

doi:10.15199/48.2019.08.06

Analiza procesów nieustalonych w układzie napędowym z pompami pionowymi o podatnej transmisji ruchu

Streszczenie. Na podstawie opracowanego modelu matematycznego dokonano analizy procesów przejściowych w układzie napędowym składającym się z transformatora mocy, asynchronicznych i synchronicznych napędów pompowych z podatną transmisją ruchu. Układ zasilania silników uwzględnia dodatkowe obciążenie rezystancyjno-indukcyjne sieci elektroenergetycznej. Model obiektu oparty jest na zmodyfikowanej zasadzie Hamiltona-Ostrogradskiego. Wyniki symulacji komputerowej przedstawiono w postaci rysunków.

Abstract. On the basis of the mathematical model developed, the analysis of transient processes in a drive system consisting of a power transformer, asynchronous and synchronous pumping drives with susceptible motion transmission was performed. The motor supply system takes into account the additional resistive-inductive load of the power network. The object's model is based on the modified Hamilton-Ostrogradski principle. The results of the computer simulation are presented in the form of drawings. (*Analysis of transient processes in a drive system with vertical pumps of susceptible motion transmission*).

Słowa kluczowe: układ trójmasowy, modelowanie interdyscyplinarne, zasada Hamiltona-Ostrogradskiego, elektromechaniczne przetwarzanie energii, pionowa pompa, napęd elektryczny, podatna transmisja ruchu.

Keywords: three-mass system, interdisciplinary modeling, Hamilton-Ostrogradski principle, electromechanical energy conversion, vertical pump, electric drive, flexible transmission of traffic.

Wstęp

Analiza nieustalonych elektromechanicznych procesów oscylacyjnych w złożonych systemach dynamicznych przetwarzania energii jest ważnym aktualnym problemem elektrotechniki stosowanej. Tradycyjne schematy zasilania dla napędów elektrycznych o dużej i średniej mocy są od dawna znane, natomiast w przypadku szczegółowym elektromechaniczne przetwarzania energii jest analizowane w różnych aplikacjach [1-4]. Dlatego każdy konkretny układ napędowy powinien być analizowany za pomocą odpowiedniego modelu matematycznego. Jest całkiem oczywiste, że dokładność charakterystyk elektromechanicznych i elektrycznych układu napędowego zależy od stopnia adekwatności zastosowanych modeli.

Tworzenie modeli matematycznych układów napędowych zwłaszcza średniej i dużej mocy zawierają bardzo złożone transmisje ruchu, które zawierają długie wały, różne sprzęgła elastyczne, przekładnie mechaniczne. Wykorzystanie takiej transmisji w jednym modelu matematycznym wymaga zastosowania skomplikowanego aparatu mechaniki stosowanej, opartego na teorii Lagrange'a z wykorzystaniem metod mechaniki analitycznej dla układów dyskretnych, a czasami systemów ciągłych. Należy zauważyć, że nie zawsze jest możliwe z wystarczającą dokładnością określić momenty obciążenia układów napędowych w postaci zaproksymowanych zależności. W takich przypadkach należy stworzyć nowe modele matematyczne uwzględniające rzeczywiste momenty obciążenia badanych napędów elektrycznych.

W niniejszej pracy analizowane są stany nieustalone procesów elektromechanicznych w elektrycznym układzie napędowym, składającym się z N pompowych napędów asynchronicznych i M pompowych napędów synchronicznych, a także dodatkowego obciążenia zespołu, które reprezentowane jest przez gałąź obciążenia o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym. Zakłada się, że wymienione elementy układu napędowego zasilane są przez uzwojenie wtórne transformatora o nieskończonej mocy.

Analiza układu napędowego wymaga zastosowania modelowania matematycznego złożonego układu dynamicznego, składającego się z trzech podsystemów: elektrycznego, mechanicznego i hydraulicznego. Oznacza to, że opracowanie adekwatnego modelu układu

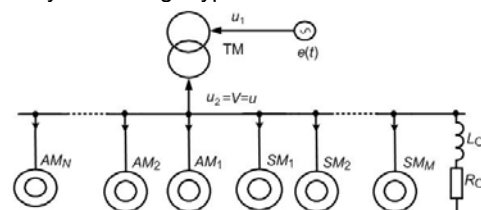
napędowego wymusza uwzględnienie trzech dziedzin nauki: elektrotechniki, mechaniki stosowanej i hydrodynamiki. Aby rozwiązać ten problem, autor, który tworzy taki model musi posiadać specjalistyczną wiedzę z trzech dyscyplin naukowych.

Opracowanie modelu układu napędowego można zrealizować innym sposobem poprzez zastosowanie uniwersalnego podejścia. W tej pracy do analizy procesów nieustalonych w skomplikowanym układzie napędowym wykorzystano interdyscyplinarną metodę modelowania matematycznego opartą na zmodyfikowanej integralnej zasadzie wariacyjnej Hamiltona-Ostrogradskiego, drogą rozszerzenia funkcji Lagrange'a [1], [5-10].

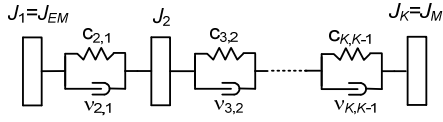
Celem pracy jest analiza procesów nieustalonych w elektromechanicznym układzie napędowym, składającym się z asynchronicznych i synchronicznych napędów elektrycznych z podatnymi transmisjami ruchu w oparciu o opracowany model matematyczny obiektu. Dla realizacji tego celu wykorzystano uogólnioną interdyscyplinarną metodę modelowania matematycznego opartą na zmodyfikowanej integralnej zasadzie wariacyjnej Hamiltona-Ostrogradskiego.

Model matematyczny układu

Schemat elektryczny badanego układu przedstawiony jest na rysunku 1. Podatna transmisja ruchu każdego napędu elektrycznego w przypadku ogólnym przedstawiana jest, jako wielomasowy system sprężysto - dysypacyjny, który składa się z K -tej liczby inercyjnych jednostek - rysunek 2. W takim przypadku nie musimy stosować metod skomplikowanego aparatu mechaniki analitycznej systemów ciągłych, co eliminuje konieczność wyznaczenia warunków brzegowych w skomplikowanych równaniach różniczkowych falowego typu.



Rys.1. Schemat elektryczny badanego układu



Rys.2. Podatna transmisja ruchu

Model matematyczny układu napędowego przedstawionego na rysunkach 1, 2 tworzymy wykorzystując rozszerzoną funkcję Lagrange'a. Wprowadzamy uogólnione współrzędne dla układu holonomicznego przedstawionego na rysunkach 1, 2:

- transformator mocy: $q_{(1-6)} = Q_{1A}, Q_{1B}, Q_{1C}, Q_{2A}, Q_{2B}, Q_{2C}$ – ładunki w uzwojeniach (A, B, C – fazy prądu);
- silniki asynchroniczne: $q_{(7-12),n} = Q_{SA,n}, Q_{SB,n}, Q_{SC,n}, Q_{RA,n}, Q_{RB,n}, Q_{RC,n}$ – ładunki w uzwojeniach (S – stojan, R – wirnik);
- silniki asynchroniczne: $q_{(13-18),m} = Q_{SA,m}, Q_{SB,m}, Q_{SC,m}, Q_{RD,m}, Q_{RQ,m}, Q_{Rf,m}$ – ładunki w uzwojeniach (D – uzwojenie tłumiące za osią d, Q – uzwojenie tłumiące za osią q, f – uzwojenie wzbudzenia);
- podatna transmisja ruchu: $q_{(k+18),n} = \gamma_{k,n}, q_{(k+18),m} = \gamma_{k,m}$ – kąty powrotu inercyjnych jednostek transmisji ruchu obu napędów;
- pompa pionowa: $q_{(K+18),n} = V_n, q_{(K+18),m} = V_m$ – objętość wody.

