

Identyfikacja parametryczna modelu matematycznego silnika indukcyjnego z wykorzystaniem wybranego algorytmu ewolucyjnego

Streszczenie. Praca przedstawia problem identyfikacji parametrycznej modelu matematycznego silnika indukcyjnego z zastosowaniem wybranego algorytmu ewolucyjnego. Minimalizowano wskaźnik jakości w postaci błędu średniokwadratowego amplitudy prądu stojana oraz prędkości kątowej silnika i jego modelu matematycznego. W pracy analizowano skuteczność wykorzystanego algorytmu ewolucyjnego oraz wpływ liczby wyznaczanych parametrów na zbieżność i dokładność procesu identyfikacji.

Abstract. This paper presents the parametric identification of induction motor mathematical model problem with the use of chosen evolutionary algorithm. The mean-square error of stator current and angular velocity of motor and his mathematical model was minimized. In this paper the effectiveness of evolutionary algorithm and the influence of the number determined parameters for convergence and accuracy identification process was analyzed. (*Parametric identification of induction motor mathematical model with the use of chosen evolutionary algorithm*).

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

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

Wstęp

Identyfikacja modelu matematycznego silnika indukcyjnego jest zaliczana do trudnych problemów, głównie z powodu nieliniowości, niestabilności modelu matematycznego, dużej liczby parametrów, jak również technicznej złożoności pomiaru sygnałów wejściowych i wyjściowych. W celu przeprowadzenia identyfikacji z dużą dokładnością należy więc dobrać właściwą strukturę modelu matematycznego, wskaźnik jakości oraz ewentualnie sygnał pobudzający. Główny podział problemów identyfikacji uwzględnia identyfikację w warunkach on-line oraz off-line. Identyfikacja w czasie rzeczywistym w dostępnej literaturze jest często realizowana za pomocą metod najmniejszych kwadratów. W przypadku zastosowania tych metod powodzenie identyfikacji zależy od czynników, takich jak: pomiar wektora stanu elektromagnetycznego, prędkości kątowej i wektora sterowania, zastosowania odpowiedniego sygnału pobudzania oraz zmniejszenia liczby wyznaczanych parametrów [19, 20]. Są to warunki trudne do spełnienia, w związku z czym proces identyfikacji często dokonuje się w warunkach off-line, stosując różne algorytmy numeryczne, np. numeryczne metody optymalizacji statycznej, algorytmy genetyczne (AG), czy algorytmy ewolucyjne (AE). Przy zastosowaniu tych metod problemem może okazać się pomiar niezbędnych do identyfikacji sygnałów wejściowych i wyjściowych silnika, a w przypadku zastosowania ww. metod sztucznej inteligencji dobór właściwego algorytmu oraz zestawu jego parametrów kontrolnych. Niewłaściwy wybór parametrów kontrolnych AG lub AE może niepotrzebnie wydłużyć czas analizowanego procesu albo być przyczyną przedwczesnej zbieżności algorytmu [16]. Metody sztucznej inteligencji z reguły wymagają większej mocy obliczeniowej, ale ich skuteczność w rozwiązywaniu różnych problemów optymalizacji sprawia, że obecnie są coraz częściej stosowane [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 17].

W zależności od technicznych możliwości wykonywania pomiarów do identyfikacji parametrycznej stosuje się modele matematyczne silnika sformułowane w różnych układach współrzędnych. Ze względu na uproszczenie problematyki pomiarowej najczęściej wykorzystuje się modele matematyczne w wirującym zgodnie z wektorem napięcia stojana oraz w stacjonarnym układzie współrzędnych [12, 13, 14, 19, 20].

Praca przedstawia problem identyfikacji parametrycznej modelu matematycznego silnika indukcyjnego w warunkach off-line. Do wyznaczenia wartości identyfikowanych parametrów wykorzystano wybrany algorytm ewolucyjny, ponieważ algorytmy te zapewniają znacznie większe prawdopodobieństwo zlokalizowania minimum globalnego przyjętego wskaźnika jakości, niż powszechniej stosowane metody klasyczne [16]. Wyżej wymienione algorytmy bazują na procesach zaczerpniętych z genetyki naturalnej. W sposobie działania, podobnie jak algorytmy genetyczne, wykorzystują przede wszystkim dziedziczenie i darwinowską zasadę przeżycia osobników najlepiej przystosowanych do określonego środowiska, ale różnią się od algorytmów genetycznych pod kilkoma względami. Wyróżnić tu można np. sposób reprezentacji osobników, specyfikę działania operatorów genetycznych, czy zmienne tempo operacji genetycznych [18].

Identyfikowane parametry modelu matematycznego silnika wyznaczono na podstawie minimalizacji wskaźnika jakości przyjętego w postaci błędu średniokwadratowego amplitudy prądu stojana i prędkości kątowej silnika i jego modelu. Badania eksperymentalne wykonano dla silnika indukcyjnego klatkowego o mocy 2,2 kW zasilanego z falownika napięcia. Analizowano zbieżność i dokładność procesu identyfikacji.

Model matematyczny silnika indukcyjnego

Opis matematyczny silnika indukcyjnego przedstawia zależność pomiędzy prądami, napięciami i strumieniami oraz uwzględnia równanie ruchu obrotowego. Model matematyczny silnika jest więc złożonym układem nieliniowych równań różniczkowych, w związku z czym w modelowaniu matematycznym stosuje się pewne założenia upraszczające, do których zaliczyć można pominięcie anizotropii, histerezy, nasycenia obwodu magnetycznego oraz nierównomiernego rozłożenia uzwojeń. Równania silnika są przedstawiane w prostokątnym układzie współrzędnych, gdzie wektory przestrzenne zastępuje się odpowiednimi związkami między składowymi. Wyróżnia się nieruchomy układ współrzędnych (związany ze stojanem) oraz wirujący zgodnie z wektorem napięcia, prądu albo strumienia [12, 16, 14, 19]. W niniejszej pracy, z uwagi na możliwości dokonania pomiarów wykorzystano model matematyczny silnika indukcyjnego sformułowany w wirującym układzie współrzędnych $d-q$, zorientowanym

zgodnie z wektorem v_s napięcia stojana określony w następujący sposób [12, 16, 19]:

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \phi_d(t) &= \phi_q(t) \omega_s(t) - R_s I_d(t) + v(t) \\
 \frac{d}{dt} \phi_q(t) &= -\phi_d(t) \omega_s(t) - R_s I_q(t) \\
 \frac{d}{dt} I_d(t) &= a_1 \phi_d(t) + a_3 \phi_q(t) \omega_e(t) - a_2 I_d(t) + \\
 &+ I_q(t) \omega_s(t) - I_q(t) \omega_e(t) + a_3 v(t) \\
 \frac{d}{dt} I_q(t) &= -a_3 \phi_d(t) \omega_e(t) + a_1 \phi_q(t) - I_d(t) \omega_s(t) + \\
 &+ I_d(t) \omega_e(t) - a_2 I_q(t) \\
 \frac{d}{dt} \omega_e(t) &= \frac{3p^2}{2J} (\phi_d(t) I_q(t) - \phi_q(t) I_d(t)) - \frac{P}{J} M_o(t)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

gdzie:

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

przy czym: 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 kątowna ($\omega_e = p\omega$), ω – mechaniczna prędkość kątowna, 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.

Identyfikacja parametryczna modelu matematycznego silnika indukcyjnego

Problem parametrycznej identyfikacji modelu silnika indukcyjnego można zrealizować w warunkach on-line oraz off-line. W pracy przeprowadzono identyfikację z zastosowaniem wybranego algorytmu ewolucyjnego w warunkach off-line. Identyfikacja on-line przy użyciu algorytmów ewolucyjnych, czy genetycznych nie jest w zasadzie możliwa, ze względu na znaczny nakład obliczeń wymaganych podczas każdej iteracji (generacji). Duży nakład obliczeniowy i związane z tym duże zapotrzebowanie na moc komputerową nie dyskwalifikuje tych metod w wielu zastosowaniach, również w problemach identyfikacji, ponieważ są one jednymi z najskuteczniejszych metod optymalizacji. Wynika to przede wszystkim ze specyfiki działania tych algorytmów, a więc między innymi ze startowania z wielu punktów równocześnie [16].

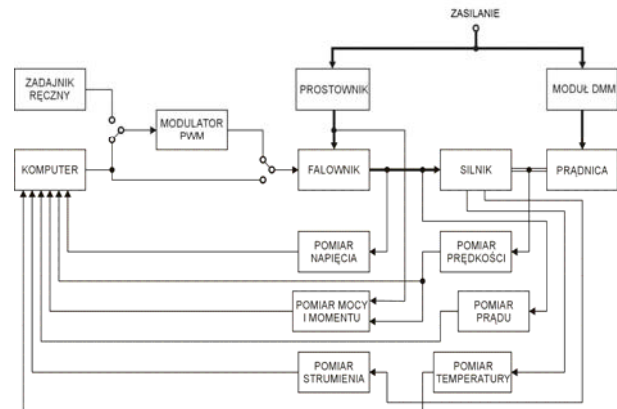
Analizowany problem identyfikacji parametrycznej modelu silnika indukcyjnego polega na minimalizacji przyjętego wskaźnika jakości identyfikacji. W dalszych badaniach uwzględniono wskaźnik jakości określony w postaci błędu średniokwadratowego amplitudy prądu stojana oraz prędkości kątownej silnika i jego modelu o postaci [14, 16, 19]

$$Q = \frac{w}{N} \sum_{i=1}^N (I(i) - \hat{I}(i))^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\omega(i) - \hat{\omega}(i))^2
 \tag{3}$$

gdzie: „ $\hat{\cdot}$ ” – rozwiązanie modelu matematycznego silnika, N – liczba pomiarów, w – współczynnik wagowy

wyznaczany w pracy [13] eksperymentalnie, aby zachować kompromis między wartością sumy kwadratów błędu prędkości kątownej ω i błędem prądu stojana I .

Rysunek 1 przedstawia w pewnym uproszczeniu schemat blokowy stanowiska badawczego.



Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska badawczego [16]

Algorytmy ewolucyjne

Algorytmy ewolucyjne (AE) wykorzystujące w sposobie działania określone procesy zaczerpnięte z zasad naturalnej ewolucji zostały opracowane do rozwiązywania zadań optymalizacji. Podczas analizy danego problemu należy określić środowisko, w którym będą egzystować populacje osobników, stanowiących potencjalne rozwiązania zadania. Aby określić, jak dany osobnik jest przystosowany do środowiska, w którym żyje, należy zdefiniować funkcję przystosowania. Pierwotnie, funkcja przystosowania stanowiła nieujemne kryterium oceny całej populacji, a algorytm wyznaczał maksimum tej funkcji. Obecnie są stosowane pewne modyfikacje, co umożliwia zastosowanie tych algorytmów również do problemów minimalizacji. W AE osobniki tworzą swoich potomków, a więc nowe rozwiązania w oparciu o specjalistyczne operatory genetyczne. Takie podejście umożliwia wymianę materiału genetycznego pomiędzy odpowiednimi osobnikami populacji i tworzenie osobników coraz lepiej przystosowanych do środowiska [18].

Algorytmy ewolucyjne stanowią rozwinięcie szeroko opisywanych w literaturze algorytmów genetycznych (AG). Według autora pracy [18], podstawową różnicą jest to, że algorytmy genetyczne operują na chromosomach binarnych, a nie tak jak algorytmy ewolucyjne na wektorach zmiennooprzecinkowych. Kolejną różnicą dotyczy sposobu generowania nowej populacji. W algorytmie genetycznym kolejna populacja ma stały rozmiar i zawiera zarówno osobniki dobrze przystosowane jak i te słabo przystosowane. Natomiast w algorytmach ewolucyjnych jest tworzona tymczasowa populacja powstająca tylko w oparciu o osobniki lepiej przystosowane. Osobniki podlegają operacjom krzyżowania i mutacji, albo wyłącznie mutacji, przy czym prawdopodobieństwo zadziałania tych operatorów nie jest stałe, jak ma to miejsce w przypadku AG. Bez względu na zastosowaną metodę selekcji, w strategiach ewolucyjnych osobniki są wybierane bez powtórzeń. W procesach selekcji najczęściej są stosowane następujące metody: ruletkowa, rankingowa i turniejowa, jak również różne ich modyfikacje oraz połączenia. Szczególnym przypadkiem metody rankingowej jest selekcja progowa, gdzie funkcja określająca wejście osobnika do puli rodzicielskiej ma postać progu. Sterowanie wartością progu zapewnia odpowiedni nacisk selektywny. Kolejną stosowaną metodą jest selekcja stłoczenia, w której

nowe osobniki zastępują najbardziej podobne do nich osobniki rodzicielskie. Takie podejście zapewnia dużą różnorodność populacji. Krzyżowanie może odbywać się np. za pomocą krzyżowania dwu lub wielopunktowego, a także krzyżowania równomiernego (określanego mianem krzyżowania jednolitego). Mutacja w wielu zastosowaniach jest odpowiednio zmodyfikowaną mutacją bitów stosowaną w algorytmach genetycznych [18].

Wyniki przeprowadzonych badań

Identyfikację parametryczną modelu matematycznego silnika indukcyjnego przeprowadzono w oparciu o minimalizację wskaźnika jakości (3) przy użyciu wybranego algorytmu ewolucyjnego. Analizowano skuteczność zastosowanej metody oraz wpływ liczby identyfikowanych parametrów na wyniki procesu. Zgodność przebiegów czasowych prędkości kątowej silnika i prądu silnika oraz modelu oceniono za pomocą współczynników korelacji wielowymiarowej, odpowiednio: R_I - dla przebiegów prądu i R_ω - dla przebiegów prędkości kątowej. W celu sprawdzenia poprawności działania algorytmu ewolucyjnego w problemie identyfikacji wykonano symulację komputerową procesu, zadając następujące parametry modelu matematycznego silnika, tj.: $a_1=1431,3$, $a_2=371,6$, $a_3=66,3$, $J=3,1\text{kgm}^2$ oraz $R_S=2,95 \Omega$, zaczerpnięte z pracy [19]. W symulacji komputerowej oczekiwano uzyskanie wartości wskaźnika bliższej zero.

Tabela 1 przedstawia wyniki symulacji komputerowej procesu identyfikacji modelu matematycznego silnika indukcyjnego z zastosowaniem algorytmu ewolucyjnego. Zamieszczono wybrany wynik z przeprowadzonej serii uruchomień symulacji procedury identyfikacji.

Tabela 1. Wyniki symulacji komputerowej procesu identyfikacji z zastosowaniem algorytmu ewolucyjnego

Liczba parametrów	Wartości identyfikowanych parametrów					Wartość wskaźnika jakości Q	Współczynniki korelacji	
	a_1	a_2	a_3	J	R_s		R_I	R_ω
3	1431,3	371,6	66,3	-	-	0,0	1,0	1,0
4	1431,3	371,6	66,3	3,1	-	0,0	1,0	1,0
5	1431,3	371,6	66,3	3,1	2,95	0,0	1,0	1,0

We wszystkich analizowanych przypadkach algorytm ewolucyjny wyznaczył poszukiwane minimum globalne wskaźnika jakości identyfikacji Q . Wzrost liczby wyznaczanych parametrów nie wpłynął na wyniki symulacji komputerowej procesu identyfikacji.

W tabeli 2 pokazano wyniki identyfikacji eksperymentalnej z wykorzystaniem algorytmu ewolucyjnego. Ze względu na elementy losowości zawarte w AE podano wyniki średnie z serii uruchomień procedury identyfikacji.

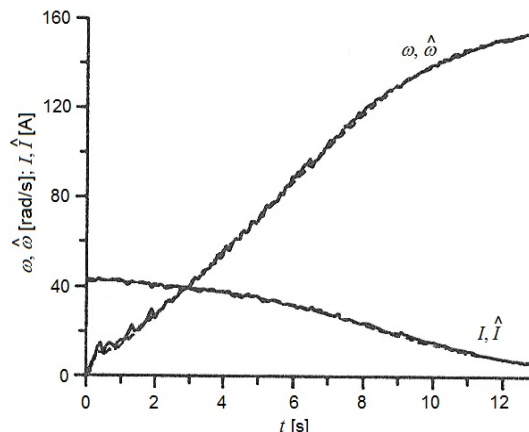
Tabela 2. Wyniki identyfikacji eksperymentalnej przy użyciu algorytmu ewolucyjnego

Liczba parametrów	Wartości średnie identyfikowanych parametrów					Wartości średnie współczynników korelacji	
	a_1	a_2	a_3	J	R_s	R_I	R_ω
3	1433,43	372,32	66,89	-	-	1,000	0,992
4	1440,65	375,87	68,54	3,10	-	1,000	0,991
5	1448,12	379,87	68,98	3,21	2,98	0,999	0,991

Analizując wartości średnie współczynników korelacji wielowymiarowej R , w tabeli 2 wykazano, że wzrost liczby identyfikowanych parametrów w ujęciu statystycznym spowodował tylko nieznaczne pogorszenie średnich wyników identyfikacji eksperymentalnej. Z uwagi na to można wysunąć stwierdzenie, że algorytm ewolucyjny

może stanowić skuteczną metodę rozwiązywania problemów identyfikacji parametrycznej.

Na rysunku 2 przedstawiono porównanie odpowiedzi czasowych prędkości kątowej i prądu stojana silnika oraz jego modelu matematycznego.



Rys. 2. Porównanie odpowiedzi czasowych prędkości kątowej i amplitudy prądu silnika i jego modelu matematycznego

Otrzymano dobrą zgodność przebiegów zarejestrowanych i wyznaczonych z rozwiązania modelu matematycznego silnika.

Wnioski

Praca przedstawia problem identyfikacji parametrycznej modelu matematycznego silnika indukcyjnego z zastosowaniem wybranego algorytmu ewolucyjnego. Analizowano skuteczność wykorzystanej metody pod kątem lokalizowania minimum globalnego przyjętego wskaźnika jakości oraz wpływ liczby identyfikowanych parametrów na wyniki procesu identyfikacji. Identyfikowane parametry modelu matematycznego silnika indukcyjnego wyznaczono w wyniku minimalizacji wskaźnika jakości określonego w postaci błędu średniokwadratowego amplitudy prądu stojana oraz prędkości kątowej silnika i jego modelu matematycznego. Przeprowadzone w pracy badania symulacyjne i laboratoryjne oraz obliczone wartości współczynników korelacji wielowymiarowej dla przebiegów prądu i prędkości silnika oraz modelu potwierdzają skuteczność zastosowanej metody identyfikacji. Wzrost liczby identyfikowanych parametrów ma znikomy wpływ na wyniki analizowanego procesu.

Autorzy: dr inż. Katarzyna Rutczyńska-Wdowiak, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Systemów Informatycznych, ul. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: K.Rutczynska@tu.kielce.pl

LITERATURA

- [1] Arabas J., Wykłady z algorytmów ewolucyjnych, *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne* (2004)
- [2] 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
- [3] El-Mihoub Tarek A., Hopgood A., Nolle L., Battersby A., Hybrid Genetic Algorithms: A Review. *Engineering Letters, EL_13_2_11 Advance online publication*: 4 August (2006)
- [4] Ghandar, A., Michalewicz, Z., Schmidt, M., To, T.-D., Zurbrugg, R., Computational Intelligence for Evolving Trading Rules, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 13 (2009), No. 1, 71- 86
- [5] Goldberg D. E., Algorytmy genetyczne i ich zastosowania, *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne* (2003)

- [6] 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
- [7] Gorzalczyński M. B., Rudziński F., A Modified Pittsburgh Approach to Design a Genetic Fuzzy Rule-Based Classifier from Data, *Lecture Notes in Computer Science*, 6113 (2010), 88-96
- [8] Gorzalczyński M. B., Rudziński F., Application of genetic algorithms and Kohonen networks to cluster analysis, *Lecture Notes in Computer Science*, 3070 (2004), 556-561
- [9] Michalewicz Zb., The Emperor is Naked: Evolutionary Algorithms for Real-World Applications, *ACM Ubiquity* (2012), 1 - 13
- [10] Michalewicz Zb., Fogel D. B., Jak to rozwiązać, czyli nowoczesna heurystyka, *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne* (2006)
- [11] Michalewicz Zb., Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne, *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne* (2003)
- [12] Pełczewski Wł., Krynke M., Metoda zmiennych stanu w analizie dynamiki układów napędowych, *WNT* (1984)
- [13] 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
- [14] Rutczyńska-Wdowiak K., Grzesikiewicz W., Identyfikacja parametryczna matematycznych modeli silników indukcyjnego i PMSM, *Logistyka* (2014), nr 4
- [15] Rutczyńska-Wdowiak K., Analiza wpływu przestrzeni poszukiwań algorytmu genetycznego w problemie projektowania filtrów, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 89 (2013), 11, 256-259
- [16] Rutczyńska-Wdowiak K., Algorytmy genetyczne w identyfikacji parametrycznej modelu matematycznego obiektu dynamicznego na przykładzie silnika indukcyjnego, *Z. N. Politechniki Świętokrzyskiej, seria Monografie, studia, rozprawy* (2005)
- [17] Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L., Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte, *Wydawnictwo Naukowe PWN* (1999)
- [18] Rutkowski L., Metody i techniki sztucznej inteligencji, *PWN* (2005)
- [19] Stefański T., Synteza adaptacyjnych algorytmów sterowania momentem falownikowego napędu samochodu elektrycznego z silnikiem indukcyjnym, *Z. N. Politechniki Świętokrzyskiej, seria Monografie, studia, rozprawy* (1995), nr 4
- [20] Söderström T., Stoica P., Identyfikacja systemów, *PWN* (1997)