

Laboratorium napędu elektrycznego

Modelowanie trójfazowej maszyny indukcyjnej i badanie właściwości trójfazowego falownika napięcia w programie PLECS

1. Wybieramy silnik indukcyjny.

Dane techniczne:

1000 min⁻¹ (6 biegunowe)

Moc znamionowa	Predkość obrotowa (obroty na minutę) przy pełnym obciążeniu	Typ	Prąd przy napięciu znamionowym przy pełnym obciążeniu	Sprawność	Współczynnik mocy	Moment znamionowy	Krotność momentu rozruchowego	Krotność prądu rozruchowego	Krotność momentu maksymalnego	Krotność momentu szczytowego	Moment bezwładności WK ²	Poziom hałasu w zasięgu 1m (bez obciążenia)	Masa netto
P _N Kw (HP)	n min ⁻¹	Typ	I _N 400V A	η 1.0P _N 0.75P _N 0.5P _N	cos φ 1.0P _N 0.75P _N 0.5P _N	M _N Nm	$\frac{M_A}{M_N}$	$\frac{I_A}{I_N}$	$\frac{M_K}{M_N}$	$\frac{M_S}{M_N}$	J kgm ²	L _{PA} dB(A)	kg
7.5 (10)	975	3Sg160M-6-IE2	16.6	$\begin{Bmatrix} 87.2 \\ 88.1 \\ 86.2 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0.75 \\ 0.67 \\ 0.56 \end{Bmatrix}$	73.5	1.8	6.5	2.8	1.7	0.10	59	87.0

2. Lista parametrów modelu trójfazowego silnika indukcyjnego klatkowego w programie PLECS.

The screenshot shows the PLECS software interface. On the left, the 'Library Browser' window displays a tree structure of components, with 'Induction Machine (Squirrel Cage)' selected under the 'Machines' category. The main workspace shows a 'Squirrel-Cage IM' block. A 'Block Parameters: Machine AC/Squirrel-Cage IM' dialog box is open, displaying the following parameters:

- Stator resistance Rs: 0.4
- Stator leakage inductance Lls: 2e-3
- Rotor resistance Rr': 0.8
- Rotor leakage inductance Llr': 2e-3
- Magnetizing inductance Lm: 70e-3
- Inertia J: 0.1
- Friction coefficient F: 1
- Number of pole pairs p: 2
- Initial rotor speed wm0: 0
- Initial rotor position thm0: 0
- Initial stator currents [isa0 isb0]: [0 0]
- Initial stator flux [psid0 psisq0]: [0 0]

The dialog box also includes 'Parameters' and 'Assertions' tabs, and buttons for 'OK', 'Cancel', 'Apply', and 'Help'.

Znanymi wprost z katalogu parametrami są:

Wyznaczanie parametrów modelu maszyny indukcyjnej pozwala jedynie oszacować ich wartość. Przybliżanie wartości parametrów może następować na podstawie pomiarów rezystancji uzwojeń stojana, próby biegu jałowego i zwarcia lub może być zrealizowane na podstawie wartości katalogowych/wartości z tabliczki znamionowej. W niniejszej instrukcji posłużono się szacowaniem wartości modelu trójfazowej maszyny indukcyjnej klatkowej na podstawie danych katalogowych.

3. Szacowanie wartości indukcyjności rozproszenia uzwojenia stojana L_{ls} (stator leakage inductance) i wirnika L_{lr}' (rotor leakage inductance):

Indukcyjność rozproszenia uzwojeń stojana przyjmuje się równą indukcyjności rozproszenia uzwojeń wirnika, a ich wartość można przybliżyć zależnością:

$$L_{ls} = L_{lr}' = \frac{X_{\sigma}}{2\pi f_N} = \frac{U_N}{2\sqrt{3}\pi f_N I_N} \left(\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_N} - \frac{I_{sdN} \cos \varphi_N}{I_{sqN}} \right)$$

w której U_N jest znamionowym napięciem przewodowym, I_N znamionowym prądem stojana, a $\cos \varphi_N$ jest współczynnikiem mocy w punkcie pracy znamionowej maszyny. Ponadto, składowe prądu stojana I_{sdN} i I_{sqN} są definiowane jako:

$$I_{sdN} = \sqrt{2} I_N \sqrt{1 - \cos \varphi_N} = \sqrt{2} \cdot 16,6 \cdot \sqrt{1 - 0,75} \text{ A} = 11,737973 \text{ A}$$

$$I_{sqN} = \sqrt{2 I_N^2 - I_{sdN}^2} = \sqrt{2 \cdot 16,6^2 - 11,737973^2} \text{ A} = 20,330765 \text{ A}$$

A po podstawieniu otrzymujemy:

$$\begin{aligned} L_{ls} = L_{lr}' &= \frac{U_N}{2\sqrt{3}\pi f_N I_N} \left(\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_N} - \frac{I_{sdN} \cos \varphi_N}{I_{sqN}} \right) = \\ &= \frac{400}{2\sqrt{3}\pi \cdot 50 \cdot 16,6} \left(\sqrt{1 - 0,75^2} - \frac{11,737973 \cdot 0,75}{20,330765} \right) \text{ H} = 0,010115 \text{ H} \end{aligned}$$

4. Szacowanie wartości indukcyjności magnesującej L_m (*magnetizing inductance*):

Wartość indukcyjności magnesującej L_m możemy obliczyć na podstawie reaktancji magnesującej X_m :

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f_N}$$

gdzie f_N jest wartością znamionową częstotliwości napięcia zasilania maszyny, a wartość reaktancji magnesującej przybliża następująca zależność:

$$X_m = \frac{\sqrt{2}U_N}{\sqrt{3}I_{sdN}} - X_\sigma = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sqrt{2}}{I_{sdN}} - \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_N}}{I_N} + \frac{I_{sdN} \cos \varphi_N}{I_{sqN} I_N} \right)$$

Ostatecznie po podstawieniu otrzymujemy:

$$\begin{aligned} X_m &= \frac{U_N}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sqrt{2}}{I_{sdN}} - \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_N}}{I_N} + \frac{I_{sdN} \cos \varphi_N}{I_{sqN} I_N} \right) = \\ &= \frac{400}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sqrt{2}}{11,737973} - \frac{\sqrt{1 - 0,75^2}}{16,6} + \frac{11,737973 \cdot 0,75}{20,330765 \cdot 16,6} \right) \Omega = 24,646247 \Omega \end{aligned}$$

oraz:

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f_N} = \frac{24,646247}{2\pi \cdot 50} = 0,078451 \text{ H}$$

5. Szacowanie wartości rezystancji stojana R_s (*stator resistance*).

Wartość rezystancji uzwojeń stojana R_s można oszacować na podstawie wzoru:

$$R_s = \frac{\omega_{slipN} I_{sdN} X_m}{2\pi f_N I_{sqN}}$$

a znamionowa wartość pulsacji poślizgu ω_{slipN} wynosi:

$$\omega_{slipN} = 2\pi \left(f_N - \frac{n_N p}{60} \right) = 2\pi \left(50 - \frac{975 \cdot 3}{60} \right) \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 7,853982 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Podstawiając wartości do wzoru na rezystancję uzwojeń stojana otrzymujemy:

$$R_s = \frac{\omega_{slipN} I_{sdN} X_m}{2\pi f_N I_{sqN}} = \frac{7,853982 \cdot 11,737973 \cdot 24,646247}{2\pi \cdot 50 \cdot 20,330765} \Omega = 0,3557 \Omega$$

6. Szacowanie wartości rezystancji wirnika R_r' (*rotor resistance*).

Wartość rezystancji uzwojeń wirnika R_r' można oszacować na podstawie wzoru:

$$R_r' = s_N \frac{U_N}{\sqrt{3} I_N}$$

gdzie s_N jest poślizgiem znamionowym zdefiniowanym jako:

$$s_N = \frac{n_s - n_N}{n_s} = \frac{1000 - 975}{1000} = 0,025$$

A wartość rezystancji uzwojenia wirnika po podstawieniu wynosi:

$$R_r' = s_N \frac{U_N}{\sqrt{3} I_N} = 0,025 \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 16,6} \Omega = 0,3478 \Omega$$

7. Szacowanie wartości współczynnika tarcia wiskotycznego F (friction coefficient).

Wartość współczynnika tarcia wiskotycznego można obliczyć na podstawie bilansu mocy maszyny:

$$F = \frac{\sqrt{3}U_N I_N \cos\varphi_N - T_N \omega_N - c_l I_N^2 R_s}{\omega_N^2}$$

gdzie sumę mocy strat w uzwojeniu stojana i wirnika oraz strat w żelazie uproszczono do c_l -krotności strat w uzwojeniu stojana. Wartość znamionowej prędkości kątowej wynosi:

$$\omega_N = n_N \frac{2\pi}{60} = 975 \frac{2\pi \text{ rad}}{60 \text{ s}} = 102,101761 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

i ostatecznie otrzymujemy:

$$F = \frac{\sqrt{3}U_N I_N \cos\varphi_N - T_N \omega_N - c_l I_N^2 R_s}{\omega_N^2} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 16,6 \cdot 0,75 - 73,5 \cdot 102,101761 - 2 \cdot 16,6^2 \cdot 0,3557}{102,101761^2} \text{ Nms} = 0,088739 \text{ Nms}$$

8. Amplitudę i częstotliwość napięcia źródła trójfazowego napięcia V_{3ph} ustawiamy na wartości, które pozwolą na zasilanie maszyny napięciem znamionowym maszyny U_N o częstotliwości f_N . Wartość źródła sygnału *Step* sterującego momentem obciążenia ustawiamy na wartość znamionową momentu na wale maszyny T_N .

Sparametryzowany model trójfazowej maszyny indukcyjnej klatkowej.

Block Parameters: Machine AC/Squirrel-Cage IM

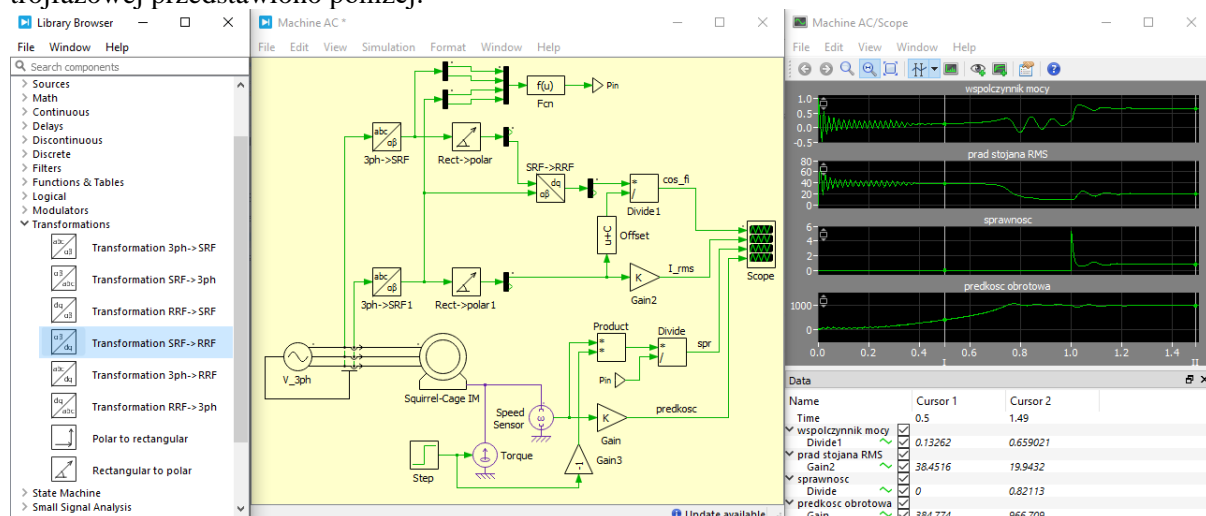
Induction Machine (Squirrel Cage) (mask) (link)

Three-phase induction machine with short-circuited rotor windings. All parameters and electrical quantities are referred to the stator side.