Wyznaczamy również odpowiednie uogólnione wartości:

- $q_{(1-6)}, q_{(7-12),n}, q_{(13-18),m} = i_{p,q}$ – prądy w odpowiednich uzwojeniach,
- $\dot{q}_{(k+18),n} = \omega_{k,n}, \dot{q}_{(k+18),m} = \omega_{k,m}$ – prędkości wirowania odpowiednich jednostek inercyjnych,
- $q_{K+18,n} = Q_{\Sigma,n}, q_{K+18,m} = Q_{\Sigma,m}$ – wydajność pomp,
- n – dotyczy napędów asynchronicznych, m – synchronicznych.

Równanie (1) określa funkcjonal działania według zasady Hamiltona-Ostrogradskiego (S), a także niezbędne warunki ekstremum wymienionego funkcjonału ($\delta S = 0$)

$$(1) \quad S = \int_{t_1}^{t_2} L^* dt, \quad \delta S = \delta \int_{t_1}^{t_2} L^* dt = \int_{t_1}^{t_2} \delta L^* dt = 0,$$

gdzie rozszerzony lagrangian określony jest równaniem [1]:

$$(2) \quad L^* = \tilde{T}^* - P^* + \Phi^* - D^*,$$

gdzie: L^* – rozszerzona funkcja Lagrange'a, \tilde{T}^* – koenergia kinetyczna, P^* – energia potencjalna, Φ^* – energia rozproszenia, D^* – energia sił zewnętrznych [1]. Elementy lagrangianu (2) wyznacza się z równań (3) – (6):

$$(3) \quad \tilde{T}^* \equiv \tilde{T}_{TM}^* + \sum_{i=1}^{N+M} \tilde{T}_{A(S)M,i}^* + \sum_{i=1}^{N+M} \tilde{T}_{Tr,i}^* + \sum_{i=1}^{N+M} \tilde{T}_{P,i}^* + T_O =$$

$$= \sum_{j=1}^3 \left\{ \int_0^{i_{1j}} \Psi_{1j} di_{1j} + \int_0^{i_{2j}} \Psi_{2j} di_{2j} \right\} + \sum_{n=1}^N \left\{ \sum_{j=1}^3 \int_0^{i_{Sj,n}} \Psi_{Sj,n} di_{Sj,n} + \right.$$

$$\left. + \sum_{j=1}^3 \int_0^{i_{Rj,n}} \Psi_{Rj,n} di_{Rj,n} + \sum_{k=1}^K \frac{J_{k,n} \omega_{k,n}^2}{2} + \frac{L_{\Sigma,n} Q_{\Sigma,n}^2}{2} \right\} +$$

$$+ \sum_{m=1}^M \left\{ \sum_{j=1}^3 \int_0^{i_{Sj,m}} \Psi_{Sj,m} di_{Sj,m} + \sum_{p=1}^3 \int_0^{i_{Rp,m}} \Psi_{Rp,m} di_{Rp,m} + \right.$$

$$+ \sum_{k=1}^K \frac{J_{k,m} \omega_{k,m}^2}{2} + \frac{L_{\Sigma,m} Q_{\Sigma,m}^2}{2} \left. \right\} + \frac{L_O i_O^2}{2};$$

$$(4) \quad P^* = \sum_{k=2}^K \left(\sum_{n=1}^N \frac{c_{k,k-1,n} (\gamma_{k,n} - \gamma_{k-1,n})}{2} + \sum_{m=1}^M \frac{c_{k,k-1,m} (\gamma_{k,m} - \gamma_{k-1,m})}{2} \right);$$

$$(5) \quad \Phi^* = \sum_{j=1}^3 \left\{ \int_0^t r_{1j}^2 d\tau + \int_0^t r_{2j}^2 d\tau \right\} + \sum_{n=1}^N \left\{ \sum_{j=1}^3 \int_0^t r_{Sj,n}^2 d\tau + \sum_{j=1}^3 \int_0^t r_{Rj,n}^2 d\tau + \sum_{k=2}^K \frac{v_{k,k-1,n} (\omega_{k,n} - \omega_{k-1,n})}{2} + \frac{1}{2} \int_0^t R_{\Sigma,n} Q_{\Sigma,n}^2 d\tau \right\} +$$

