

Tomasz PAJCHROWSKI*

KOMPENSACJA TĘTNIENI MOMENTU W NAPĘDZIE BEZPOŚREDNIM Z SILNIKIEM PMSM

W artykule omówiono zagadnienie tętnień prędkości obrotowej w napędzie bezpośrednim z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych. W pracy przedstawiono przyczynę powstawania nierównomierności prędkości obrotowej, jakim jest pasożytniczy moment tętniący. Ma to istotne znaczenie w napędach obrabiarek i robotów, ponieważ pomimo małej amplitudy tętnień prędkości obrotowej, pogarszają one pracę układu. Dlatego w tych układach napędowych dąży się do uzyskania gładkiego momentu elektromagnetycznego, a tym samym zmniejszenia nierównomierności prędkości obrotowej. W pracy w celu uzyskania gładkiego momentu elektromagnetycznego, a tym samym zmniejszenia tętnień prędkości obrotowej, wprowadzono kompensację, wykorzystując sztuczne sieci neuronowe.

1. WPROWADZENIE

Napęd bezpośredni (bez przekładni) z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych (*ang. permanent magnet synchronous motor – PMSM*) stanowi alternatywę do napędu pośredniego (z przekładnią). Luzy mechaniczne, dodatkowa sprężystość i siły tarcia wprowadzane przez przekładnię mechaniczną utrudniają precyzyjne sterowanie. Natomiast brak przekładni powoduje, że na pracę silnika bezpośrednio działają wszelkie zmiany momentu bezwładności mechanizmu, których wartość w tradycyjnym napędzie jest zredukowana dzięki podzieleniu przez kwadrat przełożenia przekładni [3, 8]. Także zmiany momentu oporowego, wynikające z pracy napędzanego urządzenia oraz wywołane zmiennymi siłami tarcia, bezpośrednio działają na silnik elektryczny [8]. Do tych wad należy zaliczyć również tętnienia momentu elektromagnetycznego. Mają one wpływ na nierównomierność prędkości obrotowej, co ma istotny wpływ na pracę napędów robotów i serwonapędów. Główną przyczyną harmonicznego momentu elektromagnetycznego jest: niesinusoidalny rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej (*ang. electromagnetic ripple torque*), moment zaczepowy (*ang. cogging torque*), błędy pomiarowe prądu i prędkości [1, 2, 3]. Dlatego w tych układach napędowych dąży się do uzyskania gładkiego momentu elektromagnetycznego, a tym samym zmniejszenia nierównomierności prędkości

* Politechnika Poznańska.

obrotowej. W celu uzyskania gładkiego momentu elektromagnetycznego, a tym samym zmniejszenia nierównomierności prędkości obrotowej, w pracy wprowadzono kompensację momentu pasożytniczego za pomocą kompensatora neuronowego i zaproponowano proces jego uczenia.

2. PRZYCZYNY POWSTAWANIA TĘTNIENÍ MOMENTU

2.1. Moment zaczepowy

Moment zaczepowy (ang. *cogging torque*) wynika z istnienia żłobków w stojanie maszyny i jest rezultatem wzajemnego oddziaływania magnesów trwałych w wirniku a zmieniającą się reluktancją w stojanie. Wartość momentu zaczepowego (może osiągać 4% momentu znamionowego silnika [1,4,6,10]) zależy od strumienia wytwarzanego przez magnesy trwałe umieszczone w wirniku. Pomijając oddziaływanie wywołane nasyceniem, moment zaczepowy (1) zależy od chwilowego położenia wirnika θ , liczby żłobków q , liczby okresów momentu zaczepowego na jeden obrót wału silnika m , i nie zależy od prądu. Można go opisać następującą zależnością [2, 3, 10]:

$$T_{cogging}(\theta) = \sum_{m=1}^{\infty} T_{cogging} \cdot \sin(m \cdot q \cdot \theta) \quad (1)$$

2.2. Pulsujący moment elektromagnetyczny

Pulsujący moment elektromagnetyczny zależy zarówno od strumienia wirnika, jak i od prądu stojana. Jego wartość osiąga zwykle 2÷5% momentu znamionowego i na jej wartość mają wpływ dwa składniki [3, 6, 10]: niesinusoidalny rozkład strumienia magnetycznego w szczelinie powietrznej, zwany momentem wzajemnym (ang. *mutual torque*) oraz brak symetrii magnetycznej wirnika (zmiana reluktancji w funkcji położenia wirnika). Składowe dominujące to najczęściej 6. i 12. harmoniczna liczby par biegunów. Dla układu regulacji prądu, który zapewni prąd zerowy w osi d, można zapisać to wyrażenie następująco:

$$\Delta T_{ep}(\theta) = i_q \cdot \psi_d(\theta) \quad (2)$$

gdzie: i_q – prąd stojana w osi q ,

$$\psi_d(\theta) = \psi_{d0} + \psi_{d6} \cdot \cos(6 \cdot p \cdot \theta) + \psi_{d12} \cdot \cos(12 \cdot p \cdot \theta) \quad (3)$$

ψ_{d0} – składowa strumienia momentu użytecznego, ψ_{d6} , ψ_{d12} – 6. i 12. składowa strumienia tworzącego moment wzajemny przez prąd w osi q , p – liczba par biegunów.

2.3. Błędy pomiarowe prądu

Brak symetrii napięcia zasilania czujników prądu i przetworników analogowo-cyfrowych oraz jego niewielkie zmiany, oraz błędy skalowania w torze prądowym są przyczyną powstawania dodatkowych błędów w torze pomiarowym prądu Δi_q . Dodatkowo skalowanie torów prądowych w dwóch fazach zasilających (współczynniki K_a i K_b) wprowadza dodatkowe błędy mające wpływ na nierównomierność prędkości obrotowej. Analiza przedstawiona w pracach [2], pozwala na następujący zapis:

$$\Delta T_{i_q} = k_t \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cos(p \cdot \theta + \alpha) \sqrt{\Delta i_a^2 + \Delta i_a \Delta i_b + \Delta i_b^2} + \frac{I_m}{\sqrt{3}} \left(\frac{K_a - K_b}{K_a \cdot K_b} \right) \left[\cos\left(2 \cdot p \cdot \theta + \frac{\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} \right] \right) \quad (4)$$

gdzie: $\alpha = \tan^{-1} \left(\sqrt{3} \Delta i_a \cdot (\Delta i_a + 2 \Delta i_b)^{-0.5} \right).$ (5)

2.4. Błędy pomiarowe prędkości

W zamkniętym układzie regulacji prędkości powstają dodatkowo pulsacje wywołane okresowymi błędami pomiarowymi prędkości [3]. Ma to istotne znaczenie w zakresie bardzo niskich prędkości (mrad/s) i problem ten nie jest przedstawiony w niniejszej pracy.

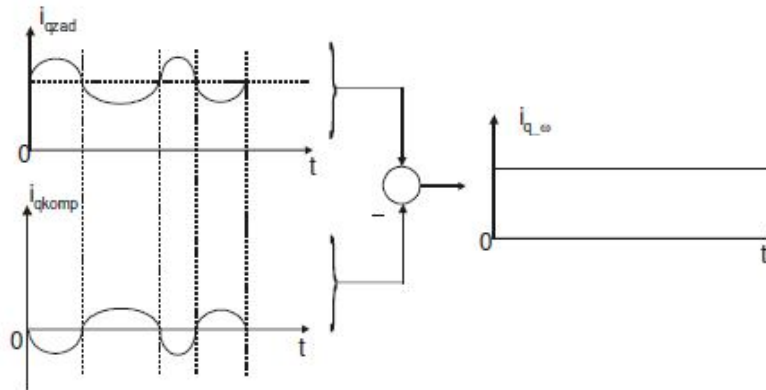
3. KOMPENSACJA TĘTNIENŃ MOMENTU

3.1. Wstęp

W wielu ośrodkach naukowych [1, 2, 4, 6] prowadzi się badania mające na celu zmniejszenie pasożytniczego momentu tętniącego. Stosowane są między innymi zabiegi konstrukcyjne poprzez odpowiednie rozmieszczenie magnesów na wirniku, uzwojeń stojana czy też poprzez odpowiedni kształt żłobków [7]. Są to jednak zabiegi zmniejszające wartość średnią momentu, oraz ze względu na specjalne wymagania, zwiększają się koszty produkcji. Alternatywnym rozwiązaniem jest kompensacja tego zjawiska. Dzięki zaawansowanym układom sterowania można znacznie ograniczyć tętnienia momentów, jednak nie można ich ograniczyć zupełnie, przede wszystkim ze względu na opóźnienia pomiarowe prądu.

3.2. Koncepcja kompensacji tętnień momentu

Celem pracy było opracowanie neuronowego kompensatora tętnień momentu. Schemat blokowy układu sterowania z silnikiem PMSM przedstawiono na rys. 1. W pracy został wykorzystany regulator prądu o dwóch stopniach swobody typu 2DFC (ang. *two degrees of freedom cotntroller*) przedstawiony w pracy [5, 8].

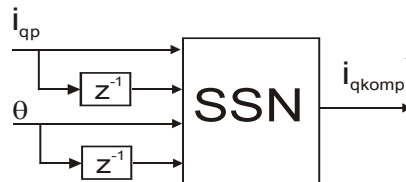


Rys. 2. Koncepcja kompensacji tętnień momentu

3.3. Proces uczenia kompensatora neuronowego

Proces uczenia kompensatora neuronowego [10], oprócz sygnałów wejściowych, wymaga wzorca sygnału do nauki (i_{qkomp}^*), który będzie kompensował rzeczywisty moment tętniący. Na rysunku 3 przedstawiono schemat blokowy wyjaśniający sposób uczenia kompensatora neuronowego. Na podstawie rysunku 1 można zapisać:

$$i_{qzad} = i_{q\omega} + i_{qkomp} \tag{9}$$



Rys. 3. Schemat blokowy wyjaśniający sposób uczenia kompensatora neuronowego

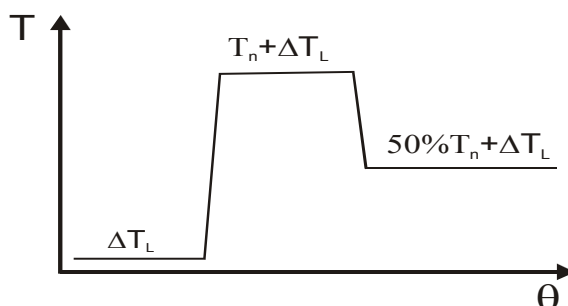
Wzorcowy sygnał wyjściowy SSN (i_{qkomp}^*) można uzyskać analizując układ bez kompensacji, dlatego można zapisać:

$$i_{qzad} = i_{q\omega} \tag{10}$$

Sygnał prądu zadanego dla układu bez kompensacji (i_{qzad}), w którym występują pulsacje prędkości obrotowej, stanowi wzorec do nauki (po odjęciu wartości prądu biegu jałowego) dlatego można zapisać:

$$i_{qkomp}^* = i_{q\omega} \tag{11}$$

Na rysunku 4 przedstawiono przebieg ideowy sygnałów wejściowych jakimi uczono SSN. Oprócz sygnału o położeniu mechanicznym, do sieci dostarczane są sygnały o poziomie tętnień momentu ($\Delta T_L = k_t \Delta i_{qL}$), następnie włączono obciążenie znamionowe ($\Delta T_n = k_t \Delta i_{qn}$), które w kolejnej części zmniejszono o połowę.



Rys. 9. Sygnały uczące SSN

Po symulacyjnym przebadaniu różnych struktur sieci neuronowych zdecydowano się na sieć jednokierunkową, jednowarstwową o strukturze 4-8-1 (linowa funkcja aktywacji wyjścia, ukryta typu tangens hiperboliczny). Wyniki symulacyjne przedstawiono w pracy [10]. Ostatecznym kryterium wyboru danej struktury, była minimalizacja błędu:

$$MSE = \min \left\langle (i_{qkomp}^*)^2 - (i_{q\omega})^2 \right\rangle \quad (12)$$

oraz tętnień prędkości obrotowej, zdefiniowanej następująco:

$$\Delta\omega = \min \left\langle \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{zad}} \right\rangle = \min \left\langle \frac{\Delta\omega}{\omega_{zad}} \right\rangle \quad (13)$$

gdzie: $\Delta\omega$ - amplituda wahań prędkości, ω_{zad} - prędkość zadana.

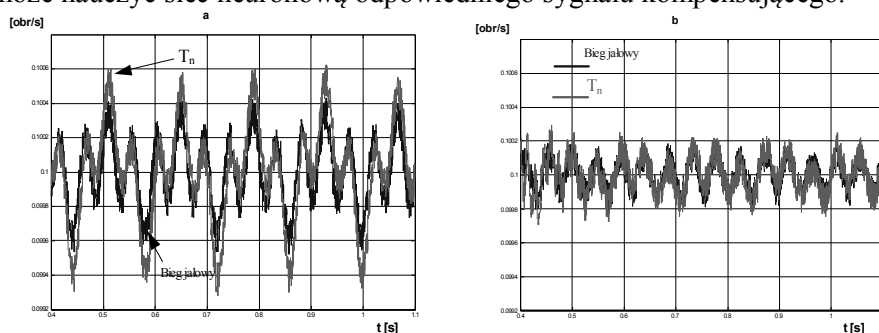
4. BADANIA LABORATORYJNE

Badania eksperymentalne przeprowadzono na stanowisku składającym się z napędu bezpośredniego z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych, falownika tranzystorowego IGBT i układu sterowania z procesorem sygnałowym ADSP – 21060. Rejestrację przebiegów przeprowadzono za pomocą oscyloskopu cyfrowego Tektronix serii DPO3014. Próbkę rejestrowanych sygnałów zostały zapisane w pamięci wewnętrznej oscyloskopu w plikach typu „.isf”. Następnie za pomocą skryptu programowego Matlab zostały poddane obróbce w celu dokładnej analizy uzyskanych wyników.

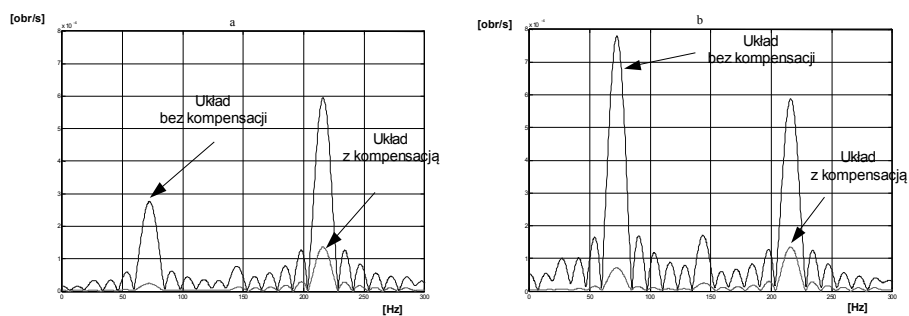
Porównując amplitudę nierównomierności prędkości obrotowej pomiędzy rysunkami 5a (bez kompensacji neuronowej) i 5b (z kompensacją neuronową) można stwierdzić znaczne zmniejszenie nierównomierności prędkości obrotowej na rysunku 5b. Przeprowadzona analiza widma harmonicznych (FFT) prędkości obrotowej (6a) ujawniła trzy dominujące składowe tętnień momentu: zaczepowego o składowej równej 216Hz, wzajemnego, który zależy od wartości prądu w osi q, o częstotliwości 72 i 144Hz. Kompensator neuronowy, zarówno w jednym jak i drugim przypadku doskonale tłumi dominujące składowe (6b).

5. WNIOSKI

Przedstawione wyniki laboratoryjne potwierdzają, słuszność przyjętego założenia, że za pomocą sztucznych sieci neuronowych można kompensować moment tętniący, który staje się przyczyną wzrostu nierównomierności prędkości obrotowej. W pracy autor zaproponował koncepcję uczenia sieci neuronowej, która umożliwiła zdecydowane zmniejszenie tętnień prędkości obrotowej w układzie rzeczywistym. Takie podejście do zadania, zwalnia projektanta od dokładnej identyfikacji silnika, który na podstawie sygnałów prądu zadanego może nauczyć się sieci neuronową odpowiedniego sygnału kompensującego.



Rys. 5. Przebieg prędkości obrotowej bez kompensacji (a) i z kompensacją (b) neuronową dla biegu jałowego i z obciążeniem znamionowym T_n



Rys. 6. Tętnienia prędkości obrotowej z układem kompensacji i bez kompensacji neuronowej dla: biegu jałowego (a) i z obciążeniem T_n (b)

LITERATURA

- [1] Holtz J., Springop L.: Identification and Compensation of Torque Ripple in High-Precision Permanent Magnet Motor Drives, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol.43, No.2, April 1996, pp.309-320.

- [2] D.-W. Chung, S.-K. Soul :Analysis and Compensation of Current Measurement Error in Vector – Controlled AC Motor Drives, *IEEE Transaction on Industrial Applications*, Vol.34, No.2, March/April 1998, pp.340-345.
- [3] Deskur J., Kaczmarek T., Nierównomierność prędkości napędu bezpośredniego z silnikiem momentowym, *Studia z Automatyki i Informatyki*, tom 30, Poznań 2005.
- [4] Grcar B., Cafuta P., Stumberger G. Stanković A.M. Control-Based Reduction of Pulsating Torque for PMAC Machines, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol.17, No.2, June 2002, pp.169-175.
- [5] Brock S., Deskur J.: Praktyczne podejście do kompensacji tętnień momentu w precyzyjnym bezpośrednim napędzie z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi, VII Krajowa Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym, SENE 2005, Łódź-Arturówek, 23-25 listopada 2005r.,str.45-50.
- [6] Ferreti G., Magnani G. Rocco P. :Modeling, Identification, and Compensation of Pulsating Torque for PMAC Machines, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol.45, No.6, December 1998, pp.912-920
- [7] Stamenković I., Jovanović D., Vukosavić S.: Torque ripple Verification in PM Machines, EUROCON 2005, Serbia&Montenegro, Belgrade, November 22-24, 2005.
- [8] Odporne sterowanie precyzyjnym napędem bezpośrednim z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych, Sprawozdanie z projektu badawczego KBN 8T10A 07521, Poznań 2004.
- [9] Norgaard M., Ravn O., Poulsen N.K., Hansen L.K.(2000), „Neural Networks for Modelling and Control of Dynamic Systems”, Springer-Verlag London 2000
- [10] Pajchrowski T. „Zastosowanie sieci neuronowej do poprawy nierównomierności prędkości obrotowej silnika momentowego”, X Krajowa Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym, SENE 2011, Łódź, 16-18 listopada 2005r.

TORQUE RIPPLE COMPENSATION IN THE DIRECT DRIVE WITH PMSM

This article presents the issue of speed ripple in the direct drive synchronous motor with permanent magnets. The paper presents the cause of ripple speed which is torque ripple. This is important in the drive machine tools and robots, because it reduces the accuracy of the drive, despite the small amplitude of this torque. Therefore, these motion drives we want to smooth the electromagnetic torque, because they decrease the speed ripple. In the paper to achieve a smooth torque and reducing speed ripple, compensation was introduced, using artificial neural networks.

Artykuł wykonany w ramach projektu NCN nr N N510 146638