

OLESIAK Krzysztof

ANALIZA ROZRUCHU UKŁADU NAPĘDOWEGO W WARUNKACH ODWZBUDZANIA SILNIKA

Streszczenie

W artykule przedstawiono model układu regulacji napędu przekształtnikowego. Scharakteryzowano podstawowe założenia dotyczące pracy napędu w warunkach odwzbudzenia silnika. Przeprowadzono badania symulacyjne napędu prądu stałego z konwencjonalnym układem regulacji podczas rozruchu. Rezultaty badań zaprezentowano w postaci charakterystyk czasowych prądu twornika, prędkości kątowej oraz całkowitego wskaźnika jakości.

WSTĘP

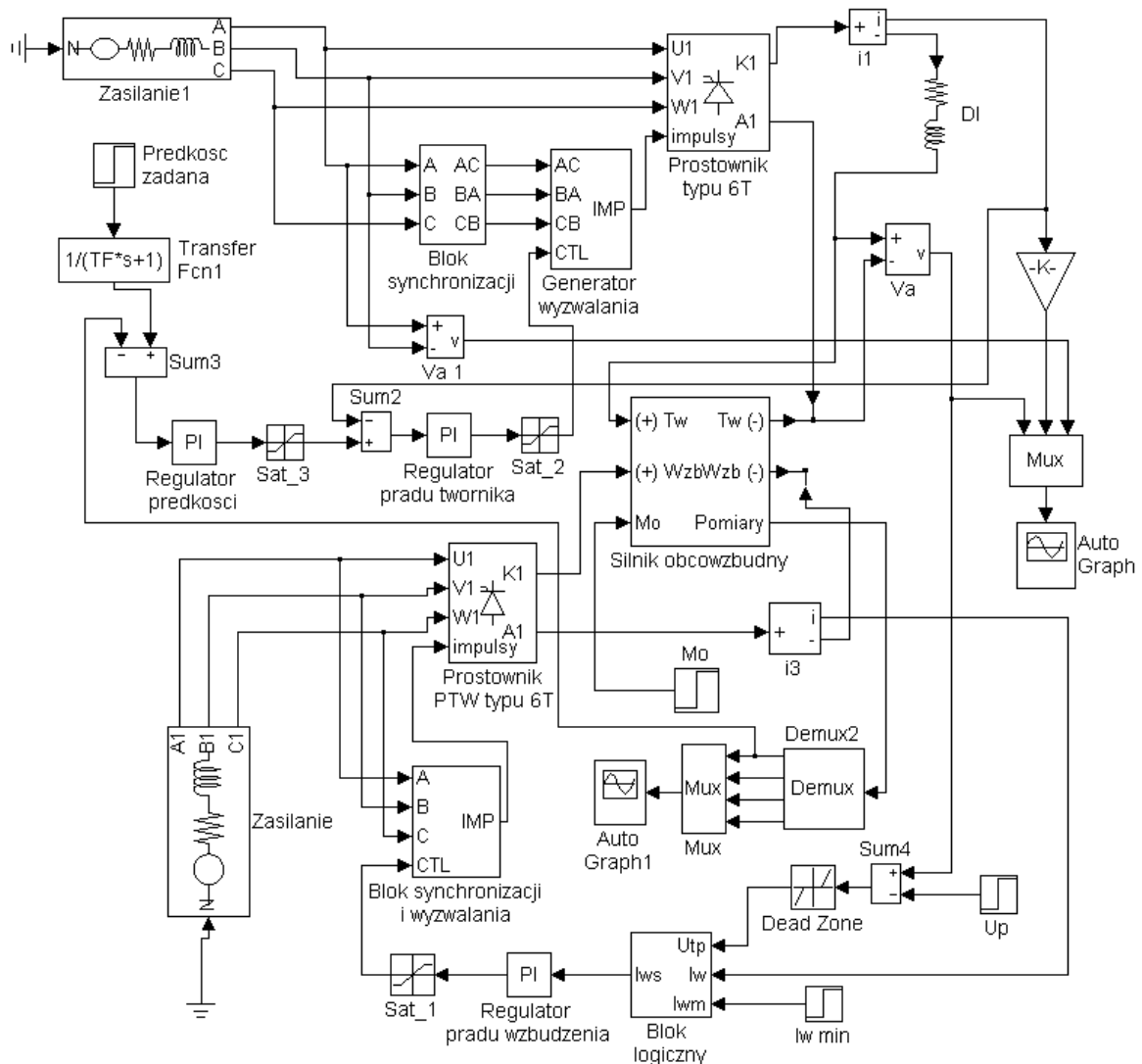
Wiele urządzeń technologicznych napędzanych przez silniki prądu stałego zasilane przy wykorzystaniu układów prostowników sterowanych wymaga uzyskiwania prędkości kątowych większych od wartości znamionowej. Zwiększanie prędkości w takich przypadkach realizuje się poprzez osłabianie strumienia magnetycznego silnika obcowzbudnego, czyli w konsekwencji przez zmniejszanie prądu wzbudzenia poniżej wartości znamionowej [2, 6]. Konieczność zapewnienia regulacji prądu wzbudzenia wymusza zastosowanie do zasilania obwodu wzbudzenia sterowanego układu przekształtnikowego. Rolę przekształtnika sterowanego najczęściej pełni prostownik tyrystorowy 6-pulsowy, który charakteryzuje się stosunkowo niewielką wartością składowej zmiennej napięcia wyjściowego w porównaniu z prostownikami 2-pulsowymi i 3-pulsowymi [1, 7].

