

Piotr FILIPEK

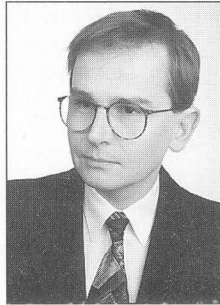
POLITECHNIKA LUBELSKA, WYDZIAŁ INFORMATYKI I ELEKTROTECHNIKI, KATEDRA NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH

Sterowanie silnika indukcyjnego na podstawie estymowanego sygnału prędkości kątowej

Dr inż. Piotr FILIPEK

Adiunkt w Katedrze Napędów Elektrycznych Politechniki Lubelskiej. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w 2001 r. w Politechnice Lubelskiej. Jego zainteresowania naukowe skupiają się na wykorzystaniu mikroprocesorów i sztucznej inteligencji w sterowaniu elektrycznych układów napędowych.

e-mail: phil@elektron.pol.lublin.pl



Streszczenie

W artykule przedstawiono porównanie dwóch koncepcji estymatorów prędkości kątowej silnika indukcyjnego - układu z modelem wzorcowym i modelem nadsztywnym strumienia wirnika oraz układu opartego na liniowej sieci neuronowej uczonej on-line. Szacowany przez nie sygnał prędkości wykorzystywano do śledzenia prędkości jak też w układzie automatycznej regulacji do realizacji sterowania wektorowego. Na drodze symulacji komputerowej oraz eksperymentów laboratoryjnych poddano analizie precyzję identyfikacji prędkości w stanach ustalonych i dynamicznych w różnych obszarach pracy. Przedstawiono wyniki badań wrażliwości estymatorów na odstrojenie parametrów modelu silnika.

Abstract

The paper presents the comparison of two speed estimator concepts: MRAS type and system based on linear neural network trained on-line. Estimated signal was not only used for speed tracking but also in automatic control system and indirect rotor field oriented control. Speed estimation performances were examined through computer simulations and laboratory tests for dynamic and steady states in wide operation range. The test results of estimator sensitivity to motor model parameters variation are presented in the paper.

Słowa kluczowe: sterowanie połowo-zorientowane, estymacja prędkości, sieć neuronowa, układ adaptacyjny

Keywords: field oriented control, speed estimation, neural network, adaptive system

1. Wstęp

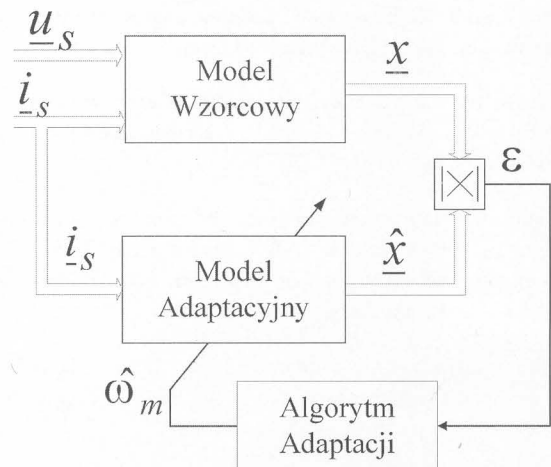
Stosowane na coraz szerszą skalę metody precyzyjnego sterowania silników indukcyjnych, zapewniające szybką odpowiedź dynamiczną (sterowanie połowo-zorientowane, bezpośrednie sterowanie momentu i strumienia), wymagają znajomości aktualnej prędkości mechanicznej. Jednakże sygnał ten nie zawsze jest bezpośrednio dostępny lub nie jest wskazane montowanie na wale silnika czujników mechanicznych. Wyeliminowanie mechanicznego czujnika prędkości i szacowanie tego sygnału wyłącznie na podstawie pomiaru prądów i napięć może przynieść szereg korzyści finansowych jak i eksploatacyjnych. Dużym utrudnieniem w realizacji tego zadania w przypadku napędów z silnikami indukcyjnymi, jest fakt, że ich prędkość mechaniczna wirnika różni się od prędkości synchronicznej pola wirującego. Dodatkowym problemem jest nieliniowość i niestacjonarność obiektu sterowanego wywołana zmianą parametrów maszyny (temperaturowy wzrost rezystancji stojana i wirnika oraz problem nasycenia obwodu magnesującego), a także znaczne odkształcenia przebiegów prądów i napięć w przypadku zasilania z układów przekształtnikowych.

Prowadzone na świecie badania zmierzające do sterowania klatkowych silników indukcyjnych bez członu pomiaru prędkości (ang. speed sensorless) koncentrują się na poszukiwaniu algorytmów estymacji prędkości działających poprawnie w jak najszerszym zakresie zmian prędkości kątowej oraz uniezależnienia ich precyzji od zakłóceń i zmian parametrów maszyny [1]. Jedną z pożądanych

właściwości estymatorów jest również prostota algorytmu, wyrażająca się w niewielkich nakładach obliczeniowych, pozwalająca na realizację obliczeń w czasie rzeczywistym. Biorąc pod uwagę tak postawione kryteria, bardzo atrakcyjną wydaje się być grupa estymatorów z pętlą sprzężenia zwrotnego, bazujących na uproszczonym modelu dynamicznym silnika, zakładającym sinusoidalny rozkład pola w szczelinie. Dość proste i efektywne algorytmy można uzyskać stosując omówioną w dalszej części strukturę z wzorcowym i adaptacyjnym modelem MRAS [2], która dodatkowo może być uzupełniona zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych (SSN) [3-6]. W związku z powyższym, w prezentowanych badaniach porównawczych skoncentrowano się na estymatorze wykorzystującym układ złożony z modelu wzorcowego i adaptacyjnego oraz układzie wykorzystującym sztuczną sieć neuronową uczoną on-line.

2. Praktyczna realizacja estymatora z modelem wzorcowym i modelem adaptacyjnym (MRAS)

Ideę identyfikacji prędkości przy użyciu układu z wzorcowym i nadsztywnym modelem silnika (ang. Model Reference Adaptive System MRAS) ilustruje rys. 1 [2,7].



Rys. 1. Schemat blokowy estymatora prędkości typu MRAS
Fig. 1. Block diagram of MRAS speed estimator

W schemacie tym rzeczywisty silnik indukcyjny reprezentowany jest przez dwa niezależne symulatory. Model wzorcowy nie zawiera w swym opisie prędkości mechanicznej ω_m , zaś w modelu adaptacyjnym występuje ona w postaci parametru. Algorytm adaptacji zmienia prędkość kątową $\hat{\omega}_m$ tak, by zminimalizować błąd ε powstały pomiędzy wyjściami dwóch modeli. Gdy błąd ten dąży do zera, prędkość estymowana $\hat{\omega}_m$ osiąga wartość rzeczywistej prędkości mechanicznej ω_m . Rozwiązania praktyczne różnią się przede wszystkim porównywanymi wielkościami \underline{x} i $\hat{\underline{x}}$ oraz sposobami realizacji modeli odniesienia i nadsztywnych.

Idąc za przykładem [2], opracowano strukturę złożoną z dwóch niezależnych symulatorów wektora przestrzennego strumienia wirnika $\underline{\Psi}_r$, wykorzystujących powszechnie znane równania opisujące dynamikę silnika, które w jednostkach względnych przyjmują postać:

- model napięciowy strumienia wirnika (wzorcowy):

$$T_N \left(\frac{d\underline{\Psi}_r}{dt} \right) = (x_r / x_M) \cdot [\underline{u}_s - r_s \underline{i}_s - \sigma x_s T_N (d\underline{i}_s / dt)] \quad (1)$$

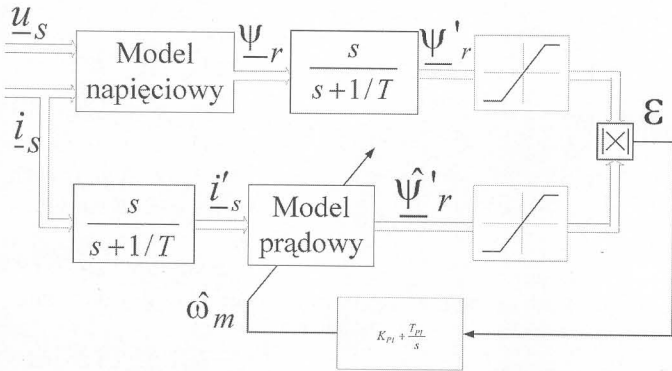
- model prądowy strumienia wirnika (adaptacyjny):

$$T_N \left(\frac{d\underline{\hat{\Psi}}_r}{dt} \right) = [-(T_N / T_r) + j\omega_m] \cdot \underline{\hat{\Psi}}_r + (T_N x_M / T_r) \cdot \underline{i}_s \quad (2)$$

gdzie: $\underline{i}_s, \underline{u}_s$ - wektory przestrzenne odpowiednio: prądu i napięcia stojana wirnika, T_r, T_N - stała czasowa wirnika i stała normalizująca, x_s, x_r, x_M - reaktancje: stojana, wirnika i magnesująca, r_s - rezystancja stojana, σ - współczynnik rozproszenia.

W przyjętej konfiguracji równanie (1), jako niepowiązane jawnie z prędkością kątową, pełni rolę modelu wzorcowego, a równanie (2) zawierające prędkość ω_m modelu nadążnego. Prędkość jest korygowana, a zarazem wyznaczana, przy użyciu członu PI na podstawie iloczynu wektorowego wektorów przestrzennych uzyskiwanych z obu modeli.

Zastosowanie w estymatorze idealnych modeli porównywanych zmiennych stanu jest trudne do realizacji ze względu na idealnego całkowania jakie występuje w modelu napięciowym będącym rozwiązaniem (1). Wymaga ono dokładnej znajomości warunków początkowych, jak też związane są z nim błędy dryftu. W efekcie powodują one niestabilność procesu estymacji. W związku z tym, w miejsce członu całkującego zastosowano człon inercyjny pierwszego rzędu [7]. Symulator strumienia powstały w wyniku tej modyfikacji może być rozpatrywany jako złożenie idealnego modelu napięciowego (1) i filtra górno-przepustowego. W celu skompensowania różnic fazowych pomiędzy dwoma modelami strumienia, wprowadzono filtr górno-przepustowy za modelem prądowym. Z doświadczeń autora niniejszej pracy wynika, że powyższe zmiany nie gwarantują stabilności procesu szacowania prędkości. Wraz ze wzrostem prędkości zwiększa się amplituda estymowanego strumienia, co pociąga za sobą również znaczne zwiększenie amplitudy oscylacji błędu identyfikacji prędkości, a w efekcie utratę stabilności procesu estymacji. Zastosowane przez autora ograniczenia amplitudy wielkości estymowanych, pozwoliły na znaczne wytłumienie tych drgań, z jednoczesnym zachowaniem informacji o fazie symulowanych zmiennych stanu rys.2. [4]



Rys. 2. Rozwiązanie praktyczne estymatora MRAS z dwoma symulatorami strumienia silnika, członem inercyjnym zamiast całkowania i ograniczeniem amplitud strumieni estymowanych
 Fig. 2. Practical realisation of MRAS estimator with two flux simulators, inertia instead of integral unit and estimated flux amplitude limits

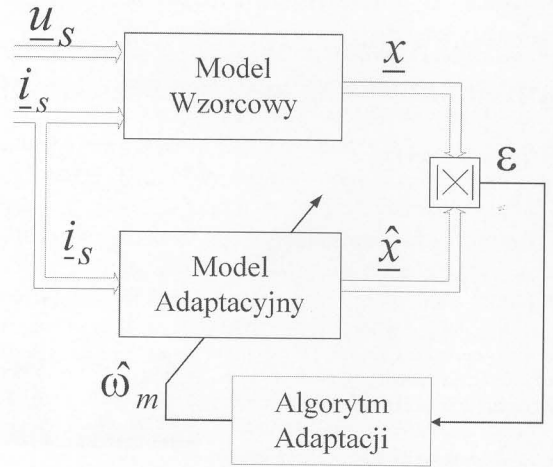
3. Estymator prędkości oparty na sieci neuronowej uczonej on-line

Struktura i działanie drugiego badanego układu estymacji są analogiczne do wcześniej omawianego estymatora typu MRAS. W tym przypadku zastosowano jednak sieć neuronową uczonej on-line (rys.3). W trakcie pracy jest ona uczona odtwarzania zmiennej stanu \underline{x} na podstawie popełnionego w poprzednim kroku błędu estymacji ϵ .

Koncepcja zaproponowana w [3], a następnie zmodyfikowana przez autora w [4] rys.4 wykorzystuje, podobnie jak MRAS, dwa modele strumienia wirnika.

Dyskretny model prądowy strumienia wirnika jest podobny do sieci neuronowej, której waga w_2 jest proporcjonalna do prędkości mechanicznej, zaś jej wyjściem jest $\underline{\psi}_r$:

$$\underline{\psi}_r(k) = w_1 \underline{\psi}_r(k-1) + w_2 \dot{\underline{\psi}}_r(k-1) + w_3 \underline{i}_s(k-1) \quad (3)$$



Rys. 3. Identyfikacja prędkości oparta na sieci neuronowej uczonej on-line
 Fig. 3. Speed identification based on neural network trained on-line

Błąd pomiędzy wyjściami obu symulatorów, dany zależnością

$$\underline{\epsilon}(k) = \underline{\psi}_r(k) - \underline{\psi}_r(k) \quad (4)$$

może być podstawą do korekcji wagi w_2 wykorzystując algorytm uczenia metodą propagacji wstecznej błędu

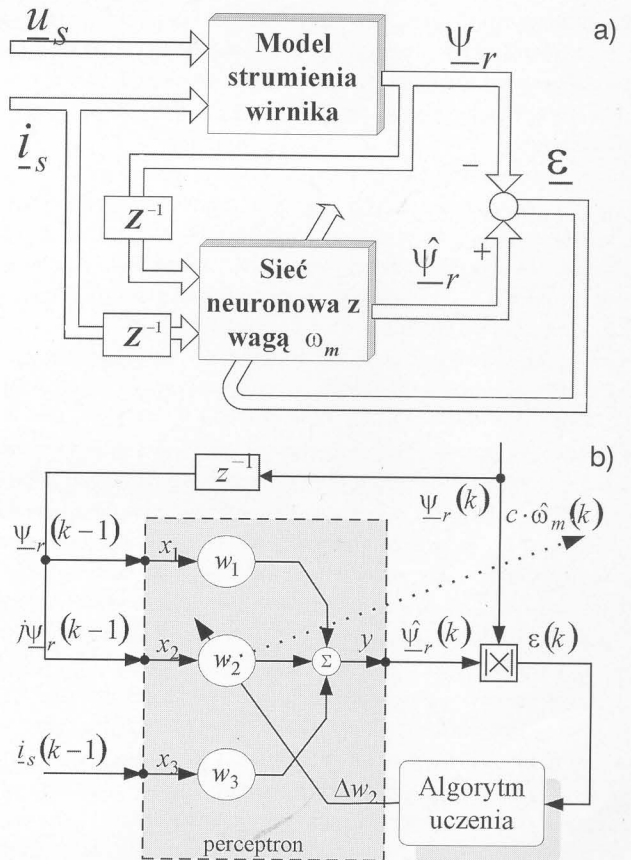
$$w_2 = w_2 - \eta(-\epsilon_\alpha \dot{\psi}_{r\beta} + \epsilon_\beta \dot{\psi}_{r\alpha}) + \mu \Delta w_2, \quad (5)$$

i wyznaczenia prędkości kątowej

$$\hat{\omega}_m = \frac{T_N}{T_s} w_2 \quad (6)$$

gdzie η jest współczynnikiem uczenia, zaś μ jest współczynnikiem zapominania sieci.

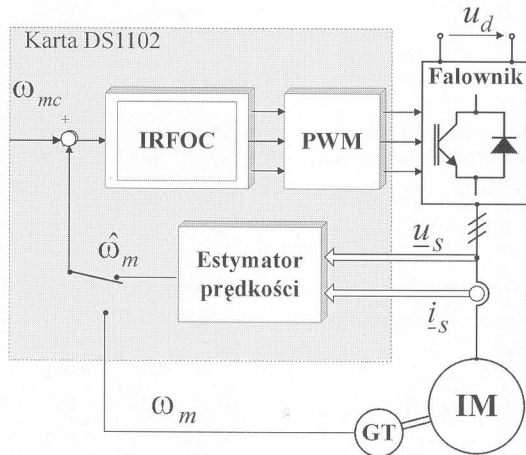
Schemat blokowy zmodyfikowanego w [4] estymatora oraz struktura zastosowanej w nim prostej sieci neuronowej przedstawione są na rys. 4.



Rys. 4. Estymator prędkości wykorzystujący sieć neuronową:
 (a) schemat blokowy, (b) struktura sieci neuronowej
 Fig. 4. Speed estimator based on neural network:
 (a) block diagram (b) neural structure.

4. Weryfikacja symulacyjna i laboratoryjna wybranych modeli

Badania precyzji szacowania prędkości wybranych estymatorów przeprowadzono dla pośredniego sterowania polowo-zorientowanego względem wirnika (ang. Indirect Rotor Field Oriented Control IRFOC) typowego silnika indukcyjnego o mocy 1kW. Badania symulacyjne układu wykonano zapisując model struktury w języku C, zaś weryfikację eksperymentalną przeprowadzono w układzie z rys.5, gdzie funkcje estymatorów, algorytmu sterowania oraz PWM pełnił oprogramowany w języku C procesor sygnałowy TMS320C31, znajdujący się na karcie DS1102.



Rys. 5. Schemat blokowy pośredniego sterowania polowo-zorientowanego (IRFOC) z wykorzystaniem prędkości estymowanej lub mierzonej
Fig. 5. Block diagram of IRFOC system utilising estimated or measured speed

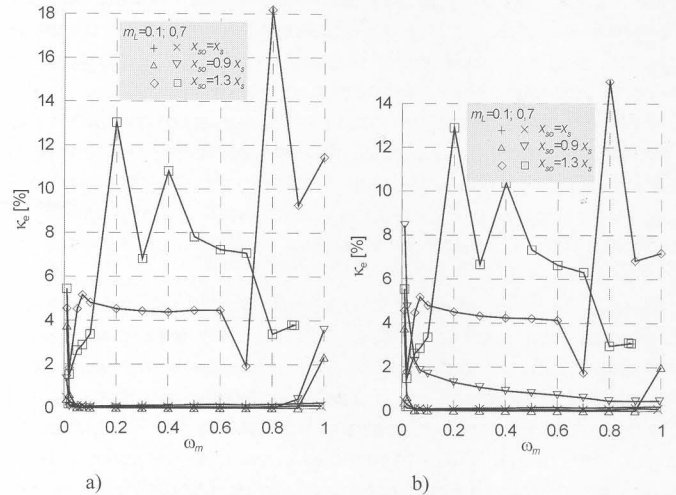
Mechanizm adaptacji dla struktury MRAS oraz algorytm uczenia SSN zostały tak dobrane, by zapewnić stabilność całego układu identyfikacji oraz by estymowana wielkość była zbliżona do wartości mierzonej z pożądaną charakterystyką dynamiczną. Dostrojenie tych parametrów przeprowadzono dla prawidłowych (równych rzeczywistym) wartości parametrów silnika zastosowanych w modelach silnika. Eksperymenty przeprowadzono dla następujących nastaw: MRAS: $K_{PI} = 0,188$, $T_{PI} = 0,04$, SSN: $\eta = 0,25$, $\mu = 0,024$.

W stanach ustalonych przeprowadzono symulacje pracy estymatorów prędkości dla różnych wartości prędkości mechanicznych ω_m i dwóch momentów m_L obciążenia na wale. Badania te przeprowadzono zarówno dla stanu, gdy użyte do estymacji parametry (z indeksami „o”) są równe rzeczywistym parametrom silnika, jak też gdy od nich się różnią.

Gdy zastosowane parametry są prawidłowe, błędy estymacji i tętnienia mają stosunkowo niewielką wartość w szerokim zakresie prędkości kątowych pracy (rys. 6 i 7). Wskaźniki te wzrastają przy końcach badanego przedziału, szczególnie dla prędkości bliskich zera $\omega_m < 0,05$, co ogranicza obszar poprawnej pracy estymatorów.

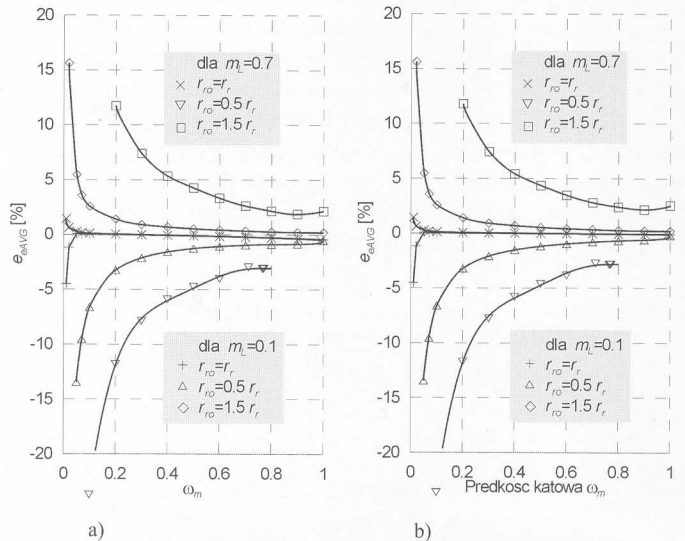
Badania wrażliwości estymatorów na zmiany parametrów silnika indukcyjnego przeprowadzono analizując wpływ czterech parametrów: r_{so} , r_{ro} , x_{so} , x_{ro} na pracę estymatorów prędkości w stanach ustalonych. W większości przypadków odstrojenie parametrów powoduje niewielkie tętnienia względne estymowanego sygnału κ_e dla szerokiego zakresu prędkości, ale gwałtownie one narastają przy prędkościach małych i większych od znamionowej ($\omega_m > 0,8$) (rys. 6 i 7). Jednakże w przypadku nieprawidłowo przyjętej reakcji stojana obserwuje się duże oscylacje prędkości estymowanej (rys. 6). Zjawiska te pogłębiają się dla parametrów obliczeniowych większych od rzeczywistych parametrów silnika.

Obydwa estymatory wykazywały zwiększone błędy średnie $e_{e,AVG}$ przy obciążeniu silnika oraz w zakresie niskich prędkości kątowych. Wartości bezwzględne średniego błędu estymacji znacznie narastały, gdy użyte w estymatorach parametry modelu silnika odbiegały od wartości rzeczywistych.



Rys. 6. Wpływ odstrojenia reakcji stojana użytej w estymatorze na tętnienia estymowanego sygnału w funkcji prędkości mechanicznej: (a) układ MRAS, (b) estymator SSN

Fig. 6. Influence of stator reactance incorrectness used in estimator on estimated signal fluctuation in mechanical speed function: (a) MRAS system, (b) neural network estimator



Rys. 7. Wpływ odstrojenia rezystancji wirnika na względny błąd średni estymacji prędkości w funkcji prędkości mechanicznej: (a) układ MRAS, (b) estymator SSN

Fig. 7. Influence of rotor resistance incorrectness used in estimator on average estimation error in mechanical speed function: (a) MRAS system, (b) neural network estimator

Wpływ odstrojenia poszczególnych parametrów na błąd $e_{e,AVG}$ miał ten sam charakter (Tabela 1) w obu przypadkach estymatorów, gdyż zastosowane w nich symulatory strumienia były oparte na analogicznych modelach.

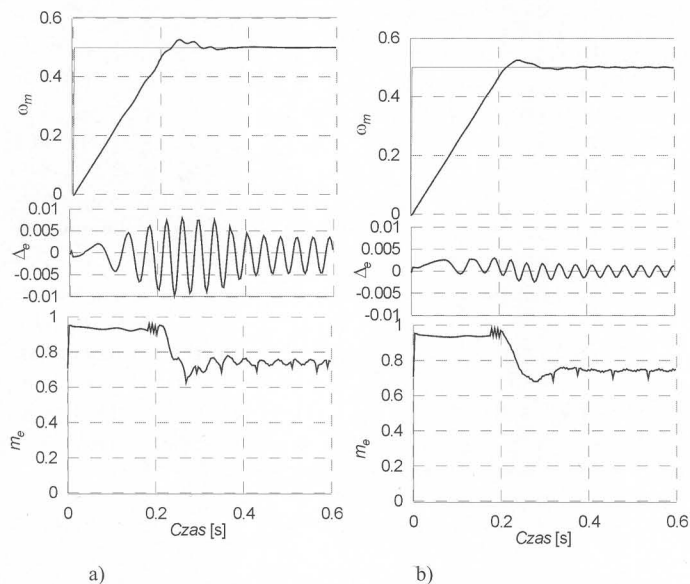
Tab. 1. Charakter powstających błędów $e_{e,AVG}$ przy odstrojeniu parametrów modelu silnika

Tab. 1. Signs of average speed errors in parameter incorrectness states

Parametr	r_{so}	r_{ro}	x_{so}	x_{ro}
Odstrojenie	$<r_s$	$>r_r$	$<x_s$	$>x_r$
Znak błędu	-	-	+	-

Badania estymatorów w stanach dynamicznych przeprowadzono porównując ich odpowiedź w testach: śledzenia prędkości i pracy estymatora w pętli sprzężenia zwrotnego przy skoku prędkości zadanej. W tych trybach pracy analizowano powstający bezwzględny błąd estymacji Δ_e , wskaźnik J_e będący sumą iloczynu kwadratu błędów estymacji i czasu próbkowania oraz czas dochodzenia do wartości ustalonej T_{edyn} , jak też wpływ błędu estymacji na przebieg momentu elektromagnetycznego m_e przy pracy estymatora w układzie zamkniętym i realizacji sterowania IRFOC.

Podczas śledzenia prędkości estymatory SSN oraz MRAS dochodziły do wartości ustalonej z podobną dynamiką. Jednakże po zastosowaniu estymowanego sygnału do sprzężenia prędkości w układzie zamkniętym regulacji estymator MRAS wykazywał zdecydowanie większe oscylacje sygnału $\hat{\omega}_m$, które przekładały się również na tętnienia momentu elektromagnetycznego m_e wytwarzanego przez silnik rys.8.



Rys. 8. Praca estymatorów w pętli sprzężenia prędkości przy skoku jednostkowym prędkości zadanej: (a) układ MRAS, (b) estymator SSN

Fig. 8. Response of speed estimators for command speed step in closed loop operation: (a) MRAS system, (b) neural network estimator

Badania laboratoryjne wykonano zarówno przy śledzeniu prędkości, jak i wykorzystaniu sygnału estymowanego do sprzężenia prędkościowego oraz realizacji sterowania IRFOC. Główny nacisk położono na sprawdzenie poprawności estymacji prędkości przy pracy nawrotnej układu napędowego, co ilustrują poniższe wybrane oscylogramy, gdzie: (1) - ω_m , (2) - $\hat{\omega}_m$, (3) - Δ_e , (4) - m_e

W stanie pracy bez obciążenia na wale, wszystkie estymatory wykazywały niewielkie błędy estymacji, a wartość bezwzględna błędu średniego zwiększała się przy wzroście momentu elektromagnetycznego.

5. Podsumowanie

Opracowano dwa estymatory prędkości kątowej silnika indukcyjnego klatkowego: układ z wzorcowym i nadążnym modelem silnika (MRAS) oraz oparty na sztucznej sieci neuronowej (SSN) uczonej on-line. Z powodzeniem stosowano je do śledzenia prędkości, jak też szacowany przez nie sygnał wykorzystywany był w pętli sprzężenia zwrotnego i realizacji pośredniego sterowania połowo-zorientowanego. Rozpatrywane estymatory wykazały pogorszenie precyzji szacowania prędkości podczas w wyniku błędnej nastawy lub zmiany parametrów schematu zastępczego silnika indukcyjnego. Wrażliwość estymacji na odstrojenie parametrów silnika zwiększała się przy wzroście obciążenia silnika oraz przy prędkościach kątowych bliskich zero. Badane estymatory, pomimo podobnej zasady działania oraz optymalnego dostrojenia cechowały się nieco odmiennymi właściwościami. W praktyce łatwiejszym do dostrojenia, a jednocześnie mniej wrażliwym na zakłócenia, był układ wykorzystujący sieć neuronową.

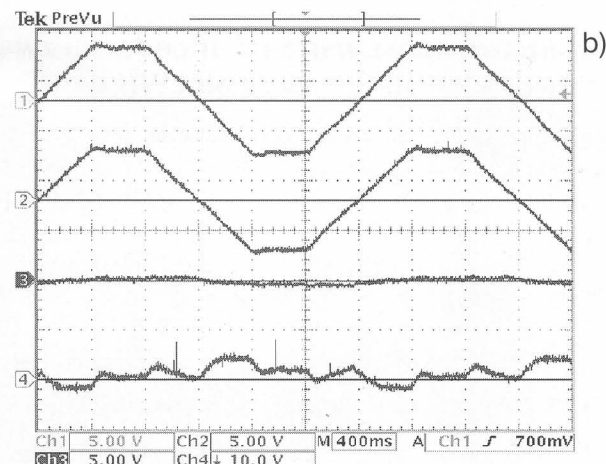
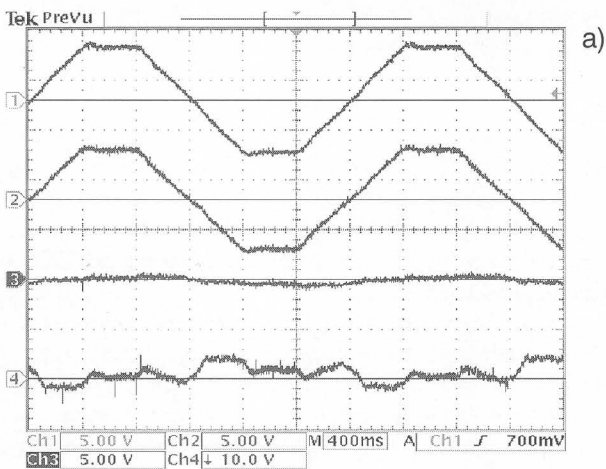
Powyższe rozważania pokazują, że zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do estymacji prędkości może być konkurencyjne względem klasycznych rozwiązań.

6. Literatura

- [1] Rajashekara K., Kawamura A., Matsuse K.: Sensorless Control of AC Motor Drives. Speed and Position Sensorless Operation. IEEE Press Book, 1996.
- [2] Tamai S. et al.: Speed Sensor-Less Vector Control of Induction Motor with Model Reference Adaptive System. Proc. of IEEE Industry Applications Society, pp.189-195 1987.
- [3] Ben-Brahim L. and Kurosawa R.: Identification of induction motor speed using neural networks. Proc. of PCC-Yokohama, pp. 689-694, 1993
- [4] Filipek P. Z.: Sterowanie silnika klatkowego bez członu pomiaru prędkości. Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 2001.
- [5] Kaźmierkowski M. P., Sobczuk D., Filipek P. Z.: Sensorless Control of Induction Motor Using a Neural Network for Speed Estimation. Proc. of ISIE'97, pp.1242-1247, Portugal 1997.
- [6] Orłowska-Kowalska T., Migas P.: Analiza wpływu struktury sieci neuronowej na dokładność odtwarzania prędkości silnika indukcyjnego. Materiały konferencji SENE'99, Łódź 1999.
- [7] Wang M., Levi E.: Experimental Tuning of a MRAS Based Speed Estimator for Sensorless Vector Controlled Induction Motor Drives. Proc. of ICEM 2000, pp. 822-826.

Title: Induction motor control with utilisation estimated speed signal

Artykuł recenzowany



Rys. 9. Praca estymatorów w układzie zamkniętym przy narastaniu prędkości zadanej i wolnym nawrocie silnika bez obciążenia:

(a) układ MRAS, (b) estymator SSN

Fig. 9. Closed loop operation of estimators in state of slow command speed increase and motor reverse; no load condition:

(a) MRAS system, (b) neural network estimator