

Aleksander FRĘCHOWICZ  
Politechnika Śląska, Gliwice

## PORÓWNANIE WŁAŚCIWOŚCI SILNIKÓW BEZSZCZOTKOWYCH PRĄDU STAŁEGO, PRACUJĄCYCH PRZY PRĘDKOŚCIACH WYŻSZYCH OD PRĘDKOŚCI BAZOWEJ

**Streszczenie.** Prace prowadzone na Politechnice Śląskiej nad układami napędowymi silników bezszczotkowych, pracujących przy prędkościach większych niż prędkość bazowa, doprowadziły do powstania dwóch nowych układów napędowych, które nazwano: kondensatorowym, bezszczotkowym silnikiem prądu stałego i bezszczotkowym silnikiem prądu stałego z bocznikami tranzystorowymi. Obie konstrukcje charakteryzuje nieskomplikowany układ połączeń i prostota układu sterowania. W artykule przedstawiono te konstrukcje i wyniki pomiarów ich podstawowych charakterystyk

## COMPARISON OF PROPERTIES OF DC BRUSHLESS MOTORS, OPERATING AT SPEEDS GREATER THAN BASE SPEED

**Summary.** Research on dc brushless motors drives operating at speeds greater than base speed has been conducted in Silesian University of Technology. It has led to developing two new designs called: condenser dc brushless motor and dc brushless motor with transistor by-passes. Both designs are characterised by simple connection diagram and uncomplicated control circuit. This paper presents structures of the drives and gives their basic characteristic curves.

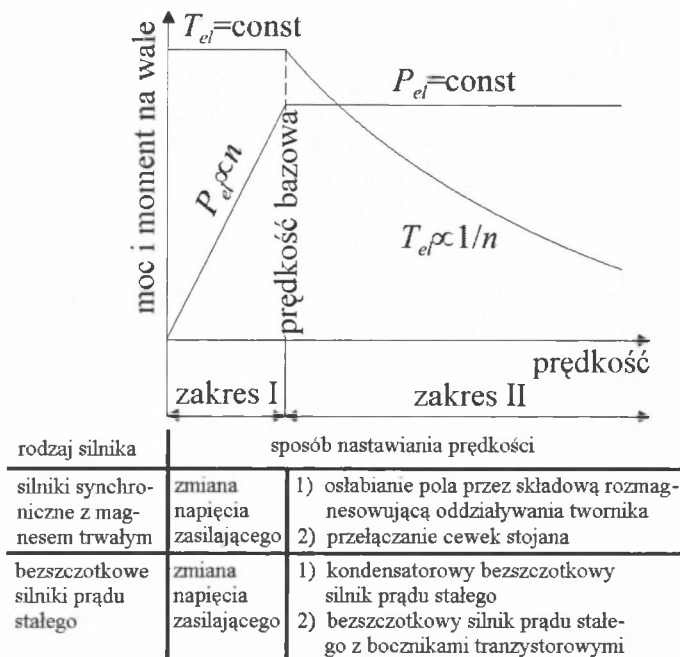
### 1. Wprowadzenie

Większość silników elektrycznych może pracować w dwóch zakresach nastawiania prędkości obrotowej  $n$ :

- zakres I, w którym silnik można obciążać momentem znamionowym i dlatego pracę w tej strefie nazwano „pracą przy stałym momencie” ( $T_{el} = \text{const}$ ),

- zakres II, w którym moment silnika maleje wraz ze wzrostem prędkości; pracę w tym zakresie nazwano „pracą przy stałej mocy” ( $P_{el} = \text{const}$ ).

Zazwyczaj silniki z magnesami trwałymi w wirniku (zarówno silniki synchroniczne, jak i 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.



