ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2004
Seria: ELEKTRYKA z. 192 Nr kol. 1634

Arkadiusz DOMORACKI
Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej

SILNIKI BEZSZCZOTKOWE – KLASYCZNE METODY STEROWANIA KOMUTATOREM ELEKTRONICZNYM

Streszczenie. W artykule przedstawiono klasyczne metody sterowania komutatorem elektronicznym silnika BLDC pod względem komutacji. Dokonano podziału strategii sterowani oraz przedstawiono najistotniejsze zalety i wady. W podsumowania przedstawiono kryteria doboru odpowiedniej metody sterowania w zależności od konstrukcji komutatora elektronicznego.

BRUSHLESS MOTORS – CLASSICAL ELECTRONIC COMMUTATOR CONTROL METHODS

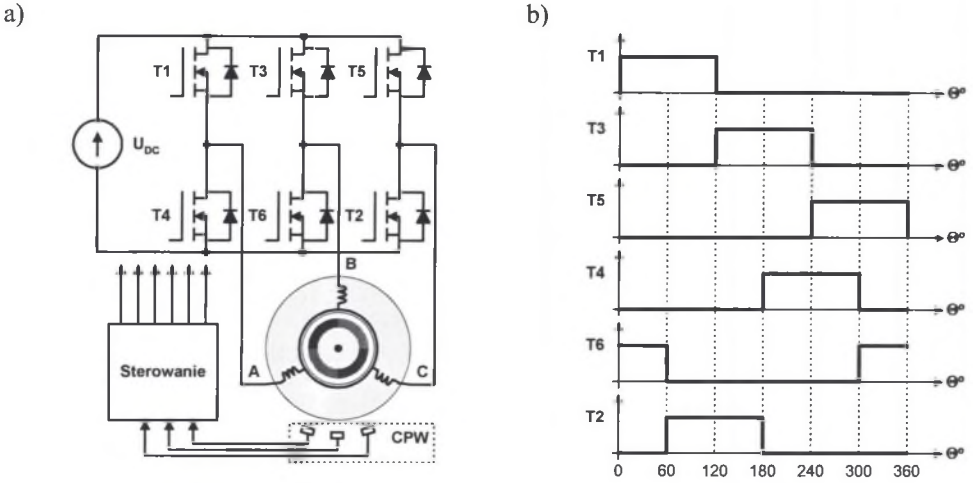
Summary. The classical BLDC motor electronic commutator control methods for the sake of commutation are presented in the paper. The classification of the control strategies, significant advantages and disadvantages are presented. The most suitable control strategy selection criteria dependent on electronic commutator construction are presented as conclusions.

1. WSTĘP

1.1. Cel pracy

Analizując literaturę podejmującą problematykę związaną z bezszczotkowymi silnikami prądu stałego (ang. *brushless DC motor BLDCM* lub w skrócie *BLDC*) trudno znaleźć jednolite uporządkowanie metod sterowania komutatorem elektronicznym. Pewne próby w tym kierunku można znaleźć w pozycjach anglojęzycznych [1, 3, 4, 6, 8, 10]. W literaturze polskojęzycznej najczęściej stosuje się podział strategii sterowania jedynie na sterowanie trapezowe i sterowanie sinusoidalne [2, 5]. Przy ocenie metody sterowania można uwzględniać kilka różnych kryteriów, np. straty mocy w zaworach komutatora, straty mocy w silniku, wykorzystanie prądowe uzwojeń silnika i wiele innych. W artykule skupiono się na wyborze metody sterowania ze względu na komutację. Przedstawiono klasyczne metody sterowania komutatorem elektronicznym silnika BLDC oraz przeprowadzono próbę uporządkowania oznaczeń i terminologii. Mianem „klasycznej metody sterowania" określa się taką strategię sterowania, w której każdy tranzystor komutatora przewodzi prąd przez okres (kąt) 120° elektrycznych, a komutacja faz następuje w równych odstępach 60°. Schemat napędu z wykorzystaniem silnika BLDC przedstawiono na rysunku 1a. Sekwencja przełączeń

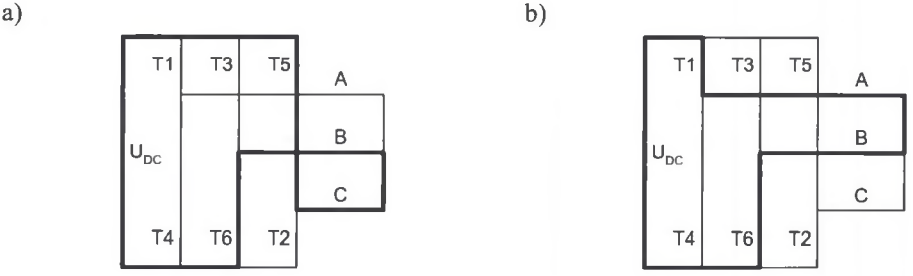
zaworów komutatora elektronicznego jest identyczna dla wszystkich rozpatrywanych strategii sterowania i zależy od aktualnego położenia wirnika względem stojana silnika (rys. 1b). Pozycja wirnika może być wyznaczana na podstawie sygnałów pochodzących z czujnika położenie wirnika (CPW z rys. 1a) zamontowanego w silniku lub z wykorzystaniem jednej z metod bezczujnikowych (ang. *sensorless*) [1, 6, 8].



Rys. 1. Napęd z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego: a) schemat układu; b) sekwencja sterowania tranzystorami komutatora elektronicznego
Fig. 1. The DC brushless drive: a) diagram of the system; b) the electronic commutator transistors switching sequence

1.2. Sposób opisu metod sterowania

Wszystkie omawiane strategie sterowania komutatorem elektronicznym zostały przedstawione na przykładzie zjawisk komutacyjnych zachodzących w położeniu wirnika oznaczonym jako 0°. Schematy zastępcze (grafy) przed i po komutacji zamieszczono na rysunku 2.

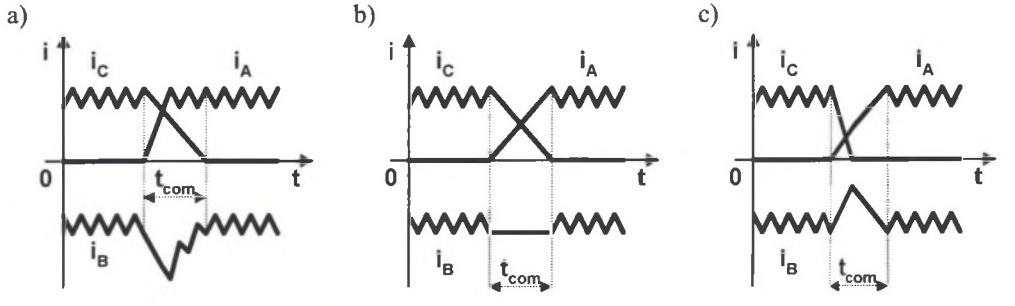


Rys. 2. Schemat zastępczy: a) przed; b) po komutacji
Fig. 2. Equivalent circuit: a) before; b) after commutation

Tranzystor T3 kończy wówczas przewodzenie prądu, natomiast tranzystor T1 rozpoczyna je. Przewodzącym zaworem grupy ujemnej jest tranzystor T6. Tranzystor kończący przewodzenie prądu nazywany będzie tranzystorem zstępującym (ang. *outgoing*). Tranzystor

rozpoczynający przewodzenie prądu nazywany będzie tranzystorem przejmującym (ang. *incoming*). Czas trwania procesów komutacyjnych oznaczono na rysunku 3 jako t_{com}. Przed komutacją prąd w silniku płynie przez uzwojenie fazowe C oraz B. Po zakończeniu komutacji prąd w silniku przepływa przez fazy A oraz B.

W zależności od warunków pracy silnika mogą występować trzy warianty komutacji prądów fazowych. Przedstawiono je na rysunku 3. Jeżeli prąd w fazie przejmującej (i_A) osiągnie wartość zadaną zanim prąd w fazie zstępującej (i_C) zaniknie do zera, to w prądzie fazy nie biorącej udziału w procesie komutacji (i_B) pojawia się dodatkowy impuls (rys. 3a). Sytuacja taka występuje często przy małych prędkościach obrotowych silnika i skutkuje pojawianiem się krótkich impulsów w przebiegu rozwijanego momentu.



Rys. 3. Przebiegi prądów dla różnych przypadków komutacji w silniku BLDC
Fig. 3. The waveforms of BLDC motor current for different commutation cases

Jeżeli prąd w fazie przejmującej osiągnie wartość zadaną dokładnie w chwili kiedy prąd w fazie zstępującej zaniknie do zera, to prąd fazy nie biorącej udziału w procesie komutacji pozostanie na stałym poziomie przez cały czas trwania procesów przejściowych (rys. 3b). W tym przypadku komutacyjne tętnienia momentu osiągają najniższy możliwy poziom. Jeśli natomiast prąd w fazie zstępującej zaniknie do zera zanim prąd w fazie przejmującej osiągnie wartość zadaną (rys. 3c), to w prądzie fazy nie biorącej udziału w procesie komutacji pojawią się załamania, które przenoszą się również na prąd pobierany ze źródła. Ich skutkiem jest występowanie komutacyjnych tętnień w przebiegu momentu. Powoduje to obniżenie średniej wartości momentu rozwijanego przez silnik. Sytuacja taka występuje często przy dużych prędkościach obrotowych silnika [3, 6, 8, 9].

1.3. Kryteria podziału metod sterowania

Ze względu na wielkość odniesienia wykorzystywaną do regulacji prądu silnika metody sterowania można podzielić na dwie kategorie. Pierwsza z nich to metody prądowe, kiedy wielkością mierzoną i wykorzystywaną do regulacji prądu silnika jest prąd po stronie DC przekształtnika lub prądy fazowe silnika. Takie metody sterowania oznacza się literą **C**. Drugą kategorię stanowią metody napięciowe – wówczas wielkością odniesienia wykorzystywaną do regulacji prądu silnika jest napięcie po stronie DC komutatora. Takie metody sterowania oznacza się literą **V** [6].

Ze względu na okres (czas, kąt) pracy regulacyjnej poszczególnych zaworów komutatora elektronicznego strategie sterowania można podzielić na dwa przypadki. Pierwszy z nich to realizacja funkcji regulacyjnej przez jeden z tranzystorów przez okres 120° elektrycznych. Takie metody sterowania oznacza się symbolem **120** (czasem 120°). W drugim przypadku

wybrany tranzystor realizuje funkcję regulacyjną przez okres 60° elektrycznych. Przez okres kolejnych 60° funkcję regulacyjną przejmuje zawór z grupy przeciwnej. Takie metody sterowania oznacza się symbolem **60** (lub też 60°) [6].

Ze względu na to, który z zaworów komutatora elektronicznego realizuje funkcję regulacyjną, metody sterowania można podzielić na trzy przypadki. Jeżeli funkcję regulacyjną pełni zawsze (lub jako pierwszy) tranzystor przejmujący przewodzenie, to taką metodę sterowania oznacza się symbolem **Q+** (czasem Q1). Jeżeli funkcję regulacyjną pełni zawsze (lub jako pierwszy) tranzystor nie biorący bezpośrednio udziału w procesie komutacji, to taką metodę sterowania oznacza się symbolem **Q-** (czasem Q6). Jeśli tranzystory obu grup biorą jednocześnie udział w pełnieniu roli regulacyjnej, to takie sterowanie określa się najczęściej nazwą „sterowanie bipolarne". Tej strategii sterowania nie oznacza się żadnym dodatkowym symbolem [1, 6, 7].

2. METODA STEROWANIA C120Q+ ORAZ C120Q-

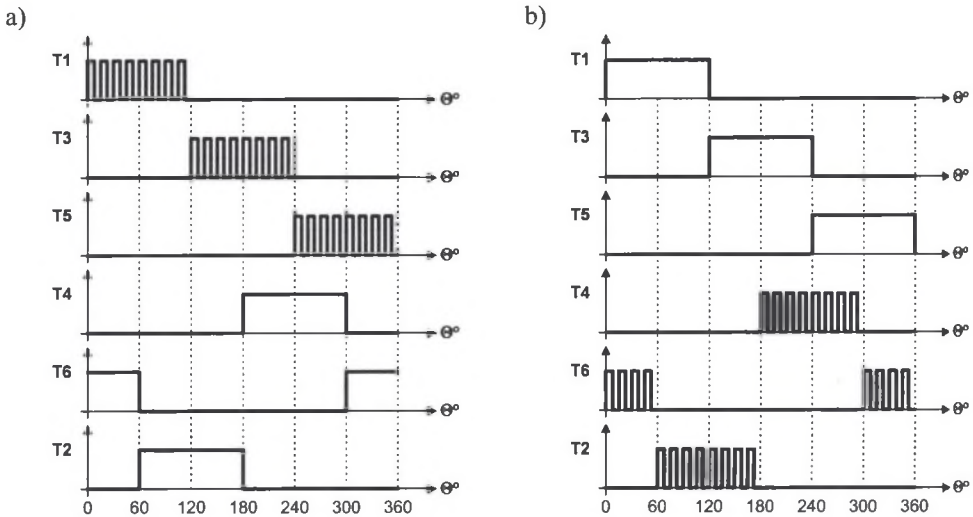
2.1. Strategia C120Q+

W metodzie tej do regulacji wartości prądu wykorzystuje się tylko tranzystory grupy dodatniej – przyłączone do dodatniego bieguna źródła napięcia zasilania. Do sterowania prądem silnika stosuje się sprzężenie prądowe od prądu mierzonego w gałęzi przejmującej lub w obwodzie DC. Okres pełnienia funkcji regulacyjnej wynosi 120° elektrycznych. Tranzystory grupy ujemnej (przyłączone do ujemnego bieguna źródła napięcia zasilania) pełnią w tej strategii jedynie rolę komutatorową. Pozostają one stale załączone w przedziale swojego przewodzenia. Funkcje bramkowe tranzystorów komutatora elektronicznego dla tej strategii sterowania przedstawiono na rysunku 4a. Wykorzystanie sygnału z czujnika umieszczonego w fazie przejmującej zapewnia to, że prąd w tej fazie (A) nie przekroczy zadanej wartości ustalonej. Jednakże tak usytuowany czujnik nie wykrywa prądu płynącego w fazie B, który w trakcie komutacji faz silnika (t_{com} z rysunku 3) jest sumą prądu narastającego w fazie A oraz zanikającego prądu fazy C. W związku z tym prąd fazy B może przekraczać zadaną wartość i powodować pojawianie się krótkich impulsów o znacznej wartości (rys. 3a). Impulsy te będą również zauważalne w całkowitym prądzie pobieranym ze źródła zasilania oraz wpłyną na zwiększenie komutacyjnych tętnień w przebiegu momentu rozwijanego przez silnik.

2.2. Metoda sterowania C120Q-

W metodzie tej do regulacji wartości prądu wykorzystuje się tylko tranzystory grupy ujemnej – przyłączone do ujemnego bieguna źródła napięcia zasilania Pełnią one funkcję regulacyjną przez okres 120°. Symbol strategii oznacza, że jest to metoda wykorzystująca sprzężenie prądowe. Tranzystory grupy dodatniej spełniają jedynie rolę komutatorową. Sygnały bramkowe dla tej strategii sterowania przedstawia rysunek 4b. W literaturze anglojęzycznej tę metodę sterowania oznacza się czasem symbolem C120T6, gdzie T6 symbolizuje numer tranzystora w komutatorze elektronicznym [1, 6]. Jednak z uwagi na niejednolitą numerację zaworów przekształtnika stosowaną przez różnych autorów, taki sposób określania strategii sterowania może być niejednoznaczny. Realizując tę strategię sterowania do regulacji prądu silnika wykorzystuje się sygnały pochodzące z czujnika umieszczonego w fazie nie biorącej bezpośrednio udziału w procesie komutacji. Jest to zasadnicza różnica pomiędzy metodą sterowania C120Q+ oraz C120Q-. Oznacza to, że stromość narastania prądu w fazie przejmującej (A) może być ograniczana przez odpowiednie sterowanie tranzy-

storem T6. W tym przypadku możliwe jest takie sterowanie pracą komutatora elektronicznego, aby w przedziałach komutacji prąd w fazie, która nie bierze bezpośrednio udziału w procesach komutacyjnych, pozostał na stałym poziomie (rys. 3b). Wówczas prąd pobierany ze źródła nie zawiera tętnień i w związku z tym nie występują komutacyjne tętnienia momentu rozwijanego prze silnik.



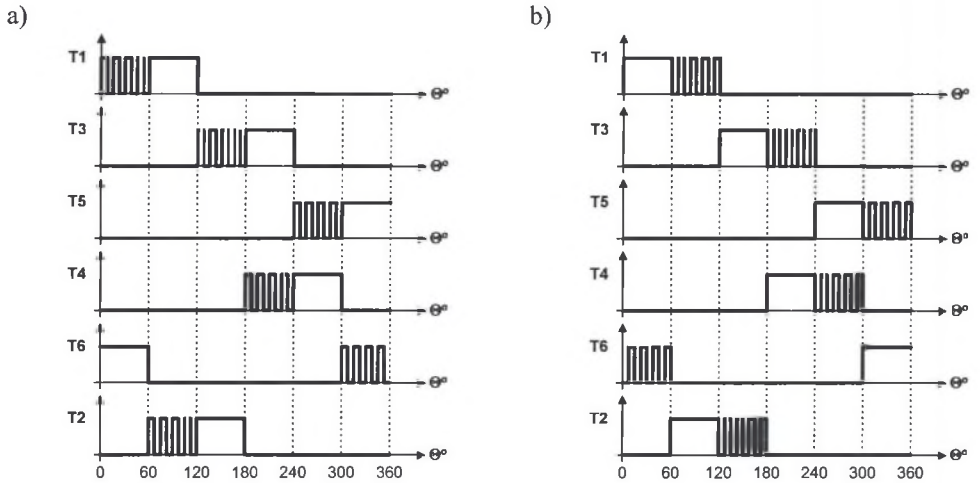
Rys. 4. Sposób sterowania tranzystorami komutatora elektronicznego przy zastosowaniu strategii sterowania: a) Q120+; b) Q120-
Fig. 4. The electronic commutator transistors control method in case of using: a) Q120+ strategy; b) Q120- strategy

Wspólną cechą wszystkich strategii sterownia oznaczonych symbolem C jest to, że są one szczególnie chętnie implementowane w komutatorach elektronicznych wykorzystujących układy śledzące z histerezowymi regulatorami prądu.

3. METODA STEROWANIA C60+ ORAZ C60Q-

3.1. Strategia C60Q+

Ta metoda sterowania jest podobna do strategii C120C+ z tą różnicą, że tranzystor grupy dodatniej (T1) pełni funkcję regulacyjną przez okres pierwszych 60°; wówczas tranzystor grupy ujemnej (T6) pozostaje stale załączony. Przez kolejne 60° tranzystor grupy dodatniej pozostaje załączony na stałe, a funkcję regulacyjną pełni przejmujący tranzystor grupy ujemnej (T2). Funkcje bramkowe zaworów komutatora dla tej strategii sterowania przedstawia rysunek 5a. Przy zastosowaniu tej metody sterowania cykl pracy wykonywany przez wszystkie tranzystory komutatora elektronicznego jest taki sam.



Rys. 5. Sposób sterowania tranzystorami komutatora elektronicznego przy zastosowaniu strategii sterowania: a) Q60+; b) Q60-

Fig. 5. The control method of the electronic commutator transistors in case of using: a) Q60+ strategy; b) Q60- strategy

3.2. Metoda sterowania C60Q-

Strategia sterowania oznaczona jako C60Q- jest zbliżona do metody C120C-, z tą różnicą, że tranzystor grupy dodatniej (T1) przez okres pierwszych 60° jest załączony na stałe, a funkcję regulacyjną pełni tranzystor grupy ujemnej (T6). Przez okres kolejnych 60° tranzystor grupy dodatniej pełni funkcję regulacyjną, a przejmujący tranzystor grupy ujemnej jest załączony na stałe. Sygnały sterujące zaworami komutatora dla tej strategii sterowania przedstawia rysunek 5b. Tak jak w przypadku metody sterowania C60Q+, cykl pracy wykonywany przez wszystkie tranzystory komutatora elektronicznego jest jednakowy.

4. POZOSTAŁE STRATEGIE STEROWANIA

4.1. Strategie sterowania typu V

Strategie sterowania typu V różnią się od wcześniej opisanych metod tym, że wielkością odniesienia wykorzystywaną do regulacji prądu silnika jest napięcie mierzone po stronie DC komutatora elektronicznego. Do regulacji chwilowej wartości prądu nie stosuje się czujnika prądu. Jeśli jednak przekształtnik jest wyposażony w taki czujnik, to może być on wykorzystany nie tylko do zabezpieczenia nadprądowego, ale również do regulacji momentu wytwarzanego przez silnik. Metody typu V stosuje się najczęściej, gdy komutator elektroniczny pracuje jako falownik napięcia z modulacją szerokości impulsów (MSI, ang. *PWM*). Zaletą takiego sterowania jest stała częstotliwość przełączeń zaworów przekształtnika. Dla osiągnięcia żądanej wartości prądu silnika należy odpowiednio regulować współczynnik wypełnienia. Sygnały sterujące wyzwalaniem zaworów komutatora elektronicznego są podobne do występujących w przypadku metod sterowania typu C [6, 10].

4.2. Sterowanie bipolarne

Metodę sterowania określa się jako bipolarną, jeżeli w danej chwili oba tranzystory pełnią funkcję regulacyjną. W związku z tym okres realizacji funkcji regulacyjnej przez każdy z tranzystorów wynosi 120°. Sterowanie bipolarne może być stosowane w metodach typu C oraz w strategiach typu V. Zaletą sterowania bipolarnego jest to, że w stanach przejściowych obwody komutacyjne są identyczne, bez względu na to, która grupa tranzystorów przejmuje przewodzenia prądu. W związku z tym czas trwania procesów komutacyjnych jest stały. Sytuacja taka nie występuje we wcześniej opisywanych metodach, gdzie zależnie od grupy zaworów przejmujących przewodzenie uzyskuje się różne schematy komutacyjne i w związku z tym również niejednakowe czasy komutacji [1, 3, 11].

5. ZAKOŃCZENIE

W artykule przeprowadzono podział klasycznych metod sterowania komutatorem elektronicznym silnika BLDC ze względu na komutację. Z przedstawionych rozważań wynika, że wybór konkretnej strategii sterowania zależy nie tyko od „preferencji" projektanta, ale jest również zdeterminowany konstrukcją komutatora. Można więc zaproponować następujące kryteria selekcji metody sterowania:

- Jeżeli do regulacji chwilowej wartości prądu stosuje się sprzężenie prądowe, to jako metodę sterowania należy wybrać strategię oznaczoną symbolem C. W przypadku jej realizacji praktycznej najczęściej stosuje się układy regulacyjne ze śledzeniem prądu (regulatory histerezowe).
- Jeśli do regulacji prądu wykorzystuje się sprzężenie napięciowe, to właściwe jest stosowanie strategii sterowania oznaczonych symbolem V. Komutator elektroniczny pracuje jako falownik napięcia z modulacją szerokości impulsów.
- Jeżeli wymagane jest, aby wszystkie tranzystory komutatora wykonywały jednakowy cykl pracy, to należy zastosować strategię oznaczoną symbolem 60.
- Jeśli wystarczy, aby tylko jedna grupa zaworów (dodatnia lub ujemna) realizowała funkcję regulacyjną, to należy zastosować metodę sterowania oznaczoną symbolem 120.
- Jeśli do regulacji prądu silnika wykorzystuje się sygnał z czujnika umieszczonego w obwodzie DC, to należy zastosować metodę Q+.
- Jeśli do regulacji prądu silnika wykorzystuje się sygnał z czujników prądu umieszczonych w gałęziach pomiędzy przekształtnikiem a silnikiem, to najkorzystniejsze jest stosowanie strategii Q-.

Uwzględnienie tak sformułowanych kryteriów powinno zapewnić uzyskanie możliwie minimalnego poziomu komutacyjnych tętnień momentu. Jest to obecnie jedno z podstawowych wymagań stawianych napędom z silnikiem BLDC.

LITERATURA

1. Berendsen C., Champenois G., Bolopin A.: *Commutation strategies for brushless DC motors: influence on instant torque*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol.8, no. 2 April 1993.
2. Dencer A., Glinka T., Jakubiec M., Polak A.: *Bezszczotkowy silnik prądu stałego – sposoby sterowania komutatorem elektronicznym*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr 65, 2003, BOBRME Komel, Katowice 2003.
3. Dixon J., Leal I.: *Current control strategy for brushless DC motors based on a common DC signal*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol.17, no. 2 March 2002.
4. Dote Y., Kinoshita S.: *Brushless servomotors - Fundamental and Applications*, Clarendon Press, Oxford 1990.
5. Dudzikowski I., Pawlaczyk L.: *Maszyny prądu stałego o magnesach trwałych i ich sterowanie – stan aktualny i perspektywy rozwoju*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Elektryka z. 176, Gliwice 2001.
6. Hendershot J.R., Miller T.J.E.: *Design of brushless permanent-magnet motors*, Magna Physics Publishing and Calderon Press, Oxford 1994.
7. Hetmańczyk J., Domoracki A., Krykowski K.: *3,6 kW DC brushless motor control system – The influence of position sensors fault on motion properties*, EDPE'2003, Slovakia 24-26 September 2003.
8. Krishnan R.: *Electric motor drives modeling, analysis and control*, Prentice Hall 2001.
9. Lee K., Park J., Yeo H., Yoo J., Jo H.: *Current control algorithm to reduce torque ripple in brushless DC motor*, Proceedings ICPE'98, Seoul 1998.
10. Ohm D., Park J.: *About commutation and current control methods for brushless motors*, 29 annual IMCSD symposium, San Jose 1999.
11. Pillay P., Krishnan R.: *Modeling, simulation and analysis of permanent-magnet motor drives, part II: the brushless DC motorr drive*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol.25, no. 2, March/April 1989.

Recenzent: Dr hab. inż. Maciej Tondos, prof. AGH

Wpłynęło do Redakcji: 4 maja 2004 r.