1. MODEL UKŁADU REGULACJI NAPĘDU

Układ regulacji napędu jest zbudowany z regulatorów: prędkości kątowej Ω oraz prądu twornika I_t tworzących kaskadowy układ regulacji. Regulator prądu wypracowuje sygnał sterujący zaworami prostownika w oparciu o różnicę pomiędzy wartością zadaną prądu twornika I_{tz} a wartością rzeczywistą I_t . Wartość rzeczywista prądu jest jedną z wielkości wyjściowych modelu silnika prądu stałego. Natomiast wartość zadana prądu twornika I_{tz} jest wyznaczana przez regulator prędkości na podstawie różnicy pomiędzy prędkością kątową zadaną Ω_z a rzeczywistą Ω .

Opracowany model układu regulacji napędu obejmuje również regulator prądu wzbudzenia. Jego zastosowanie wynika z faktu, iż napęd pracuje również przy prędkościach kątowych większych od wartości nominalnej. Zwiększanie prędkości kątowej jest realizowane poprzez osłabienie strumienia magnetycznego silnika. Uzyskuje się je wskutek zmniejszenia prądu wzbudzenia poniżej wartości znamionowej. Regulacja prądu I_w jest możliwa dzięki zastosowaniu w obwodzie wzbudzenia prostownika sterowanego. Sygnał sterujący zaworami prostownika wypracowuje regulator prądu wzbudzenia. Model

symulacyjny napędu prądu stałego wraz z układem zasilania oraz układami regulacji przedstawiono na rys. 1.



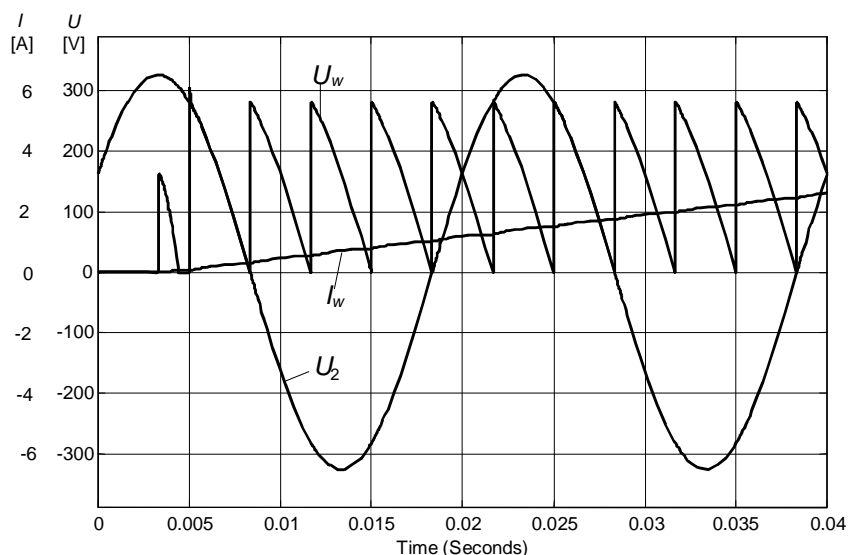
Rys. 1. Model symulacyjny napędu przekształtnikowego z konwencjonalnym układem regulacji
Źródło: opracowanie własne na podstawie [4, 5]

