

Krzysztof KRYKOWSKI, Aleksander BODORA
Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej

KOMUTATOR ELEKTRONICZNY UMOŻLIWIAJĄCY DWUSTREFOWĄ PRACĘ SILNIKA PMBDC

Streszczenie. W artykule omówiono zagadnienia związane z pracą dwustrefową silników bezszczotkowych prądu stałego (PMBDC). Przedstawiono przegląd znanych obecnie metod uzyskiwania pracy dwustrefowej silników PMBDC, następnie przedstawiono alternatywną koncepcję komutatora o zmiennej strukturze: mostek/półmostek. Zaproponowano oryginalną topologię układu komutatora elektronicznego, umożliwiającą praktyczną realizację takiej koncepcji. Omówiono zasadę działania układu oraz pokazano wybrane wyniki badań eksperymentalnych.

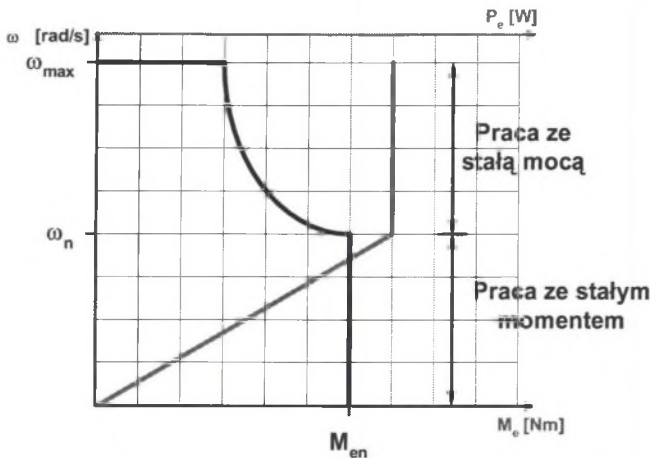
ELECTRONIC COMMUTATOR WITH POSSIBILITY OF TWO ZONE OPERATION OF PMBDC MOTOR

Summary. The issues connected with the brushless direct current motors (PMBDC) two-zone operation are referred in the paper. The survey of currently known two-zone operation methods of the PMBDC motor is presented. Next, the alternative conception of bridge-halfbridge variable commutator structure is introduced. There is presented the original topology of the electronic commutator, which allows practical realisation of the conception. The principle of the system operation and some selected experimental test results are described too.

1. WPROWADZENIE

W rozwiązaniach praktycznych spotyka się napędy elektryczne, w których wymaga się pracy ze zwiększoną prędkością obrotową, przy czym moment obciążenia, jest mniejszy od momentu znamionowego. Tego typu praca silnika jest nazywana w literaturze „pracą ze stałą mocą” [5, 16] i można ją przedstawić jako II strefę naturalnej charakterystyki mechanicznej silnika rys. 1.

Aby uzyskać pracę ze stałą mocą, zmniejsza się strumień magnetyczny w szczelinie powietrznej, odwrotnie proporcjonalnie do prędkości obrotowej silnika. W przypadku silników prądu przemiennego pracę przy stałej mocy uzyskuje się podwyższając częstotliwość napięcia przy stałej wartości jego amplitudy. W przypadku silników wzbudzanych magnesami trwałymi strumień magnetyczny jest stały. Z tego powodu nie jest możliwa ani regulacja wzbudzenia analogiczna do regulacji wzbudzenia silnika obcowzbudnego DC, ani regulacja wzbudzenia analogiczna do stosowanej w silnikach prądu przemiennego [7, 8].



Rys. 1. Charakterystyki mechaniczne silnika $\omega=f(M_e)$, $\omega=f(P_e)$

Fig. 1. Mechanical characteristics of electric motor $\omega=f(M_e)$, $\omega=f(P_e)$

Zmiana zakresu prędkości obrotowej silników elektrycznych wiąże się ze zmianą ich prędkości biegu jałowego. W przypadku pracy dwustrefowej, wraz ze zwiększaniem prędkości biegu jałowego następuje równoczesne zmniejszanie momentu elektromagnetycznego [1, 16]. Dla silników prądu stałego (w tym także bezszczotkowych) obowiązują zależność:

$$\omega_0 = \frac{U_d \cdot \pi}{\xi \cdot N \cdot \Phi_g}, \quad (1)$$

U_d oznacza wartość napięcia zasilania, Φ_g oznacza strumień magnetyczny w szczelinie powietrznej silnika, N oznacza liczbę zwojów uzwojenia twornika przypadających na fazę, natomiast współczynnik ξ , związany jest z konfiguracją uzwojeń stojana. Współczynnik ten, dla silnika trójfazowego (najczęściej spotykanego w rozwiązaniach praktycznych), wynosi:

$$\begin{aligned} \xi &= 1, & \text{dla połączenia w gwiazdę,} \\ \xi &= 1/\sqrt{3}, & \text{dla połączenia w trójkąt,} \\ \xi &= 1/2, & \text{dla struktury unipolarnej (półmostkowej).} \end{aligned}$$

Współczynnik ξ na ogół nie jest stosowany w literaturze, przyjęto go, aby uwidatnić wpływ danych konstrukcyjnych silnika i sposobu łączenia uzwojeń na prędkość obrotową.

Z zależności (1) wynika, że teoretycznie, istnieją cztery sposoby zwiększania zakresu prędkości biegu jałowego silników bezszczotkowych:

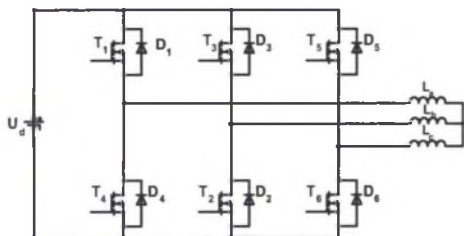
- poprzez zwiększanie napięcia zasilania,
- poprzez osłabianie strumienia magnetycznego w szczelinie powietrznej silnika,
- poprzez zmianę liczby zwojów uzwojenia twornika,
- poprzez zmianę konfiguracji połączeń uzwojeń twornika.

Przykłady rozwiązań, w których stosuje się osłabianie strumienia, zmianę liczby zwojów oraz zmianę konfiguracji przedstawiono w [2, 4, 5, 7, 8, 12-15].

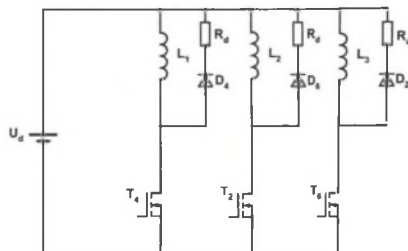
Wszystkie znane metody uzyskiwania pracy dwustrefowej silników bezszczotkowych wymagają stosowania silników o specjalnej konstrukcji obwodów magnetycznych oraz rozbudowanych struktur obwodów zasilających i sterowania. Brak jest natomiast opracowań, które nadawałyby się do zastosowania w typowych silnikach bezszczotkowych i nie wymagałyby istotnego zwiększania liczby zaworów. Sytuacja ta uzasadnia potrzebę podjęcia tematu.

2. KONCEPCJA ZMIENNEJ STRUKTURY KOMUTATORA ELEKTRONICZNEGO

Podstawową strukturą komutatora elektronicznego jest struktura mostka (bipolarna), przedstawiona na rys. 2a. W praktyce spotyka się czasem również strukturę półmostka (unipolarna), zawierająca tylko trzy zawory elektroniczne. Schemat takiej struktury przedstawiono na rys. 2b.



Rys. 2a. Silnik PMBDC układzie mostka
Fig. 2a. PMBDC motor in bridge system



Rys. 2b. Silnik PMBDC w układzie półmostka
Fig. 2b. PMBDC motor in half bridge system

Przyjmując metodę opisu silnika taką, jak dla silnika obcowzbudnego prądu stałego [6], można zauważyć, że zastępczy współczynnik wzbudzenia widziany z zacisków obwodu prądu stałego jest dla struktury półmostka dwukrotnie mniejszy niż dla struktury mostka.

$$K_{fB} = 2 \cdot K_{fHB} \quad (2)$$

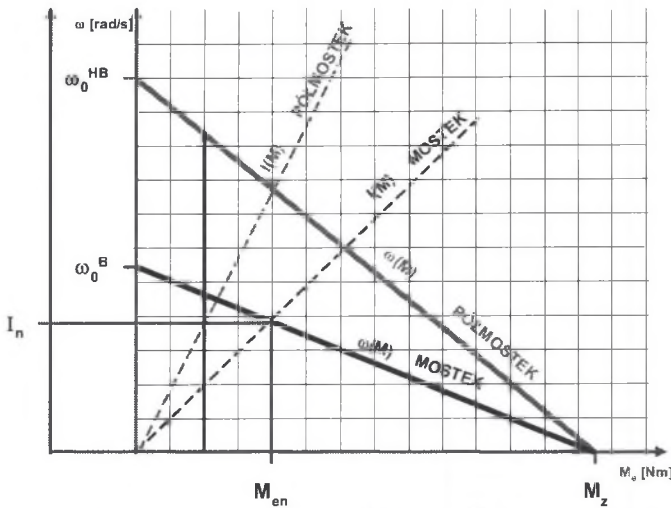
Wynika to z faktu, że w strukturze półmostka strumień współpracuje tylko z jednym uzwojeniem aktywnym, podczas gdy w strukturze mostka strumień współdziała z dwoma aktywnymi uzwojeniami stojana. Wartość SEM indukowanej w tworniku silnika jest więc w przypadku mostka większa od SEM indukowanej w przypadku półmostka. Jeśli wartość napięcia zasilającego jest taka sama dla obydwu przypadków, to aby w zastępczym obwodzie prądu stałego wystąpiła taka sama całkowita SEM, silnik w układzie półmostka powinien wirować z dwukrotnie większą prędkością, co opisuje zależność (3).

$$\frac{\omega_{0HB}}{\omega_{0B}} = \frac{U_d}{K_{fHB}} \cdot \frac{K_{fB}}{U_d} = 2 \quad (3)$$

Moment elektromagnetyczny silnika zasilanego w układzie półmostka jest natomiast dwukrotnie mniejszy niż moment elektromagnetyczny silnika pracującego w układzie mostka. Wynika to z zależności:

$$\frac{M_{eHB}}{M_{eB}} = \frac{K_{fHB} \cdot I_z}{K_{fB} \cdot I_z} = 0.5 \quad (4)$$

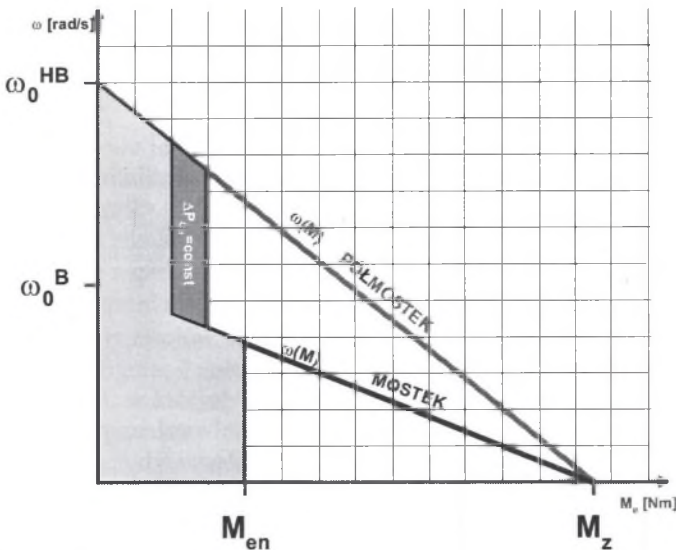
Interpretację graficzną powyższych rozważań stanowią charakterystyki mechaniczne $\omega_m = f(M_e)$ oraz $\omega_m = f(I_s)$, silnika pracującego w obydwu strukturach. Charakterystyki te przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Charakterystyki elektromechaniczne $\omega_m=f(M_e)$, $\omega_m=f(I_e)$ silnika PMBDC pracującego w układzie mostka i półmostka

Fig. 3. Electromechanical characteristics $\omega_m=f(M_e)$, $\omega_m=f(I_e)$ of PMBDC motor working in bridge and half bridge configuration

Przedstawione rozważania stanowiły inspirację do przyjęcia nowej koncepcji zasilania silnika. Koncepcja ta polega na pracy silnika w pierwszej strefie w układzie mostka i przełączaniu komutatora do układu półmostka dla pracy w drugiej strefie. Charakterystykę mechaniczną napędu pracującego według proponowanej idei przedstawiono na rys. 4. Ze względu na rozkład fazowych SEM indukowanych w silniku PMBDC, pomiędzy strukturą mostka i półmostka zachodzą interakcje, które uniemożliwiają poprawną pracę napędu. Zjawiska te szerzej mówiono w [10, 11].

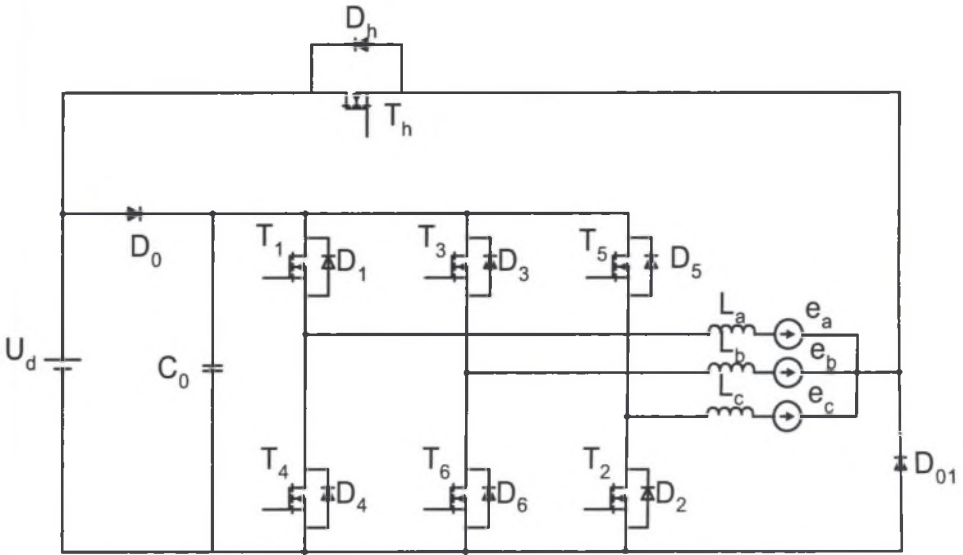


Rys. 4. Przewidywane charakterystyki mechaniczne napędu z komutatorom o przełączanej strukturze

Fig. 4. Predicted mechanical characteristics of drive system with changing structure

3. NOWA STRUKTURA KOMUTATORA ELEKTRONICZNEGO

Wynikiem prac analityczno-symulacyjnych był pomysł nowej struktury komutatora elektronicznego, którą przedstawiono na rys. 5. W układzie oprócz struktury mostka (tranzystory T_1 - T_6) znajduje się zawór pełnosterowalny T_h łączący punkt gwiazdowy silnika z dodatnim biegunem źródła zasilania, dioda D_{01} łącząca ujemny biegun źródła zasilania z punktem gwiazdowym silnika oraz układ buforujący składający się z diody D_0 oraz kondensatora C_0 , rozmieszczone jak na rysunku.



Rys. 5. Schemat proponowanej struktury komutatora elektronicznego
Fig. 5. Diagram of proposed electronic commutator structure

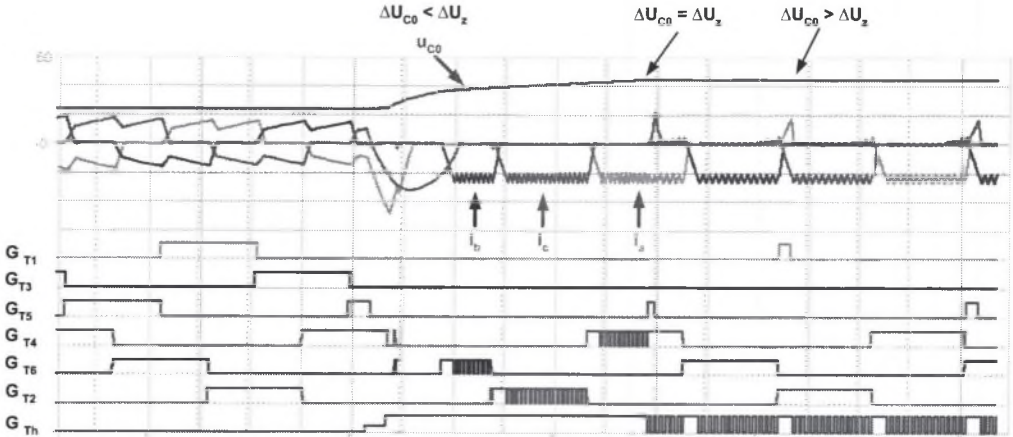
Układ umożliwia pracę silnika w strukturze mostka (łącznik T_h jest wyłączony), co odpowiada pracy w I zakresie prędkości obrotowej lub w strukturze półmostka (łącznik T_h jest załączony), czemu odpowiada praca w II strefie.

W czasie pracy w strukturze mostka zawory T_1 - T_6 pracują w taki sposób, jak występuje to w klasycznym układzie mostkowym, szczegółowo opisanym np. w [3, 7].

Przejście układu do pracy w strukturze półmostka inicjowane jest poprzez załączenie łącznika T_h . W tym czasie dolne zawory komutatora elektronicznego T_2 - T_6 pracują jako zawory główne, co oznacza, że prąd płynący przez nie powoduje wytwarzanie momentu elektromagnetycznego silnika. Jeżeli tranzystor T_h jest załączony, a zawory grupy ujemnej zapewniają regulację prądu, to w wyniku przełączania indukcyjności fazowych stojana i występowania diod zwrotnych zaworów grupy dodatniej D_1 - D_3 następuje doładowywanie kondensatora, a tym samym zwiększanie napięcia na nim. Jeżeli natomiast regulację prądu uzyskuje się poprzez impulsowanie tranzystora T_h , to zawory grupy ujemnej przełączane są zgodnie z funkcją komutatorową, a doładowanie kondensatora następuje tylko w czasie komutacji faz.

Praca zaworów grupy dodatniej związana jest z utrzymywaniem zadanego napięcia na kondensatorze. Na rys. 6 przedstawiono sposób sterowania zaworami komutatora w czasie przełączenia struktury z układu mostka do układu półmostka. W chwili następującej po

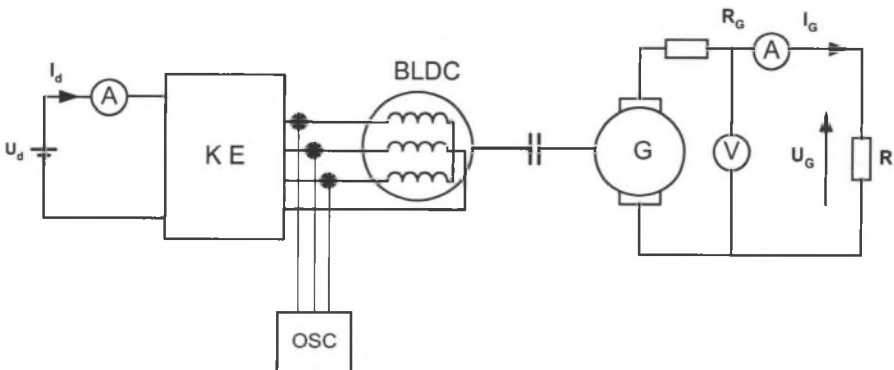
zmianie struktury zawory grupy ujemnej pełnią funkcję regulacji prądu. Dzięki temu następuje wzrost wartości napięcia na kondensatorze. Wartość napięcia powinna być utrzymywana na takim poziomie, aby nie następował przepływ prądu w czasie trwania aktywnej półfali SEM o przeciwnej polaryzacji. W praktyce powinna ona być równa w przybliżeniu dwukrotnej wartości napięcia zasilającego. Po doładowaniu kondensatora zadanie regulacji prądu przejmuje tranzystor T_h . W chwilach gdy napięcie na kondensatorze przekracza wartość zadaną, załączane są odpowiednie tranzystory grupy dodatniej.



Rys. 6. Zasada sterowania komutatorem elektronicznym w układzie półmostka
Fig. 6. Control principles of electronic commutator working in half bridge system

4. WERYFIKACJA LABORATORYJNA

Schemat układu laboratoryjnego przedstawiono na rys. 7. Układ składał się z silnika bezszczotkowego typu RTM ct-85-1 produkcji ELKAR – Warszawa, o mocy około 300 W. Silnik posiadał dostępny punkt gwiazdowy stojana i był połączony z komutatorem o przełączalnej strukturze. Badany napęd był zasilany napięciem o wartości 24 V z baterii akumulatorów trakcyjnych o napięciu 24 V i pojemności 42 Ah. Obciążenie silnika napędowego stanowił silnik komutatorowy o mocy 400 W, pracujący jako prądnica.



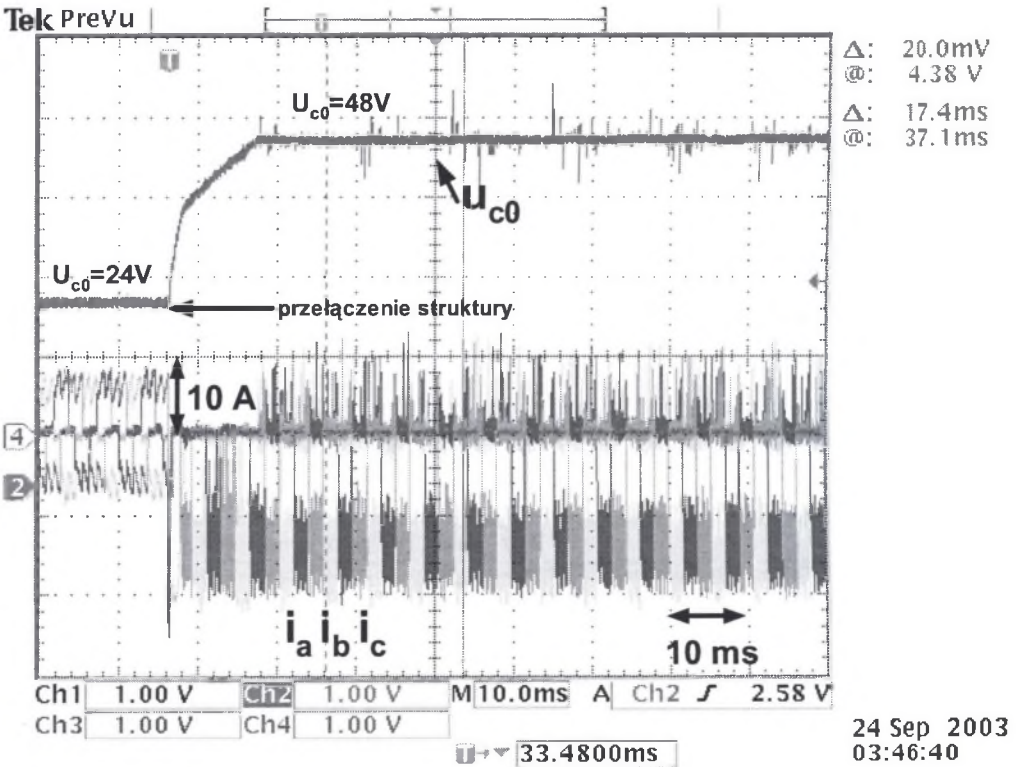
Rys. 7. Schemat układu laboratoryjnego
Fig. 7. Diagram of laboratory system

Układ komutatora elektronicznego był zbudowany z siedmiu tranzystorów MOSFET typu IRF 2807. Do wyzwalania tranzystorów mostka zastosowano typowy sterownik IR 2130, zaś do wyzwalania dodatkowego tranzystora T_h zastosowano układ TLP 250. Jako diodę D_0 zastosowano diodę Shottky'ego typu: 40CPQ080. Dioda ta współpracowała z kondensatorem elektrolitycznym typu ALS41A, o pojemności $C=2200 \mu\text{F}$ i napięciu znamionowym $U=100 \text{ V}$.

Do pomiaru prądów fazowych zastosowano przetworniki prądowe LEM oraz dwa mostki prostownicze. Dzięki takiemu rozwiązaniu uzyskano dwa rozdzielone sygnały proporcjonalne do sumy prądów, polaryzacji dodatniej I^+ oraz polaryzacji ujemnej I^- .

W czasie pracy w strukturze mostka na potrzeby sterowania korzystano z sygnału prądu polaryzacji ujemnej, natomiast w czasie pracy w strukturze półmostka korzystano z obu tych sygnałów. Układ pomiaru napięcia składał się z przetwornika napięcia LEM, przy czym wielkością mierzoną była różnica pomiędzy napięciem na kondensatorze C_0 a napięciem zasilającym U_d .

Sygnały proporcjonalne do prądów fazowych, jak również sygnał proporcjonalny do napięcia mierzonego podawano na wejścia komparatorów analogowych LM393 pracujących w układzie z histerezą.



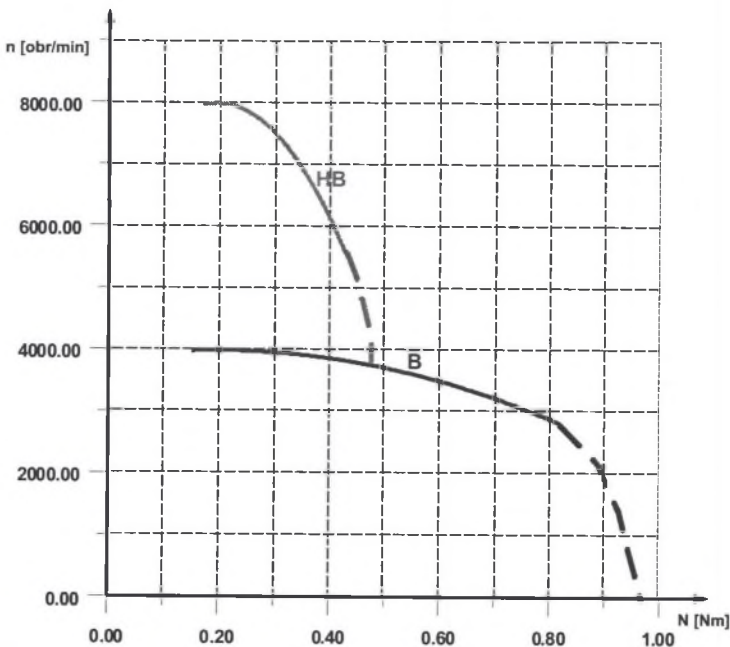
Rys. 8. Przebiegi prądów fazowych silnika i napięcia na kondensatorze, zmierzone w czasie przejścia układu ze struktury mostka do struktury półmostka

Fig. 8. Measured waveforms of motor phase currents and capacitor voltage during bridge to half bridge reconfiguration of the test motor

Układ sterowania komutatorem elektronicznym zbudowano opierając się na sterowniku mikroprocesorowym typu: ZD-3048F. Rdzeń tego sterownika mikroprocesorowego zawiera mikrokontroler Hitachi H8/3048F. Oprócz wewnętrznych zasobów mikrokontrolera sterownik jest wyposażony w układ monitora pozwalający na współpracę z komputerem. Istotną cechą sterownika jest fakt, że wyświetlacz LCD, klawiatura oraz sygnały z portów *PA* i *PB* zostały sprzężone z mikrokontrolerem poprzez matryce programowalne ispLSI 1016E firmy Lattice. Dzięki temu do jednego z tych układów zaimplementowany został algorytm sterowania komutatorem elektronicznym, a jednocześnie wykorzystano możliwości sterownika mikroprocesorowego do nadzorowania i monitorowania pracy napędu.

Rysunek 8 ilustruje zjawiska zachodzące w czasie przełączenia struktury z układu mostka do układu półmostka. Na rysunku jest widoczny przedział pracy silnika w układzie mostka. W chwili, kiedy następuje przełączenie struktury, widoczny jest stan przejściowy, w czasie którego następuje przepływ prądu w obwodzie diody zwrotnej tranzystora T_5 oraz kondensatora C_0 . Następnie układ przechodzi do pracy z załączonym tranzystorem T_h . Widoczny jest w tym przedziale przyrost napięcia na kondensatorze C_0 . Od chwili, kiedy napięcie na kondensatorze C_0 osiąga ustaloną wartość $U_{C0}=48\text{ V}$, układ przechodzi do pracy z przełączającym tranzystorem T_h . W przebiegach prądów fazowych widoczne są przedziały, w których następuje przepływ prądów polaryzacji dodatniej. Następuje wtedy załączanie odpowiednich tranzystorów grupy dodatniej, dzięki czemu napięcie na kondensatorze C_0 , utrzymywane jest na stałym poziomie.

Na rysunku 9 wykreślono charakterystyki mechaniczne analizowanego napędu dla pracy w układzie mostka i półmostka. Charakterystyki te pomierzono przy ograniczeniu prądowym na poziomie prądu znamionowego silnika.



Rys. 9. Wyznaczona charakterystyka mechaniczna proponowanego napędu
Fig. 9. Measured electromechanical characteristics of proposed drive system

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Znane obecnie układy umożliwiające pracę dwustrefową silników PMBDC mają wiele niekorzystnych cech, które mogą ograniczać możliwości ich aplikacji.

Istotne uproszczenie struktur obwodów głównych komutatora uzyska się stosując komutator o przełączalnej strukturze mostek-półmostek. Struktura ta wykorzystuje fakt, że strumień skojarzony z uzwojeniami czynnymi przy pracy z komutatorem w układzie półmostka jest w przybliżeniu dwukrotnie mniejszy niż przy pracy z komutatorem w układzie mostka.

Niekorzystne zjawiska przy pracy w zakresie ujemnych wartości SEM uniemożliwiają bezpośrednie przełączanie komutatora z układu o strukturze mostka do układu o strukturze półmostka.

Zastosowanie trzech dodatkowych zaworów oraz kondensatora buforującego połączonych zgodnie z sugestią autorów umożliwia płynne przechodzenie od struktury mostka do półmostka i odwrotnie oraz w istotny sposób ogranicza zakłócenia występujące przy zmianie struktury z mostka na półmostek.

Badania laboratoryjne potwierdziły słuszność obranej koncepcji.

Opracowana struktura nie powoduje pogorszenia właściwości silnika pracującego z komutatorem o strukturze mostka.

Opracowany układ nie wymaga użycia dodatkowych elementów reaktancyjnych.

Uzyskane wyniki upoważniają do stwierdzenia, że podjęty temat zmieniającej się struktury komutatora elektronicznego jest tematem przyszłościowym, przewiduje się prowadzenie dalszych badań na ten temat

LITERATURA

1. Bisztyga K.: *Sterowanie i regulacja silników elektrycznych*, WNT, Warszawa 1989.
2. Cros J., Paynot C., Figueroa J., Viarouge P.: *Multi-Star PM brushless IDC motor for traction applications*, 10th European Conference on Power Electronics and Applications, Toulouse, 2-4 September 2003.
3. Dote Y., Kinoshita S.: *Brushless Servomotors. Fundamentals and applications*, Oxford 1990.
4. Fręchowicz A.: *Regulacja kondensatorowa prędkości obrotowej silnika bezszczotkowego prądu stałego*, Zeszyty Problemowe BOBRME Komel, Maszyny Elektryczne, nr 66, 2003.
5. Glinka T., Fręchowicz A.: *Brushless DC Motor Operating in Constant Power Range..*
6. Glinka T.: *Mikromaszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*, Podręcznik akademicki. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1995.
7. Hendershot J.R., Miller T.J.E.: *Design of brushless permanent magnet motors*, Magna physics publishing and Clarendon Press, Oxford 1994.
8. Kaczmarek T., Zawirski K.: *Układy napędowe z silnikiem synchronicznym*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000.
9. Krishnan R.: *Electric Motor Drives, Modeling, Analysis and Control*, Prentice Hall, New Jersey 2001.
10. Krykowski K., Bodora A.: *Dwustrefowa praca silników bezszczotkowych PM BLDC*, VI Krajowa Konferencja, SENE'2003, Łódź, listopad 2003.
11. Krykowski K., Bodora A., Hetmańczyk J.: *Możliwości pracy dwustrefowej silników PM BLDC*, Podstawowe Problemy Energoelektroniki i Elektromechaniki PPEE'03, Wista, 7-10 grudzień 2003.
12. Nipp, E.: *Alternative to field-weakening of surface-mounted permanent-magnet motors for variable-speed drives*, Industry Applications Conference, Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95, Conference Record of the 1995 IEEE, Vol. 1, 8-12 October 1995.
13. Nipp, E., Norberg E.: *On the feasibility of switched stator windings in permanent magnet motors for traction drives*, Railroad Conference, Proceedings of the 1998 ASME/IEEE, 15-16 April 1998.

14. Patterson D.J., Spée R.: *The Design, and Development of an Axial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor for Wheel Drive in Solar Powered Vehicle*, Proceedings IEEE IAS'94.
15. Patterson D.J.: *Recent Advances in the Design and Construction of Axial Flux Permanent Magnet Machines*, IEEE IAS'95.
16. Slemon, G.R.: *Achieving a constant power speed range for PM drives*, Industry Applications, IEEE Transactions, Vol. 31, Issue 2, March/April 1995.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Koczara

Wpłynęło do Redakcji: 26 maja 2004 r.