

GERMAN-GAŁKIN Sergiej, DREAS Andrzej

WŁAŚCIWOŚCI MASZYNY DWUSTRONNIE ZASILANEJ W SYSTEMACH TRANSPORTOWYCH

Streszczenie

Przedstawiono rezultaty badania maszyny elektrycznej dwustronnie zasilanej (MDZ) przy dużych poślizgach i sterowaniu częstotliwościowym. Obliczono charakterystyki mechaniczne, regulacyjne i energetyczne. Zbadano procesy przejściowe i przedstawiono propozycje wdrożenia w układach transportowych.

WSTĘP

Podstawy współczesnych prac w zakresie teorii i zasad budowy systemów regulacji maszyn elektrycznych dwustronnego zasilania (MDZ) zawdzięczamy badaniom przeprowadzonym w końcu lat 60-tych — początku 70-tych w laboratorium maszyn elektrycznych dwustronnego zasilania WNIIE pod kierownictwem prof. M. M. Botwinnika i prof. J. G. Szakariana [1]. Wynikami tych prac było opracowanie podstaw teorii systemu napędu, strukturalnych zasad budowy systemów regulacji, a także stworzenie szeregu eksperymentalnych i przemysłowych urządzeń, które pozwoliły przeprowadzić badania eksploatacyjne napędów z silnikami elektrycznymi dwustronnego zasilania.

Ważną częścią elektrycznych napędów z silnikami dwustronnego zasilania jest półprzewodnikowy przetwornik, włączany w obwód wirnika silnika asynchronicznego. Odnośnie problemów napędowych znaczny wkład przedstawiają opracowania teorii systemów zaworowych, zaproponowane przez A. A. Bułgakowa [2]. Opracowanie ogólnej teorii przekształtników półprzewodnikowych przewiduje użycie głównej idei metody A. A. Bułgakowa – wydzielenie składowej użytecznej prądu i napięcia oraz ich wykorzystanie do analizy procesów w stanie ustalonym i przejściowym [7].

Współczesne regulowane napędy elektryczne rozpatruje się jako urządzenia sterowane automatycznie, zabezpieczone zamkniętym systemem automatycznej regulacji prędkości, momentu, położenia lub innych parametrów. Rozwój teorii automatycznej regulacji napędów pozwolił opracować jedyne ogólne zasady ich budowy.

Znaczący wkład do teorii napędów elektrycznych i agregatów prądotwórczych, zbudowanych na bazie MZD dokonany przez polskich naukowców [3,4,5].

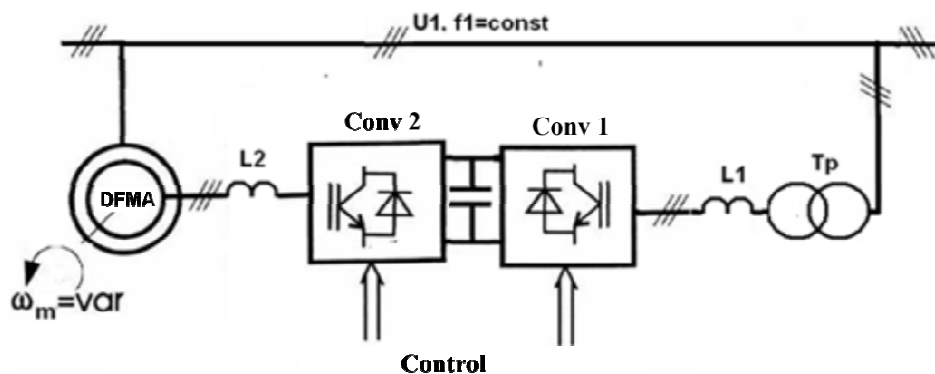
W maszynach dwustronnego zasilania energia jest podana (lub jest pobrana) do obwodu stojana i wirnika. Struktury te pozwalają sterować przepływem mocy czynnej i biernej.

Badanie właściwości MDZ i jej charakterystyk energetycznych jest wyjątkowo ważne dla projektowania energooszczędnych systemów transportowych. Cechą charakterystyczną tych układów jest długotrwała praca maszyny w trybie silnikowym i prądnicowym w szerokim zakresie prędkości obrotowej (poślizgu).

Właściwości energetyczne MDZ przy poślizgach znacznie przekraczających poślizg krytyczny, zbadano niewystarczająco. W tym referacie opisano właściwości MDZ przy niezależnym sterowaniu częstotliwościowym w obwodzie wirnika maszyny.

1. SCHEMAT FUNKCJONALNY MASZINY DWUSTRONNIE ZASILANEJ.

Maszyna dwustronnego zasilania składa się z maszyny asynchronicznej pierścieniowej, uzwojenia stojana, które są podłączone bezpośrednio do sieci zasilającej ($U_1 = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$), natomiast uzwojenia wirnika są podłączone do sterowanego źródła energii (przekształtnika półprzewodnikowego, rys.1).



Rys.1. Schemat funkcjonalny MDZ

Główne zalety MDZ są następujące:

- Sterowanie jest przeprowadzane w obwodzie wirnika, ze względu na moc sterowania (moc poślizgu) mniejsza niż moc w obwodzie stojana, zwiększa to wydajność energetyczną maszyny;
- MDZ może pracować przy prędkościach powyżej i poniżej synchronicznej w trybie silnikowym albo prądnicowym. Dlatego też, podczas korzystania z MDZ w trybie silnika nie powstają trudności w uzyskaniu momentu przy różnych prędkościach, natomiast podczas korzystania z MDZ w trybie prądnicy nie powstają trudności w stabilizacji parametrów generowanego napięcia, gdy prędkość obrotowa wału jest zmienna;
- MDZ umożliwia dostosowanie zewnętrznego i wewnętrznego przepływu mocy czynnej i biernej, co pozwala na budowanie energooszczędnych napędów elektrycznych i agregatów prądotwórczych, jak również energooszczędnych stanowisk badawczych.

2. TRYBY PRACY, WYKRESY WEKTOROWE, WYKRESY ENERGETYCZNE MASZINY DWUSTRONNIE ZASILANEJ.

Poniżej szczegółowo omówiono wszystkie rodzaje pracy MDZ:

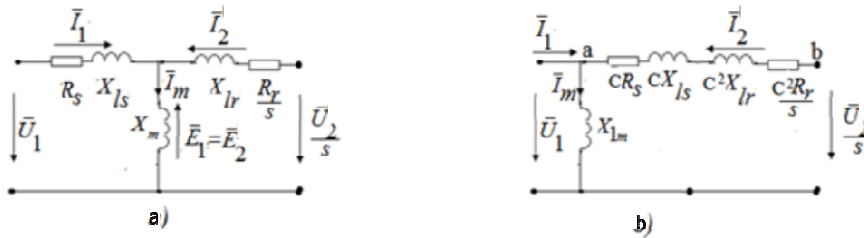
- silnikowy i prądnicowy tryb przy prędkościach poniżej synchronicznej;
- Silnikowy i prądnicowy tryb przy prędkościach powyżej synchronicznej.

W każdym z tych trybów, układ równań opisujący procesy elektromagnetyczne w stanie ustalonym jest następujący:

$$\begin{aligned}\bar{U}_1 &= R_s \bar{I}_1 + jX_{ls} \bar{I}_1 + \bar{E}_1, \\ \frac{\bar{U}_2}{s} &= \frac{R_r}{s} \bar{I}_2 + jX_{lr} \bar{I}_2 + \bar{E}_2, \\ \bar{I}_m &= \bar{I}_1 + \bar{I}_2.\end{aligned}\quad (1)$$

Gdzie \bar{U}_1 - napięcie fazowe sieci, \bar{I}_1 , $\bar{E}_1 = j\omega_1 \bar{\Psi}_m = jX_m \bar{I}_m$ - prąd i SEM w uzwojeniu stojana, \bar{U}_2 , \bar{I}_2 , $\bar{E}_2 = j\omega_1 \bar{\Psi}_m = jX_m \bar{I}_m$ - doprowadzone napięcie, prąd i SEM w uzwojeniu wirnika, \bar{I}_m - prąd magnesowania, R_s , $X_{ls} = \omega_1 L_{ls}$ - rezystancja i reaktancja rozproszenia stojana, R_r , $X_{lr} = \omega_1 L_{lr}$ - sprowadzona rezystancja i reaktancja rozproszenia wirnika, $X_m = \omega_1 L_m$ reaktancja magnesowania, s-poślizg.

Schemat zastępczy. odpowiadający równaniu 1, jest pokazany na rys.2.a.



Rys.2. Schematy zastępcze MDZ.

Przetwornik półprzewodnikowy (Conv.2, rys.1) jest źródłem napięcia, pierwsza harmoniczna tego napięcia na wyjściu jest równa:

$$\bar{U}_2 = \frac{m}{2} U_d \exp(j\delta) = \frac{m}{2} U_d (\cos \delta + j \sin \delta) \quad (2)$$

gdzie m - współczynnik modulacji, δ - faza napięcia w obwodzie wirnika względem napięcia zasilającego.

Dla jakościowej oceny właściwości MDZ rozważmy wykresy wektorowe i energetyczne. Dla tego należy przekształcić obwód MDZ w kształcie litery T w równoważny obwód MDZ w kształcie litery G, jak to pokazano na rys.2.b.

Współczynnik C ustala się na podstawie równania $C = 1 + \frac{X_{ls}}{X_m}$ i dla silników indukcyjnych o mocy 10 kW i powyżej $C = 1$ [7]. Opis matematyczny MDZ w przedstawionym kształcie można zapisać jako:

$$\begin{aligned}\frac{\bar{U}_2}{s} &= \bar{U}_1 + R_2 \bar{I}_2 + jX_2 \bar{I}_2, \\ \bar{U}_1 &= jX_{1m} \bar{I}_m, \quad \bar{I}_m = \bar{I}_2 + \bar{I}_2.\end{aligned}\quad (3)$$

gdzie $R_2 = R_s C + \frac{R_r}{s} C^2 \approx R_s + \frac{R_r}{s}$, $X_2 = X_{ls} C + X_{lr} C^2 \approx X_{ls} + X_{lr}$, $X_{1m} = X_{ls} + X_m$.

Oceniając właściwości energetyczne MDZ należy uwzględniać umowne kierunki przepływu mocy czynnej i biernej. Są one następujące:

- moc czynna źródła jest dodatnia, gdy źródło wytwarza energię i jest ujemna, gdy źródło zużywa energię;
- moc bierna w źródle jest dodatnia (indukcyjna), gdy napięcie wyprzedza prąd i ujemna (pojemnościowa), gdy napięcie jest opóźnione w stosunku do prądu;
- mechaniczna moc na wale jest dodatnia w trybie silnikowym i ujemna - w trybie prądnicowym.

Wykresy wektorowe i diagramy energetyczne MDZ, pracującej w trybie silnika i generatora są przedstawione na rys.3.a, rys.4.a.

Podstawowe właściwości, uzyskanych na podstawie analizy jakościowej są następujące:

- tryb silnikowy MDZ występuje, gdy δ jest ujemne, tryb prądnicowy MDZ występuje, gdy δ jest dodatnie;
- wartość mocy czynnej, w maszynie jest, proporcjonalna do wielkości δ ;
- znak mocy biernej w obwodzie stojana jest zależny od stosunku \bar{U}_1 i $\frac{\bar{U}_2}{s}$, gdy napięcie

\bar{U}_1 przekracza $\frac{\bar{U}_2}{s}$ moc bierna w obwodzie stojana jest dodatnia (indukcyjna). Jeżeli $\frac{\bar{U}_2}{s}$ przekroczy wartość napięcia \bar{U}_1 , moc bierna w obwodzie stojana jest ujemna (pojemnościowa), to znaczy maszyna jest wzbudzana przez wirnik.

Uzwojenie wirnika MDZ jest zasilane przez przetwornik półprzewodnikowy, na wyjściu którego zmienia się napięcie, faza napięcia w stosunku do napięcia sieci i częstotliwość napięcia ($\omega_2 = \omega_1 - p\omega_m$).

Sposoby regulacji częstotliwości w obwodzie wirnika MDZ podobne są do sposobów regulacji częstotliwości dla maszyn indukcyjnych, gdzie utrzymują pewną proporcję pomiędzy ω_2 i U_2 . W dalszej części są zbadane właściwości MDZ dla najprostszego sposobu sterowania, gdy:

$$\frac{U_2}{s} = \frac{\omega_1 U_2}{\omega_2} = U_{2m} = const \quad (4)$$

3. ANALIZA MATEMATYCZNA MDZ.

W celu ilościowego określenia właściwości MDZ należy rozwiązać układ równań (1, 2). To rozwiązanie jest realizowane w wirującym układzie współrzędnych x (oś rzeczywista), y (oś urojona).

Napięcie \bar{U}_1 jest połączone z rzeczywistą osią x, natomiast dla napięcia wtórnego zadane są wskaźnik $U_{2m} = \frac{\omega_1 U_2}{\omega_2}$ i faza δ . Wtedy prądy stojana i wirnika są określane przez rozwiązanie równań:

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{U}_1 \left(\frac{R_r}{s} + jX_s \right) - j \frac{\bar{U}_2}{s} X_m}{(R_s + jX_s) \left(\frac{R_r}{s} + jX_s \right) - X_m^2} \quad (5)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{\frac{\bar{U}_2}{s}(R_s + jX_s) - j\bar{U}_1 X_m}{(R_s + jX_s)\left(\frac{R_r}{s} + jX_s\right) - X_m^2} \quad (6)$$

Moment elektromagnetyczny jest obliczony z równania:

$$T_e = \frac{3}{2} p L_m \cdot (\bar{I}_2 \times \bar{I}_1) = \frac{3}{2} p L_m (I_{2x} I_{1y} - I_{2y} I_{1x}) \quad (7)$$

Właściwości energetyczne MDZ ustalone po obliczeniu prądów z równań (5, 6), zgodnie z następującymi wzorami:

$$\begin{aligned} P_1 &= 1.5 \cdot U_1 \cdot I_{1x}, \quad Q_1 = -1.5 \cdot U_1 \cdot I_{1y} \\ Q_2 &= 1.5 \cdot (U_{2y} I_{2x} - U_{2x} I_{2y}), \\ P_m &= T_e \cdot \omega_m = T_e \frac{(1-s)\omega_1}{p}, \\ P_2 &= 1.5 \cdot (U_{2x} I_{2x} + U_{2y} I_{2y}) - P_m \text{sign}(s). \end{aligned} \quad (8)$$

Dalsze badania przeprowadzone dla MDZ, o następujących parametrach:

160kW, 400V, 50Hz, 1487RPM,

$$R_s = 13,79 \cdot 10^{-3} \Omega, L_{ls} = 0.152 \cdot 10^{-3} H, R_r = 7.728 \cdot 10^{-3} \Omega,$$

$$L_{lr} = 0.152 \cdot 10^{-3} H, L_m = 7.69 \cdot 10^{-3} H.$$

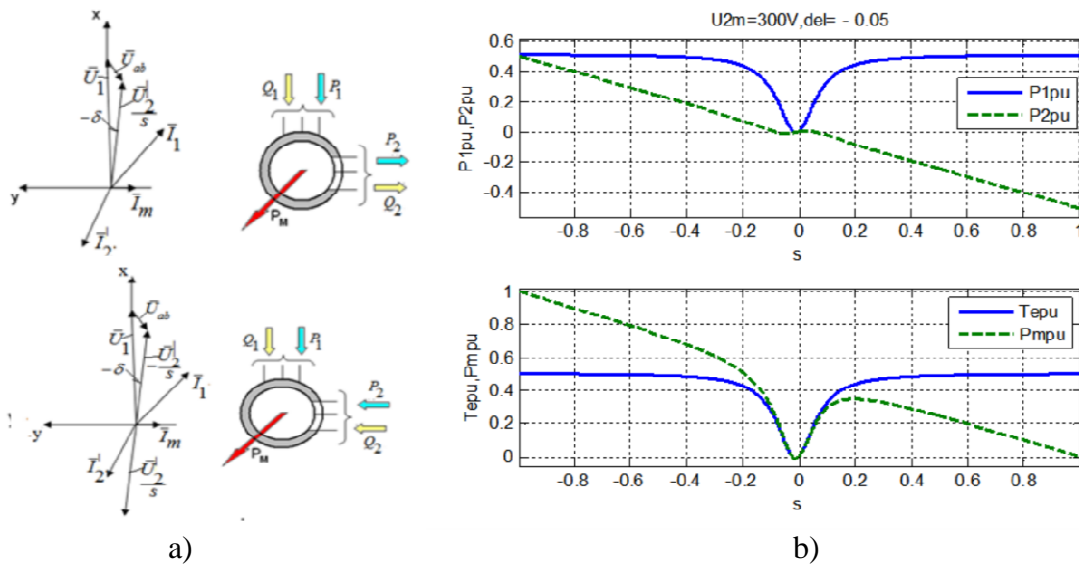
Wszystkie zmienne są obliczane w jednostkach względnych (bezwymiarowe, pu-per units.), które obliczane są przez podzielenie obliczonych zmiennych na wartości bazowe. W przypadku maszyny z powyższymi parametrami, bazowe wartości zmienne są obliczane według wzorów i są równe:

$$P_b = 160 \text{ kVA}, \quad U_b = 400 \text{ V}, \quad Z_b = \frac{U_b^2}{P_b} = 1.0 \text{ Ohm}, \quad I_b = \frac{U_b}{\sqrt{3} Z_b} = 231.2 \text{ A},$$

$$\omega_b = 2\pi f_n = 314 \text{ 1/s}, \quad T_b = \frac{\sqrt{3} p U_n I_b}{\omega_b} = 1019 \text{ Nm}.$$

Wyniki badania MDZ przy sterowaniu częstotliwościowym w obwodzie wirnika pokazano na rysunkach 3.b, 4.b.

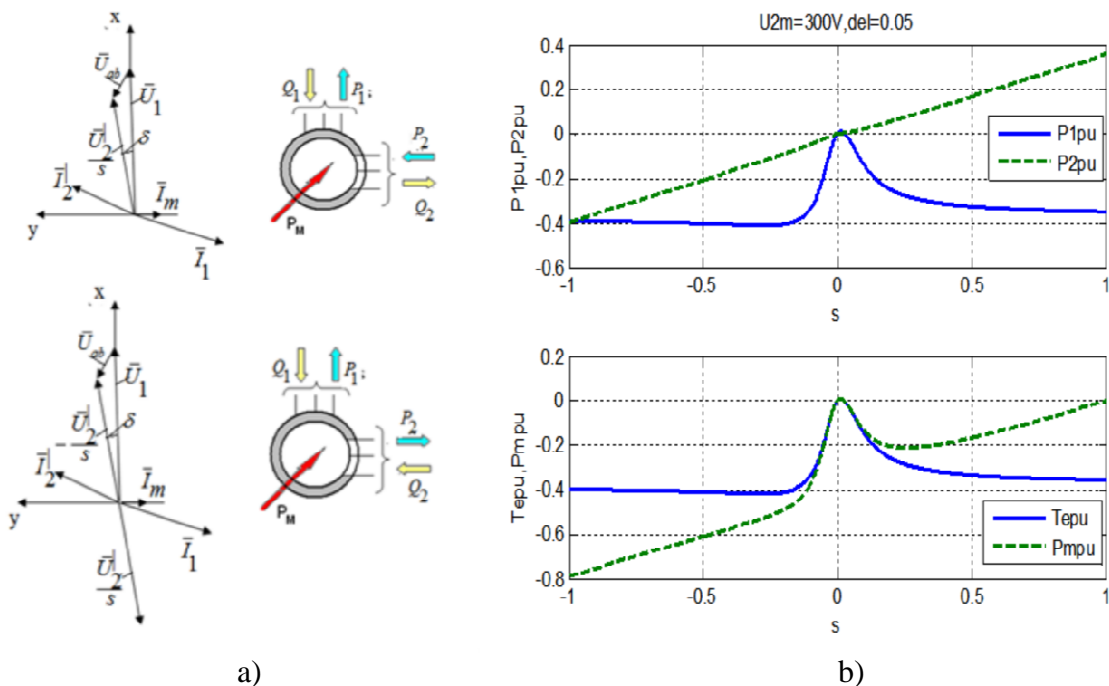
Na rys.3.b są przedstawione zależności mocy czynnej w obwodzie stojana i wirnika, momentu obrotowego i mocy na wale maszyny od poślizgu w zakresie od -1 do 1 przy pracy MDZ w trybie silnika ($\delta < 0^0$). Charakterystyki energetyczne i elektromagnetyczne (rys.3.b) odpowiadają przypadkowi, gdy istnieje zależność $U_{2m} \leq U_1$. Charakterystyki są obliczone dla wartości $\delta = -0.05$.



Rys.3. Właściwości MDZ w trybie silnikowym

Oceniając właściwości MDZ w trybie silnikowym, można wyciągnąć następujące wnioski:

- przy dużych poślizgach MDZ jest źródłem momentu obrotowego;
- dla poślizgów ujemnych moc na wale MDZ jest określona sumą mocy stojana i wirnika. Tryb ten może być stosowany w układach napędowych pojazdów trakcyjnych, jak również energooszczędnych stanowiskach do testowania silników spalinowych;
- dla poślizgów dodatnich moc na wale MDZ jest określona przez różnicę mocy stojana i wirnika. Tryb ten może być stosowany do energooszczędnych stanowisk testowania samej maszyny.



Rys.4. Właściwości MDZ w trybie prądnicowym.

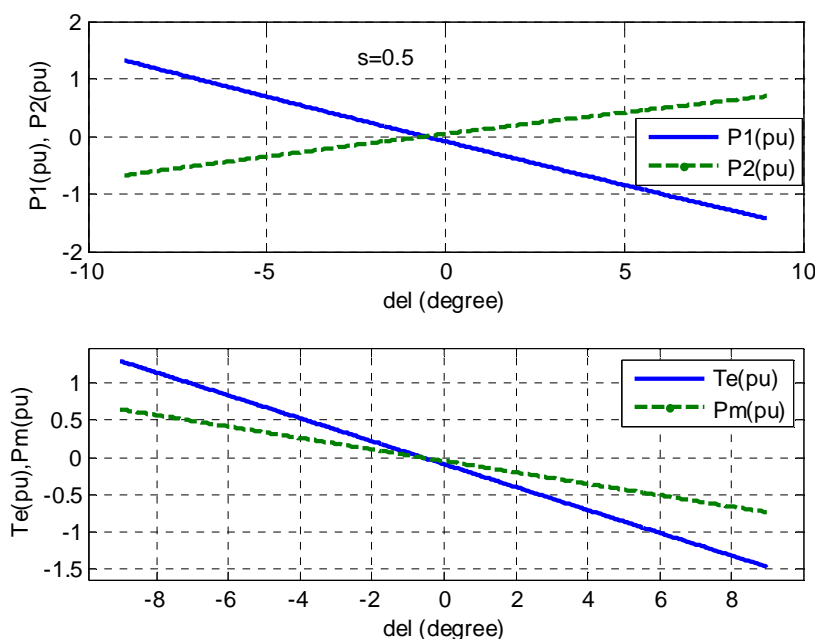
Rys.4. pokazuje zależność mocy w obwodach stojana i wirnika, momentu elektromagnetycznego i mocy na wale maszyny, poślizgu w trybie generatora (rys.4.a), gdy poślizg zmienia się w zakresie od -1 do 1. Procesy elektromagnetyczne (rys.4.b) odpowiadają

przypadkowi, gdy istnieje zależność $U_{2m} \leq U_1$. Charakterystyki obliczone są dla wartości $\delta = 0.05$.

Oceniając właściwości MDZ w trybie prądnicowym, można wyciągnąć następujące wnioski:

- przy dużych poślizgach MDZ jest źródłem momentu obrotowego;
- dla poślizgów ujemnych moc sieci zasilającej jest określona sumą mocy stojana i wirnika. Tryb ten należy stosować w prądnicach o zmiennej prędkości obrotowej wału (prądnicy wałowe statków, generatory wiatrowe), w układach napędowym pojazdów trakcyjnych podczas hamowania z odzyskiem energii elektrycznej do sieci, jak i w stanowiskach prób silników elektrycznych i silników spalinowych;
- dla poślizgów dodatnich moc elektryczna w sieci jest określana różnicą mocy stojana i wirnika. Tryb ten jest odpowiedni do stosowania w energooszczędnych stanowiskach prób samej maszyny.

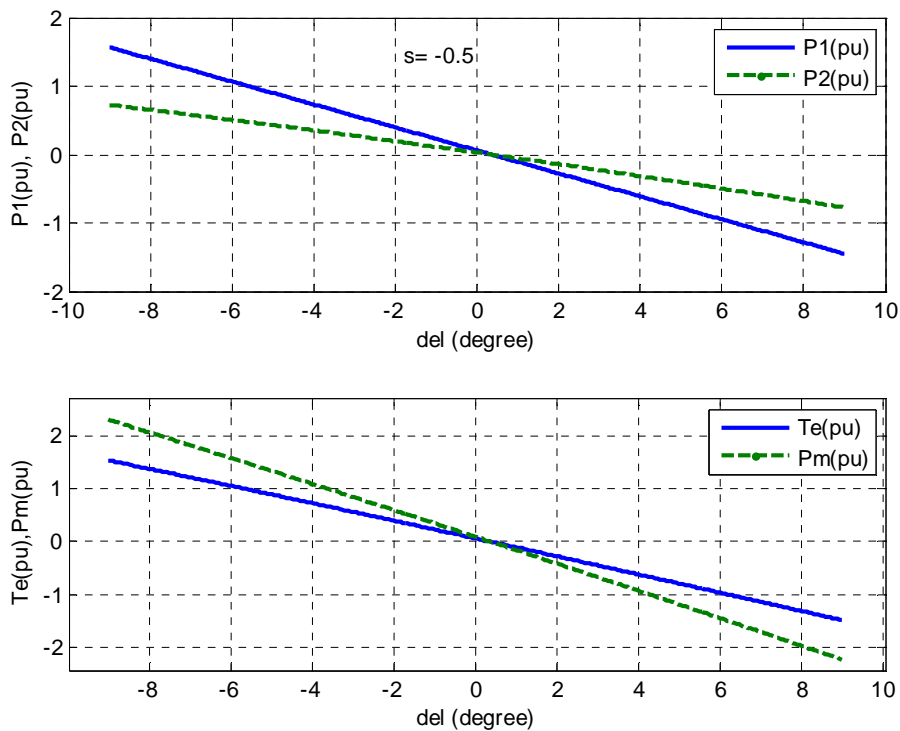
Charakterystyki regulacyjne MDZ są przedstawione na rys.5 i rys.6. Te charakterystyki uzyskuje się poprzez rozwiązywanie równania (1, 2), zostały one obliczone przy stałym poślizgu.



Rys.5. Charakterystyki regulacyjne MDZ przy $s = 0.5$.

Rys.5. przedstawia zależności mocy czynnej w obwodach stojana i wirnika, momentu elektromagnetycznego i mocy mechanicznej maszyny od kąta δ .

Procesy elektromagnetyczne (rys.5.) odpowiadają przypadkowi, gdy istnieje zależność $U_{2m} \leq U_1$. Charakterystyki obliczone dla wartości $s = 0.5$. Analogiczne charakterystyki dla $s = -0.5$ są przedstawione na rys.6.



Rys.6. Charakterystyki regulacyjne MDZ przy $s = -0.5$.

Oceniając właściwości regulacyjne MDZ przy poślizgach ujemnych można stwierdzić, że:

- moce w obwodach stojana i wirnika mają ten sam znak. Moc mechaniczna na wale silnika jest sumą mocy elektromagnetycznej stojana i wirnika. Takie tryby pracy powinny być używane w elektrycznych zespołach prądowców i systemach transportowych;
- przy poślizgach dodatnich moce w obwodach stojana i wirnika mają różne znaki. Tryb ten jest odpowiedni do stosowania w energooszczędnych stanowiskach prób samej maszyny.

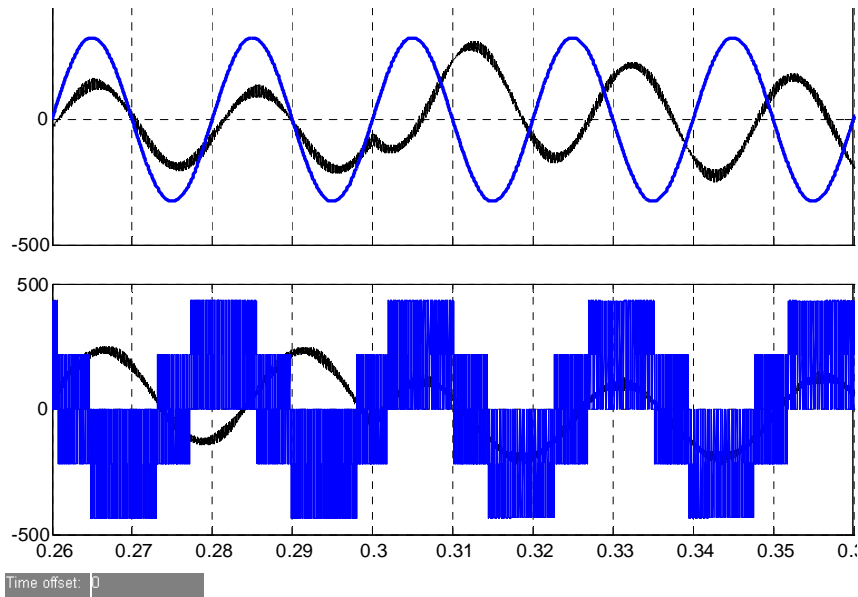
4. WYNIKI SYMULACJI.

Wyniki symulacji modelu badanego w pakiecie SimPower System są przedstawione na rys. 7 dla poślizgu dodatniego i rys.8. dla poślizgu ujemnego.

W stanach nieustalonych odnotowane przebiegi napięć i prądów w obwodzie stojana i wirnika.

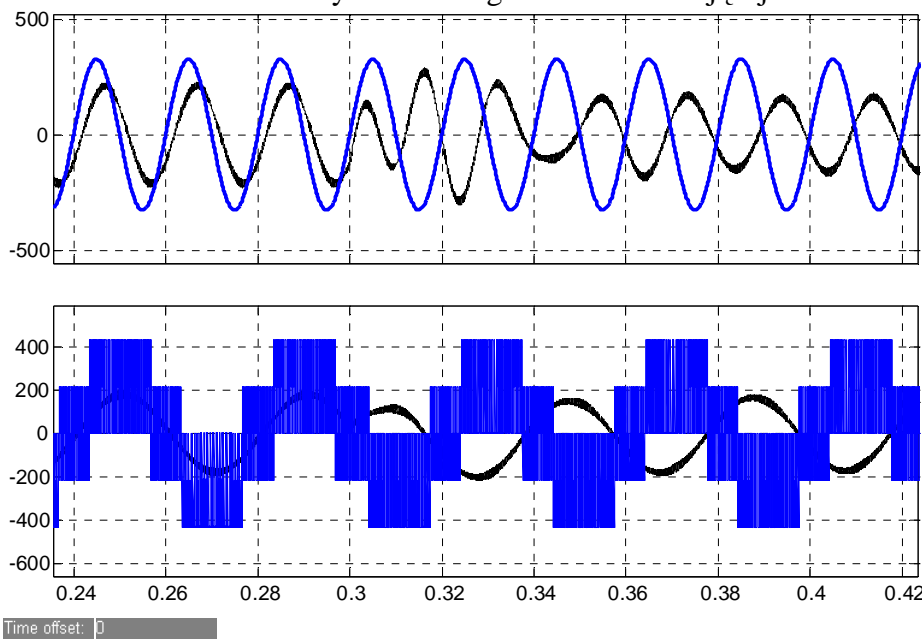
Przełączenie trybu pracy było realizowane kosztem skoku kąta od $-0,05$ rad do $0,05$ rad. w czasie $t = 0,3$ sek.

Wyniki symulacji wskazują:



Rys.7. Wyniki symulacji przy $s = 0.5$.

- w stanach przejściowych nie są obserwowane duże przyrosty prądów w obwodach stojana i wirnika;
- czas trwania procesu przejściowego jest równy 1,5 okresu częstotliwości sieci;
- omówiony sposób sterowania powinien być stosowany w elektrycznym transporcie do przyspieszania i hamowania z odzyskiem energii do sieci zasilającej.



Rys.8. Wyniki symulacji przy $s = -0.5$.

PODSUMOWANIE

W systemach transportowych i stanowiskach badawczych, gdzie głównym wymogiem jest efektywność energetyczna, można używać prostych algorytmów sterowania maszyną dwustronnie zasilaną. Zakres zmiany poślizgu MDZ powinien być dobrany w zależności od przeznaczenia układu. Dla napędów elektrycznych oraz zespołów prądotwórczych energooszczędność MDZ może być realizowana przy ujemnych poślizgach. Dla stanowisk badawczych energooszczędność MDZ może być realizowana przy dodatnich poślizgach.

BIBLIOGRAFIA

1. Botwinnik M. M., Szakarian J. G., Uprawiaemaja maszyna pieremiennowo toka. Nauka, Moskwa. 1969.
2. Bułgakow A. A., Nowaja teoria uprawiaemych wypriamitelei Nauka, Moskwa 1970.
3. Bogalecka E., Zagadnienia sterowania maszyną dwustronnie zasilaną pracującą jako prądnica w systemie elektroenergetycznym. Prace Naukowe Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni, Gdynia 1997.
4. Kaźmierkowski M.P, Tunia H. Automatic Control of Converter-Fed Drives. ELSEVIER, Amsterdam-London-New York-Tokyo 1994.
5. Krzemiński Z., Cyfrowe sterowanie maszynami asynchronicznymi. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2001
6. Lecocq D., Lataire P.: *Study of a variable speed, double fed induction motor drive system with both stator and rotor voltages controllable*, 4th European Conf. on Power Electr. and AppL, Firenze 1991.
7. Oniszenko G. B., Loktiewa I. L., *Asinchronnyje wentilnyje kaskady i dwigateli dwoinowo pitania*. Energia. Moskwa 1979.

PROPERTIES OF THE DOUBLE – FED INDUCTION MACHINE IN TRANSPORT SYSTEMS

Abstract

Discussed of result research double-fed induction machine (DFIM) in the control of voltage and frequency for large slip. Designed mechanical, control and power characteristics. Investigated transients and did recommendations for the use of DFIM.

Autorzy:

Prof. Dr, hab inż **Sergiej German-Gałkin**,– Akademia Morska w Szczecinie, Instytut Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej.

mgr inż. **Andrzej Dreas** – Akademia Morska w Szczecinie, Instytut Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej