

## Wyznaczanie parametrów schematu zastępczego silnika indukcyjnego z wirnikiem dwuklatkowym

*W obliczeniach elektromechanicznych napędów wysokowydajnych maszyn górniczych często niezbędna jest znajomość modelu matematycznego silnika napędowego. W artykule przedstawiono metodykę wyznaczania wartości elementów schematu zastępczego dla silników z wirnikiem dwuklatkowym. Przedstawiono wyniki przykładowych obliczeń dla silnika 500 kW, 3300 V.*

### 1. WPROWADZENIE

---

Wzrost mocy napędów współczesnych maszyn górniczych stawia coraz wyższe wymagania dotyczące niezawodności pracy silników napędowych oraz układów zasilających. Optymalizacja układów sterowania i zasilania wymaga często prowadzenia badań symulacyjnych bądź też numerycznych obliczeń iteracyjnych. Niezbędna jest wówczas znajomość podstawowych parametrów umożliwiających opis pracy silnika indukcyjnego przy zróżnicowanym obciążeniu – w stanach ustalonych i nieustalonych. Możliwe jest to przy znajomości parametrów schematu zastępczego silnika. Ich wyznaczenie możliwe jest doświadczalnie po przeprowadzeniu odpowiednich badań laboratoryjnych lub też teoretycznie na podstawie dokumentacji konstrukcyjnej silnika – zwykle jednak użytkownik nie dysponuje szczegółowymi danymi lub też wynikami badań. Stąd też szczególne znaczenie nabiera poszukiwanie sposobów przybliżonego wyznaczania wartości tych elementów jedynie na podstawie ograniczonego zestawu parametrów podawanych przez producenta w danych katalogowych. Zagadnienie to jest dość szeroko opisywane w literaturze, jednak większość dostępnych algorytmów opiera się na zestawie danych podawanych według norm amerykańskich [3], a nie europejskich oraz wymaga stosowania czasochłonnych metod optymalizacyjnych (algorytmy genetyczne, metody ewolucyjne [1,4]) przeszukujących systematycznie przestrzeń rozwiązań w celu uzyskania najlepszego dopasowania wyznaczonych charakterystyk do danych katalogowych lub pomiarowych – w wybranych punktach pracy. Zjawisko wypierania prądu w uzwojeniach wirnika opisywane jest wówczas w ogólny sposób liniową lub nieliniową funkcją poślizgu, której parametry podlegają również wyznaczeniu metodami optymalizacyjnymi. Metody te bywają jednak często zbyt czasochłonne do praktycznego zastosowania oraz wrażliwe na wybór początkowego punktu poszukiwań. Stąd też celowe jest poszukiwanie metod prostszych, łatwiejszych do implementacji programowej w dowolnym języku lub nawet w arkuszu kalkulacyjnym.

kańskich [3], a nie europejskich oraz wymaga stosowania czasochłonnych metod optymalizacyjnych (algorytmy genetyczne, metody ewolucyjne [1,4]) przeszukujących systematycznie przestrzeń rozwiązań w celu uzyskania najlepszego dopasowania wyznaczonych charakterystyk do danych katalogowych lub pomiarowych – w wybranych punktach pracy. Zjawisko wypierania prądu w uzwojeniach wirnika opisywane jest wówczas w ogólny sposób liniową lub nieliniową funkcją poślizgu, której parametry podlegają również wyznaczeniu metodami optymalizacyjnymi. Metody te bywają jednak często zbyt czasochłonne do praktycznego zastosowania oraz wrażliwe na wybór początkowego punktu poszukiwań. Stąd też celowe jest poszukiwanie metod prostszych, łatwiejszych do implementacji programowej w dowolnym języku lub nawet w arkuszu kalkulacyjnym.

