

doi:10.15199/48.2016.12.08

Model matematyczny napędu synchronicznego o podatnej transmisji ruchu w fizycznych współrzędnych prądów (A-model)

Streszczenie. W pracy, na podstawie uogólnionej interdyscyplinarnej metody wykorzystującej modyfikację zasady Hamiltona z uwzględnieniem rozszerzenia funkcji Lagrange'a sformulowano model matematyczny układu napędowego z silnikiem synchronicznym o biegunach jawnych we współrzędnych fizycznych prądów. Wał napędowy rozpatrywano jako podatny sprężysto-dysypacyjny układ transmisji ruchu. Równania elektromechanicznego stanu przedstawiono w postaci Cauchy'ego. Na podstawie sformułowanego modelu przeprowadzono obliczenia numeryczne. Wyniki symulacji komputerowych przedstawiono w postaci graficznej.

Abstract. In the paper the mathematical model of a salient pole synchronous motor-based drive system is presented. The model was formulated for the current reference frame on the basis of the generalized interdisciplinary method that uses a modification of Hamilton's principle including extending function of Lagrange. The transmission shaft is considered as an elastic and dissipative transmission system of mechanical power. The equations of electromechanical state are given in Cauchy form. The numerical calculations based on the formulated mathematical model were carried out. The results of computer simulations are presented as time dependencies. (**Mathematical model of synchronous motor-based drive with a susceptible transmission of mechanical power**)

Słowa kluczowe: zasada Hamiltona-Ostrogradskiego, Euler-Lagrange'a system, zespół elektryczny, silnik synchroniczny

Keywords: Hamilton-Ostrogradsky's principle, Euler-Lagrange's system, electrical set, synchronous motor

Wstęp

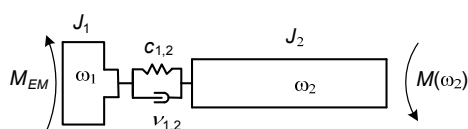
Napędy elektryczne z silnikami synchronicznymi są szeroko wykorzystywane w przemysłowych układach napędowych przede wszystkim w przemyśle chemicznym, przetwórczym i hutniczym. Zastosowanie tych napędów nie jest tak powszechne, jak układów z silnikami indukcyjnymi, jednak stosowane są wszędzie tam, gdzie konieczne jest zachowanie stałej prędkości w procesie technologicznym, niezależnie od obciążenia i innych warunków zewnętrznych.

W niniejszej pracy przedstawiono model matematyczny układu napędowego z silnikiem synchronicznym, który poprzez sprężysto-dysypacyjny wał napędowy jest obciążony zadaniem momentem obciążenia. Do sformułowania modelu matematycznego analizowanego układu napędowego wykorzystano interdyscyplinarną metodą wariacyjną, która opiera się na modyfikacji integralnej wariacyjnej zasady Hamiltona-Ostrogradskiego, poprzez wykorzystanie rozszerzenia funkcji Lagrange'a o dwa dodatkowe składniki [1]. Pierwszy składnik uwzględnia rozproszenie energii w układzie oraz drugi – uwzględnia energię sił aktywnych i pasywnych o charakterze niepotencjalnym. [1, 2, 4].

Model matematyczny układu.

Modelu zespołu elektrycznego, który składa się ze źródła energii nieskończonej mocy oraz silnika synchronicznego o podatnej transmisji ruchu sformulowano drogą formowania elementów zmodyfikowanego lagrangianu [2]. Równania ekstremali tego funkcjonału przedstawiają model matematycznym analizowanego elektromechanicznego układu napędowego [1].

Na rysunku 1 przedstawiono obliczeniowy schemat analizowanego obiektu.



Rys. 1. Schemat układu napędowego z silnikiem synchronicznym

Zmodyfikowana funkcja Lagrange'a przedstawiona jest następującą zależnością [1, 4]:

$$(1) \quad L^* = \tilde{T}^* - P^* + \Phi^* - D^*,$$

gdzie L^* – zmodyfikowana funkcja Lagrange'a, \tilde{T}^* – koenergia kinetyczna, P^* – energia potencjalna, Φ^* – energia dysypacji, D^* – energia sił zewnętrznych [1, 2].