Dysponując opracowanym modelem prostownika sterowanego można przeprowadzić badania symulacyjne dla różnych kątów opóźnienia wysterowania α . Rezultaty przeprowadzonych badań w postaci przebiegów czasowych: napięcia zasilającego prostownik U_2 , napięcia obwodu wzbudzenia U_w oraz prądu wzbudzenia I_w zaprezentowano na rys. 2 i 3.

Prostownik tyrystorowy 6-pulsowy, który zasila obwód wzbudzenia silnika prądu stałego, jest sterowany przy pomocy układu regulacji prądu wzbudzenia. Działanie układu rozpoczyna się w chwili gdy napięcie twornika U_t osiągnie, wskutek wzrostu sygnału wartości zadanej prędkości kątovej Ω_z , wartość większą od napięcia progowego U_p . Wartość napięcia progowego ustala się zazwyczaj na poziomie zbliżonym do napięcia znamionowego silnika czyli [3]:

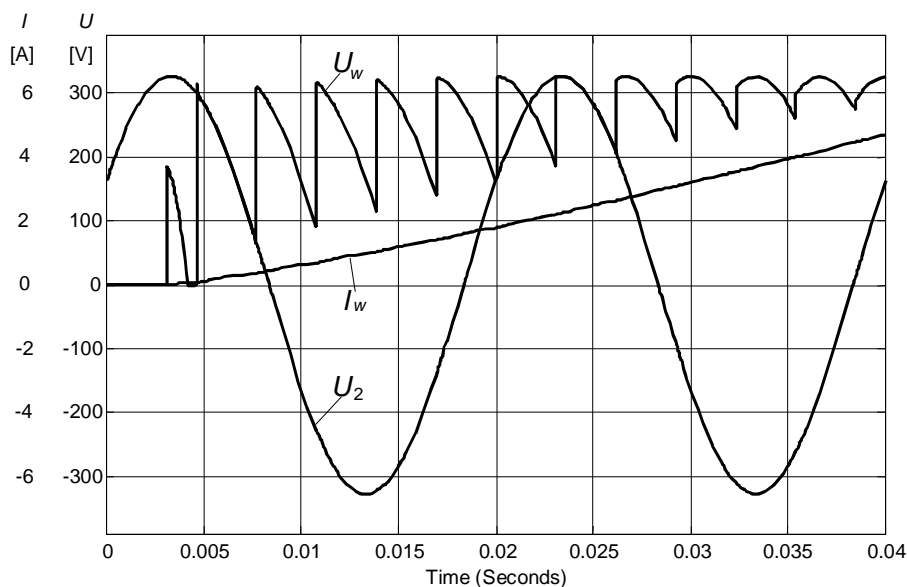
$$U_p = (0,98 \div 0,99)U_{iN} \quad (1)$$

Sygnal różnicy napięć $\Delta U = U_t - U_p$ jest wprowadzany do regulatora prądu wzbudzenia. Powoduje to zmniejszanie prądu wzbudzenia I_w do momentu, w którym prędkość kątowna Ω osiągnie wartość zadaną Ω_z . Oczywiście zmniejszanie prądu wzbudzenia jest ograniczone do wartości minimalnej I_{wmin} , która wynika z maksymalnej dopuszczalnej prędkości kątowej Ω_{max} , jaką może osiągnąć silnik obcowzbudny. Należy zwrócić uwagę na to, iż współczynnik wzmocnienia regulatora prądu wzbudzenia powinien mieć stosunkowo dużą wartość, co wynika z konieczności zapewnienia odpowiedniego forsowania przebiegów dynamicznych.



