

Neuronowy estymator położenia biegunów wirnika silnika synchronicznego z magnesami trwałymi

Streszczenie. W artykule opisano projekt neuronowego estymatora położenia wirnika silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (PMSM). Opisana metoda estymacji położenia stanowi rozwinięcie metody PIPCRM. Nowością w stosunku do oryginalnej wersji, jest zastosowanie do wyznaczania położenia wirnika, jednokierunkowej sztucznej sieci neuronowej. W artykule zawarto opis sposobu doboru optymalnej konfiguracji sieci oraz narzędzia, jakie wykorzystano do tego celu. Poprawność działania zaproponowanej metody została zweryfikowana w laboratoryjnym układzie napędowym z silnikiem PMSM.

Abstract. The paper presents the design of the neural estimator of the rotor position for permanent magnet synchronous motor (PMSM). Presented method bases on sensorless PIPCRM idea. However a different way of position calculation is proposed. Now it is based on an artificial neural network. The paper includes a description of the optimal configuration of the neural network selection and the tools that were used for this purpose. Proposed estimation algorithm has been verified in the laboratory system with the PMSM motor. (A neural estimator of the rotor poles position for the permanent magnet synchronous motor).

Słowa kluczowe: PMSM, sterowanie bezczujnikowe, metoda PIPCRM, sztuczne sieci neuronowe

Keywords: PMSM, sensorless control, PIPCRM method, artificial neural network

Wstęp

Obserwowany w ostatnich latach wzrost wymagań stawianych układom napędowym z silnikami PMSM odnośnie dynamiki, sprawności czy niezawodności działania, przyczynił się do dynamicznego rozwoju wektorowo zorientowanych bezczujnikowych (ang. sensorless) algorytmów sterowania [1][2]. Rezygnacja z zewnętrznego przetwornika elektromechanicznego w pętli sprzężenia zwrotnego umożliwiła wzrost niezawodności całego systemu napędowego, jak również zmniejszenie jego masy, wymiarów oraz ceny. W bezczujnikowych układach sterowania, do estymacji aktualnego położenia kąowego biegunów magnetycznych wirnika, względem nieruchomego obwodu stojana wykorzystuje się, łatwo mierzalne wielkości elektryczne takie jak prądy i napięcia zasilające układ.

W niniejszym artykule zostanie opisana jedna z metod bezczujnikowego odtwarzania położenia kąowego wirnika silnika PMSM. Opisywana metoda jest rozwinięciem metody PIPCRM (ang. Position Identification by Parallel Current Rate Measurement) opisanej w artykułach [3][4][5]. Różnica w stosunku do oryginalnej wersji, polega na zastosowaniu odmiennego sposobu wyodrębniania informacji o położeniu wirnika z odpowiedzi prądowych maszyny z magnesami trwałymi, do którego wykorzystano jednokierunkową sztuczną sieć neuronową (ang. Artificial Neural Network, ANN).

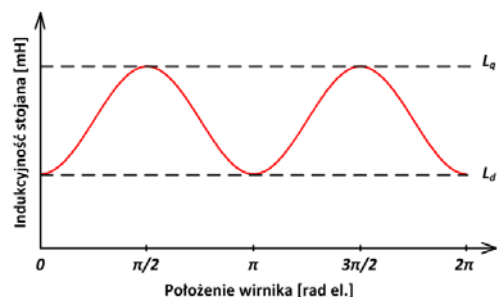
Metody odtwarzania położenia kąowego wirnika

Bezczujnikowe metody wyznaczania położenia kąowego wirnika, można podzielić na dwie kategorie, metody fizyczne oraz metody algorytmiczne [6]. Podstawą działania metod algorytmicznych jest znajomość opisu matematycznego silnika. Metody te do odtwarzania położenia wykorzystują, przygotowany off-line, model maszyny oraz informację o aktualnych wartościach napięć i prądów zasilających układ. W przypadku metod fizycznych, wykorzystuje się specyficzne właściwości obwodu magnetycznego silnika z magnesami trwałymi. Poprzez analizę zmian indukcyjności uzwojeń stojana można dokonać identyfikacji położenia kąowego wirnika.

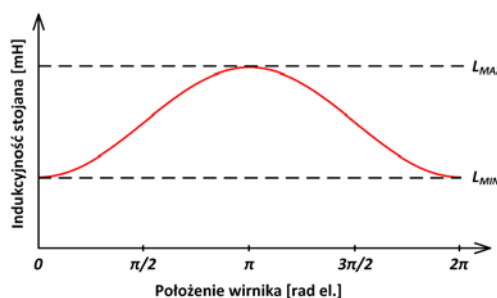
Popularną metodą algorytmiczną jest metoda bazująca na estymacji siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniach silnika przy poruszającym się wirniku [7][8]. Ponieważ, wartość indukowanej w uzwojeniach stojana SEM jest proporcjonalna do prędkości obrotowej wirnika,

metoda estymacji siły elektromotorycznej daje dobre rezultaty w zakresie średnich i wysokich prędkości wirowania. Stosowanie tej metody przy niskich prędkościach obrotowych jest kłopotliwe ze względu na niewielką wartość indukowanej w uzwojeniach siły elektromotorycznej oraz konieczność uwzględniania rezystancji uzwojeń w modelu matematycznym silnika. Zdecydowanie lepsze wyniki odtwarzania położenia biegunów magnetycznych wirnika przy niskich prędkościach obrotowych można uzyskać stosując jedną z metod fizycznych, których dodatkową zaletą jest możliwość określenia położenia spoczynkowego wirnika.

Metody fizyczne mogą wykorzystywać zarówno naturalne zmiany indukcyjności uzwojeń w funkcji położenia kąowego wirnika (rys.1), jak i zmiany indukcyjności występujące w stanie nasycenia obwodu magnetycznego silnika (rys.2).



Rys.1. Naturalne zmiany indukcyjności uzwojenia stojana w funkcji położenia kąowego wirnika.



Rys.2. Zmiany indukcyjności stojana w funkcji położenia kąowego wirnika, w stanie nasycenia obwodu magnetycznego.

Wybór konkretnej metody fizycznej determinowany jest wielkością asymetrii obwodu magnetycznego maszyny, tj. różnicy pomiędzy indukcyjnościami uzwojeń sprowadzonymi do układu wirującego dq . Wielkość asymetrii zależy od konstrukcji silnika. W przypadku silników PMSM, w których magnesy trwale są zagłębione w wirniku (ang. Interior PMSM, IPMSM) opisywana asymetria magnetyczna jest widoczna. Analizując naturalne zmiany indukcyjności uzwojeń, możliwe jest określenie położenia biegunów magnetycznych wirnika. Dla silników, w których magnesy trwale umieszczone są na powierzchni wirnika (ang. Surface Mount PMSM, SMPMSM) omawiana asymetria jest niewielka, reaktancje w osiach d i q są porównywalne, przez co określenie położenia jest łatwiejsze w stanie nasycenia obwodu magnetycznego. Popularnym sposobem wykorzystującym opisywaną asymetrię silników PMSM do określenia położenia wirnika, jest metoda polegająca na pomiarze reaktancji uzwojeń poprzez wymuszenie przepływu prądu wysokiej częstotliwości w uzwojeniach silnika (ang. High Frequency Injection), bez wprowadzania obwodu magnetycznego w stan nasycenia [9][10][11]. Stosując wysokoczęstotliwościowy sygnał pomiarowy można pominąć wpływ rezystancji na wynik pomiaru, jednak metoda ta wymaga stosowania filtrów pasmowych wprowadzających dodatkowe opóźnienia w torze regulacji. Ponadto maksymalna częstotliwość sygnału pomiarowego ograniczona jest, przez maksymalną częstotliwość sygnału PWM sterującego pracą tranzystorów falownika [6]. Pewną niedogodnością w przypadku stosowania opisywanej metod jest fakt, że mierzona indukcyjność jest funkcją podwójnego kąta położenia wirnika, co w porównaniu do analizy indukcyjności w stanie nasycenia może wprowadzać niejednoznaczność określenia położenia. Realizacja opisywanych metod fizycznych polega na wygenerowaniu przez mostek falownika określonych sekwencji przełączeń tranzystorów, w czasie których nie jest realizowane zadanie sterowania momentem wytwarzanym przez silnik. Powoduje to, że metody te stosowane są przeważnie przy niskich prędkościach obrotowych. Popularnym zabiegiem jest łączne wykorzystywanie obu metod - fizycznej i algorytmicznej, w beczujnikowym układzie sterowania, przy czym metody fizyczne wykorzystywane są do określania położenia wirnika w stanie spoczynku i przy niewielkich prędkościach wirowania, a metody algorytmiczne dla określenia położenia przy średnich i wysokich prędkościach obrotowych [9][12].

W dalszej części artykułu zostanie opisana dokładniej metoda PIPCRM, którą można zaliczyć do grona metod fizycznych wykorzystujących pomiar indukcyjności uzwojeń w stanie nasycenia obwodu magnetycznego do określenia położenia biegunów wirnika.

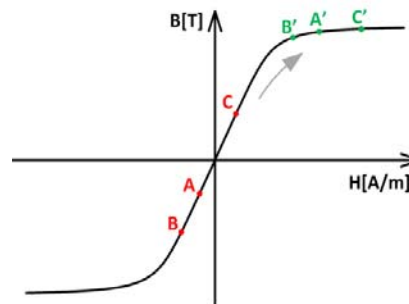
Metoda PIPCRM

W metodzie PIPCRM, poprzez wprowadzenie obwodu magnetycznego maszyny PMSM w stan nasycenia uzyskuje się gwałtowny spadek indukcyjności uzwojeń stojana. Punkty pracy dla każdego z obwodów magnetycznych przemieszczają się w obszar nieliniowy charakterystyki magnesowania (rys.3).

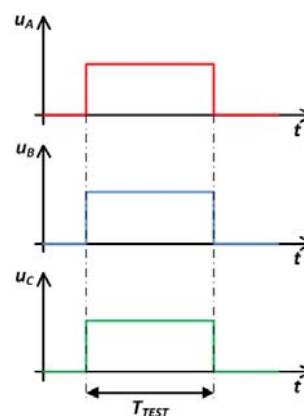
W stanie nasycenia indukcyjności poszczególnych cewek stojana różnią się, a ich wartości są funkcjami położenia osi magnetycznych wirnika.

Wprowadzenie obwodów magnetycznych w stan nasycenia w metodzie PIPCRM uzyskuje się poprzez jednoczesne zasilenie wszystkich trzech uzwojeń silnika napięciem testowym U_{TEST} o zadanym kształcie, przez czas T_{TEST} (rys.4).

Jednoczesne zasilenie uzwojeń napięciem testującym, powoduje wytworzenie przez cewki stojana dodatkowego strumienia magnetycznego Ψ_D , którego wartość dana jest wzorem (1).



Rys.3. Przemieszczenie punktów pracy na charakterystyce magnesowania, odpowiednio dla faz A, B, C

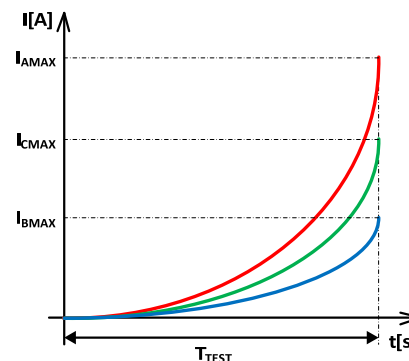


Rys.4. Przebiegi czasowe napięć testujących

$$(1) \quad \Psi_D = \int_0^{T_{TEST}} U_{TEST} dt$$

Strumień magnetyczny Ψ_D dodając się do strumienia pochodzącego od magnesów trwałych wirnika, przesuwa punkt pracy obwodu magnetycznego w zakres pracy nieliniowej.

Przyłożenie skoku napięcia testującego U_{TEST} powoduje dodatkowo przepływ prądów w uzwojeniach stojana. Przykładowe przebiegi prądów będących odpowiedzią na napięcie testujące U_{TEST} pokazano na rysunku 5.



Rys.5. Przykładowe uproszczone przebiegi prądów pomiarowych w czasie trwania impulsu testującego U_{TEST}

W metodzie PIPCRM do bezpośredniej identyfikacji kąta pomiędzy układami współrzędnych związanymi z wirnikiem i stojanem wykorzystywane są wartości szczytowe prądów fazowych w chwili czasu T_{TEST} . Ponieważ indukcyjności poszczególnych faz są funkcjami położenia wirnika, stąd wartości maksymalne impulsów prądowych w chwili T_{TEST} , w poszczególnych fazach, różnią się od siebie. Opierając się na analizie tych wartości można wyznaczyć aktualne położenie wirnika. Praktyczna realizacja metody PIPCRM wymaga specjalnej konstrukcji ze strony przekształtnika – topologia czterogałęziowa, jak i ze strony silnika, w którym muszą być wyprowadzone na zewnątrz wszystkie końce uzwojeń lub punkt neutralny w przypadku połączenia silnika w gwiazdę.

Badania laboratoryjne

Opisywana w poprzednim rozdziale metoda identyfikacji położenia biegunów wirnika silnika PMSM, została zaimplementowana na stanowisku laboratoryjnym pokazanym na rysunku 6. W tabeli 1, zestawiono parametry znamionowe badanego silnika.



Rys. 6. Laboracyjny zestaw maszynowy z silnikiem PMSM

Tabela 1. Parametry znamionowe silnika PMSM

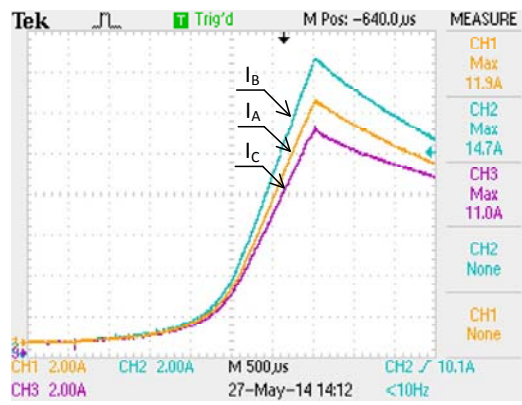
Moc	P	40	kW
Prędkość	Ω	3000	obr/min
Moment	T_e	127	Nm
Rezystancja stojana	R_s	0,247	Ω
Indukcyjność stojana	L_s	134	μH
liczba biegunów	p	16	-

