

Model dynamiczny silnika indukcyjnego klatkowego

Tadeusz Glinka

1. Wstęp

Silniki indukcyjne klatkowe dużej mocy w większości napędów elektrycznych pracują przy zasilaniu bezpośrednim z sieci elektroenergetycznej, pracują zatem jako napędy nieregulowane. Stany dynamiczne związane z:

- rozruchem;
- wyłączeniem zasilania i powtórny załączeniem napięcia;
- rewersją prędkości obrotowej

oddziałują (najczęściej niekorzystnie) na silnik, sieć elektroenergetyczną, na napędzaną maszynę roboczą i elementy przeniesienia napędu (wały, sprzęgła, przekładnie). A także na aparaturę łączeniową.

W czasie pracy ustalonej silników zdarzają się także zaburzenia napięcia sieci:

- krótkie impulsy napięcia generowane w czasie wyłączenia innych odbiorników energii (transformatorów, silników) przyłączonych do tej samej sieci;
- krótkie przerwy w napięciu zasilania związane z działaniem SPZ-ów i SZR-ów.

Krótkie przerwy napięcia zasilającego są zwykle przypadkowe, gdyż nie wynikają z algorytmu pracy napędu, lecz mogą być spowodowane zaburzeniami w sieci elektroenergetycznej, wywołane zwykle przypadkowymi zwarciami. Stany nieustalone, takie jak rozruch silników oraz wyłączenie i ponowne załączenie napięcia, są dla silników stanami elektromechanicznymi nieustalonymi, których analiza jest przeprowadzona z wykorzystaniem modelu matematycznego silnika.

2. Transformacja uzwojenia trójfazowego do układu α, β

Charakterystyka mechaniczna $T_e = f(\omega_m)$ silnika indukcyjnego klatkowego musi spełniać określone wymagania, aby silnik wypełniał swoją funkcję. Wymagania te narzuca maszyna robocza i są spełnione przy zasilaniu silnika napięciem trójfazowym znamionowym U_N i częstotliwości znamionowej $f_1 = f_N = 50$ Hz. Wymagania te dotyczą (rys. 1):

- momentu rozruchowego, zwykle $1,8T_N < T_r < 2,2T_N$;
- momentu minimalnego, zwykle $T_{min} > 1,5T_N$;
- momentu maksymalnego (krytycznego), zwykle $2,2T_N < T_k < 3T_N$

oraz dopuszczalnego, ze względu na temperaturę maksymalną uzwojenia wirnika, czasu rozruchu t_{roz} równego kilku do kilkunastu sekund, który zależy od rodzaju klatki wirnika i mocy znamionowej silnika.

Wymagane wartości momentu T_r i T_{min} wynikają stąd, że napięcie sieci elektroenergetycznej na zaciskach silnika w czasie rozruchu jest zwykle mniejsze od znamionowego, gdyż prąd

Streszczenie: Silniki indukcyjne klatkowe dużej mocy w większości napędów elektrycznych pracują przy zasilaniu bezpośrednim z sieci elektroenergetycznej, pracują zatem jako napędy nieregulowane. Stany dynamiczne związane z: rozruchem, wyłączeniem zasilania i powtórny załączeniem napięcia, rewersją prędkości obrotowej, oddziałują niekorzystnie na silnik, sieć elektroenergetyczną, na napędzaną maszynę roboczą i elementy przeniesienia napędu (wały, sprzęgła, przekładnie).

Analiza pracy silnika w stanach elektromechanicznie nieustalonych jest przeprowadzona z wykorzystaniem modelu matematycznego silnika w układzie współrzędnych α, β . Dla silnika o parametrach znamionowych: 500 kW; 6000 V, wykorzystując pomiary przy biegu jałowym i w stanie zwarcia, obliczono parametry schematu zastępczego dla współrzędnych α, β . Przeprowadzono symulację komputerową rozruchu silnika przy korzystnej chwili załączenia napięcia i niekorzystnej chwili załączenia napięcia. W pierwszym przypadku wartości udarowe prądu rozruchowego i momentu rozruchowego są mniejsze i wynoszą: $I_{ud\ min} = 6I_N$, $T_{ud\ min} = 4,5T_N$. W drugim przypadku wartości udarowe prądu rozruchowego i momentu rozruchowego są maksymalne i wynoszą: $I_{ud\ max} = 8I_N$, $T_{ud\ max} = 8,5T_N$.

