (-\underline{I}_{2F2}^*) = \underline{E}_{2\Sigma}^*, \quad (9c)$$

przy czym przyjęto następujące oznaczenia:

$\underline{E}_{2\Sigma}^*$ - wypadkowa siła elektromotoryczna rotacji (sprowadzona na stronę uzwojenia wzbudzenia) indukowana w obwodach zastępczych wirnika zewnętrznego

$$\underline{E}_{2\Sigma}^* = \underline{E}_{2qf}^* + (\underline{E}_{2aq}^* + \underline{E}_{2ad}^*) \quad (10a)$$

\underline{E}_{2qf}^* , \underline{E}_{2ad}^* , \underline{E}_{2aq}^* - siły elektromotoryczne rotacji (sprowadzone na stronę uzwojenia wzbudzenia) indukowane w obwodach zastępczych wirnika zewnętrznego przez pole magnetyczne uzwojenia wzbudzenia oraz przez pole magnetyczne "oddziaływania" uzwojeń wirnika zewnętrznego odpowiednio w osi d i w osi q

$$\underline{E}_{2qf}^* = j(X_{md}^* I_f), \quad (10b)$$

$$\underline{E}_{2aq}^* = j(X_{md}^* + X_{2M\sigma}^*) I_{2\Sigma d}^*, \quad (10c)$$

$$\underline{E}_{2ad}^* = j(X_{mq}^* + X_{2M\sigma}^*) I_{2\Sigma q}^*, \quad (10d)$$

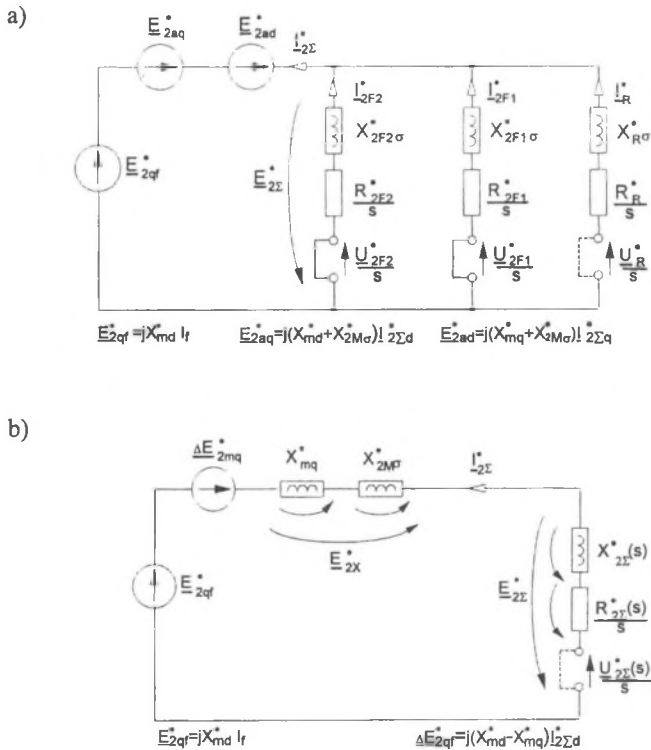
s - poślizg sprzęgła

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} = \frac{\omega_{1m} - \omega_{2m}}{\omega_{1m}}, \quad (11)$$

$X_{R\sigma}^*$, $X_{2F1\sigma}^*$, $X_{2F2\sigma}^*$, $X_{2M\sigma}^*$ - reaktancje rozproszenia poszczególnych uzwojeń wirnika zewnętrznego sprzęgła, obliczone dla pulsacji ω_1 i sprowadzone na stronę uzwojenia wzbudzenia ($X_{i\sigma}^* = \omega_1 L_{i\sigma}^*$),

X_{md}^* , X_{mq}^* - reaktancje magnesujące (główne) sprzęgła w osi d i w osi q, obliczone dla pulsacji ω_1 i sprowadzone na stronę uzwojenia wzbudzenia ($X_{md}^* = \omega_1 L_{md}^*$, $X_{mq}^* = \omega_1 L_{mq}^*$),

$\underline{I}_{2\Sigma}^*$, $\underline{I}_{2\Sigma d}^*$, $\underline{I}_{2\Sigma q}^*$ - wypadkowy prąd obwodów zastępczych wirnika zewnętrznego sprzęgła i jego składowe osiowe (sprowadzone na stronę uzwojenia wzbudzenia)



