

Porównanie identyfikacji parametrów modelu matematycznego silnika indukcyjnego przy zastosowaniu algorytmu ewolucyjnego oraz addytywnego i multiplikatywnego wskaźnika jakości

Dynamiczny rozwój technik sterowania, zwłaszcza sterowania wektorowego prędkością obrotową w układach z silnikami indukcyjnymi wymaga znajomości parametrów fizycznych związanych z danym silnikiem. W wielu pracach sterowanie opiera się na znajomości np. wartości i położenia strumienia elektromagnetycznego skojarzonego. Do budowy obserwatora - bloku odtwarzającego położenie i wartość tego strumienia - wykorzystuje się np. wartości parametrów silnika indukcyjnego. Istnieje wiele metod obliczania tych parametrów, wykorzystujących wiele różnych wskaźników jakości. W niniejszym artykule dokonano porównania metod identyfikacji parametrów modelu matematycznego silnika indukcyjnego przy zastosowaniu algorytmu ewolucyjnego i addytywnego oraz multiplikatywnego wskaźnika jakości.

1. WSTĘP

W chwili obecnej silniki indukcyjne są dominującymi maszynami elektrycznymi stosowanymi we współczesnych układach napędowych. W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój technik sterowania, zwłaszcza sterowania wektorowego prędkością obrotową w układach z tymi silnikami [5, 6, 9]. Metody te wymagają znajomości parametrów fizycznych związanych z danym silnikiem. Ich dokładna znajomość determinuje dokładność regulacji prądu i prędkości obrotowej przy dynamicznych zmianach momentu obciążenia. W wielu pracach sterowanie opiera się na znajomości np. wartości i położenia strumienia elektromagnetycznego skojarzonego [2, 5, 6, 9]. By uzyskać te informacje wykorzystuje się np. obserwatory zmiennych stanu lub sieci neuronowe [9]. Do budowy obserwatora (bloku odtwarzającego położenie i wartość tego strumienia) wykorzystuje się np. wartości parametrów silnika indukcyjnego (wartości rezystancji fazy stojana R_1 i fazy wirnika sprowadzonej na stronę stojana R_2 , wartości indukcyjności fazy stojana L_1 i fazy wirnika sprowadzonej na stronę stojana

na L_2 , wartości indukcyjności wzajemnej między fazami stojana i wirnika sprowadzonej na stronę stojana L_{12} , wartości współczynnika tarcia lepkiego D oraz wartości momentu bezwładności J) [2]. Istnieje wiele metod obliczania tych parametrów wykorzystujących wiele różnych wskaźników jakości [1, 2, 3, 4, 7]. Do metod tych należą metody wykorzystujące algorytmy ewolucyjne.

W niniejszej pracy dokonano porównania metod identyfikacji parametrów modelu matematycznego silnika indukcyjnego przy zastosowaniu algorytmu ewolucyjnego i addytywnego oraz multiplikatywnego wskaźnika jakości.

2. PRELIMINARIA

W niniejszej pracy zastosowano powszechnie przyjmowane założenia upraszczające dotyczące modelu matematycznego silnika indukcyjnego [2, 3, 8, 9, 10]:

- nie uwzględnia się nasycenia obwodu magnetycznego silnika,

- nie uwzględnia się strat mocy w rdzeniu obwodu magnetycznego,
- nie uwzględnia się wpływu efektów żłobkowych,
- przyjmuje się symetryczne uzwojenie trójfazowe dla stojana,
- przyjmuje się symetryczne uzwojenie trójfazowe wirnika zastępujące pręty klatki,
- poszczególne pasma fazowe stojana sprzęgają się między sobą przez pierwszą harmoniczną strumieni magnetycznych głównych,
- poszczególne pasma fazowe wirnika sprzęgają się między sobą przez pierwszą harmoniczną strumieni magnetycznych głównych,
- uzwojenia stojana z uzwojeniami wirnika sprzęgają się przez harmoniczne podstawowe indukcyjności wzajemnych faz stojana i zastępczych faz wirnika.

Dla tych założeń osobnik, będący jednocześnie parametrami silnika indukcyjnego, jest wektorem 7-elementowym o współrzędnych $\{R_1, R_2, L_1, L_2, L_{12}, J, D\}$ [2, 3]. Pojedynczy osobnik jest unikalnym rozwiązaniem problemu identyfikacji. W niniejszej pracy autorzy przyjęli zmiennopozycyjną reprezentację zadania [2, 3].

Do celów identyfikacji wykorzystano cztery kryteria jakości (K_1, K_2, K_3, K_4), które obliczano odpowiednio [2]:

- K_1 – jako sumę kwadratów błędów w dyskretnych momentach czasu między wartościami zmierzonymi prędkości obrotowej rejestrowanej podczas rozruchu a wartościami obliczonymi na podstawie osobnika,
- K_2 – jako sumę kwadratów błędów w dyskretnych momentach czasu między zmierzonymi wartościami skutecznego prądu fazowego rejestrowanego podczas rozruchu a wartościami obliczonymi na podstawie osobnika,
- K_3 – jako sumę kwadratów błędów między wartościami zmierzonymi momentu elektromagnetycznego a wartościami obliczonymi na podstawie osobnika w wybranych punktach pomiarowych,
- K_4 – jako sumę kwadratów błędów między wartościami zmierzonymi prądu fazowego a wartościami obliczonymi na podstawie osobnika w wybranych punktach pomiarowych.

Porównano metody wielokryterialnej identyfikacji prowadzonej do problemu jednokryterialnego:

- wielokryterialna ewolucyjna metoda identyfikacji prowadzona do przypadku jednokryterialnego przy zastosowaniu addytywnego wskaźnika jakości,
- wielokryterialna ewolucyjna metoda identyfikacji prowadzona do przypadku jednokryterialnego

go przy zastosowaniu multiplikatywnego wskaźnika jakości.

Badanym silnikiem był silnik Tamel Sg90L-6. Niezbędnych pomiarów dokonano przy zastosowaniu programu DAMOT. Dane pomiarowe stanowiły rekordy wejściowe algorytmu ewolucyjnego. W obydwu przypadkach wielokryterialności jako metodę selekcji wykorzystano dwie metody doboru naturalnego: metodę turnieju i metodę deterministyczną [2].

3. PORÓWNANIE WIELOKRYTERIALNEJ EWOLUCYJNEJ IDENTYFIKACJI PARAMETRÓW MODELU MATEMATYCZNEGO SILNIKA INDUKCYJNEGO PRZY ZASTOSOWANIU ADDYTYWNEGO I MULTIPLIKATYWNEGO WSKAŹNIKA JAKOŚCI

Wielokryterialna ewolucyjna metoda identyfikacji prowadzona do przypadku jednokryterialnego przy zastosowaniu addytywnego wskaźnika jakości.

W tej metodzie całkowity wskaźnik jakości stanowił sumę cząstkowych wskaźników jakości i obliczany był zgodnie ze wzorem:

$$K = \sum_{i=1}^I \frac{w_i}{N_r^2} \sum_{j=1}^P (w_{z,j} - w_{oi,j})^2 \quad (1)$$

gdzie:

- w_i – wartość współczynnika wagowego i -tego kryterium,
- I – liczba kryteriów,
- w_{zj} – wielkość zmierzona w j -tej chwili czasu,
- w_{oj} – wielkość obliczona w j -tej chwili czasu,
- P – liczba dyskretnych momentów czasu, w których obliczony jest wskaźnik jakości,
- N_r – współczynnik normalizujący.

Parametry algorytmu ewolucyjnego są takie jak w [2]. Wyniki identyfikacji przedstawiono w tabeli 1.

Wielokryterialna ewolucyjna metoda identyfikacji prowadzona do przypadku jednokryterialnego przy zastosowaniu multiplikatywnego wskaźnika jakości.

W tej metodzie całkowity wskaźnik jakości stanowił iloczyn cząstkowych wskaźników jakości i obliczany był zgodnie ze wzorem:

$$K = \prod_{i=1}^I \frac{1}{N_r^2} \sum_{j=1}^P (w_{z,j} - w_{oi,j})^2 \quad (2)$$

Tabela 1

**Wyniki identyfikacji przy użyciu wielokryterialnego programu ewolucyjnego,
w którym problem wielokryterialny sprowadzono do przypadku jednokryterialnego
przy zastosowaniu addytywnego wskaźnika jakości**

Lp.	R ₁ [Ω]	R ₂ [Ω]	L ₁ [H]	L ₂ [H]	L ₁₂ [H]	J [kgm ²]	D [Nms/rad]	K
1	5.02776	3.43342	0.19802	0.10315	0.08088	0.01416	0.00603	0.3084
2	5.02041	3.43268	0.20101	0.10132	0.08084	0.01347	0.00598	0.2949
3	5.02259	3.43368	0.20092	0.10107	0.08076	0.01413	0.00596	0.2929
4	5.02377	3.42178	0.20023	0.10168	0.08084	0.01409	0.00600	0.2940
5	5.02463	3.43384	0.19868	0.10259	0.08076	0.01399	0.00602	0.2992
6	5.01670	3.42167	0.20071	0.10117	0.08068	0.01375	0.00604	0.2922
7	5.02347	3.43374	0.20008	0.10135	0.08063	0.01394	0.00602	0.2936
8	5.01671	3.43088	0.19671	0.10353	0.08065	0.01415	0.00601	0.3170
9	5.02674	3.44720	0.20594	0.10065	0.08079	0.01304	0.00595	0.6749
10	5.01011	3.42405	0.20254	0.10051	0.08071	0.01371	0.00598	0.3071

Tabela 2

**Wyniki identyfikacji przy użyciu wielokryterialnego programu ewolucyjnego,
w którym problem wielokryterialny sprowadzono do przypadku jednokryterialnego
przy zastosowaniu multiplikatywnego wskaźnika jakości**

Lp.	R ₁ [Ω]	R ₂ [Ω]	L ₁ [H]	L ₂ [H]	L ₁₂ [H]	J [kgm ²]	D [Nms/rad]	K
1	5.01728	3.43581	0.20078	0.10117	0.08076	0.01373	0.00599	0.00120
2	5.02609	3.42756	0.20109	0.10083	0.08073	0.01334	0.00606	0.00180
3	5.02202	3.43231	0.20006	0.10172	0.08081	0.01357	0.00602	0.00099
4	5.02056	3.43018	0.20064	0.10125	0.08070	0.01368	0.00600	0.00109
5	5.01998	3.43683	0.20079	0.10142	0.08087	0.01360	0.00598	0.00117
6	5.01265	3.42724	0.20069	0.10117	0.08067	0.01382	0.00602	0.00103
7	5.01632	3.43228	0.19810	0.10274	0.08068	0.01358	0.00600	0.00070
8	5.01637	3.43019	0.19920	0.10239	0.08083	0.01403	0.00601	0.00059
9	5.02533	3.42874	0.19920	0.10157	0.08061	0.01321	0.00603	0.00135
10	5.00187	3.44847	0.19265	0.10430	0.08048	0.01496	0.00594	0.06717

Wyniki identyfikacji przedstawiono w tabeli 2.

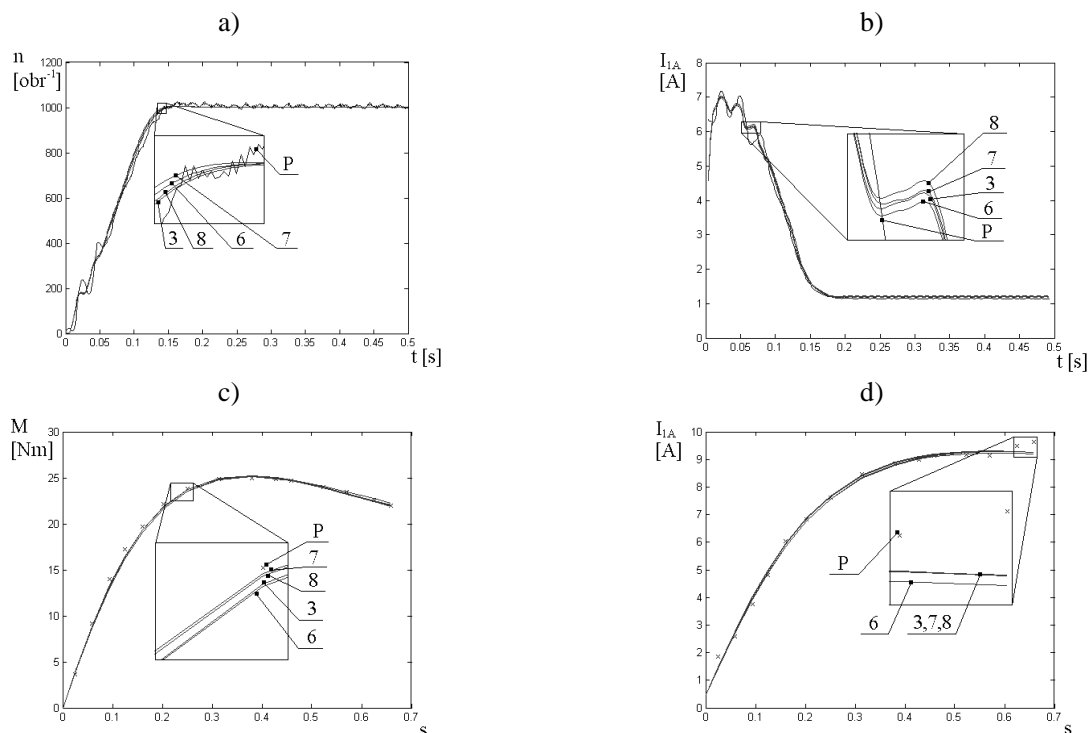
Na podstawie osobników (obliczonych parametrów silnika indukcyjnego) wykreślono charakterystyki skokowe i porównano je z charakterystykami pomiarowymi dla metody z addytywnym i multiplikatywnym wskaźnikiem jakości. Na rys. 1 oznaczono:

- P – charakterystyki pomiarowe,
- 3, 6, 7, 8 – charakterystyki obliczone na podstawie osobników odpowiednio:
 - 3 – z tabeli 1,
 - 6 – z tabeli 1,
 - 7 – z tabeli 2,
 - 8 – z tabeli 2.

Osobniki, dla których wykreślono charakterystyki, były obliczonymi osobnikami najlepszymi.

4. PODSUMOWANIE

Jak wynika z tabel 1 i 2 i określonych charakterystyk otrzymane wyniki są powtarzalne i jednoznaczne. Jak dodatkowo wynika z rys. 1, osobnik 8 z tabeli 2 jest osobnikiem najlepszym. Określa on parametry modelu matematycznego silnika indukcyjnego. Pozostałe otrzymane wyniki, podobnie jak osobnik najlepszy, mieszczą się w granicach założonego uchybu. Wyniki otrzymane przy zastosowaniu obydwu metod są porównywalnie dobre. Czas obliczeń programów ewolucyjnych wykorzystujących te metody był zbliżony. Metoda wielokryterialności dla wskaźnika multiplikatywnego była nieznacznie szybsza. Obydwie metody wielokryterialne dla tego zadania należy więc traktować jako dające porównywalnie dobre rezultaty.



Rys. 1. Wykreślone na podstawie obliczonych ewolucyjnie osobników z tabel 1 i 2:

- a) przebieg prędkości obrotowej,
- b) przebieg prądu pierwszej fazy stojana,
- c) zależność momentu elektromagnetycznego od poślizgu,
- d) zależność prądu fazowego od poślizgu

Literatura

1. *Chrzan P.J.*: Identyfikacja parametrów silnika indukcyjnego w układzie polowozorientowanym podczas postoju. I Krajowa Konferencja Użytkowników MATLAB'a, AGH – Kraków, 14-15 listopada 1995.
2. *Hudy W.*: Projektowanie układu sterowania oraz identyfikacja parametrów silnika indukcyjnego z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych i różnych kryteriów jakości. Rozprawa doktorska, AGH, Kraków 2007.
3. *Hudy W., Jaracz K.*: Identyfikacja parametrów silnika indukcyjnego przy wykorzystaniu zasady optymalności w sensie Pareto i zastosowaniu algorytmów ewolucyjnych. Materiały Konferencyjne SENE 2005, Łódź 23-25 listopada 2005.
4. *Jażdżyński W., Milej W.*: Identyfikacja niestacjonarnego modelu silnika indukcyjnego z uwzględnieniem zjawisk cieplnych – Identification of a nonstationary model of an induction motor accounting for heating problem. SME'2002: XXXVIII International Symposium on Electrical Machines: new constructions, technologies and calculation methods of electrical machines: Cedzyna – June 18–21, Kielce, Poland 2002.
5. *Kaźmierkowski M.P.*: Porównanie metody sterowania polowozorientowanego z metodą bezpośredniej regulacji momentu silnika klatkowego. Przegląd Elektrotechniczny 4/98, Warszawa 1998.
6. *Leonard W.*: Control of Electrical Drives. Springer Verlag, Berlin 1985.
7. *Macek-Kamińska K.*: Estymacja parametrów modeli matematycznych silników indukcyjnych dwuklatkowych i głębokożłobkowych. Wyd. Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Opolu, Opole 1992.
8. *Miksiewicz R.*: Maszyny elektryczne. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
9. *Orłowska-Kowalska T.*: Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
10. *Skwarczyński J., Tertel Z.*: Maszyny elektryczne. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, AGH, Kraków 1999.

Recenzent: dr inż. Agnieszka Gornig