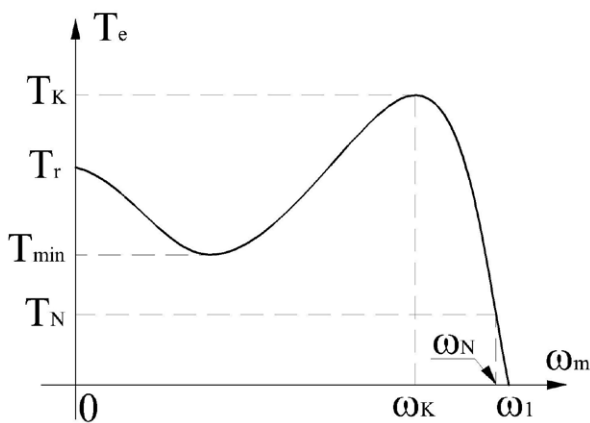
Słowa kluczowe. Silnik indukcyjny, współrzędne α, β , model matematyczny, rozruch

🇬🇧 A DYNAMIC MODEL OF A SQUIRREL-INDUCTION MOTOR

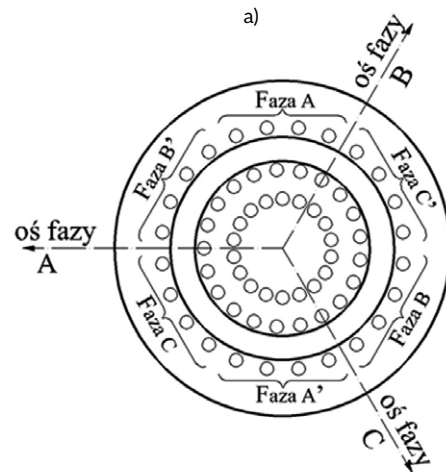
Abstract: High power cage induction motors work, in most electric drives, with direct supply from the power grid, therefore they work as unregulated drives. Dynamic states are associated with: start, turning the power off and re-switching on, rotation reverse, they have an adverse effect on the motor, on the electricity network, on the driven machine and power train components (shafts, clutches, gears).

The analysis of motor's operation in electro-mechanically unsteady states are carried out using the mathematical model of the engine in the α, β coordinate system. For a motor with rated parameters: 500 kW; 6000 V, $p = 2$, using idle and short circuit measurements, the equivalent circuit diagram parameters for the α, β coordinates were calculated. Computer simulation of the motor's start-up was carried out at the favorable and unfavorable moment of switching on the voltage. In the first case, the shock values of the starting current and the starting torque are minimal and are: $I_{ud\ min} = 6I_N$, $T_{ud\ min} = 4,5T_N$. In the second case, the shock values of the starting current and the starting torque are maximal and are: $I_{ud\ max} = 8I_N$, $T_{ud\ max} = 8,5T_N$.

Keywords. Induction motor, co-ordinates α, β , mathematical model, start-up

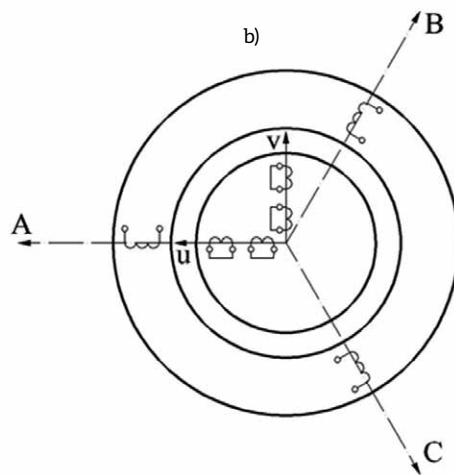


Rys. 1. Charakterystyka elektromechaniczna silnika indukcyjnego



rozruchowy powoduje większe spadki napięcia sieci. Moment elektromagnetyczny silnika jest funkcją kwadratu napięcia i w tych warunkach silnik powinien dokonać rozruchu przy obciążeniu momentem znamionowym. Moment maksymalny T_k determinuje maksymalne przyspieszenie układu w czasie rozruchu i np. w przypadku taśmociągu może powodować dużą siłę naciągu taśmy, a nawet jej zerwanie.

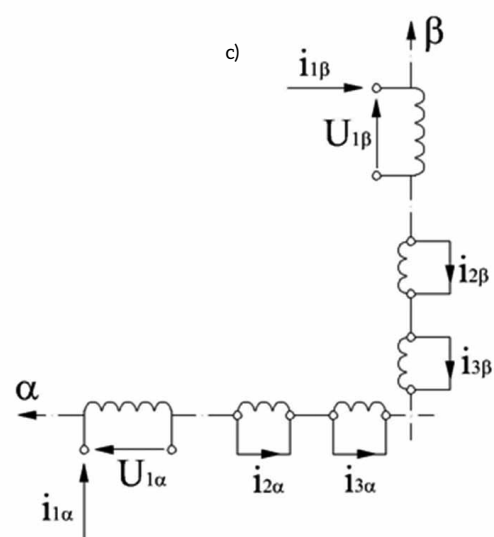
Spełnienie tych wymagań uzyskuje się przez odpowiednie ukształtowanie klatki uzwojenia wirnika. W silnikach przewidzianych do napędów maszyn roboczych o częstych rozruchach i krótkich czasach rozruchu są stosowane wirniki z uzwojeniem dwuklatkowym z prętami okrągłymi, a w silnikach przewidzianych do napędu maszyn roboczych o długim czasie rozruchu stosowane są wirniki głębokożłobkowe. Jedno i drugie rozwiązanie uzwojeń wirników w elektrycznych schematach zastępczych silników aproksymuje się dwoma uzwojeniami zwartymi (rys. 2) [5, 7].