Rys. 2. Schemat zastępczy sprzęgła indukcyjnego w stanie ustalonym dla wielkości kompleksorowych

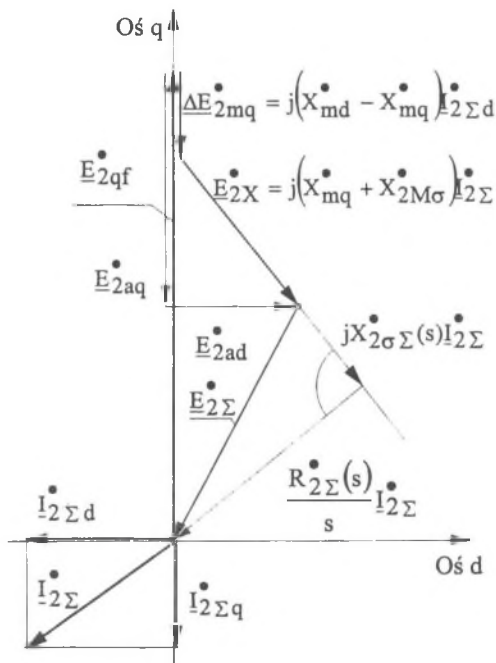
Fig. 2. Equivalent circuit of the inductive clutch at steady states

$$\underline{I}_{2\Sigma}^{\bullet} = \underline{I}_R^{\bullet} + \underline{I}_{2F1}^{\bullet} + \underline{I}_{2F2}^{\bullet} = \underline{I}_{2\Sigma d}^{\bullet} + \underline{I}_{2\Sigma q}^{\bullet}, \quad (12a)$$

$$\underline{I}_{2\Sigma d}^{\bullet} = \operatorname{Re}\{\underline{I}_{2\Sigma}^{\bullet}\} = \underline{I}_{Rd}^{\bullet} + \underline{I}_{2F1d}^{\bullet} + \underline{I}_{2F2d}^{\bullet}, \quad (12b)$$

$$\underline{I}_{2\Sigma q}^{\bullet} = j\operatorname{Im}\{\underline{I}_{2\Sigma}^{\bullet}\} = j(\underline{I}_{Rq}^{\bullet} + \underline{I}_{2F1q}^{\bullet} + \underline{I}_{2F2q}^{\bullet}). \quad (12c)$$

Równaniom (9a,...,c) oraz (12a) odpowiada schemat zastępczy dla obwodów wirnika zewnętrznego sprzęgła w stanie ustalonym, przedstawiony na rys. 2a. Schemat ten można przedstawić w postaci jak na rys.2b, przy czym parametry tego schematu wynikają z zasady Thevenine'a. Należy podkreślić, że rezystancja zastępcza $R_{2\Sigma}^{\bullet}(s)$ i reaktancja zastępcza $X_{2\Sigma}^{\bullet}(s)$ oraz zastępcze źródło zasilania $U_{2\Sigma}^{\bullet}(s)$, reprezentujące w schemacie z rys. 2b obwody wirnika zewnętrznego, nie są stałe, lecz ich wielkości zmieniają się przy zmianach poślizgu s sprzęgła. Reaktancje zastępcze są ponadto zależne od prędkości kątowej elektrycznej ω_1 wirnika wewnętrznego. Natomiast siła elektromotoryczna $\underline{\Delta E}_{2mq}^{\bullet}$, figurująca na rys. 2b, wynika z równania:



Rys. 3. Wykres kompleksorowy napięć i prądów sprzęgła indukcyjnego dla $U_{2\Sigma}^{\bullet}(s) = 0$

Fig. 3. Phasor diagram of the inductive clutch for $U_{2\Sigma}^{\bullet}(s) = 0$

$$\Delta \underline{E}_{2mq}^{\circ} = j(X_{md}^{\circ} - X_{mq}^{\circ}) \underline{I}_{2\Sigma d}^{\circ}. \quad (12d)$$