W jakości uogólnionych współrzędnych wykorzystano ładunki w uzwojeniach (stojana i wirnika) silnika synchronicznego, dla stojana: $q_{1-3} = Q_{SA}, Q_{SB}, Q_{SC}$ i dla wirnika: $q_{4-6} = Q_D, Q_Q, Q_f$, a także kąty obrotu wirnika oraz jednostek inercyjnych napędu: $q_{7,8} = \gamma_1, \gamma_2$. A w jakości uogólnionych współrzędnych odpowiednio prądy w wymienionych uzwojeniach oraz prędkości kątowe jednostek inercyjnych: $\dot{q}_{1-3} = i_{SA}, i_{SB}, i_{SC}$, $\dot{q}_{4-6} = i_D, i_Q, i_f$, $\dot{q}_{7,8} = \omega_1, \omega_2$. Elementy zmodyfikowanego lagrangianu dla układu elektromechanicznego przedstawionego na rysunku 1 opisane są następującymi zależnościami:

$$(2) \quad \tilde{T}^* = \tilde{T}_E^* + \tilde{T}_M^* = \left[\sum_{j=1}^3 \int_0^{i_{Sj}} \Psi_{Sj} di_{Sj} + \sum_{m=1}^3 \int_0^{i_m} \Psi_m di_m \right] + \left[\frac{J_1 \omega_1^2}{2} + \frac{J_2 \omega_2^2}{2} \right],$$

$$P^* = \frac{c_{1,2}(\gamma_2 - \gamma_1)^2}{2}, \quad \Phi^* = \sum_{j=1}^3 \int_0^t \frac{1}{2} r_{Sj} i_{Sj}^2 d\tau + \sum_{m=1}^3 \int_0^t \frac{1}{2} r_m i_m^2 d\tau +$$

$$+ \int_0^t \frac{v_{1,2}(\omega_2 - \omega_1)^2}{2} \Big|_{t=\tau} d\tau, \quad D^* = \sum_{j=1}^3 \int_0^t u_{Sj} i_{Sj} d\tau + \int_0^t u_f i_f d\tau -$$

$$- \int_0^t \int_0^{\omega_2} M(\omega_2) d\omega_2 \Big|_{t=\tau} d\tau, \quad j = A, B, C, m = D, Q, f,$$

gdzie: Ψ_1, Ψ_2 – strumienie skojarzone; r z indeksami S,R,f,D,Q – rezystancje uzwojeń maszyny; M_{EM} – moment elektromagnetyczny silnika, $M(\omega_2)$ – moment obciążenia silnika.

Podstawiając wyrażenia (2) do zależności (1) i wyznaczono funkcjonał działania wg Hamiltona-Ostrogradskiego [1]. Następnie obliczono wariacje tego funkcjonału i dla

uzyskania poszukiwanych równań modelu matematycznego przyrównano je do zera. Uwzględniając zależność:

$$(3) \quad M_{EM} = \frac{\partial \tilde{T}_E^*}{\partial \gamma}.$$

otrzymano równania ekstremali funkcjonału. Innymi słowami, uzyskano równania Eulera-Lagrange'a (model Ψ - typu) [1, 2].

$$(4) \quad \frac{d\Psi_{Sj}}{dt} + r_S i_{Sj} - u_{Sj} = 0, \quad \frac{d\Psi_m}{dt} + r_m i_m - u_m = 0, \quad u_D, u_Q \equiv 0$$

$$(5) \quad \frac{dQ_{Sj}}{dt} = i_{Sj}, \quad \frac{dQ_m}{dt} = i_m, \quad j = A, B, C, \quad m = D, Q, f;$$

$$(6) \quad \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{1}{J_1} (M_{EM} + c_{1,2}(\gamma_2 - \gamma_1) + v_{1,2}(\omega_2 - \omega_1));$$

$$(7) \quad \frac{d\omega_2}{dt} = -\frac{1}{J_2} (c_{1,2}(\gamma_2 - \gamma_1) + v_{1,2}(\omega_2 - \omega_1) + M(\omega_2));$$

$$(8) \quad \frac{d\gamma_1}{dt} = \omega_1, \quad \frac{d\gamma_2}{dt} = \omega_2.$$