Uzwojenie wirnika wiruje, co powoduje, że sprzężenie magnetyczne tego uzwojenia z uzwojeniem stojana jest funkcją czasu. Aby sprzężenie to uniezależnić od czasu, stosuje się różne transformacje. W literaturze [4] omówiono sześć przypadków takich transformacji. Tutaj posłużymy się transformacją uzwojeń stojana i wirnika na dwuosiowy układ współrzędnych α, β , nieruchomy względem stojana, przy czym oś α pokrywa się z osią fazy A (rys. 2), ponadto uzwojenie wirnika jest sprowadzone na napięcie i częstotliwość uzwojenia stojana.

Transformacja jest przeprowadzona przy założeniach:

- siła magnetomotoryczna wypadkowa uzwojeń stojana Θ_1 wzbudzana przez prądy stojana $I_1 \in (I_A, I_B, I_C)$ i przez prądy I_α, I_β jest taka sama, to samo dotyczy smm Θ_2 wzbudzonej przez prądy w uzwojeniach wirnika;
- liczba zwojów wszystkich uzwojeń jest identyczna ($N_\alpha = N_\beta = N_1 = N_{2\alpha} = N_{2\beta} = N_{3\alpha} = N_{3\beta}$);
- rezystancje: $R_{1\alpha} = R_{1\beta} = R_1, R_{2\alpha} = R_{2\beta} = R_2, R_{3\alpha} = R_{3\beta} = R_3$;
- indukcyjności uzwojeń: $L_{1\alpha} = L_{1\beta} = L_1, L_{2\alpha} = L_{2\beta} = L_2, L_{3\alpha} = L_{3\beta} = L_3$.



Rys. 2. Kolejne etapy transformacji uzwojeń silnika indukcyjnego klatkowego z układu trójfazowego do układu dwuosiowego α, β : a – przekrój obwodu magnetycznego; b – schematyczne przedstawienie uzwojeń; c – uzwojenia w osiach α, β nieruchomych względem stojana

Zgodnie z założeniami równania napięć w układzie α, β

$$\begin{aligned} U_{1\alpha}(t) &= \frac{3}{2}U_{1A}(t) = U_{1mA}\sin(\omega t - \varphi) \\ U_{1\beta}(t) &= \frac{3}{2}U_{1mA}\cos(\omega t - \varphi) \end{aligned} \quad (1)$$

Transformacja odwrotna napięcia i prądu w fazie A

$$\begin{aligned} U_{1A}(t) &= \frac{2}{3}U_{1\alpha}(t) \\ I_{1A}(t) &= \frac{2}{3}I_{1\alpha}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

Zestaw równań napięciowo-prądowych silnika we współrzędnych α, β , dla schematu jak na rys. 2 c:

$$\begin{aligned} u_{1\alpha} &= R_1 i_{1\alpha} + \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt} \\ 0 &= \frac{R_2}{s} i_{2\alpha} + \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} \\ 0 &= \frac{R_3}{s} i_{3\alpha} + \frac{d\psi_{3\alpha}}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} u_{1\beta} &= R_1 i_{1\beta} + \frac{d\psi_{1\beta}}{dt} \\ 0 &= \frac{R_2}{s} i_{2\beta} + \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} \\ 0 &= \frac{R_3}{s} i_{3\beta} + \frac{d\psi_{3\beta}}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

i równania momentów

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_m}{dt} &= \frac{1}{J} [T_e(t) - T_{ob}(t)] \\ T_e(t) &= p \frac{P_\psi(t)}{\omega_1} \\ \omega_m &= \frac{1}{p} \omega_1 [1 - s] \end{aligned} \quad (5)$$

Moc $P_\psi(t)$, przy pominięciu strat w obwodzie magnetycznym:

$$P_\psi(t) = u_{1\alpha}i_{1\alpha} + u_{1\beta}i_{1\beta} - R_1(i_{1\alpha}^2 + i_{1\beta}^2) \quad (6)$$

Przy czym napięcia na uzwojeniach zasilanych

$$\begin{aligned} u_{1\alpha} &= \frac{3\sqrt{2}}{2\sqrt{3}}U\sin(\omega_1 t - \varphi) \\ u_{1\beta} &= \frac{3\sqrt{2}}{2\sqrt{3}}U\cos(\omega_1 t - \varphi) \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie: s jest poślizgiem, a $U/\sqrt{3}$ – napięcie fazowe w układzie 3-fazowym, a $\text{razy } \sqrt{2}$ jest napięciem fazowym w układzie α, β .

Strumień sprzężony dla uzwojenia skupionego $\Psi = N\Phi$, gdzie N oznacza liczbę zwojów uzwojenia, a Φ strumień magnetyczny.

Dla uzwojeń rozłożonych $\Psi = \sum_{i=1}^n \Phi_i$. Pojęcie strumień sprzężony Ψ wykorzystuje się do definicji indukcyjności uzwojenia. Jeżeli przez uzwojenie płynie prąd I i wzbudza on strumień sprzężony Ψ , to indukcyjność uzwojenia wynosi

$$L = \frac{\Psi}{I} \quad (8)$$

Jest to wzór definicyjny indukcyjności.

W naszym modelu indukcyjności L , jako parametry schematu zastępczego, są znane albo z obliczeń projektowych albo z pomiarów. Zatem równanie (8) wykorzystamy do obliczania strumieni sprzężonych Ψ ze znanych wartości indukcyjności L . Strumienie sprzężone poszczególnych uzwojeń w modelu α, β zapiszemy następująco

$$\begin{aligned} \Psi_{1\alpha} &= L_{11}i_{1\alpha} + L_{12}i_{2\alpha} + L_{13}i_{3\alpha} \\ \Psi_{2\alpha} &= L_{12}i_{1\alpha} + L_{22}i_{2\alpha} + L_{23}i_{3\alpha} \\ \Psi_{3\alpha} &= L_{13}i_{1\alpha} + L_{23}i_{2\alpha} + L_{33}i_{3\alpha} \\ \Psi_{1\beta} &= L_{11}i_{1\beta} + L_{12}i_{2\beta} + L_{13}i_{3\beta} \\ \Psi_{2\beta} &= L_{12}i_{1\beta} + L_{22}i_{2\beta} + L_{23}i_{3\beta} \\ \Psi_{3\beta} &= L_{13}i_{1\beta} + L_{23}i_{2\beta} + L_{33}i_{3\beta} \end{aligned} \quad (9)$$

Zestaw równań (3) do (6) jest rozwiązywalny przy:

- zadaniem napięciu zasilającym międzyprzewodowym o wartości skutecznej U i pulsacji $\omega = 2\pi f_1$;
- zadaniem momencie obciążenia T_{ob} ;
- znanej liczbie par biegunów p ;
- znanych parametrach maszyny; rezystancjach i indukcyjnościach:

R_1 ; $L_1 = L_{1\sigma} + L_\mu$; $L_{12} = L_{13} = L_\mu$ – rezystancja i indukcyjności jednej fazy uzwojenia stojana w układzie gwiazdy,

R_2 , $L_2 = L_{2\sigma} + L_\mu$; $L_{23} = L_\mu$; R_3 ; $L_3 = L_{3\sigma} + L_\mu$ – rezystancje i indukcyjności jednej fazy ekwiwalentnego uzwojenia trójfazowego wirnika transformowanego na układ gwiazdy. Ponieważ liczba zwojów $N_\alpha = N_\beta = N_A = N_B = N_C$, to zakłada się, że rezystancje R_1, R_2, R_3 i indukcyjności $L_1, L_2, L_3, L_{12}, L_{13}, L_{23}$ są takie same w układzie α, β .

Kąt φ określa wartość chwilową napięcia w fazie A w czasie załączenia. Rozwiązując te równania, kąt φ można zmieniać parametrycznie, można obliczyć przebiegi: moment elektromagnetyczny $T_e(t)$, prąd fazy A silnika $i_A = \frac{2}{3}i_{1\alpha}$ i prędkość kątową $\omega_m(t)$. Z przebiegu momentu można określić moment udarowy T_{ud} z przebiegu prądu prąd udarowy I_{ud} , a z przebiegu prędkości kątowej czas rozruchu t_{roz} . Przeprowadzając obliczenia symulacyjne, przy parametrycznej zmianie wartości kąta φ , można wyznaczyć wartości minimalne i maksymalne momentu udarowego $T_{ud\ min}$ i $T_{ud\ max}$ i prądu udarowego $I_{ud\ min}$ i $I_{ud\ max}$.

3. Stany dynamiczne silnika indukcyjnego

Rozruch silnika indukcyjnego przy bezpośrednim załączeniu do sieci elektroenergetycznej jest jednym z trudniejszych stanów dynamicznych. Charakterystyki rozruchowe zostaną zaprezentowane dla silnika SVf 400 x4 o parametrach znamionowych: 500 kW; 6000 V; 50 Hz; 51 A; 1470 obr./min, $\cos\varphi_N = 0,91$; sprawność $\eta_N = 0,95$; $p = 2$.

Jednofazowy schemat zastępczy silnika dla fazy α przedstawiono na rys. 3. Identyczny schemat zastępczy ma faza β .