### 2. ZAŁOŻENIA

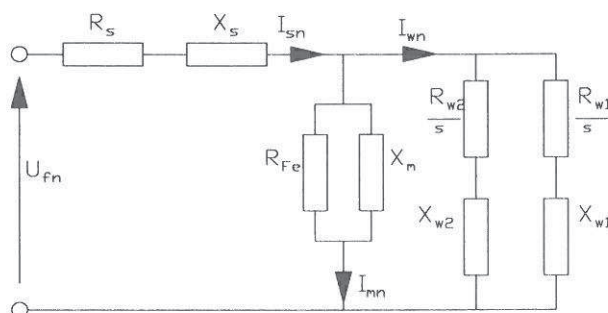
---

Do wyznaczenia podstawowych parametrów schematu zastępczego silnika dwuklatkowego wykorzystywane są przede wszystkim dane znamionowe podawane przez producenta i przedstawione w tabeli 1:

**Tabela 1**  
**Parametry znamionowe wykorzystywane do obliczania schematu zastępczego**

Lp.	Symbol	Parametr	Jednostka
1	$P_n$	Moc znamionowa	[kW]
2	$U_n$	Napięcie znamionowe	[V]
3	$I_n$	Prąd znamionowy	[A]
4	$\eta_n$	Sprawność znamionowa	[%]
5	$\cos\varphi_n$	Znamionowy współczynnik mocy	-
6	$n_n$	Prędkość znamionowa	obr/min
7	$K_{Ir} = \frac{I_m}{I_n}$	Krotność prądu rozruchowego	-
8	$K_{Mr} = \frac{M_{rn}}{M_n}$	Krotność momentu rozruchowego	-
9	$K_{Mm} = \frac{M_{max}}{M_n}$	Krotność momentu maksymalnego	-

Na podstawie tych 9 parametrów należy wyznaczyć wartości 7 elementów schematu zastępczego (rys. 1) o oznaczeniach przedstawionych w tabeli 2.



Rys. 1. Schemat zastępczy silnika z wirnikiem dwuklatkowym i stosowane oznaczenia

**Tabela 2**  
**Oznaczenia elementów schematu zastępczego**

$R_s$	rezystancja stojana
$X_s$	reaktancja rozproszenia stojana
$R_{w1}$	rezystancja klatki roboczej
$X_{w1}$	reaktancja rozproszenia klatki roboczej
$R_{w2}$	rezystancja klatki rozruchowej
$X_{w2}$	reaktancja rozproszenia klatki rozruchowej
$X_m$	reaktancja gałęzi magnesującej

Ponieważ w silniku z wirnikiem dwuklatkowym z uwagi na zjawisko wypierania prądu rezystancja wirnika zmienia się wraz z poślizgiem, niezbędne jest wyznaczenie jej wartości dla kilku charakterystycznych punktów pracy:

- dla obciążenia znamionowego ( $R_{wn}, X_{wn}$  z wykorzystaniem danych dotyczących sprawności, współczynnika mocy i przeciążalności momentem)
- dla warunków rozruchowych ( $R_{wr}, X_{wr}$  z wykorzystaniem danych dotyczących prądu rozruchowego i momentu rozruchowego)

Po wyznaczeniu zbioru wartości parametrów charakteryzujących wypadkową impedancję wirnika ( $R_{wn}, X_{wn}, R_{wr}, X_{wr}$ ) można w dalszej kolejności przystąpić do wyznaczenia elementów schematu zastępczego obydwu klatek wirnika.

### 3. METODYKA OBLICZEŃ

#### 3.1. Bezpośrednia zależność między napięciem wejściowym i prądem wirnika (współczynnik rozproszenia C)

Wyznaczając zależność między napięciem wejściowym ( $U_s$ ) i prądem wirnika  $I_w$  decydującym o wartości momentu można zapisać układ równań:

$$\begin{cases} E_m = I_w Z_w = I_m Z_m & \left( Z_w = \frac{R_w}{s} + jX_w, \quad Z_m = jX_m \right) \\ I_s = I_w + I_m \\ U_s = E_m + I_s Z_s & (Z_s = R_s + jX_s) \end{cases} \quad (1)$$

czyli

$$I_m = I_w \frac{Z_w}{Z_m}$$

oraz

$$U_s = I_w Z_w + \left( I_w \frac{Z_w}{Z_m} + I_w \right) Z_s = I_w \left( Z_s + Z_w + Z_w \frac{Z_s}{Z_m} \right) = I_w \left[ Z_s + Z_w \left( 1 + \frac{Z_s}{Z_m} \right) \right]$$

Ostatecznie  $U_s = I_w (Z_s + C \cdot Z_w)$ , czyli

$$I_w = \frac{U_s}{Z_s + C \cdot Z_w} \quad (2)$$

gdzie

$$C = 1 + \frac{Z_s}{Z_m} \approx 1 + \frac{X_s}{X_m} \quad (3)$$

Wartość współczynnika rozproszenia C nie zależy od poślizgu, czyli od stanu pracy silnika i jest bardzo zbliżona do jedności ... praktycznie  $C \in \langle 1,01 \dots 1,05 \rangle$ .

Można to wykazać, przyjmując dla stanu jałowego  $I_0 = \frac{U_s}{Z_s + Z_m} \approx \frac{U_s}{Z_m}$  (ponieważ  $Z_s \ll Z_m$  a dla stanu

zwarcia  $I_r \approx \frac{U_s}{Z_s + Z_w} \approx \frac{U_s}{2Z_s}$ , czyli  $Z_m \approx \frac{U_s}{I_0}$ ,  $Z_s \approx \frac{U_s}{2I_r}$

Zatem  $C = 1 + \frac{Z_s}{Z_m} \approx 1 + \frac{I_0}{2I_r}$ .

Przyjmując „typowe” wartości  $I_0 = 0.3I_n$ ,  $I_r = 6I_n$  uzyskuje się  $C = 1 + \frac{0.3}{2 \cdot 6} = 1.025$ .

Wartość tego współczynnika może być parametrem pozwalającym „dostroić” wartości elementów wyznaczanego schematu zastępczego w celu jak najlepszego odwzorowania danych katalogowych.

### 3.2. Wyznaczenie wartości prądu magnesującego i prądu wirnika w warunkach pracy znamionowej

Wartości prądu magnesującego i prądu wirnika są podstawowymi parametrami decydującymi o charakterystykach eksploatacyjnych silnika w różnych stanach pracy i umożliwiającymi wyznaczenie wartości elementów schematu zastępczego. Znamionowy prąd stojana  $I_{sn}$  może być wyrażony jako geometryczna suma znamionowego prądu magnesującego  $I_{mn}$  i znamionowego prądu wirnika  $I_{wn}$ :

$$I_{sn} = \sqrt{(I_{mn} + I_{wn} \sin \varphi_{wn})^2 + (I_{wn} \cos \varphi_{wn})^2} \quad (4)$$

Stąd też składowa bierna znamionowego prądu stojana  $I_{sbn}$

$$I_{sbn} = I_{sn} \sin \varphi_n \approx I_{mn} + I_{wn} \sin \varphi_{wn} \quad (5)$$

a składowa czynna znamionowego prądu stojana  $I_{scn}$

$$I_{scn} = I_{sn} \cos \varphi_n \approx I_{wn} \cos \varphi_{wn} \quad (6)$$

Aby wyrazić  $\sin \varphi_{wn}$  i  $\cos \varphi_{wn}$  w funkcji krotności momentu maksymalnego  $K_{Mm} = \frac{M_{nmax}}{M_n}$  można wykorzystać zależność (2) opisującą prąd wirnika

$$I_w = \frac{U_s}{Z_s + C \cdot Z_w} = \frac{U_s}{R_s + jX_s + C \cdot \left( \frac{R_w}{s} + jX_w \right)} \quad (7)$$

czyli

$$\operatorname{tg} \varphi_w = \frac{X_s + C \cdot X_w}{R_s + C \cdot \frac{R_w}{s}} \quad (8)$$

Ponieważ dla  $s=s_n$  zachodzi  $R_s \ll C \frac{R_w}{s}$  to

$$\operatorname{tg} \varphi_{wn} = \frac{(X_s + C \cdot X_w) s_n}{C \cdot R_w}$$

Jednocześnie ponieważ poślizg krytyczny  $s_k$  zapewniający maksymalną wartość momentu będzie równy

$$s_k = \frac{R}{C \cdot R_w} \approx \frac{C \cdot R_w}{\sqrt{R_s^2 + (X_s + C \cdot X_w)^2}} \approx \frac{C \cdot R_w}{X_s + C \cdot X_w}$$

to można zapisać  $\operatorname{tg} \varphi_{wn} \approx \frac{s_n}{s_k}$

Ponieważ ze wzoru Klossa wynika że

$$\frac{s_k}{s_n} = K_{Mm} + \sqrt{K_{Mm}^2 - 1} \text{ to}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{wn} \approx \frac{1}{K_{Mm} + \sqrt{K_{Mm}^2 - 1}} \quad (9)$$

Ponieważ  $\operatorname{tg} \varphi_{wn} = \frac{\sin \varphi_{wn}}{\cos \varphi_{wn}}$  oraz  $\sin^2 \varphi_{wn} + \cos^2 \varphi_{wn}$

to po przekształceniach wzoru (9) uzyskuje się

$$\sin \varphi_{wn} = \frac{1}{\sqrt{2K_{Mm} (K_{Mm} + \sqrt{K_{Mm}^2 - 1})}} \quad (10a)$$

$$\cos \varphi_{wn} = \sqrt{\frac{K_{Mm} + \sqrt{K_{Mm}^2 - 1}}{2K_{Mm}}} \quad (10b)$$

Teraz można już wyznaczyć bezpośrednio wartość prądu wirnika w warunkach obciążenia znamionowego jako:

$$I_{wn} = I_{sn} \cos \varphi_n \sqrt{\frac{2K_{Mm}}{K_{Mm} + \sqrt{K_{Mm}^2 - 1}}} \quad (11)$$

a znamionową wartość prądu magnesującego z zależności:

$$I_{mn} = I_{sn} \sin \varphi_n - I_{wn} \sin \varphi_{wn} = I_{sn} \sin \varphi_n - \frac{I_{sn} \cos \varphi_n}{\cos \varphi_{wn}} \sin \varphi_{wn} \quad (12)$$

czyli

$$I_{mn} = I_{sn} \sin \varphi_n - I_{sn} \cos \varphi_n \frac{\sin \varphi_{wn}}{\cos \varphi_{wn}} = I_{sn} \sin \varphi_n - I_{sn} \cos \varphi_n \operatorname{tg} \varphi_{wn} \quad (13)$$

Ostatecznie

$$I_{mn} = I_{sn} \left( \sin \varphi_n - \frac{\cos \varphi_n}{K_{Mm} + \sqrt{K_{Mm}^2 - 1}} \right) \quad (14)$$

Wyznaczona w ten sposób wartość  $I_{mn}$  może być wykorzystana do dokładniejszego wyznaczenia wartości współczynnika  $C$  jako

$$C = 1 + \frac{I_{mn}}{2 \cdot K_{Ir} \cdot I_{sn}} \quad (15)$$

Wyznaczone z wzorów (11) (14) wartości  $I_{wn}$ ,  $I_{mn}$  zostaną wykorzystane w dalszych obliczeniach wartości elementów schematu zastępczego.

### 3.3. Wyznaczanie rezystancji wirnika dla warunków znamionowych

Z bilansu mocy wirnika dla warunków znamionowych (przy założeniu, że wartość prądu  $I_{wn}$  została już wcześniej obliczona z wzoru (11))

$$P_{mn} + 3I_{wn}^2 R_{wn} = 3I_{wn}^2 \frac{R_{wn}}{s_n} \quad (16)$$

czyli

$$P_{mn} = 3I_{wn}^2 R_{wn} \left( \frac{1}{s_n} - 1 \right) \quad (17)$$

$$P_{mn} = 3I_{wn}^2 R_{wn} \frac{1 - s_n}{s_n} \quad (18)$$

Ostatecznie rezystancję obwodu wirnika dla warunków znamionowych można wyznaczyć jako:

$$R_{wn} = \frac{P_{mn} s_n}{3I_{wn}^2 (1 - s_n)} \quad (19)$$

### 3.4. Wyznaczanie rezystancji uzwojenia stojana

Zapisując bilans mocy dla strat w uzwojeniach dla warunków znamionowych

$$3I_{sn}^2 R_s + 3I_{wn}^2 R_{wn} = 3U_{fn} I_{sn} \cos \varphi_n (1 - \eta_n) \quad (20)$$

uzyskuje się

$$R_s = \frac{U_{fn} I_{sn} \cos \varphi_n (1 - \eta_n) - I_{wn}^2 R_{wn}}{I_{sn}^2} \quad (21)$$

### 3.5. Wyznaczanie rezystancji wirnika dla warunków rozruchu

Ponieważ w stanie rozruchu  $s=1$  to bilans mocy przybiera postać

$$3I_{wr}^2 R_{wr} = M_{rn} \omega_0 \quad (22)$$

czyli

$$R_{wr} = \frac{M_{rn} \omega_0}{3I_{wr}^2} = \frac{K_{Mr} M_n \frac{\omega_n}{(1 - s_n)}}{3I_{wr}^2} = \frac{K_{Mr} P_{mn}}{3I_{wr}^2 (1 - s_n)} \quad (23)$$

a ostatecznie

$$R_{wr} \approx \frac{K_{Mr} P_{mn}}{3 \cdot K_{Ir}^2 s_n (1 - s_n)} \quad (24)$$

### 3.6. Wyznaczanie reaktancji wirnika dla warunków znamionowych

Do oceny reaktancji wirnika w zakresie obciążeń bliskich znamionowemu można wykorzystać wartość momentu krytycznego  $M_k = K_{Mm} \cdot M_n$ . Zgodnie z [5] jest ona równa:

$$M_k = \frac{3}{\omega_0 2C} \frac{U_{fn}^2}{\left[ R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_s + CX_{wn})^2} \right]} = \frac{1}{\omega_0 2C} \frac{U_n^2}{\left[ R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_s + CX_{wn})^2} \right]} \quad (25)$$

Pomijając  $R_s^2$  w porównaniu z  $(X_s + CX_{wn})^2$  uzyskuje się

$$K_{Mm} \cdot M_n = \frac{1}{\omega_0 2C} \frac{U_n^2}{(R_s + X_s + CX_{wn})} \quad (26)$$

A ponieważ  $M_n = \frac{P_n}{\omega_m} = \frac{P_n}{\omega_0 (1 - s_n)}$

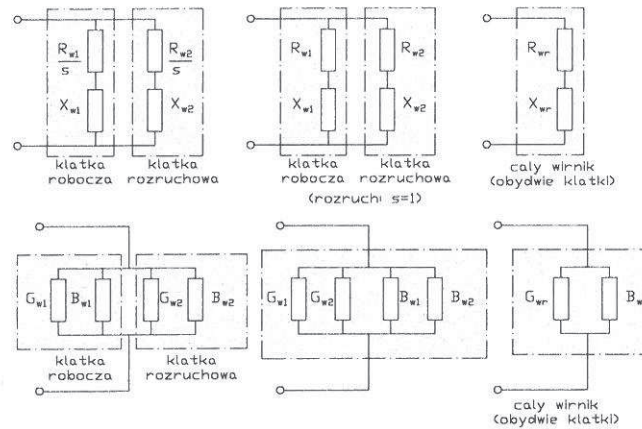
to po uproszczeniach

$$X_{wn} = \frac{1}{C} \left[ \frac{U_n^2 (1 - s_n)}{2C \cdot P_n \cdot K_{Mm}} - R_s - X_s \right] \quad (27)$$

### 3.7. Wyznaczanie reaktancji wirnika dla warunków rozruchowych

Dla warunków rozruchowych ( $s=1$ ) można pominąć w analizie gałąź magnesującą i po obliczeniu impedancji wejściowej silnika

$$Z_r = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot K_{Ir} \cdot I_n} \quad (28)$$



Rys. 2. Kolejne przekształcenia struktury schematu zastępczego wirnika silnika dwuklatkowego w celu wyznaczenia jego parametrów

wyznaczyć bezpośrednio reaktancję rozproszenia wirnika jako

$$X_{wr} = \sqrt{Z_r^2 - (R_s + R_{wr})^2} - X_s \quad (29)$$

### 3.8. Wyznaczenie bezpośrednich parametrów klatki roboczej i klatki rozruchowej

Ponieważ dla pracy w obszarach bliskich obciążeniu znamionowemu wpływ klatki rozruchowej można praktycznie pominać, to parametry klatki roboczej można przyjąć praktycznie równe parametrom wyznaczonym w p. 3.3 ... 3.7, czyli

$$R_{w1} = R_{wr} \quad (30a)$$

$$X_{w1} = X_{wr} \quad (30b)$$

Natomiast w stanie rozruchu niezbędne jest uwzględnienie obydwu klatek, więc parametry klatki rozruchowej należy wyznaczyć jako różnice pomiędzy parametrami całego wirnika  $R_{wr}$ ,  $X_{wr}$  a parametrami klatki roboczej  $R_{w1}$ ,  $X_{w1}$  dla  $s=1$ . Ze względu na równoległe połączenie obydwu klatek, również ich parametry wygodniej jest do obliczeń przedstawić w postaci połączenia równoległego, czyli zamiast w postaci parametrów  $R, X$  – w postaci parametrów  $G, B$ :

Kolejne etapy przekształceń przedstawiono graficznie na rys. 2, a odpowiadające im zależności w tabeli 3.

