

Stanisław NITKA

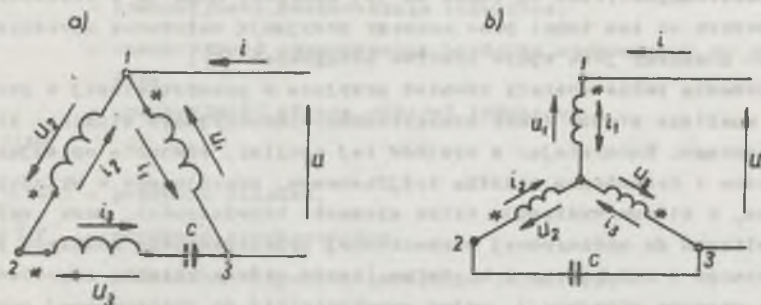
OBR-Systemów Mechanizacji,
 Elektrotechniki i Automatyki Górniczej
 Katowice

INDUKCYJNY SILNIK LINIOWY TRÓJFAZOWY PRZY ZASILANIU JEDNOFAZOWYM

Streszczenie. W artykule przeprowadzono analizę pracy silnika liniowego trójfazowego przy zasilaniu z sieci jednofazowej według dwóch sposobów połączeń. Przedstawiono metody obliczeń stanów przejściowych (dynamicznych i statycznych) oraz zamieszczono wyniki obliczeń i pomiarów dla stanów statycznych przy prędkości silnika $V = 0$ m/s.

1. Wstęp

Podobnie jak to ma miejsce w przypadku silników wirujących, mając do dyspozycji indukcyjny silnik liniowy trójfazowy można go zastosować do pracy jednofazowej, stosując odpowiedni sposób zasilania z sieci. Można to stosunkowo łatwo zrealizować, włączając na przykład jedno z uzwojeń induktora (część pierwotna odpowiednia stojanowi silnika wirującego) do sieci poprzez kondensator o odpowiednio dobranej pojemności (rys. 1).



Rys. 1. Dwa sposoby włączenia silnika trójfazowego do sieci jednofazowej

W obu przedstawionych na rys. 1 przykładach połączeń uzyskuje się możliwość zmiany kierunku ruchu silnika, stosując proste przełączenie zacisku sieci zasilającej (z zacisku 3 na zacisk 2). Ze względu na możliwość uzyskania większych wartości siły ciągu silników przeznaczonych do pracy w

sieciach trójfazowych 380 V, przy zasilaniu z sieci jednofazowych 220 V należałoby preferować sposób połączeń przedstawiony na rys. 1a. Należy jednak zwrócić uwagę na kolejność połączeń początków i końców uzwojeń poszczególnych faz (na rys. 1 początki uzwojeń oznaczone są gwiazdkami).

Przy zasilaniu z sieci jednofazowej silnika z uzwojeniem połączonym tak jak na rys. 1a (połączenia w trójkąt), napięciem równym napięciu fazowemu sieci trójfazowej może on rozwijać siłę ciągu o wartości zbliżonej do siły rozwijanej przy pracy trójfazowej.

Sposób wyznaczania charakterystyk elektromechanicznych indukcyjnego silnika liniowego trójfazowego przy zastosowaniu do pracy jednofazowej omówiono w dalszej części artykułu.

2. Model matematyczny

2.1. Równania wyjściowe

Analizę pracy jednofazowej silnika trójfazowego można przeprowadzić w oparciu o model matematyczny silnika trójfazowego, gdyż jego model fizyczny nie ulega zmianie. Dodajmy, że równania opisujące pracę indukcyjnego silnika liniowego można z kolei wyprowadzić posługując się metodami stosowanymi w obliczeniach silników wirujących [4, 6]. Jednak w takim przypadku nie można uniknąć wprowadzenia założeń upraszczających, gdyż analiza silników liniowych jest komplikowana przez tzw. efekty brzegowe [2, 3, 4]. Dla symetrycznej maszyny wirującej wystarczające jest ograniczenie obliczeń do jednej podziałki biegunowej, otrzymując rozwiązanie dla całej maszyny poprzez liniowe powielenie tak otrzymanych wyników. Ten argument nie może mieć zastosowania dla ścisłych obliczeń maszyny liniowej, w której zjawiska elektromagnetyczne są różne na jej końcach. Mimo to w większości publikowanych na ten temat prac autorzy przyjmują założenia upraszczające, w których pomijany jest wpływ efektów brzegowych [3].

Założenia takie zostały również przyjęte w przedstawionej w pracach [1] i [2] analizie stanów pracy symetrycznego indukcyjnego silnika liniowego trójfazowego. Korzystając z wyników tej analizy, równanie opisujące stany statyczne i dynamiczne silnika trójfazowego, pracującego w układzie mechanicznym, w którym występują tylko elementy bezwładności, przy ograniczeniu obliczeń do podstawowej harmonicznej przestrzennego rozkładu pola magnetycznego w induktorze i bieźniku (część wtórna silnika odpowiednia wirnikowi maszyny wirującej), można przekształcić do następującej postaci:

$$U_1 = (R_1 + L_0^1 \frac{d}{dt})i_1 + L_{\mu}^1 \frac{d}{dt} (i_1 - \frac{1}{2}i_2 - \frac{1}{2}i_3) + \frac{\sqrt{3}}{2} L_{\mu}^1 \frac{d}{dt} (i_{1b} + i_{2b})$$

$$U_2 = (R_1 + L_0^1 \frac{d}{dt})i_2 + L_{\mu}^1 \frac{d}{dt} (-\frac{1}{2}i_1 + i_2 - \frac{1}{2}i_3) + \frac{\sqrt{3}}{2} L_{\mu}^1 \frac{d}{dt} (a^2 i_{1b} + a i_{2b})$$

$$U_3 = (R_1 + L_G^1 \frac{d}{dt}) i_3 + L_\mu \frac{d}{dt} (-\frac{1}{2} i_1 - \frac{1}{2} i_2 + i_3) + \frac{\sqrt{3}}{2} L_\mu \frac{d}{dt} (a i_{1b} + a^2 i_{2b})$$

$$0 = R_b i_{1b} + (L_G^b + \frac{3}{2} L_\mu) (\frac{d}{dt} i_{1b} - j \frac{\omega}{\tau} v i_{1b}) + \frac{\sqrt{3}}{2} L_\mu \left\{ \frac{d}{dt} (i_1 + a i_2 + a^2 i_3) + \right.$$

$$\left. - j \frac{\omega}{\tau} v (i_1 + a i_2 + a^2 i_3) \right\} \quad (1)$$

$$0 = R_b i_{2b} + (L_G^b + \frac{3}{2} L_\mu) (\frac{d}{dt} i_{2b} + j \frac{\omega}{\tau} v i_{2b}) + \frac{\sqrt{3}}{2} L_\mu \left\{ \frac{d}{dt} (i_1 + a^2 i_2 + a i_3) + \right.$$

$$\left. + j \frac{\omega}{\tau} v (i_1 + a^2 i_2 + a i_3) \right\}$$

$$F_e = m \frac{dv}{dt} - F_m = j \frac{\omega}{\tau} \frac{\sqrt{3}}{2} L_\mu \left\{ (i_1 + a^2 i_2 + a i_3) i_{1b} - (i_1 + a i_2 + a^2 i_3) i_{2b} \right\}$$

gdzie:

- $U_{1,2,3}$ - napięcia załączone na uzwojenia fazowe induktora 1, 2 i 3,
- $i_{1,2,3}$ - prądy w uzwojeniach fazowych induktora 1, 2 i 3,
- i_{1b}, i_{2b} - transformatorowane prądy bieznika sprowadzone do induktora ($i_{1b} = \frac{v}{i_{2b}}$),
- v - umieszczona nad wielkością oznacza sprzężenie,
- R_1 - rezystancja fazowa induktora,
- R_b - rezystancja fazowa bieznika sprowadzona do induktora,
- L_G^1 - indukcyjność rozproszenia induktora,
- L_G^b - indukcyjność rozproszenia bieznika sprowadzona do induktora,
- L_μ - indukcyjność własna uzwojeń induktora,
- $a = e^{j120^\circ}$
- $v = v_0(1-s)$ - prędkość silnika,
- $v_0 = 2 \check{f} \tau$ - prędkość synchroniczna,
- τ - podziałka biegunowa uzwojenia induktora,
- f - częstotliwość napięcia zasilania silnika,
- s - poślizg,
- m - masa ruchomych elementów układu napędowego (przemieszczających się z prędkością v)
- F_e - siła elektromagnetyczna (siła ciągu silnika),
- F_m - zewnętrzna siła mechaniczna działająca na silnik.

Występujące w równaniach (1) rezystancja R_b i indukcyjność rozproszenia L_G^b nie są w ogólnym przypadku parametrami stałymi, lecz zależą od częstotliwości pola elektromagnetycznego indukowanego w litym bieźniku. Oznacza to, że ich wartości zmieniają się wraz z prędkością silnika. Są one również zależne od amplitudy indukowanego prądu w bieźniku, gdy jest on wykonany z litej stali. Zagadnienia te są szeroko analizowane w stosunkowo licznych pracach [2, 3, 4, 5].

Warto jednak zaznaczyć, że w praktycznych przypadkach zastosowania indukcyjnych silników liniowych z dwustronnym induktorem i bieźnikiem litym nieferromagnetycznym oraz silników z jednostronnym induktorem i bieźnikiem litym dwuwarstwowym (z jedną warstwą nieferromagnetyczną) rezystancja i indukcyjność rozproszenia bieźnika mogą być traktowane jako parametry stałe przy spełnieniu określonych warunków [2].

2.2. Równania dla silnika połączanego w trójkąt

Układ połączeń silnika dla tego przypadku został przedstawiony na rys. 1a. Łatwo zauważyć, że taki sposób połączeń nie odpowiada klasycznemu połączeniu w trójkąt uzwojenia trójfazowego. Jedno z uzwojeń (na rys. 1a faza 2-3) jest tutaj bowiem włączone przeciwnie do uzwojeń pozostałych dwóch faz. Stosując umownie sposób strzałkowania napięć i prądów tak jak na rys. 1a, otrzymujemy:

$$\begin{aligned} i_3 &= -i_2 \\ U_1 &= U \\ U + U_2 - U_3 - \frac{1}{C} \int i_3 dt &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Podstawiając wzory (2) do (1) równania dla napięć induktora można przedstawić w postaci:

$$\begin{aligned} U_1 &= R_1 i_1 + (L_G^1 + L_\mu) \frac{d}{dt} i_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} L_\mu \frac{d}{dt} (i_{1b} + i_{2b}) \\ U_2 &= R_1 i_2 + (L_G^1 + \frac{3}{2} L_\mu) \frac{d}{dt} i_2 - \frac{1}{2} L_\mu \frac{d}{dt} i_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} L_\mu \frac{d}{dt} (a^2 i_{1b} + a i_{2b}) \\ U_3 &= -R_1 i_2 - (L_G^1 + \frac{3}{2} L_\mu) \frac{d}{dt} i_2 - \frac{1}{2} L_\mu \frac{d}{dt} i_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} L_\mu \frac{d}{dt} (a i_{1b} + a^2 i_{2b}) \end{aligned} \quad (3)$$

Stąd działanie silnika w układzie połączeń podanym na rys. 1a można opisać następująco:

$$\begin{aligned} U &= R_1 i_1 + (L_G^1 + L_\mu) \frac{d}{dt} i_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} L_\mu \frac{d}{dt} (i_{1b} + i_{2b}) \\ U &= -2R_1 i_2 - 2(L_G^1 + \frac{3}{2} L_\mu) \frac{d}{dt} i_2 + \frac{3}{2} L_\mu \frac{d}{dt} (i_{1b} - i_{2b}) - \frac{1}{C} \int i_2 dt \end{aligned} \quad (4)$$

$$0 = R_b \dot{i}_{1b} + (L_b^b + \frac{3}{2} L_\mu) \left(\frac{d}{dt} \dot{i}_{1b} - j \frac{\omega}{c} v \dot{i}_{1b} \right) + \frac{\sqrt{3}}{2} L_\mu \left\{ \frac{d}{dt} (i_1 + j \sqrt{3} i_2) + j \frac{\omega}{c} v (i_1 + j \sqrt{3} i_2) \right\}$$

$$0 = R_b \dot{i}_{2b} + (L_b^b + \frac{3}{2} L_\mu) \left(\frac{d}{dt} \dot{i}_{2b} + j \frac{\omega}{c} v \dot{i}_{2b} \right) + \frac{\sqrt{3}}{2} L_\mu \left\{ \frac{d}{dt} (i_1 - j \sqrt{3} i_2) + j \frac{\omega}{c} v (i_1 - j \sqrt{3} i_2) \right\}$$

$$F_e = - \frac{dV}{dt} - F_m = j \frac{\omega}{c} \frac{\sqrt{3}}{2} L_\mu \left\{ (i_1 - j \sqrt{3} i_2) \dot{i}_{1b} - (i_1 + j \sqrt{3} i_2) \dot{i}_{2b} \right\}.$$

Równania (4) są na tyle ogólne, że opisują wszystkie przypadki działania silnika i związanego z nim układu mechanicznego. W ogólnym przypadku są one równaniami nieliniowymi (prędkość silnika jest wielkością zmienną), co nie pozwala na niezależne rozwiązywanie równań napięciowych od równań sił działających w analizowanym układzie elektromechanicznym. Rozwiązanie takiego układu równań wymaga stosowania metody matematycznych.

W szczególnych przypadkach, gdy rozważany problem pozwala na założenie niezmienności prędkości silnika ($v = \text{const}$), układ równań przyjmuje postać liniową, co pozwala na szukanie rozwiązań ze pomocą rachunku operatorowego.

Penieźaż jednak zagadnienie pracy jednofazowej dotyczy głównie silników o małych siłach ciągu, praktycznie znaczenia posiada tutaj analiza stanów ustalonych przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym:

$$U = U_m \cos(\omega_0 t + \psi)$$

U_m - amplituda napięcia zasilania,

$$\omega_0 = 2\pi f,$$

ψ - kąt początkowy napięcia.

Napięcie to może być inaczej wyrażone jako suma dwóch napięć:

$$U = \frac{1}{2} U_m \left\{ e^{j(\omega_0 t + \psi)} + e^{-j(\omega_0 t + \psi)} \right\}$$

z tego wynika, że na podstawie zasady superpozycji równania napięciowe (4), przy założeniu $v = \text{const}$, mogą być przedstawione w postaci dwóch układów równań, których całkami szczególnymi dla stanu ustalonego są:

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \dot{i}_{1b} \\ \dot{i}_{2b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1^X & \dot{I}_1^{XX} \\ \dot{I}_2^X & \dot{I}_2^{XX} \\ \dot{I}_{1b}^X & \dot{I}_{1b}^{XX} \\ \dot{I}_{2b}^X & \dot{I}_{2b}^{XX} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{j\omega_0 t} \\ e^{-j\omega_0 t} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Natomiast równania dla stanów ustalonych silnika przyjmują postać:

$$\frac{1}{2}U_m = \left\{ R_1 + j(X_1 + \frac{2}{3}X_m) \right\} I_1^x + j \frac{1}{\sqrt{3}} X_m (I_{1b}^x + I_{2b}^x)$$

$$\frac{1}{2}U_m = -\left\{ sR_1 + j(2X_1 + 2X_m - X_0) \right\} I_2^x - X_m (I_{1b}^x - I_{2b}^x) \quad (6)$$

$$0 = \left\{ R_b + js(X_b + X_m) \right\} I_{1b}^x + j \frac{1}{\sqrt{3}} sX_m I_1^x - sX_m I_2^x$$

$$0 = \left\{ R_b + j(2-s)(X_b + X_m) \right\} I_{2b}^x + j \frac{1}{\sqrt{3}} (2-s)X_m I_1^x + (2-s)X_m I_2^x$$

$$\frac{1}{2}U_m^{xx} = \left\{ R_1 - j(X_1 + \frac{2}{3}X_m) \right\} I_1^{xx} - j \frac{1}{\sqrt{3}} X_m (I_{1b}^{xx} + I_{2b}^{xx})$$

$$\frac{1}{2}U_m^{xx} = -\left\{ 2R_1 - j(2X_1 + 2X_m - X_0) \right\} I_2^{xx} + X_m (I_{1b}^{xx} - I_{2b}^{xx})$$

$$0 = \left\{ R_b - j(2-s)(X_b + X_m) \right\} I_{1b}^{xx} - j \frac{1}{\sqrt{3}} (2-s)X_m I_1^{xx} + (2-s)X_m I_2^{xx} \quad (7)$$

$$0 = \left\{ R_b - js(X_b + X_m) \right\} I_{2b}^{xx} - j \frac{1}{\sqrt{3}} sX_m I_1^{xx} - sX_m I_2^{xx}$$

$$\begin{aligned} F_o = j \frac{1}{\sqrt{3}} v_o X_m & \left\{ I_1^x (I_{1b}^{xx} - I_{2b}^{xx}) + I_1^{xx} (I_{1b}^x - I_{2b}^x) - j \sqrt{3} I_2^x (I_{1b}^{xx} + I_{2b}^{xx}) + \right. \\ & - j \sqrt{3} I_2^{xx} (I_{1b}^x + I_{2b}^x) + I_1^x (I_{1b}^x - I_{2b}^x) e^{j 2\omega_o t} + \\ & + I_1^{xx} (I_{1b}^{xx} - I_{2b}^{xx}) e^{-j 2\omega_o t} - j \sqrt{3} I_2^x (I_{1b}^x + I_{2b}^x) e^{j 2\omega_o t} + \\ & \left. - j \sqrt{3} I_2^{xx} (I_{1b}^{xx} + I_{2b}^{xx}) e^{-j 2\omega_o t} \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie:

$$x_1 = \omega_o L_{\sigma}^1, \quad X_m = \omega_o \frac{1}{2} L_{\mu}, \quad X_b = \omega_o L_{\sigma}^b, \quad X_0 = \frac{1}{\omega_o},$$

$$v_o = \frac{\tilde{v}}{\beta} \omega_o'$$

$$s = \frac{V_0 - V}{V} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_b},$$

U_m - wartość maksymalna napięcia zasilania.

Zauważmy, że w zależności (8) określającej siłę ciągu silnika F_0 , obok składników stałych występują składniki zmienne w czasie, które wywołują pulsującą siłę z dwukrotną częstotliwością sieci. Ponieważ ich średnie wartości są równe zeru, w obliczeniach średnich wartości siły ciągu mogą być pominięte, co daje:

$$F_{e \text{ sr}} = j \frac{1}{\sqrt{3} V_0} X_m \left\{ \underline{I}_1^x (\underline{I}_{1b}^{xx} - \underline{I}_{2b}^{xx}) + \underline{I}_1^{xx} (\underline{I}_{1b}^x - \underline{I}_{2b}^x) - j \sqrt{3} \underline{I}_2^x (\underline{I}_{1b}^{xx} + \underline{I}_{2b}^{xx}) - j \sqrt{3} \underline{I}_2^{xx} (\underline{I}_{1b}^x + \underline{I}_{2b}^x) \right\} \quad (9)$$

Korzystając z równań (6) i (7) należy mieć na uwadze, że parametry bieżnika R_b i X_b są w ogólnym przypadku zależne od częstotliwości jego prądów, co wymaga określenia ich wartości w stosunku do przyporządkowanego prądu bieżnika, o czym wspomniano w p. 2.1.

Rozwiązanie równań (6) i (7) pozwala na wyznaczenie interesujących nas prądów na podstawie związków określonych zależnością (5), które ogólnie można przedstawić w postaci:

$$A \cdot e^{j(\omega_0 t + \varphi)} = A_1 \cdot e^{j(\omega_0 t + \varphi_1)} + A_2 \cdot e^{-j(\omega_0 t + \varphi_2)}$$

gdzie:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1 A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}$$

$$\tan \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}$$

Zauważmy, że między prądami w równaniach (6) i (7) zachodzą relacje:

$$\underline{I}_1^x = \underline{I}_{1b}^{xx}; \quad \underline{I}_2^x = \underline{I}_{2b}^{xx}; \quad \underline{I}_{1b}^x = \underline{I}_{2b}^x; \quad \underline{I}_{2b}^x = \underline{I}_{1b}^{xx}$$

co pozwala na ograniczenie obliczeń do rozwiązania tylko jednego z tych równań.

2.3. Równania dla silnika połączonego w gwiazdę

Silnik połączony w gwiazdę może być włączony do pracy jednofazowej według układu połączeń zamieszczonego na rys. 1b. Zgodnie z prawami Kirchhoffa dla tego układu połączeń otrzymujemy:

$$U - U_1 + U_3 = 0$$

$$U_2 - U_3 + \frac{1}{C} \int i_2 dt = 0 \quad (10)$$

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

Na podstawie równań (10) i (1) otrzymujemy równania opisujące działanie silnika w następującej postaci:

$$U = 2 \left\{ R_1 + (L_0 + \frac{3}{2} L_\mu) \frac{d}{dt} \right\} i_1 + \left\{ R_1 + (L_0 + \frac{3}{2} L_\mu) \frac{d}{dt} \right\} i_2 + j \frac{3}{2} L_\mu \frac{d}{dt} (a^2 i_{1b} - a i_{2b})$$

$$0 = \left\{ R_1 + (L_0 + \frac{3}{2} L_\mu) \frac{d}{dt} \right\} i_1 + 2 \left\{ R_1 + (L_0 + \frac{3}{2} L_\mu) \frac{d}{dt} \right\} i_2 - j \frac{3}{2} L_\mu \frac{d}{dt} (i_{1b} - i_{2b}) + \frac{1}{C} \int i_2 dt$$