Z obliczeń projektowych silnika określono:

- parametry uzwojenia stojana: $R_1 = 0,75 \Omega$, $X_{1\sigma} = 5,1 \Omega$, $X_\mu = 250 \Omega$, z danych tych obliczono

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{\omega_1} = \frac{5,1}{314} = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ H}$$

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{\omega_1} = \frac{250}{314} = 0,8 \text{ H}$$

- parametry uzwojenia wirnika sprowadzone na układ trójfazowy oraz na napięcie i częstotliwość stojana:

- dla stanu zwarcia ($\omega_m = 0$): $R_{2z} = 1,8 \Omega$, $X_{2z} = 4,3 \Omega$,
- dla pracy znamionowej (ω_{mN}): $R_{2N} = 0,65 \Omega$, $X_{2N} = 8,8 \Omega$.

Z parametrów tych oblicza się parametry modelu matematycznego charakteryzujące wirnik R_2 , $L_{2\sigma}$, R_3 , $L_{3\sigma}$. Obliczenia prowadzimy metodą przybliżoną.

Dla pracy znamionowej silnika (ω_{mN}) częstotliwość w uzwojeniu wirnika jest równa częstotliwości poślizgu $f_2 = sf_1 = 1 \text{ Hz}$, o rozplywie prądów $i_{2\alpha}$, $i_{3\alpha}$ decydują rezystancje uzwojeń R_2 i R_3 , gdyż $R_2 > 2\pi f_2 L_{2\sigma}$; $R_3 > 2\pi f_2 L_{3\sigma}$.

W pierwszej iteracji zakładamy

$$R_2 = R_{2z} = 1,8 \Omega$$

$$R_3 = R_{2N} = 0,65 \Omega$$

i obliczamy rezystancję zastępczą

$$R_{zast} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \dots = 0,477 \Omega$$

W następnej iteracji podwyższa się wartość rezystancji w gałęziach równoległych w stosunku

$$\frac{R_{2N}}{R_{zast}} = \frac{0,65}{0,477} = 1,36$$

i otrzymuje się nowe wartości rezystancji

$$R_2 = 1,8 \cdot 1,36 = 2,45 \Omega, R_3 = 0,65 \cdot 1,36 = 0,88 \Omega$$

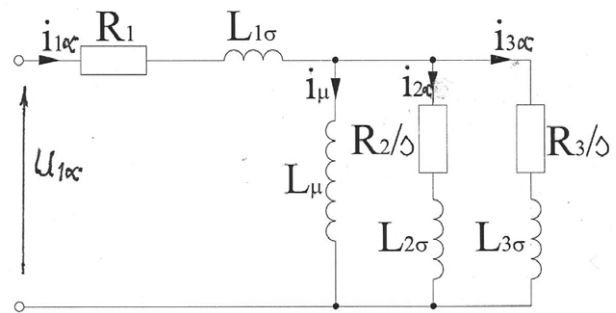
które przyjmuje się jako parametry modelu matematycznego silnika.

Dla stanu zwarcia silnika ($\omega_m = 0$) spadek napięcia na reaktancji rozproszenia wirnika jest większy od spadku napięcia na rezystancji $R_2 < 2\pi f_1 L_{2\sigma}$; $R_3 < 2\pi f_1 L_{3\sigma}$. Zakłada się spadek napięcia na rezystancji równy zero i przyjmuje się wartości reaktancji w gałęziach równoległych,

$$X_{2\sigma} = X_{2z} = 4,3 \Omega, X_{3\sigma} = X_{2N} = 8,8 \Omega$$

Podobnie jak dla rezystancji oblicza się reaktancję zastępczą

$$X_{zast} = \frac{X_{2\sigma} X_{3\sigma}}{X_{2\sigma} + X_{3\sigma}} = \dots = 2,9 \Omega$$



Rys. 3. Jednofazowy schemat zastępczy silnika przy pominięciu mocy strat w żelazie $\Delta P_{fe} = 0$

i współczynnik korygujący

$$\frac{X_{2z}}{X_{zast}} = \frac{4,3}{2,9} = 1,48$$

co pozwala obliczyć końcową wartość reaktancji aproksymujących

$$X_{2\sigma} = 4,3 \cdot 1,48 = 6,36 \Omega, X_{3\sigma} = 8,8 \cdot 1,48 = 13,02 \Omega$$

które przyjmuje się jako parametry modelu matematycznego silnika.

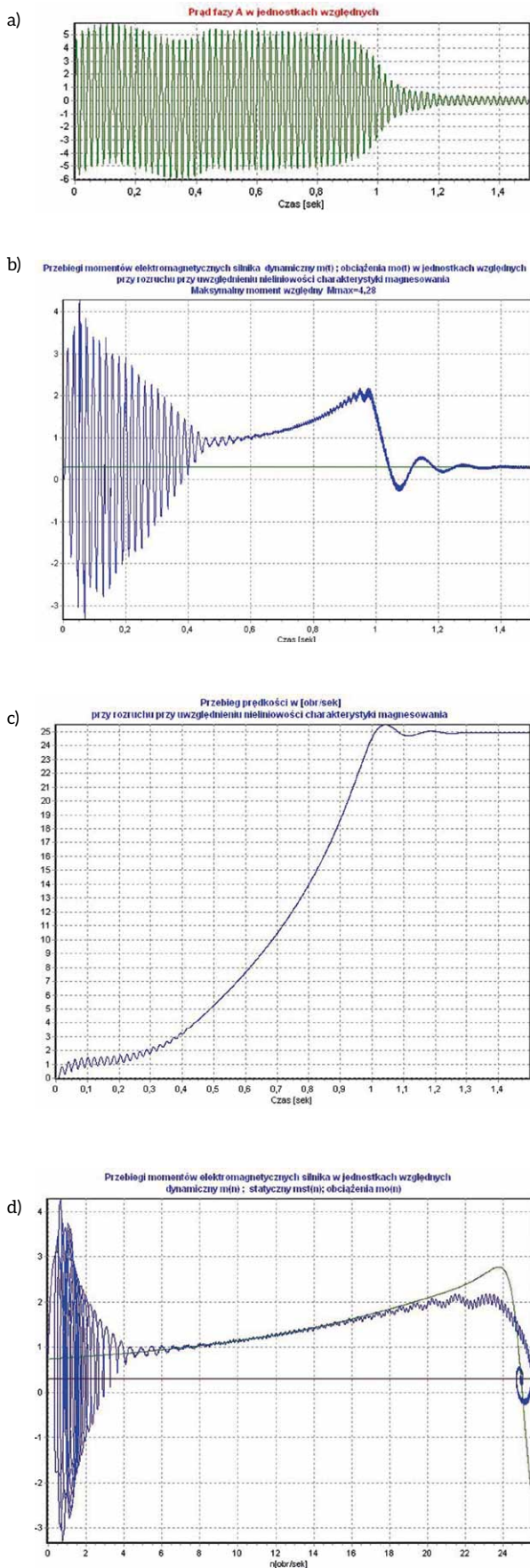
$$L_{2\sigma} = \frac{X_{2\sigma}}{\omega_1} = \frac{6,36}{314} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ H}$$

$$L_{3\sigma} = \frac{X_{3\sigma}}{\omega_1} = \frac{13,02}{314} = 4,1 \cdot 10^{-2} \text{ H}$$

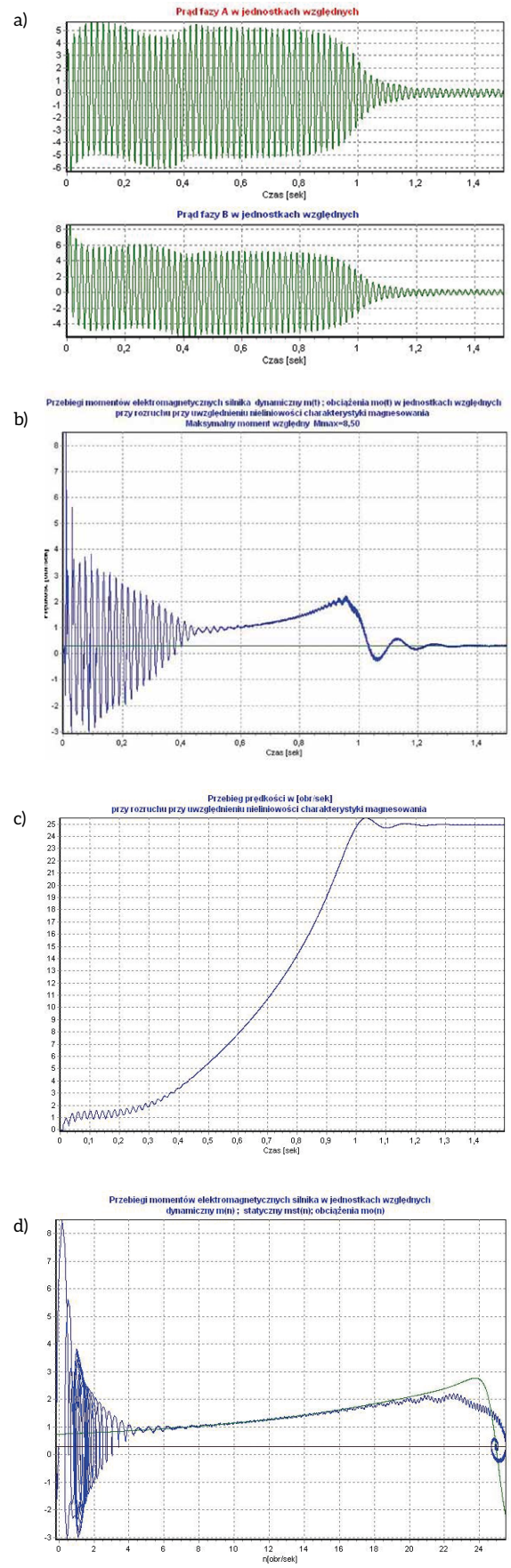
Metoda obliczania parametrów wirnika R_2 , $L_{2\sigma}$, R_3 , $L_{3\sigma}$ jest metodą przybliżoną. Błąd popełniony w tym przypadku jest znacznie mniejszy niż np. błąd wynikający ze zmiany rezystancji uzwojeń przy wzroście temperatury uzwojeń miedzianych. Na przykład w czasie rozruchu silnika temperatura uzwojenia wirnika może się zmienić nawet o 200°C , co powoduje wzrost rezystancji uzwojenia miedzianego o 80%. W przedstawionym modelu obliczeń rezystancję uzwojeń uważa się za stałą. Zatem obliczanie parametrów modelu matematycznego z większą dokładnością nie podwyższy dokładności analizy stanów dynamicznych silnika.