Rys. 2. Przebiegi czasowe napięcia zasilającego prostownik U_2 , napięcia obwodu wzbudzenia U_w oraz prądu wzbudzenia I_w dla kąta wysterowania $\alpha = \Pi/3$

Źródło: opracowanie własne



Rys. 3. Przebiegi czasowe napięcia zasilającego prostownik U_2 , napięcia obwodu wzbudzenia U_w oraz prądu wzbudzenia I_w dla kąta wysterowania α zmieniającego się liniowo od $\Pi/3$ do 0 w czasie $t = 0,04$ s (oprac. wł.)

Źródło: opracowanie własne

Współczynnik wzmocnienia zazwyczaj dobiera się w taki sposób, aby przy osiągnięciu przez prąd wzbudzenia wartości minimalnej napięcie twornika wynosiło [3]:

$$U_t = (1,01 \div 1,02)U_{tN} \quad (2)$$

Konieczne staje się także określenie wymaganego zapasu napięcia przekształtnika zasilającego obwód wzbudzenia. W tym celu wprowadza się pojęcie współczynnika forsowania, który jest ilorazem wymaganej wartości średniej napięcia wyprostowanego i znamionowego napięcia wzbudzenia silnika prądu stałego. Przy wyznaczaniu współczynnika forsowania przyjmuje się następujące założenia upraszczające [7, 3]:

- w drugiej strefie regulacji strumień wzbudzenia Φ ulega osłabieniu z taką szybkością, że prąd twornika I_t oraz siła elektromotoryczna E indukowana w uzwojeniu twornika nie ulegają zmianie, czyli:

$$\forall t \in (t_{II}^p, t_{II}^k): I_t(t) = I_{to}, \quad E(t) = E_o \quad (3)$$

gdzie: t_{II}^p - czas rozpoczęcia drugiej strefy regulacji, t_{II}^k - czas zakończenia drugiej strefy regulacji,

- wpływ oddziaływania twornika jest pomijany,
- rozruch układu napędowego odbywa się bez obciążenia.

Po uwzględnieniu powyższych założeń oraz wykorzystaniu równań różniczkowych opisujących silnik obcowzbudny można zapisać zależności określające siłę elektromotoryczną E , strumień wzbudzenia Φ i moment dynamiczny M_d w sposób następujący [7, 3]:

$$\begin{aligned} E &= c_E \Phi \Omega \\ \Phi &= \Phi_N e^{-t/T_{wN}} - \Phi_N k_f (1 - e^{-t/T_{wN}}) \\ M_d &= c_M \Phi I_{to} = J \frac{d\Omega}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie: Ω - prędkość kątowna, Φ_N - strumień wzbudzenia znamionowy, k_f - współczynnik forsowania, T_{wN} - elektromagnetyczna stała czasowa obwodu wzbudzenia określona dla nominalnego prądu wzbudzenia I_{wN} , J - moment bezwładności, c_E , c_M - stałe konstrukcyjne maszyny.

Następnie z pierwszego równania układu (4) wyznacza się przyrost siły elektromotorycznej, który wynosi:

$$\Delta E = c_E \Omega_o \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Delta t + c_E \Phi_N \frac{\partial \Omega}{\partial t} \Delta t \quad (5)$$

Z przyjętych założeń upraszczających wynika, że $\Delta E = 0$. Wobec tego zależność (5) można zapisać w następujący sposób:

$$\Omega_o \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Delta t = -\Phi_N \frac{\partial \Omega}{\partial t} \Delta t \quad (6)$$

W celu wyznaczenia pochodnej strumienia po czasie drugie równanie układu (4) rozwinięto w szereg i po pominięciu wyrazów rzędu drugiego i wyższych uzyskano:

$$\Phi = \Phi_N - \Phi_N (1 + k_f) \frac{t}{T_{wN}} \quad (7)$$

Z powyższej zależności obliczono pochodną strumienia wzbudzenia po czasie uzyskując:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\Phi_N (1 + k_f) \frac{1}{T_{wN}} \quad (8)$$

Do wyznaczenia pochodnej prędkości po czasie wykorzystuje się natomiast trzecie równanie układu (4), które po przekształceniach można zapisać w postaci:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} = \frac{c_M \Phi I_{to}}{J} \quad (9)$$

Następnie zależności (8) i (9) podstawia się do równania (6), które przyjmuje wtedy następującą postać:

$$\Omega_o \Phi_N (1 + k_f) \frac{1}{T_{wN}} = \Phi_N \frac{c_M \Phi I_{to}}{J} \quad (10)$$

Wykorzystując równanie (10) wyznacza się współczynnik forsowania:

$$k_f = \frac{c_M \Phi I_{to} T_{wN}}{J \Omega_o} - 1 \quad (11)$$

Dla potrzeb obliczeniowych wygodnie jest przedstawić zależność (4.62) w innej postaci. Wykorzystuje się w tym celu podstawienie:

$$J = \frac{T_M M_{emN}}{\Omega_o} = \frac{T_M c_M \Phi_N I_{tN}}{\Omega_o} \quad (12)$$

Po uwzględnieniu zależności (12) współczynnik forsowania wynosi:

$$k_f = \frac{T_{wN} I_{to} \Phi}{T_M I_{tN} \Phi_N} - 1 \quad (13)$$

2. REZULTATY BADAŃ SYMULACYJNYCH

Badania symulacyjne modelu napędu prądu stałego z konwencjonalnym układem regulacji przeprowadzono w warunkach rozruchu dla zmniejszonego strumienia wzbudzenia $\varphi = 0,7$; 0,8 oraz stałego obciążenia $m_o = 0$.

Dla badanych przypadków wyznaczono czas regulacji oraz całkowity wskaźnik jakości prędkości kątowej I_Ω . Rezultaty badań symulacyjnych w postaci przebiegów czasowych prądu twornika, prędkości kątowej oraz całkowitego wskaźnika jakości przedstawiono na rys. 4-7. Prąd twornika i prędkość kątową wyrażono w jednostkach względnych, a czas regulacji

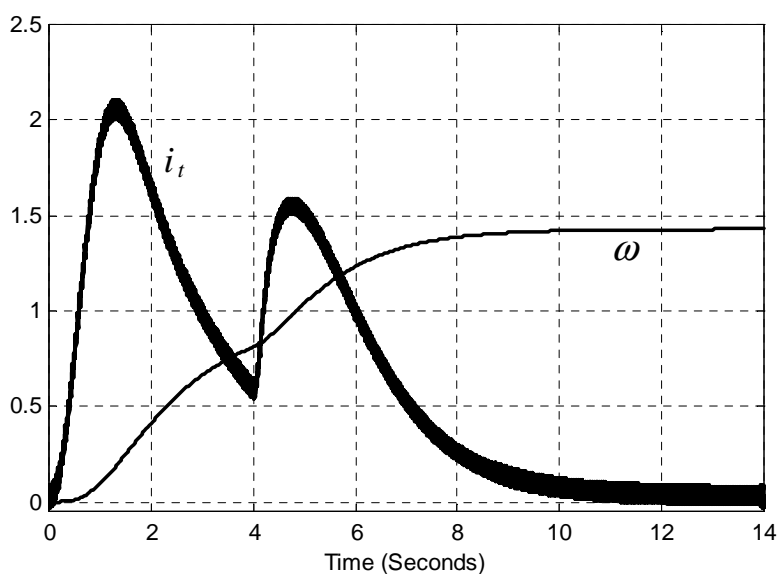
w sekundach. Natomiast całkowity wskaźnik jakości prędkości kątowej jest wielkością bezwymiarową, wyrażoną następującą zależnością [6, 7]:

$$I_{\Omega} = \int_0^{\infty} t \cdot |e_{\omega}(t)| dt = \int_0^{t_k} t \cdot |e_{\omega}(t)| dt \quad (14)$$

przy czym:

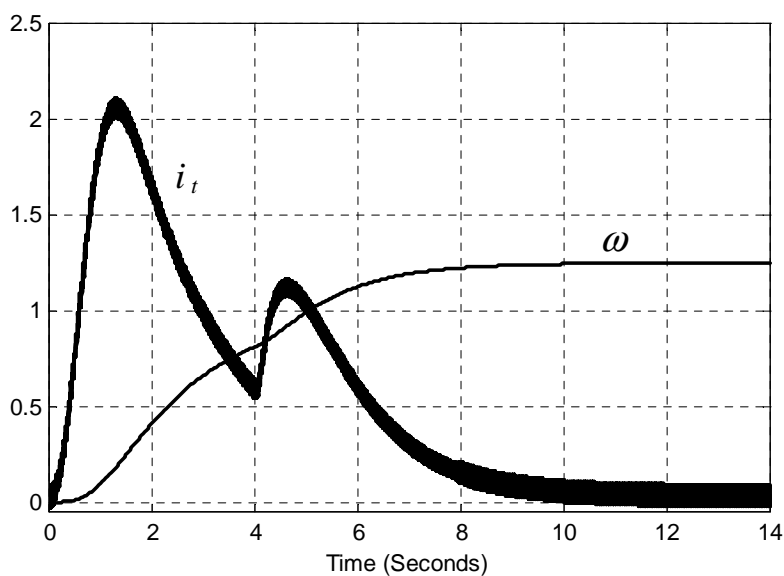
$$e_{\omega}(t) = \omega_z - \omega(t) \quad (15)$$

gdzie: $\omega(t)$ - prędkość kątowa, ω_z - prędkość kątowa zadana, $e_{\omega}(t)$ - uchyb prędkości kątowej.



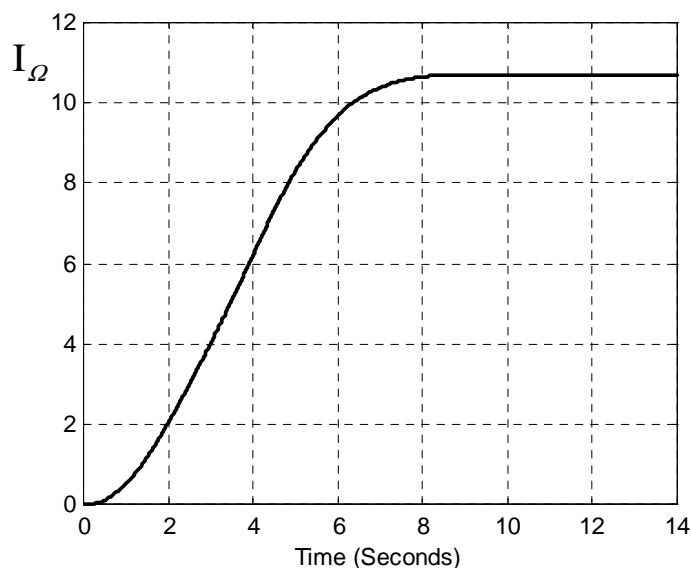
Rys. 4. Charakterystyki czasowe prądu twornika oraz prędkości kątowej napędu z klasycznym układem regulacji dla $\varphi = 0,7$ oraz $m_o = 0$

Źródło: opracowanie własne

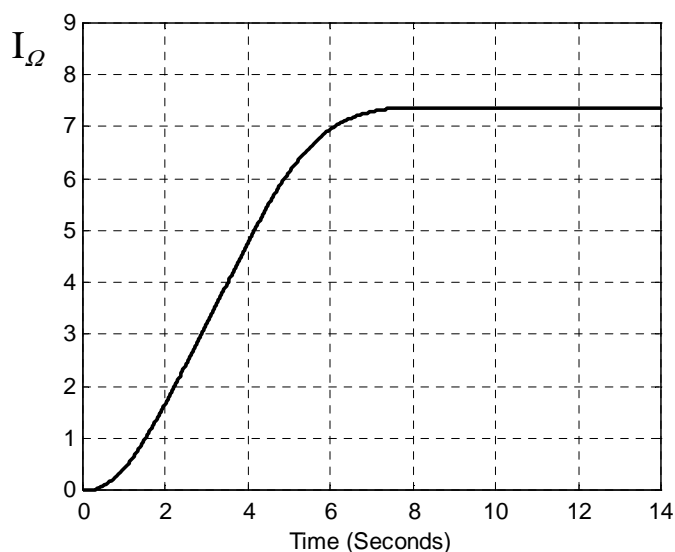


Rys. 5. Charakterystyki czasowe prądu twornika oraz prędkości kątowej napędu z klasycznym układem regulacji dla $\varphi = 0,8$ oraz $m_o = 0$

Źródło: opracowanie własne



Rys. 6. Przebieg wskaźnika jakości prędkości kątowej I_{Ω} napędu z klasycznym układem regulacji dla $\varphi = 0,7$ oraz $m_o = 0$
 Źródło: opracowanie własne



Rys. 7. Przebieg wskaźnika jakości prędkości kątowej I_{Ω} napędu z klasycznym układem regulacji dla $\varphi = 0,8$ oraz $m_o = 0$
 Źródło: opracowanie własne

PODSUMOWANIE

Przedstawiony model symulacyjny pozwala badać przebiegi czasowe poszczególnych wielkości elektromechanicznych układu napędowego. Zapewnia także możliwość analizowania wpływu nastaw regulatorów na charakterystyki czasowe. Szczególnie jest to istotne w odniesieniu do regulacji prądu w obwodzie wzbudzenia.

Przeprowadzone badania modelowe napędu przekształtnikowego w warunkach odwzbudzenia silnika wskazują, iż wzrost wartości chwilowej prądu twornika podczas drugiej fazy rozruchu nie przekracza wartości maksymalnej uzyskanej dla pierwszej fazy. Wartość prądu twornika jest w znacznym stopniu zależna od zadanej wartości strumienia wzbudzenia

dla drugiej fazy rozruchu. Obniżanie wartości względnej strumienia wzbudzenia skutkuje wzrostem prądu twornika i zwiększeniem prędkości kątowej układu napędowego, aż do osiągnięcia stanu ustalonego.

Przebieg czasowy prędkości kątowej ma charakter aperiodyczny i wynika to z nastaw układu regulacji. Zmniejszanie wartości strumienia wzbudzenia skutkuje wydłużeniem czasu regulacji. Wyznaczone całkowite wskaźniki jakości prędkości kątowej pozwalają na dokonanie oceny działania układu regulacji prądu wzbudzenia.

BIBLIOGRAFIA

1. Barlik R., Nowak M.: *Technika tyrystorowa*. WNT, Warszawa 1994.
2. Boldea I., Nasar S. A.: *Electric Machine Dynamics*. Macmillan Publishing Company, New York 1986.
3. Ciepela A.: *Automatyka przekształtnikowego napędu prądu stałego*. Wydawnictwa AGH, Kraków 1992.
4. Olesiak K.: *Metodyka realizacji modelu symulacyjnego układu napędowego walcarki rur*. Metody i Systemy Komputerowe w Automatyce i Elektrotechnice, Monografia, Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2005, s. 205-208.
5. SimPowerSystems for use with Simulink. The Math Works 2003.
6. Szklarski L., Jaracz K., Horodecki A.: *Electric Drive Systems Dynamics - Selected Problems*. Polish Scientific Publishers, Warsaw 1990.
7. Tunia H., Kaźmierkowski M.: *Automatyka napędu przekształtnikowego*. PWN, Warszawa 1987.

ANALYSIS OF THE DRIVE SYSTEM START-UP FOR THE WEAKENED MOTOR FIELD

Abstract

The paper presents a model of the converter drive control system. Basic assumptions about the drive motor in the field weakening conditions have been characterized. The simulation tests of the direct current drive with the conventional control system were carried out under conditions of start-up. The results of research were presented in the form of time characteristics of the armature current, the angular speed, and the integral quality index.

Autor:

Dr inż. Krzysztof Olesiak – Politechnika Częstochowska