W wyniku takich przekształceń równania (9a,b,c) napięcie dla obwodów zastępczych wirnika zewnętrznego przyjmują następującą postać:

$$\left(\frac{R_{2\Sigma}^{\circ}(s)}{s} + jX_{2\Sigma}^{\circ}(s) \right) \left(-\underline{I}_{2\Sigma}^{\circ} \right) = \underline{E}_{2\Sigma}^{\circ}, \quad (13a)$$

przy czym wypadkową siłę elektromotoryczną rotacji $\underline{E}_{2\Sigma}^{\circ}$ określa zależność (10a), którą można zapisać w postaci

$$\underline{E}_{2\Sigma}^{\circ} = \underline{E}_{2qf}^{\circ} + \Delta \underline{E}_{2mq}^{\circ} + j(X_{mq}^{\circ} + X_{2M\sigma}^{\circ}) \underline{I}_{2\Sigma}^{\circ}. \quad (13b)$$

Na rys. 3 przedstawiono wykres kompleksorowy napięć i prądów sprzęgła przy zwartych obwodach zastępczych wirnika zewnętrznego ($\underline{U}_{2\Sigma}^{\circ}(s) = 0$).

Przedstawione równania i schematy zastępcze z rys.2 umożliwiają wyznaczenie prądów w obwodach zastępczych wirnika zewnętrznego sprzęgła, pracującego w stanie ustalonym jeśli zadane są warunki zasilania uzwojeń i poślizg sprzęgła. Można następnie wyznaczyć moment elektromagnetyczny sprzęgła w zadanych warunkach pracy.

3. CHARAKTERYSTYKA MECHANICZNA SPRZĘGŁA INDUKCYJNEGO

Charakterystyka mechaniczna sprzęgła indukcyjnego przedstawia zależność momentu elektromagnetycznego M_e od poślizgu s dla pracy sprzęgła przy nieziennej wartości prądu wzbudzenia. Równanie charakterystyki mechanicznej sprzęgła wynika z równania (3b) po wprowadzeniu do niego zależności określających osiowe strumienie sprzężone i prądy osiowe obwodów wirnika zewnętrznego wyznaczonych na podstawie równań Kirchhoffa.

Wprowadzając zależności (4a,b) do równania (3b) określającego moment elektromagnetyczny sprzęgła indukcyjnego otrzymuje się po przekształceniach:

$$M_e = \frac{P_b}{\omega_1} \left\{ \underline{E}_{2qf}^{\circ} + (X_{md}^{\circ} - X_{mq}^{\circ}) \underline{I}_{2\Sigma d}^{\circ} \right\} \underline{I}_{2\Sigma q}^{\circ}. \quad (14)$$

Ale składowe osiowe $\underline{I}_{2\Sigma d}^{\circ}$ oraz $\underline{I}_{2\Sigma q}^{\circ}$ oraz kompleksor $\underline{I}_{2\Sigma}^{\circ}$ prądu wypadkowego zastępczych obwodów wirnika zewnętrznego można wyznaczyć jako rozwiązanie układu równań (13a,b),otrzymując:

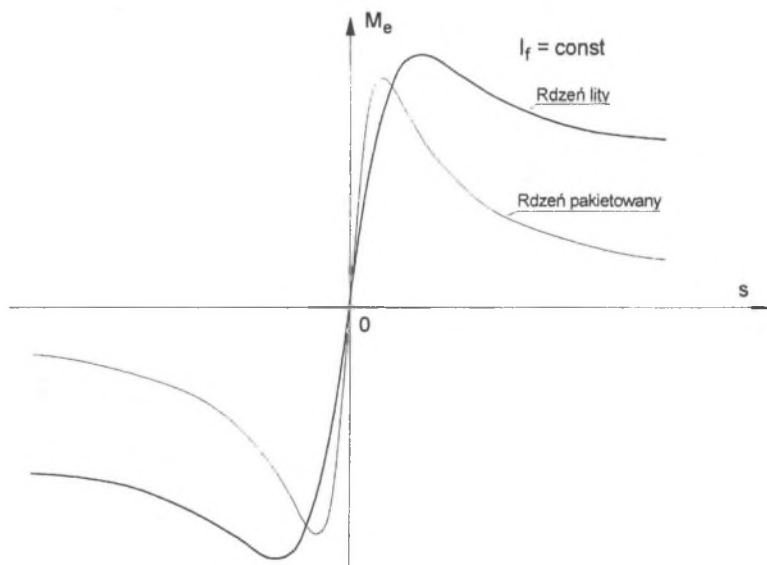
$$I_{2\Sigma d}^* = - \frac{X_{2q\Sigma}^*(s)}{\left(\frac{R_{2\Sigma}^*(s)}{s}\right)^2 + X_{2d\Sigma}^*(s) X_{2q\Sigma}^*(s)} E_{2qf}^* \quad (15a)$$