Rys. 1. Zakresy pracy silników z magnesami trwałymi w wirniku

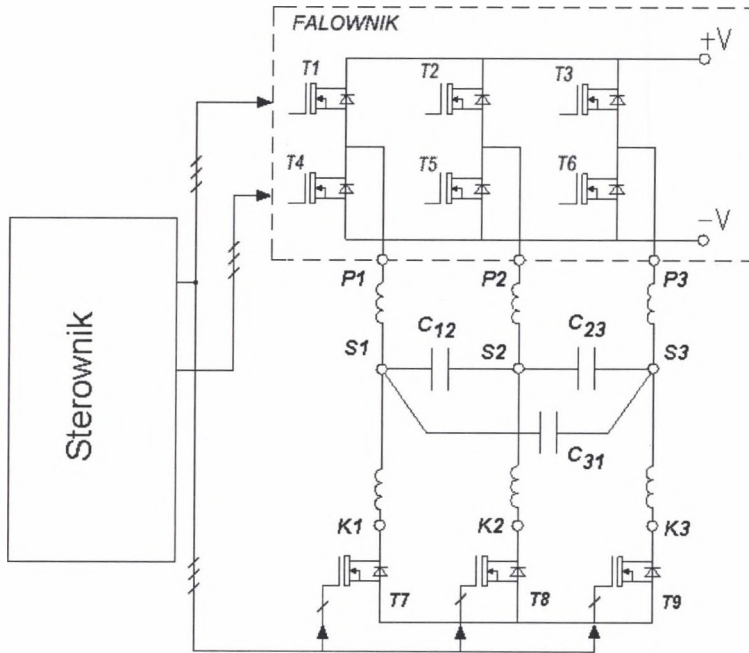
Fig. 1. Ranges of operation of motors with permanent magnets in rotors

W rodzinie silników wzbudzanych magnesami trwałymi umieszczonymi w wirniku znane są dwa sposoby rozwiązania tego problemu. Pierwszy sposób polega na takim sterowaniu zaworami, aby składowa odmagnezowująca pola oddziaływania twornika osłabiła pole magnesów trwałych. Drugi sposób to zastosowanie przełączalnych uzwojeń stojana (gwiazda - trójkąt lub przełączanie cewek z układu szeregowego na równoległy). Obie te metody

stosowane są w silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi. W popularnych bezszczotkowych silnikach prądu stałego wzbudzanych magnesami trwałymi nie stosuje się zmiany strumienia wzbudzenia. W typowych rozwiązaniach układów sterowania prędkością obrotową tych silników jest realizowany tylko pierwszy zakres regulacji prędkości obrotowej (zakres „stałego momentu”), czyli nastawianie prędkości obrotowej poprzez zmianę napięcia twornika od prędkości równej zero do prędkości bazowej. Prace prowadzone na Politechnice Śląskiej nad układami napędowymi silników bezszczotkowych, pracujących przy prędkościach większych niż prędkość bazowa, doprowadziły do powstania dwóch nowych układów napędowych, które nazwano: kondensatorowym, bezszczotkowym silnikiem prądu stałego i bezszczotkowym silnikiem prądu stałego z bocznikami tranzystorowymi [1 ÷ 4]. Obie konstrukcje charakteryzuje nieskomplikowany układ połączeń i prostota układu sterowania.

W układzie kondensatorowego silnika bezszczotkowego prądu stałego (rys.2), każde pasmo podzielone jest na dwie części, zatem w każdym paśmie wyróżnić można trzy zaciski: początek pasma (na rysunku: P1, P2, P3), środek pasma (S1, S2, S3) i koniec pasma (K1, K2, K3). Początki pasm uzwojenia silnika zasilane są z falownika (na rysunku falownik oznaczono linią przerywaną), ale dodatkowo między środki cewek każdego pasma uzwojenia są włączone kondensatory, a wszystkie końce pasm (cewek) twornika połączone są w gwiazdę za pomocą kluczy elektronicznych, składających się z tranzystorów i diod. Bramki tych tranzystorów sterowane są tymi samymi sygnałami co bramki górnych tranzystorów mostka falowniczego.