$$0 + R_b i_{1b} + (L_0 + \frac{3}{2} L_\mu) \left(-\frac{d}{dt} i_{1b} - j \frac{\sqrt{3}}{2} v_{1b} \right) - j \frac{3}{2} L_\mu \frac{d}{dt} (a i_1 - i_2) - \frac{\sqrt{3}}{2} v_{1b} L_\mu (a i_1 - i_2) \quad (11)$$

$$0 = R_b i_{2b} + (L_0 + \frac{3}{2} L_\mu) \left(\frac{d}{dt} i_{2b} + j \frac{\sqrt{3}}{2} v_{1b} \right) + j \frac{3}{2} L_\mu \frac{d}{dt} (a^2 i_1 - i_2) - \frac{\sqrt{3}}{2} v_{1b} L_\mu (a^2 i_1 - i_2)$$

$$F_o = m \frac{dv}{dt} - F_m = - \frac{\sqrt{3}}{2} L_\mu \left\{ (a^2 i_1 - i_2) i_{1b} + (a i_1 - i_2) i_{2b} \right\}$$

Postępując dalej podobnie jak w przypadku silnika połączonego w trójkąt, dla stanów ustalonych przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym otrzymujemy:

$$\frac{1}{2} \dot{W}_m = 2 \left\{ R_1 + j(X_1 + X_m) \right\} I_{11}^x + \left\{ R_1 + j(X_1 + X_m) \right\} I_{12}^x - X_m (a^2 i_{1b} - a i_{2b})$$

$$0 = R_1 + j(X_1 + X_m) I_{11}^x + \left\{ 2R_1 + j(2X_1 + 2X_m - X_o) \right\} I_{12}^x + X_m (I_{1b}^x - I_{2b}^x) \quad (12)$$

$$0 = \left\{ R_b + j(X_b + X_m) \right\} I_{1b}^x + s X_m (a I_{11}^x - I_{12}^x)$$

$$0 = \left\{ R_b + j(2-s)(X_b + X_m) \right\} I_{2b}^x - (2-s) X_m (a^2 I_{11}^x - I_{12}^x)$$

$$\frac{1}{2}U_m = 2 \left\{ R_1 - j(X_1 + X_m) \right\} I_{-1}^{XX} + \left\{ R_1 - j(X_1 + X_m) \right\} I_{-2}^{XX} + X_m (a^2 I_{1b}^{XX} - a I_{2b}^{XX})$$

$$0 = \left\{ R_1 - j(X_1 + X_m) \right\} I_1^{XX} + \left\{ 2R_1 - j(2X_1 + 2X_m - X_0) \right\} I_2^{XX} - X_m (I_{1b}^{XX} - I_{2b}^{XX}) \quad (13)$$

$$0 = \left\{ R_b - j(2-s)(X_b + X_m) \right\} I_{1b}^{XX} - (2-s)X_m (a I_{-1}^{XX} - I_{-2}^{XX})$$

$$0 = \left\{ R_b - js(X_b + X_m) \right\} I_{2b}^{XX} + sX_m (a^2 I_{1b}^{XX} - I_{-2}^{XX})$$

$$F_o = -\frac{1}{V_o} X_m \left\{ I_{-1}^X (a^2 I_{1b}^{XX} + a I_{2b}^{XX}) + I_{-1}^{XX} (a^2 I_{1b}^X + a I_{2b}^X) \right. \\ \left. - I_{-2}^X (I_{1b}^{XX} + I_{2b}^{XX}) - I_{-2}^{XX} (I_{1b}^X + I_{2b}^X) + I_{-1}^X (a^2 I_{1b}^X + a I_{2b}^X) \right\} e^{j 2\omega_o t} \quad (14)$$

$$+ I_{-1}^{XX} (a^2 I_{1b}^{XX} + a I_{2b}^{XX}) e^{-j 2\omega_o t} - I_{-2}^X (I_{1b}^X + I_{2b}^X) e^{j 2\omega_o t} \\ - I_{-2}^{XX} (I_{1b}^{XX} + I_{2b}^{XX}) e^{-j 2\omega_o t}$$

oraz

$$F_o \epsilon_r = -\frac{1}{V_o} X_m \left\{ I_{-1}^X (a^2 I_{1b}^{XX} + a I_{2b}^{XX}) + I_{-1}^{XX} (a^2 I_{1b}^X + a I_{2b}^X) \right. \\ \left. - I_{-2}^X (I_{1b}^{XX} + I_{2b}^{XX}) - I_{-2}^{XX} (I_{1b}^X + I_{2b}^X) \right\} \quad (15)$$

3. Analiza obciążeniowo-napięciowa

Ro patrząc zakresy praktycznego wykorzystania indukcyjnych silników liniowych o małych prędkościach synchronicznych i siłach ciągu, można zauważyć, że często staje się tutaj wystarczające dysponowanie danymi dotyczącymi tylko stanów statycznych. Ponadto w licznych przypadkach praktycznych mamy do czynienia z wykorzystaniem tych silników do pracy w zakresie dużych poślینگów. Wtedy wystarczające jest posługiwanie się danymi dla stanu swarcia, co skłania producentów induktorów do podawania ich jako dane znamionowe.

Choć osiągnąć możliwie największą siłę ciągu, przy zasilaniu silnika trójfazowego z sieci jednofazowej, należy dążyć do optymalnego doboru pojemności stosowanego wtedy kondensatora.

W praktycznych obliczeniach przybliżoną wartość dla optymalnej pojemności kondensatora (dla obu przypadków połączeń) można wyznaczyć z doświadczalnie określonej zależności:

$$C \approx \frac{1}{2 \omega_0 (X_1 + X_M)}$$

Przechodząc do weryfikacji przedstawionych metod obliczeniowych, należy zwrócić uwagę na trudności napotymane już przy wyznaczaniu parametrów (indukcyjności i rezystancji) induktora i litego bieznika [5], co w poważnym stopniu rzutuje na wyniki obliczeń parametrów elektromechanicznych silnika.

Także wyniki badań eksperymentalnych mogą być obciążone trudnymi do oszacowania błędami, wynikającymi w pierwszym rzędzie z trudności występujących przy identyfikacji rzeczywistych wartości temperatury materiału litego bieznika, która może ulegać szybkim zmianom.

Przedstawione w niniejszej publikacji metody obliczeniowe były sprawdzane w kilku praktycznych przypadkach, dla stanów statycznych odpowiadających pracy silnika w stanie zwarcia ($V = 0$). Niżej zamieszczono wyniki uzyskane dla silnika z induktorem SL-5-100 seryjnie produkowanym w Zakładzie Maszyn Elektrycznych i Motorreduktorów INDUKTA. Badany silnik posiadał jednostrenny induktor i ferromagnetyczny bieznik z nałożoną białą aluminiową o grubości $2 \cdot 10^{-3}$ m.

Wartości rezystancji i reaktancji rozproszenia takiego bieznika mogą być traktowane jako stałe, przy zasilaniu silnika napięciem o częstotliwości $f = 50$ Hz w zakresie prędkości $V < 3 \frac{m}{s}$ [2]. Otrzymane dane dla stanu zwarcia tego silnika były następujące:

$$R_1 = 10,9\Omega, \quad X_1 = 37,1\Omega, \quad X_M = 36,4\Omega,$$

$$R_b = 34,36\Omega, \quad X_b = 3,73\Omega;$$

a) Przy połączeniu według rys. 1a (w wartościach skutecznych)

$$U = 220 \text{ V}, \quad C = 20 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

	Obliczenia	Pomiar
I_1	4,1 A	3,8 A
I_2	3,0 A	3,1 A
I	4,3 A	3,9 A
$F_{\text{e}} \text{ r}$	92,2 N	79 N
$\cos \varphi$	0,91	0,92

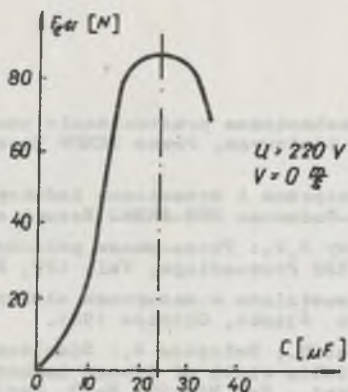
I - prąd pobierany z sieci

Na rys. 2 i 3 zamieszczono wykres $F_{\text{e}} \xi_r = f(C)$ oraz charakterystyki elektromechaniczne badanego silnika.

