

Tadeusz Białoń, Marian Pasko
Politechnika Śląska, Gliwice

WIELOKRYTERIALNY DOBÓR PARAMETRÓW PROPORCJONALNEGO OBSERWATORA STRUMIENI MAGNETYCZNYCH SILNIKA INDUKCYJNEGO PRZY WYKORZYSTANIU ALGORYTMU GENETYCZNEGO

MULTICRITERIAL SELECTION OF THE PROPORTIONAL OBSERVER PARAMETERS OF INDUCTION MOTOR MAGNETIC FLUXES WITH APPLICATION OF THE GENETIC ALGORITHM

Abstract: The paper discusses the issues connected with selection of the gains of a proportional Luenberger observer, applied to reconstruction of magnetic fluxes of the induction motor. The criteria of selection are described, as well as the method for formation of a fitness function of the genetic algorithm, taking these criteria into consideration. The criteria based on the roots of the observer's characteristic polynomial that have been discussed in the literature before are briefly described, moreover, new criterion have been introduced, providing the same observer's reconstruction quality independently on the rotation direction of the motor. Simulation results are also presented, obtained for two different parameter sets of the observer, selected with and without use of the new criterion.

1. Wstęp

Współczesne algorytmy sterowania silników indukcyjnych, takie jak sterowanie wektorowe, sterowanie multiskalarne czy bezpośrednie sterowanie momentem, działają w pętlach sprzężenia zwrotnego od różnych wielkości elektromechanicznych silnika. Problem pojawia się gdy algorytm sterowania wymaga informacji o wartościach takich wielkości jak strumienie magnetyczne sprzężone z uzwojeniami stojana i wirnika silnika, których pomiary są trudne do zrealizowania w praktyce. W takich przypadkach można zastosować układ odtwarzania zmiennych stanu, przy pomocy obserwatora.

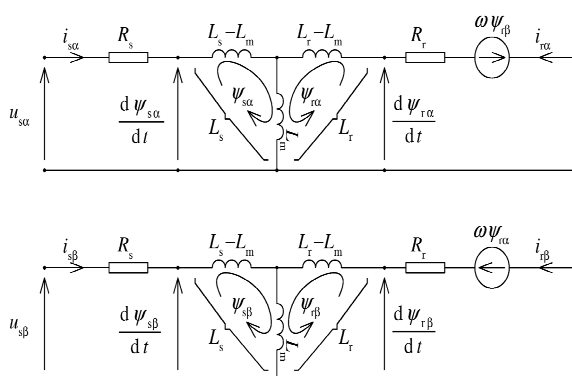
Celem doboru jest zapewnienie stabilności obserwatora, w dalszej kolejności należy zapewnić odpowiednie warunki tłumienia błędów odtwarzania. Na koniec należy zminimalizować efekty związane ze wzmacnianiem zakłóceń wewnątrz obserwatora.

W artykule tym podano dotychczas stosowane kryteria doboru parametrów proporcjonalnego obserwatora strumieni magnetycznych silnika indukcyjnego. Wprowadzono również nowe kryterium, gwarantujące takie same właściwości obserwatora niezależnie od kierunku wirowania wirnika silnika. Opisano również sposób ujęcia wszystkich kryteriów w postaci funkcji celu, do wykorzystania w trakcie doboru parametrów obserwatora przy użyciu algorytmu genetycznego.

2. Obserwator

Punktem wyjścia do projektowania obserwatora jest model matematyczny silnika indukcyjnego, przedstawiony na rysunku 1 w postaci schematu zastępczego.

Schemat zastępczy [1], przedstawia silnik indukcyjny jako monoharmoniczną maszynę z liniowym obwodem magnetycznym, wirnikiem bez wypierania prądów, w nieruchomym, prostokątnym układzie współrzędnych α - β . Model ten należy przedstawić w postaci macierzowych równań stanu [2, 3, 4]. W tym celu za-



Rys. 1. Schemat zastępczy silnika indukcyjnego w układzie współrzędnych α - β

Podstawowym problemem podczas projektowania obserwatora jest dobór jego parametrów.

łożono postać wektora stanu \mathbf{x} , zawierającego strumienie magnetyczne stojana i wirnika silnika:

$$\mathbf{x} = [\psi_{sa} \quad \psi_{sb} \quad \psi_{ra} \quad \psi_{rb}]^T, \quad (1)$$

oraz postaci wektorów wymuszeń \mathbf{u} i wyjścia \mathbf{y} , zawierających odpowiednio napięcia uzwojenia stojana i prędkość kątową oraz prądy uzwojenia stojana:

$$\mathbf{u} = [u_{sa} \quad u_{sb} \quad \omega]^T, \quad \mathbf{y} = [i_{sa} \quad i_{sb}]^T. \quad (2)$$

Różniczkowe równanie stanu oraz algebraiczne równanie wyjścia, zapisane w wielkościach względnych przyjmują odpowiednio postaci [2]:

$$t_{\text{odn}} \dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} + \omega \mathbf{A}_3) \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u}, \quad \mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{x}, \quad (3)$$

gdzie przez t_{odn} oznaczono czas odniesienia, macierze \mathbf{A} , \mathbf{A}_3 , \mathbf{B} i \mathbf{C} mają wartości elementów zależne tylko od parametrów schematu zastępczego silnika.

Do odtwarzania zmiennych stanu tak zdefiniowanego obiektu obserwowanego, można zastosować proporcjonalny obserwator Luenbergera opisany równaniem stanu [2, 3, 4]:

$$t_{\text{odn}} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = (\mathbf{A} + u_3 \mathbf{A}_3) \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B} \mathbf{u} + (\mathbf{K} + u_3 \mathbf{K}_3)(\mathbf{C} \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{y}), \quad (4)$$

gdzie $\hat{\mathbf{x}}$ oznacza odtwarzany wektor zmiennych stanu \mathbf{x} , przez u_3 oznaczono trzeci element wektora \mathbf{u} – prędkość kątową ω , macierze wzmocnień korekcyjnego sprzężenia zwrotnego obserwatora \mathbf{K} i \mathbf{K}_3 mają wartości elementów wyznaczane w trakcie doboru parametrów obserwatora. Schematy blokowe modelu silnika i obserwatora przedstawiono na rysunku 2.

3. Kryteria doboru

Z każdym z zastosowanych kryteriów doboru związany jest jeden składnik F_i funkcji celu F o postaci:

$$F(k_1 \dots k_j \dots) = F_1(k_1 \dots k_j \dots) + F_2(k_1 \dots k_j \dots) + \dots, \quad (5)$$

gdzie przez k_j oznaczono kolejne elementy macierzy \mathbf{K} i \mathbf{K}_3 . Minimum tak zbudowanej funkcji celu jest poszukiwane przy wykorzystaniu algorytmu genetycznego [5], a optymalizowanymi zmiennymi są wartości elementów k_j .

3.1. Właściwości dynamiczne

Pierwsza grupa kryteriów doboru oraz związane z nimi składniki funkcji celu F są determinowane pierwiastkami wielomianu charakterystycznego obserwatora, określającymi jego sta-

bilność, stałe czasowe i częstotliwości drgań własnych [2, 3, 4]. Wielomian charakterystyczny obserwatora opisanego równaniem (4) ma postać:

$$\phi(p) = | \mathbf{A} + \omega \mathbf{A}_3 + (\mathbf{K} + \omega \mathbf{K}_3) \mathbf{C} - p \mathbf{I} |, \quad (6)$$

gdzie przez \mathbf{I} oznaczono macierz jednostkową. Pierwiastki λ wielomianu charakterystycznego, nazywane również wartościami własnymi obserwatora, są liczbami zespolonymi, a kryteria z nimi związane dotyczą sposobu ich rozmieszczenia w lewej półpłaszczyźnie zespolonej [5].

3.2. Odporność na zakłócenia

Kryteria związane z pierwiastkami wielomianu charakterystycznego obserwatora mają wpływ na proces tłumienia błędów odtwarzania strumieni magnetycznych. Kolejnym zagadnieniem jest minimalizacja efektów związanych ze wzmacnianiem wewnątrz obserwatora zakłóceń nakładających się na jego przebiegi wejściowe. W praktyce, źródłem takich zakłóceń są, między innymi, szumy przetworników pomiarowych.

Cel ten można osiągnąć na dwa sposoby, dodając do funkcji celu składnik minimalizujący wartość wskaźnika wzmocnienia macierzy \mathbf{K} i \mathbf{K}_3 [5], lub w odpowiedni sposób ograniczając przestrzeń poszukiwań algorytmu genetycznego [2, 5].

3.3. Symetria względem prędkości kątowej

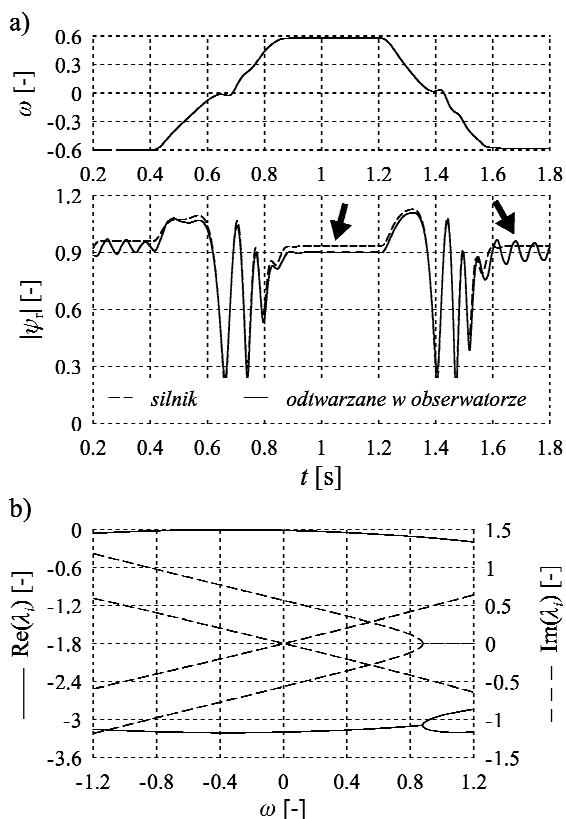
Kolejnym, dotychczas nie stosowanym, kryterium doboru wzmocnień obserwatora jest zapewnienie takich samych właściwości dynamicznych dla dodatnich i ujemnych prędkości kątowych ω .

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych przykładowego obserwatora proporcjonalnego, którego parametry zostały dobrane bez zastosowania kryterium symetrii. Zastosowano tylko kryteria opisane w punktach 3.2 i 3.3. W trakcie badań przeprowadzono dwa symulowane nawroty silnika przy prędkości kątowej równej 0,6 prędkości znamionowej (rys. 3a). Na drugim wykresie przedstawiono przebiegi strumienia wirnika modelu silnika i odtworzony w modelu obserwatora. Różnice w jakości odtwarzania strumienia wirnika przy dodatniej i ujemnej prędkości kątowej ω są wyraźnie widoczne w miejscach oznaczonych strzałkami. Różnice te są spowodowane różnicami wartości pierwiastków λ wielomianu charakterystycznego $\phi(p)$, widocznymi na rys. 3b.

Symetrię właściwości dynamicznych obserwatora względem prędkości obrotowej można zapewnić poprzez narzucenie macierzom \mathbf{K} i \mathbf{K}_3 odpowiedniej struktury, wprowadzając uzależnienia pomiędzy wartościami ich poszczególnych elementów. Jedną z możliwych struktur macierzy \mathbf{K} i \mathbf{K}_3 , gwarantującą spełnienie warunków symetrii ma postać:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_1 \\ k_2 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_3 = \begin{bmatrix} 0 & -k_3 \\ k_3 & 0 \\ 0 & -k_4 \\ k_4 & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

Można wykazać, że w przypadku gdy macierze wzmocnień obserwatora mają postaci opisane równaniami (7), wielomian charakterystyczny obserwatora $\phi(p)$ przyjmuje postać:



Rys. 3. Wyniki badań symulacyjnych oraz pierwiastki λ wielomianu charakterystycznego obserwatora o asymetrycznym sprzężeniu zwrotnym

$$\phi(p) = p^4 + \alpha_3 p^3 + a_2(\omega) p^2 + a_1(\omega) p + a_0(\omega), \quad (8)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} a_2(\omega) &= \alpha_{22}\omega^2 + \alpha_{20}, \\ a_1(\omega) &= \alpha_{12}\omega^2 + \alpha_{10}, \\ a_0(\omega) &= \alpha_{04}\omega^4 + \alpha_{02}\omega^2 + \alpha_{00}, \end{aligned} \quad (9)$$

W równaniach (8) i (9) współczynniki α mają stałe wartości zależne tylko i wyłącznie od parametrów schematu zastępczego silnika i elementów macierzy \mathbf{K} i \mathbf{K}_3 . We współczynnikach wielomianu charakterystycznego obserwatora $a(\omega)$ prędkość kątowna ω występuje tylko w parzystych potęgach, w związku z czym, wartości pierwiastków wielomianu nie zależą od jej znaku. Obserwator proporcjonalny, którego macierze sprzężenia zwrotnego mają postaci opisane równaniami (7) ma więc takie same właściwości dynamiczne dla dodatnich i ujemnych prędkości kątowych silnika.

Należy zauważyć, że schemat uzależnień pomiędzy elementami macierzy \mathbf{K} i \mathbf{K}_3 opisany równaniami (7) jest uogólnieniem struktury sprzężenia zwrotnego najszerszej opisywanego w literaturze obserwatora zmiennych stanu silnika indukcyjnego, opracowanego przez Kubotę [6, 7].

Wyniki badań symulacyjnych obserwatora spełniającego warunek symetrii (7) przedstawiono na rysunku 4a. Z uzyskanych przebiegów wynika, że nie ma różnic pomiędzy działaniem obserwatora przy dodatnich i przy ujemnych prędkościach kątowych. Właściwości dynamiczne obserwatora w obydwu przypadkach są takie same, o czym świadczą przedstawione na rysunku 4b wykresy części rzeczywistych i urojonych pierwiastków λ wielomianu charakterystycznego, które są symetryczne względem osi $\omega = 0$.