4. Przebiegi prądu i momentu w czasie rozruchu silnika

Dla projektanta i użytkownika układu napędowego istotne są wartości maksymalne prądu i momentu elektromagnetycznego, a ze względu na sprzęgło i maszynę roboczą – pochodna momentu $dT_e(t)/dt$, która determinuje zryw. Wartości ekstremalne występują w czasie załączenia napięcia. Napięcie może być załączane na silnik nieruchomy (rozruch silnika), a także na silnik wirujący, np. po chwilowym zaniku napięcia i ponownym jego załączeniu. Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi parametrów elektromechanicznych silnika w czasie rozruchu. Napięcie załączono na silnik niewzbudzany $\Psi = 0$ i niewirujący $\omega_m = 0$.



Rys. 4. Charakterystyki rozruchowe silnika indukcyjnego klatkowego SVf 400 x4: a – prądu $i(t)$; b – momentu elektromagnetycznego $T_e(t)$; c – prędkości kątowej $\omega_m(t)$; d – $T_e(t) = f(\omega_m(t))$, w czasie rozruchu ($\Psi = 0, \omega_m = 0$) przy korzystnej chwili załączenia napięcia



Rys. 5. Charakterystyki rozruchowe silnika indukcyjnego klatkowego SVf 400-x4: a – prądu $i_a(t)$ i $i_\beta(t)$; b – momentu elektromagnetycznego $T_e(t)$; c – prędkości kątowej $\omega_m(t)$; d – $T_e(t) = f(\omega_m(t))$, w czasie rozruchu ($\Psi = 0, \omega_m = 0$), przy niekorzystnej chwili załączenia napięcia

W tym stanie załączenia napięcia wartości maksymalne prądu i momentu elektromagnetycznego oraz ich przebiegi zależą od wartości chwilowych napięcia w momencie załączenia, czyli od kąta φ w równaniu (5). Obliczenia przeprowadzono dla silnika o parametrach podanych w punkcie 3, przy załączeniu napięcia znamionowego i przy założeniu momentu obciążenia $T_{ob} = 0$ oraz momentu bezwładności samego silnika $J = 40 \text{ kgm}^2$, jest to rozruch samego silnika. Na rysunku 4 przedstawiono najkorzystniejszy przypadek rozruchu silnika.

Wartości udarowe prądu rozruchowego i momentu rozruchowego są w tych warunkach minimalne i wynoszą: $I_{ud \min} = \sqrt{2} \cdot 6I_N = 8,5I_N$, $T_{min} = 4,5T_N$, a czas rozruchu wynosi $t_{roz} \approx 1 \text{ s}$.

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe przebiegi prądu, momentu i prędkości obrotowej przy ekstremalnie niekorzystnym załączeniu napięcia.

Wartości udarowe prądu rozruchowego i momentu rozruchowego są w tych warunkach maksymalne i wynoszą: $I_{ud \max} = \sqrt{2} \cdot 8I_N = 13,3I_N$, $T_{ud \max} = 8,5T_N$, a czas rozruchu wynosi $t_{roz} \approx 1 \text{ s}$.

Rozruchy silników indukcyjnych odbywają się zwykle przy obciążeniu silnika $T_{ob} > 0$ i przy dodatkowym momencie bezwładności $(J + J_d)$ maszyny roboczej. Warunki te nie mają wpływu na wartości maksymalne (udarowe) prądu i momentu, gdyż wartości udarowe występują, gdy wirnik stoi ($\omega_m = 0$). Moment obciążenia T_{ob} i moment bezwładności J_d mają wpływ na czas rozruchu t_r . Załączone na rysunkach 4 i 5 przebiegi dowodzą, że największy wpływ na wartości udarowe prądu i momentu ma kąt φ determinujący chwilową wartość napięcia w czasie załączenia. Przy zmianie kąta φ załączenia napięcia wartości udarowe prądu i momentu elektromagnetycznego mieszczą się między przebiegami pokazanymi na rysunkach 4 i 5.

