

Aleksander FRECHOWICZ  
Politechnika Śląska

## CHARAKTERYSTYKI STATYCZNE KONDENSATOROWEGO SILNIKA BEZSZCZOTKOWEGO PRĄDU STAŁEGO

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono nowy układ bezszczotkowego silnika prądu stałego z kondensatorową regulacją prędkości obrotowej i elektronicznym układem zasilającym. Ten nowy układ pozwala silnikowi osiągnąć prędkość większą od tzw. prędkości bazowej (prędkości rozwijanej przez silnik zasilany napięciem znamionowym, przy znamionowym strumieniu wzbudzenia). Przedstawiono projekt układu, jego model matematyczny i charakterystyki statyczne obliczone za pomocą tego modelu.

## THE STATIC CHARACTERISTICS OF BRUSHLESS CAPACITOR DC MOTOR

**Summary.** In this paper a new design of brushless DC motor with capacitor speed control and electronic switching scheme is presented. This new design allows the motor to achieve speed higher than a base speed. The paper presents design of the system, its mathematical model, and static characteristics calculated with this model.

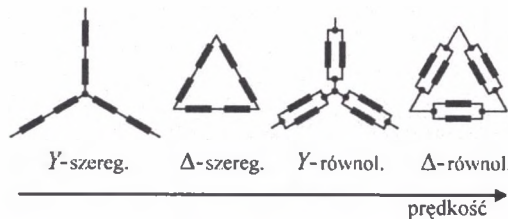
### 1. Wprowadzenie

W klasycznym układzie zasilania silniki synchroniczne zasilane napięciem o zmiennej częstotliwości oraz bezszczotkowe silniki prądu stałego pracują w tak zwanym „zakresie stałego momentu”, czyli przy nastawianym napięciu zasilającym i stałym strumieniu wzbudzenia, pochodzącym od magnesów trwałych. Takie układy pozwalają na regulację prędkości obrotowej od zera do tzw. „prędkości bazowej” (prędkości rozwijanej przez silnik zasilany napięciem znamionowym, przy znamionowym strumieniu wzbudzenia). Czasem jednak (szczególnie w napędach trakcyjnych) istnieje potrzeba, by rozciągnąć zakres prędkości powyżej prędkości bazowej kosztem maksymalnego momentu rozwijanego przez

silnik. Pozwala to utrzymać projekt napędu wewnątrz ekonomicznie uzasadnionej klasy falowników. Na przykład w napędach pojazdów elektrycznych wymaga się wysokiego momentu od prędkości równej zero do prędkości bazowej i w przybliżeniu stałej mocy w zakresie wyższych prędkości (typowo do trzykrotnej prędkości bazowej).

W zasadzie istnieją trzy metody umożliwiające na pracę silników bezszczotkowych z magnesami trwałymi przy prędkościach wyższych niż prędkość bazowa. Pierwszy sposób to osłabianie pola otrzymywane przez takie wyprzedzenie fazowe prądów stojana, aby otrzymać składową odmagnesowującą pola oddziaływania twornika. Ta składowa redukuje strumień w osi magnesów. Praca w zakresie osłabiania pola pozwala utrzymać stałą moc napędu [1,2]. Rozwiązanie to jest eleganckie, ponieważ nie wymaga rozbudowania elektronicznego układu przełączającego, a cała modyfikacja klasycznej konstrukcji jest zawarta w oprogramowaniu procesora sterującego napędem. Wadą tej metody jest możliwość rozmagnesowania magnesów trwałych.

Drugi sposób pozwalający na przekroczenie prędkości bazowej to zastosowanie przełączalnych uzwojeń stojana. Najczęściej stosowana jest klasyczna zmiana układu połączeń z gwiazdy (Y) na trójkąt ( $\Delta$ ). Jeśli uzwojenia faz są podzielone na kilka części, możliwe jest też przełączanie cewek z układu szeregowego na równoległy. Kombinacja obu metod oferuje zwykle dostateczne zwiększanie prędkości dla wszelkich zastosowań. Na rys. 1 przedstawiono kolejne układy połączeń trójfazowego uzwojenia silnika, w którym każda faza składa się z dwóch cewek. Każde przełączenie na następny układ powoduje zwiększenie prędkości, przy równoczesnym zmniejszeniu maksymalnego momentu silnika [4]. W sumie otrzymać można nawet pięciokrotne zwiększenie prędkości ponad prędkość bazową, przy trzy i półkrotnym zmniejszeniu momentu maksymalnego silnika [3].



Rys. 1. Możliwa sekwencja układów połączeń uzwojenia stojana, w którym każda faza składa się z dwóch cewek  
Fig. 1. Stator winding configuration sequences with two coils per each phase

Wadą takiego układu jest konieczność stosowania dużej liczby elementów przełączających, a przełączenie z układu na układ nie może być przeprowadzane w sposób płynny, ale musi być przeprowadzane w sekwencji: odłączenie prądu, zmiana układu, ponowne załączenie prądu.

Przerwa w prądzie silnika oznacza przerwę w momencie obrotowym silnika. Jest to przyczyną szarpnięć napędu i może spowodować uszkodzenia mechaniczne.

Trzecią znaną metodą pozwalającą na pracę silników bezszczotkowych z magnesami trwałymi przy prędkościach wyższych niż prędkość bazowa jest zastosowanie elektronicznych układów podnoszących napięcie zasilania silnika, tzw. „podwajaczy napięcia”. Również w tym przypadku zmiana zasilania (przejście do pracy przy podwójnym napięciu i powrót do pracy przy zasilaniu znamionowym) wiąże się z koniecznością odłączenia prądu i udarami momentu.

Nowa koncepcja regulacji prędkości obrotowej silników bezszczotkowych z magnesami trwałymi przy prędkościach wyższych niż prędkość bazowa została zaproponowana w [5,6]. Zgodnie z tą koncepcją (rys. 2) bezszczotkowy silnik prądu stałego posiada 3 pasma uzwojeń twornika, przy czym każde pasmo podzielone jest na dwie części, zatem w każdym paśmie wyróżnić można trzy zaciski: początki pasm (na rysunku: P1, P2, P3), środki pasm (S1, S2, S3) i końce pasm (K1, K2, K3). Początki pasm uzwojenia silnika są zasilane klasycznie z falownika oznaczonego na rysunku linią przerywaną. Dodatkowo napęd jest wyposażony w dwa układy elektronicznych kluczy sterowanych, z których jeden zwiera środki, a drugi końce pasm (cewek) twornika. W zależności od tego, który układ kluczy jest zwarty, gwiazda twornika składa się bądź z większej, bądź z mniejszej liczby zwojów. Podczas rozruchu i przy małej prędkości wirowania na stałe zwarte są końce pasm, a rozwarte ich środki. Wzrost prędkości odbywa się poprzez odpowiednie sterowanie szerokościami impulsów napięcia zasilającego twornik, jak w klasycznym napędzie bezszczotkowym (praca w zakresie „stałego momentu”). Po osiągnięciu maksymalnej wartości napięcia (koniec pracy w zakresie „stałego momentu”) zaczynają działać łączniki zwierające środki uzwojeń. Zwieranie części uzwojeń powoduje narastanie prądu płynącego przez górne części cewek i malenie prądu płynącego przez dolne części cewek.

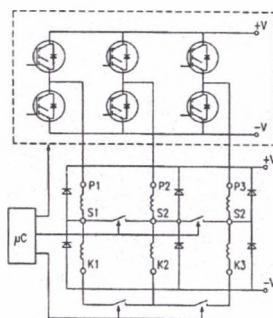
Kiedy prąd, płynący w dolnej części uzwojenia, osiągnie zero, zostaje odcięty przez łączniki zwierające końce cewek. Powstaje nadwyżka momentu, pozwalająca na przyspieszenie silnika. Prędkość wirowania wzrasta i silnik rozpoczyna pracę w II strefie regulacji.

W ciągu ubiegłego roku rozwijano przedstawiony wyżej układ koncepcyjny. Opracowano model matematyczny układu [9] i wyliczono jego charakterystyki [7, 8].

Pracowano również nad różnymi typami łączników zwierających i elektronicznych układów sterowników możliwych do zastosowania w układzie. W niniejszym artykule zostanie zaprezentowane jedno z takich rozwiązań.

## 2. Kondensatorowy silnik bezszczotkowy prądu stałego

W koncepcyjnym układzie napędowym silnika bezszczotkowego (rys. 2) znajdują się dwa układy łączników zwierających: jeden dołączony jest do środków, a drugi do końców uzwojeń. Zadaniem łącznika zwierającego końce uzwojeń jest zapobieżenie sytuacji, w której po zamknięciu układu kluczy zwierających środki cewek prąd płynący przez dolne części cewek zmieni znak i będzie hamować ruch wirnika.



Rys. 2. Schemat układu regulacji prędkości silnika bezszczotkowego  
Fig. 2. Speed control system diagram of a DC brushless motor

Najprostszym rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie w punkcie gwiazdowym uzwojenia twornika kluczy tranzystorowych, sterowanych tymi samymi sygnałami, którymi sterowane są górne tranzystory falownika (rys. 2). Dzięki nim prąd płynący przez obie części pasma musi mieć ten sam kierunek. W momencie, w którym prąd miałby zmienić znak, prąd zgaśnie, bowiem tranzystory w pozostałych ramionach gwiazdy są wyłączone i przez te ramiona prąd może płynąć tylko w jedną stronę – poprzez diody.

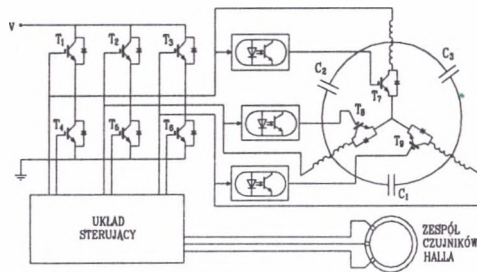
Drugi układ łączników zwierających, pokazany na rys. 2, przeznaczony jest do zwierania środków pasm. Praca tego układu powinna umożliwić zwiększenie prądu płynącego przez górne części cewek i powstanie nadwyżki momentu, pozwalającej na przyspieszenie silnika do prędkości wyższej niż prędkość bazowa.

Reguły pracy łączników powinny być następujące. Przy małej prędkości silnika okresy, w których łączniki są zamknięte, powinny być krótkie w porównaniu z okresem komutacji, (okresem, w którym prąd płynie przez jedno pasmo uzwojenia twornika), tak by przez większość czasu prąd płynął przez obie połowki cewek i by silnik rozwijał moment o wartości maksymalnej. Kiedy silnik wiruje z dużą szybkością, okresy czasu, w których łączniki zwierają środki cewek, powinny być duże w porównaniu z okresem komutacji, tak by cały

prąd płynął głównie przez połowę uzwojenia, co zapewnia większą prędkość przy zmniejszonym momencie obrotowym silnika.

Ponieważ z natury pracy silnika prądu stałego wynika, że przy różnych prędkościach występują różne długości okresów komutacji, przedstawione reguły można zrealizować zakładając stałą wartość okresu, w którym łączniki zwierające środki pasm są zamknięte. W takim przypadku, przy małej prędkości wirowania silnika, czas, w którym łączniki zwierające środki pasm są zamknięte, będzie stanowił niewielką część okresu komutacji, a przy dużych prędkościach – znaczną część tego okresu.

Przy takim założeniu najprostszymi łącznikami zwierającymi środki pasm mogą być trzy kondensatory, połączone w gwiazdę lub w trójkąt, o odpowiednio dobranej pojemności (por. rys. 3). W chwili komutacji kondensatory są przeładowywane w obwodzie zamykającym się przez górne połówki pasm twornika. Okres przeładowywania zależy od rezystancji obwodu i pojemności kondensatorów, ale może też być regulowany przez odpowiednie dobranie wartości maksymalnej prądu wydawanego przez falownik (tzw. „odcięcia prądowego”). Przy małej prędkości wirowania wirnika kondensatory są przeładowywane na początku okresu komutacji i pozostają w tym stanie aż do następnej komutacji. Oznacza to, że przez większą część okresu prąd płynie przez obie połówki uzwojenia. Przy dużej prędkości czas przeładowania kondensatorów staje się porównywalny z okresem komutacji i przez dolną część uzwojenia prąd nie płynie. Taki nowy układ napędowy nazwano kondensatorowym silnikiem bezszczotkowym prądu stałego.



Rys. 3. Schemat blokowy prezentowanego układu napędowego  
Fig. 3. Block diagram of the presented drive system

### 3. Model matematyczny układu

Aby sprawdzić poprawność koncepcji układu napędowego przedstawionego w poprzednim rozdziale, zbudowano model matematyczny, pozwalający na obserwację stanów

nieustalonych prądów i napięć silnika. Model matematyczny został sporządzony w języku symulacji komputerowej Matlab. Podczas budowy modelu przyjęto, że badaną maszyną będzie bezszczotkowy silnik prądu stałego o parametrach znamionowych:  $P = 1,0 \text{ kW}$ ,  $p_b = 3$ ,  $n = 1000 \text{ obr/min}$ ,  $U = 110 \text{ V}$ .

W modelu sześć cewek uzwojenia twornika, tworzących trzy pasma, włączono między zaciski oznaczone jako: początki pasm (na rysunku: P1, P2, P3), środki pasm (S1, S2, S3) i końce pasm (K1, K2, K3). Początki pasm są zasilane z falownika (konstrukcję falownika tworzą tranzystory T1 do T6). Tranzystory falownika są wyzwalane impulsami, których czas trwania odpowiada kątowi elektrycznemu siły elektromotorycznej indukowanej w wirniku, równemu 120 stopni elektrycznych i jest odwrotnie proporcjonalny do prędkości wirowania wirnika. W sumie w programie wygenerowano sześć fal impulsów, wyzwalających sześć tranzystorów, poprzesuowanych względem siebie co 60 stopni. Aby je otrzymać, do kąta elektrycznego  $\alpha_{el}$  dodano pięć razy po 60 stopni i obliczono funkcje sinus z tak otrzymanych przebiegów. Następnie na komparatorach zamieniono na impulsy wyzwalające te części przebiegów, które były większe niż 0,5, a wyzerowano te części, które były mniejsze od 0,5. Trzy z tak otrzymanych przebiegów impulsowych (te które są przeznaczone do wyzwalania górnych tranzystorów falownika), wykorzystano również do wyzwalania tranzystorów zwierających punkt gwiazdowy cewek twornika.

W każdej połówce pasma umieszczono element sterowanego źródła napięcia, symbolizującego siłę elektromotoryczną indukowaną w uzwojeniu. Założono, że rozkład siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu twornika jest zależny od kąta obrotu wirnika i ma charakter zbliżony do trapezoidalnego. W programie przebieg zbliżony do wymaganego uzyskano obliczając trzy funkcje sinus: z kąta siły elektromotorycznej (elektrycznego)  $\alpha_{el}$ , z kąta  $\alpha_{el}$  przesuniętego o 120 stopni i z kąta  $\alpha_{el}$  przesuniętego o 240 stopni. Następnie funkcje te poddano przekształceniu typu „nasylenie”, dzięki czemu sinusoidy zostały „obcięte” na wysokości  $\pm 0,5$ .

Właściwą zależność wartości maksymalnej siły elektromotorycznej od prędkości wirowania wirnika maszyny uzyskano mnożąc przebieg trapezoidalny przez sygnał prędkości obrotowej  $\omega$  i przez stałą maszynową  $k_m$ .

W programie mierzone są prądy płynące przez wszystkie połówki pasm uzwojenia twornika. W ten sposób moment silnika można było obliczyć z zależności:

$$T_e = \frac{1}{2\omega} (e_a (i_a' + i_a'') + e_b (i_b' + i_b'') + e_c (i_c' + i_c''))$$

Znając sygnał momentu elektromagnetycznego silnika i zakładając moment obciążenia, można klasycznie, za pomocą dwóch integratorów, zasymulować równania ruchu:

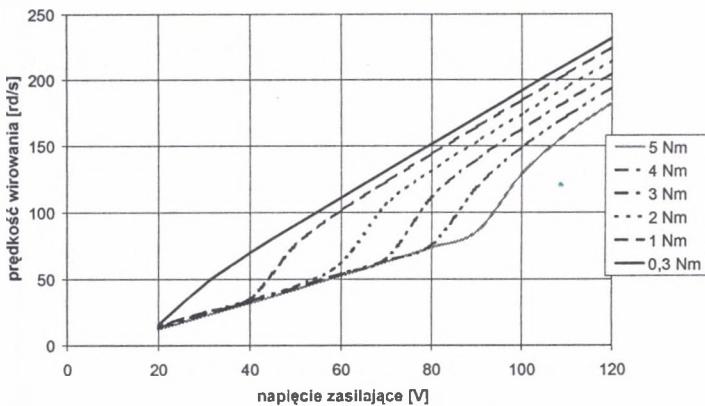
$$T_e - T_{obc} = J \frac{d\omega}{dt}$$

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt},$$

otrzymując w ten sposób sygnały prędkości kątovej  $\omega$  i „mechanicznego” kąta obrotu wirnika  $\alpha_{mech}$ . Po wymnożeniu kąta  $\alpha_{mech}$  przez liczbę par biegunów  $p_b$  otrzymano kąt siły elektromotorycznej („elektryczny”)  $\alpha_{el}$ , niezbędny do opisanego wyżej układu wyzwalania tranzystorów i do wygenerowania poprawnych sygnałów sił elektromotorycznych indukowanych w uzwojeniach wirnika.

#### 4. Charakterystyki statyczne układu napędowego

Za pomocą przedstawionego modelu matematycznego obliczono szereg charakterystyk statycznych i dynamicznych kondensatorowego silnika bezszczotkowego prądu stałego. Poniżej przedstawione zostaną niektóre obliczone charakterystyki statyczne.



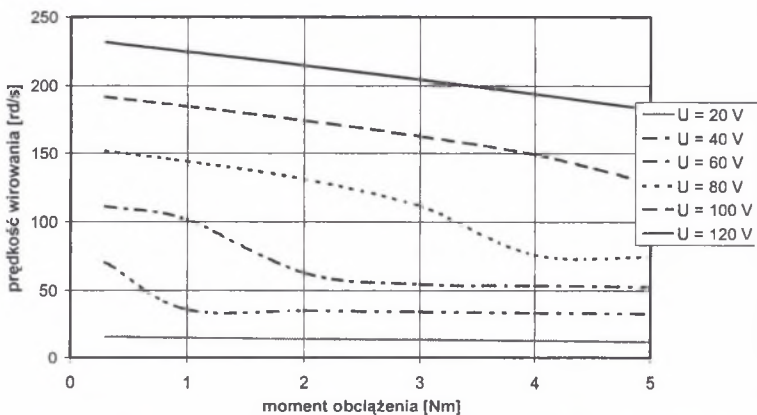
Rys. 4. Zależność prędkości obrotowej od napięcia przy różnych obciążeniach ( $C=440\mu\text{F}$ ,  $R=1\Omega$ )  
 Fig. 4. Speed versus voltage along various load torque ( $C=440\mu\text{F}$ ,  $R=1\Omega$ )

Jak wspomniano w rozdziale 2, istnieje kilka sposobów nastawiania prędkości obrotowej omawianego układu napędowego. Podobnie jak w klasycznym silniku prądu stałego, prędkość wirowania można nastawiać za pomocą zmiany napięcia zasilającego układ silnika, ale równocześnie prędkość wirowania będzie zależała od parametrów obwodu zawierającego

środki cewek: pojemności kondensatorów i od rezystancji tego obwodu. Przykładową rodzinę charakterystyk prędkości obrotowej od napięcia zasilającego przy różnych obciążeniach i ustalonych parametrach obwodu zawierającego środki uzwojeń przedstawiono na rys. 4.

Analizując ten rysunek warto pamiętać, że prędkość bazowa silnika była przyjęta na poziomie 105 radianów na sekundę. Jak widać na rysunku, cała rodzina leży między dwoma prostymi, z których pierwsza (dolna) jest linią biegnącą od zera do prędkości bazowej (jest taka sama jak w silniku bez kondensatorów), a druga (górna) biegnie od zera do podwójnej prędkości bazowej. Przy małych obciążeniach silnik zachowuje się tak, jakby jego prędkość bazowa była dwukrotnie wyższa. Natomiast przy większych obciążeniach początkowo charakterystyka leży wzdłuż dolnej linii, by po osiągnięciu pewnej wartości (zależnej od obciążenia) skrócić w górę i podążać asymptotycznie do górnej linii.

Na rysunku 5 przedstawiono rodzinę charakterystyk mechanicznych w „klasycznym” układzie współrzędnych: prędkość wirowania w funkcji momentu obciążenia, przy różnym napięciu zasilającym. Na tych charakterystykach widać wyraźnie, że powiększając obciążenie silnika zasilanego napięciem niższym niż znamionowe przechodzi się przez punkt, w którym wzrasta spadek prędkości obrotowej, co odpowiada przejściu z pracy na połówce uzwojenia do pracy na całym uzwojeniu.



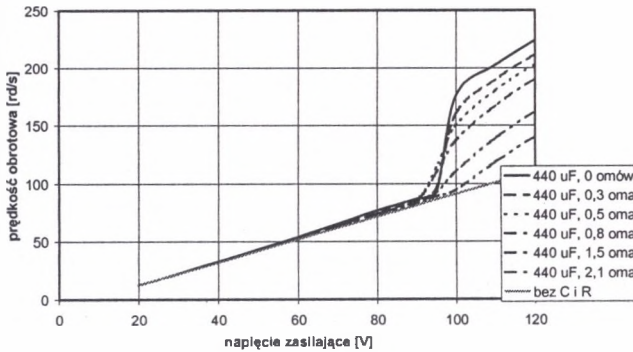
Rys. 5. Zależność prędkości obrotowej od obciążenia przy różnych napięciach ( $C=440\mu\text{F}$ ,  $R=1\Omega$ )  
Fig. 5. Speed versus load torque along various voltages ( $C=440\mu\text{F}$ ,  $R=1\Omega$ )

Na rysunkach 6 i 7 zilustrowano wpływ zmiany rezystancji i pojemności obwodu zawierającego na prędkość wirowania napędu. Powiększanie rezystancji tych gałęzi powoduje wolniejsze przeładowanie kondensatorów, co pociąga za sobą spowolnienie napędu. Z kolei powiększenie pojemności kondensatora przyspiesza ruch silnika.

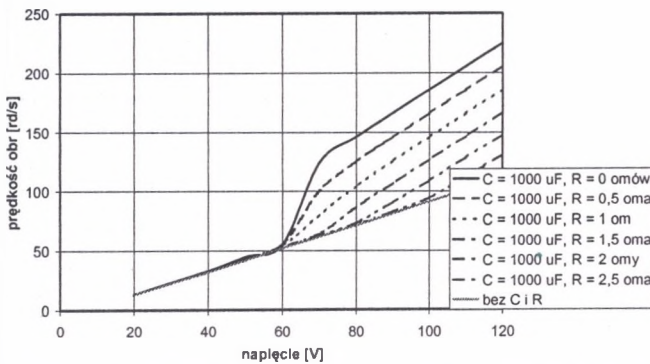


## 5. Wnioski

1. Zastosowanie w bezszczotkowych silnikach prądu stałego dzielonego uzwojenia, w którym środki uzwojeń są zwierane kondensatorami a końce łącznikami tranzystorowymi, pozwala na osiągnięcie przy momencie obciążenia mniejszym od znamionowego prędkości większych niż prędkość znamionowa.



Rys. 6. Zależność prędkości od napięcia przy  $T = 5 \text{ Nm}$ ,  $C = 440 \mu\text{F}$ ,  $R = \text{variab}$   
 Fig. 6. Speed versus voltage (at  $T = 5 \text{ Nm}$ ,  $C = 440 \mu\text{F}$ ,  $R = \text{variab}$ )



Rys. 7. Zależność prędkości od napięcia przy  $T = 5 \text{ Nm}$ ,  $C = 1000 \mu\text{F}$ ,  $R = \text{variab}$   
 Fig. 7. Speed versus voltage (at  $T = 5 \text{ Nm}$ ,  $C = 1000 \mu\text{F}$ ,  $R = \text{variab}$ )

2. Przy prędkościach większych od znamionowej wartość osiągniętej prędkości obrotowej jest zależna od napięcia zasilającego, od pojemności i rezystancji gałęzi z kondensatorami i od wartości momentu obciążającego.
3. Opisany układ pozwala na płynne przejście prędkości obrotowej przez punkt prędkości bazowej, bez konieczności przerywania prądu i bez szarpnięć momentu.

4. Silna zależność maksymalnej prędkości od momentu obciążającego sprawia, że napęd posiada „miękką” charakterystykę mechaniczną, podobną do charakterystyki silnika szeregowego.

## LITERATURA

1. Chalmers B. J., Akmesse R., Musaba L.: Validation of procedure for prediction of field-weakening performance of brushless synchronous machines, Proc. ICEM '98, Istanbul, September 1998, pp. 320-323.
2. Chalmers B. J., Akmesse R., Musaba L.: Design and field-weakening performance of a permanent magnet/reluctance motor with two-part rotor, Proc. IEE, Elec. Power Appl, 145, 2, March 1998, pp. 133- 139.
3. Adnanes A.K.: High Efficiency, High Performance Permanent Magnet Synchronous Motor Drives, Ph.D. thesis. Norwegian Institute of Technology, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Trondheim, 1991.
4. Nipp E.: Permanent Magnet Motor Drives with Switched Stator Windings, Ph.D. thesis. Royal Institute of Technology Department of Electric Power Engineering Electrical Machines and Drives, Stockholm, 1999
5. Glinka T., Fręchowicz A.: Układ sterowania prędkością obrotową bezszczotkowego silnika prądu stałego. Zgłoszenie patentowe nr P.348378 z dnia 27.06.2001.
6. Glinka T., Fręchowicz A.: Bezszytkowy silnik prądu stałego pracujący z zakresie stałej mocy. Referat na XXXVIII Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Cedzyna k. Kielc 2002
7. Glinka T., Fręchowicz A.: Brushless dc motor operating in constant power zone. Referat na 15<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines ICEM 2002, Bruges (Belgia) 2002.
8. Glinka T., Fręchowicz A.: Характеристики безколлекторного двигателя постоянного тока работающего в зоне постоянной мощности. Referat na IV международный симпозиум «ЭЛМАШ - 2002» Москва 2002.
9. Fręchowicz A.: Model matematyczny silnika bezszczotkowego prądu stałego, pracującego w drugiej strefie regulacji prędkości. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. s. Górnicтво, z. 255 Gliwice, listopad 2002

Recenzent: Doc. dr inż. Franciszek Szczucki

## Abstract

In this paper a new design of brushless DC motor with capacitor speed control and electronic switching scheme is presented. These new designs allow motor to achieve speed higher than a base speed.

The motor design is as follows (Fig.3). DC brushless motor contains three different armature winding "phases", each "phase" is further subdivided into two parts. The "phase" origins are supplied from the inverter, and the midpoints are short-circuiting through capacitors  $C_1..C_3$ . In addition, the drive is equipped with the system of electronic switches, which is used for short-circuiting the ends of the armature coils. In steady state, when rotating speed is low, current flows mainly through the whole of windings. When speed increases, and the frequency of capacitors reload is large, current flows through an upper part of the windings only. This results in speed increase, similar to that occurring in classic DC motors operating in a standard circuit in "constant power range".

Switches closing the winding's ends are switched on simultaneously with the switches of higher part of inverter. Therefore the current flowing through a lower part of the windings can not change its polarity.

The paper presents design of the system, its mathematical model, and static characteristics calculated with this model.