

# Wykorzystanie sztucznej sieci neuronowej do wyznaczania prądu generatora w układzie napędowym silnik PMSM – generator prądu stałego

**Streszczenie.** W pracy wykorzystując sztuczną sieć neuronową wyznaczono prąd twornika generatora prądu stałego, który napędzany jest przez silnik PMSM za pomocą długiego elementu sprężystego. Uczenie sieci neuronowej prowadzono wykorzystując matematyczny model układu elektromechanicznego. Model ten został sformułowany poprzez zastosowanie interdyscyplinarnej metody wariacyjnej. Wyniki symulacji komputerowej przedstawiono w postaci tabel oraz graficznej.

**Summary.** In the paper the rotor current of a DC generator driven by PMSM motor through a long elastic component has been determined. For this purpose an artificial neural network has been determined. Teaching of the ANN has been carried out using a mathematical model of the electromechanical system. The model has been formulated using an interdisciplinary variation method. The results of computer simulations have been depicted in the form of tables and charts. (**Application of an artificial neural network for determination of rotor current in a driver system: a PMSM motor – a DC generator**)

**Słowa kluczowe:** Euler-Lagrange'a systemy, silnik synchroniczny PMSM typu, zasada Hamiltona-Ostrogradskiego.

**Keywords:** Euler-Lagrange systems, Permanent Magnet Synchronous Motor, artificial neural network, Hamilton-Ostrogradsky rule.

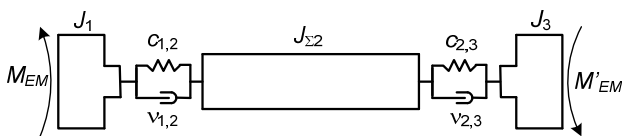
doi:10.12915/pe.2014.06.55

## Wstęp

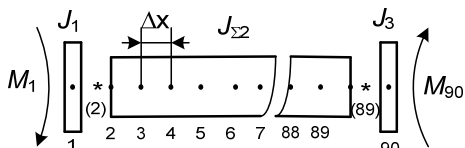
Do analizy procesów przejściowych podczas pracy układu napędowego został wykorzystany układ elektromechaniczny, który składa się z następujących elementów składowych: silnika synchronicznego z magnesami trwałymi, połączonego z generatorem obcowzbudnym prądu stałego za pomocą długiego elementu sprężystego. Generator został obciążony rezystancją  $R$ , której wartość zmienia się w szerokim zakresie.

## Model matematyczny

W rozdziale tym poddano analizie elektromechaniczny układ dwumaszynowy, składający się z silnika synchronicznego z magnesami trwałymi połączonego z prądnicą prądu stałego za pomocą długiego elementu sprężystego. W przemyśle wymienione silniki znajdują coraz szersze zastosowanie na razie w układach napędowych małych i średnich mocy. Brak dotąd przykładów zastosowania tych silników w układach o dużej mocy. Analiza matematyczna procesów niestabilnych pracy układów napędowych z silnikami z magnesami trwałymi oraz wyznaczenie oscylacji skrętnych w elementach transmisji ruchu ma istotne znaczenie dla rozwoju tych silników.



Rys.1. Schemat zasadniczy układu elektromechanicznego



Rys.2. Schemat obliczeniowy układu elektromechanicznego

W rysunku 2 przedstawiono schemat obliczeniowy części mechanicznej układu, który został sformułowany drogą dyskretyzacji równań elementu sprężystego. Do budowy modelu matematycznego przyjęto następujące współrzędne

uogólnione: ładunki elektryczne w uzwojeniach silnika synchronicznego  $q_{1-3} = Q_{1-3}$ , strumienie magnetyczne magnesu trwałego w osiach  $d$ :  $q_4 = \Phi_d$  i  $q$ :  $q_5 = \Phi_q$ , ładunki elektryczne w uzwojeniach generatora prądu stałego –  $q_{6,7} = Q_{a,f}$  ( $a$  – uzwojenie twornika,  $f$  – uzwojenie wzbudzenia), kąty obrotu wirników obu maszyn elektrycznych  $q_{8,9}(t) = \gamma_{1,90}(t)$ , a także kąt obrotu długiego elementu sprężystego  $q(x,t) = \phi(x,t)$ . Jako uogólnione prędkości przyjęto odpowiednio prądy:  $\dot{q}_{1-3}(t) = i_{1-3}(t)$ ,  $\dot{q}_4 = \frac{d\Phi_d}{dt}$ ,  $\dot{q}_5 = \frac{d\Phi_q}{dt}$ ,  $\dot{q}_{6,7}(t) = i_{a,f}(t)$ , prędkości kątowe wirników obu maszyn  $\dot{q}_{8,9}(t) = \omega_{1,90}(t)$  oraz funkcję prędkości kątowej długiego elementu sprężystego  $\dot{q}(x,t) = \omega(x,t)$ . Generator prądu stałego został obciążony rezystancją  $R$ .