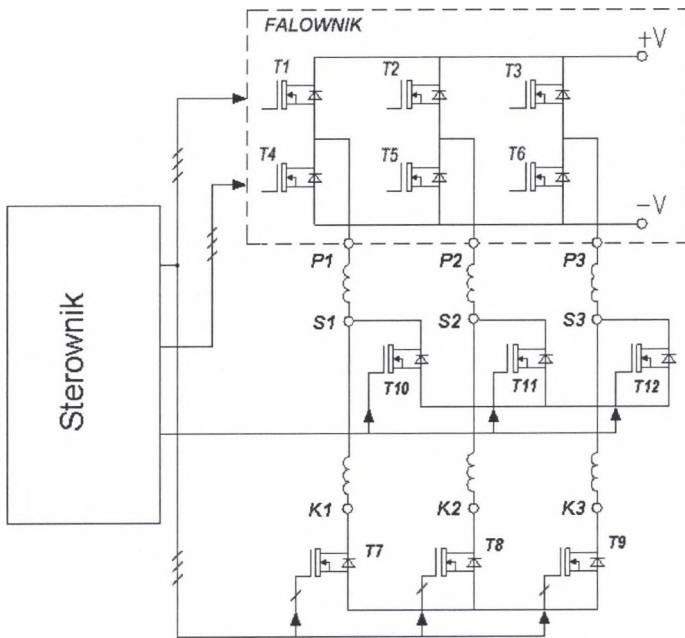
Każde przełączenie tranzystorów falownika powoduje powstanie impulsu prądowego, przeładowującego układ kondensatorów. Impulsy prądu przepływając przez „górne” części pasm twornika (P1 i P3), wytwarzają impulsowy moment napędowy rozpędzający masy wirujące. Jeśli silnik będzie obciążony małym momentem, impulsy momentu mogą rozpędzić silnik do prędkości zbliżonej do podwójnej prędkości bazowej. Tranzystory T7 do T9 (sterowane tymi samymi impulsami co górne tranzystory mostka falowniczego) blokują przepływ prądu hamującego, który mógłby płynąć przez „dolne” części pasm. Przy wzroście obciążenia prędkość wirowania silnika maleje i gdy wirnik zwolni do prędkości niższej niż prędkość bazowa, wypadkowa siła elektromotoryczna rotacji indukowana we wszystkich czterech połówkach pasm staje się mniejsza od napięcia zasilającego i przez dolne połówki pasm może zacząć płynąć prąd. Od tej chwili prąd płynie przez cały czas, a nie jedynie w impulsach przeładowujących kondensatory. Silnik zaczyna zachowywać się jak normalny bezszczotkowy silnik prądu stałego.



Rys. 2. Schemat układu napędowego kondensatorowego silnika bezszczotkowego prądu stałego  
 Fig. 2. Drive system diagram of a capacitor dc brushless motor

W tym układzie sterownik i układ enkodera są identyczne jak w klasycznym układzie sterowania silnika bezszczotkowego, a przebieg zmiany prędkości obrotowej od zera, poprzez zakres „stałego momentu” i zakres „regulacji kondensatorowej” łączy się w jeden proces i zachodzi samoczynnie.

Również drugi z prezentowanych układów: bezszczotkowy silnik prądu stałego z bocznikami tranzystorowymi (rys. 3) ma 3 pasma uzwojeń twornika podzielone na dwie części. Tak jak w poprzednim układzie początki pasm uzwojenia silnika zasilane są z falownika, ale w tym przypadku napęd jest wyposażony w dwa układy elektronicznych kluczy sterowanych, z których jeden zwiera środki, a drugi końce pasm twornika. Pojedynczy układ kluczy składa się z trzech tranzystorów IGBT współpracujących z przeciwrównolegle włączonymi diodami. Klucze zwierające końce cewek (tranzystory T7, T8 i T9) są cały czas wyzwalane tymi samymi impulsami co górne tranzystory falownika (T1, T2 i T3). Dlatego podczas pracy w zakresie „stałego momentu” (przy otwartych tranzystorach T10, T11 i T12) praca tranzystorów T7, T8 i T9 jest praktycznie niezauważalna. Dopiero po osiągnięciu maksymalnej wartości napięcia (prędkość bazowa), zaczynają działać klucze zwierające środki pasm (praca w zakresie „stałej mocy”), a wtedy odpowiednio spolaryzowane tranzystory T7, T8 i T9 nie pozwalają na przepływ w obwodzie prądu hamującego.



Rys. 3. Schemat układu napędowego silnika bezszczotkowego prądu stałego z bocznikami tranzystorowymi  
 Fig. 3. Control system diagram of a dc brushless motor with transistor bypasses

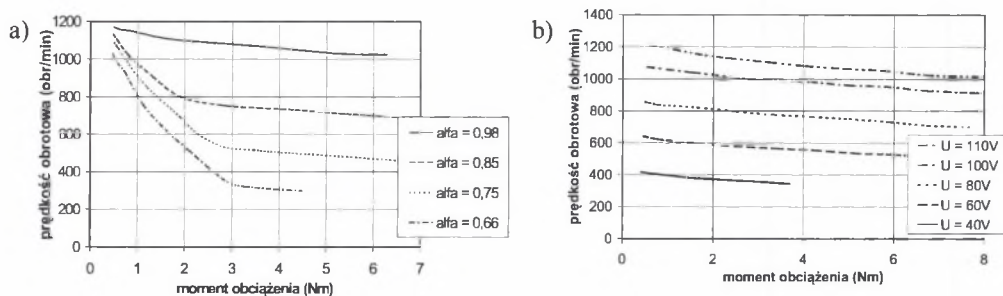
## 2. Własności nowych układów napędowych

O własnościach statycznych bezszczotkowego silnika prądu stałego decydują jego charakterystyki mechaniczne. Silnik bezszczotkowy w wykonaniu klasycznym przeznaczony jest do pracy w tzw. „strefie stałego momentu”. W tym zakresie silnik może pracować z nastawianą prędkością obrotową w dwóch trybach pracy:

- przy zasilaniu falownika napięciem stałym, o nastawianej wartości, przy czym tranzystory falownika sterowane są wyłącznie przetworzonymi sygnałami położenia wału (tzw. „pojedynczy impuls”) bądź
- przy zasilaniu falownika napięciem stałym o niezmiennej wartości, ale tranzystory falownika sterowane są sumą logiczną przetworzonych sygnałów położenia wału i fali PWM o nastawianym współczynniku wypełnienia  $\alpha$ .

W zależności od przyjętego trybu pracy (sposobu zasilania) otrzymuje się dwie rodziny charakterystyk mechanicznych. Pierwszą rodzinę tworzą charakterystyki mechaniczne mierzone przy współczynniku wypełnienia fali PWM zbliżonym do jedności (a więc przy ciągłych prądach twornika) i nastawianej wartości napięcia stałego zasilającego falownik. Te

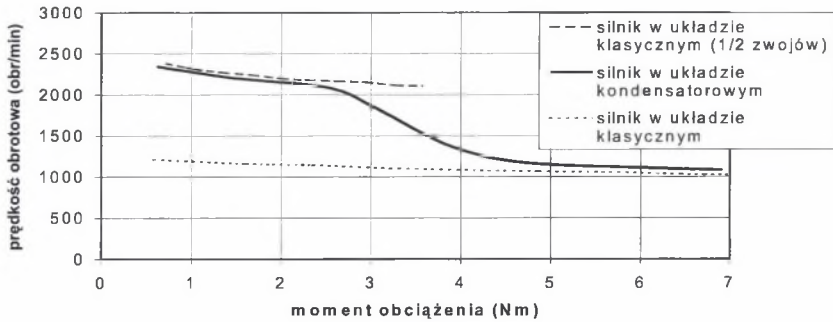
charakterystyki mają kształt lekko opadającej linii prostej, typowej dla maszyn prądu stałego ze wzbudzeniem od magnesów trwałych lub ze wzbudzeniem elektromagnetycznym, obcowzbudnym (rys. 4b). Przy nastawianym współczynniku wypełnienia kształt charakterystyki bezszczotkowego silnika prądu stałego zmienia się: przy małym i bardzo małym obciążeniu silnik rozwija duże prędkości, zbliżone do tych, jakie osiągałby przy zasilaniu ciągłym. Ponadto, przy wzroście obciążenia od małego do średniego pojawia się obszar prądów przerywanych, w którym charakterystyka gwałtownie opada. Po osiągnięciu granicy prądów ciągłych nachylenie charakterystyki maleje, stając się podobne do nachylenia charakterystyki mierzonej przy współczynniku wypełnienia fali PWM zbliżonym do jedności (rys. 4a).