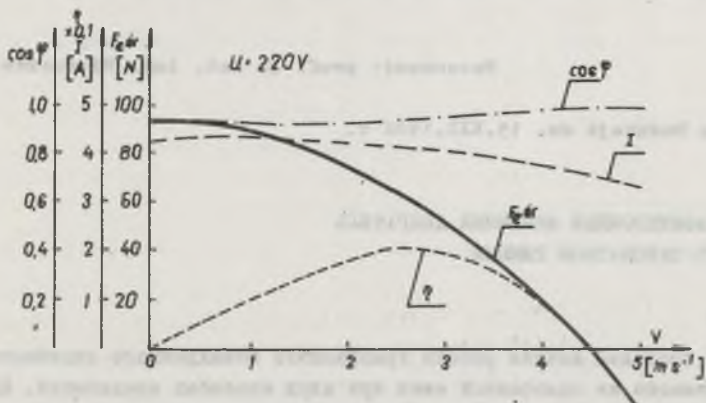
b) Przy połączeniu według rys. 1b (w wartościach skutecznych)

$U = 380 \text{ V}, \quad C = 24 \cdot 10^{-6} \text{ F}$

	Obliczenia	Pomiar	Dane znamionowe przy zasileniu 3-fazowym
I	2,8 A	2,4 A	3,0 A
I_2	3,6 A	3,1 A	
$F_{\text{e}} \xi_r$	109,2 N	96,0 N	100 N
$\cos \varphi$	0,98	0,95	0,45



Rys. 2. Wykres $F_{\text{e}} \xi_r = f(C)$ dla silnika włączonego do sieci według rys. 1a sporządzony na podstawie wyników pomiarów



Rys. 3. Charakterystyki elektromechaniczne silnika włączonego do sieci według rys. 1a, sporządzone na podstawie wyników obliczeń

4. Zakończenia

Przedstawiona metoda obliczeń charakterystyk elektromechanicznych indukcyjnych silników liniowych trójfazowych, przy zasilaniu z sieci jednofazowej, pozwala na uzyskanie wyników z dokładnością, jaka w praktyce inżynierskiej może być uznana za zadowalającą.

Silnik trójfazowy przy jednofazowym zasilaniu charakteryzuje się znaczącym obniżeniem maksymalnej sprawności (w badanym przypadku o ok. 50%). Nie ma to istotnego znaczenia w przypadku wykorzystania go do pracy przerywanej względnie dorywczej w zakresie dużych poślizgów.

Natomiast korzystnym zjawiskiem jest zdecydowanie większa wartość współczynnika mocy, co sprawia, że przy zasilaniu jednofazowym silnik pobiera z sieci znacznie mniejszą moc pozorną, czyli jego praca przebiega przy lepszych warunkach zasilania.

LITERATURA

- [1] Nitka St.: Elektromechaniczne przetwarzanie energii w asynchronicznych przetwornikach liniowych. Prace ZKMPW Zeszyt nr 80 Wyd. Śląsk, Katowice 1972.
- [2] Nitka St.: Stany statyczne i dynamiczne indukcyjnych silników liniowych. Prace Naukowo-Badawcze OBR-SMEAG Zeszyt nr 11, Katowice 1980.
- [3] Nondahl T.A., Novotny D.W.: Three-phase pole-by-pole model of a linear induction machine. IEE Proceedings, Vol. 127, Part B, No 2, March 1980.
- [4] Paszek W.: Stany niestabilne w maszynach elektrycznych. Cz. I Skrypt nr 992. Politechnika Śląska, Gliwice 1981.
- [5] Peloujadoff M., Morel B., Bolopion A.: Simultaneous consideration of finite length and finite width of linear induction motors. IEE Trans. on Power App. and Syst., Vol PAS-99, No 3, May/June 1980.
- [6] Puchała A.: Dynamika maszyn i układów elektromechanicznych. PWN, Warszawa 1977.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Władysław Paszek

Wpłynęło do Redakcji dn. 15.XII.1982 r.

ТРЕХФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЛИНИЙНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ РАБОТАЮЩИЙ В ОДНОФАЗНОМ РЕЖИМЕ

Резюме

В статье проведен анализ работы трехфазного асинхронного линейного двигателя, питаемого из однофазной сети при двух способах соединений. Представлены способы определения переходных и статических режимов, а кроме того результаты расчетов и испытаний для двигателей работающих при нулевой скорости.

**THREE-PHASE LINEAR INDUCTION MOTOR OPERATING
UNDER SINGLE-PHASE CONDITIONS****S u m m a r y**

This paper presents analysis of a three-phase linear induction motor supplied from a single-phase network for two connection schemes. Methods of calculation of transient and steady-state conditions are given, as well as the experimental and theoretical testing results for the motors operated under starting conditions.