Dla wyrażen (4), (5) równania stacjonarnych powiązań opisane są następującymi równaniami[5]:

$$(9) \quad u_{SA} + u_{SB} + u_{SC} = 0, \quad \Psi_{SA} + \Psi_{SB} + \Psi_{SC} = 0, \\ i_{SA} + i_{SB} + i_{SC} = 0, \quad \Psi_{SA} + \Psi_{SB} + \Psi_{SC} = 0.$$

Strumienie skojarzone z odpowiednimi uzwojeniami w postaci wektorowej z uwzględnieniem równań powiązań (9) przedstawiają następującą zależność:

$$(10) \quad \frac{d\Psi_S}{dt} = \mathbf{u}_S - \mathbf{r}_S \mathbf{i}_S \Rightarrow \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{SA} \\ \Psi_{SB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{SA} & r_S & i_{SA} \\ u_{SB} & r_S & i_{SB} \end{bmatrix};$$

$$(11) \quad \frac{d\Psi_R}{dt} = \mathbf{u}_R - \mathbf{r}_R \mathbf{i}_R \Rightarrow \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_D \\ \Psi_Q \\ \Psi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_D & & i_D \\ & r_Q & i_Q \\ u_f & r_f & i_f \end{bmatrix}.$$

Równania powiązań między pełnymi i roboczymi strumieniami skojarzonymi maszyny [1] przedstawiono w następującej postaci:

$$(12) \quad \begin{bmatrix} \Psi_{SA} \\ \Psi_{SB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{\sigma S}^{-1} & & i_{SA} \\ & \alpha_{\sigma S}^{-1} & i_{SB} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{Sd} \\ \Psi_{Sq} \end{bmatrix}, \quad \Psi \equiv \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix};$$

$$(13) \quad \begin{bmatrix} \Psi_D \\ \Psi_Q \\ \Psi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_D^{-1} & & i_D \\ & \alpha_Q^{-1} & i_Q \\ & & \alpha_f^{-1} & i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & & \Psi_d \\ & 1 & \Psi_q \\ 1 & & \Psi_q \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} \equiv \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ 1 & & \end{bmatrix};$$

$$(14) \quad \Psi_R = \mathbf{B}\Psi, \quad \Psi_S = \mathbf{\Pi}^{-1}\Psi, \quad \mathbf{\Pi}\Psi_S \equiv \Psi_S^{\Pi}, \quad \mathbf{i}_R \equiv (i_D, i_Q, i_f)^T,$$

gdzie: Ψ – robocze strumienie skojarzone \mathbf{B} – macierz topologiczna, $\mathbf{\Pi}, \mathbf{\Pi}^{-1}$ – prosta i odwrotna macierz Parka [5]:

$$(15) \quad \mathbf{\Pi} \equiv \frac{2}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -\sin(p_0\gamma_1 - 120^\circ) & \sin(p_0\gamma_1) \\ -\cos(p_0\gamma_1 - 120^\circ) & \cos(p_0\gamma_1) \end{bmatrix};$$

$$(16) \quad \mathbf{\Pi}^{-1} \equiv \begin{bmatrix} \cos(p_0\gamma_1) & -\sin(p_0\gamma_1) \\ \cos(p_0\gamma_1 - 120^\circ) & -\sin(p_0\gamma_1 - 120^\circ) \end{bmatrix},$$

gdzie: p_0 – liczba par biegunów maszyny

Równanie powiązań między roboczym strumieniem skojarzonym oraz prądami maszyny opisuje zależność [5]:

$$(17) \quad \Psi = \mathbf{L}_m (\mathbf{\Pi} \mathbf{i}_S + \mathbf{B}^T \mathbf{i}_R), \quad \mathbf{i}_m = \mathbf{\Pi} \mathbf{i}_S + \mathbf{B}^T \mathbf{i}_R, \quad \mathbf{L}_m = \text{diag}(L_d, L_q).$$

Na podstawie literatury [1, 5] można zapisać:

$$(18) \quad \Psi = \mathbf{L}^* (\alpha_{\sigma S} \Psi_S^{\Pi} + \mathbf{B}^T \alpha_{\sigma R} \Psi_R), \quad \Psi_S^{\Pi} \equiv \mathbf{\Pi} \Psi_S,$$

gdzie [1]:

$$(19) \quad \mathbf{L}^* \equiv \text{diag} \left(\frac{L_d}{1 + L_d(\alpha_S + \alpha_D + \alpha_f)}, \frac{L_q}{1 + L_q(\alpha_S + \alpha_Q)} \right).$$

Następnie, z równania (4) z uwzględnieniem (18) otrzymano:

$$(20) \quad \frac{d\Psi_S}{dt} = \frac{d}{dt} (\mathbf{\Pi}^{-1} \mathbf{\Pi} \Psi_S) \equiv \frac{d}{dt} (\mathbf{\Pi}^{-1} \Psi_S^{\Pi}) = \\ = \frac{d\mathbf{\Pi}^{-1}}{dt} \mathbf{\Pi} \Psi_S + \mathbf{\Pi}^{-1} \frac{d\Psi_S^{\Pi}}{dt} = \mathbf{u}_S - \mathbf{r}_S \mathbf{i}_S.$$

Po dokonaniu przekształceń matematycznych otrzymano:

$$(21) \quad \frac{d\Psi_S^{\Pi}}{dt} = \mathbf{u}_S^{\Pi} - \mathbf{r}_S \mathbf{i}_S^{\Pi} - \mathbf{\Pi} \frac{d\mathbf{\Pi}^{-1}}{dt} \mathbf{\Pi} \Psi_S = \mathbf{\Pi} \mathbf{u}_S - \mathbf{\Pi} \mathbf{r}_S \mathbf{i}_S - \\ - \mathbf{\Pi} \mathbf{\Omega}_1 \Psi_S = \mathbf{\Pi} (\mathbf{u}_S - \mathbf{r}_S \mathbf{i}_S - \mathbf{\Omega}_1 \Psi_S), \quad \mathbf{\Omega}_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \mathbf{\Omega}_S,$$

gdzie: $\mathbf{\Omega}_S$ – opisana jest następującą zależnością [1, 2, 5]:

$$(22) \quad \mathbf{\Omega}_S \equiv \mathbf{\Pi} \frac{d\mathbf{\Pi}^{-1}}{dt} = -\frac{d\mathbf{\Pi}}{dt} \mathbf{\Pi}^{-1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{d\mathbf{\Pi}^{-1}}{dt} \mathbf{\Pi} = \\ = -\frac{\sqrt{3}}{2} \mathbf{\Pi}^{-1} \frac{d\mathbf{\Pi}}{dt} = p_0 \omega_1 \begin{bmatrix} & -1 \\ 1 & \end{bmatrix}.$$

Różniczkując równanie (18) po czasie otrzymano równanie (23):

$$(23) \quad \frac{d\Psi}{dt} = \mathbf{L}^* (\alpha_{\sigma S} \mathbf{\Pi} (\mathbf{u}_S - \mathbf{r}_S \mathbf{i}_S - \mathbf{\Omega}_1 \Psi_S) + \mathbf{B}^T \alpha_{\sigma R} (\mathbf{u}_R - \mathbf{r}_R \mathbf{i}_R)).$$

Równania powiązań między prądami maszyny oraz strumieniami skojarzonymi we współrzędnych Parka, uwzględniając także wyrażenia (12) – (16), przybierają postać:

$$(24) \quad \mathbf{i}_S^{\Pi} = \alpha_{\sigma S} (\Psi_S^{\Pi} - \Psi), \quad \mathbf{i}_R = \alpha_{\sigma R} (\Psi_R - \mathbf{B}\Psi), \quad \mathbf{i}_S^{\Pi} \equiv \mathbf{\Pi} \mathbf{i}_S.$$

