

Analiza wpływu wskaźnika jakości na wyniki identyfikacji parametrycznej modelu matematycznego silnika indukcyjnego z zastosowaniem algorytmu genetycznego

Streszczenie. Praca przedstawia problem identyfikacji parametrycznej modelu matematycznego silnika indukcyjnego z zastosowaniem algorytmu genetycznego. Wykorzystano model matematyczny silnika sformułowany w wirującym układzie współrzędnych zorientowany zgodnie z wektorem napięcia stojana. Analizowano wpływ przyjętego wskaźnika jakości na wyniki identyfikacji. Badania eksperymentalne wykonano dla silnika indukcyjnego o mocy 2.2 kW zasilanego z falownika napięcia.

Abstract. This paper presents problem of parametric identification of induction motor mathematical model with the use of genetic algorithm. In this work the induction motor mathematical model in the references frame, oriented according to the stator voltage vector was used. The influence of given performance index on identification results was analyzed. The experimental investigations were performed for induction motor 2.2 kW powered from voltage inverter. (The analysis of the influence of performance index on the results of parametric identification of induction motor mathematical model with the use of genetic algorithm).

Słowa kluczowe: identyfikacja parametryczna, silnik indukcyjny, model matematyczny, algorytm genetyczny.

Keywords: parametric identification, induction motor, mathematical model, genetic algorithm.

Wstęp

Silniki indukcyjne są obecnie często stosowane w układach napędowych o szerokim zakresie regulacji prędkości kątowej, ponieważ są stosunkowo tanie, niezawodne i odporne na trudne warunki eksploatacji [1, 2, 11]. Regulacja momentu i prędkości obrotowej jest realizowana w sposób efektywny, dzięki odpowiednim metodom sterowania. Zastosowanie nowoczesnych metod sterowania jest jednak ograniczone koniecznością znajomości parametrów silnika indukcyjnego. W pracy [2] dokonano przeglądu metod identyfikacji parametrów schematu zastępczego silnika indukcyjnego. Zwrócono również uwagę na to, że stosowane wcześniej metody identyfikacji parametrów obciążone były zbyt dużymi kosztami realizacji i często ograniczało to wdrażanie nowoczesnych technik sterowania do przemysłu. Ze względu na to, w ostatnich latach można zaobserwować dynamiczny rozwój nowych metod identyfikacji parametrycznej w warunkach on-line oraz off-line.

Wśród metod, które umożliwiają przeprowadzenie skutecznej identyfikacji można wyróżnić metody zaliczane do tzw. sztucznej inteligencji, czyli m.in. algorytmy genetyczne, ewolucyjne, a także algorytmy hybrydowe bazujące na metodzie klasycznej i wybranej metodzie sztucznej inteligencji. Ze względu na istotne zalety tych metod, cieszą się one wciąż rosnącym zainteresowaniem. Liczne przykłady zastosowań zawarte w pracach [3, 4, 5, 6, 8, 9, 10] świadczą o globalnych możliwościach stosowania metod sztucznej inteligencji, nawet w problemach, w których metody klasyczne zawodzą. Prowadzone przez autora doświadczenia z dziedziny identyfikacji pokazują, że istnieją przypadki, w których stosowanie metod klasycznych jest ograniczone na skutek lokalizacji minimum lokalnego wskaźnika jakości identyfikacji, zamiast globalnego oraz niestabilności rozwiązań modelu matematycznego [9].

Przedmiotem pracy jest identyfikacja parametryczna modelu matematycznego silnika indukcyjnego zasilanego z falownika napięcia. Parametry modelu matematycznego silnika wyznaczono w oparciu o minimalizację wskaźnika jakości identyfikacji z zastosowaniem zaproponowanego przez autora algorytmu genetycznego. Oceniano wpływ przyjętego wskaźnika jakości na wartości identyfikowanych parametrów. Badania eksperymentalne wykonano dla silnika indukcyjnego klatkowego o mocy 2.2 kW.

Model matematyczny silnika indukcyjnego

Ze względu na złożony opis matematyczny silników indukcyjnych w problemie modelowania matematycznego tych silników stosowane są określone założenia upraszczające, przy których silnik stanowi obiekt sterowania o parametrach skupionych. Dzięki czemu rózniczkowy model można wyrazić za pomocą równań różniczkowych zwyczajnych o stałych współczynnikach [9, 11].

Zgodnie z literaturą [7, 11], w niniejszej pracy wykorzystano jeden z najczęściej stosowanych modeli matematycznych silnika indukcyjnego, tj. model matematyczny sformułowany w wirującym układzie współrzędnych d - q o postaci:

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt}\phi_d(t) &= \phi_q(t)\omega_s(t) - R_s I_d(t) + v(t) \\
 \frac{d}{dt}\phi_q(t) &= -\phi_d(t)\omega_s(t) - R_s I_q(t) \\
 \frac{d}{dt}I_d(t) &= a_1\phi_d(t) + a_3\phi_q(t)\omega_e(t) - a_2I_d(t) + \\
 &+ I_q(t)\omega_s(t) - I_q(t)\omega_e(t) + a_3v(t) \\
 \frac{d}{dt}I_q(t) &= -a_3\phi_d(t)\omega_e(t) + a_1\phi_q(t) - I_d(t)\omega_s(t) + \\
 &+ I_d(t)\omega_e(t) - a_2I_q(t) \\
 \frac{d}{dt}\omega_e(t) &= \frac{3p^2}{2J}(\phi_d(t)I_q(t) - \phi_q(t)I_d(t)) - \frac{P}{J}M_o(t)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

przy czym:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \frac{R_r}{\sigma L_s L_r}, \quad a_2 = \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r}, \quad a_3 = \frac{1}{\sigma L_s} \\
 \sigma &= \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s L_r}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

gdzie: I_d , I_q i ϕ_d , ϕ_q – odpowiednio składowe wektora prądu i strumienia stojana, ω_s – pulsacja synchroniczna stojana, ω_e – elektryczna prędkość kątowa ($\omega_e = p\omega$), ω – mechaniczna prędkość kątowa, p – liczba par biegunów, R_s i L_s – rezystancja i indukcyjność stojana, R_r i L_r – rezystancja i indukcyjność wirnika, L_m – indukcyjność główna, J – moment bezwładności, M_o – moment obciążenia, v – moduł

wektora napięcia stojana, σ – wypadkowy współczynnik rozproszenia [9].

Identyfikacja modelu matematycznego silnika indukcyjnego

Identyfikowane parametry modelu matematycznego silnika indukcyjnego wyznaczono na podstawie minimalizacji wskaźnika jakości Q_i z zastosowaniem opracowanego przez autora algorytmu genetycznego. Analizowano wpływ przyjętego wskaźnika jakości na wyniki identyfikacji parametrycznej modelu matematycznego silnika indukcyjnego. W tym celu wykorzystano wskaźniki jakości określone w postaci zależności (3)-(5), a więc błędu średniokwadratowego prędkości kątovej ω silnika oraz jego modelu matematycznego $\hat{\omega}$ (3), błędu średniokwadratowego prądu stojana I silnika i modelu \hat{I} (4), jak również błędu średniokwadratowego uwzględniającego wszystkie wymienione wyżej wielkości (5):

$$(3) \quad Q_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\omega(i) - \hat{\omega}(i))^2$$

gdzie: N – liczba pomiarów, „ \wedge ” – rozwiązanie modelu matematycznego silnika.

$$(4) \quad Q_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I(i) - \hat{I}(i))^2$$

$$(5) \quad Q_3 = \frac{w}{N} \sum_{i=1}^N (I(i) - \hat{I}(i))^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\omega(i) - \hat{\omega}(i))^2$$

przy czym: w – współczynnik wagowy wyznaczony w pracy [9] eksperymentalnie, dla zachowania kompromisu między wartością błędu prądu stojana I oraz błędu prędkości kątovej ω .

Tabela 1 przedstawia wyniki identyfikacji eksperymentalnej modelu matematycznego silnika indukcyjnego przy użyciu algorytmu genetycznego.

Tabela 1. Wyniki identyfikacji eksperymentalnej modelu matematycznego silnika indukcyjnego z zastosowaniem algorytmu genetycznego

Wskaźnik jakości	Wartości identyfikowanych parametrów średni/najlepszy						Współczynniki korelacji	
	L_m [H]	L_r [H]	L_s [H]	R_r [Ω]	R_s [Ω]	J [kgm ²]	R_ω	R_I
Q_1	0.2202/0.1809	0.2702/0.2756	0.2328/0.2136	2.5546/2.7027	3.2641/3.3042	0.0366/0.0407	0.9998/0.9998	0.9882/0.9885
Q_2	0.2159/0.2315	0.2234/0.2618	0.2329/0.2495	2.5270/2.4569	3.2025/3.0322	0.0387/0.0384	0.9991/0.9992	0.9927/0.9930
Q_3	0.2277/0.2228	0.2547/0.2519	0.2430/0.2341	2.7070/2.4781	3.0565/2.9510	0.0421/0.0399	0.9998/0.9998	0.9926/0.9930

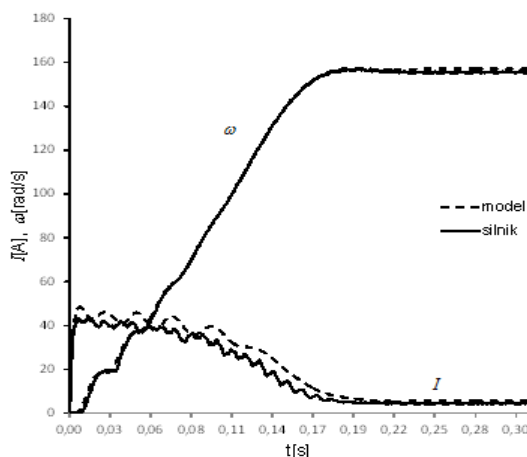
Zgodność trajektorii czasowych prądu i prędkości kątovej silnika i jego modelu matematycznego oceniano za

pomocą współczynników korelacji wielowymiarowej R (wielkość unormowana, przyjmująca wartości w przedziale $0 \leq R \leq 1$).

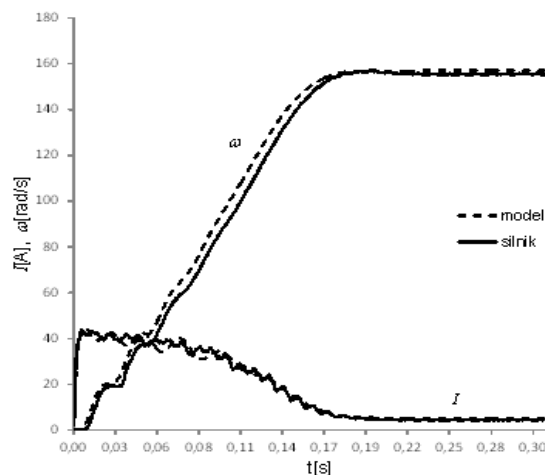
Z uwagi na losowość algorytmów genetycznych podano wynik średni z 10 uruchomień procedury identyfikacji oraz najlepszy, pod względem wartości współczynników korelacji wielowymiarowej R_ω (dla przebiegów prędkości) oraz R_I (dla przebiegów prądu). We wszystkich analizowanych przypadkach zadano identyczny rozmiar populacji oraz przestrzeń poszukiwań algorytmu genetycznego.

Oceniając proces identyfikacji na podstawie wartości współczynników R_ω oraz R_I można stwierdzić, że najgorsze rezultaty uzyskano posługując się w badaniach wskaźnikiem jakości (3), lepsze pod tym względem korzystając ze wskaźnika (4), natomiast najlepsze biorąc pod uwagę wskaźnik (5).

Na rysunkach 1-3 pokazano zarejestrowane (linia ciągła) oraz wyznaczone w procesie identyfikacji modelu matematycznego silnika (linia przerywana) odpowiedzi czasowe prędkości kątovej ω i prądu stojana I . Identyfikację dokonano na podstawie minimalizacji wskaźnika: Q_1 (rys. 1), Q_2 (rys. 2) oraz Q_3 (rys. 3).



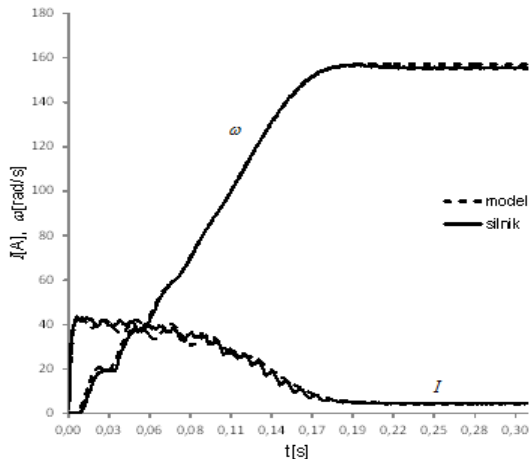
Rys.1. Porównanie odpowiedzi czasowych zarejestrowanych i wyznaczonych z rozwiązania modelu matematycznego silnika (minimalizacja wskaźnika Q_1)



Rys.2. Wykresy odpowiedzi czasowych silnika i modelu (identyfikacja z wykorzystaniem wskaźnika Q_2)

W rezultacie zastosowania w procesie identyfikacji parametrycznej wskaźnika jakości (3) otrzymano bardzo dobrą zgodność przebiegów czasowych prędkości kątovej silnika oraz modelu, ale niezgodność przebiegów

czasowych prądów (rys. 1). Natomiast wykorzystanie wskaźnika (4) spowodowało uzyskanie dobrej zgodności przebiegów prądów, ale gorszej zgodności przebiegów prędkości. Dopiero przeprowadzenie identyfikacji na podstawie minimalizacji wskaźnika jakości (5), uwzględniającego zarówno prędkość ω jak i prąd I silnika i modelu zapewniło zgodność przebiegów czasowych prądów i prędkości silnika oraz jego modelu matematycznego.



Rys.3. Porównanie odpowiedzi czasowych zarejestrowanych i wyznaczonych z rozwiązania modelu matematycznego silnika (identyfikacja z wykorzystaniem wskaźnika Q_3)

Wnioski

W pracy przedstawiono problem identyfikacji parametrycznej modelu matematycznego silnika indukcyjnego z zastosowaniem wybranego algorytmu genetycznego. Przyjęto model matematyczny silnika sformułowany w wirującym układzie współrzędnych zorientowany zgodnie z wektorem napięcia stojana. W badaniach koncentrowano się na określeniu wpływu wskaźnika jakości identyfikacji na zbieżność i dokładność analizowanego procesu.

Wyniki badań eksperymentalnych wykazały, że w rezultacie przeprowadzenia identyfikacji parametrycznej z zastosowaniem wskaźnika jakości określonego zależnością (3) uzyskano dobrą zgodność przebiegów czasowych prędkości kątowej silnika indukcyjnego oraz jego modelu matematycznego, natomiast niezgodność przebiegów czasowych prądów (silnika i modelu). Lepsze pod tym względem wyniki otrzymano posługując się w procesie identyfikacji wskaźnikiem (4) stanowiącym błąd średniokwadratowy prądu stojana silnika oraz jego modelu. Zdecydowanie najlepsze wyniki, z uwagi na zbieżność i dokładność procesu identyfikacji uzyskano uwzględniając we wskaźniku jakości obie wyżej wymienione wielkości (5),

tj. zarówno prędkość kątową jak i prąd stojana silnika oraz jego modelu matematycznego. Ocenę zgodności przebiegów czasowych prędkości i prądu oceniano za pomocą współczynników korelacji wielowymiarowej określonych dla przebiegów prędkości i prądu stojana. Przeprowadzone badania dowodzą, że aby zwiększyć dokładność analizowanego procesu identyfikacji należy wyznaczać parametry modelu matematycznego silnika korzystając ze wskaźnika jakości określonego zależnością (5).

Autorzy: dr inż. Katarzyna Rutczyńska-Wdowiak, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, ul. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: K.Rutczynska@tu.kielce.pl.

LITERATURA

- [1] Dybkowski M., Orłowska-Kowalska T., Estymacja prędkości i wybranych parametrów schematu zastępczego silnika indukcyjnego w beczujnikowym układzie napędowym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), 4b, 64-69
- [2] Bos A., Orłowska-Kowalska T., Metoda wyznaczania parametrów schematu zastępczego silnika indukcyjnego w stanie nieruchomym, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, (2000), nr 21
- [3] Ghandar, A., Michalewicz, Z., Schmidt, M., To Thuy-Duong, Zurbrugg, R., Computational Intelligence for Evolving Trading Rules, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 13, (2009), No. 1, 71 - 86
- [4] Gorzalczyński M., B., Rudziński F., A Modified Pittsburg Approach to Design a Genetic Fuzzy Rule-Based Classifier from Data, *Lecture Notes in Computer Science*, 6113 (2010), 88-96
- [5] Gorzalczyński M., B., Rudziński F., Accuracy vs. Interpretability of Fuzzy Rule-Based Classifiers: An Evolutionary Approach, *Lecture Notes in Computer Science*, 7269 (2012), 222-230
- [6] Michalewicz Z., The Emperor is Naked: Evolutionary Algorithms for Real-World Applications, *ACM Ubiquity* (2012), 1 - 13.
- [7] Pełczewski Wł., Krynke M., Metoda zmiennych stanu w analizie dynamiki układów napędowych, *WNT*, (1984)
- [8] Rutczyńska-Wdowiak K., Analiza wpływu przestrzeni poszukiwań algorytmu genetycznego w problemie projektowania filtrów, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), 11, 256-259
- [9] Rutczyńska-Wdowiak K., Analiza wpływu wartości współczynnika wagowego wskaźnika jakości w problemie identyfikacji modelu matematycznego silnika indukcyjnego z zastosowaniem algorytmu genetycznego, *Logistyka*, (2014), nr 6, 1142-1148
- [10] Rutkowski L., Metody i techniki sztucznej inteligencji, *PWN*, (2005)
- [11] Stefański T., Synteza adaptacyjnych algorytmów sterowania momentem falownikowego napędu samochodu elektrycznego z silnikiem indukcyjnym, *Politechnika Świętokrzyska Rozprawa habilitacyjna seria Monografie, Studia, Rozprawy*, (1995), nr 4