

ADAM S. JAGIEŁŁO*

WŁAŚCIWOŚCI BEZSZCZOTKOWEJ MASZYNY PRĄDU
STAŁEGO WZBUDZANEJ MAGNESAMI TRWAŁYMI
W ZASTOSOWANIU DO NAPĘDU POJAZDÓWPROPERTIES OF DIRECT CURRENT MACHINES
BRUSHLESS PERMANENT MAGNET EXCITED
APPLICABLE TO MOTOR VEHICLES

Streszczenie

W artykule przedstawiono model matematyczny bezszczotkowej maszyny wzbudzonej magnesami trwałymi. Jego konstrukcja korzysta z klasycznego modelu maszyny synchronicznej magnesami trwałymi i utworzonego modelu falownika za pomocą form serraphilowych. Na podstawie przeprowadzonych symulacji komputerowych można stwierdzić, że zachowanie maszyny w warunkach rozruchu i obciążenia momentem w zakresie wykładniczej i skokowej zmiany kąta wysterowania falownika prądu wyjściowego nie wykazuje istotnych różnic.

Słowa kluczowe: bezszczotkowa maszyna prądu stałego, magnesy trwałe, formy serraphilowe, falownik prądu

Abstract

The paper presents a mathematical model of brushless DC machine induced permanent magnets. Its construction uses the classical model of synchronous machine permanent magnet and induced model of power inverter using the serraphil form. Conducted a computer simulation states: startup, work load and the behavior of the machine in terms of exponential and step change angle of the inverter rated output current.

Keywords: brushless dc machines, permanent magnets, serraphil forms, the inverter current

* Prof. dr hab. inż. Adam S. Jagiełło, Katedra Trakcji i Sterowania Ruchem, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

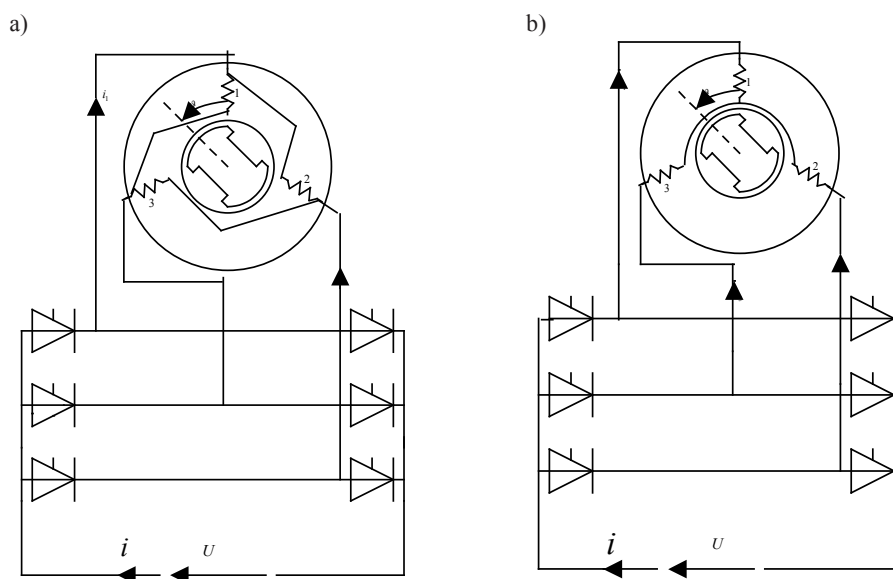
1. Wstęp

W układach napędowych wzrasta wykorzystanie silników elektrycznych wzbudanych magnesami trwałymi. Jest to niewątpliwie związane z rozwojem tych materiałów, a zwłaszcza uzyskiwania dużych wartości $(BH)_{\max}$. Tendencja ta występuje również w napędach pojazdów [3, 4]. Maszyny wzbudane magnesami trwałymi są sprawniejsze niż analogiczne maszyny ze wzbudzeniem elektromagnetycznym, a także są bardziej niezawodne. Natomiast bezszczotkowa maszyna prądu stałego ma jeszcze tę zaletę, że ma mniejsze wymiary (zwłaszcza poosiowy) w porównaniu z konwencjonalną maszyną prądu stałego o tych samych parametrach. Jest to spowodowane brakiem komutatora mechanicznego. W tym przypadku funkcję komutatora pełni falownik prądu, który może być umieszczony w dowolnym miejscu pojazdu względem maszyny napędowej.

Specyficzne warunki pracy napędu trakcyjnego stawiają szczególne wymagania – duży moment rozruchowy, szeroki zakres regulacji tak prędkości, jak i momentu. Wszystkie te cechy posiada napęd zrealizowany na bazie bezszczotkowego silnika prądu stałego.

2. Model matematyczny bezszczotkowego silnika prądu stałego

Idea pracy falownika prądu zasilającego trójfazową maszynę synchroniczną sprowadza się do sekwencyjnego przełączania poszczególnych par faz uzwojenia stojana skojarzonego w gwiazdę. Przełączanie to następuje w funkcji kąta położenia wirnika. W rezultacie można napisać [1]:



Rys. 1. Ideowe schematy zasilania maszyny synchronicznej falownikiem prądu, z uzwojeniami stojana połączonymi: a) w trójkąt, b) w gwiazdę

Fig. 1. Ideological power schemes current inverter synchronous machine with stator windings connected: a) in the triangle, b) the stars

dla połączenia w trójkąt

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \\ -\frac{2}{3} \\ \frac{1}{3} \end{bmatrix} i$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} \\ -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} \end{bmatrix} i$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \\ -\frac{2}{3} \end{bmatrix} i$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{3} \\ \frac{2}{3} \\ -\frac{1}{3} \end{bmatrix} i$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2}{3} \\ \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \end{bmatrix} i$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} \\ \frac{2}{3} \end{bmatrix} i$$

dla połączenia w gwiazdę

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} i$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} i$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} i$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} i$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} i$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} i$$

dla $\eta < \vartheta < \frac{\pi}{3} - \eta$;

dla $\frac{\pi}{3} - \eta < \vartheta < \frac{2\pi}{3} - \eta$;

dla $\frac{2\pi}{3} - \eta < \vartheta < \frac{3\pi}{3} - \eta$;

dla $\frac{3\pi}{3} - \eta < \vartheta < \frac{4\pi}{3} - \eta$;

dla $\frac{4\pi}{3} - \eta < \vartheta < \frac{5\pi}{3} - \eta$;

dla $\frac{5\pi}{3} - \eta < \vartheta < \frac{6\pi}{3} - \eta$;

Powyższe relacje dane przedziałami można zapisać analitycznie:

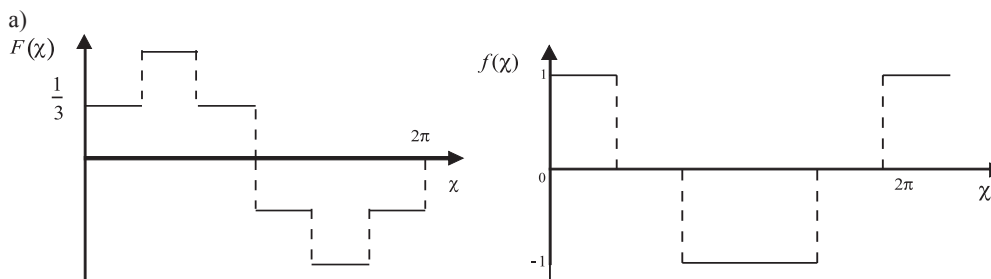
dla połączenia w trójkąt

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(\chi) \\ F(\chi - \frac{2\pi}{3}) \\ F(\chi - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} i$$

dla połączenia w gwiazdę

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(\chi) \\ f(\chi - \frac{2\pi}{3}) \\ f(\chi - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} i$$

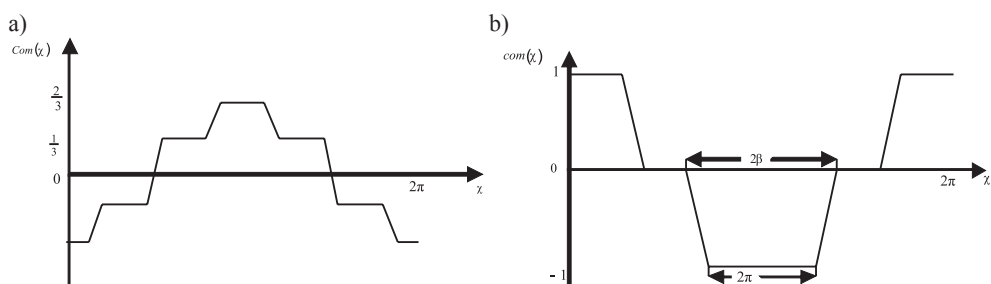
gdzie odpowiednie funkcje można przedstawić graficznie.



Rys. 2. Graficzna reprezentacja funkcji przełączającej: a) dla połączenia w trójkąt, b) dla połączenia w gwiazdę

Fig. 2. Graphical representation of switching functions: a) for the delta connection, b) for connection in a star

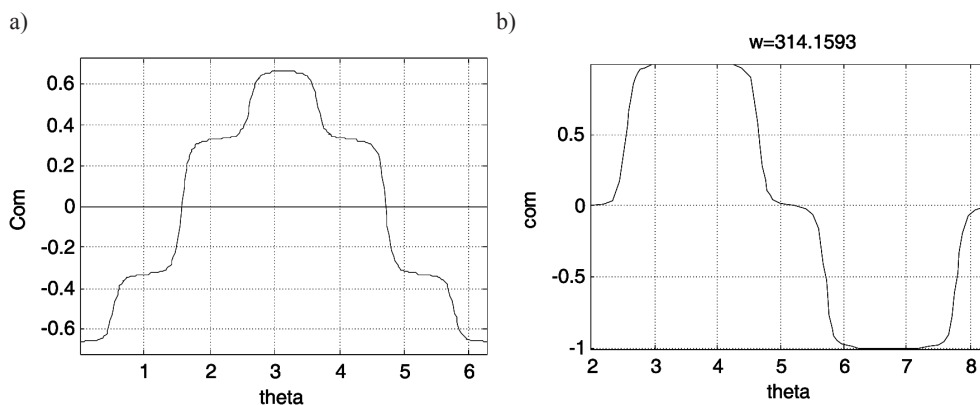
Jednak funkcje takie nie będą dobrze przybliżały rzeczywiste procesy związane z komutacją zaworów, bowiem przełączanie to nie może dokonywać się w sposób bezzwłoczny. Wprowadzimy zatem pewne modyfikacje tych funkcji oraz ich nazw; i tak pierwszą z nich nazwiemy $Com(\chi)$ natomiast drugą $com(\chi)$.



Rys. 3. Przebieg funkcji komutacji zaworów: a) dla połączenia w trójkąt $Com(\chi)$ i b) dla połączenia w gwiazdę $com(\chi)$

Fig. 3. The course features the commutation of valves: a) for a delta connection and b) for connection in a star

Zmienna niezależna, od której zależy powyższa funkcja, określona jest związkiem z kątem obrotu wirnika relacją $\chi = p(\vartheta - \eta)$.



Rys. 4. Funkcje Com (χ) i com (χ) uwzględniające realny kształt prądu w czasie komutacji zaworów
 Fig. 4. Functions Com and com take into account the real shape of the current during the commutation of valves

Funkcję komutacyjną można zapisać za pomocą form serrafilewych [1].

$$\text{com}(\chi) = \frac{\text{tris}(\chi + \alpha) + \text{tris}(\chi - \alpha) - \text{tris}(\chi + \beta) - \text{tris}(\chi - \beta)}{2[\text{tris}(\frac{\pi}{2} + \alpha) - \text{tris}(\frac{\pi}{2} + \beta)]}$$

gdzie

$$\text{tris}(\chi) = \lim_{\rho \rightarrow 1} \frac{\arcsin[\rho \sin(\chi)]}{\arcsin(\rho)}$$

Teraz relacje między prądem falownika a prądami fazowymi silnika, dane uprzednio przedziałami, można zapisać w postaci

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Com}(p\chi) \\ \text{Com}(p\chi - \frac{2\pi}{3}) \\ \text{Com}(p\chi - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} i \quad (1a)$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{com}(p\chi) \\ \text{com}(p\chi - \frac{2\pi}{3}) \\ \text{com}(p\chi - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} i \quad (1b)$$

Natomiast relacja między napięciem falownika a napięciami fazowymi przyjmuje postać

$$u = \begin{bmatrix} \text{Com}(p\chi) & \text{Com}(p\chi - \frac{2\pi}{3}) & \text{Com}(p\chi - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (1c)$$

i odpowiednio

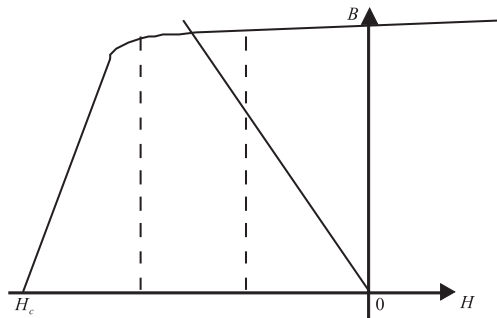
$$u = \begin{bmatrix} \cos(p\chi) & \cos(p\chi - \frac{2\pi}{3}) & \cos(p\chi - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (1d)$$

Model matematyczny maszyny synchronicznej, pozbawionej klatki rozruchowej, wzbudzonej magnesem trwałym, opisany za pomocą quasi-współrzędnych dq ma postać [2]

$$\begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + p\dot{\vartheta} \begin{bmatrix} 0 & -L_q \\ L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + p\dot{\vartheta} \begin{bmatrix} \frac{\partial \psi_d(p\vartheta)}{\partial \vartheta} \\ \frac{\partial \psi_q(p\vartheta)}{\partial \vartheta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (2a)$$

$$J \frac{d^2 \vartheta}{dt^2} = p \left[\frac{\partial \psi_q(p\vartheta)}{\partial \vartheta} i_q + \frac{\partial \psi_d(p\vartheta)}{\partial \vartheta} i_d + (L_d - L_q) i_d i_q \right] - T_z \quad (2b)$$

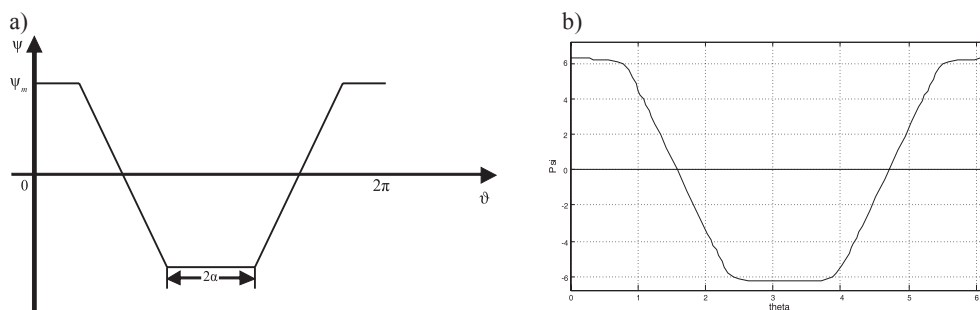
gdzie ψ_d i ψ_q są strumieniami skojarzonymi z uzwojeniami osi d i q pochodzącymi od magnesu trwałego.



Rys. 5. Przykładowa charakterystyka odmagnesowania magnesu trwałego

Fig. 5. Example of the characteristics of permanent magnet demagnetizing

Narysowane powyżej charakterystyki są bliskie idealnych, natomiast linia prosta odpowiada charakterystyce magnesowania szczeliny powietrznej łącznie z magnesem trwałym. W takich warunkach można przyjąć, że wartość indukcji w szczeliny powietrznej jest stała, to znaczy, że nie zależy od wartości prądów płynących w uzwojeniach wirnika. Teraz funkcję zmian strumienia skojarzonego z pierwszą fazą będzie można przedstawić w postaci funkcji trapezoidalnej (rys. 6a), której lepszym odpowiednikiem jest funkcja przedstawiona na trap(ϑ) (rys. 6b).



Rys. 6. Kształt funkcji strumienia magnesu trwałego skojarzonego z fazą stojana: a) przybliżenie liniami prostymi z zaznaczonym kątem podziałki biegunowej magnesu trwałego, b) przybliżenie za pomocą funkcji serrafilowych

Fig. 6. Shape of the functions of the permanent magnet flux with the phase of the stator:
a) approximation by straight lines to indicate the pitch angle of the permanent magnet pole,
b) approximation using serraphil

Funkcje strumienia skojarzonego z fazą drugą i trzecią będą przesunięte odpowiednio o $\frac{2\pi}{3}$ i $\frac{4\pi}{3}$. Jak łatwo spostrzec, do opisu analitycznego powyższej funkcji możemy wykorzystać formy krzywoliniowe. Zastosujemy tu już wcześniej wprowadzoną funkcję trap

$$\psi[p\vartheta - (j-1)\frac{2\pi}{3}] = \psi_m \frac{\text{tris}[p\vartheta + \alpha - (j-1)\frac{2\pi}{3}] + \text{tris}[p\vartheta - \alpha - (j-1)\frac{2\pi}{3}]}{2 \text{tris}(\frac{\pi}{2} + \alpha)}, j = 1, 2, 3.$$

Ostatecznie możemy napisać

$$\frac{\partial \psi_d(p\vartheta)}{\partial \vartheta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \psi[p\vartheta - (j-1)\frac{2\pi}{3}]}{\partial \vartheta} \cos[p\vartheta - (j-1)\frac{2\pi}{3}]$$

$$\frac{\partial \psi_q(p\vartheta)}{\partial \vartheta} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \psi[p\vartheta - (j-1)\frac{2\pi}{3}]}{\partial \vartheta} \sin[p\vartheta - (j-1)\frac{2\pi}{3}]$$

W dalszych rozważaniach ograniczymy się tymczasowo do uzwojeń skojarzonych w gwiazdę. W celu wykorzystania równań więzów (1b, d) wprowadzanych przez falownik, musimy je przekształcić za pomocą macierzy transformacji $0dq$, w wyniku czego otrzymujemy

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(p\vartheta) & \cos(p\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(p\vartheta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(p\vartheta) & -\sin(p\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(p\vartheta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{com}(p\chi) \\ \text{com}(p\chi - \frac{2\pi}{3}) \\ \text{com}(p\chi - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} i$$

Po wykonaniu zaznaczonych działań otrzymujemy

$$i_0 = 0$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(p\chi)\cos(p\vartheta) + S(p\chi)\sin(p\vartheta) \\ S(p\chi)\cos(p\vartheta) - C(p\chi)\sin(p\vartheta) \end{bmatrix} i \quad (3a)$$

gdzie

$$C(p\chi) = \sqrt{\frac{3}{2}} \operatorname{com}(p\chi)$$

$$S(p\chi) = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[\operatorname{com}\left(p\chi - \frac{2\pi}{3}\right) - \operatorname{com}\left(p\chi - \frac{4\pi}{3}\right) \right]$$

i odpowiednio dla napięć

$$u = \begin{bmatrix} C(p\chi)\cos(p\vartheta) + S(p\chi)\sin(p\vartheta) & S(p\chi)\cos(p\vartheta) - C(p\chi)\sin(p\vartheta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (3b)$$

Postępując analogicznie w przypadku uzwojeń połączonych w trójkąt, otrzymujemy

$$C(p\chi) = \frac{1}{\sqrt{6}} \left[\operatorname{com}\left(p\chi - \frac{2\pi}{3}\right) - \operatorname{com}\left(p\chi - \frac{4\pi}{3}\right) \right]$$

$$S(p\chi) = -\frac{1}{\sqrt{2}} \operatorname{com}(p\chi)$$

Po podstawieniu związków (3a, b) do równań (2a, b) otrzymujemy poszukiwany model matematyczny

$$L_a \frac{d}{dt} i + p\dot{\vartheta} \left\{ \begin{array}{l} M_a^a i + \frac{\partial \Psi_q(p\vartheta)}{\partial \vartheta} [S(p\chi)\cos(p\vartheta) - C(p\chi)\sin(p\vartheta)] + \\ \frac{\partial \Psi_d(p\vartheta)}{\partial \vartheta} [C(p\chi)\cos(p\vartheta) + S(p\chi)\sin(p\vartheta)] \end{array} \right\} + \quad (4a)$$

$$+ p\dot{\chi} G_{aa} i + R_a i = u$$

$$J \frac{d^2 \vartheta}{dt^2} = \frac{1}{2} M_a^a \dot{i}^2 + \left\{ \frac{\partial \Psi_q(p\vartheta)}{\partial \vartheta} [S(p\chi)\cos(p\vartheta) - C(p\chi)\sin(p\vartheta)] + \frac{\partial \Psi_d(p\vartheta)}{\partial \vartheta} [C(p\chi)\cos(p\vartheta) + S(p\chi)\sin(p\vartheta)] \right\} i \quad (4b)$$

W powyższych równaniach oznaczono

$$L_a = (L_d + L_q) [C^2(p\chi) + S^2(p\chi)] + \\ + (L_d - L_q) \{ [C^2(p\chi) - S^2(p\chi)] \cos(2p\vartheta) + 2C(p\chi)S(p\chi) \sin(2p\vartheta) \}$$

$$M_a^a = 2(L_d - L_q) \{ 2C(p\chi)S(p\chi) \cos(2p\vartheta) - [C^2(p\chi) - S^2(p\chi)] \sin(2p\vartheta) \}$$

$$G_{aa} = (L_d + L_q) [C(p\chi)C_d(p\chi) + S(p\chi)S_d(p\chi)] + \\ + (L_d - L_q) \{ [C(p\chi)C_d(p\chi) - S(p\chi)S_d(p\chi)] \cos(2p\vartheta) + [C_d(p\chi)S(p\chi) + C(p\chi)S_d(p\chi)] \sin(2p\vartheta) \}$$

Powróćmy teraz do uzwojeń skojarzonych w trójkąt. Zauważmy, że istnieje ścisła korelacja między funkcjami $\text{Com}(\chi)$ oraz $\text{com}(\chi)$ i tak

$$C_\Delta(\chi) = \sqrt{\frac{3}{2}} \text{Com}(\chi) = \frac{\text{com}(\chi - \frac{2\pi}{3}) - \text{com}(\chi - \frac{4\pi}{3})}{\sqrt{6}} \\ S_\Delta(\chi) = \frac{\sqrt{2}}{2} [\text{Com}(\chi - \frac{2\pi}{3}) - \text{Com}(\chi - \frac{4\pi}{3})] = \frac{\sqrt{2}}{6} [\text{com}(\chi - \frac{4\pi}{3}) - 2\text{com}(\chi) + \text{com}(\chi - \frac{2\pi}{3})]$$

Ponieważ $\sum_{j=1}^3 \text{com}[\chi - (j-1)\frac{2\pi}{3}] \equiv 0$, zatem

$$S_\Delta(\chi) = -\frac{\text{com}(\chi)}{\sqrt{2}}$$

Można teraz zauważyć proste relacje pomiędzy wielkościami C i S dla gwizdy i trójkąta

$$S_\Delta(\chi) = -\frac{\sqrt{3}}{3} C(\chi) \quad C_\Delta(\chi) = \frac{\sqrt{3}}{3} S(\chi)$$

3. Analiza właściwości dynamicznych

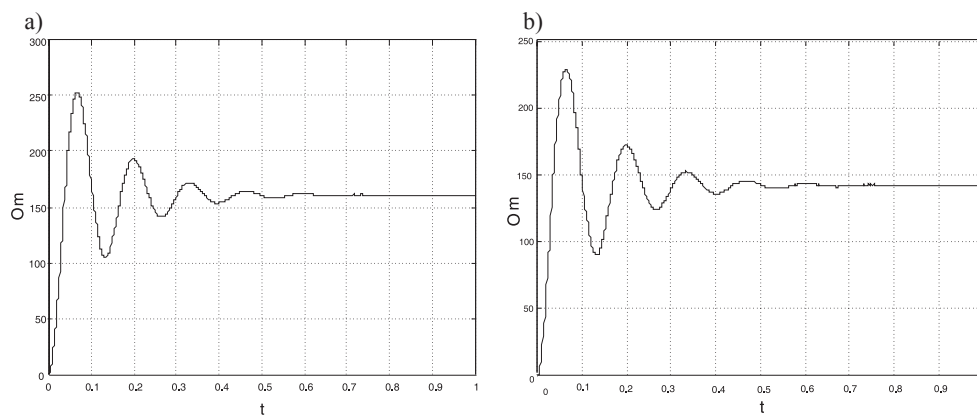
Analiza właściwości dynamicznych będzie bazowała na symulacji komputerowej modelu matematycznego danego układem równań (4a, b). W pierwszej kolejności zostanie przedstawiony przebieg rozruchu w warunkach stałego wystawienia względem kąta położenia wirnika zaworów falownika. Matematycznie fakt możemy zapisać

$$p\chi = p\vartheta - \eta$$

gdzie:

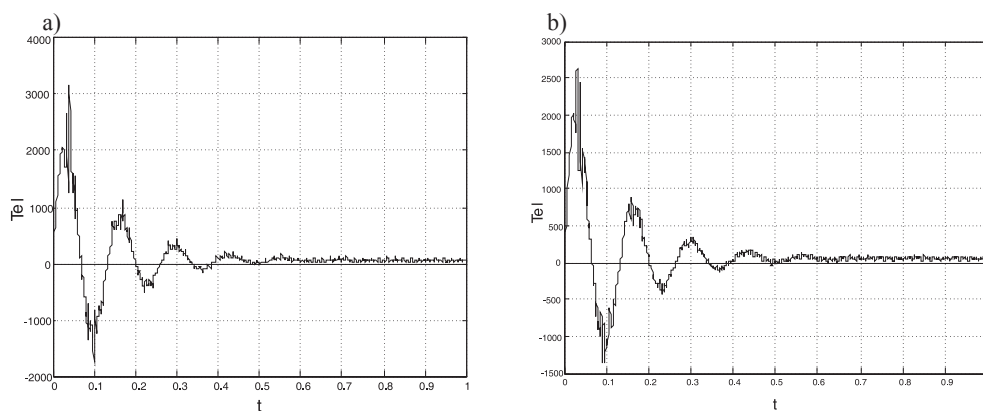
$$\eta = -\frac{\pi}{2} \text{ dla uzwojeń skojarzonych w gwiazdę,}$$

$$\eta = \pi \text{ dla uzwojeń skojarzonych w trójkąt.}$$



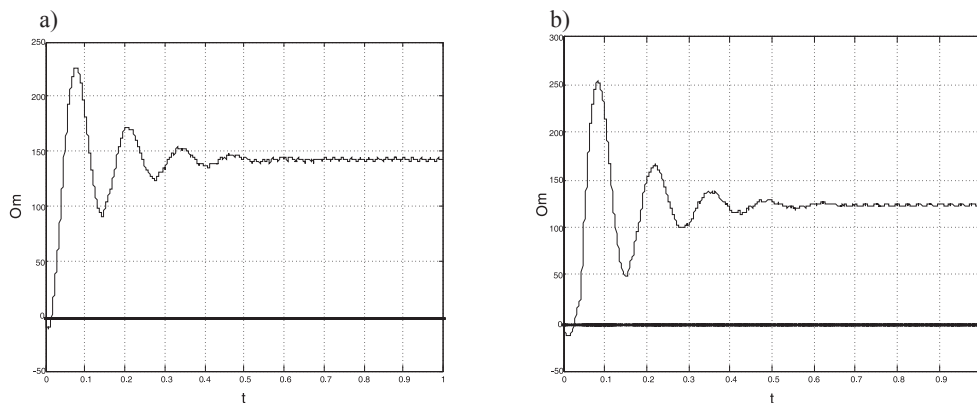
Rys. 7. Przebieg w funkcji czasu prędkości kątowej maszyny w warunkach obciążenia jej jedynie stratami mechanicznymi: a) dla połączenia w trójkąt, b) dla połączenia w gwiazdę

Fig. 7. As a function of the time course of the angular velocity of the machine under load it only mechanical losses: a) for a delta connection, b) for connection in a star



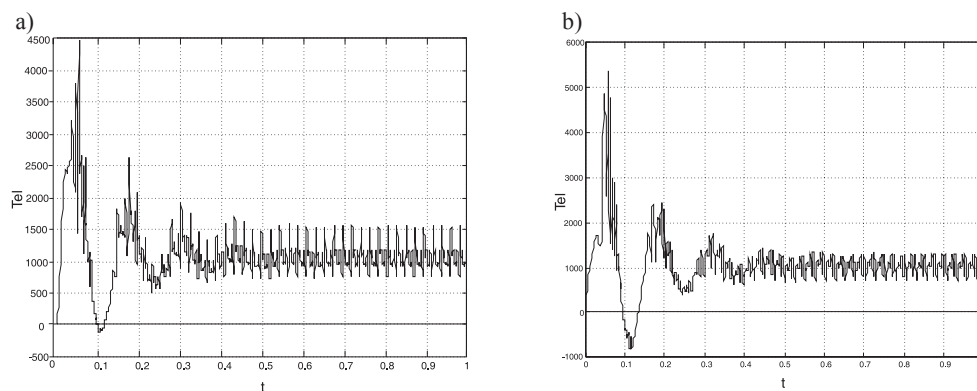
Rys. 8. Przebieg w funkcji czasu momentu elektromechanicznego maszyny w warunkach obciążenia jej jedynie stratami mechanicznymi: a) dla połączenia w trójkąt, b) dla połączenia w gwiazdę

Fig. 8. Time course of the machine electromagnetic torque under load the motor torque loss: a) for a delta connection, b) for connection in a star



Rys. 9. Przebieg prędkości obrotowej podczas rozruchu maszyny w warunkach obciążenia jej stałym momentem czynnym: a) dla połączenia w trójkąt, b) dla połączenia w gwiazdę

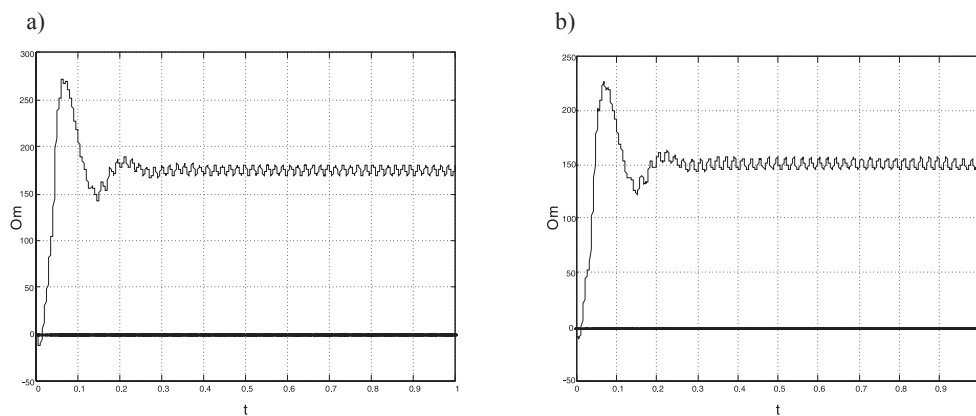
Fig. 9. Mileage speed during start-up equipment in the loading conditions of constant torque active: a) for a delta connection, b) for connection in a star



Rys. 10. Przebieg momentu elektromagnetycznego podczas rozruchu maszyny w warunkach obciążenia jej stałym momentem czynnym: a) dla połączenia w trójkąt, b) dla połączenia w gwiazdę

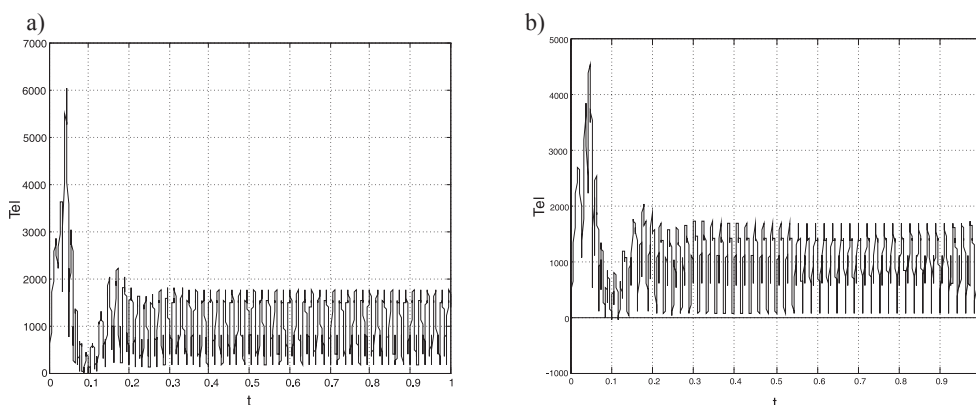
Fig. 10. Mileage electromagnetic torque during start-up equipment in the loading conditions of constant torque active: a) for a delta connection, b) for connection in a star

W bezszczotkowej maszynie prądu stałego ze wzbudzeniem magnesami trwałymi rezultat odzwzbudzenia można uzyskać, zmieniając kąt η . W niniejszym przykładzie wynosił on odpowiednio $0,75\pi$ i $-1,55\frac{\pi}{2}$.



Rys. 11. Przebieg prędkości obrotowej podczas rozruchu maszyny w warunkach obciążenia jej stałym momentem czynnym z osłabionym strumieniem wzbudzenia: a) dla połączenia w trójkąt, b) dla połączenia w gwiazdę

Fig. 11. Mileage speed during boot the machine in terms of a constant torque load with a weak stream of active excitation: a) for a delta connection, b) for connection in a star

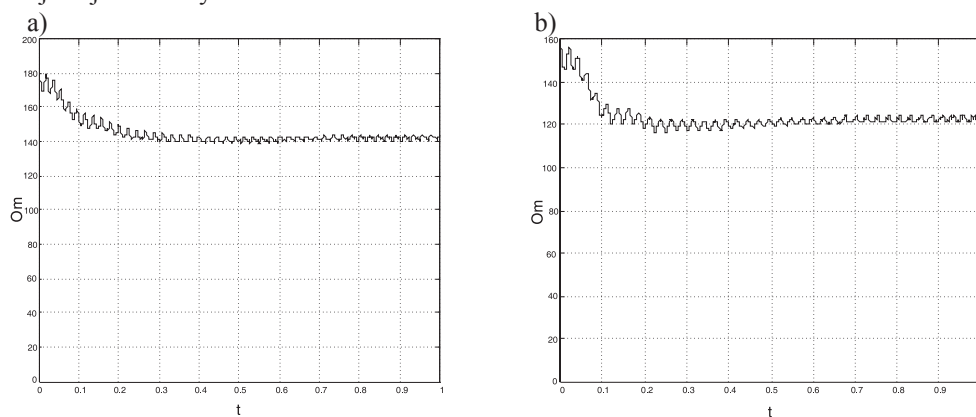


Rys. 12. Przebieg momentu elektromagnetycznego podczas rozruchu maszyny w warunkach obciążenia jej stałym momentem czynnym z osłabionym strumieniem wzbudzenia: a) dla połączenia w trójkąt, b) dla połączenia w gwiazdę

Fig. 12. Mileage electromagnetic torque during start-up equipment in the loading conditions of constant torque with a weak stream of active excitation: a) for a delta connection, b) for connection in a star

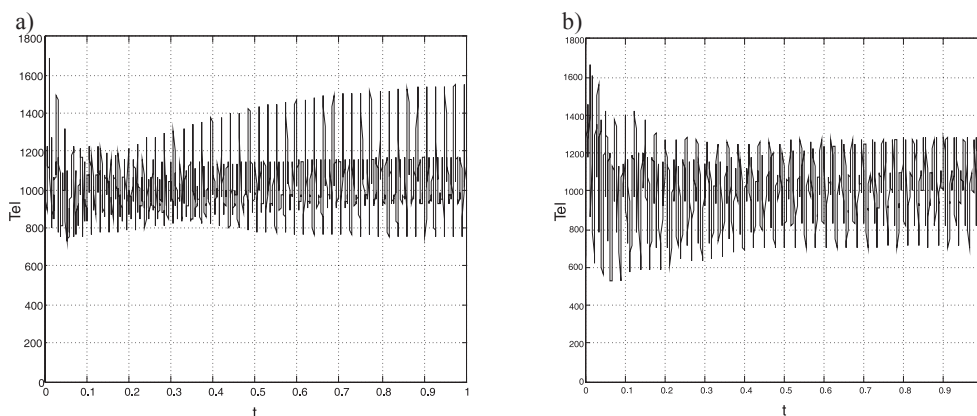
Obecnie dokonamy symulacji zachowania się maszyny obciążonej momentem czynnym, pracującej w stanie ustalonym, w której dokonano zmiany kąta wysterowania falownika zgodnie z relacją: $\eta = \varepsilon_1 e^{-\beta t} + \varepsilon_2 (1 - e^{-\beta t})$, gdzie ε_1 przyjmuje wartości $0,75\pi$ dla trójkąta $-1,55 \frac{\pi}{2}$ i dla gwiazdy, natomiast ε_2 odpowiednio π i $-\frac{\pi}{2}$. Oznacza to, że kąt wysterowania zmienia się wykładniczo z wartości powodującej osłabienie wypadkowego pola wzbudzenia

do wartości znamionowej. Wartość współczynnika tłumienia β przyjęto w niniejszych symulacjach jako równy 4.0.



Rys. 13. Przebieg prędkości obrotowej maszyny w przypadku obciążenia jej stałym momentem czynnym w warunkach wykładniczego powrotu strumieniem wzbudzenia do wartości znamionowej: a) dla połączenia w trójkąt, b) dla połączenia w gwiazdę

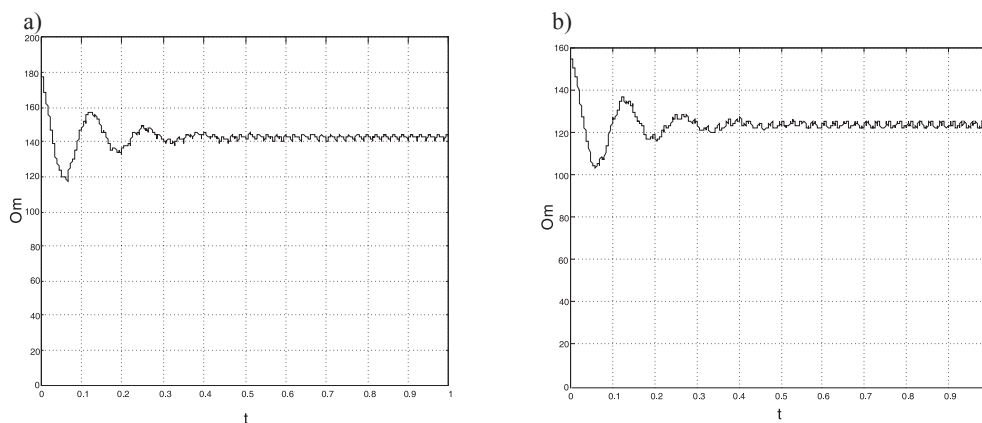
Fig. 13. Machine speed machine for constant torque loads it open in terms of exponential return flow to the rated excitation: a) for a delta connection, b) for connection in a star



Rys. 14. Przebieg momentu elektromagnetycznego maszyny w przypadku obciążenia jej stałym momentem czynnym w warunkach wykładniczego powrotu strumieniem wzbudzenia do wartości znamionowej: a) dla połączenia w trójkąt, b) dla połączenia w gwiazdę

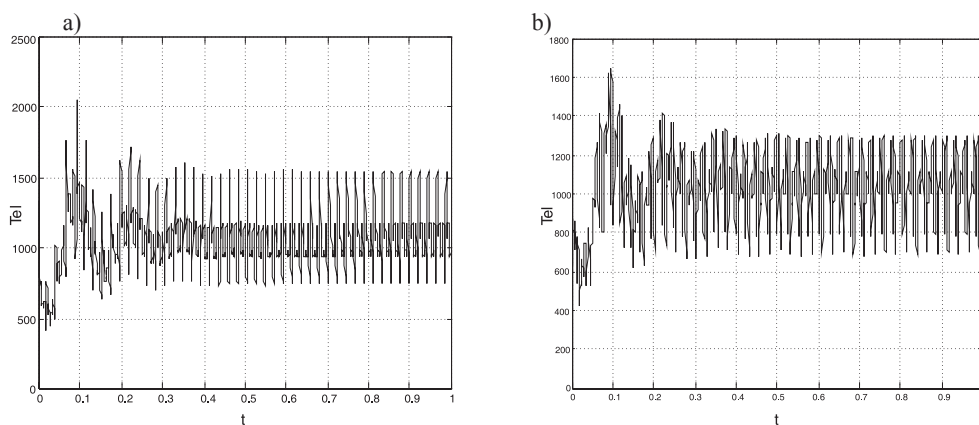
Fig. 14. Course of the machine electromagnetic torque for constant torque loads it open in terms of exponential return flow to the rated excitation: a) for a delta connection, b) for connection in a star

W celach porównawczych dokonano obliczeń dla przypadku skokowej zmiany kąta wysterowania falownika. Za wystarczająco szybką zmianę uznano przyjęcie wartości współczynnika tłumienia $\beta = 14$. Rezultaty przedstawiono na rys. 12 i 13.



Rys. 15. Przebieg prędkości obrotowej maszyny w przypadku obciążenia jej stałym momentem czynnym w warunkach skokowego powrotu strumieniem wzbudzenia do wartości znamionowej: a) dla połączenia w trójkąt, b) dla połączenia w gwiazdę

Fig. 15. Mileage speed machine for constant torque loads it open in a jump jet to return to the nominal value of excitation: a) for a delta connection, b) for connection in a star



Rys. 16. Przebieg momentu elektromagnetycznego maszyny w przypadku obciążenia jej stałym momentem czynnym w warunkach skokowego powrotu strumieniem wzbudzenia do wartości znamionowej: a) dla połączenia w trójkąt, b) dla połączenia w gwiazdę

Fig. 16. Mileage machine electromagnetic torque for constant torque load of active ankle in a return flow to the rated excitation: a) for a delta connection, b) for connection in a star

4. Podsumowanie

Analiza przebiegów przedstawionych na rys. 7–16 pozwala stwierdzić, że bezszczotkowa maszyna prądu stałego zbudowana na bazie silnika synchronicznego z wydajnymi biegunami, wzbudzanego magnesami trwałymi, wykazuje cechy charakterystyczne dla silnika

obcowzbudnego prądu stałego z komutatorem mechanicznym, wzbudzanego magnesami trwałymi. Silnik ten jednak nie daje możliwości regulacji prędkości obrotowej przez zmianę strumienia wzbudzenia. Natomiast dla omawianego tu silnika można uzyskać odwzbudzenie, zmieniając kąt wysterowania falownika prądu, a ma to istotne znaczenie w warunkach zastosowania go w napędach pojazdów. W takim przypadku jednak silnik wykazuje większą amplitudę szybkozmiennego momentu elektromagnetycznego. Należy zwrócić uwagę na fakt, że nie jest wskazana zbyt szybka zmiana kąta wysterowania zaworów falownika prądu. Wtedy bowiem obserwuje się dłużej trwające i o większej amplitudzie oscylacje wolnozmiennego momentu elektrycznego. Oczywiście jest, że w przypadku połączenia uzwojeń maszyny synchronicznej w trójkąt właściwości bezszczotkowej maszyny DC są nieco inne. Można zauważyć, że jego charakterystyka mechaniczna jest sztywniejsza, natomiast tłumienie wolnozmiennych oscylacji momentu jest porównywalne.

Literatura

- [1] Jagiełło A.S., *Przekształcenia niecałkowalne w teorii maszyn elektrycznych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002.
- [2] Węgiel T., *Modelowanie maszyn synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi*, rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska 1997.
- [3] Fręchowicz A., *Własności dynamiczne bezszczotkowych silników prądu stałego, zastosowanych w czterokwadrantowych napędach wózka inwalidzkiego*, Conference Proceedings, 9th International Conference „Modern Electric Traction” MET’2009.
- [4] Bernatt J., Gawron S., Król E., *Nowoczesne silniki z magnesami trwałymi do zastosowań trakcyjnych*, Conference Proceedings, 9th International Conference „Modern Electric Traction” MET’2009.