Przyjmując zaproponowany układ współrzędnych i prędkości uogólnionych, przedstawiono rozszerzony funkcjonal działania z uwzględnieniem dodatkowych członków, które opisują elektryczne i magnetyczne zjawiska w analizowanym układzie. Składniki zmodyfikowanego lagrangianu z uwzględnieniem pracy generatora prądu stałego przedstawiono w następującej postaci:

$$(1) \quad L = \tilde{T} - P + \Theta - D \quad L_l = T_l - P_l + \Theta_l - D_l,$$

gdzie  $L$  - zmodyfikowana funkcja Lagrange'a,  $L_l$  - gęstość liniowa zmodyfikowanej funkcji Lagrange'a  $\tilde{T}$  - koenergia kinetyczna,  $P$  - energia potencjalna,  $\Theta$  - energia dyssypacji,  $D$  - energia sil zewnętrznych,  $T_l, P_l, \Theta_l, D_l$  - gęstości wspomnianych funkcji.

Stosując przyjęte założenia sformułowano rozszerzony funkcjonal wg Hamiltona-Ostrogradskiego. Elementy funkcji Lagrange'a dla układu napędowego z rysunków 1 i 2 przyjmują postać [1,2]:

$$(2) \quad \tilde{T} = \sum_{j=1}^3 \int \Psi_{Sj}(i_{Sj}) di_{Sj} + \int_0^{i_a} \Psi_a(i_a, i_f, \gamma_1) di_a + \int_0^{i_a} \Psi'_a(i_a, i_f, \gamma_1) di_a + \int_0^{i_a} \Psi''_a(i_a, i_f, \gamma_1) di_a +$$

$$+ \int_0^{i_a} \Psi_f(i_f, i_a, \gamma_1) di_f + \frac{J_1 \omega_1^2}{2} + \frac{J_3 \omega_{90}^2}{2}, \quad j = A, B, C$$

$$(3) \quad P = \int_0^{\Phi_d} \rho(\Phi_d) \Phi_d d\Phi_d + \int_0^{\Phi_q} \rho(\Phi_q) \Phi_q d\Phi_q + \frac{c_{1,2}(\gamma_2 - \gamma_1)^2}{2} + \frac{c_{2,3}(\gamma_{89} - \gamma_{90})^2}{2}$$

$$(4) \quad \Theta = \sum_{j=1}^3 \int_0^t \frac{1}{2} R_S i_{Sj}^2 d\tau + \int_0^t \frac{1}{2} (R_a + R' + R'' + R) i_a^2 d\tau + \int_0^t \frac{1}{2} R_f i_f^2 d\tau + \int_0^t \left( \frac{v_{1,2}(\omega_2 - \omega_1)^2}{2} + \frac{v_{2,3}(\omega_{89} - \omega_{90})^2}{2} \right) d\tau$$

$$(5) \quad D = \sum_{j=1}^3 \int_0^t u_{Sj} i_{Sj} d\tau - \int_0^t (u_f i_f - \Delta u i_a) d\tau - \int_0^{\omega_1} \int_0^{\omega_0} M_{EM} d\omega_1 d\tau + \int_0^{\omega_{90}} \int_0^{\omega_0} M'_{EM} d\omega_{90} d\tau + \int_0^{\Phi_d} \int_0^{\Phi_d} (F_d + F(\Phi_d)) \frac{d\Phi_d}{dt} d\Phi_d d\tau + \int_0^{\Phi_q} \int_0^{\Phi_q} F_q \frac{d\Phi_q}{dt} d\Phi_q d\tau$$

$$(6) \quad T_l = \frac{\rho J_p}{2} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2, \quad P_l = \frac{G J_p}{2} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2,$$