## 4. WERYFIKACJA OBLICZEŃ

Aby zweryfikować wyniki przeprowadzonych obliczeń należy wyznaczyć dla trzech wartości poślizgu odpowiadających obciążeniu znamionowemu, poślizgowi krytycznemu i stanowi rozruchu silnika ( $s=s_n$ ,  $s=s_k$ ,  $s=1$ ) impedancje i admitancje obydwu klatek wirnika. Zastosowane wzory zestawiono w tabeli 4.

Tabela 3

### Zależności opisujące parametry poszczególnych klatek wirnika dwuklatkowego

Klatka robocza	Impedancja	$Z_{w1} = R_{wr} + jX_{wr}$
	Rezystancja	$R_{w1} = R_{wr}$
	Reaktancja	$X_{w1} = X_{wr}$
	Admitancja	$Y_{w1} = \frac{1}{Z_{w1}}$
	Konduktancja	$G_{w1} = \frac{R_{wr}}{R_{wr}^2 + X_{wr}^2}$
	Susceptancja	$B_{w1} = \frac{X_{wr}}{R_{wr}^2 + X_{wr}^2}$
Cały wirnik	Impedancja	$Z_{wr} = R_{wr} + jX_{wr}$
	Admitancja	$Y_{wr} = \frac{1}{Z_{wr}}$
	Konduktancja	$G_{wr} = \frac{R_{wr}}{R_{wr}^2 + X_{wr}^2}$
	Susceptancja	$B_{wr} = \frac{X_{wr}}{R_{wr}^2 + X_{wr}^2}$
Klatka rozruchowa	Konduktancja	$G_{w2} = G_{wr} - G_{w1}$
	Susceptancja	$B_{w2} = B_{wr} - B_{w1}$
	Admitancja	$Y_{w2} = G_{w2} - jB_{w2}$
	Impedancja	$Z_{w2} = \frac{1}{Y_{w2}} = \frac{1}{G_{w2} - jB_{w2}}$
	Rezystancja	$R_{w2} = \frac{G_{w2}}{G_{w2}^2 + B_{w2}^2}$
	Reaktancja	$X_{w2} = \frac{B_{w2}}{G_{w2}^2 + B_{w2}^2}$

Tabela 4

Wartości impedancji i admitancji wirnika dwuklatkowego w różnych stanach pracy

Klatka robocza (1)	impedancja	$Z_{w1}(s) = \frac{R_{w1}}{s} + j \cdot X_{w1}$
	admitancja	$Y_{w1}(s) = \frac{1}{Z_{w1}} = \frac{1}{\frac{R_{w1}}{s} + jX_{w1}} = \frac{R_{w1} - jX_{w1}}{\left(\frac{R_{w1}}{s}\right)^2 + X_{w1}^2}$
	konduktancja	$G_{w1}(s) = \frac{\frac{R_{w1}}{s}}{\left(\frac{R_{w1}}{s}\right)^2 + X_{w1}^2}$
	susceptancja	$B_{w1}(s) = \frac{-X_{w1}}{\left(\frac{R_{w1}}{s}\right)^2 + X_{w1}^2}$
Klatka rozruchowa (2)	impedancja	$Z_{w2}(s) = \frac{R_{w2}}{s} + j \cdot X_{w2}$
	admitancja	$Y_{w2}(s) = \frac{1}{Z_{w2}} = \frac{1}{\frac{R_{w2}}{s} + jX_{w2}} = \frac{R_{w2} - jX_{w2}}{\left(\frac{R_{w2}}{s}\right)^2 + X_{w2}^2}$
	konduktancja	$G_{w2}(s) = \frac{\frac{R_{w2}}{s}}{\left(\frac{R_{w2}}{s}\right)^2 + X_{w2}^2}$
	susceptancja	$B_{w2}(s) = \frac{-X_{w2}}{\left(\frac{R_{w2}}{s}\right)^2 + X_{w2}^2}$
Cały wirnik (1+2)	konduktancja	$G_w(s) = G_{w1}(s) + G_{w2}(s)$
	susceptancja	$B_w(s) = B_{w1}(s) + B_{w2}(s)$
	admitancja	$Y_w(s) = G_w(s) - jB_w(s)$
	impedancja	$Z_w(s) = \frac{1}{Y_w(s)} = \frac{1}{G_w(s) - j \cdot B_w(s)}$
	rezystancja	$R_w(s) = \frac{G_w(s)}{G_w^2(s) + B_w^2(s)}$
	reaktancja	$X_w(s) = \frac{B_w(s)}{G_w^2(s) + B_w^2(s)}$

5. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Przedstawioną metodykę zastosowano do wyznaczenia parametrów schematu zastępczego silnika SG3W 760Y4 (prod. DAMEL) o danych znamionowych przedstawionych w tabeli 5.

Tabela 5

Dane znamionowe silnika SG3W 760Y4 [6]

Moc znamionowa	$P_n$	[kW]	500
Napięcie znamionowe	$U_n$	[V]	3300
Prąd znamionowy	$I_n$	[A]	105
Współczynnik mocy	$\cos\phi_n$	-	0.87

Sprawność	$\eta$	[%]	95.8
Prędkość obrotowa	$n$	[obr/min]	1482
Moment znamionowy	$M_n$	[Nm]	3222
Krotność prądu rozruchowego	$I_k/I_n$	-	7.3
Krotność momentu rozruchowego	$M_k/M_n$	-	2.2
Krotność momentu krytycznego	$M_{max}/M_n$	-	2.8

W oparciu o przedstawione powyżej zależności wyznaczono następujące parametry schematu zastępczego przedstawione w tabeli 6.

Tabela 6

Wyznaczone parametry schematu zastępczego silnika SG3W 760Y4

Stojan	$R_s$	0.0277	[Ω]
	$X_s$	1.38	[Ω]
Gałąź magnesowania	$X_m$	48.3	[Ω]
Klatka robocza	$R_{w1}$	0.0026	[Ω]
	$X_{w1}$	1.247	[Ω]
Klatka rozruchowa	$R_{w2}$	1.770	[Ω]
	$X_{w2}$	0.1607	[Ω]

6. ZAKOŃCZENIE

W artykule przedstawiono podstawowe zależności umożliwiające wyznaczenie parametrów schematu zastępczego silnika indukcyjnego z wirnikiem dwuklatkowym. Proponowany sposób zapewnia dość dobre odwzorowanie charakterystyki elektromechanicznej w wybranych punktach zgodnych z danymi katalogowymi. Wartości elementów schematu mogą być następnie korygowane, np. z uwzględnieniem metod analizy wrażliwościowej [2]. Wyznaczone parametry mogą być następnie wykorzystywane w obliczeniach elektromechanicznych pozwalających ocenić warunki zasilania i obciążenia napędów wysokowydajnych maszyn górnictwa.

Literatura

1. Alonge F., Dippolito F., Ferrante G.: Parameter Identification of induction motor model using genetic algorithms. IEEE Proceedings on Control Theory Applications, Nr 6/1998.
2. Anuj S., Shokoooh F., Schinzinger R.: Parameter Estimation for Induction Machines Based on Sensitivity Analysis. IEEE Transactions on Energy Conversion, Nr 6/1989.
3. Haque M.H.: Determination of NEMA Design Induction Motor Parameters From Manufacturer Data. IEEE Transactions on Energy Conversion, Nr 4/2008.
4. Pillay P., Nollan R., Haque T.: Application of genetic algorithms to motor parameter determination for transient torque calculations. IEEE Transactions on Industry Applications, Nr 5/1997.
5. Plamitzer A.M. Maszyny elektryczne. WN-T, Warszawa 1982.
6. Karta katalogowa K4-15-124. Silniki indukcyjne górnictwa SG3W 760Y4. DFME DAMEL. S.A. Dąbrowa Górnicza 2004.

Recenzent: dr inż. Jarosław Joostberens