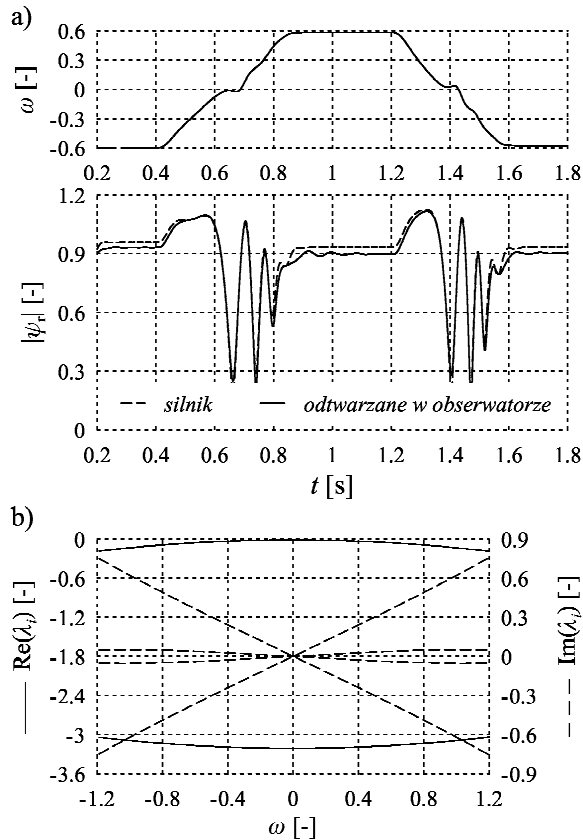
4. Algorytm genetyczny

Zastosowany algorytm genetyczny [5], służący do poszukiwania minimum funkcji celu (5) jest oparty na typowych rozwiązaniach opisanych w literaturze [8]. Zastosowano selekcję opartą na zasadzie elitarności, jednobitową mutację jednopunktową oraz krzyżowanie proste jednopunktowe. Krzyżowaniu są poddawane z jednakowym prawdopodobieństwem chromosomy zachowane w trakcie selekcji. Warunkiem zatrzymania algorytmu jest osiągnięcie zadanej liczby pokoleń.

5. Wnioski

Wprowadzone kryterium symetrii obserwatora pozwoliło rozwiązać problem różnic w jego

właściwościach dynamicznych przy różnych kierunkach wirowania wirnika silnika indukcyjnego. Jak wykazały przeprowadzone badania, narzucenie sprzężeniu zwrotnemu obserwatora struktury opisanej równaniami (7) ma wpływ na działanie algorytmu genetycznego.



Rys. 4. Wyniki badań symulacyjnych oraz pierwiastki λ wielomianu charakterystycznego obserwatora spełniającego warunek symetrii

Liczba optymalizowanych zmiennych została ograniczona do czterech elementów k_i , podczas gdy w ogólnym przypadku elementów tych jest 16. Spowodowało to, że algorytm genetyczny znacznie szybciej uzyskiwał zbieżność i znajdował minimum globalne funkcji celu.

6. Literatura

- [1]. Paszek W.: *Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, Helion, Gliwice, 1998.
- [2]. Białoń T.: *Zastosowanie obserwatorów Luenbergera do odtwarzania zmiennych stanu silnika indukcyjnego*, rozprawa doktorska, Politechnika Śląska w Gliwicach, 2010, pełny tekst dostępny na <http://delibra.bg.polsl.pl>.
- [3]. Białoń T., Lewicki A., Pasko M.: *Badania obserwatorów proporcjonalnych w multiskalarnym układzie sterowania silnika indukcyjnego*, Przegląd Elektrotechniczny, 9 (LXXXIV), 2008, 105-108.

[4]. Orłowska-Kowalska T.: *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2003.

[5]. Żywiec A., Białoń T.: *Synteza obserwatora sprzężeń elektromagnetycznych silnika indukcyjnego przy wykorzystaniu algorytmów genetycznych*, XXIX SME, Gdańsk - Jurata, 2003, CD.

[6]. Kubota H., Matsuse K., Nakano T.: *New adaptive flux observer of induction motor for wide speed range motor drives*, 16th Conf. of IEEE Industrial Electronics Society IECON, Pacific Grove, 1990, 921-926.

[7]. Kubota H., Matsuse K., Nakano T.: *DSP-based speed adaptive flux observer of induction motor*, IEEE Trans. on Ind. Appl., 2 (29), 1993, 344-348

[8]. Arabas J.: *Wykłady z algorytmów ewolucyjnych*, WNT, Warszawa, 2001.

Autorzy

Dr inż. Tadeusz Białoń, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, Wydział Elektryczny, Politechnika Śląska w Gliwicach, tadeusz.bialon@polsl.pl; prof. dr hab. inż. Marian Pasko, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, Wydział Elektryczny, Politechnika Śląska w Gliwicach, marian.pasko@polsl.pl;