

Jerzy KUDŁA
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki Śląskiej

WYKORZYSTANIE ALGORYTMU GENETYCZNEGO I GRADIENTOWEGO DO ESTYMACJI PARAMETRÓW ELEKTROMAGNETYCZNYCH NIELINIOWEGO MODELU MATEMATYCZNEGO MASZYNY INDUKCYJNEJ

Streszczenie. W pracy przedstawiono model matematyczny maszyny indukcyjnej w stanie ustalonym, w którym uwzględniono zjawisko nasycania się rdzeni magnetycznych stojana i wirnika. Zbiór parametrów tego modelu obejmujący: rezystancję stojana i wirnika oraz współczynniki określające analityczne postaci syntetycznych charakterystyk sprzężeń magnetycznych pola głównego oraz pól rozproszonych wyznaczono na podstawie charakterystyki biegu jałowego oraz charakterystyk mocy czynnej i biernej stojana w funkcji prędkości obrotowej wirnika.

ESTIMATION OF ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF THE INDUCTION MACHINE NONLINEAR MATHEMATICAL MODEL WHEN USING GENETIC AND GRADIENT ALGORITHM

Summary. The paper presents the steady state mathematical model of an induction machine in which a saturation effect in the stator and rotor cores has been taken into account. The set of this model parameters consisting of stator and rotor resistances and coefficients describing the analytical form of the synthetic characteristics of the main and leakage flux linkages has been estimated from the motor no-load steady-state characteristic and from the dependencies of the stator active and passive power on the rotational speed.

1. WPROWADZENIE

Znajomość wartości liczbowych parametrów elektromagnetycznych modeli matematycznych maszyn indukcyjnych jest warunkiem koniecznym do:

- przeprowadzenia wiarygodnych badań symulacyjnych maszyn indukcyjnych oraz układów z nimi współpracujących,

- prawidłowego działania mikroprocesorowych układów sterowania maszyn indukcyjnych, w których implementuje się modele matematyczne maszyn.

Parametry elektromagnetyczne obwodowych modeli matematycznych maszyn indukcyjnych można wyznaczyć na podstawie:

- danych konstrukcyjnych oraz wyników obliczeń rozkładów przestrzennych pól elektromagnetycznych występujących w maszynie wykorzystując w tym celu zależności projektowe [1, 11] lub też stosując metodę elementów skończonych [2, 5, 6],
- pomiarów wielkości wejściowych i wyjściowych maszyny w stanach ustalonych lub nieustalonych oraz doborze parametrów elektromagnetycznych modelu matematycznego maszyny minimalizujących błąd średniokwadratowy pomiędzy charakterystykami zmierzonymi a obliczonymi na podstawie modelu [3, 4].

Rozwój systemów pomiarowych wspomaganých komputerowo oraz postęp w doskonaleniu algorytmów optymalizacji umożliwia obecnie dokładniejszą oraz łatwiejszą estymację złożonych modeli matematycznych maszyn indukcyjnych, które uwzględniają w dokładniejszy sposób niektóre zjawiska elektromagnetyczne występujące w maszynie. Do zjawisk elektromagnetycznych, które w istotny sposób wpływają na jej właściwości eksploatacyjne, zaliczyć można:

- zjawisko nasycania się rdzeni ferromagnetycznych stojana i wirnika spowodowane nieliniowymi właściwościami materiałów magnetycznych rdzeni,
- zjawisko wypierania prądów w prętach wirnika.

Sformułowanie ogólnego obwodowego modelu matematycznego maszyny, w którym uwzględnia się wzajemny wpływ obu zjawisk na siebie, jest trudne i jak dotychczas modele takie nie zostały wyprowadzone. Natomiast w przypadku gdy zjawiska te mają niewielki na siebie wpływ, istnieje możliwość bezpośredniego wyprowadzenia modelu matematycznego maszyny przez rozpatrzenie obydwu zjawisk oddzielnie. W pracy przedstawiono model matematyczny maszyny indukcyjnej, w której można pominąć zjawisko wypierania prądu w prętach wirnika.

2. MODEL MATEMATYCZNY MASZYNY INDUKCYJNEJ W STANIE USTALONYM ORAZ JEGO PARAMETRY ELEKTROMAGNETYCZNE

Zjawisko nasycania się rdzeni ferromagnetycznych stojana i wirnika maszyny indukcyjnej z wirnikiem jednoklatkowym, w którym pomija się zjawisko wypierania prądu, można uwzględnić w monoharmonicznym modelu matematycznym maszyny przyjmując oprócz tradycyjnych założeń [8] następujące dodatkowe założenia:

- charakterystyki magnesowania rdzeni ferromagnetycznych stojana i wirnika są nieliniowe i jednoznaczne,

- zjawiska nasycenia się rdzeni magnetycznych maszyny zarówno w polu magnetycznym głównym, jak i w polach rozproszenia są od siebie niezależne, tak że można je analizować oddzielnie,
- wektory przestrzenne sprzężeń magnetycznych pola głównego oraz pól rozprożeń stojana i wirnika są nieliniowymi funkcjami modułu i argumentu wektorów przestrzennych odpowiednich prądów: prądu stojana (pole rozproszenia stojana) i prądu wirnika (pole rozproszenia wirnika) oraz prądu magnesującego (pole główne)

$$\underline{\Psi}_{\sigma s} = \underline{\Psi}_{\sigma s}(I_s, \gamma_s), \quad \underline{\Psi}_{\sigma r}^* = \underline{\Psi}_{\sigma r}^*(I_r^*, \gamma_r), \quad (1)$$

$$\underline{\Psi}_m = \underline{\Psi}_m(I_m, \gamma_m), \quad I_m = I_s + I_r^*, \quad (2)$$

- wektory przestrzenne sprzężeń magnetycznych stojana i wirnika z odpowiednimi polami można wyrazić za pomocą nieliniowych syntetycznych charakterystyk sprzężeń magnetycznych zależnych od modułu wektora przestrzennego odpowiedniego prądu:

$$\underline{\Psi}_{\sigma s}(I_s, \gamma_s) \cong \Psi_{\sigma s}(I_s) e^{j\gamma_s}, \quad \underline{\Psi}_{\sigma r}^*(I_r, \gamma_r) \cong \Psi_{\sigma r}^*(I_r^*) e^{j\gamma_r}, \quad (3)$$

$$\underline{\Psi}_m(I_m, \gamma_m) = \Psi_m(I_m) e^{j\gamma_m}. \quad (4)$$

W świetle relacji (1-4), równania maszyny indukcyjnej w stanie ustalonym, uwzględniające zjawisko nasycenia, przyjmują postać:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_s \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_s \\ \underline{I}_r^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j\omega_s & 0 \\ 0 & js\omega_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\Psi}_s \\ \underline{\Psi}_r^* \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{\Psi}_s \\ \underline{\Psi}_r^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_{\sigma s}(I_s) e^{j\gamma_s} \\ \Psi_{\sigma r}^*(I_r^*) e^{j\gamma_r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_m(I_m) e^{j\gamma_m} \\ \Psi_m(I_m) e^{j\gamma_m} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Aproksymując syntetyczne charakterystyki sprzężeń magnetycznych za pomocą funkcji analitycznych:

$$\Psi_{\sigma s}(I_s) = A_{\sigma s} \arctg(B_{\sigma s} I_s) + C_{\sigma s} I_s, \quad \Psi_{\sigma r}^*(I_r) = A_{\sigma r} \arctg(B_{\sigma r} I_r^*) + C_{\sigma r} I_r^* \quad (7)$$

$$\Psi_m(I_m) = A_m \arctg(B_m I_m),$$

otrzymuje się parametryczny model matematyczny maszyny indukcyjnej w stanach ustalonych. Wektor parametrów elektromagnetycznych takiego modelu można przedstawić w postaci:

$$P = [R \quad P_{\sigma s} \quad P_{\sigma r} \quad P_m]^T \quad (8)$$

gdzie:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_s & R_r^* \end{bmatrix}^T \quad \mathbf{P}_{\sigma s, r} = \begin{bmatrix} A_{\sigma s, r} & B_{\sigma s, r} & C_{\sigma s, r} \end{bmatrix}^T \quad \mathbf{P}_m = \begin{bmatrix} A_m & B_m \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

Przy uwzględnieniu zależności (7-9) równania maszyny indukcyjnej w stanie ustalonym w postaci parametrycznej mają postać:

$$\begin{aligned} \underline{U}_s &= R_s \underline{I}_s + j\omega_s \underline{\Psi}_{\sigma s}(I_s, \mathbf{P}_{\sigma s}) + j\omega_s \underline{\Psi}_m(I_m, \mathbf{P}_m) \\ 0 &= \frac{R_r^*}{s} \underline{I}_r^* + j\omega_s \underline{\Psi}_{\sigma r}^*(I_r^*, \mathbf{P}_{\sigma r}) + j\omega_s \underline{\Psi}_m(I_m, \mathbf{P}_m) \end{aligned} \quad (10)$$

Równania (10) dla zadanej wartości poślizgu i przy znanym wektorze parametrów tworzą układ równań algebraicznych nieliniowych, który można rozwiązać za pomocą metod numerycznych.

3. ALGORYTM ESTYMACJI PARAMETRÓW MODELU MATEMATYCZNEGO MASZINY

Na podstawie analizy wrażliwości wpływu parametrów elektromagnetycznych maszyny na jej charakterystyki przedstawionej w [7] przyjęto, że:

- współczynniki opisujące syntetyczną charakterystykę sprzężenia magnetycznego pola głównego wyznaczy się z charakterystyki biegu jałowego maszyny,
- pozostałe parametry wyznaczy się z charakterystyki mocy czynnej i biernej stojana w funkcji prędkości obrotowej wirnika.

W celu ułatwienia obliczeń zmodyfikowano postaci niektórych parametrów:

$$A_m^* = \omega_s A_m, \quad A_{\sigma}^* = \omega_s A_{\sigma s} = \omega_s A_{\sigma r}, \quad C_{\sigma}^* = \omega_s C_{\sigma s} = \omega_s C_{\sigma r}, \quad (11)$$

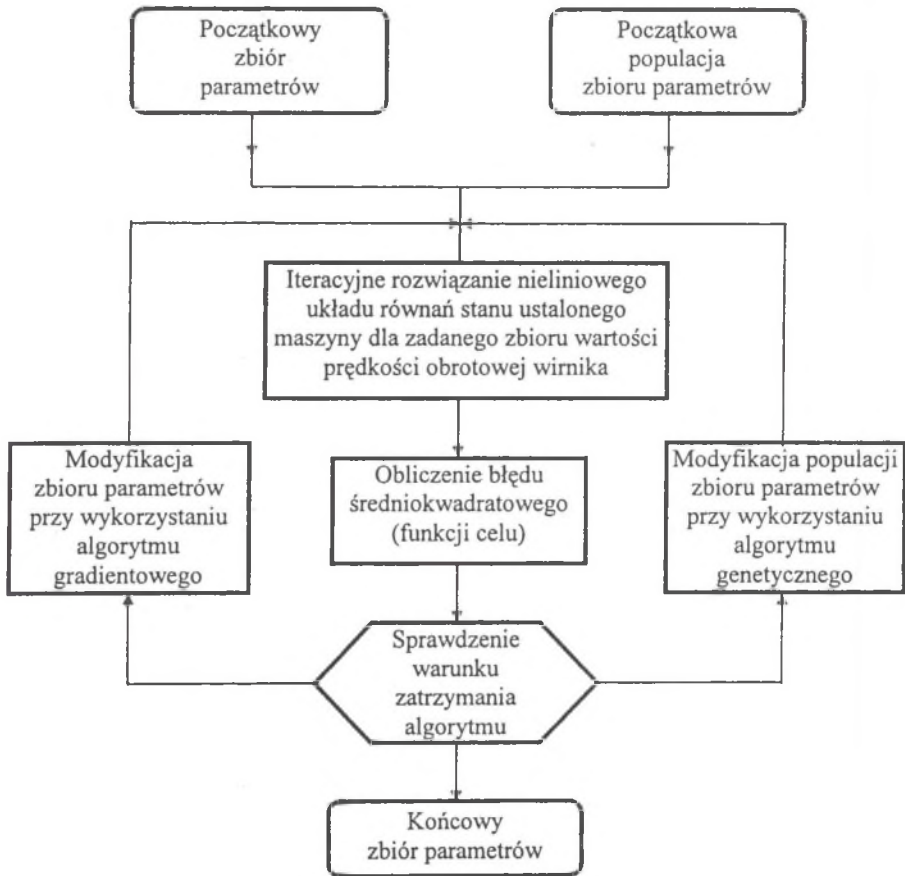
oraz przyjęto, że współczynniki opisujące syntetyczne charakterystyki sprzężeń magnetycznych pola rozproszenia stojana i wirnika są sobie równe.

W procesie estymacji pozostałych parametrów elektromagnetycznych jako miarę zgodności modelu matematycznego maszyny z maszyną rzeczywistą przyjęto błąd średniokwadratowy wyznaczony dla mocy czynnej i biernej stojana w następujący sposób:

$$\varepsilon(P) = \sum_k \left\{ \left(\frac{P_{s(p)}(n_k) - P_{s(m)}(P, n_k)}{P_{s(p)}(n_k)} \right)^2 + \left(\frac{Q_{s(p)}(n_k) - Q_{s(m)}(P, n_k)}{Q_{s(p)}(n_k)} \right)^2 \right\}. \quad (12)$$

Poszukiwany zbiór parametrów modelu matematycznego maszyny otrzymuje się w wyniku minimalizacji powyższego błędu. Do minimalizacji funkcji celu można stosować różne algorytmy (algorytmy bezgradientowe, gradientowe oraz algorytmy sztucznej inteligencji). W pracy zastosowano dwa algorytmy: algorytm genetyczny oraz algorytm gradientowy. Przy stosowaniu obu algorytmów dla każdego zbioru potencjalnych parametrów oblicza się funkcję celu, co wymaga dodatkowego rozwiązania nieliniowego układu równań

algebraicznych określających stan ustalony maszyny. Rozwiązanie nieliniowego układu równań otrzymuje się metodami iteracyjnymi, co powoduje wydłużenie procesu estymacji parametrów. Jest to szczególnie istotne przy stosowaniu algorytmów genetycznych, w których operuje się jednocześnie całą populacją potencjalnych rozwiązań. Schemat blokowy algorytmu estymacji parametrów przedstawiono na rys.3



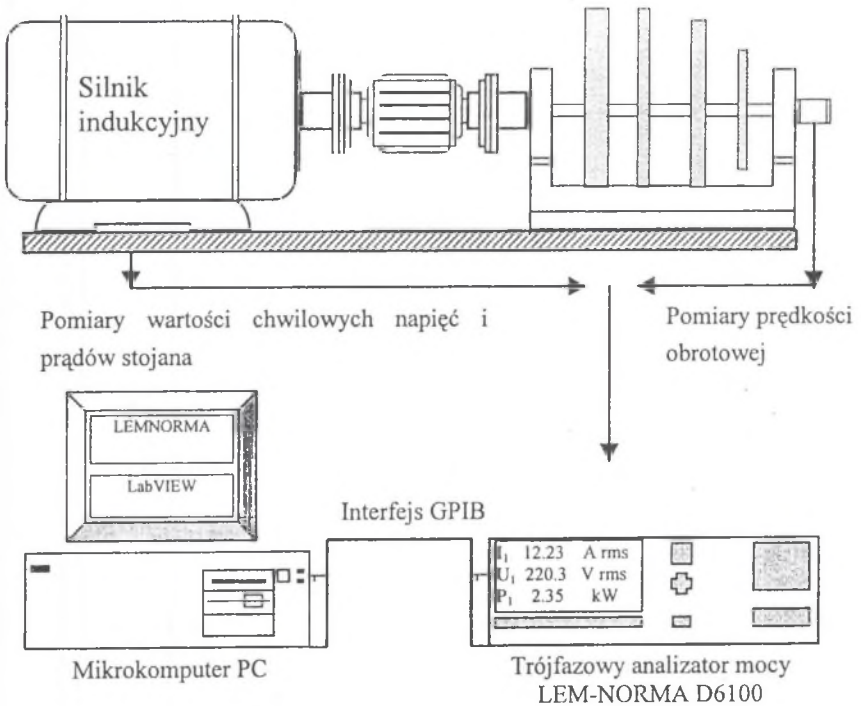
Rys. 1. Schemat blokowy algorytmu estymacji parametrów

Fig. 1. Schematic diagram of the algorithm of parameters estimation

W celu skrócenia czasu wykonywania obliczeń oraz zapewnienia ich zbieżności przydatna jest możliwość ograniczenia obszaru poszukiwań potencjalnych rozwiązań przez zadanie ich dolnej i górnej granicy zmian. W pracy wykorzystano nowe algorytmy optymalizacyjne „reflective Newton methods” zaimplementowane w Optimizations Toolbox v.2.0 Matlab'a oraz program FT3pak (opcja GA- algorytmy genetyczne) firmy Flextool.

4. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO. METODYKA PRZEPROWADZENIA POMIARÓW

W badaniach pomiarowych wykorzystano stanowisko laboratoryjne składające się z badanego silnika indukcyjnego połączonego za pośrednictwem sprzęgieł z układem wirujących tarcz o różnych momentach bezwładności. Pomiaru wykonano za pomocą trójfazowego analizatora mocy firmy LEM-NORMA D6100 gwarantującego bardzo dobrą dokładność pomiaru mierzonych sygnałów elektrycznych. Sterowanie procesem pomiarowym, akwizycję mierzonych sygnałów oraz ich obróbkę i wizualizację wykonano za pomocą mikrokomputera oraz opracowanego do tego celu programu komputerowego pracującego w środowisku LABVIEW.

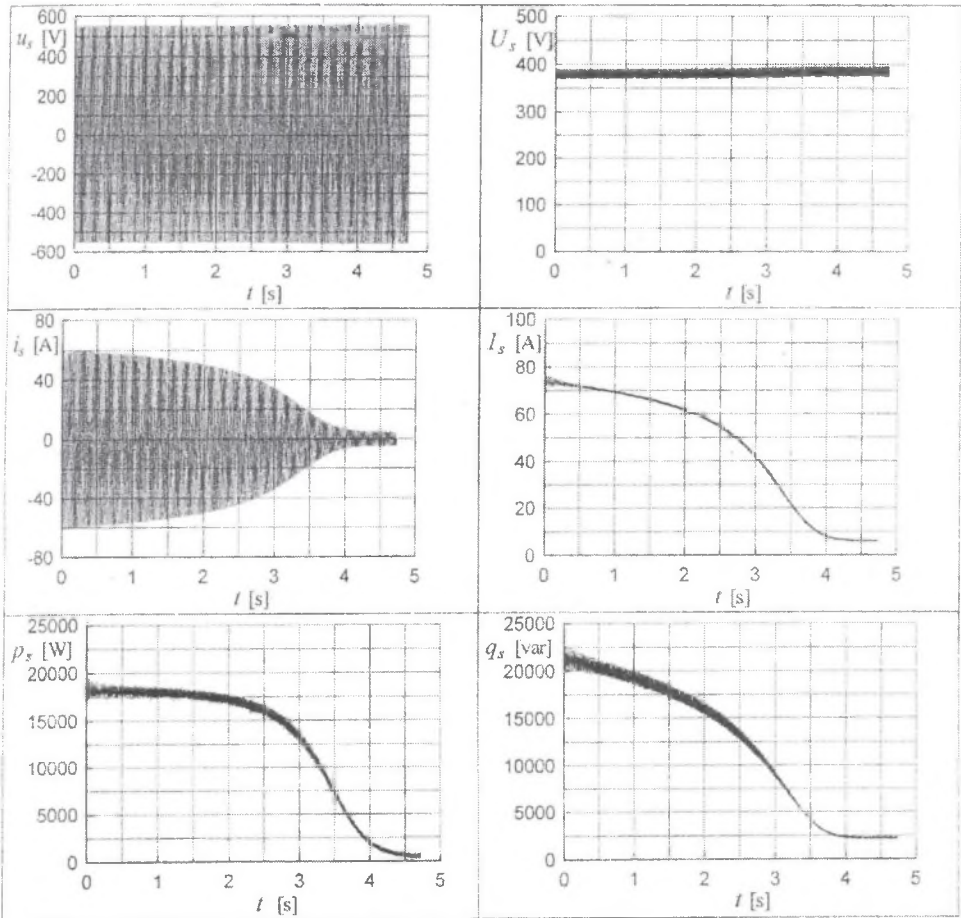


Rys. 2. Schemat ideowy stanowiska laboratoryjnego
Fig. 2. Schematic diagram of the laboratory stand

Na stanowisku laboratoryjnym przeprowadzono pomiary charakterystyk maszyny w stanach quasi-ustalonych, które uzyskano przez odpowiedni dobór momentu bezwładności wirujących tarcz powiększając czas rozruchu silnika do wartości większych niż 3 sekundy.

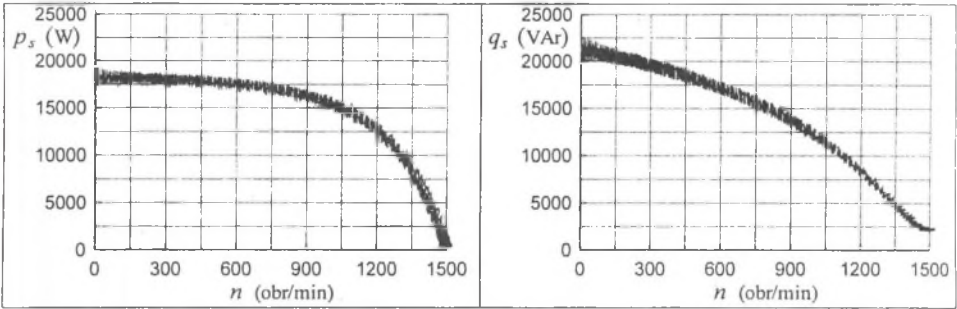
Rejestrując za pomocą analizatora mocy wartości chwilowe napięć oraz prądów stojana maszyny, jak również prędkość obrotową wirnika wyznaczono na ich podstawie wektory przestrzenne napięcia i prądu stojana oraz wartości chwilowe mocy czynnej i umownej chwilowej mocy biernej stojana według następujących zależności:

$$p_s = \operatorname{Re}(\underline{U}_s \underline{I}_s^*), \quad q_s = \operatorname{Im}(\underline{U}_s \underline{I}_s^*). \quad (13)$$



Rys.3. Przebiegi czasowe mierzonych wielkości stojana maszyny indukcyjnej
 Fig.3. Waveforms of the measured stator quantities of the induction machine

Na podstawie przebiegów czasowych wyznaczono charakterystyki chwilowej mocy czynnej i biernej w funkcji prędkości obrotowej, które przedstawiono na rys.4. Do estymacji parametrów przyjęto charakterystyki, w których odfiltrowano składowe przemienne.



Rys.4. Wykresy chwilowej mocy czynnej i biernej stojana w funkcji prędkości obrotowej

Fig.4. Plots of the instantaneous active and passive power of the stator versus rotational speed

5. WYNIKI ESTYMACJI PARAMETRÓW ELEKTROMAGNETYCZNYCH

Estymację parametrów elektromagnetycznych przeprowadzono dla silnika indukcyjnego klatkowego o mocy 3 kW, w którym jak wynika z pracy [5], praktycznie można pominąć zjawisko wypierania prądu w wirniku. Dane znamionowe badanego silnika wynoszą:

$$P_N = 3 \text{ kW} ; U_{sN} = 220 / 380 \text{ V} ; I_{sN} = 11,5 / 6,7 \text{ A} ; \\ \cos(\phi_{sN}) = 0,82 ; n_n = 1430 \text{ obr / min} .$$

Współczynniki opisujące syntetyczną charakterystykę sprzężenia magnetycznego pola głównego wyznaczono z biegu jałowego silnika $A_m^* = 411,234$, $B_m = 0,225$.

Estymacje pozostałych parametrów przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym etapie na podstawie charakterystyk silnika zasilanego z sieci o napięciu 380 V i przy wykorzystaniu algorytmu genetycznego wyznaczono zbiór wstępnych parametrów maszyny traktując go jako punkt startowy dla drugiego etapu. Ze względu na długi czas obliczeń ograniczono ilość generacji oraz wybrano stosunkowo niewielką liczebność populacji.

Przy stosowaniu algorytmu genetycznego [9] przyjęto binarny system kodowania oraz metodę turniejową (dla podgrup złożonych z 2 osobników) jako sposób selekcji. Do obliczeń wybrano algorytm genetyczny z ustalonym stanem (steady state), w którym przyjęto, że 11% procent populacji jest przekazywane do następnej generacji bez stosowania operatorów reprodukcji. Pozostałe parametry algorytmu genetycznego oraz wynik końcowy zestawiono w tabeli 1. Podane w tablicy górny i dolny zakres wartości zmian parametrów określają obszar poszukiwań, a liczba znaków po przecinku tych liczb oznacza dodatkowo rozdzielczość.

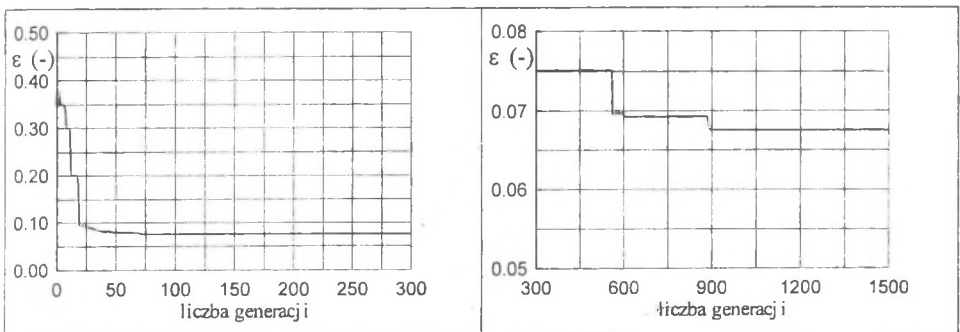
Łącznie decydują one o liczbie genów, za pomocą których jest zakodowany poszukiwany parametr oraz w konsekwencji o długości chromosomu odpowiadającemu wektorowi parametrów. Algorytm genetyczny wykorzystano do wyznaczenia czterech parametrów. Liczba genów reprezentująca poszczególne parametry wynosiła: $A_{\sigma}^* = 13$, $B_{\sigma} = 8$, $C_{\sigma}^* = 9$, $R_r^* = 9$, zaś długość chromosomu była równa 39.

Tabela 1

Wyniki estymacji parametrów przy wykorzystaniu algorytmu genetycznego

Parametry algorytmu genetycznego		Parametry maszyny	Górny zakres	Dolny zakres	Wyniki końcowe
Liczebność populacji	31	A_{σ}^*	60,00	10,00	43,6027
Liczba generacji	1500	B_{σ}	0,200	0,020	0,1108
Prawdopodobieństwo krzyżowania	0,77	C_{σ}^*	5,00	0,50	1,0568
Prawdopodobieństwo mutacji	0,0077	R_r^*	5,00	0,50	1,2505

Przy stosowaniu algorytmu genetycznego zrezygnowano z wyznaczania rezystancji stojana, której wartość przyjęto z pomiarów metodą techniczną ($R_s = 2,1 \Omega$). Przebieg minimalnej wartości funkcji celu dla kolejnych generacji przedstawiono na rys.5



Rys.5. Wykres minimalnej wartości funkcji celu dla kolejnych generacji.

Fig.5. Plot of the minimal magnitude of the objective function for the succeeding generations

W drugim etapie wykorzystano algorytm gradientowy, w którym ograniczono także obszar poszukiwań parametrów poprzez zadanie dolnego i górnego zakresu ich zmian.

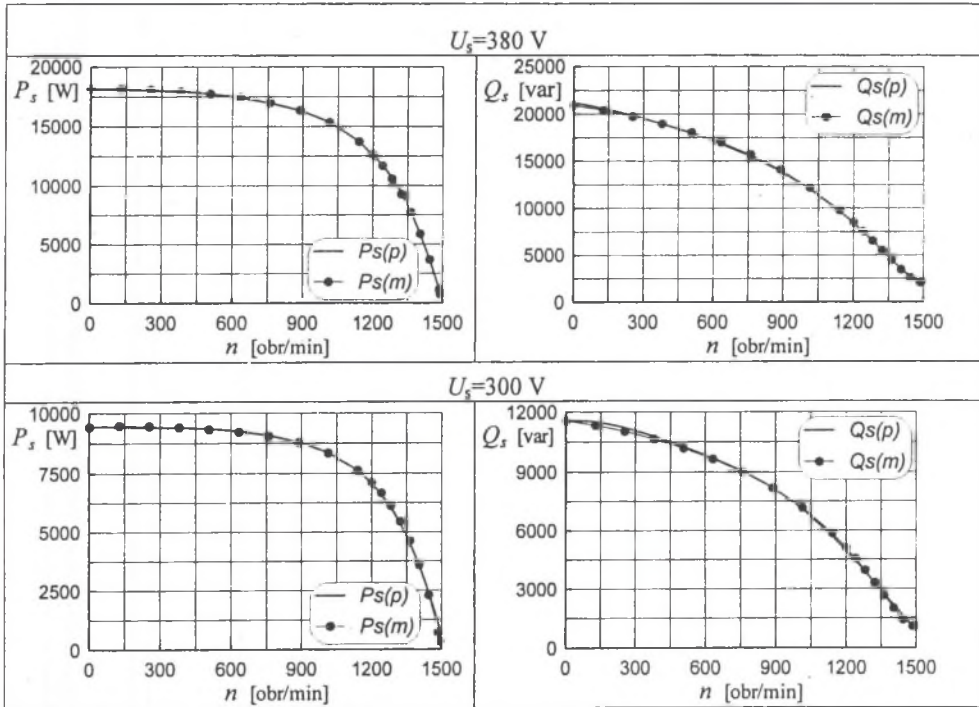
Tabela 2

Wyniki estymacji parametrów przy wykorzystaniu algorytmu gradientowego

Parametry	Dolny zakres	Górny zakres	$U_s=380$ V	$U_s=300$ V	$U_s=220$ V	$U_s=150$ V
A_σ^*	5,00	60,00	43,105	43,295	42,456	40,789
B_σ	0,010	0,400	0,0760	0,0687	0,0616	0,0640
C_σ^*	0,300	5,00	1,1671	1,091	1,064	0,964
R_s	2,00	2,50	2,255	2,401	2,436	2,50
R_r^*	1,20	1,65	1,258	1,251	1,251	1,20
ε			0,0178	0,253	0,0813	0,140

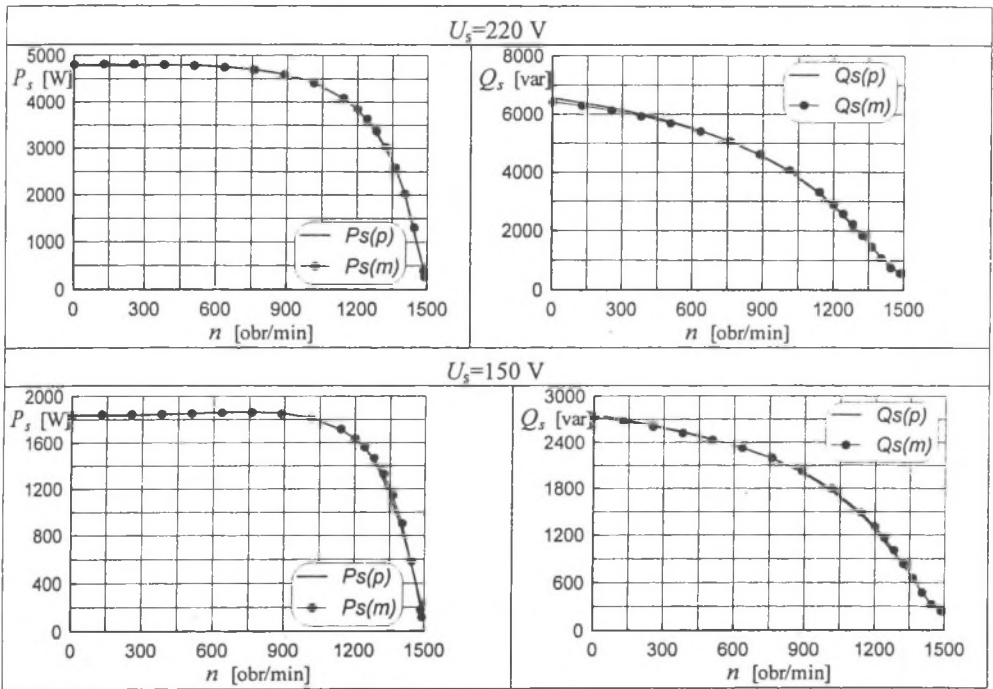
W ten sposób wyznaczono ostateczne parametry maszyny dla różnych napięć zasilania stojana. Wyniki tego etapu estymacji zestawiono w tabeli 2 umieszczając w niej również przyjęte dolne i górne zakresy zmian parametrów.

Jakość odwzorowania charakterystyk rzeczywistej maszyny przez jej model matematyczny i wyznaczone dla tego modelu parametry można ocenić porównując ze sobą charakterystyki zmierzone i obliczone, co przedstawiono na rys.6,7.



Rys.6. Wykresy mocy czynnej i biernej stojana zmierzone (p) i obliczone (m)

Fig.6. Plots of the measured (p) and calculated (m) stator active and passive power



Rys.7. Wykresy mocy czynnej i biernej stojana zmierzone (p) i obliczone (m)
 Fig.7. Plots of the measured (p) and calculated (m) stator active and passive power

Z porównania charakterystyk dla różnych napięć zasilania stojana wynika dobra zgodność charakterystyk maszyny rzeczywistej z charakterystykami wyznaczonymi na podstawie modelu.

6. UWAGI KOŃCOWE

Przedstawiony w artykule model matematyczny maszyny indukcyjnej uwzględniający zjawisko nasycenia rdzeni magnetycznych maszyny w polu magnetycznym głównym oraz w polach rozproszenia w dostatecznie dokładny sposób odwzorowuje właściwości rzeczywistej maszyny indukcyjnej klatkowej, w której można pominąć zjawisko wypierania w prętach wirnika.

Zaproponowana metodyka estymacji parametrów powyższego modelu (współczynników opisujących analityczne postaci syntetycznych charakterystyk sprzężeń magnetycznych oraz rezystancji stojana i wirnika) na podstawie zmierzonych charakterystyk maszyny w stanie quasi-ustalonym jest możliwa do zastosowania w warunkach

przemysłowych przy wykorzystaniu dostępnego sprzętu pomiarowego w postaci analizatorów mocy lub kart przetworników analogowo-cyfrowych.

Zastosowana procedura estymacji parametrów wykorzystująca korzystne cechy zarówno algorytmu genetycznego (brak konieczności określenia punktu startowego, praca na populacji parametrów), jak i algorytmu gradientowego (szybkość obliczeń) może być z powodzeniem zastosowana do estymacji parametrów modeli matematycznych maszyn indukcyjnych, w tym także dwuklatkowych i głębokożłobkowych.

Wpływ temperatury na wartość rezystancji uzwojeń oraz niedoskonałość przyjętego modelu powodują, iż otrzymane zbiory parametrów różnią się między sobą. Ta niekorzystna cecha wynika z przyjętej metodyki wyznaczania charakterystyk maszyny ze stanu quasi-ustalonego, podczas którego ulegają zmianie warunki termiczne występujące w maszynie.

LITERATURA

1. Dąbrowski M.: Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego, WNT, Warszawa 1988.
2. Dems M., Symulacja komputerowa przebiegów elektromechanicznych w silnikach indukcyjnych klatkowych, Politechnika Łódzka, Rozprawy Naukowe z. 229, Łódź 1996.
3. Hickiewicz J., Macek-Kamińska K., Wach P.: Algorithmic Methods of Induction Machines Parameters Estimation from Measured Slip-Curves, Archiv fur Elektrotechnik,, 1989, no. 72 s. 239-249.
4. Hickiewicz J., Macek-Kamińska K., Wach P.: Simulation investigations and parameters estimation of induction machine's model considering saturation of leakage inductances. Proc. of ICEM 1988, s. 271-276.
5. Kudła J. Burlikowski W.: Pomiarowa weryfikacja parametrów maszyn indukcyjnych klatkowych wyznaczone metodami połowymi (MES), Zeszyty Naukowe Pol. Śl. ser. Elektryka z.159, Gliwice 1997, s. 63-80.
6. Kudła J.: Determination of static and dynamic nonlinear inductances of an induction machines, International Workshop on Electrical Machines in Prague, Praga 1999, s. 77-86.
7. Kudła J.: Estymacja parametrów elektromagnetycznych modelu matematycznego maszyny indukcyjnej uwzględniającego zjawisko nasycenia Materiały konferencyjne SME 2000 (w przygotowaniu do druku).
8. Paszek W.: Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego, Wyd. Helion, Gliwice 1997.
9. Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L.: Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte. PWN, Warszawa 1997.
10. Śliwiński T., Głowacki A.: Parametry rozruchowe silników indukcyjnych. PWN, Warszawa 1982.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Roman Nadolski

Wpłynęło do Redakcji dnia 5 maja 2000 r.

Abstract

The paper presents the steady-state mathematical model of an induction machine with one equivalent circuit in the rotor (5,6), in which a saturation effect in the stator and rotor cores has been taken into account by means of the synthetic characteristics of magnetic flux linkages (3,4). When expressing the synthetic characteristic by analytical functions (7) the set of the above presented model parameter (8,9) consists of stator and rotor resistances and coefficients describing the analytical form of the synthetic characteristics of the main and leakage flux linkages. Basing on the sensitivity analysis [7] which shows the influence of the change of the parameters on the machine steady-state characteristics there has been assumed that the coefficients of the synthetic characteristic of the main flux linkage will be estimated from the motor no-load steady-state characteristic. The other parameters will be determined from the dependencies of the stator active and passive power on the rotational speed. The mentioned above characteristics have been obtained from the start-up tests of an induction motor performed on the laboratory stand, which is presented in the Fig.2. Exemplary results of the measurements are shown in the Fig. 3,4. Determining the least square error as an objective function (12) and using the genetic and gradient algorithms to minimize it (Fig.1), the sets of the machine parameters for different stator voltages and, as a consequence, for the different saturation level have been estimated (table 2). One can determine the quality of the performed estimation from the plots shown in the Fig.6.7.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- | | |
|---|--|
| $\underline{I}_s, I_s, \gamma_s, \underline{I}_r, I_r, \gamma_r,$ | – wektory przestrzenne prądu stojana, wirnika oraz ich moduły i argumenty, |
| $\underline{I}_m, I_m, \gamma_m, \underline{U}_s, U_s$ | – wektory przestrzenne prądu magnesującego oraz jego moduł i argument, napięcia stojana oraz jego moduł, |
| $\underline{\Psi}_{\sigma s}, \underline{\Psi}_{\sigma r}, \underline{\Psi}_m,$ | – wektory przestrzenne sprzężeń magnetycznych pola rozproszenia stojana, wirnika oraz pola głównego, |
| $\Psi_{\sigma s}(I_s), \Psi_{\sigma r}^*(I_r^*), \Psi_m(I_m)$ | – syntetyczne charakterystyki sprzężeń magnetycznych pola rozproszenia stojana, wirnika, oraz pola głównego, |
| R_s, R_r^* | – rezystancja stojana i wirnika, |

p_s, q_s

– chwilowa moc czynna i bierna stojana,

 $P_{s(p),(m)}, Q_{s(p),(m)}$

– moc czynna i bierna stojana zmierzona (p) i obliczona (m),

 s, n

– poślizg i prędkość kątowna wirnika,

 ω_s

– pulsacja sieci zasilającej.