

WYKORZYSTANIE ALGORYTMÓW EWOLUCYJNYCH DO DOBORU WZMOCNIEŃ ROZSZERZONEGO OBSERWATORA PRĘDKOŚCI MASZYNY INDUKCYJNEJ

Daniel WACHOWIAK¹, Zbigniew KRZEMIŃSKI², Patryk STRANKOWSKI³

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 347 18 71, e-mail: daniel.wachowiak@pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 347 23 48, e-mail: zbigniew.krzeźmiński@pg.gda.pl
3. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 347 18 71, e-mail: patryk.strankowski@pg.gda.pl

Streszczenie: W pracy opisano sposób doboru wzmacnień rozszerzonego obserwatora prędkości maszyny indukcyjnej przy wykorzystaniu algorytmów ewolucyjnych. Zaproponowano funkcję celu opartą na rozkładzie biegunów obserwatora. Ze względu na wpływ prędkości maszyny na dynamikę obserwatora zaproponowano dobór wzmacnień obserwatora dla różnych przedziałów prędkości. Dla poszczególnych przedziałów zaprezentowano wyniki doboru wzmacnień w postaci tabel prezentujących wartości funkcji celu w ostatnim pokoleniu algorytmu ewolucyjnego w kolejnych próbach doboru wzmacnień.

Słowa kluczowe: maszyna indukcyjna, obserwator prędkości, algorytm ewolucyjny.

1. WPROWADZENIE

Zastosowanie urządzenia do pomiaru prędkości pracy maszyny elektrycznej niesie za sobą szereg wad. Montaż dodatkowego urządzenia pomiarowego na wale silnika może być kłopotliwy, w szczególności w przypadku modernizacji istniejącego napędu. Ponadto występowanie dodatkowej aparatury wiąże się z większym ryzykiem awarii, zwłaszcza w środowiskach o dużym zapyleniu. Zastosowanie obserwatora prędkości w układzie regulacji maszyny indukcyjnej pozwala na redukcję kosztu napędu elektrycznego poprzez wyeliminowanie urządzenia pomiarowego, które może mieć znaczny udział w całkowitym koszcie napędu, w szczególności w przypadku zastosowania maszyn małej mocy.

W niniejszej pracy analizowany jest rozszerzony obserwator prędkości maszyny indukcyjnej opisany w [1]. W równaniach rozszerzonego obserwatora występuje aż 12 wzmacnień. Od doboru tych wzmacnień zależy stabilność obserwatora oraz jego właściwości dynamiczne. W przypadku obserwatorów przedstawionych w [2], [3] do odtwarzania prędkości maszyny indukcyjnej zastosowano estymator MRAS, w którym rolę modelu przestrajanego pełni obserwator Luenbergera strumienia wirnika. W takim wariancie wymagany jest dobór jedynie 4 wzmacnień i możliwe jest wyprowadzenie analitycznych zależności na ich wartości, tak by ulokować bieguny w proporcjonalnej odległości od środka płaszczyzny zespolonej do biegunów maszyny [4], [5]. Taki sposób doboru wzmacnień

porównano z wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu algorytmów ewolucyjnych [2]. W przypadku rozszerzonego obserwatora prędkości, ze względu na złożoność zlinearyzowanych równań opisujących dynamikę błędów odtwarzania, wyprowadzenie analitycznych zależności opisujących wartości wzmacnień obserwatora jest bardzo kłopotliwe. Do doboru wzmacnień zalecane jest zatem wykorzystanie innych metod, jak algorytmy ewolucyjne.

2. OBSERWATOR PRĘDKOŚCI

2.1. Równania obserwatora

Rozszerzony obserwator prędkości zaproponowany w [1] oparty jest na modelu matematycznym maszyny indukcyjnej, w którym wprowadzono dodatkową zmienną ζ zdefiniowaną następująco:

$$\zeta = \omega_r \psi_r. \quad (1)$$

Po przyjęciu prądu stojana oraz strumienia wirnika jako zmienne stanu oraz uwzględnieniu dodatkowej zmiennej ζ , rozszerzony obserwator prędkości maszyny indukcyjnej opisany jest następującymi wektorowymi równaniami:

$$\frac{d\hat{\mathbf{i}}_s}{d\tau} = a_1 \hat{\mathbf{i}}_s + a_2 \hat{\psi}_r + j a_3 \hat{\zeta} + a_4 \mathbf{u}_s + \quad (2)$$

$$k_{11} \tilde{\zeta} + j k_{12} \tilde{\zeta} + k_{13} \tilde{\mathbf{i}}_s + j k_{14} \tilde{\mathbf{i}}_s$$

$$\frac{d\hat{\psi}_r}{d\tau} = a_5 \hat{\mathbf{i}}_s + a_6 \hat{\psi}_r + j \hat{\zeta} + \quad (3)$$

$$k_{21} \tilde{\zeta} + j k_{22} \tilde{\zeta} + k_{23} \tilde{\mathbf{i}}_s + j k_{24} \tilde{\mathbf{i}}_s$$

$$\frac{d\hat{\zeta}}{d\tau} = a_5 \hat{\omega}_r \hat{\mathbf{i}}_s + a_6 \hat{\zeta} + j \hat{\omega}_r \hat{\zeta} + \quad (4)$$

$$k_{31} \tilde{\zeta} + j k_{32} \tilde{\zeta} + k_{33} \tilde{\mathbf{i}}_s + j k_{34} \tilde{\mathbf{i}}_s$$

gdzie zmienne oznaczone symbolem $\hat{}$ są zmiennymi odtwarzanymi, zmienne oznaczone $\tilde{}$ są błędami odtwarzania, \mathbf{i}_s , ψ_r , \mathbf{u}_s są wektorami prądu stojana, strumienia wirnika oraz napięcia stojana, $k_{11} - k_{34}$ są wzmacnieniami obserwatora, τ jest czasem względnym,

$a_1 - a_6$ są stałymi zależnymi od parametrów maszyny zdefiniowane następująco:

$$a_1 = -\frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{w L_r}, a_2 = \frac{R_r L_m}{w L_r}, a_3 = -\frac{L_m}{w}, a_4 = \frac{L_r}{w},$$

$$a_5 = \frac{R_r L_m}{L_r}, a_6 = -\frac{R_r}{L_r}, a_7 = \frac{L_m}{L_r}, w = L_s L_r - L_m^2,$$

natomiast ω_r jest prędkością kątową wirnika, którą obliczyć można korzystając z następującej zależności algebraicznej:

$$\hat{\omega}_r = \frac{\hat{\psi}_{r\alpha} \hat{\zeta}_\alpha + \hat{\psi}_{r\beta} \hat{\zeta}_\beta}{\hat{\psi}_r^2}, \quad (5)$$

gdzie ψ_r jest modułem wektora strumienia wirnika, natomiast indeksy α, β oznaczają składowe wektora.

2.2. Dynamika błędów odtwarzania obserwatora

Błąd odtwarzania prądu stojana jest różnicą między wartością odtwarzaną prądu oraz rzeczywistą:

$$\tilde{i}_s = \hat{i}_s - i_s. \quad (6)$$

W przypadku występowania błędów odtwarzania możliwe jest, że odtwarzana wartość zmiennej $\hat{\zeta}$ nie będzie, zgodnie z definicją (1), równa iloczynowi odtwarzanej prędkości kątowej wirnika oraz wektora strumienia wirnika. W równaniach obserwatora dodano zatem dodatkowy człon korekcyjny równy różnicy tych dwóch wyrazów:

$$\tilde{\zeta} = \hat{\zeta} - \hat{\omega}_r \hat{\psi}_r. \quad (7)$$

Po odjęciu od równań obserwatora (2) oraz (3) odpowiadających im równań rozszerzonego modelu maszyny indukcyjnej uzyskuje się następujący układ równań opisujący dynamikę błędów odtwarzania obserwatora:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_1 + k_{13} & -k_{14} + a_5 \frac{i_{sq}}{\psi_{rd}} + \omega_r & a_2 & k_{12} \omega_r & 0 & -a_3 - k_{12} \\ k_{14} - a_5 \frac{i_{sq}}{\psi_{rd}} - \omega_r & a_1 + k_{13} & 0 & a_2 - k_{11} \omega_r & a_3 & k_{11} \\ a_5 + k_{23} & -k_{24} & a_6 & a_5 \frac{i_{sq}}{\psi_{rd}} + \omega_r + k_{22} \omega_r & 0 & -1 - k_{22} \\ k_{24} & a_5 + k_{23} & -\left(a_5 \frac{i_{sq}}{\psi_{rd}} + \omega_r \right) & a_6 - k_{21} \omega_r & 1 & k_{21} \\ k_{33} + a_5 \omega_r & -k_{34} & -\omega_r a_5 \frac{i_{sd}}{\psi_{rd}} & k_{32} \omega_r & a_6 + a_5 \frac{i_{sd}}{\psi_{rd}} & -k_{32} + a_5 \frac{i_{sq}}{\psi_{rd}} \\ k_{34} & k_{33} + a_5 \omega_r & -\omega_r a_5 \frac{i_{sq}}{\psi_{rd}} - \omega_r^2 & -k_{31} \omega_r & \omega_r & a_6 + k_{31} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

gdzie indeksy d, q oznaczają składowe wektorów w wirującym układzie współrzędnych zorientowanym względem wektora strumienia wirnika. Składowe wektorów w tak przyjętym układzie współrzędnych są stałe w stanie ustalonym.

$$\frac{d\tilde{i}_s}{d\tau} = a_1 \tilde{i}_s + a_2 \tilde{\psi}_r + j a_3 (\hat{\zeta} - \omega_r \psi_r) + k_{11} \tilde{\zeta} + j k_{12} \tilde{\zeta} + k_{13} \tilde{i}_s + j k_{14} \tilde{i}_s, \quad (8)$$

$$\frac{d\tilde{\psi}_r}{d\tau} = a_5 \tilde{i}_s + a_6 \tilde{\psi}_r + j (\hat{\zeta} - \omega_r \psi_r) + k_{21} \tilde{\zeta} + j k_{22} \tilde{\zeta} + k_{23} \tilde{i}_s + j k_{24} \tilde{i}_s, \quad (9)$$

$$\frac{d\tilde{\zeta}}{d\tau} = a_5 \hat{\omega}_r (i_s + \tilde{i}_s) + a_6 \hat{\zeta} + j \hat{\omega}_r \hat{\zeta} + k_{31} \tilde{\zeta} + j k_{32} \tilde{\zeta} + k_{33} \tilde{i}_s + j k_{34} \tilde{i}_s. \quad (10)$$

Równanie opisujące dynamikę błędów odtwarzania zmiennej ζ nie zostało uwzględnione w powyższym układzie, ze względu na brak możliwości wyrażenia błędu prędkości wirnika ani wartości odtwarzanej prędkości wirnika bez znajomości odtwarzanej zmiennej $\hat{\zeta}$. Równanie (10) jest zatem przekształconym równaniem (4) obserwatora.

Występującą w równaniach (8) – (10) odtwarzaną prędkość wirnika oraz błąd odtwarzania zmiennej ζ wyrazić można za pomocą błędów odtwarzania następującymi zależnościami:

$$\hat{\omega}_r = \frac{(\psi_{r\alpha} + \tilde{\psi}_{r\alpha}) \hat{\zeta}_\alpha + (\psi_{r\beta} + \tilde{\psi}_{r\beta}) \hat{\zeta}_\beta}{(\psi_{r\alpha} + \tilde{\psi}_{r\alpha})^2 + (\psi_{r\beta} + \tilde{\psi}_{r\beta})^2}, \quad (11)$$

$$\tilde{\zeta} = \hat{\zeta} - \hat{\omega}_r \psi_r - \hat{\omega}_r \tilde{\psi}_r. \quad (12)$$

Właściwości dynamiczne obserwatora ocenić można na podstawie rozkładu biegunów. Układ równań (8) – (12) stanowi nieliniowy układ równań różniczkowych, zatem nie jest możliwe bezpośrednie określenie położenia biegunów na podstawie równań opisujących dynamikę błędów odtwarzania. Pod pojęciem biegunów obserwatora w niniejszej pracy rozumie się wartości własne macierzy stanu uzyskanej w wyniku linearyzacji równań (8) – (12) wokół punktu pracy zapewniającego zerowe błędy odtwarzania. Macierz ta jest następującej postaci:

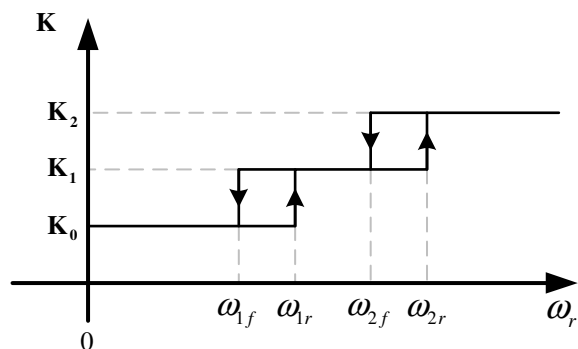
Wartości elementów macierzy (13) zależne są między innymi od prędkości kątowej wirnika, modułu strumienia wirnika oraz generowanego momentu, który jest proporcjonalny do składowej prądu stojana i_{sq} . Wielkości te mogą zmieniać się w czasie, zatem właściwości dynamiczne obserwatora mogą być od nich zależne. Z przeprowadzonych

badania w [6] wynika, że zmiany modułu strumienia wirnika oraz momentu obciążenia nie mają istotnego wpływu na rozkład biegunów. Na zmiany właściwości obserwatora wpływają jedynie zmiany prędkości wirnika, co należy uwzględnić podczas doboru wzmacnień.

3. DOBÓR WZMOCNIEŃ OBSERWATORA

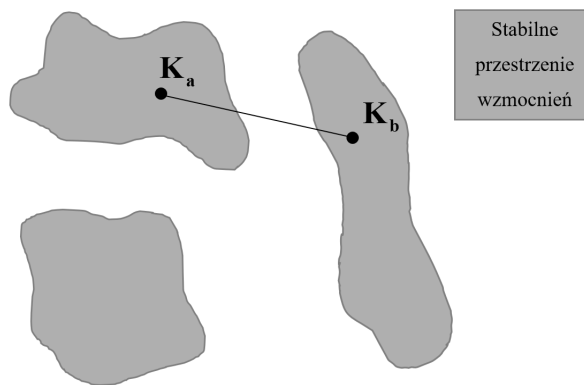
3.1. Modyfikacja wzmacnień w funkcji prędkości wirnika

Właściwości dynamiczne obserwatora zależne są od prędkości kątowej wirnika. Oznacza to, że obserwator może mieć dobre właściwości w pewnym przedziale prędkości, natomiast w innych zakresach dynamika obserwatora może być niesatysfakcjonująca lub wręcz układ może być niestabilny. Oznacza to, że podczas doboru wartości wzmacnień należy rozpatrywać cały przedział dopuszczalnych prędkości. Sposobem ułatwiającym uzyskanie dobrych właściwości dynamicznych jest podział całego zakresu dopuszczalnych prędkości na mniejsze przedziały i dobór wartości wzmacnień dla każdego z nich. Wówczas w zależności od bieżącej prędkości wirnika wybierany jest odpowiedni zestaw wzmacnień zgodnie z rys. 1. Przełączenie wartości wzmacnień przy rosnącej prędkości następuje dla wartości ω_r , natomiast przy malejącej prędkości dla wartości ω_f , gdzie $\omega_r > \omega_f$. Histereza ta została wprowadzona w celu uniknięcia wielokrotnego przełączania wartości wzmacnień wokół prędkości granicznych.



Rys. 1. Sposób modyfikacji wzmacnień obserwatora wraz ze zmianami prędkości wirnika

Podczas przełączania zestawów wzmacnień nie stosuje się liniowej zmiany wartości wzmacnień z jednego zestawu do drugiego ze względu na możliwość występowania wartości wzmacnień, dla których obserwator jest niestabilny. Sytuacja ta została zobrazowana na rys. 2. Dla przykładowych dobranych zestawów wzmacnień K_a oraz K_b obserwator jest stabilny. Obserwator jest stabilny także w pewnym otoczeniu tych wartości wzmacnień. Między obszarami stabilnych wzmacnień mogą się natomiast znajdować obszary, w których obserwator jest niestabilny. Dokonując liniowego przejścia między takimi zestawami wzmacnień obserwator może chwilowo stracić stabilność. Wady tej pozbawiony jest stosowany w tej pracy sposób skokowej zmiany wartości wzmacnień.



Rys. 2. Obszary stabilnych wartości wzmacnień obserwatora

3.2. Algorytm ewolucyjny

W niniejszej pracy do doboru wzmacnień obserwatora zastosowano klasyczny algorytm ewolucyjny [7]. Zastosowano kodowanie liczbami rzeczywistymi, zatem pojedynczy osobnik jest zbiorem dwunastu wartości wzmacnień. Przyjęto populację wynoszącą 500 osobników. Warunkiem zakończenia działania algorytmu ewolucyjnego jest osiągnięcie 50 pokoleń. Inicjalizacji populacji dokonuje się poprzez losowy wybór wartości wzmacnień z zadanego przedziału. Do selekcji osobników biorących udział w tworzeniu kolejnego pokolenia zastosowano selekcję turniejową. Generowanie potomka odbywa się przez zastosowanie krzyżowania arytmetycznego oraz mutacji nierównomiernej, w której wpływ mutacji maleje wraz z kolejnymi pokoleniami. Zaproponowana funkcja celu opisana została w kolejnym rozdziale.

3.3. Funkcja celu

Jakość działania obserwatora ocenić można na podstawie przebiegów wielkości estymowanych, co wymaga przeprowadzenia symulacji bądź badań eksperymentalnych. W przypadku zaproponowanej metody doboru wzmacnień z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych, funkcja celu jest wielokrotnie wywoływana, zatem dobór wzmacnień w oparciu na przebiegach wartości odtwarzanych jest bardzo czasochłonny. Zaproponowana funkcja celu oparta jest na położeniu biegunów obserwatora, co znacznie przyspiesza dobór wzmacnień. Jest ona sumą składowych funkcji celu mających zapewnić stabilność obserwatora oraz dobre właściwości dynamiczne. Ogólna postać minimalizowanej funkcji celu przedstawiona została poniżej:

$$F = \sum_{j=1}^{n_k} F_j(\lambda(\mathbf{K}, \omega_r, \psi_r, m_o)), \quad (14)$$

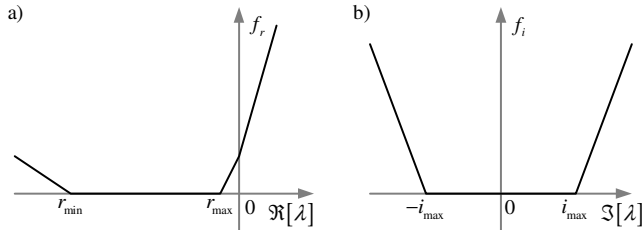
gdzie F_1, F_2, \dots są funkcjami stanowiącymi wskaźniki jakości poszczególnych kryteriów doboru wzmacnień, natomiast n_k jest liczbą kryteriów. λ jest wektorem biegunów obserwatora, które zależne są od wzmacnień obserwatora \mathbf{K} , prędkości wirnika, modułu strumienia wirnika oraz momentu obciążenia.

Pierwsze kryterium związane jest ze stabilnością obserwatora. Oczekuje się, by wszystkie bieguny znalazły się po lewej stronie płaszczyzny zespolonej. Nie mogą się one także znajdować zbyt daleko od osi rzeczywistej czy urojonej, ze względu na ograniczoną częstotliwość próbkowania mierzonych sygnałów. Zaproponowana składowa funkcji celu F_1 jest zatem sumą funkcji f_r oraz f_i ,

będących funkcjami kary odpowiednio dla części rzeczywistej oraz urojonej biegunu.

$$F_1(\lambda) = \sum_{i=1}^p [f_r(\Re[\lambda_i]) + f_i(\Im[\lambda_i])], \quad (15)$$

gdzie p jest liczbą biegunów, natomiast funkcje f_r oraz f_i zostały zdefiniowane na rys. 3.



Rys. 3. Funkcje kary dla a) części rzeczywistej biegunu oraz b) części urojonej

Kolejne kryteria mają na celu zapewnienie dobrych właściwości dynamicznych obserwatora. Oczekuje się, by obserwator korygował błędy odtwarzania możliwie szybko. Uzyskuje się to poprzez ulokowanie biegunów, w szczególności biegunów dominujących (o największej wartości części rzeczywistej), jak najdalej po lewej stronie od osi urojonej. Składowa funkcji celu związana z tym kryterium opisana jest zatem zależnością:

$$F_2(\lambda) = k_2 r = k_2 \max \{ \Re[\lambda_1], \Re[\lambda_2], \dots, \Re[\lambda_p] \}, \quad (16)$$

gdzie r jest to odległość biegunu dominującego od osi urojonej, natomiast k_2 jest współczynnikiem wagowym tego kryterium.

Składowa F_3 funkcji celu ma na celu wyeliminowanie występowania oscylacji w stanach przejściowych obserwatora. Przyjęto, że dostateczne tłumienie zapewnione jest, gdy wartość względnego współczynnika tłumienia jest mniejsza od 0,707, czyli gdy część urojona biegunu jest mniejsza od wartości części rzeczywistej. Warunek ten powinien być spełniony w szczególności w przypadku biegunów dominujących. Bieguny położone dalej od osi urojonej, których wpływ zanika znacznie szybciej, mogą być ulokowane dalej od osi rzeczywistej. Założenia te spełnia przedstawiona poniżej funkcja.

$$F_3(\lambda) = \sum_{i=1}^p \begin{cases} 0 & \text{gdy } |\Re[\lambda_i]| \geq |\Im[\lambda_i]| \\ k_3 \exp\left(-a \frac{r - \Re[\lambda_i]}{r}\right) & \text{gdy } |\Re[\lambda_i]| < |\Im[\lambda_i]| \end{cases} \quad (17)$$

4. WYNIKI

Badania przeprowadzono dla maszyny o mocy 5,5 kW o znamionowym napięciu stojana 400 V, znamionowym prądzie 11 A oraz znamionowej prędkości obrotowej 1450 obr/min. Wartości parametrów modelu maszyny wyrażone w jednostkach względnych wynoszą: $R_s = 0,0487$, $R_r = 0,0261$, $L_m = 2,135$, $L_s = L_r = 2,224$. W pracy rozpatrywane są trzy przedziały prędkości wirnika:

- a) małe prędkości – zakres ten obejmuje prędkości od prędkości bliskich zera (około 1% prędkości znamionowej) do prędkości 0,1,
- b) prędkości robocze – zakres ten obejmuje prędkości od 0,1 do 1,0,
- c) zakres osłabiania pola – prędkości większe od prędkości znamionowych, przy których moduł strumienia wirnika maleje wraz ze wzrostem prędkości (do $\omega_r = 2,0$).

Dla każdego z tych przedziałów dobierany jest oddzielny zestaw wzmocnień. Podczas doboru wzmocnień pod uwagę brane są wartości prędkości na krańcach przedziałów oraz znamionowy moduł wektora strumienia wirnika, za wyjątkiem prędkości 2,0, gdzie przyjęto połowę znamionowego modułu wektora strumienia wirnika. Wartości parametrów funkcji celu opisanej w rozdziale 3.3 są następujące: $r_{min} = -12$, $r_{max} = -0.001$, $i_{max} = 12$, $k_2 = 10$, $k_3 = 0.1$. Wartości funkcji celu uzyskane w ostatnim pokoleniu algorytmu ewolucyjnego przy 15 kolejnych próbach doboru wartości wzmocnień przedstawiono w tab. 1-3.

Ujemna wartość funkcji celu oznacza, że wszystkie bieguny znajdują się w dozwolonych położeniach i obserwator jest stabilny. W przypadku małych prędkości uzyskanie ujemnego wskaźnika jakości jest znacznie trudniejsze niż dla zestawów wzmocnień obowiązujących przy dużych prędkościach. Z przeprowadzonych badań na większej liczbie prób doboru wzmocnień z użyciem algorytmów ewolucyjnych ujemne wartości funkcji celu uzyskano jedynie w około 10% przypadków. W przypadku prędkości roboczych oraz dla zakresu osłabiania pola niemal każda próba doboru wzmocnień kończy się sukcesem. Z badań przeprowadzonych na dużej liczbie prób doborów wzmocnień wynika, że skuteczność doboru wzmocnień dla tych zestawów wzmocnień przekracza 99%.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że w przypadku badań przedstawionych w tab. 1 brak ujemnej wartości funkcji celu nie świadczy o braku stabilności. W przedstawionych próbach doboru wzmocnień bieguny znajdują się blisko osi urojonej, gdzie wskaźnik jakości związany z kryterium stabilności przyjmuje już wartość dodatnią, jednak bieguny w dalszym ciągu posiadają ujemną część rzeczywistą.

Mniejsza wartość funkcji celu oznacza większą odległość biegunów dominujących od osi urojonej, zatem krótszy czas ustalania. Z przeprowadzonych badań wynika, że wraz ze wzrostem prędkości pracy maszyny możliwe jest uzyskanie krótszych stanów przejściowych obserwatora.

Tablica 1. Wartości funkcji celu w 15 kolejnych próbach doboru wzmocnień obserwatora dla zakresu małych prędkości

Nr próby	$\omega_r = 0,01$	$\omega_r = 0,1$	Suma
1	154.916	-0.011	154.905
2	148.666	-0.011	148.655
3	154.066	-0.010	154.056
4	151.840	-0.011	151.829
5	172.035	-0.013	172.022
6	150.584	25.224	175.808
7	130.635	-0.030	130.606
8	-0.023	-0.023	-0.046
9	139.023	-0.011	139.013
10	151.677	-0.011	151.666
11	151.842	-0.011	151.831
12	148.938	121.284	270.222
13	-0.010	-0.010	-0.021
14	-0.011	-0.021	-0.032
15	127.666	77.292	204.958

Tablica 2. Wartości funkcji celu w 15 kolejnych próbach doboru wzmocnień obserwatora dla zakresu prędkości roboczych

Nr próby	$\omega_r = 0,1$	$\omega_r = 1,0$	Suma
1	-0.402	-18.149	-18.551
2	-1.848	-25.325	-27.173
3	-1.285	-13.970	-15.255
4	-2.161	-14.555	-16.716
5	-0.050	-2.511	-2.561
6	-0.681	-11.443	-12.124
7	-0.558	-22.053	-22.611
8	-0.275	-18.573	-18.847
9	-0.566	-11.470	-12.036
10	-1.197	-25.512	-26.709
11	-1.338	-18.213	-19.551
12	-0.601	-28.359	-28.960
13	-0.158	-19.389	-19.547
14	-1.463	-24.329	-25.793
15	-0.156	-24.010	-24.166

Tablica 3. Wartości funkcji celu w 15 kolejnych próbach doboru wzmocnień obserwatora dla zakresu osłabiania pola

Nr próby	$\omega_r = 1,0$	$\omega_r = 2,0$	Suma
1	-16.218	-26.314	-42.532
2	-14.685	-29.716	-44.401
3	-26.080	-19.587	-45.668
4	-14.799	-20.352	-35.150
5	-12.513	-26.682	-39.195
6	-12.996	-24.838	-37.834
7	-34.049	-15.176	-49.225
8	-16.817	-36.188	-53.005
9	-17.046	-39.239	-56.285
10	-20.608	-26.499	-47.106
11	-15.551	-33.871	-49.421
12	-21.662	-32.401	-54.062
13	-15.943	-37.638	-53.582
14	-13.674	-33.303	-46.977
15	-11.786	-31.124	-42.911

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Z przeprowadzonych badań wynika, że możliwe jest zastosowanie algorytmów ewolucyjnych do doboru wzmocnień rozszerzonego obserwatora prędkości maszyny indukcyjnej. Wykorzystanie funkcji celu opartej na rozkładzie biegunów pozwala na znaczne skrócenie czasu potrzebnego na wykonanie algorytmu doboru wzmocnień.

EVOLUTIONARY ALGORITHMS IN GAINS SELECTION OF EXTENDED SPEED OBSERVER OF INDUCTION MACHINE

The paper concerns the problem of gains selection of extended speed observer for induction machines. Equations of the observer as well as equations of the dynamics of estimation errors have been presented. Dynamic properties and stability of the observer depend on proper gains selection. The analyzed observer requires an adjustment of 12 gains. Furthermore, the complexity of linearized equations of the error estimation dynamics makes an analytical solution approach for the problem of gains selection impossible. A method based on evolutionary algorithm has been proposed in order to counteract this problem, where a cost function based on poles placement of the observer has been presented. Defined cost function ensures stability of the observer as well as good dynamic properties. The main goal is a transient time reduction of the observer which ensures a proper damping properties in order to avoid the presence of estimation errors oscillations during transient states. Three different rotor speed ranges are considered with separate observer gains set. A series of gains selection attempts have been conducted for every presented speed range. The final results presents and discusses the cost function values in the last generation of evolutionary algorithm.

Keywords: induction machine, speed observer, evolutionary algorithms.

Uzyskanie ujemnego wskaźnika jakości zapewnia ulokowanie biegunów obserwatora po lewej stronie płaszczyzny zespolonej. Należy jednak pamiętać, że bieguny obserwatora uzyskano ze zlinearyzowanych równań opisujących dynamikę błędów odtwarzania. W przypadku dużych odchyień od punktu pracy, czyli od zerowych błędów odtwarzania, wnioski na temat właściwości dynamicznych obserwatora wyciągnięte z rozkładu biegunów mogą być błędne. Wymagane jest zatem symulacyjne przetestowanie uzyskanego zestawu wzmocnień przed jego ostatecznym zastosowaniem.

Projekt został częściowo sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie numeru 2015/19/N/ST7/03078.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Z. Krzeźniński: Identyfikacja parametrów maszyny indukcyjnej z zastosowaniem obserwatorów prędkości, *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 4b, 2012.
2. T. Białoń, A. Lewicki, R. Niestrój, and M. Pasko: Porównanie dwóch metod doboru parametrów proporcjonalnego obserwatora zmiennych stanu silnika indukcyjnego pracującego w roli modelu przestrzajanego estymatora typu, *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 4b, 2012.
3. R. Niestrój and T. Białoń: Estymator typu mras z proporcjonalnym obserwatorem luenbergera do odtwarzania zmiennych stanu silnika indukcyjnego, *Pr. Nauk. Inst. Masz. Napędów i Pomiarów Elektr. Politech. Wrocławskiej*, no. 62, pp. 372–377, 2008
4. H. Kubota, K. Matsuse, and T. Nakano: New adaptive flux observer of induction motor for wide speed rangemotor drives, [Proceedings] *IECON '90 16th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, pp. 921–926, 1990.
5. H. Kubota, K. Matsuse, S. Member, and T. Nakmo: DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor, vol. 29, no. 2, pp. 344–348, 1993.
6. D. Wachowiak: Analiza właściwości rozszerzonego obserwatora prędkości maszyny indukcyjnej, rozprawa doktorska, Gdańsk 2016.
7. T. D. Gwiazda: Algorytmy genetyczne. Kompendium. Tom 1, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2007.