$$+ \sum_{m=1}^M \left\{ \sum_{j=1}^3 \int_0^t r_{Sj,m}^2 d\tau + \sum_{p=1}^3 \int_0^t r_{Rp,m}^2 d\tau + \sum_{k=2}^K \frac{v_{k,k-1,m} (\omega_{k,m} - \omega_{k-1,m})}{2} + \frac{1}{2} \int_0^t R_{\Sigma,m} Q_{\Sigma,m}^2 d\tau \right\} + \frac{1}{2} \int_0^t R_O i_O^2 d\tau;$$

$$(6) \quad D^* = \int_0^t \left(u_A i_{1A} + u_B i_{1B} + u_C i_{1C} + \sum_{m=1}^M u_j i_{jf} \right) d\tau$$

$$j = A, B, C, p = D, Q, f,$$

gdzie indeksy oznaczają: TM – transformator mocy, AM – silnik asynchroniczny, SM – silnik synchroniczny, Tr – podatna transmisja ruchu, P – pompa pionowa, O – obciążenie, Ψ – strumienie skojarzone, r – oporności uzwojeń transformatora i silników, u – napięcie zasilania węzła obciążenia, c, v – współczynniki sztywności i rozproszenia wału.

Przyjmujemy następujące założenia [1], [9]:

$$(7) \quad M_{EM,nm} = \frac{\partial [\tilde{T}_{EM}^*]}{\partial \gamma_{nm}}, \quad \rho g (H_\Gamma - H_0)_{nm} = \frac{\partial [\tilde{T}_\Sigma^*]}{\partial V_{nm}},$$

gdzie: M_{EM} – moment elektromagnetyczny silników, ρ – gęstość płynu, g – przyspieszenie ziemskie, H_g – geometryczna wysokość podnoszenia płynu.

Następnie tworzymy na podstawie wyrażań (3) – (6), rozszerzoną funkcję Lagrange'a (2) zawartą w równaniu (1). Uwzględniając równania (7), uzyskujemy równanie Eulera-Lagrange'a dla układu dynamicznego przedstawionego na rysunkach 1, 2.

Z metodyką uzyskania równań podobnego typu można zapoznać się w artykułach [1], [5-7]. Dlatego biorąc pod uwagę teorię przekształceń matematycznych modeli: z modelu Ψ na model A otrzymamy równania w postaci macierzowo-wektorowej:

$$(8) \quad \frac{d\mathbf{i}_1}{dt} = \mathbf{A}_{11}(\mathbf{u}_1 - \mathbf{r}_1 \mathbf{i}_1) + \mathbf{A}_{12}(\mathbf{V} - \mathbf{r}_2 \mathbf{i}_2);$$

$$(9) \quad \frac{d\mathbf{i}_2}{dt} = \mathbf{A}_{21}(\mathbf{u}_1 - \mathbf{r}_1 \mathbf{i}_1) + \mathbf{A}_{22}(\mathbf{V} - \mathbf{r}_2 \mathbf{i}_2);$$

$$(10) \quad \frac{d\mathbf{i}_{S,n}}{dt} = \mathbf{A}_{S,n}(\mathbf{V} - \mathbf{r}_{S,n} \mathbf{i}_{S,n}) + \mathbf{A}_{SR,n}(-\mathbf{u}_{R,n} -$$

$$-\Omega_n \Psi_{R,n} - \mathbf{r}_{RL,n} \mathbf{i}_{R,n} ;$$

$$(11) \quad \frac{d\mathbf{i}_{R,n}}{dt} = \mathbf{A}_{RS,n} (\mathbf{V} - \mathbf{r}_{S,n} \mathbf{i}_{S,n}) +$$

$$+ \mathbf{A}_{R,n} (-\mathbf{u}_{R,n} - \Omega_n \Psi_{R,n} - \mathbf{r}_{RL,n} \mathbf{i}_{R,n}) + \Omega_n \mathbf{i}_{R,n} ;$$

