

# Dobór parametrów silnika indukcyjnego dużej mocy

Ryszard Arendt, Andrzej Kopczyński

Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono trzy typy statycznych modeli matematycznych silników klatkowych oraz metodę estymacji parametrów przy wykorzystaniu algorytmów genetycznych. Korzystając z kryteriów: suma kwadratów, suma wartości bezwzględnych oraz całkowego, oceniono przydatność badanych modeli. Opracowane modele matematyczne zostały wykorzystane przy doborze algorytmów sterownia sterów strumieniowych. Pokazano metodykę doboru parametrów i modele silnika umożliwiające badanie ich wpływu na system energetyczny statku.

**Słowa kluczowe:** model matematyczny, silnik indukcyjny, algorytm genetyczny, ster strumieniowy

## 1. Wprowadzenie

Maszyny elektryczne są obecnie najczęściej stosowanymi urządzeniami do wytwarzania energii mechanicznej. Ich rozwój zapoczątkowało wytworzenie w XIX wieku pola wirującego. Dzięki prostocie budowy, niskim kosztom produkcji oraz stosunkowo bezawaryjnej pracy znajdują szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach, m.in. jako napędy sterów strumieniowych na statkach. W tym przypadku są to najczęściej silniki asynchroniczne (klatkowe). Istnieje zapotrzebowanie na dokładniejsze przewidywanie własności silników zarówno w fazie wytwarzania, jak i eksploatacji. Jest to możliwe jedynie przez wprowadzenie zaawansowanych metod modelowania matematycznego zjawisk w maszynach indukcyjnych [11].

Jakość wyników badań symulacyjnych zależy zarówno od użytego modelu matematycznego silnika, jak i od wiarygodności przyjętych parametrów modelu. Estymacji parametrów można dokonać metodą pośrednią (porównując przebiegi rzeczywiste z przebiegami modelowanymi) [12] lub bezpośrednią (dokonując odpowiednich pomiarów).

Dane ujęte na tabliczkach znamionowych silników indukcyjnych nie są wystarczające, aby uzyskać informacje o niezbędnych parametrach, które są konieczne przy budowie modeli statycznych i dynamicznych. Przy metodzie bezpośredniej pomiarów parametrów obwodu stojana dokonujemy, dysponując odpowiednim wyposażeniem pomiarowym, natomiast parametry obwodu wirnika wyznacza się pośrednio na podstawie prób biegu jałowego oraz zwarcia [4].

Z uwagi na nietypowe zastosowanie badanych silników (napędy sterów strumieniowych statków), a co za tym

idzie trudności w dokonaniu pomiarów na rzeczywistych obiektach oraz braku możliwości uzyskania stosownych parametrów od producentów tych urządzeń, zdecydowano się na wykorzystanie metody pośredniej estymacji parametrów silników indukcyjnych.

Estymacja parametrów polega na minimalizacji funkcji celu przy zmianie parametrów [12]. W tym celu stosuje się również algorytmy genetyczne.

W referacie przedstawiono i oceniono statyczne modele matematyczne silników indukcyjnych wraz z dobranymi parametrami przez algorytm genetyczny. Algorytm poszukiwał takich parametrów, aby charakterystyki momentu i prądu uzyskiwane w wyniku symulacji, oceniane według wybranego kryterium, jak najlepiej odzwierciedlały charakterystyki rzeczywistego silnika o mocy 800 kW wytwarzanego przez firmę ABB na potrzeby napędu sterów strumieniowych statków.

## 2. Algorytmy genetyczne

W celu estymacji parametrów silników indukcyjnych wykorzystano algorytm genetyczny zaimplementowany w środowisku MATLAB – GEATbx (ang. *Genetic and Evolutionary Algorithm Toolbox [for use with Matlab]*) [9]. Przybornik ten zawiera bibliotekę podstawowych skryptów w postaci *m*-plików, umożliwiających budowanie złożonych algorytmów genetycznych. W GEATbx znajdziemy takie elementy, jak :

- funkcja selekcji – wyboru osobników,
- funkcja rekombinacji – krzyżowania osobników,
- funkcja mutacji,
- funkcja migracji,
- funkcja oceniająca przystosowanie osobników,
- funkcja zamieniająca stare osobniki na nowe.

Zastosowanie ww. funkcji umożliwia budowę algorytmu genetycznego wspomagającego estymację parametrów.

Algorytm genetyczny rozpoczyna pracę od wygenerowania populacji początkowej, która jest losowana z zdefiniowanego przedziału (wprowadzamy dopuszczalny zakres zmian parametrów). Następnie obliczana jest funkcja przystosowania – funkcja celu. Do reprodukcji wybierane są osobniki najlepiej przystosowane. Ulegają one krzyżowaniu i mutacji, dzięki czemu możliwe jest utworzenie nowej populacji. Proces jest powtarzany do czasu spełnienia zadanego kryterium – maksymalnej liczby generacji. Wartości danego wskaźnika jakości określa parametr *ans* – im bliższy jest on zeru, tym model z parametrami dokładniej naśladuje wzorzec. Wynikiem pracy algorytmu

genetycznego jest macierz parametrów modelu, dla których algorytm uzyskał jak najmniejszą wartość parametru ans. Podawany jest również czas pracy algorytmu.