Rys. 4. Charakterystyki mechaniczne pomierzone a) przy stałym napięciu i zmiennym współczynniku wypełnienia, b) przy stałym współczynniku wypełnienia  $\alpha = 1$  i zmiennym napięciu

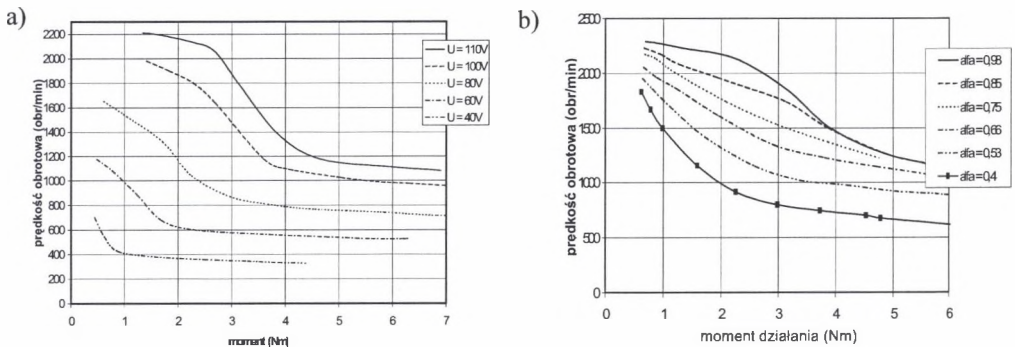
Fig. 4. Torque-speed characteristics a) at different pulse-duty factors and constant supply voltage, b) at different supply voltages and pulse-duty factor  $\alpha = 1$

Kształt charakterystyk mechanicznych kondensatorowego, bezszczotkowego silnika prądu stałego również zależy od sposobu zasilania. Dla obu sposobów zasilania wspólna jest charakterystyka zmierzona dla zasilania maksymalnym napięciem (napięcie zasilania równe znamionowemu) przy współczynniku wypełnienia fali PWM równym lub zbliżonym do jedności. Charakterystykę mechaniczną kondensatorowego silnika bezszczotkowego prądu stałego zmierzoną przy takim zasilaniu pokazano na rys. 5 (linia pogrubiona). Dla lepszego zrozumienia wywodów na tym samym wykresie naniesiono dwie charakterystyki mechaniczne zmierzone dla tego samego silnika, ale w układzie klasycznym (bez kondensatorów). Jedną charakterystykę zmierzono przy pełnym uzwojeniu, a drugą przy połowie zwojów twornika. Widać, że wraz ze zmianą obciążenia, charakterystyka badanego napędu zbliża się do jednej lub drugiej charakterystyki silnika pracującego w układzie klasycznym.



Rys. 5. Charakterystyka mechaniczna silnika kondensatorowego  
Fig. 5. Torque-speed characteristic of condenser motor

Charakterystykę pokazaną na rys. 5 można uważać zatem za charakterystykę naturalną silnika kondensatorowego. Charakterystyki sztuczne można otrzymać na dwa sposoby: zmieniając wartość napięcia zasilającego falownik przy stałym współczynniku wypełnienia fali PWM lub zmieniając współczynnik wypełnienia przy stałej wartości napięcia zasilającego falownik. Obie rodziny charakterystyk pokazano na rys. 6.

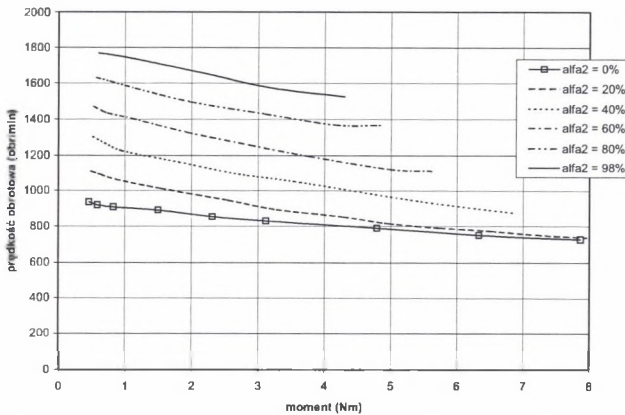


Rys. 6. Charakterystyki mechaniczne silnika kondensatorowego a) przy stałym współczynniku wypełnienia  $\alpha = 1$  i zmiennym napięciu, b) przy stałym napięciu i zmiennym współczynniku wypełnienia  
Fig. 6. Torque-speed characteristics of condenser motor a) at different supply voltages and pulse-duty factor  $\alpha = 1$ , b) at different pulse-duty factors and constant supply voltage

Jak widać na rys. 6a, zmniejszenie wartości napięcia zasilającego falownik powoduje przesunięcie charakterystyki mechanicznej (sztucznej) w dół i w lewo, czyli zmniejszają się wartości maksymalne prędkości, a wzrost prędkości, będący następstwem odciążania silnika, zachodzi przy coraz niższej prędkości wirowania. Zasadniczy kształt charakterystyki jednak nie zmienia się. Natomiast zmniejszanie współczynnika wypełnienia fali PWM zmienia się kształt charakterystyk. Kiedy pojawiają się prądy przerywane twornika, zanika pierwszy punkt przegięcia i charakterystyki obniżają się, przyjmując równocześnie kształt hiperboliczny, podobny do kształtu charakterystyk silników szeregowych prądu stałego o

wzbudzeniu elektromagnetycznym, szeregowym. Pierwszy punkt przegięcia zanika, bo przy małych i średnich obciążeniach obszar prądów nieciągłych występujący przy małych współczynnikach wypełnienia pokrywa się z górnym płaskim odcinkiem charakterystyki silnika w wykonaniu klasycznym. Ostatecznie więc charakterystyki mechaniczne silnika kondensatorowego mają kształt opadający, przy czym leżą one znacznie wyżej niż analogiczne charakterystyki zmierzone dla silników w wykonaniu klasycznym.

Silnik bezszczotkowy z bocznikami tranzystorowymi w drugiej strefie może pracować tylko w trybie nastawiania wartości współczynnika wypełnienia fali PWM, sterującej okresowymi zwarciami środków pasm uzwojenia twornika. Dla odróżnienia ten współczynnik wypełnienia będzie oznaczany symbolem  $\alpha_2$ . Charakterystyki mechaniczne silnika w tej strefie leżą powyżej najwyższej charakterystyki mechanicznej zmierzonej w układzie klasycznym. Jedynym logicznym sposobem parametrycznego pokazania całej rodziny charakterystyk jest wykreślenie zależności  $n = f(M_{obc})$ , przy wybranych stałych wartościach współczynnika wypełnienia fali PWM  $\alpha_2$ . Pomierzone charakterystyki pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Charakterystyka mechaniczna silnika kondensatorowego bezszczotkowego prądu stałego z bocznikami tranzystorowymi pracującego w II strefie regulacji prędkości  
 Fig. 7. Torque-speed characteristics of a dc brushless motor with transistor bypasses operating in speed control range II

Charakterystyki przyjmują kształt linii prostych, opadających wraz ze wzrostem obciążenia. Wzrostowi momentu obciążenia i wzrostowi prędkości towarzyszy wzrost prądu pobieranego przez silnik, a szczególnie prądu płynącego przez górną połówkę uzwojenia. Z tego powodu, przy większych prędkościach charakterystyki kończą się przy coraz mniejszym momencie obciążenia: w tym punkcie podczas pomiarów osiągnięto prąd znamionowy uzwojenia, po czym przerwano pomiary, aby nie przegrzać twornika. Otrzymane



charakterystyki są typowe dla pracy w zakresie stałej mocy, kiedy wzrośtowi prędkości towarzyszy zmniejszanie momentu obciążenia.