Parameters	Assertions
Stator resistance R_s : 0.3557	Friction coefficient F : 0.088739
Stator leakage inductance L_{ls} : 0.01	Number of pole pairs p : 3
Rotor resistance R_r' : 0.3478	Initial rotor speed ω_{m0} : 0
Rotor leakage inductance L_{lr}' : 0.01	Initial rotor position θ_{m0} : 0
Magnetizing inductance L_m : 0.07845	Initial stator currents [i_{sa0} i_{sb0}]: [0 0]
Inertia J : 0.1	Initial stator flux [ψ_{sd0} ψ_{sq0}]: [0 0]

OK Cancel Apply Help

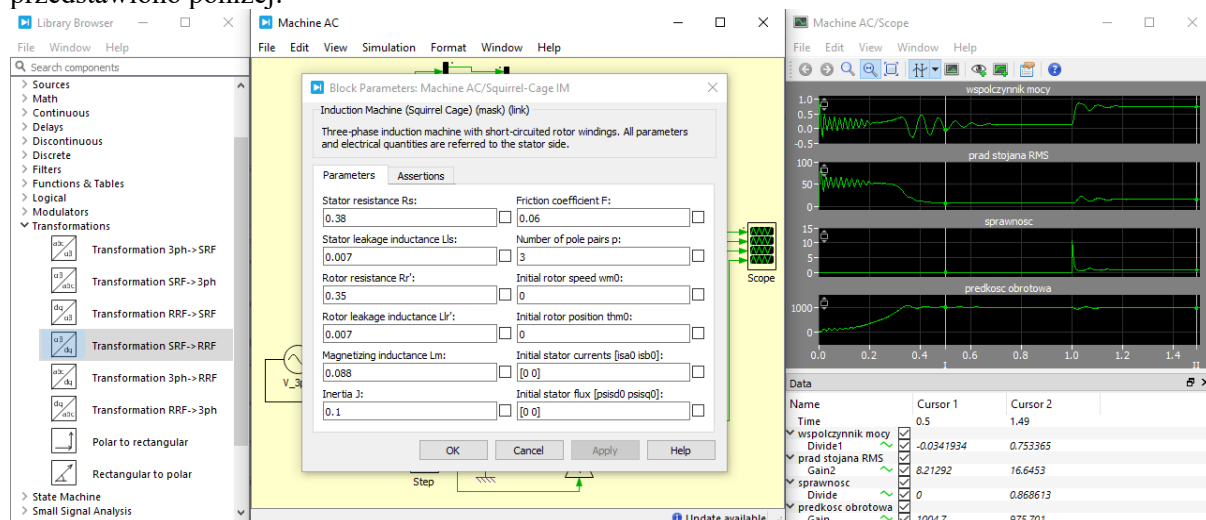
Wyniki symulacyjne w warunkach znamionowych modelu zamodelowanej maszyny indukcyjnej trójfazowej przedstawiono poniżej.



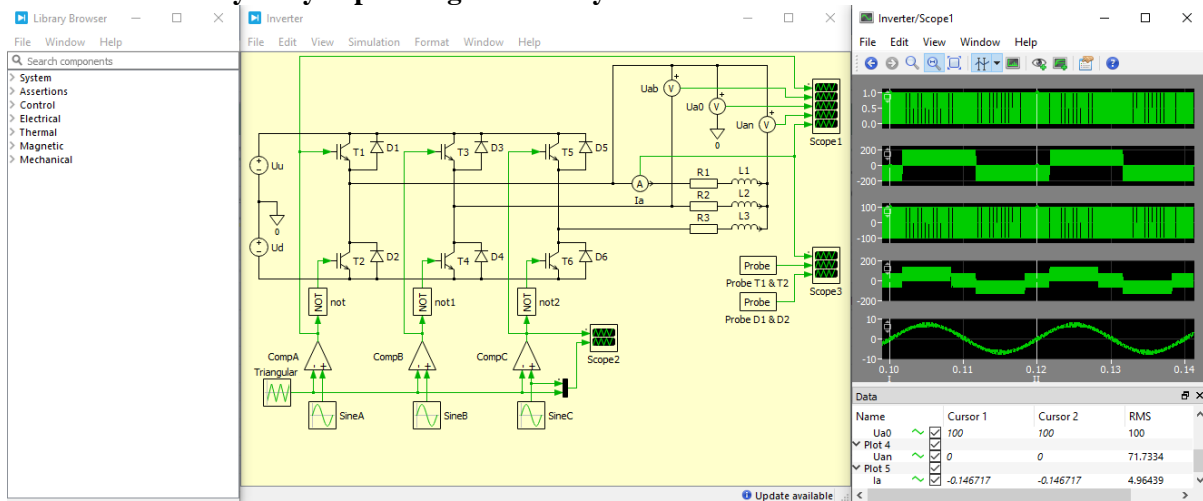
Szacowane parametry modelu obwodowego maszyny indukcyjnej, na podstawie danych katalogowych, pozwoliły na otrzymanie wartości prądu stojana, sprawności, współczynnika mocy i prędkości obrotowej w punkcie pracy znamionowej różniących się od danych katalogowych o blisko 10%. Dalsze ulepszenie/korekta modelu maszyny indukcyjnej może odbywać się jedynie z zastosowaniem metody prób i błędów. Celem jest dobranie parametrów modelu obwodowego maszyny, tak aby różnica uzyskanych wartości nie różniła się więcej niż 1% od wartości znamionowych.

9. Wyniki symulacyjne skorygowanego modelu maszyny indukcyjnej trójfazowej.

W następstwie korekty parametrów modelu maszyny indukcyjnej udało się uzyskać wierniejsze odzwierciedlenie wartości prądu, współczynnika mocy i sprawności w warunkach znamionowych, co przedstawiono poniżej:



10. Zbudować trójfazowy przekształtnik napięcia i do wyjścia przekształtnika dołączyć symetryczny trójfazowy odbiornik rezystancyjno-indukcyjny 3xRL. Przeanalizować rozkład Fouriera otrzymanych przebiegów czasowych.



11. Uruchomić symulację z symetrycznym obciążeniem rezystancyjno-indukcyjnym i odpowiedzieć na poniższe pytania:

- Jaki kształt i jakie dyskretne wartości przyjmuje napięcie U_{a0} w odniesieniu do napięcia zasilania przekształtnika? Z czego wynikają te wartości?
- Jaki kształt i jakie dyskretne wartości przyjmuje napięcie U_{ab} w odniesieniu do napięcia zasilania przekształtnika? Z czego wynikają te wartości?
- Jaki kształt i jakie dyskretne wartości przyjmuje napięcie U_{an} w odniesieniu do napięcia zasilania przekształtnika? Z czego wynikają te wartości?
- Jaki kształt ma prąd wyjściowy mostka I_{out} ?
- Co ma wpływ na wartość tętnień prądu odbiornika?

11. Jaka powinna być minimalna wartość napięcia w obwodzie napięcia stałego (napięcia zasilającego przekształtnik $U_{dc} = U_u + U_d$), aby uzyskać wartość podstawowej harmonicznej przewodowego napięcia wyjściowego, przy zastosowaniu modulacji sinusoidalnej, równą napięciu znamionowemu maszyny indukcyjnej ($U_N = 400V$)?

$$U_{dc}^{min} = \dots\dots\dots$$

12. Usunąć trójfazowe obciążenie RL i zastąpić je uprzednio zamodelowanym silnikiem indukcyjnym wraz z obciążeniem mechanicznym i pomiarem prędkości.