## 2.1. Funkcja celu – kryterium oceny jakości wyników symulacji

Algorytm genetyczny minimalizuje funkcję celu. Najczęściej stosowane miary „odległości” charakterystyki modelu od charakterystyki wzorcowej:

- suma kwadratów (1),
- suma wartości bezwzględnych (2),
- całkowa (3),

pozwalają na ocenę modelu. Funkcję celu można zatem wyznaczyć za pomocą jednego z równań:

$$\zeta(p) = \sum_{i=1}^n \left( |Te_{wzi} - Te_{mi}(p)|^2 + |In_{wzi} - In_{mi}(p)|^2 \right), \quad (1)$$

$$\zeta(p) = \sum_{i=1}^n \left( |Te_{wzi} - Te_{mi}(p)| + |In_{wzi} - In_{mi}(p)| \right), \quad (2)$$

$$\zeta(p) = \int_0^n [Te_{wz} - Te_m(p)] dt + \int_0^n [In_{wz} - In_m(p)] dt, \quad (3)$$

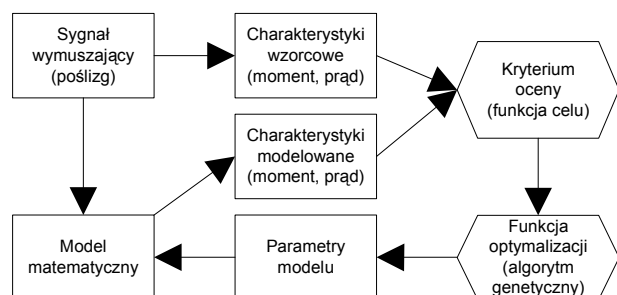
gdzie:

- $Te_{wzi}$  – wektor wielkości zmierzonych momentu,
- $In_{wzi}$  – wektor wielkości zmierzonych prądu,
- $Te_{mi}$  – wektor wielkości momentu wyznaczonego dla badanego modelu,
- $In_{mi}$  – wektor wielkości prądu wyznaczonego dla badanego modelu,
- $p$  – wektor parametrów badanego modelu wyznaczony przez algorytm genetyczny,
- $n$  – punkty odczytane z charakterystyk wzorcowych (odpowiadają proporcjonalnie poślizgowi  $s \in <1; 0>$ ).

Adekwatność modelu, wyrażoną w procentach, można wyznaczyć z równania (4):

$$\zeta_{\%}(p) = \frac{\zeta(p)}{2 \cdot n} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Algorytm genetyczny dokonuje minimalizacji funkcji celu zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 1.



Rys. 1. Optymalizacja z wykorzystaniem algorytmu genetycznego

Fig. 1. Optimization using genetic algorithm

Sygnałem wymuszającym jest poślizg, który zmienia się od 1 do 0 w 101 „krokach”. Każdej z wartości poślizgu przyporządkowane są po jednym punkcie charakterystyki

momentu ( $Te_{wz}$ ) i prądu ( $In_{wz}$ ). Jednocześnie, dla kolejnych wartości poślizgu, model matematyczny, korzystając z parametrów dostarczonych przez algorytm genetyczny, generuje punkty charakterystyk momentu ( $Te_m$ ) i prądu ( $In_m$ ). Kryterium oceny za pomocą jednego ze wzorów (1–3) porównuje punkty charakterystyk wzorcowych z charakterystykami uzyskanymi w wyniku symulacji modelu. W ten sposób uzyskujemy funkcję celu. Algorytm genetyczny minimalizuje funkcję celu przez generowanie coraz lepszych wektorów parametrów. Proces ten jest powtarzany do wartości zadanej liczby generacji.

Przeprowadzono badania dla ww. miar. Najlepsze rezultaty uzyskiwano, korzystając z sumy kwadratów.

## 3. Modele matematyczne silników indukcyjnych i wykonane badania symulacyjne

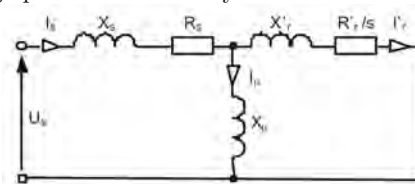
Przy opisie matematycznym rozważa się różne stany maszyny indukcyjnej:

- dynamiczne (zmianie w czasie ulegają właściwości elektryczne i mechaniczne maszyny),
- nieustalone (zachodzą podczas procesów przejściowych, prędkość kątowna jest ustalona, zmianie ulegają prądy i strumienie),
- ustalone (zachodzi powtarzalność właściwości elektrycznych i mechanicznych) [11].

Badane modele statyczne opisują równania algebraiczne, w których żaden z parametrów nie jest zależny od czasu. Przyjęto symetryczne zasilanie.

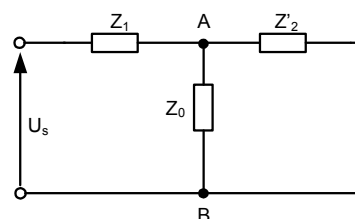
### 3.1. Statyczny model silnika indukcyjnego

Na podstawie literatury przyjęto statyczny model silnika indukcyjnego [8, 11] przedstawiony na rys. 2. Model ten uwzględnia reaktancję magnesującą  $X_\mu$  oraz pomija straty w żelazie  $R_F$  i straty w miedzi  $R'_{cu}$ . Założono stan ustalony oraz symetryczne napięcie zasilania. Schemat zastępczy maszyny indukcyjnej z wirnikiem klatkowym dla stanu ustalonego przedstawiono na rys. 3.