Różniczkując po czasie zależność (24) otrzymano:

$$(25) \quad \frac{d\mathbf{i}_S^{\Pi}}{dt} = \alpha_{\sigma S} \left(\frac{d\Psi_S^{\Pi}}{dt} - \frac{d\Psi}{dt} \right), \quad \frac{d\mathbf{i}_R}{dt} = \alpha_{\sigma R} \left(\frac{d\Psi_R}{dt} - \mathbf{B} \frac{d\Psi}{dt} \right),$$

oraz uwzględniając równania (4), (21):

$$(26) \quad \frac{d\mathbf{i}_S^{\Pi}}{dt} = \alpha_{\sigma S} \left(\mathbf{\Pi} (\mathbf{u}_S - \mathbf{r}_S \mathbf{i}_S - \mathbf{\Omega}_1 \Psi_S) - \frac{d\Psi}{dt} \right);$$

$$(27) \quad \frac{d\mathbf{i}_R}{dt} = \alpha_{\sigma R} \left(\mathbf{u}_R - \mathbf{r}_R \mathbf{i}_R - \mathbf{B} \frac{d\Psi}{dt} \right).$$

Przekształcając zależność (26) otrzymano:

$$(28) \quad \frac{d\mathbf{i}_S^\Pi}{dt} \equiv \frac{d}{dt}(\mathbf{\Pi}\mathbf{i}_S) = \frac{d\mathbf{\Pi}}{dt}\mathbf{i}_S + \mathbf{\Pi}\frac{d\mathbf{i}_S}{dt},$$

mnożąc (28) przez odwrotną macierz Parka $\mathbf{\Pi}^{-1}$:

$$(29) \quad \frac{d\mathbf{i}_S}{dt} = \mathbf{\Pi}^{-1}\frac{d\mathbf{i}_S^\Pi}{dt} - \mathbf{\Pi}^{-1}\frac{d\mathbf{\Pi}}{dt}\mathbf{i}_S = \mathbf{\Pi}^{-1}\frac{d\mathbf{i}_S^\Pi}{dt} + \mathbf{\Omega}_1\mathbf{i}_S.$$

Rozwiązując razem równania (22) – (29) uzyskano ostatecznie zależności modelu matematycznego we współrzędnych prądów

$$(30) \quad \frac{d\mathbf{i}_S}{dt} = \mathbf{A}_S(\mathbf{u}_S - \mathbf{r}_S\mathbf{i}_S - \mathbf{\Omega}_1\mathbf{\Psi}_S) + \mathbf{A}_{SR}(\mathbf{u}_R - \mathbf{r}_R\mathbf{i}_R) + \mathbf{\Omega}_1\mathbf{i}_S;$$

$$(31) \quad \frac{d\mathbf{i}_R}{dt} = \mathbf{A}_{RS}(\mathbf{u}_S - \mathbf{r}_S\mathbf{i}_S - \mathbf{\Omega}_1\mathbf{\Psi}_S) + \mathbf{A}_R(\mathbf{u}_R - \mathbf{r}_R\mathbf{i}_R),$$

gdzie: macierze \mathbf{A} , zależące od indukcyjności maszyny z uwzględnieniem przekształceń Parka (15), (16) opisane są zależnościami:

$$(32) \quad \mathbf{A}_S = \mathbf{a}_{\sigma S}\mathbf{\Pi}^{-1}(\mathbf{1} - \mathbf{L}^*\mathbf{a}_{\sigma S})\mathbf{\Pi}, \quad \mathbf{A}_{SR} = -\mathbf{a}_{\sigma S}\mathbf{\Pi}^{-1}\mathbf{L}^*\mathbf{B}^T\mathbf{a}_{\sigma R};$$

$$(33) \quad \mathbf{A}_{RS} = -\mathbf{a}_{\sigma R}\mathbf{B}\mathbf{L}^*\mathbf{a}_{\sigma S}\mathbf{\Pi}, \quad \mathbf{A}_R = \mathbf{a}_{\sigma R}(\mathbf{1} - \mathbf{B}\mathbf{L}^*\mathbf{B}^T\mathbf{a}_{\sigma R}).$$

Strumienie skojarzone wyznaczono z równań stacjonarnych powiązań między strumieniami skojarzonymi oraz prądami (14), (17):

$$(34) \quad \mathbf{\Psi}_S = \mathbf{L}_{\sigma S}\mathbf{i}_S + \mathbf{\Pi}^{-1}\mathbf{\Psi} = \mathbf{L}_{\sigma S}\mathbf{i}_S + \mathbf{\Pi}^{-1}\mathbf{L}_m(\mathbf{\Pi}\mathbf{i}_S + \mathbf{B}^T\mathbf{i}_R).$$

Moment elektromagnetyczny silnika (M_{EM}) można zapisać równaniem [5]:

$$(35) \quad M_{EM} = \sqrt{3}p_0(\Psi_{SB}i_{SA} - \Psi_{SA}i_{SB}).$$

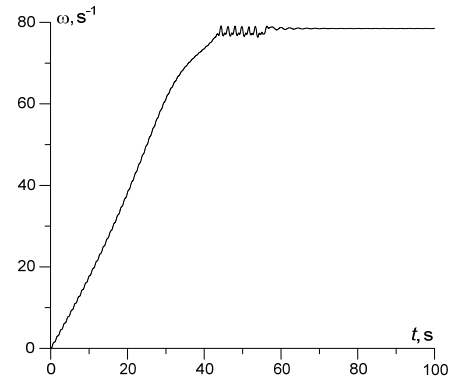
Wspólnemu całkowaniu podlega układ równań różniczkowych: (6) – (8), (30), (31) z wrachowaniem wyrażen (15), (16), (19), (22), (32) – (35).

Wyniki symulacji komputerowej.

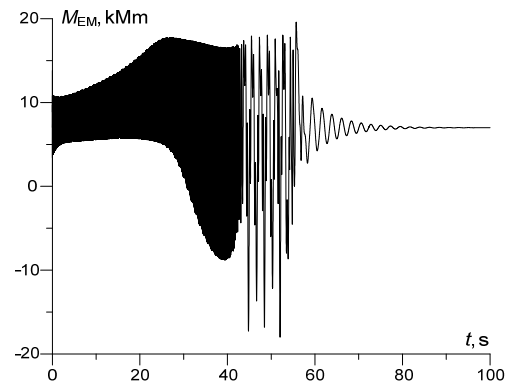
Do obliczeń numerycznych przyjęto następujące dane elementów układu napędowego z rysunku 1: silnik synchroniczny z aktywnym momentem na wale wirnika $P_N = 630$ kW, $n_N = 750$ ob/min; $U_N = 6$ kV; $u_f = 42$ V, $J_1 = 1700$ N·m², moment obciążenia silnika $M(\omega_2) = 7$ kN·m., moment bezwładności mechanizmu $J_2 = 3500$ N·m². Współczynniki sztywności i dyssypacji $c_{1,2} = 50$ kN·m, $v_{1,2} = 40$ N·m·s. Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla następujących przedziałów czasowych: rozruch silnika napędowego bez obciążenia razem z ruchomą masą przyłączoną przez sprzęgło elastyczne do prędkości podsynchronicznej od 0 do 45s. Następnie, uzwojenie wirnika zostało podłączone do źródła energii prądu stałego. Razem z tym, silnik został obciążony przez znamionowe obciążenie. Całkowania równań stanu układu dokonano się przy pomocy metody Runge-Kutta 4 rzędu.

Na rysunku 2 przedstawiono przebieg czasowy prędkości kątowej w układzie transmisji ruchu na obciążeniu. Analizując przebieg pokazany na rysunku można zauważyć następujące stany pracy układu:

1. Rozruch silnika do prędkości podsynchronicznej ok. $t = 45$ s. Podczas rozruchu praktycznie nie widać oscylacji funkcji, co jest spowodowane bardzo wielkimi momentami bezwładności obu mas.

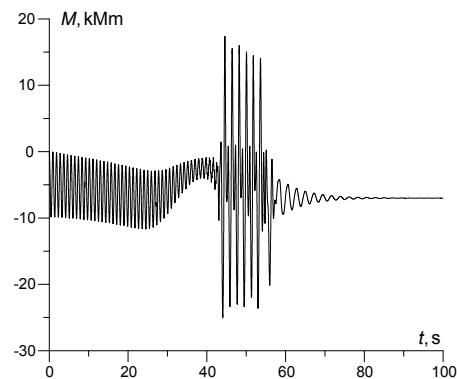


Rys. 2. Przebieg czasowy prędkości kątowej w układzie transmisji ruchu



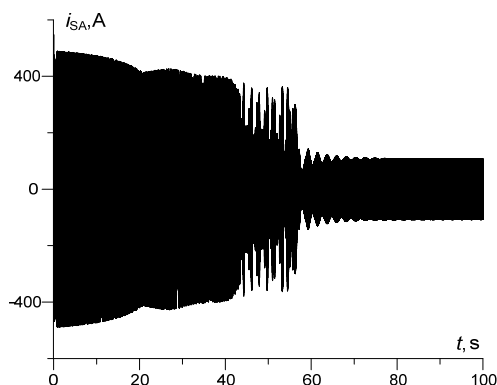
Rys. 3. Przebieg czasowy momentu elektromagnetycznego silnika synchronicznego dla analizowanego przypadku obliczeniowego

2. Po podłączeniu energii prądu stałego na uzwojenie wirnika oraz jednocześnie włączeniu znamionowego obciążenia pojawiają się istotne oscylacje prędkości.
3. Stan ustalony, dzięki dyssypacji energii, prędkość kątowa napędzanej masy ustala się ok. $t = 70$ s.

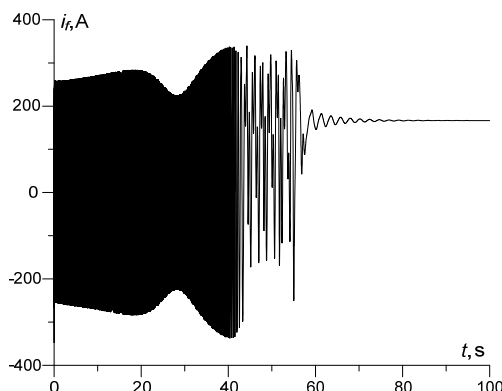


Rys. 4. Przebieg czasowy momentu sprężystości w sprzęgle elastycznym układu napędowego

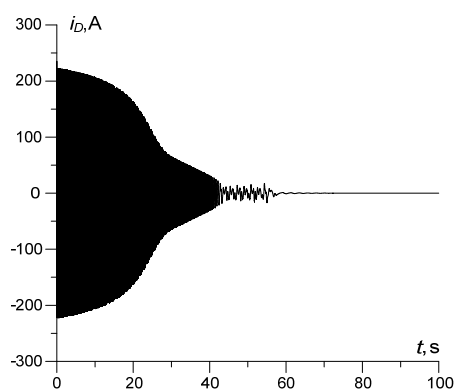
Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono przebiegi czasowe momentu elektromagnetycznego silnika synchronicznego oraz sprężystości w sprzęgle elastycznym na wale maszyny dla analizowanego przypadku obliczeniowego. Wymienione powyżej procesy tutaj także są obserwowane. Wybrane do symulacji parametry sprzęgła są niekorzystne. Moment sprężystości podczas wprowadzania maszyny w synchronizm zwiększył się 3,5 krotnie w stosunku do początkowego. W stanie ustalonym oba momenty są jednakowe co do wielkości ale o przeciwnych znakach.



Rys. 5. Przebieg czasowy prądu fazy A stojana silnika synchronicznego



Rys. 6. Przebieg czasowy prądu w uzwojeniu wzbudzenia wirnika



Rys. 7. Przebieg czasowy prądu w osi d w uzwojeniu tłumiącym wirnika

Na rysunkach 5 do 7 przedstawiono przebiegi czasowe następujących prądów silnika: fazy A stojana, w uzwojeniu wzbudzenia wirnika maszyny synchronicznej, w uzwojeniu rozruchowym wirnika maszyny w osi d . W porównaniu z poprzednimi rysunkami tutaj także widoczne są opisane powyżej procesy występujące w kolejnych stanach pracy układu napędowego. Analizując te rysunki można zauważyć skomplikowane procesy zachodzące podczas elektromechanicznego przetworzenia energii w układzie

napędowym z silnikiem synchronicznym. Oddziaływanie poprzez przekazywanie energii z pola elektromagnetycznego przez silnik polu mechanicznemu prowadzi do wykonywania pracy.

Wnioski

Modele matematyczne elektrycznych układów napędowych z silnikami synchronicznymi w fizycznych współrzędnych prądów istotnie rozszerzają wykorzystanie tych modeli do analizy skomplikowanych zespołów elektrycznych, unikając dodatkowych przekształceń. Na podstawie wyników przeprowadzonych symulacji komputerowych można wyciągnąć następujące wnioski:

- dla napędu synchronicznego o podatnej linii transmisji ruchu najbardziej niebezpieczny jest stan wprowadzenia maszyny w synchronizm,
- uderzeniowe prądy stojana maszyny powodują oscylacje momentu elektromagnetycznego, a to prowadzi do generowania wielkich momentów sprężystości w sprzęgle elastycznym, co może spowodować jego uszkodzenie.

Autorzy: dr hab. inż. Andriy Czaban prof. PCz, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, e-mail: atchaban@gmail.com, dr. hab. inż. Marek Lis prof. PCz., Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, e-mail: lism@el.pcz.czest.pl, mgr inż. Marcjjan Nowak Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny al. Armii Krajowej 17, e-mail: marcjjan124@wp.pl, mgr inż. Karol Klatow Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny al. Armii Krajowej 17, e-mail: karolklatow@gmail.com, mgr inż. Marek Patro Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny al. Armii Krajowej 17.

LITERATURA

- [1] Czaban A., Modelowanie matematyczne procesów oscylacyjnych systemów elektromechanicznych. (Wydanie drugie, zmienione i uzupełnione). – Lwów 2008.
- [2] Lis M. Modelowanie matematyczne procesów niestabilnych w elektrycznych układach napędowych o złożonej transmisji ruchu. Częstochowa. – W-wo Politechniki Częstochowskiej, 2013
- [3] A. Rusek Stany dynamiczne układów napędowych z silnikami indukcyjnymi specjalnego wykorzystania. Monografia. W-wo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2012
- [4] White D.C., Woodson H.H. Electromagnetic Energy Conversion, New-York, John Wiley & Sons, Inc, 1958
- [5] Чабан В. И. Методы анализа электромеханических систем. - Львов: Вища школа, 1985
- [6] Czaban A., Modelowanie matematyczne procesów oscylacyjnych systemów elektromechanicznych. (Wydanie drugie, zmienione i uzupełnione). – Lwów 2008
- [7] Rusek A., Czaban A., Lis M., A Mathematical Model of a Synchronous Drive with Protrude Poles, An Analysis Using Variational Methods. SAEM'12. Digest Book of the 4th Symposium on Applied Electromagnetics. Ed. Miklos Kuczmann. June 3-6, 2012, Sopron, Hungary. 79-80
- [8] Puchała A., Elektromechaniczne przetworniki energii, BOBRME Komel, Katowice 2002
- [9] Szewczyk K., Golisz R., Walasek T., Kucharczyk Z., The influence of an air gap around the permanent magnets with the flux concentrator in Permanent Magnet Synchronous Motor with Internal Magnetic Circuits, Zastosowania Elektromagnetyzmu w Nowoczesnych Technikach i Informatyce. XXI Sympozjum Środowiskowe PTZE. 5-8 czerwca 2011. Lubliniec