Wykorzystany do badań silnik z magnesami trwałymi posiada budowę tarczową; magnesy trwałe naklejone są na powierzchni dwóch tarcz pełniących rolę wirnika. Układ sterowania został wykonany w oparciu o kontroler sygnałowy TMS320F28335 produkcji firmy Texas Instruments. Do weryfikacji poprawności odtwarzania położenia wirnika został wykorzystany 13-bitowy enkoder absolutny zamontowany na wale maszyny. Przykładowe odpowiedzi prądowe układu na wymuszenie w postaci skoków napięcia testującego, dla zadanych położań wirnika, pokazano na rysunkach 7 oraz 8, odpowiednio dla kąta obrotu θ równego $\pi/2 \text{ rad el.}$ oraz $\pi \text{ rad el.}$ pomiędzy układami odniesienia związanymi z wirnikiem i stojanem. Czas trwania impulsów pomiarowych wynosił 3 ms, przy napięciu w obwodzie pośredniczącym równym 40 V.

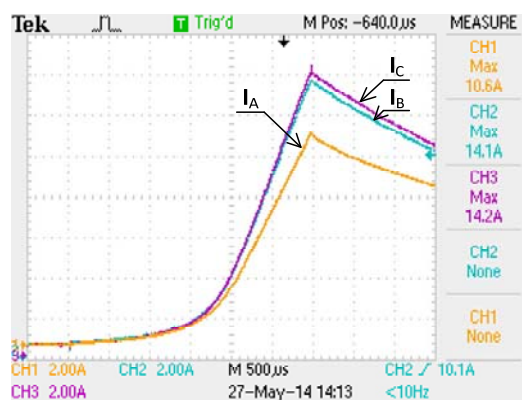
Na rysunku 9, przedstawiono zależność odpowiedzi prądowych w funkcji mechanicznego położenia wirnika maszyny pokazanej na rysunku 6.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów, zaobserwowano, że amplituda zmian odpowiedzi prądowych jednego z uzwojeń stojana jest mniejsza od

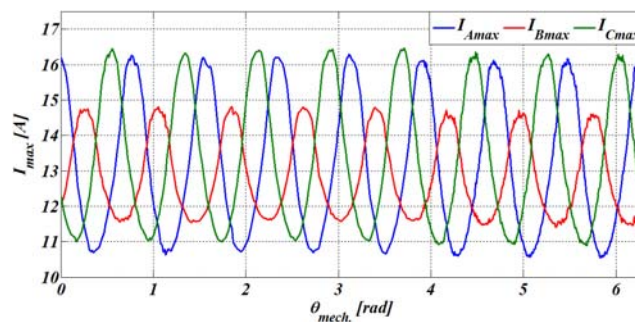
pozostałych. Asymetria ta może wynikać z nieprecyzyjnego wykonania maszyny (badana maszyna została dostarczona przez producenta, jako egzemplarz prototypowy).



Rys. 7. Odpowiedzi prądowe układu przy kącie $\theta = \pi/2 \text{ [rad el.]}$, pomiędzy układami współrzędnych stojana i wirnika



Rys. 8. Odpowiedzi prądowe układu przy kącie $\theta = \pi \text{ [rad el.]}$, pomiędzy układami współrzędnych stojana i wirnika



Rys. 9. Rozkład zmierzonych wartości odpowiedzi prądowych w funkcji położenia mechanicznego wirnika maszyny z magnesami trwałymi

Projekt neuronowego estymatora położenia wirnika

W oryginalnej wersji metody PIPCRM wyznaczenie położenia biegunów magnetycznych wirnika polegało na dokonaniu odpowiednich przekształceń na odpowiedziach prądowych układu i odtwarzaniu na podstawie ich analizy kąta obrotu pomiędzy układami współrzędnych wirnika i stojana [3]. W niniejszej pracy do ekstrakcji informacji o położeniu biegunów z odpowiedzi prądowych została wykorzystana jednokierunkowa sztuczna sieć neuronowa.

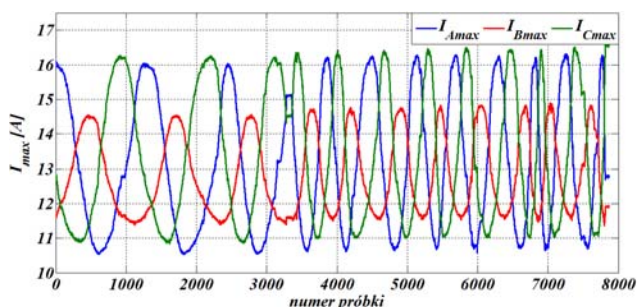
Sztuczne sieci neuronowe (SSN) są nowoczesnymi strukturami służącymi do przetwarzania danych, których zasada działania wzoruje się na sposobie przetwarzania informacji w systemie nerwowym istot żywych. Podstawowymi jednostkami przetwarzającymi informację w

SSN są neurony powiązane ze sobą za pomocą połączeń o parametrach (wagach) modyfikowanych w trakcie procesu uczenia [13]. Proces uczenia sieci polega na adaptacji parametrów sieci (wag neuronów) poprzez pobudzenie jej określonymi wymuszeniami i modyfikacji ich tak, aby uzyskać pożądaną reakcję systemu.

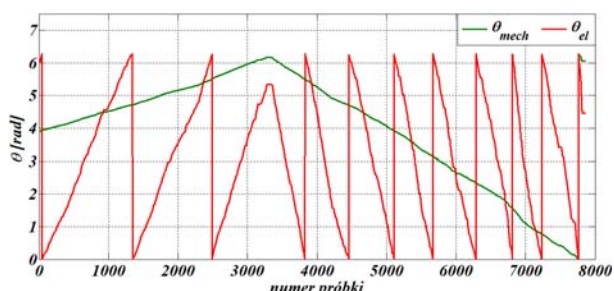
Założenia, które przyjęto w czasie projektowania neuronowego estymatora położenia:

- jednokierunkowa architektura sieci
- jedna warstwa ukryta
- funkcja aktywacji neuronów warstwy ukrytej- tangens hiperboliczny
- funkcja aktywacji neuronów warstwy wyjściowej- liniowa

Ważnym elementem w trakcie projektowania SSN jest odpowiedni dobór składowych wektora danych uczących. W projektowanym neuronowym estymatorze położenia biegunów wirnika, wektor danych uczących jest wektorem trójelementowym, zawierającym wartości maksymalne impulsów prądowych, odpowiadających aktualnemu, w czasie pomiaru, położeniu kątowemu wirnika (metoda PIPCRM). Do nauki sieci neuronowej, wykorzystano metodę uczenia „z nauczycielem”, gdzie w roli nauczyciela wystąpił sygnał referencyjny z enkodera absolutnego zamontowanego na wale silnika. Na rysunku 10 pokazane zostały składowe wektora danych uczących, które zostały wykorzystane do uczenia sieci, natomiast na rysunku 11 przedstawiono odpowiadający im przebieg zmian położenia kąowego biegunów magnetycznych wirnika (θ_{el}) oraz położenia mechanicznego wału maszyny (θ_{mech}).

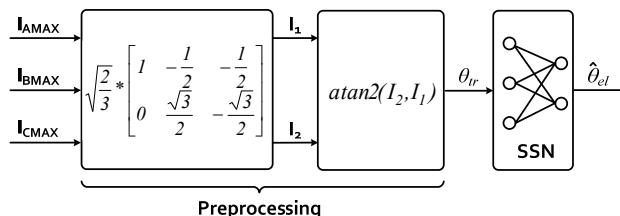


Rys.10. Składowe wektora danych uczących



Rys.11. Przebieg referencyjny zmian położenia kąowego wału maszyny, odpowiadający zmienności sygnałów z rysunku 11

W celu ograniczenia rozmiaru sieci neuronowej, a tym samym czasu potrzebnego na jej realizację, w projekcie estymatora zastosowano wstępne przetworzenie sygnałów uczących (ang. preprocessing). Odpowiedni dobór sposobu przetworzenia danych wejściowych jest istotny. Ważne jest, aby wykonana transformacja niosła ze sobą możliwie dużo informacji o przebiegu estymowanym [14]. W projektowanym estymatorze położenia faza przetwarzania wstępnego składa się z dwóch przekształceń (rys.12), w wyniku których uzyskiwany jest przebieg testujący θ_{tr} .

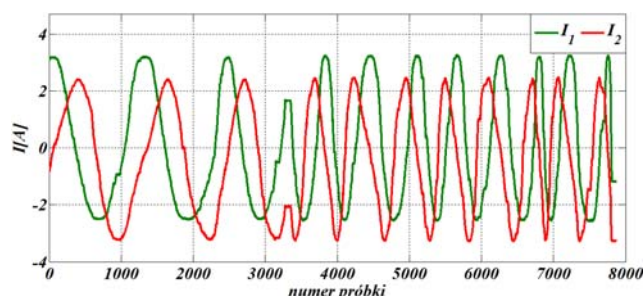


Rys.12. Wstępne przetwarzanie sygnałów wejściowych projektowanego estymatora

W pierwszym przekształceniu na sygnałach wejściowych (rys. 10) dokonywana jest transformacja dana wzorem (2).

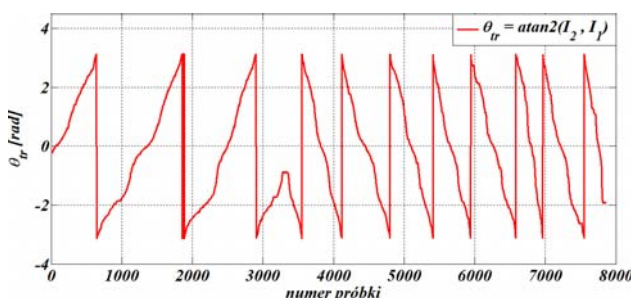
$$(2) \quad \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{AMAX} \\ I_{BMAX} \\ I_{CMAX} \end{bmatrix}$$

Otrzymane w ten sposób sygnały I_1, I_2 przedstawione są na rysunku 13.



Rys.13. Wstępne przetwarzanie sygnałów wejściowych sieci neuronowej

W fazie drugiej, na otrzymanych sygnałach dokonywana jest transformacja z wykorzystaniem dwuargumentowej funkcji arcus tangens. Uzyskany w ten sposób sygnał wejściowy θ_{tr} sieci neuronowej pokazany jest na rysunku 14. Ma on charakter podobny do sygnału referencyjnego pochodzącego z enkodera i został on wykorzystany do finalnego uczenia sieci.

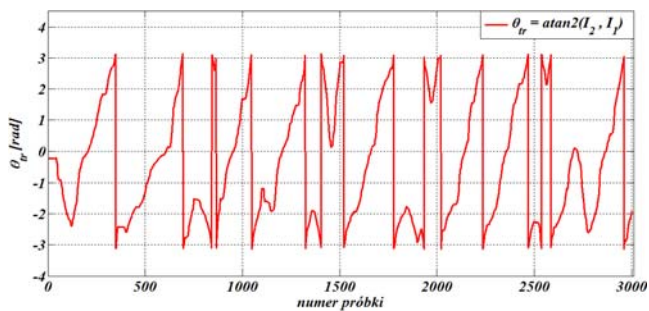


Rys.14. Drugie przetworzenie sygnałów uczących

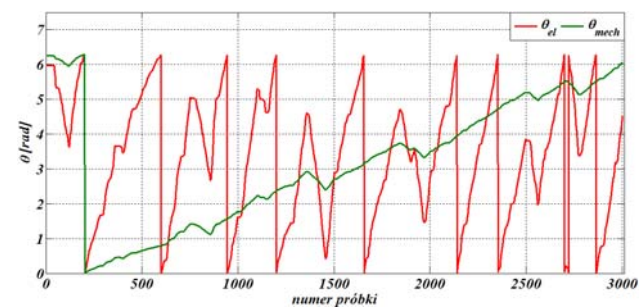
Uczenie sieci

Do nauki SSN oraz jej testów wykorzystano oprogramowanie Matlab R2013a firmy Mathworks, wraz z dołączonym do niego dodatkiem wspomagającym projektowanie sieci neuronowych Neutral Network Toolbox w wersji 8.0.1. Jako sygnał uczący wykorzystano sygnał uzyskany w procesie przetwarzania wstępnego (rys.14) odpowiedzi prądowych silnika, przedstawionych na rysunku 10. Testowanie sieci zostało przeprowadzone za pomocą przebiegu θ_{tr} pokazanego na rysunku 15, któremu

odpowiadają rzeczywiste zmiany położenia kąтового wału maszyny zarejestrowane za pomocą czujnika położenia wirnika. Rzeczywiste zmiany mechanicznego kąta θ_{mech} oraz elektrycznego kąta θ_{el} położenia wirnika przedstawiono na rysunku 16.



Rys.15. Przebieg wejściowego sygnału testującego θ_{tr} dla estymatora położenia



Rys.16. Przebieg rzeczywistych zmian położenia kąowego θ_{el} oraz θ_{mech}

Testowaniu poddano sieci o następujących strukturach: 1-2-1; 1-3-1; 1-4-1; 1-5-1; 1-6-1; 1-7-1; 1-8-1; 1-9-1; 1-10-1; przy czym kolejne cyfry oznaczają odpowiednio: liczbę sygnałów wejściowych, liczbę neuronów warstwy ukrytej, liczbę sygnałów wyjściowych. Do oceny działania zaproponowanych struktur wykorzystano wartość błędu średniokwadratowego (3) odtwarzania położenia elektrycznego wirnika.

$$(3) \quad mse = \frac{1}{N} \sum_1^N (\theta_{el} - \hat{\theta}_{el})^2$$

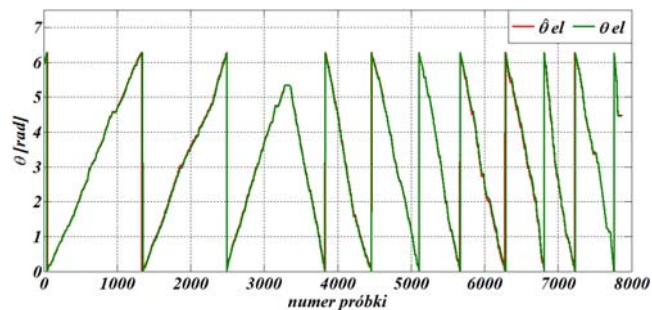
gdzie: θ_{el} – wartość referencyjna położenia, $\hat{\theta}_{el}$ – wartość odtworzona przez sieć

Wyniki testów wszystkich struktur sieci zestawiono w tabeli 2. Ze względu na to, że zastosowany algorytm uczenia sieci dobiera wartości początkowe wag poszczególnych neuronów w sposób losowy, zestawione w tabeli 1 wyniki, są wartością uśrednioną z dziesięciu prób uczenia sieci.

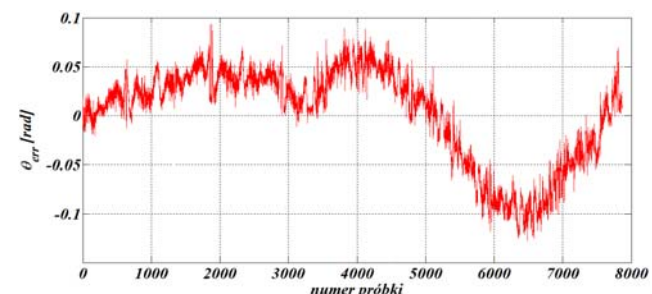
Tabela 2. Porównanie wartości błędu średniokwadratowego mse wyznaczania położenia wirnika za pomocą sieci neuronowych o różnych topologiach

Topologia sieci	mse
1-2-1	0.209557
1-3-1	0.193033
1-4-1	0.184759
1-5-1	0.182505
1-6-1	0.197448
1-7-1	0.198019
1-8-1	0.283673
1-9-1	0.230233
1-10-1	0.313625

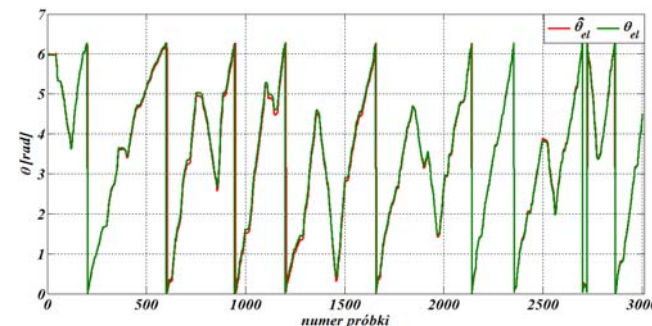
Porównując otrzymane wyniki, należy stwierdzić, że wraz ze wzrostem liczby neuronów powyżej pięciu w pierwszej warstwie ukrytej, wzrasta błąd odtwarzania - sieć staje się bardziej wrażliwa na skokowe zmiany sygnału wejściowego. W dalszych badaniach eksperymentalnych zdecydowano się na wykorzystanie sieci o strukturze 1-5-1 o jednej warstwie ukrytej z pięcioma neuronami. Na rysunkach 17 - 20 zestawiono przebiegi ukazujące efekt działania wybranej struktury estymatora przy pobudzeniu sygnałem testowym i uczącym.



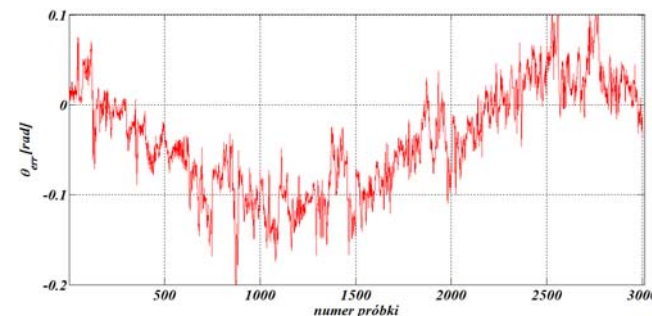
Rys.17. Porównanie wyniku działania sieci z przebiegiem uczącym



Rys.18. Błąd odtwarzania położenia dla przebiegu uczącego

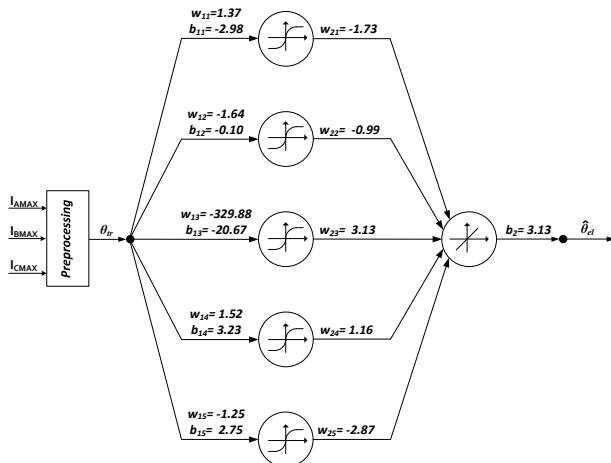


Rys.19. Porównanie rzeczywistego przebiegu testującego θ_{el} z przebiegiem $\hat{\theta}_{el}$ uzyskanym w wyniku działania sieci na przebiegu testującym



Rys.20. Błąd odtwarzania położenia

Budowa sieci wraz z wartościami wag uzyskanymi w procesie uczenia została przedstawiona na rysunku 21.



Rys.21. Budowa neuronowego estymatora położenia kąowego wirnika

Podsumowanie

W artykule przedstawiono metodę wyznaczania położenia biegunów magnetycznych wirnika silnika z magnesami trwałymi. Pokazana metoda bazuje na idei metody PIPCRM, jednakże sposób ekstrakcji położenia wirnika z pomierzonych odpowiedzi prądowych został zrealizowany według nowej koncepcji – za pomocą neuronowego estymatora położenia kąowego wirnika. Zaproponowana struktura odtwarzania położenia została zaimplementowana i przetestowana w układzie laboratoryjnym z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi, o mocy 40 kW, o ośmiu parach biegunów. Wyniki badań eksperymentalnych pokazały, że maksymalne wartości błędów odtwarzania położenia zaproponowaną metodą, wyniosły około $+0.1 \text{ rad el.} / -0.2 \text{ rad el.}$ ($+5,8^\circ \text{el.} / -11,6^\circ \text{el.}$) wzdłuż całego obwodu maszyny, co dla badanego silnika odpowiada błędowi pozycjonowania na poziomie $+0,725^\circ \text{mech.} / -1,45^\circ \text{mech.}$ Opracowany estymator może zostać z powodzeniem wykorzystany do identyfikacji spoczynkowego położenia biegunów magnetycznych wirnika. W dalszej części badań omawiana metoda zostanie zaimplementowana w bezczujnikowym wektorowym układzie sterowania silnikiem PMSM przy niskich prędkościach wirowania.

LITERATURA

- [1] Nguyen Khanh Quang; Nguyen Trung Hieu; Hunter, G.P.; Ha, Q.P., "FPGA-based sensorless PMSM drive using parallel reduced-order Extended Kalman Filter", 2012 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), pp.164-169, 26-29 Nov. 2012
- [2] Hyun Lee; Jangmyung Lee, "Design of Iterative Sliding Mode Observer for Sensorless PMSM Control", IEEE Transactions on control systems technology, vol. 21, no. 4, July 2013
- [3] Wiśniewski J.; Jakubowski P.; Koczara W.; Al-Khayat N., "Poles position identification of permanent magnet axial flux

- motor using PIPCRM sensorless method", 12th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2007, 2 – 5.09.2007, Aalborg, Denmark
- [4] Wiśniewski J.; Koczara W., "Control of Axial Flux Permanent Magnet Motor by the PIPCRM Method at Standstill and at Low Speed", 13th International Conference on Power Electronics and Motion Control, EPE-PEMC 2008, 1-3.09.2008, Poznań, Poland
- [5] Wiśniewski J.; Koczara W., „Bezczujnikowa praca silnika z magnesami o polu osiowym w zakresie niskich prędkości wirowania”, *Zeszyty Problemowe- Maszyny Elektryczne*, nr 82/2009, 27-31
- [6] Zawirski K., „Sterowanie silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych”, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2005
- [7] Genduso F.; Miceli R.; Rando C.; Galluzzo G.R., "Back EMF Sensorless-Control Algorithm for High-Dynamic Performance PMSM", IEEE Transactions on control systems technology, vol. 57, no. 6, JUNE 2010
- [8] Aite Driss Y.; Yousfi D., "PMSM sensorless control using back-EMF based position and speed estimation method", *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, vol., no., pp.436-440, 7-9 March 2013
- [9] Vosmik D.; Smidl V.; Peroutka Z., "Sensorless PMSM control: Hybrid rotor position estimator using maximum likelihood model selection", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, vol., no., pp.1,6, 28-31 May 2013
- [10] Qi Jilong; Tian Yantao; Gong Yimin; Zhucheng, "A sensorless initial rotor position estimation scheme and an Extended Kalman Filter observer for the direct torque controlled Permanent Magnet Synchronous Motor Drive", *International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2008.*, pp.3945-3950, 17-20 Oct. 2008
- [11] Bolognani S.; Calligaro S.; Petrella R.; Tursini M., "Sensorless Control of IPM Motors in the Low-Speed Range and at Standstill by HF Injection and DFT Processing", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.47, no.1, pp.96-104, Jan.-Feb. 2011
- [12] Robeischl E.; Schroedl M.; Krammer M., "Position-sensorless biaxial position control with industrial PM motor drives based on INFORM- and back EMF model", *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, IECON 02*, vol.1, pp.668-673, 5-8 Nov. 2002
- [13] Urbański K.; Pajchrowski T., „Zastosowanie DSP do odpornej regulacji prędkości SSMT z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej”, V Krajowa Konferencja Naukowa SENE 2001, Łódź, Poland
- [14] Orłowska-Kowalska T.; Lewandowski M., "Neuronowy estymator prędkości w układzie wektorowego sterowania silnikiem indukcyjnym", *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 56, ser. Studia i Materiały, Nr 24, 2004, 291–306*

Autorzy:

mgr inż. Tomasz Miazga, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: tomasz.miazga@ee.pw.edu.pl
 dr inż. Janusz Wiśniewski, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: janusz.wisniewski@ee.pw.edu.pl