$$(12) \quad \frac{d\mathbf{i}_{S,m}}{dt} = \mathbf{A}_{S,m} (\mathbf{V} - \mathbf{r}_{S,m} \mathbf{i}_{S,m} - \Omega_m \Psi_{S,m}) +$$

$$+ \mathbf{A}_{SR,m} (\mathbf{u}_{R,m} - \mathbf{r}_{R,m} \mathbf{i}_{R,m}) + \Omega_m \mathbf{i}_{S,m} ;$$

$$(13) \quad \frac{d\mathbf{i}_{R,m}}{dt} = \mathbf{A}_{RS,m} (\mathbf{V} - \mathbf{r}_{S,m} \mathbf{i}_{S,m} - \Omega_m \Psi_{S,m}) +$$

$$+ \mathbf{A}_{R,m} (\mathbf{u}_{R,m} - \mathbf{r}_{R,m} \mathbf{i}_{R,m}) ;$$

$$(14) \quad \frac{d\mathbf{i}_O}{dt} = \mathbf{L}_O^{-1} (\mathbf{V} - \mathbf{R}_O \mathbf{i}_O) ;$$

$$(15) \quad \mathbf{V} \equiv \mathbf{u}_2 = colon(u_A; u_B), \quad \mathbf{u}_{R,m} = colon(0; 0; u_{f,m}),$$

gdzie: u_1 – napięcie sieci zasilania, V – napięcie zespołu, \mathbf{A}_{pq} – macierz odwrotnych indukcyjności rozproszenia i namagnesowania transformatora i silników, Ω_j – macierz kątowych prędkości wirowania silników [1].

Aby nie komplikować modelu i w sposób przejrzysty przestawić analizowane zagadnienie ogólne równania ruchu wielomasowego układu ograniczamy układem o liczbie jednostek $k=3$ (trójmasowy system inercyjny).

$$(16) \quad \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{1}{J_{EM}} (M_{EM} + c_{2,1}(\gamma_2 - \gamma_1) - v_{2,1}(\omega_2 - \omega_1)) ;$$

$$(17) \quad \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{J_2} (-c_{2,1}(\gamma_2 - \gamma_1) - v_{2,1}(\omega_2 - \omega_1) +$$

$$+ c_{3,2}(\gamma_3 - \gamma_2) + v_{3,2}(\omega_3 - \omega_2)), \quad \frac{d\gamma_j}{dt} = \omega_j, \quad j = 1-3 ;$$

$$(18) \quad \frac{d\omega_3}{dt} = \frac{1}{J_M} (-c_{3,2}(\gamma_3 - \gamma_2) - v_{3,2}(\omega_3 - \omega_2) - M_M) ;$$

$$(19) \quad \frac{dQ_\Sigma}{dt} = \frac{1}{L_\Sigma} \left(\rho_k g (H_\Gamma - S_0 Q_\Sigma^2) - R_\Sigma Q_\Sigma \right).$$

Momenty rozruchowe dla obu typów silników wyznaczamy z równania [1]:

$$(20) \quad M_{EM,n} = \sqrt{3} p_{0,n} (i_{SB,n} i_{RA,n}^\Pi - i_{SA,n} i_{RB,n}^\Pi) / \tau_n,$$

gdzie: Π – wskazuje na przekształcony układ ukośny, τ_n – odwrotna główna indukcyjność silnika, p_0 – liczba par biegunów [1].

$$(21) \quad M_{EM,m} = \sqrt{3} p_{0,m} (\Psi_{SB,m} i_{SA,m} - \Psi_{SA,m} i_{SB,m}).$$

Następnie należy wyznaczyć niewiadomą funkcję V – napięcie zasilania układu napędowego. W tym celu dla układu przedstawionego na rysunku 1 korzystamy z pierwszego prawa Kirchhoffa a następnie różniczkujemy to równanie względem czasu z uwzględnieniem warunków początkowych [1].

$$(22) \quad \mathbf{i}_2 + \sum_{n=1}^N \mathbf{i}_{S,n} + \sum_{m=1}^M \mathbf{i}_{S,m} + \mathbf{i}_O = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{d\mathbf{i}_2}{dt} + \sum_{n=1}^N \frac{d\mathbf{i}_{S,n}}{dt} + \sum_{m=1}^M \frac{d\mathbf{i}_{S,m}}{dt} + \frac{d\mathbf{i}_O}{dt} = 0.$$

Rozwiązując równania (9), (10), (12), (14) otrzymamy szukaną wartość napięcia V układu napędowego.

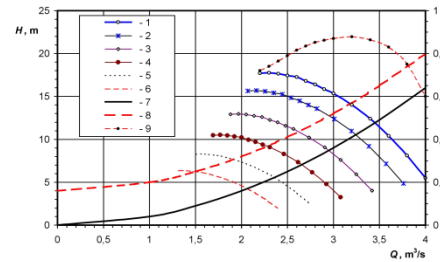
$$(23) \quad \mathbf{V} = \left\{ \mathbf{A}_{22} + \sum_{n=1}^N \mathbf{A}_{S,n} + \sum_{m=1}^M \mathbf{A}_{S,m} + \mathbf{L}_O^{-1} \right\}^{-1} \left\{ -\mathbf{A}_{21} (\mathbf{u}_1 - \mathbf{r}_1 \mathbf{i}_1) + \right.$$

$$+ \mathbf{A}_{22} \mathbf{r}_2 \mathbf{i}_2 + \sum_{n=1}^N \left[\mathbf{A}_{S,n} \mathbf{r}_{S,n} \mathbf{i}_{S,n} - \mathbf{A}_{SR,n} (-\mathbf{u}_{R,n} - \Omega_n \Psi_{R,n} - \right.$$

$$\left. - \mathbf{r}_{RL,n} \mathbf{i}_{R,n}) \right] + \sum_{m=1}^M \left[\mathbf{A}_{S,m} (\mathbf{r}_{S,m} \mathbf{i}_{S,m} + \Omega_m \Psi_{S,m}) - \right.$$

$$\left. - \mathbf{A}_{SR,m} (\mathbf{u}_{R,m} - \mathbf{r}_{R,m} \mathbf{i}_{R,m}) - \Omega_m \mathbf{i}_{S,m} \right] + \mathbf{L}_O^{-1} \mathbf{R}_O \mathbf{i}_O \left. \right\}$$

Wykorzystanie w modelu matematycznym równania pompy (19) jest bardzo złożonym zadaniem, ponieważ postaje problem wyznaczenia parametrów pompy i instalacji wodociągowej [11]. Dla uproszczenia zadania wykorzystujemy charakterystyki wysokości podnoszenia w funkcji wydajności pompy oraz charakterystyki rurociągu, przedstawione na rysunku 3. Szczegółowy opis charakterystyk zawarty jest w pracach [8], [11]. Krzywa 9 przedstawia sprawność pompy.



Rys.3. Wysokość podnoszenia pompy, charakterystyka rurociągu i sprawność pompy w funkcji wydajności

Momenty obciążenia napędów wyznaczamy dla wysokości podnoszenia $H_f=0$ oraz $H_f=4$ m (krzywe 7 i 8), które zostały aproksymowane przez funkcje:

$$(24) \quad M_{P0}(\omega_2) = 2,052 \cdot \omega_2^2; \quad M_{P4}(\omega_2) = 3,958 \cdot \omega_2^{1,856}.$$

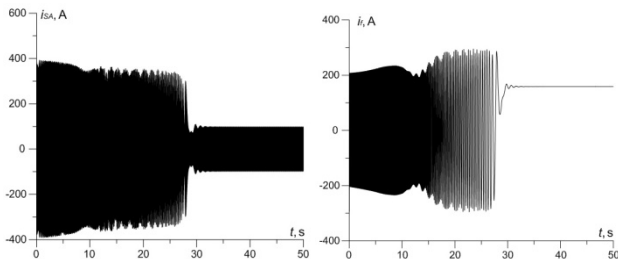
Wspólnemu całkowaniu podlegają równania: (8) – (14), (16) – (18) z uwzględnieniem wyrażen (15), (20), (21), (23), (24).

Wyniki symulacji komputerowej

W symulacji wykorzystano układ napędowy przedstawiony na rysunku 1, który składa się z transformatora o mocy 1,6 MVA, dwu silników synchronicznych (dla uproszczenia zadania napędy asynchroniczne w części symulacyjnej nie są uwzględniane) o parametrach: $P_N = 630$ kW, $n_N = 750$ obr/min, $U_N = 6$ kV, $u_{fN} = 42$ V, $p_0 = 4$. Wymienione silniki przez długie wały napędzały pompy pionowe zasilające instalację wodociągową: $D=1200$ mm, $L=1500$ m, $H_f=0$ m – pierwsza pompa oraz $H_f=4$ m – druga. Parametry wałów pomp są następujące: $l_0 = 6$ m, $G = 8,1 \cdot 10^{10}$ Nm, $\rho = 7850$ kg/m³, $d_0 = 28$ cm. Dla modelowania transmisji ruchu wymieniony układ długich wałów został zaimplementowany przez trójmasowy system dyskretny, patrz równania (16) – (18). Momenty obciążenia znajdujemy na podstawie

wyrażenia (24). Rozruch układu został dokonany przy zwartych uzwojeniach wzbudzenia. Przy asynchronicznym rozruchu po osiągnięciu podsynchronicznej prędkości dla każdego z silników zostało włączone wzbudzenia przy napięciach: $u_{f1} = 20 \text{ V}$, $u_{f2} = 42 \text{ V}$.

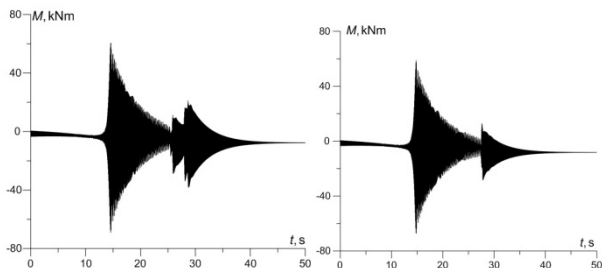
Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono prąd fazy A pierwszego silnika oraz jego prąd wzbudzenia w funkcji czasu. Z rysunków widać, że pierwszy napęd osiągnął stan ustalony w czasie około $t=28$ sekund.



Rys.4. Prąd fazy A pierwszego silnika

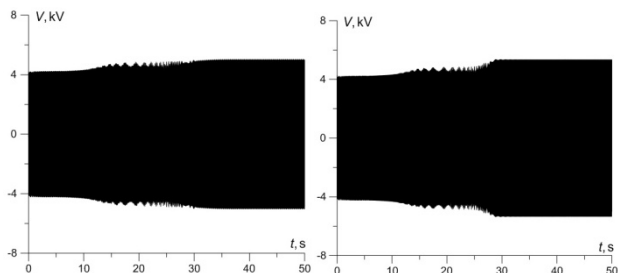
Rys.5. Prąd wzbudzenia pierwszego silnika

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono momenty sprężystości w wałach obu napędów synchronicznych w funkcji czasu. Analizując rysunki można stwierdzić, że pierwszy napęd wszedł w stan ustalony w czasie około $t=25 \text{ s}$, w porównaniu do drugiego $t=28 \text{ s}$, co jest powiązane z różnymi momentami obciążeń. Pierwszy silnik jest niedowzbudzony, a to oznacza, że powiązanie magnetyczne między polem stojana a polem twornika w pierwszym silniku jest znacząco słabsze niż w drugim, co spowodowało duży wzrost momentu (rys. 6).



Rys.6. Moment sprężystości w wałe pierwszego napędu

Rys.7. Moment sprężystości w wałe drugiego napędu



Rys.8. Napięcie w fazie A układu napędowego przy $u_{f1,2} = 18 \text{ V}$

Rys.9. Napięcie w fazie A układu napędowego przy $u_{f1,2} = 42 \text{ V}$

Na rysunkach 8, 9 przedstawiono napięcia fazy A układu napędowego przy pracy silników w stanach podsynchronicznych dla $u_{f1,2} = 18 \text{ V}$, oraz $u_{f1,2} = 42 \text{ V}$. Przy $u_{f1,2} = 18 \text{ V}$ napędy pobierają moc bierną w stanie ustalonym, natomiast w drugim przypadku generują moc bierną. W analizowanym przypadku napięcie zespołu wzrosło o około 10 %.

Wnioski

1. Wykorzystanie podejść interdyscyplinarnych podczas modelowania skomplikowanych obiektów dynamicznych umożliwia analizę złożonych układów napędowych.
2. Wykorzystanie opracowanego modelu matematycznego urządzeń elektromechanicznych upraszcza procedurę wyznaczania niewiadomej funkcji – napięcia układu napędowego.
3. Implementowanie długich wałów napędów elektrycznych w postaci trójmasowego systemu inercyjnego upraszcza postać wyjściowych równań różniczkowych elektromechanicznego stanu obiektu dynamicznego.
4. Wykorzystanie napędów synchronicznych w układach napędowych umożliwia regulację mocy biernej, co może eliminować wprowadzenie dodatkowych układów kompensujących moc bierną.

Autorzy: dr hab. inż. Marek Lis prof. PCz., Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, E-mail: lisn@el.pcz.czest.pl; dr inż. Andrzej Szafraniec, Uniwersytet Technologiczno – Humanistyczny, Wydział Transportu i Elektrotechniki, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom, E-mail: a.szafraniec@uthrad.pl

LITERATURA

- [1] Czaban A., Zasada Hamiltona-Ostrogradskiego w układach elektromechanicznych, *Wydawnictwo T. Soroki*, Lwów 2015, 464
- [2] Szafraniec A., Modelowanie matematyczne procesów oscylacyjnych w napędzie elektrohydraulicznym o podatnej transmisji ruchu, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 93 nr 12/2017, 167-170
- [3] Ortega R., Loria A., Nicklasson P.J., Sira-Ramirez H., *Passivity-Based Control of Euler-Lagrange Systems: Mechanical, Electrical and Electromechanical Applications*. Springer Verlag, London 1998, 543
- [4] Zhang D., Shi W., Chen B., Guan X., Unsteady flow analysis and experimental investigation of axial-flow pump, *Journal of Hydrodynamics*, 2010, v. 22(1), 35-43
- [5] Łukasik Z., Czaban A., Szafraniec A., Mathematical model of asynchronous pump drive with distributed mechanical parameters, *Przegląd Elektrotechniczny*, R.94 nr 6/2018, 155-159
- [6] Szafraniec A., Mathematical Model of Asynchronous Pump Drive and Power Transformer Drive System with Complex Motion Transmission, *Control of Power Systems 13th International Scientific Conference CPS 2018*, Tatranské Matliare - Tatranská Lomnica, 5-7 June 2018
- [7] Łukasik Z., Czaban A., Szafraniec A., Żuk W., The mathematical model of the drive system with asynchronous motor and vertical pump, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 94 nr 1/2018, 133-138
- [8] Lis M., Szafraniec A., Model matematyczny synchronicznego układu pompowego o podatnej transmisji ruchu, *Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe*, 2/2018, no. 118, 165-170
- [9] Lis M., Modelowanie matematyczne procesów niestabilnych w elektrycznych układach napędowych o złożonej transmisji ruchu, – *Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej*, 2013, 258
- [10] Czaban A., Lis M., Popenda A., Patro M., Nowak M., Model matematyczny zespołu elektrycznego składającego się z transformatora mocy, silników indukcyjnych, odciążenia nieliniowego RL oraz baterii kompensacyjnej, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 91 nr 1/2015, 129-132
- [11] Mandrus W., Żuk W., *Hydraulika, napędy hydrauliczne i pneumatyczne maszyn wojskowych*, ACB, Lwów, (2013), 372