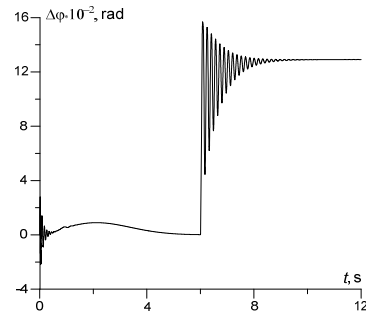
$$\Theta_l = \int_0^t \frac{\xi}{2} \left( \frac{\partial \omega}{\partial x} \right)^2 d\tau, \quad D_l = 0$$

Wariacja funkcjonału działania opisana jest zależnością:

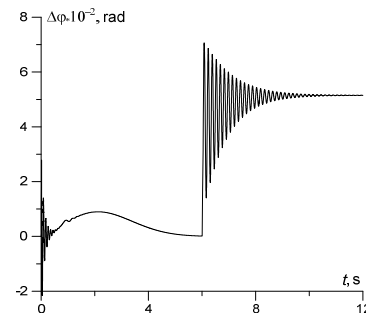
$$(7) \quad \delta S = \int_{t_1}^{t_2} \left\{ \sum_{j=1}^3 \left[ \left( \frac{\partial}{\partial i_{Sj}} \int_0^{i_{Sj}} \Psi_{Sj}(i_{Sj}) di_{Sj} + \int_0^t R_S i_{Sj} d\tau - \frac{\partial}{\partial i_{Sj}} \int_0^t u_{Sj} i_{Sj} d\tau \right) \delta i_{Sj} \right] + \left[ \frac{d}{dt} \int_0^t \left( \frac{\partial}{\partial \Phi_d} \int_0^{\Phi_d} (F_d + F(\Phi_d)) \frac{d\Phi_d}{dt} d\Phi_d \right) d\tau \delta \Phi_d - \frac{\partial}{\partial \Phi_d} \int_0^{\Phi_d} \rho(\Phi_d) \Phi_d d\Phi_d \delta \Phi_d \right] + \left[ \frac{d}{dt} \int_0^t \left( \frac{\partial}{\partial \Phi_q} \int_0^{\Phi_q} (F(\Phi_q)) \frac{d\Phi_q}{dt} d\Phi_q \right) d\tau \delta \Phi_q - \frac{\partial}{\partial \Phi_q} \int_0^{\Phi_q} \rho(\Phi_q) \Phi_q d\Phi_q \delta \Phi_q \right] + \left[ \frac{\partial}{\partial i_a} \int_0^{i_a} (\Psi_a(i_a, i_f, \gamma_1) + \Psi'_a(i_a, i_f, \gamma_1) + \Psi''_a(i_a, i_f, \gamma_1)) di_a + \int_0^t (R_a + R' + R'' + R) i_a d\tau + \frac{\partial}{\partial i_a} \int_0^t \Delta u i_a d\tau \right] \delta i_a + \left( \frac{\partial}{\partial i_f} \int_0^{i_f} \Psi_f(i_f, i_a, \gamma_1) di_f + \int_0^t R_f i_f d\tau - \frac{\partial}{\partial i_f} \int_0^t u_f i_f d\tau \right) \delta i_f +$$

$$+ \left( J_1 \omega_1 - \int_0^t v_{1,2}(\omega_2 - \omega_1) d\tau - \int_0^t M_{EM} d\tau \right) \delta \omega_1 + c_{1,2}(\gamma_2 - \gamma_1) \delta \gamma_1 + \left( J_{90} \omega_{90} - \int_0^t v_{2,3}(\omega_{89} - \omega_{90}) d\tau + \int_0^t M'_{EM} d\tau \right) \delta \omega_{90} + c_{2,3}(\gamma_{89} - \gamma_{90}) \delta \gamma_{90} + \int_l \left( \rho J_p \varphi_t \delta \varphi_t + G J_p \varphi_x \delta \varphi_x + \xi \int_0^t \varphi_{xt} d\tau \delta \varphi_{xt} \right) dl \Big\} dt = 0.$$

Zależnie od wartości obciążenia ulega zmianom prąd twornika oraz moc oddawana przez generator. Dodatkowo zmianie ulegają wartości prądu stojana silnika PMSM oraz moc pobierana z sieci przez silnik. Przy zmianie wartości obciążenia zmienia się kąt skręcenia sprężystego elementu łączącego.



Rys.3. Przebieg kąta skręcenia elementu łączącego dla prądu generatora  $I_a = 14,5 A$



Rys.4. Przebieg kąta skręcenia elementu łączącego dla prądu generatora  $I_a = 5,8 A$

### Wyniki analizy obliczeniowej

Do wyznaczenia prądu twornika generatora prądu stałego układu napędowego z silnikiem PMSM, wykorzystano sztuczną sieć neuronową, w której jako wejściowe wektory uczące przyjęto: wartość skuteczną prądu fazy A twornika silnika PMSM w stanie ustalonym w przedziale  $t \in (11,976; 12)$  oraz maksymalny kąt skręcenia elementu łączącego dla danego obciążenia. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono przebiegi kąta skręcenia elementu łączącego dla dwóch wariantów obciążenia generatora prądu stałego  $I_a = 14,5 A$  i  $I_a = 5,8 A$ . Na rysunkach tych można zauważyć istotne różnice w przebiegach kąta skręcenia wynikające z różnic wartości prądu obciążenia.

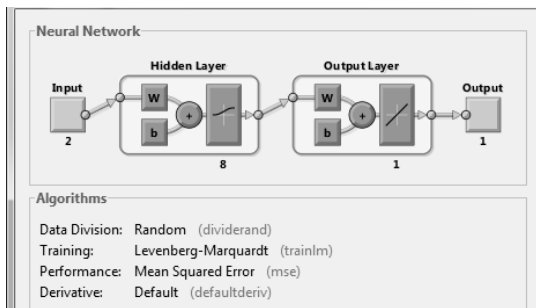
W tabeli 1 przedstawiono zbiór wartości wektorów uczących zależnych od prądu obciążenia generatora.

Do analizy wybierano sieć neuronową z jedną ukrytą warstwą. Sygnał wejściowy zawiera dwa receptory. Liczbę neuronów w ukrytej warstwie dobrano eksperymentalnie. Ukryta warstwa zawiera 8 neuronów, a sygnał wyjściowy zawiera 1 neuron (rys.5). Proces uczenia sztucznej sieci

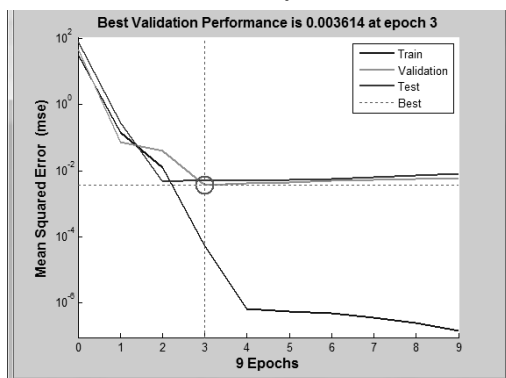
neuronowej przeprowadzono za pomocą metody gradientowej Levenberga-Marquardta w połączeniu z algorytmem wstecznej propagacji (*backpropagation*). Obliczenia wykonano z wykorzystaniem pakietu Matlab. Jako funkcję aktywacji dla warstwy ukrytej wykorzystano funkcję nieliniową *logsig*, a dla wyjściowej – liniową *pureline*.

Tabela 1. Zbiór wartości dla wektorów uczących

Lp.	$I_{SA}, A$	$\Delta\varphi, 10^{-2} \text{ rad}$	$I_a, A$
1	9.65523	14.83298	16.67649
2	8.95514	13.42632	15.02333
3	8.39085	12.12927	13.66844
4	7.99166	11.11783	12.53672
5	7.72495	10.33786	11.57791
6	7.51208	9.649915	10.75553
7	7.32959	9.018933	10.04240
8	7.17328	8.444151	9.41806
9	7.04111	7.926220	8.86685
10	6.93030	7.462128	8.37662
11	6.83760	7.046614	7.93775
12	6.75994	6.673795	7.54258
13	6.69464	6.338049	7.18489
14	6.63944	6.034384	6.85958
15	6.59255	5.758507	6.56246
16	6.55249	5.506780	6.28999
17	6.51811	5.276149	6.03925
18	6.48845	5.064032	5.80774
19	6.46275	4.868255	5.59332



Rys. 5. Architektura sieci neuronowej



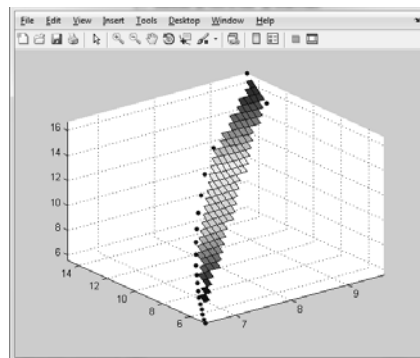
Rys.6. Zależność uczenia sieci neuronowej od liczby epok dla przypadku obliczeniowego P13

Rysunek 6 przedstawia funkcję uczenia sztucznej sieci neuronowej w zależności od liczby epok.

Na rysunku 7 przedstawiono rozkład przestrzenny zależności wektora wyjściowego sieci neuronowej od jej wektorów wejściowych podczas szkolenia. Widać, że powierzchnia łącząca punkty nie ma lokalnych ekstremów, a jedynie minimum globalne. Na tej podstawie można stwierdzić, że architektura sieci została dobrana prawidłowo.

W tabeli 2 przedstawiono wyniki uzyskane na podstawie modelu matematycznego układu napędowego  $I_a$  oraz na podstawie odpowiedzi sieci neuronowej  $I'_a$ . Obliczenia przeprowadzono dla czterech wartości prądu generatora  $I_a$ . Analizując wyniki przedstawione w tabeli 2 można stwierdzić, że wyniki uzyskane przy użyciu sieci neuronowej

są obarczone błędem maksymalnym na poziomie 0,15 %, co wskazuje na bardzo wysoką jakość szkolenia sieci.



Rys.7. Powierzchnia w przestrzeni parametrów dla zależności wyjścia sieci neuronowej od jej wejść podczas szkolenia

Tabela 2 Odpowiedź sieci neuronowej na zadane wymuszenia

Lp.	$I, A$	$\Delta\varphi 10^{-2}, \text{ rad}$	$I'_a, A$	$I_a, A$	błąd %
1	8,722	12,89	14,443	14,450	0,05
2	7,217	8,610	9,583	9,597	0,14
3	6,601	5,811	6,624	6,619	-0,07
4	6,483	5,023	5,770	5,763	-0,12

### Wnioski

1. Na podstawie interdyscyplinarnej uogólnionej metody wybudowano model matematyczny dwumaszynowego układu elektromechanicznego, który składa się z napędowego silnika PMSM i prądnicy prądu stałego, a także długiego, sprężystego elementu łączącego o parametrach rozłożonych. Takie podejście pozwoliło uniknąć dekompozycji układu elektromechanicznego i uzyskać równania stanu wyłącznie z zależności energetycznych i teorii elektromechanicznego przetwarzania energii.
2. Wychodząc z wybudowanego modelu matematycznego reprezentowano wyniki symulacji komputerowej procesów niestabilnych, które analizują się.
3. Skomplikowane równania stanu układu elektromechanicznego wykorzystali się dla nauczania sztucznej sieci neuronowej analizować stany dwumaszynowego systemu. W tym nauczono neurosieć prowadzić pomiary prądu generatora prądu stałego, wykorzystujący dla tego wyłącznie informacje codo napędowego silnika PMSM, przy tym informacja o samego generatora podczas treningu nie wykorzystana się.

### LITERATURA

- [1] Chaban A. Modelowanie matematyczne procesów oscylacyjnych w systemach elektromechanicznych. (Wydanie drugie, zmienione i uzupełnione). – Lwów: W-wo T. Soroki 2008. – 328 s. (w języku Ukraińskim).
- [2] Czaban A., Czaban W., Rusek A., Lis M.: Model matematyczny silnika synchronicznego z magnesami trwałymi typu PMSM z wykorzystaniem metod wariacyjnych. Maszyny Elektryczne, Zeszyty Probl. Nr 1 (98) KOMEL, 2013, s. 177-182
- [3] Czaban A., Lis M., A Mathematical Model of a DC Drive on the Basis of Variational Approaches, Przegląd Elektrotechniczny vol 2012, nr 12b, s. 20-23, 2012.
- [4] Lis M., Makarchuk O.: Mathematical Model of a Synchronous Motor with Permanent Magnets and Sine Waveform Control Supplied from a Current Source. Maszyny Elektryczne, Zeszyty Probl. Nr 3 (96) KOMEL, 2012, s. 175-178.
- [5] Ossowski S. Sieci neuronowe do przetwarzania. – Wyd. Politechniki Warszawskiej, 2000. – 312 s.
- [6] T chaban V. Metody analizy układów elektromechanicznych. – Lwów, "Wyższa szkoła", 1985, 192 s.

**Autorzy:** prof. nadzw., dr hab. inż. Andriy Czaban, Politechnika Czestochowska, Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, E-mail: [atchaban@gmail.com](mailto:atchaban@gmail.com); dr. inż. Marek Lis, (tam samo) E-mail: [lism@el.pcz.czest.pl](mailto:lism@el.pcz.czest.pl).