### 3. Wnioski

Na podstawie przedstawionych wyników badań laboratoryjnych nowych układów napędowych bezszczotkowego silnika prądu stałego można sformułować następujące wnioski:

1. Oba układy działały poprawnie i pozwalały na wygodne nastawianie prędkości od zera do (praktyczne) podwójnej prędkości bazowej.
2. Opisane układy pozwalają na płynne przejście prędkości obrotowej przez punkt prędkości bazowej, bez konieczności przerywania prądu i bez szarpnięć momentu.
3. Silnik pracujący w układzie „ tranzystorowym ” posiada liniowe, lekko opadające charakterystyki podobne do charakterystyk silnika bocznikowego prądu stałego o wzbudzeniu elektromagnetycznym.
4. Silna zależność maksymalnej prędkości od momentu obciążającego sprawia, że napęd „ kondensatorowy ” posiada „ miękka ” charakterystykę mechaniczną, która (szczególnie przy regulacji prędkości za pomocą zmiany współczynnika wypełnienia fali PWM) jest podobna do charakterystyki silnika szeregowego prądu stałego o wzbudzeniu elektromagnetycznym.
5. W układzie „ tranzystorowym ” prędkość wirowania w zakresie „ stałego momentu ” nastawia się zmieniając współczynnik wypełnienia fali PWM falownika zasilającego silnik, a w zakresie „ stałej mocy ” - zmieniając współczynnik wypełnienia fali PWM zespołu kluczy zwierających środki cewek. Przejście z jednej strefy do drugiej jest łagodne i pozbawione jakichkolwiek szarpnięć.
6. W układzie „ kondensatorowym ” pełny zakres nastawiania prędkości w zakresie od zera do podwójnej prędkości bazowej jest możliwy przez zmianę napięcia zasilającego falownik bądź przez zmianę współczynnika wypełnienia fali PWM. W pracy napędu nie ma wyraźnego podziału na strefy pracy.

### LITERATURA

1. Fręchowicz A.: Model matematyczny silnika bezszczotkowego prądu stałego, pracującego w drugiej strefie regulacji prędkości. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. Górnictwo, z. 255, Gliwice, listopad 2002.

2. Fręchowicz A.: Charakterystyki statyczne kondensatorowego silnika bezszczotkowego prądu stałego. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. Górnictwo, z. 257, Gliwice, listopad 2003.
3. Glinka T., Fręchowicz A.: Układ sterowania prędkością obrotową bezszczotkowego silnika prądu stałego Zgłoszenie patentowe nr P.348378 z dnia 27.06.2001.
4. Glinka T., Fręchowicz A.: Układ sterowania bezszczotkowego silnika prądu stałego Zgłoszenie patentowe nr P.364964 z dnia 11.02.2004.

Recenzent: Doc. dr inż. Franciszek Szczucki

## Abstract

Research on dc brushless motors drives operating at speeds greater than base speed has been conducted in Silesian University of Technology. It has led to developing two new designs (Fig.1) called: condenser dc brushless motor and dc brushless motor with transistor bypasses. Both design are characterised by simple connection diagram and uncomplicated control circuit (Fig. 2, 3). The stator winding consists of three phases and each phase in turn is divided into two parts. The winding is supplied with dc voltage via three-phase inverter consisting of  $T1$  to  $T6$  valves (switches). The phase windings are wye-connected with the help of  $T7$ ,  $T8$  and  $T9$  switches. The switches ( $T7$ ,  $T8$ ,  $T9$ ) are controlled by the identical impulses as the upper switches ( $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$ ) of the inverter. In condenser dc brushless motor the mid-points of the windings are bypassed by three delta-connected condensers (Fig. 2), and in dc brushless motor with transistor bypasses the mid-points of the windings are bypassed by three transistors (Fig. 3).

Fig. 4, 5, 6, 7 show measured torque-speed characteristics of the presented drive system. Both systems have operated correctly and made possible convenient setting of speed from null up to practically double base speed. The described systems allow for smooth going through base speed point, without the need for disconnecting the current or torque jerking. Taking into account the measured characteristic curves, it must be noted that the properties of both systems operating in second speed range differ slightly from each other.

For a motor operating in "transistor" circuit the torque-speed characteristics are linear and slightly drooping, similar to characteristics of dc shunt motor with electromagnetic excitation, while for a "condenser" circuit the torque-speed curve is hyperbolic, similar to torque-speed curve of dc series motor with electromagnetic excitation (in particular when the speed is controlled by changing pulse-duty factor of PWM inverter waveform).