$$I_{2\Sigma q}^* = - \frac{\left(\frac{R_{2\Sigma}^*(s)}{s}\right)}{\left(\frac{R_{2\Sigma}^*(s)}{s}\right)^2 + X_{2d\Sigma}^*(s) X_{2q\Sigma}^*(s)} E_{2qf}^* \quad (15b)$$

$$I_{2\Sigma}^* = \sqrt{I_{2\Sigma d}^{*2} + I_{2\Sigma q}^{*2}} \quad (15c)$$

Po wprowadzeniu zależności (15a,b,c) do równania (14) otrzymuje się ostatecznie następujące równanie, określające moment elektromagnetyczny sprzęgła:

$$M_e = \frac{P_b}{\omega_1} E_{2qf}^{*2} \frac{\frac{R_{2\Sigma}^*(s)}{s} \left\{ \left(\frac{R_{2\Sigma}^*(s)}{s}\right)^2 + \left(X_{2q\Sigma}^*(s)\right)^2 \right\}}{\left\{ \left(\frac{R_{2\Sigma}^*(s)}{s}\right)^2 + X_{2d\Sigma}^*(s) X_{2q\Sigma}^*(s) \right\}^2} = \frac{P_b}{\omega_1} \frac{R_{2\Sigma}^*(s)}{s} I_{2\Sigma}^{*2} \quad (16)$$



Rys. 4. Charakterystyki mechaniczne sprzęgła indukcyjnego
Fig. 4. Torque - speed characteristics of the inductive clutch

przy czym

$$X_{2d\Sigma}(s) = X_{md}^* + X_{2M\sigma}^* + X_{2\Sigma}^*(s), \quad (17a)$$

$$X_{2q\Sigma}(s) = X_{mq}^* + X_{2M\sigma}^* + X_{2\Sigma}^*(s). \quad (17b)$$

Na rys. 4 wykreślono charakterystyki mechaniczne $M_e = f(s)$ sprzęgła indukcyjnego, wynikające z równania (16). Zwykle tak projektuje się sprzęgło, aby ekstremalne wartości momentu występowały przy dużym poślizgu (nawet większym od 1)

4. SPRZĘGŁO O JEDNYM OBWODZIE W WIRNIKU ZEWNĘTRZNYM

W przypadku sprzęgła indukcyjnego o jednym zastępczym obwodzie wirnika zewnętrznego (tzn. bez rdzenia litego i bez wypierania prądu w uzwojeniu roboczym) obowiązują następujące równości (rys.1):

$$R_{2\Sigma}^*(s) = R_R^* = const, \quad (18a)$$

$$X_{2d\Sigma}^*(s) = X_{md}^* + X_{2M\sigma}^* + X_{R\sigma}^* = X_{2d\Sigma}^* = X_{Rd}^* = const, \quad (18b)$$

$$X_{2q\Sigma}^*(s) = X_{mq}^* + X_{2M\sigma}^* + X_{R\sigma}^* = X_{2q\Sigma}^* = X_{Rq}^* = const. \quad (18c)$$

Wówczas równanie (16), określające moment elektromagnetyczny, przyjmuje następującą postać:

$$M_e = \frac{P_b}{\omega_1} E_{2qf}^{*2} \frac{s(R_R^{*2} + s^2 X_{Rq}^{*2}) R_R^*}{(R_R^{*2} + s^2 X_{Rd}^* X_{Rq}^*)^2}, \quad (19)$$

z której po przekształceniach otrzymuje się:

$$M_e = 2 M_{kC} \frac{\frac{s}{s_{kC}} + \frac{s_{kC}}{s} k_x^2}{\left(\frac{s}{s_{kC}} + \frac{s_{kC}}{s} k_x\right)^2}, \quad (20)$$

przy czym:

k_x - stosunek reaktancji uzwojenia roboczego w osi d i w osi q

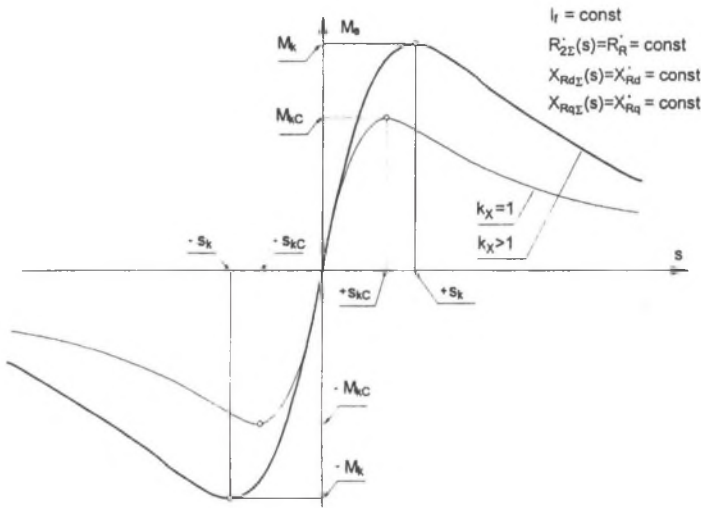
$$k_x = \frac{X_{Rd}^*}{X_{Rq}^*}, \quad (21a)$$

s_{kC} - poślizg krytyczny sprzęgła cylindrycznego (dla którego $k_x = 1$)

$$s_{kC} = \frac{R_R^*}{X_{Rd}^*}, \quad (21b)$$

M_{kC} - moment elektromagnetyczny krytyczny sprzęgła cylindrycznego (dla którego $k_x=1$)

$$M_{kC} = \frac{p_b}{\omega_l} E_{2qf}^2 \frac{1}{2 X_{Rd}^*}. \quad (21c)$$



Rys.5. Charakterystyki mechaniczne sprzęgła indukcyjnego o jednym obwodzie elektrycznym w wirniku zewnętrznym

Fig. 5. Torque - speed characteristics of the inductive clutch with one electric circuit of the external rotor

Charakterystyka mechaniczna $M_e = f(s)$ takiego sprzęgła (rys. 5), wynikająca z zależności (20), wykazuje dwie wartości ekstremalne. Z zasady wyznaczania ekstremum funkcji otrzymuje się:

- poślizg krytyczny

$$s_k = s_{kC} f_1(k_x), \quad (22a)$$

- moment elektromagnetyczny krytyczny

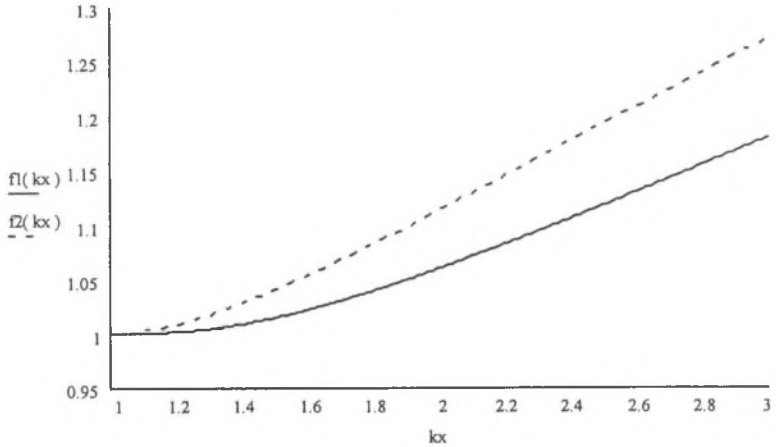
$$M_k = M_{kC} f_2(k_x), \quad (22b)$$

przy czym funkcje $f_1(k_x)$ oraz $f_2(k_x)$ są określone następującymi zależnościami (rys. 6):

$$f_1(k_x) = \sqrt{k_x \left\{ \sqrt{k_x + \left\{ \frac{3}{2}(k_x - 1) \right\}^2} - \frac{3}{2}(k_x - 1) \right\}}, \quad (23a)$$

$$f_2(k_x) = \frac{2f_1(k_x) \{k_x^2 + f_1^2(k_x)\}}{\{k_x + f_1^2(k_x)\}^2}, \quad (23b)$$

Na rys.6 przedstawiono wykresy funkcji $f_1(k_x)$ oraz $f_2(k_x)$.



Rys. 6. Wykresy funkcji $f_1(k_x)$ oraz $f_2(k_x)$

Fig. 6. Diagrams of the functions $f_1(k_x)$ and $f_2(k_x)$

Równania (16) lub (20) umożliwiają obliczeniowe wyznaczenie momentu elektromagnetycznego oraz charakterystyki mechanicznej sprzęgła w stanie ustalonym dla określonych warunków zasilania uzwojenia wzbudzenia, jeśli znane są parametry schematu zastępczego (rys. 2) sprzęgła. Z równań tych widoczny jest wpływ jawnobiegowości oraz wpływ litego rdzenia wirnika zewnętrznego na własności statyczne sprzęgła.

5. UWAGI KOŃCOWE

Przedstawione równania i schematy zastępcze sprzęgła indukcyjnego umożliwiają wyznaczenie właściwości statycznych sprzęgieł indukcyjnych o różnych wykonaniach. W szczególności możliwa jest ocena wpływu rdzenia litego wirnika zewnętrznego oraz parametrów uzwojenia roboczego w tworniku na charakterystyki mechaniczne sprzęgła (rys. 4, rys.5 i rys.6). Równania określające moment elektromagnetyczny mogą być wykorzystane w fazie projektowania sprzęgła, przy kształtowaniu charakterystyki

mechanicznej przez odpowiedni dobór parametrów schematu zastępczego, które jednoznacznie są zależne od danych wykonawczych rdzenia ferromagnetycznego i uzwojeń sprzęgła.

LITERATURA

1. Żywiec A.: Równania ogólne sprzęgła indukcyjnego wydatnobiegunowego z litym rdzeniem i z uzwojeniem roboczym w tworniku. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej ser. Elektryka, z. 168, Gliwice, 1998, s. 50 - 67.
2. Pełczewski W.: Sprzęgła elektromagnetyczne. WNT, Warszawa 1965.
3. Tunia H., Łastowiecki J.: Elektryczne elementy automatyki. PWN, Warszawa 1976.
4. Paszek W.: Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego. WNT, Warszawa 1986.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Piotr Wach

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 grudnia 1998 r.

Abstract

The general equations and the axial equivalent circuits (Fig.1) of an inductive separate-excited clutch presented in the publication [1] have been used in this paper. Based on these equations, the relationships describing the properties of an inductive clutch at steady-state have been determined. The analysis has taken into account the salient-poling of the internal rotor as well as the solid core and the external rotor winding reactions.

Chapter 2 presents the equations and the equivalent circuits at steady-state of an inductive clutch with the field winding DC supply. At such working conditions all the axial electromagnetic parameters of the equivalent circuits are time-independent as well as there is no solid core reaction (there are no currents in the internal rotor circuits representing the solid core reaction). After some transformations the matrix equations (1), ..., (3a, b) of an inductive clutch have been obtained. The voltage, current and flux linkage vectors in the equations as well as the resistance and inductance matrices of the external rotor circuits are described by the relationships (4a, b), ..., (6d, e). After introduction of the vector defined by (7a,b) and after writing the matrix equations, the relationships (9a,b,c) determining the

equivalent circuit of the clutch external rotor circuits have been obtained (Fig. 2). The phasor diagram of an inductive clutch with the field winding DC supply has been presented in Fig. 3.

Chapter 3 derives the equation (16) determining the electromagnetic torque of an inductive clutch with solid core and armature winding placed in the external rotor. Fig. 4 presents the mechanical characteristics of an inductive clutch which show the influence of solid core reaction of the external rotor. As a particular case, the inductive clutch with one equivalent circuit in the external rotor (e.g. working winding) has been investigated. For such an inductive clutch, the Eqns (19) and (20) describing electromagnetic torque have been derived as well as the mechanical characteristics (Fig.5) have been plotted. Additionally, the relationships (22a, b) determining the slip at maximum torque and the critical torque of such an inductive clutch have been determined.

The presented equations and equivalent circuits of an inductive clutch allow the determination of steady state properties for different types of inductive clutches. They can be used to estimate the influence of solid core and working winding parameters of the external rotor on the mechanical characteristic of an inductive clutch. The equations determining electromagnetic torque may be used at design stage of a clutch.