Rys. 2. Model maszyny indukcyjnej z wirnikiem klatkowym dla stanu ustalonego

Fig. 2. Steady state model of a squirrel-cage induction motor



Rys. 3. Schemat zastępczy maszyny indukcyjnej z wirnikiem klatkowym dla stanu ustalonego

Fig. 3. Steady state equivalent circuit of a squirrel cage induction motor

Równania (5) do (14) przedstawiają opis matematyczny maszyny indukcyjnej z wirnikiem klatkowym dla stanu ustalonego [5, 8, 10, 11]:

$$Z_1 = R_s + jX_s, \quad (5)$$

$$Z_2 = \frac{R_r}{s} + jX_r, \quad (6)$$

$$Z_0 = jX_\mu, \quad (7)$$

$$Z_{AB} = \frac{Z_2' \cdot Z_0}{Z_2' + Z_0}, \quad (8)$$

$$I_s = \frac{U_s}{Z_{AB} + Z_1}, \quad (9)$$

$$U_1 = I_s \cdot Z_1, \quad (10)$$

$$U_{AB} = U_s - U_1, \quad (11)$$

$$I_r' = \frac{U_{AB}}{Z_2}, \quad (12)$$

$$M = \frac{|I_r'|^2 \cdot R_r}{s}, \quad (13)$$

$$I_s = |I_s|, \quad (14)$$

gdzie:

- $I_s$  – prąd uzwojenia stojana,
- $R_s$  – rezystancja uzwojenia stojana,
- $X_s$  – reaktancja rozproszenia uzwojenia stojana,
- $I_r'$  – prąd uzwojenia wirnika,
- $R_r'$  – rezystancja uzwojenia wirnika,
- $X_r'$  – reaktancja rozproszenia uzwojenia wirnika,
- $I_\mu$  – prąd magnesujący,
- $X_\mu$  – reaktancja magnesująca,
- $U_s$  – napięcie fazowe stojana,
- $s$  – poślizg.

Model sprowadzono do jednostek względnych [12].

Charakterystyka wzorcowa została zdjęta w zakładach ABB z silnika indukcyjnego produkcji ABB, typu AMA 400L6D VAMH, o mocy znamionowej 800 kW, napięciu zasilania 440 V, częstotliwości sieci 60 Hz, prędkości obrotowej 1186 obr/min i prądzie znamionowym 1331 A [1]. Badany silnik jest stosowany jako napęd sterów strumieniowych. Z charakterystyki otrzymanej z firmy ABB odczytano 101 punktów dla prądu oraz momentu. Następnie sprowadzono obie charakterystyki do jednostek względnych, dzieląc każdy z odczytanych punktów charakterystyki przez wartość nominalną odpowiednio prądu lub momentu. Umożliwia to wykorzystanie posiadanych charakterystyk do oceny badanego modelu matematycznego silnika indukcyjnego.

Model zbudowano w środowisku MATLAB [6], w postaci *m*-pliku. Przyjęto zmienność poślizgu w zakresie  $s = <0; 1>$ , aby obejmował całą charakterystykę wzorcową.

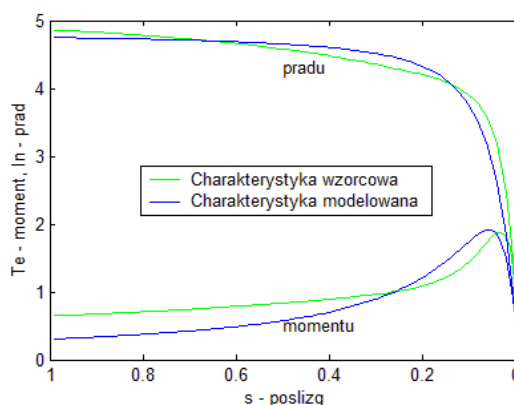
Fragment pliku *model.m* zawierający model silnika ma postać:

```
(...)
Z1 = Rs+j*Xs;
Z2 = Rr/(s(n)+0,00001)+j*Xr;
Z0 = j*Xmi;
```

```
ZAB = Z2*Z0/(Z2+Z0);
Is = Us/(ZAB+Z1);
U1 = Is*Z1;
UAB = Us-U1;
Ir = UAB/Z2;
Me = abs(Ir)^2*Rr/(s(n)+0,00001);
Is = abs(Is);
(...)
```

Badania przeprowadzono dla 5000 generacji. Zwiększenie liczby generacji nie powodowało znaczącej poprawy wyników. Liczba osobników w podpopulacji wynosiła 15, wskaźniki: mutacji 0,2, migracji między podpopulacjami 0,2 oraz krzyżowań 1. Do wartości poślizgu dodano 1/10000, co nie wpływa znacząco na wyniki symulacji i jednocześnie eliminuje dzielenie przez „zero”, zatrzymujące wykonywanie skryptu przez aplikację MATLAB.

W wyniku przeprowadzonych badań modelu dla  $U_s = 1$  (napięcie zasilania równe 100 %) uzyskano charakterystykę  $Te = f(s)$  oraz  $In = f(s)$ , oznaczone kolorem niebieskim. Natomiast kolorem zielonym przedstawiono charakterystyki wzorcowe (rys. 4).



**Rys. 4.** Charakterystyki momentu oraz prądu stojana w funkcji poślizgu

**Fig. 4.** Torque and stator current curve in function of slip

Adekwatność estymacji parametrów modelu oceniono zgodnie z (1) i (4) na 5,1 %. Czas symulacji wyniósł 297 s. Algorytm genetyczny dla  $U_s = 1$  wygenerował następujące parametry modelu (tab. 1).

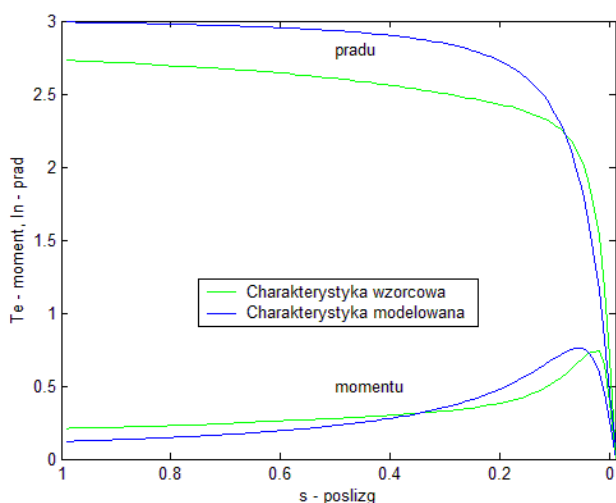
**Tab. 1.** Parametry modelu

**Tab. 1.** Model parameters

$R_s$	$X_s$	$R_r'$	$X_r'$	$X_\mu$
0,048 6	0,000 1	0,014 1	0,206 2	8,088 2

Ze względu na możliwość sterowania rozruchem przez przełącznik trójkąt/gwiazda, producent podał również charakterystyki dla 63 %  $U_s$ . W wyniku przeprowadzonych badań symulacyjnych dla  $U_s = 0,63$  (napięcie zasilania równe 63 %  $U_s$  sprowadzone do jednostek względnych), uzyskano charakterystyki  $Te = f(s)$  oraz  $In = f(s)$  (rys. 5).

Adekwatność estymacji parametrów modelu oceniono zgodnie z (1) i (4) na 4,6 %.

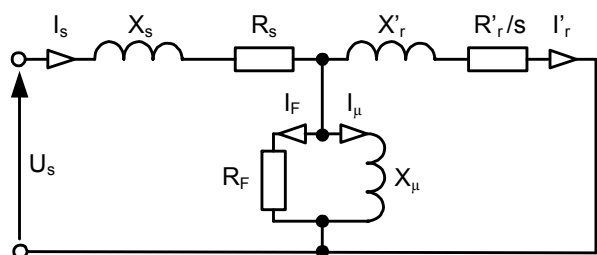


Rys. 5. Charakterystyki momentu oraz prądu stojana w funkcji poślizgu

Fig. 5. Torque and stator current curve in function of slip

### 3.2. Model maszyny indukcyjnej uwzględniający straty w żelazie

Na podstawie literatury przyjęto statyczny model silnika indukcyjnego [11] przedstawiony na rys. 6. Model ten uwzględnia reaktancję magnesującą  $X_\mu$  i straty w żelazie  $R_F$  oraz pomija straty w miedzi  $R'_{cu}$ . Założono stan ustalony oraz symetryczne napięcie zasilania.



Rys. 6. Model maszyny indukcyjnej z wirnikiem klatkowym dla stanu ustalonego

Fig. 6. Steady state model of a squirrel-cage induction motor

Schemat zastępczy silnika indukcyjnego z uwzględnieniem strat w żelazie jest analogiczny, jak w pkt 3.1 (rys. 3).

Równania (15) do (24) przedstawiają opis matematyczny maszyny indukcyjnej z wirnikiem klatkowym dla stanu ustalonego [5, 8, 10, 11]:

$$Z_1 = R_s + jX_s, \quad (15)$$

$$Z_2 = \frac{R'_r}{s} + jX'_r, \quad (16)$$

$$Z_0 = \frac{jX_\mu \cdot R_F}{jX_\mu + R_F}, \quad (17)$$

$$Z_{AB} = \frac{Z'_2 \cdot Z_0}{Z'_2 + Z_0}, \quad (18)$$

$$I_s = \frac{U_s}{Z_{AB} + Z_1}, \quad (19)$$

$$U_1 = I_s \cdot Z_1, \quad (20)$$

$$U_{AB} = U_s - U_1, \quad (21)$$

$$I'_r = \frac{U_{AB}}{Z_2}, \quad (22)$$

$$M = \frac{|I'_r|^2 \cdot R'_r}{s}, \quad (23)$$

$$I_s = |I_s|, \quad (24)$$

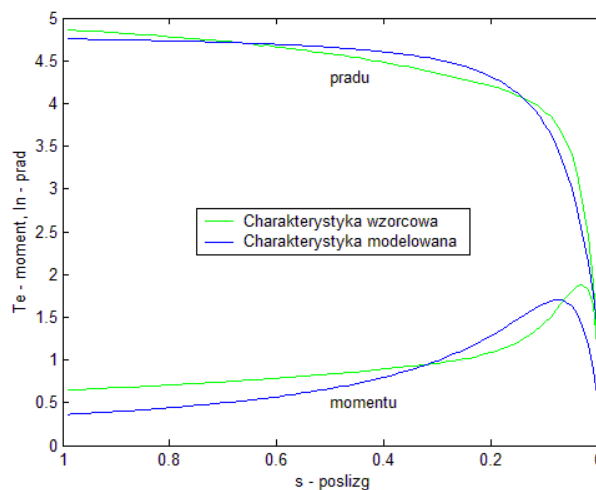
gdzie:

$I_F$  – prąd strat w żelazie,

$R_F$  – rezystancja strat w żelazie.

Model sprowadzono do jednostek względnych [12]. Badania modelu przeprowadzono analogicznie, jak w 3.1.

W wyniku przeprowadzonych badań modelu dla  $U_s = 1$  (napięcie zasilania równe 100 %) uzyskano charakterystykę  $Te = f(s)$  oraz  $In = f(s)$ , oznaczone kolorem niebieskim. Natomiast kolorem zielonym przedstawiono charakterystyki wzorcowe (rys. 7).



Rys. 7. Charakterystyki momentu oraz prądu stojana w funkcji poślizgu

Fig. 7. Torque and stator current curve in function of slip

Adekwatność estymacji parametrów modelu oceniono zgodnie z (1) i (4) na 4,1 %. Czas symulacji wyniósł 280 s. Algorytm genetyczny dla  $U_s = 1$  wygenerował następujące parametry modelu (tab. 2).

Tab. 2. Parametry modelu

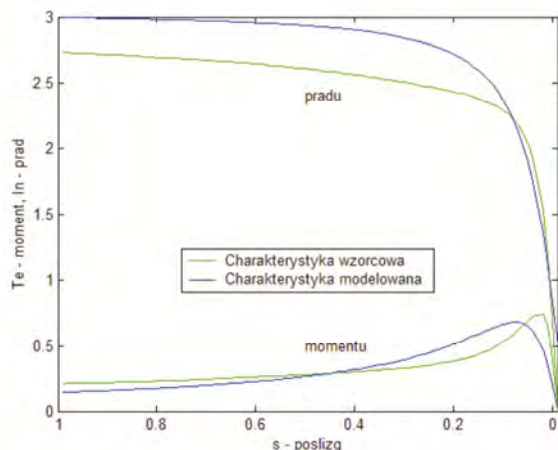
Tab. 2. Model parameters

$R_s$	$X_s$	$R'_r$	$X'_r$	$R_F$	$X_\mu$
0,041 3	0,187 3	0,016 4	0,015 6	10	1,175 5

Badania symulacyjne powtórzono również dla zasilania  $U_s = 0,63$  (napięcie zasilania równe 63 %  $U_s$  sprowadzone

do jednostek względnych). Uzyskano charakterystyki  $Te = f(s)$  oraz  $In = f(s)$  (rys. 8).

Adekwatność estymacji parametrów modelu oceniono zgodnie z (1) i (4) na 4,6 %.

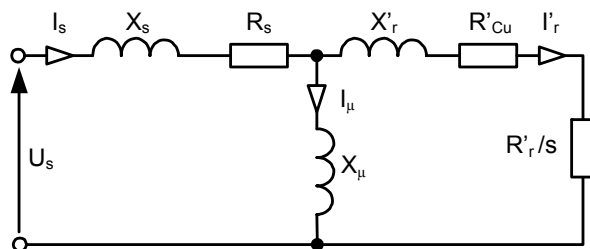


Rys. 8. Charakterystyki momentu oraz prądu stojana w funkcji poślizgu

Fig. 8. Torque and stator current curve in function of slip

### 3.3. Model maszyny indukcyjnej uwzględniający straty w miedzi

Na podstawie literatury przyjęto statyczny model silnika indukcyjnego [8, 10], przedstawiony na rys. 9. Model ten uwzględnia reaktancję magnesującą  $X_\mu$  i straty w miedzi  $R'_{Cu}$  oraz pomija straty w żelazie  $R_F$ . Założono stan ustalony oraz symetryczne napięcie zasilania.



Rys. 9. Model maszyny indukcyjnej z wirnikiem klatkowym dla stanu ustalonego

Fig. 9. Steady state model of a squirrel-cage induction motor

Schemat zastępczy silnika indukcyjnego z uwzględnieniem strat w miedzi jest analogiczny, jak w pkt 3.1 (rys. 3).

Równania (25) do (34) przedstawiają opis matematyczny maszyny indukcyjnej z wirnikiem klatkowym dla stanu ustalonego [5, 8, 10, 11].

$$Z_1 = R_s + jX_s, \quad (25)$$

$$Z'_2 = R'_{Cu} + \frac{R'_r}{s} + jX'_r, \quad (26)$$

$$Z_0 = jX_\mu, \quad (27)$$

$$Z_{AB} = \frac{Z'_2 \cdot Z_0}{Z'_2 + Z_0}, \quad (28)$$

$$I_s = \frac{U_s}{Z_1 + Z_{AB}}, \quad (29)$$

$$U_1 = I_s \cdot Z_1, \quad (30)$$

$$U_{AB} = U_s - U_1, \quad (31)$$

$$I'_r = \frac{U_{AB}}{Z'_2}, \quad (32)$$

$$M = \frac{|I'_r|^2 \cdot R'_r}{s}, \quad (33)$$

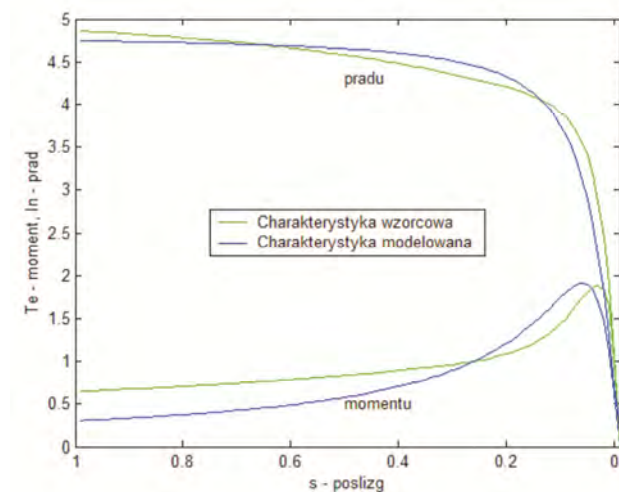
$$I_s = |I_s|, \quad (34)$$

gdzie:

$R'_{Cu}$  – rezystancja strat w miedzi.

Model sprowadzono do jednostek względnych [12]. Badania modelu przeprowadzono analogicznie, jak w 3.1.

W wyniku przeprowadzonych badań modelu dla  $U_s = 1$  (napięcie zasilania równe 100 %) uzyskano charakterystykę  $Te = f(s)$  oraz  $In = f(s)$ , oznaczone kolorem niebieskim. Natomiast kolorem zielonym przedstawiono charakterystyki wzorcowe (rys. 10).



Rys. 10. Charakterystyki momentu oraz prądu stojana w funkcji poślizgu

Fig. 10. Torque and stator current curve in function of slip

Adekwatność estymacji parametrów modelu oceniono zgodnie z (1) i (4) na 5,1 %. Czas symulacji wyniósł 312 s. Algorytm genetyczny dla  $U_s = 1$  wygenerował następujące parametry modelu (tab. 3).

Tab. 3. Parametry modelu

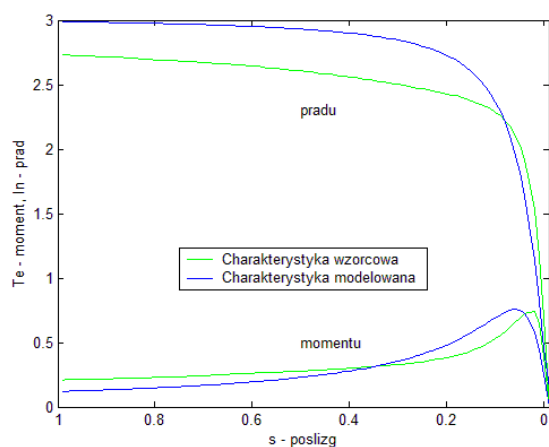
Tab. 3. Model parameters

$R_s$	$X_s$	$R'_r$	$X'_r$	$R'_{Cu}$	$X_\mu$
0,000 1	0,000 1	0,014 4	0,209 0	0,047 0	5,925 8

Badania symulacyjne powtórzono również dla zasilania  $U_s = 0,63$  (napięcie zasilania równe 63 %  $U_s$  sprowadzone do jednostek względnych). Uzyskano charakterystyki  $Te = f(s)$  oraz  $In = f(s)$  (rys. 11).



Adekwatność estymacji parametrów modelu oceniono zgodnie z (1) i (4) na 4,6 %.



Rys. 11. Charakterystyki momentu oraz prądu stojana w funkcji poślizgu

Fig. 11. Torque and stator current curve in function of slip

#### 4. Przykładowe badania symulacyjne steru strumieniowego statku

Przyjęto strukturę steru strumieniowego z silnikiem indukcyjnym i śrubą o skoku nastawnym [3]. Zastosowano rozruch bezpośredni silnika indukcyjnego, który powoduje największe spadki napięć w obwodach zasilania. Badania przeprowadzono w celu określenia wpływu impedancji obwodów zasilania na własności pracy silnika steru strumieniowego.

W badaniach wykorzystano zaprezentowany model silnika indukcyjnego (pkt 3.1) z parametrami dobranymi dla silnika indukcyjnego produkcji ABB, typu AMA 400L6D VAMH, o mocy znamionowej 800 kW, napięciu zasilania 440 V, częstotliwości sieci 60 Hz, prędkości obrotowej 1186 obr/min i prądzie znamionowym 1331 A [1].

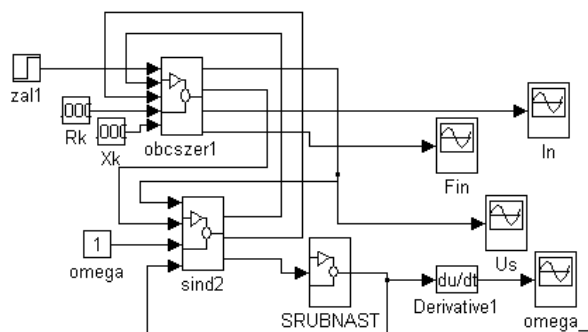
Przyjęto zasilanie steru strumieniowego z idealnego źródła napięciowego – przyjmując wartości względne napięcia i częstotliwości sieci równe 1 dla  $U_g = 440$  V oraz  $\omega_g = 60$  Hz.

W programie MATLAB/Simulink [6] zredagowano i połączono model węzła wyróżniającego obwód szeregowy, model silnika indukcyjnego oraz model śruby o skoku nastawnym. Model śruby nastawnej był już prezentowany przy badaniach symulacyjnych systemu energetycznego statku [2]. Strukturę modelu użytą w badaniach symulacyjnych przedstawiono na rys. 12.

Przyjęto następujący program badań: w chwili 0 s zostaje załączone zasilanie silnika indukcyjnego przy zerowym skoku śruby nastawnej. W chwili 20 s zostaje ustawione znamionowe obciążenie silnika – zmiana ustawienia łopatek śruby nastawnej. Badania wykonano dla zasilania silnika kablem o impedancji  $Z = 0,01 + j0,01$ . Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 13–16.

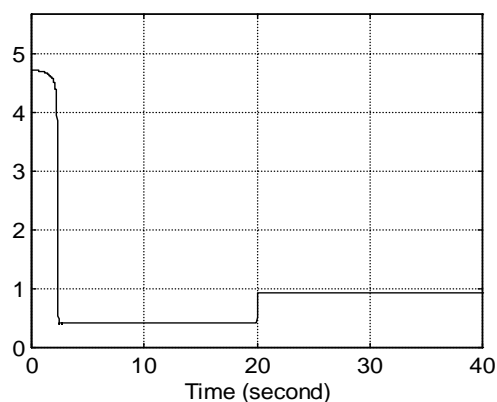
Ze względu na zastosowanie rozruchu bezpośredniego silnika indukcyjnego, w chwili załączenia napięcia prąd zasilania przekracza ok. 5 razy wartość znamionową

(rys. 13). W przedziale czasu 0–2,5 s następuje rozruch silnika, następnie do 20 s silnik pracuje z obciążeniem 20 % mocy znamionowej. Śruba o skoku nastawnym, mimo zerowego skoku, w środowisku wodnym stwarza opory hydrodynamiczne ujęte w zastosowanym modelu. W przedziale czasu 20–40 s silnik pracuje z obciążeniem bliskim znamionowego.



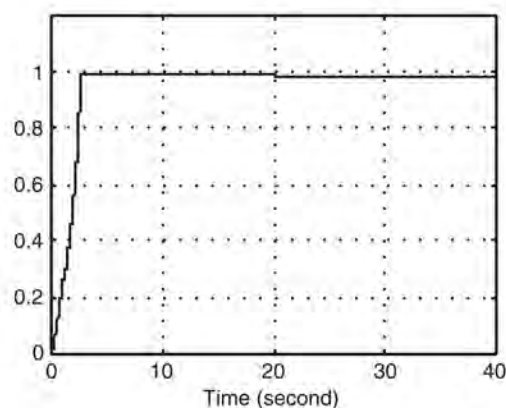
Rys. 12. Struktura modelu steru strumieniowego z uwzględnieniem spadków napięć zasilania

Fig. 12. Bow thruster model structure including the voltage drops



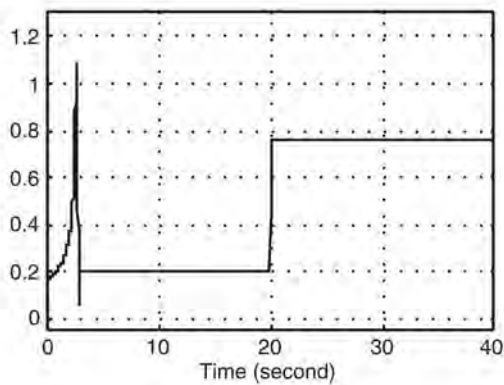
Rys. 13. Przebieg prądu obciążenia modelu silnika indukcyjnego

Fig. 13. Current load waveform of induction motor model



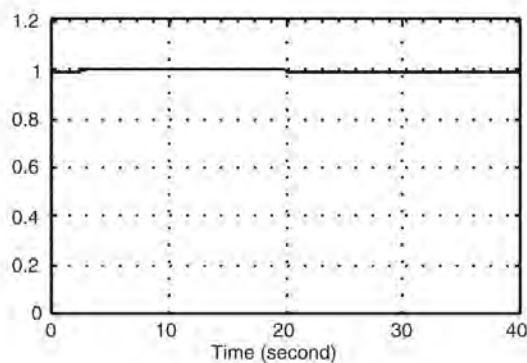
Rys. 14. Przebieg prędkości obrotowej modelu silnika indukcyjnego

Fig. 14. Angular velocity waveform of induction motor model



**Rys. 15.** Przebieg momentu obciążenia modelu silnika indukcyjnego

**Fig. 15.** Load torque waveform of induction motor model



**Rys. 16.** Przebieg napięcia zasilania modelu silnika indukcyjnego

**Fig. 16.** Voltage waveforms of induction motor model

W stosunku do badań bez uwzględnienia impedancji kabla [2] można zaobserwować nieznaczny spadek początkowej wartości prądu rozruchowego silnika ok. 4,5 wartości znamionowej, lekkie wydłużenie czasu rozruchu ok. 3 s, jak również niewielki wzrost prądu przy obciążeniu znamionowym (rys. 13).

Przebieg prędkości obrotowej wału silnika (rys. 14) przedstawia wzrost prędkości obrotowej do wartości bliskiej znamionowej oraz nieznaczny spadek prędkości obrotowej po załączeniu pełnego obciążenia.

Moment przenoszony wałem silnika (rys. 15) zmienia się z prędkością obrotową silnika i osiąga maksymalną wartość w chwili 3 s.

Widoczne są niewielkie spadki napięć zasilania przy poborze większego prądu przez silnik indukcyjny (rys. 16).

## 5. Uwagi i wnioski

W celu oceny przydatności modeli matematycznych do oceny procesów zachodzących podczas rozruchu i pracy sterów strumieniowych na statkach, wykonano badania symulacyjne dla szeregu, dostępnych w literaturze modeli statycznych [4, 5, 7, 8, 10, 11]. Przebadano następujące modele maszyn indukcyjnych:

- z wirnikiem klatkowym dla stanu ustalonego,

- z wirnikiem klatkowym dla stanu ustalonego z uwzględnieniem strat w żelazie,
- z wirnikiem klatkowym z uwzględnieniem mocy traconej w wirniku (strat w miedzi),
- z wirnikiem głębokożłobkowym,
- z wirnikiem dwuklatkowym.

Przy badaniach symulacyjnych użyto środowiska symulacyjnego MATLAB 6.2, nowsze wersje nie mogły zostać użyte z uwagi na ograniczenia licencyjne i brak możliwości współpracy z posiadanym toolboxem GEATbx (Algorytmów Genetycznych). Zarówno algorytm genetyczny, jak i model silnika został opracowany w postaci m-plików, co znacznie przyspiesza czas potrzebny na wykonanie symulacji. Cały proces doboru parametrów dla 5000 generacji trwał od kilku do kilkunastu minut, w zależności od badanego modelu silnika. Do badań wykorzystano komputer klasy PC z systemem Windows Vista, procesorem AMD Turion 64 X2 2,1 GHz oraz 2 GB pamięci RAM.

Na podstawie literatury [5] oraz charakterystyk uzyskanych z firmy ABB wywnioskowano, iż badany silnik jest jednoklatkowy. Wyniki badań symulacyjnych potwierdziły, iż modele silników głębokożłobkowego i dwuklatkowego najgorzej odwzorowywały charakterystyki rzeczywiste badanego silnika (dlatego pominięto je w artykule). Najlepsze rezultaty natomiast dał model silnika indukcyjnego z wirnikiem klatkowym dla stanu ustalonego, z uwzględnieniem strat w żelazie. Wyniki uzyskane dla najlepszego modelu nie są jednak satysfakcjonujące. Nasuwa się w związku z tym wniosek o potrzebie poszukiwania lepszych rozwiązań.

Należy rozważyć możliwość użycia modeli polowych lub hybrydowych. Charakterystyki modeli hybrydowych mogą być utworzone z połączenia dwóch lub więcej modeli.

Algorytmy genetyczne są jedną z metod estymacji parametrów modeli. Ponieważ wyniki nie są satysfakcjonujące, należy również rozważyć użycie innych metod. Wydaje się jednak, że przy zastosowaniu innych metod estymacji uzyskane wyniki nie powinny być znacząco lepsze.

Zagadnienia związane z badaniem silnika indukcyjnego jako napędu steru strumieniowego statku są interesujące, gdyż dobór takich elementów sprawia kłopoty konstrukcyjne. Moce silników napędzających stery strumieniowych osiągają setki, a nawet tysiące kilowatów, i są porównywalne z mocami elektrowni statku.

Prezentowane prace dotyczą jedynie wycinka zagadnień podejmowanych przez autorów, związanych z komputerowo wspomaganym projektowaniem układów automatyki systemów energetycznych statku.

Opracowane modele wraz z dobranymi parametrami znajdą zastosowanie w systemie ekspertowym, wspomagającym projektowanie sterów strumieniowych statków.

## Bibliografia

1. ABB Zamech: *Silnik indukcyjny AMA 400L6D VAMH*, dokumentacja 4902HD200, 2000.
2. Arendt R.: *Simulation and investigation fo ship Power systems*, IEEE Xplore, 2011, 1–4.

3. Galbas J., Krajczyński Z., Lisowski J.: *Okrętowe stery strumieniowe*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk, 1986.
4. Grunwald Z. (red.): *Napęd elektryczny*, WNT Warszawa, 1987.
5. Kalus M., Skoczkowski T.: *Sterowanie napędami asynchronicznymi i prądu stałego*, PKJS Gliwice, 2003.
6. Karris S. T.: *Circuit Analysis I (II) with MATLAB and Simulink, SimPowerSystems Modeling*, Orchard Publications, 2009.
7. Lindenmeyer D., Dommel H.W., Moshref A., Kundur P.: *An induction motor parameter estimation method*, EP&ES, 2001, 251–262.
8. Ogbuka C. U., Agu M. U.: *A modified approach to induction motor stator voltage and frequency control*, WCE London, 2011.
9. Pohlheim Hartmut: *Genetic and Evolutionary Algorithm Toolbox for use with Matlab. User Guide*.
10. Roszczyk S.: *Teoria maszyn elektrycznych*, WNT Warszawa, 1979.
11. Sobczyk T. J.: *Metodyczne aspekty modelowania matematycznego maszyn indukcyjnych*, WNT Warszawa, 2004.
12. Zajczyk R.: *Modele matematyczne systemu elektroenergetycznego do badania elektromechanicznych stanów nieustalonych i procesów regulacyjnych*, WPG Gdańsk, 2003. ■

### Estimation of parameters of high power induction motor

**Abstract:** In the paper three types of mathematical models of static squirrel cage motors and the method of estimating pa-

rameters using genetic algorithms are presented. Criteria: the sum of the squares, the sum of absolute values and integral of optimization problem are used. In selection control of algorithm a bow thruster identified mathematical models are applied. The parameters and methodology for the selection of motor models were considered for the study of their impact on the energy system of the ship are showed.

**Keywords:** mathematical model, induction motor, genetic algorithm, bow thruster

#### dr hab. inż. Ryszard Arendt

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Mechatroniki i Inżynierii Wysokich Napięć, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk.  
e-mail: r.arendt@ely.pg.gda.pl



#### mgr inż. Andrzej Kopczyński

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Mechatroniki i Inżynierii Wysokich Napięć, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk.  
e-mail: akopczyzn@ely.pg.gda.pl