Rzeczywiste przebiegi momentu elektromagnetycznego mogą być mniejsze, gdyż spadek napięcia na impedancjach sieci elektroenergetycznej, spowodowany przez prąd rozruchowy, obniża napięcie na zaciskach silnika, prąd udarowy zależy liniowo od napięcia, a moment elektromagnetyczny zależy od kwadratu napięcia. Obliczenia symulacyjne, których wyniki są podane na rysunkach 4 i 5, były przeprowadzone przy $U = \text{const}$.

Zgoła inne skutki dynamiczne wystąpią w czasie tak zwanych rozruchów przerywanych, gdy $(\Psi > 0, \omega_m > 0)$. Stany ekstremalne pod względem dynamicznym będą zależeć od aktualnego wzbudzenia silnika Ψ i aktualnej prędkości kątowej ω_m oraz kąta fazowego φ . Najbardziej niekorzystny stan wystąpi, gdy napięcie sieci i siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu twornika będą w przeciwfazie, to jest gdy przesunięcie fazowe między nimi będzie równe 180° .

Stany chwilowego zaniku napięcia w sieci elektroenergetycznej występują także w czasie pracy silnika, gdy nastąpi wyłączenie napięcia i ponowne szybkie załączenie, czas przerwy jest mały i strumień wzbudzenia Ψ nie zaniknie do zera i wirnik wiruje.

5. Podsumowanie

Silniki indukcyjne klatkowe dużej mocy w większości napędów elektrycznych pracują przy zasilaniu bezpośrednim z sieci elektroenergetycznej, pracują zatem jako napędy nieregulowane. Stany dynamiczne związane z:

- rozruchem;
 - wyłączeniem zasilania i powtórny załączeniem napięcia;
 - rewersją prędkości obrotowej
- oddziałują niekorzystnie na silnik, sieć elektroenergetyczną, na napędzaną maszynę roboczą i elementy przeniesienia napędu (wały, sprzęgła, przekładnie). A także na aparaturę łączeniową. Stany nieustalone silników indukcyjnych klatkowych w czasie rozruchu są dobrze rozpoznane tak pod względem dynamicznym, jak i cieplnym. Wartości udarowe prądu rozruchowego zawierają się w granicach $8,5I_N \leq I_{ud} \leq 11,3I_N$, a momentu rozruchowego $4,5T_N \leq T_{ud} \leq 8,5T_N$. Wymienione wartości udarowe występują przy załączeniu silnika do sieci, to jest przy prędkości obrotowej równej zero. Na wartości udarowe prądu i momentu nie ma wpływu moment obciążenia maszyny roboczej.

Problemy cieplne w czasie rozruchu silnika są związane z przegrzewaniem się uzwojenia klatkowego i nierównomiernym rozkładem temperatury w prętach. Problemy cieplne determinuje czas rozruchu, a więc moment bezwładności wprowadzony na wał silnika wszystkich mas w ruchu obrotowym i liniowym oraz moment obciążenia maszyny roboczej.

Silnik indukcyjny będzie pracował niezawodnie przez długie lata, jeśli konstrukcja wirnika będzie dostosowana do warunków rozruchowych stwarzanych przez maszynę roboczą. Wirnik dwuklatkowy z prętami okrągłymi wytrzymuje dużą liczbę rozruchów (nawet kilkadziesiąt tysięcy), których czas jest krótki (sekundy). Silniki z wirnikami głębokożłobkowymi mają znacznie dłuższy dopuszczalny czas rozruchu, lecz liczba rozruchów niszcząca uzwojenie wynosi kilka tysięcy.

Literatura

- [1] CLARKE E.: *Circuit Analysis of A. C. Power Systems. V. 1, 2*. New York, 1943, 1952.
- [2] GLINKA T.: *Dynamika silnika indukcyjnego i synchronicznego po wyłączeniu i ponownym załączeniu napięcia*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 113/2017.
- [3] GLINKA T.: *Maszyny elektryczne i transformatory*. PWN, Warszawa 2018.
- [4] KALUS M., SKOCZKOWSKI T.: *Sterowanie napędami asynchronicznymi i prądu stałego*. Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice 2003.
- [5] Казовский Е.Я.: *Переходные процессы в электрических машинах переменного тока*. Издательство Академии наук СССР, 1962.
- [6] PARK R.H.: *Two-reaction Theory of Synchronous Machines*. Trans. AIEE. Part I, v. 48, 1929, str 716; part II v. 52. 1933, s. 352.
- [7] PASZEK W.: *Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. WNT, Warszawa 1986.
- [8] PUCHAŁA A.: *Dynamika maszyn i układów elektromechanicznych*. PWN, Warszawa 1977.
- [9] PUCHAŁA A.: *Elektromechaniczne przetworniki energii*. Wyd. BOBRME KOMEL, Katowice 2002.
- [10] PUCHAŁA A., NOGA M., GOŁĘBIEWSKI L.: *Zbiór zadań z dynamiki układów elektromechanicznych*. PWN, Warszawa 1979.

artykuł recenzowany

Tadeusz Glinka – Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL