ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1999
Seria: ELEKTRYKA z. 170 Nr kol. 1426

Arkadiusz DOMORACKI
Krzysztof KRYKOWSKI

MOŻLIWOŚCI POPRAWY WŁAŚCIWOŚCI RUCHOWYCH SILNIKA DC BRUSHLESS PRZEZ STEROWANIE KOMUTATOREM – BADANIA SYMULACYJNE

Streszczenie. Celem artykułu jest zaprezentowanie możliwości badania wpływu przyśpieszenia chwil przełączenia zaworów komutatora elektronicznego na charakterystyki elektromechaniczne bezszczotkowego silnika prądu stałego za pomocą symulacji komputerowej przy zastosowaniu oprogramowania Matlab-Simulink. W artykule przedstawiono konstrukcję i zasadę działania silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi o trapezoidalnym sterowaniu (DC brushless). Omówiono opracowany model komputerowy oraz przedstawiono wyniki badań symulacyjnych. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że poprzez sterowanie komutatorem elektronicznym z odpowiednim wyprzedzeniem można uzyskać minimalizację niekorzystnych zjawisk (tętnień momentu i prędkości) występujących podczas pracy silnika przy klasycznym sterowaniu.

POSSIBILITIES OF MOTION PROPERTIES IMPROVEMENT OF DC BRUSHLESS MOTOR BY COMMUTATOR CONTROL - SIMULATION RESEARCH

Summary. The purpose of the paper is to present possibilities of research of the influence of an electronic commutator commutation time advancing on electromechanical characteristics, using computer simulation in Matlab-Simulink software. Construction and principle of operation of DC Permanent Magnet Brushless motor are described in the paper. The worked out computer model and results of the simulation research are shown. As a result of the research it was proved that it was possible to minimize disadvantageous effects (torque and speed ripple) existing during motor operation at the classical control, by the electronic commutator control with the proper commutation margin.

1. WPROWADZENIE

Obecnie coraz częściej i chętniej stosuje się silniki z komutatorem elektronicznym. Tendencja ta wynika z kilku faktów: dłuższej żywotności silników bezkomutatorowych w stosunku do klasycznych silników z komutatorem mechanicznym, wyższej sprawności, mniejszych gabarytów. Oprócz niewątpliwych zalet mają one pewne wady, do których można między innymi zaliczyć: tętnienia momentu elektromagnetycznego oraz prędkości rozwijanej przez silnik. Istnieje kilka metod minimalizacji tych niekorzystnych zjawisk. W poniższym artykule przedstawiono jedną z takich metod. Przedstawiono również wyniki badań symulacyjnych potwierdzających słuszność zaproponowanej metody sterowania.

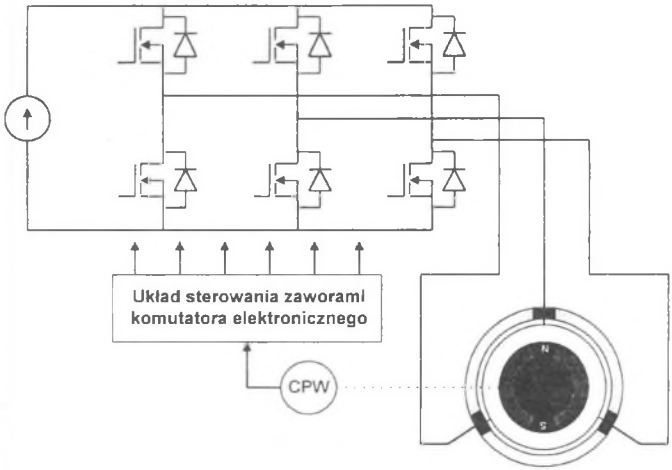
2. CEL I ZAKRES PROWADZONYCH PRAC

Celem pracy jest zaprezentowanie możliwości badania wpływu przyspieszenia chwil przełączenia zaworów komutatora elektronicznego na charakterystyki elektromechaniczne bezszczotkowego silnika prądu stałego za pomocą symulacji komputerowej przy zastosowaniu oprogramowania Matlab-Simulink. Tak przedstawiony cel pracy wynika z potrzeby znalezienia odpowiedzi na pytanie: czy istnieje możliwość poprawy własności ruchowych silnika jedynie przez sterowanie komutatorem elektronicznym. Ze wstępnej analizy wynika, że zastosowanie komutacji przyspieszonej może doprowadzić do zmniejszenia tętnień momentu i prędkości obrotowej silnika. W przeprowadzonych badaniach zastosowano tę właśnie metodę poprawy własności ruchowych silnika.

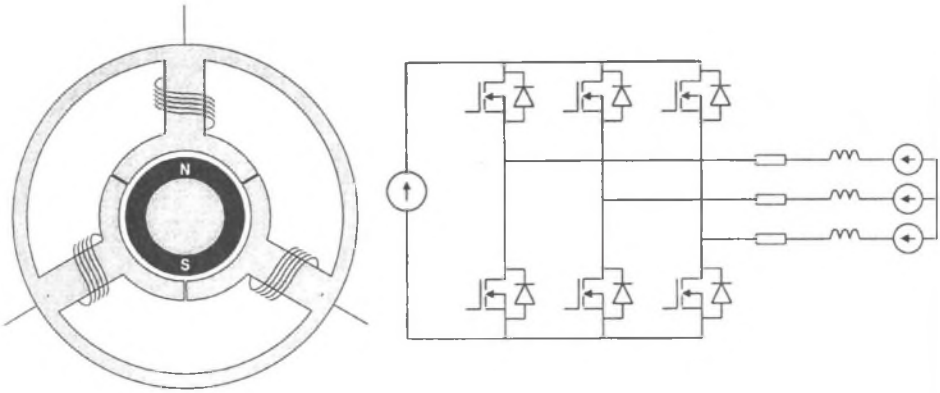
Aby zrealizować postawione cele, autorzy opracowali – opierając się na oprogramowaniu Matlab-Simulink – model komputerowy oraz przeprowadzili badania symulacyjne. W przyszłości przewiduje się weryfikację laboratoryjną otrzymanych wyników.

3. KONSTRUKCJA I ZASADA DZIAŁANIA SILNIKA

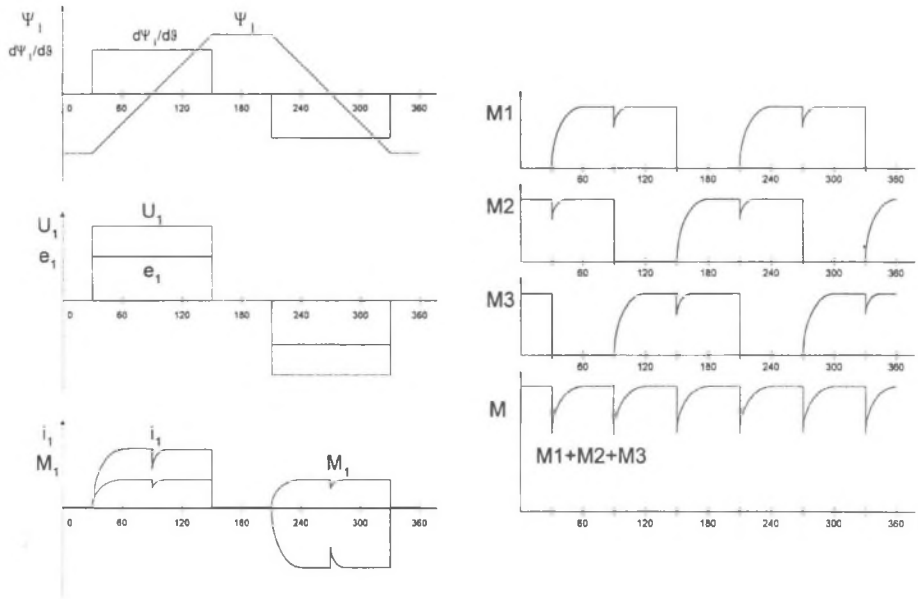
Silnik zbudowany jest z trzech zasadniczych elementów: silnika (wirnik z magnesami trwałymi, stojan z rozłożonymi w żłobkach uzwojeniami), komutatora elektronicznego (sześć tranzystorów mocy) oraz czujnika położenia wirnika (najczęściej zbudowanego z hallotronów). Na rysunku 1 przedstawiono schemat silnika DC brushless. W trakcie badań posługiwano się wyidealizowanym modelem silnika. Przyjęto następujące założenia: kąt magnesu 180^0 oraz kąt jednego uzwojenia 120^0. Oczywiście, w rzeczywistości taki silnik nie istnieje, jednakże na potrzeby przedstawienia konstrukcji oraz zasady działania model taki jest wystarczający i zrozumiały. Poniżej przedstawiono konstrukcję takiego silnika oraz przebiegi wybranych wielkości w funkcji kąta obrotu wirnika. Zaprezentowano również proces wytwarzania całkowitego momentu elektromagnetycznego rozwijanego przez silnik jako sumowanie momentów wytwarzanych w poszczególnych fazach.



Rys. 1. Budowa silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi
Fig. 1. Construction of permanent magnet brushless DC motor



Rys. 2. Konstrukcja silnika oraz schemat zastępczy całego układu
Fig. 2. Drive construction and equivalent circuit of the whole system



a) b)

Rys. 3. Przebiegi: a) wybranych wielkości fazowych silnika w funkcji kąta obrotu wirnika oraz b) momentów elektromagnetycznych poszczególnych faz silnika oraz momentu całkowitego
Fig. 3. Waveforms of a) selected phases parameters in rotor position function, b) electromagnetic torque of each phase and summary torque

4. MODEL KOMPUTEROWY

4.1. Założenia upraszczające

Przy budowie modelu komputerowego przyjęto następujące założenia upraszczające:

- obwody elektryczne są symetryczne o stałych parametrach,
- obwód magnetyczny jest nienasycony, a charakterystyka magnesowania jednoznaczna,
- moment reluktancyjny jest równy zero,
- indukcja magnetyczna pod magnesami trwałymi ma wartość stałą, natomiast w strefie pomiędzy nimi równa jest zero,
- pomija się zmiany temperatury i ich wpływ na parametry obwodu,
- zawory są idealne.

4.2. Model matematyczny

Wielkości i parametry występujące w rozpatrywanym silniku można opisać za pomocą niżej przedstawionych równań. Wyrażają one: napięcie poszczególnych faz silnika (1), siłę elektromotoryczną rotacji wytwarzaną w poszczególnych fazach silnika (2), moment elektromagnetyczny wytwarzany przez pojedynczą fazę silnika (3) oraz całkowity moment elektromagnetyczny rozwijany przez silnik (4). Należy zwrócić uwagę, że moment M_x wytworzony w x-tej fazie silnika jest sumą momentów M_{x-} oraz M_{x+} wytworzonych w czasie przepływu odpowiednio prądu „ujemnego" i „dodatniego" w fazie x.

$$u_x = R_x \cdot i_x + L_x \cdot \frac{di_x}{dt} + e_x, \tag{1}$$

$$e_x = \omega \cdot \left(\frac{d\Psi_x}{d\vartheta} \right), \tag{2}$$

$$M_x = i_x \cdot \left(\frac{d\Psi_x}{d\vartheta} \right), \tag{3}$$

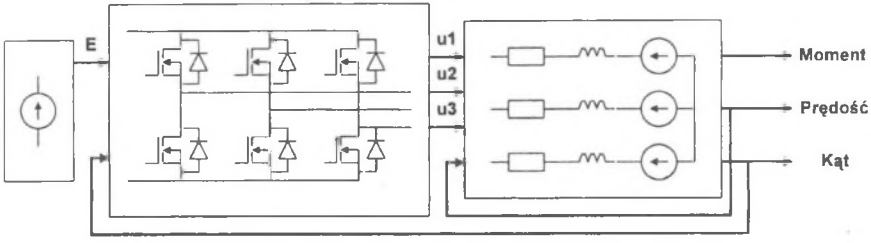
$$M = \sum_{x=1}^{3} M_x = \sum_{x=1}^{3} \frac{d\Psi_x}{d\vartheta} \cdot i_x = \frac{1}{\omega} \cdot \sum_{x=1}^{3} i_x \cdot e_x . \tag{4}$$

gdzie:

x - numer fazy silnika (x = 1, 2 lub 3),
u_x - napięcie fazowe silnika,
R_x - rezystancja jednej fazy,
L_x - indukcyjność rozproszenia fazy x silnika,
i_x - prąd płynący w fazie x,
e_x - siła elektromotoryczna wytworzona w fazie x silnika,
M_x - moment elektromagnetyczny wytworzony w fazie x silnika,
M - całkowity moment elektromagnetyczny rozwijany przez silnik,
Ψ_x - strumień magnetyczny główny skojarzony z fazą x,
ω - prędkość obrotowa silnika (wyrażona w radianach na sekundę),
ϑ - kąt położenia wirnika.

4.3. Model komputerowy

Model komputerowy zbudowano opierając się na oprogramowaniu MATLAB oraz *toolbox* SIMULINK. Jego schemat przedstawiono na rysunku poniżej.



Rys. 4. Schemat modelu komputerowego silnika bezszczotkowego
Fig. 4. Schematic diagram of DC brushless motor computer model

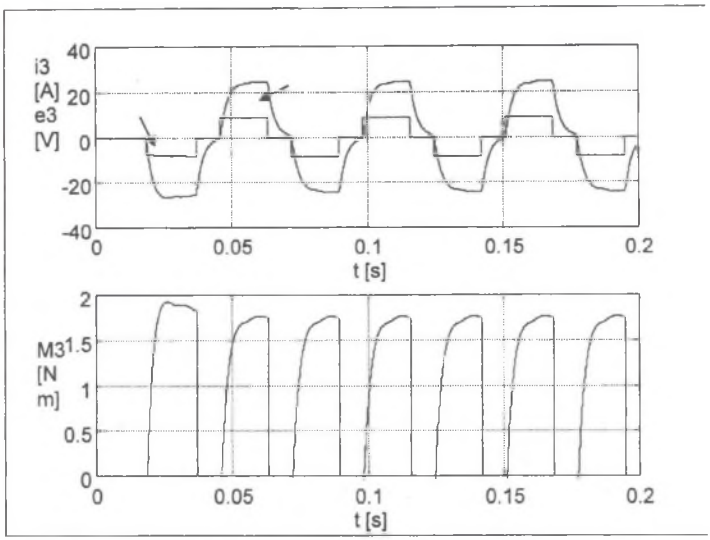
Model został skonstruowany w taki sposób, aby było możliwe przebadanie silników o różnych parametrach. Badania symulacyjne wykonano dla silnika małej mocy typu PM40. Jego podstawowe dane znamionowe to:

- wejściowa moc znamionowa: $P_N = 300$ W,
- prędkość obrotowa: $n_N = 3000$ obr/min,
- napięcie zasilania: $U_N = 24$ V,
- prąd znamionowy: $I_N = 12{,}5$ A,
- rezystancja jednej fazy: $R_x = 0{,}14\ \Omega$,
- indukcyjność jednej fazy: $L_x = 0{,}35$ mH.

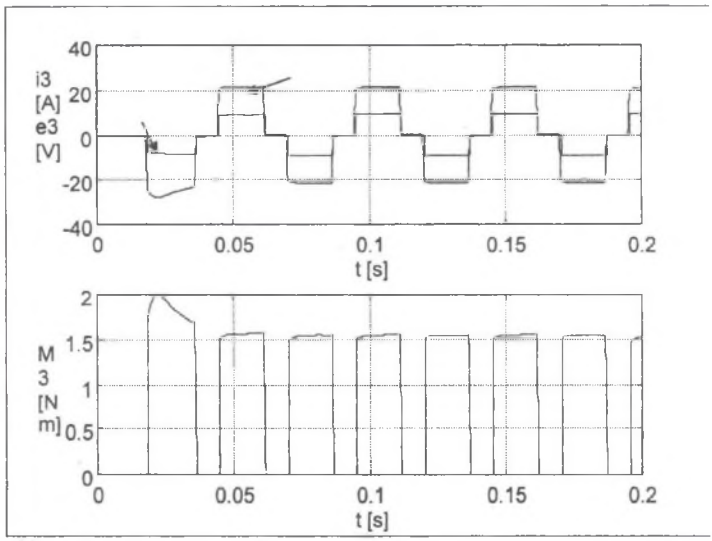
5. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Wyniki badań symulacyjnych potwierdziły, że przy zwiększeniu kąta wyprzedzenia załączenia zaworów następuje poprawa właściwości ruchowych silnika. Po osiągnięciu pewnej wartości optymalnej dalsze zwiększanie kąta wyprzedzenia nie polepsza już właściwości napędu, lecz powoduje ich pogorszenie.

Poniżej zamieszczono wyniki przykładowych symulacji komputerowych. Przedstawiono wyniki zarówno przy sterowaniu klasycznym, jak i przy zmodyfikowanej metodzie sterowania (komutacja przyspieszona). Badania przeprowadzono przy jednakowym momencie obciążenia dla obu sposobów sterowania (3 Nm). Kąt wyprzedzenia załączania zaworów komutatora elektronicznego dla rozpatrywanego silnika - w tak wyznaczonych warunkach pracy - wynosił 5^0.



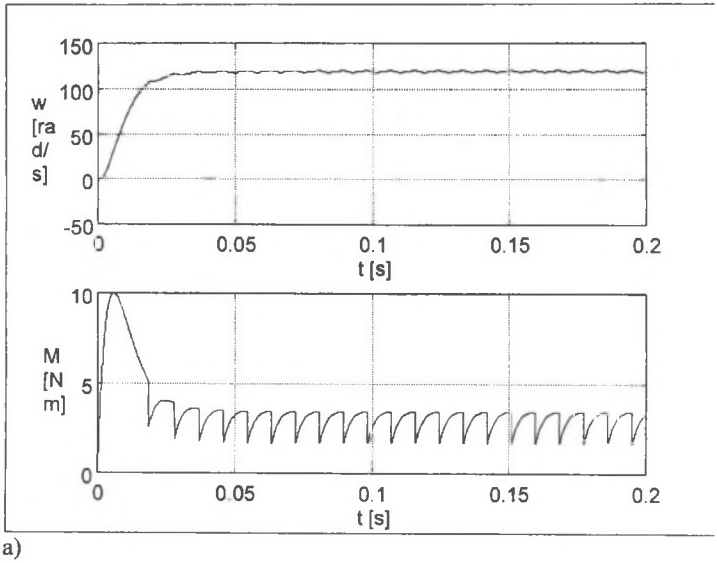
a)



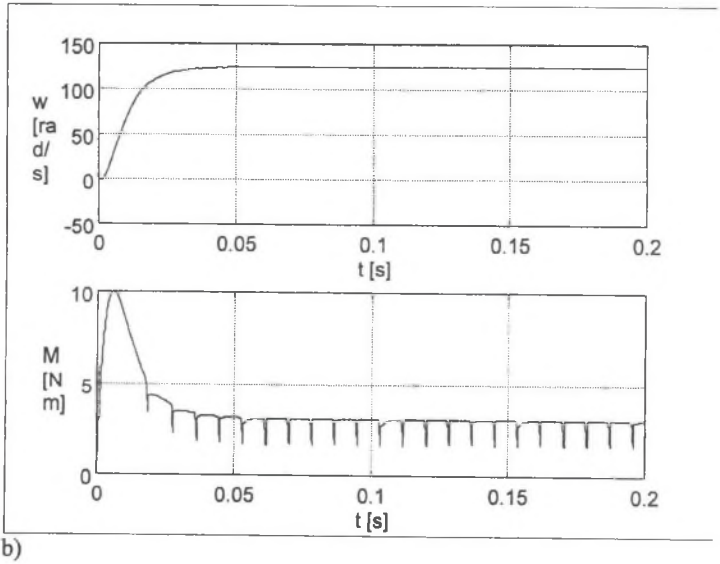
b)

Rys. 5. Przebiegi czasowe prądu, siły elektromotorycznej oraz momentu elektromagnetycznego jednej fazy silnika przy: a) sterowaniu klasycznym, b) komutacji przyspieszonej

Fig. 5. Waveforms of current, Back-EMF and torque of one phase in: a) classical control, b) over-commutation



a)



b)

Rys. 6. Przebiegi czasowe prędkości obrotowej oraz całkowitego momentu elektromagnetycznego rozwijanego przez silnik przy: a) klasycznej metodzie sterowania, b) zmodyfikowanej metodzie sterowania

Fig. 6. Waveforms of velocity and electromagnetic torque in case of : a) typical control, b) modified control

6. ZAKOŃCZENIE

Opracowany model komputerowy bezszczotkowego silnika prądu stałego umożliwia symulację pracy silnika przy różnych sposobach sterowania komutatorem elektronicznym. Badania symulacyjne przeprowadzone dla przykładowego silnika wykazały, że odpowiednie przyspieszenie punktu przełączania zaworów pozwala zmniejszać tętnienia momentu i prędkości obrotowej silnika. Podczas badań zaobserwowano poprawę następujących parametrów silnika:

- znaczne zmniejszenie tętnień momentu elektromagnetycznego,
- zwiększenie wartości momentu całkowitego (szacunkowo o około 10%),
- zwiększenie prędkości w stanie pracy ustalonej,
- eliminację pulsacji prędkości obrotowej.

Dla innych silników oraz innych warunków pracy należy spodziewać się wyników podobnych jakościowo, lecz innych rezultatów liczbowych. W trakcie dalszych prac badawczych, które są w toku, przewiduje się:

1) zwiększenie dokładności modelu oraz dobudowanie regulatora prędkości i prądu;
2) budowę stanowiska badawczego w celu laboratoryjnej weryfikacji otrzymanych wyników.

LITERATURA

1. Chalupa L.: Sensorless speed control for brushless DC motor with a low-cost micro controller: MC68HC(7)05MC4. PCIM'97, June 10-12 1997, s. 167-177.
2. Domoracki A.: Analiza wpływu sposobu sterowania komutatorem elektronicznym bezszczotkowego silnika prądu stałego z magnesami trwałymi na składowe zmienne momentu elektromagnetycznego. Projekt Badawczy nr: 8T10A07915 finansowany przez KBN - prace niepublikowane.
3. Dote Y., Kinoshita S.: Brushless servomotors - Fundamental and Applications. Clarendon Press, Oxford 1990.
4. Glinka T.: Mikromaszyny elektryczne wzbudzane magnesami trwałymi. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1995.
5. Glinka T., Krykowski K.: Model silnika z magnesami trwałymi i komutatorem elektronicznym. XXXIII Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME'97. Poznań-Kiekrz, czerwiec 1997.
6. Hendershot J. R.: Design of brushless permanent-magnet motors. Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford 1994.
7. Krykowski K., Bodora A., Sajkowski M.: Symulacja pracy silnika z magnesami trwałymi i komutatorem elektronicznym w przypadku dwubiegunowej modulacji szerokości impulsów. ZN Politechniki Śląskiej,ser. Elektryka z. 160, Gliwice 1998, s. 19-29.
8. Miller T. J. E.: Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives. Clarendon Press, Oxford 1989.
9. Zalewski A. Cegieła R.: Matlab - obliczenia numeryczne i ich zastosowania. Wydawnictwo Nakom, Poznań 1997.

Recenzent: Dr hab.inż. Jerzy Hickiewicz,prof. Politechniki Opolskiej

Wpłynęło do Redakcji 31 maja 1999 r.

Abstract

The purpose of the paper is to present possibilities of research of the influence of an electronic commutator commutation time advancing on electromechanical characteristics. Construction and principle of operation of DC Permanent Magnet Brushless motor are described in the paper. Mathematical model for simplifying assumptions is presented. Basing on the mathematical model the computer model has been worked out using Matlab-Simulink simulation environment. The aim of the made computer simulation was to estimate the influence of the electronic commutator commutation time advancing in comparison to the classical control method. It turned out that, in case of proper margin selection of commutation, motor properties improvement (lower ripples of torque and velocity, higher electromagnetic torque) is achieved, however the most advantageous margin of commutation depends on both motor parameters and operation condition (rotation speed and load torque). As an example selected results of computer simulation research have been shown. As a result of the research it was proved, that it was possible to minimize disadvantageous effects (torque and speed ripple) existing during motor operation at the classical control, by the electronic commutator control with the proper commutation margin.