

## Praca silnika PM BLDC w zakresie pracy z maksymalnym prądem, w trakcie pracy okresowej przerywanej S3

**Streszczenie.** Przedstawione rozwiązanie pokazuje wykorzystanie bezszczotkowego silnika prądu stałego PM BLDC do pracy przerywanej okresowej S3. Zastosowane rozwiązanie zastępuje wcześniej wykorzystywane oparte na silniku asynchronicznym, potwierdzając większe możliwości w kilku aspektach, głównie w zakresie wysokiego momentu i bezpieczeństwa pracy obsługi. Prezentowane rozwiązanie posiadając własny magazyn energii w postaci akumulatora zapewnia ciągłość pracy po zaniku napięcia zasilania tam gdzie ze względów bezpieczeństwa jest to warunkiem koniecznym.

**Abstract.** The solution shows the use of a brushless DC motor (PM BLDC) for intermittent periodic work S3. The solution replaces the previously used one which was based on asynchronous motor, confirming greater opportunities in several aspects, mainly in the field of high torque and safety service. This solution having its own energy storage in the form of a battery which ensures continuous work after power failure where for safety reasons this is a necessary condition. **The use of a brushless DC motor (PM BLDC) for intermittent periodic work S3**

**Słowa kluczowe:** Bezsztotkowy silnik prądu stałego, komutator elektroniczny, PM BLDC, ładowanie baterii akumulatorów, czujniki Hall'a.  
**Keywords:** motor DC, PM BLDC, battery charging, Hall's sensors.

### Wstęp

W przemysłowych zastosowaniach wykorzystuje się wiele rodzajów i typów silników elektrycznych. W obecnej chwili, znacząca część układów napędowych jest wyposażona w silniki asynchroniczne. Coraz częściej jednak, wykorzystywane są nowe rodzaje silników, do których należą bezszczotkowe silniki prądu stałego typu PM BLDC. Silniki tego typu posiadają pewne właściwości, które pozwalają je wykorzystywać w takich miejscach, w których żaden inny typ silnika nie może znaleźć zastosowania. Jednym z bardzo praktycznych zastosowań jest wykorzystanie silnika PM BLDC do pracy okresowej, przerywanej S3 z wykorzystaniem przekroczenia maksymalnej mocy lub momentu, który w tym przypadku może zostać przekroczony pięć razy w stosunku do momentu nominalnego  $T_N$ .

- silniki prądu stałego,
- bezszczotkowe silniki prądu stałego wzbudzone magnetoelektrycznie (PM BLDC),
- silniki synchroniczne wzbudzone magnetoelektrycznie (PMSM).

Pierwsze dwa typy silników produkowane są głównie w zakresie prędkości obrotowych mniejszych od 10 000 obr/min. Wielu specjalistów [1], [3] w tym zakresie widzi przyszłość napędów elektrycznych w bezszczotkowych silnikach prądu stałego PM BLDC. Wśród silników, które mogą osiągać wyższe prędkości od 30 000 obr/min [1] są dwa typy silników wzbudzanych magnetoelektrycznie PM BLDC oraz PMSM. Zaletą silników PM BLDC w porównaniu do silników PMSM, jest ich prostsza konstrukcja i prostsze układy sterowania. W związku z powyższym silniki te stanowią główny temat niniejszego artykułu.

Tabela 1 Parametry silników Sh71-6B i SKh71-6B2.

Parametry silnika	Sh 71-6B	SKh 71-6B2
rodzaj pracy	S1	S3 4s/124s
moc znamionowa [kW]	0,25	0,75
moc znamionowa [HP]	0,33	1
prędkość znamionowa [1/min]	860	870
Prąd znamionowy I [A]	1	3,7
częstotliwość [Hz]	50	50
połączenie uzwojeń	Y/D	Y/D
moment maks./moment znamion.	1,6	1,75
prąd rozruch/prąd znamion.	2	1,8
współczynnik mocy znamionowy	0,79	0,66
moment maks./moment znamion.	1,6	1,75
moment rozruch./moment znamion.	1,6	1,75
liczba biegunów	6	6
moment znamionowy [Nm]	2,78	8,232
prędkość synchroniczna [1/min]	1000	870
sprawność znamionowa [%]	55	44
rozruch gwiazda/trójkąt	bezpośredni	
masa (IMB3) [kg]	5,8	6,3

### Silniki w przemysłowych napędach

Aktualnie największym zainteresowaniem wśród elektrycznych silników cieszą się:

- silniki indukcyjne (asynchroniczne),
- silniki synchroniczne wzbudzone elektromagnetycznie,



Rys. 1 Silnik asynchroniczny SKh71-6B2

W artykule tym zostaną porównane dwa rodzaje silników asynchronicznych - do pracy ciągłej i przerywanej okresowej typu S3 firmy Besel Brzeg oraz bezszczotkowy silnik prądu stałego typu PM BLDC Dunkermotoren BG 75x50 (rys. 2), również do pracy przerywanej okresowej typu S3. Z porównania danych katalogowych wynika, że silnik asynchroniczny, jest o większych gabarytach w stosunku do silnika PM BLDC, który ma około trzykrotnie mniejszą moc nominalną spełniając jednak warunki pracy urządzenia.

Tabela 2 Parametry silnika BG75x50 24V

Dane	BG 75x50	Dane
Napięcie znamionowe	VDC	24
Prąd znamionowy*)	A	21,1
Moment znamionowy*)	Nm	1,1
Prędkość znamionowa*)	Rpm	3700
Tarcie obrotowe	Nm	0,08
Moment utknięcia silnika**)	Nm	5
Prędkość bez obciążenia	Rpm	4660
Maksymalna moc wyjściowa**)	W	860
Stała momentu*)	Ncm A <sup>-1</sup>	5,2
Rezystancja wyprowadzenia	Ω	0,04
Indukcyjność wyprowadzeń	mH	0,25
Prąd szczytowy (2s)**)	A	98
Moment bezwładności wirnika	gcm <sup>2</sup>	440
Waga silnika	kg	2,2

\*)  $DJ_w = 100K$ ,\*\*)  $JR = 20^{\circ}C$ 

### Praca okresowa przerywana – S3

Podczas pracy okresowej przerywanej S3, występuje szereg identycznych okresów pracy, z których każdy obejmuje czas pracy pod obciążeniem stałym i czas postoju, a prąd rozruchowy nie wpływa w znaczący sposób na czas nagrzewania się maszyny.

W artykule jest prezentowane rozwiązanie oparte na bezszczotkowym silniku prądu stałego BG 75x50, które zastąpiło wcześniejszą wersję opartą na silniku asynchronicznym SKh71-6B2 (rys. 1), przedstawionym w tabeli 2.



Rys. 2 Silnik firmy Dunkermotoren BG 75x50

Zależności przedstawione poniżej, wiążą podstawowe parametry silników, których wirniki są wzbudzone magnesami trwałymi i dotyczą silników PMSM oraz silnika PM BLDC o trapezoidalnym kształcie siły elektromotorycznej [1]. Wartości skuteczne prądów stojana są powiązane z wartościami maksymalnymi prądów stojana zależnościami:

$$(1) \quad I_{sAC} = \frac{I_{sACm}}{\sqrt{2}}$$

w przypadku silnika sinusoidalnego PMSM oraz

$$(2) \quad I_{sDC} = I_d \sqrt{\frac{2}{3}} = I_{sDCm} \sqrt{\frac{2}{3}}$$

w silniku PM BLDC o sterowaniu trapezowym.

Straty w miedzi obu rodzajów silników są równe gdy:

$$(3) \quad 3I_{sAC}^2 R_s = 3I_{sDC}^2 R_s$$

Podstawiając zależności (1) oraz (2) do wzoru (3) otrzymujemy następującą zależność:

$$(4) \quad I_{sDCm} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{sACm}$$

potwierdzającą relację między prądami silników PM BLDC i PMSM.

Wartości sił elektromotorycznych stojana w uzwojeniach fazowych wynoszą:

$$(5) \quad E_{sACm} = \sqrt{2} E_{sAC}$$

biorąc pod uwagę silnik PMSM oraz

$$(6) \quad E_{sDCm} = E_d$$

w silniku PM BLDC z trapezowym kształtem siły elektromotorycznej.

Wzory na moc elektromagnetyczną silników trójfazowych, przedstawiają się następująco:

$$(7) \quad P_e = 3E_s I_s$$

w przypadku silnika PMSM, a:

$$(8) \quad P_e = 2E_d I_d$$

w silniku PM BLDC.

Porównując moce idealnych silników PM BLDC i PMSM otrzymujemy zależność:

$$(9) \quad \frac{P_{PMBLDC}}{P_{PMSM}} = \frac{2E_d I_d}{3E_{sAC} I_{sAC}}$$

W przypadku równych wartości maksymalnych, fazowych sił elektromotorycznych i wartości skutecznych prądów fazowych, stosunek mocy silnika PM BLDC do PMSM uwzględniając wzory (1,2,4-6 oraz 9) uzyskujemy następującą zależność:

$$(10) \quad \frac{P_{PMBLDC}}{P_{PMSM}} = \frac{2E_{sDCm} I_{sDCm}}{3 \frac{E_{sACm} I_{sACm}}{\sqrt{2}} \frac{I_{sACm}}{\sqrt{2}}} = \frac{4 E_{sDCm} I_{sDCm}}{3 E_{sACm} I_{sACm}} = \frac{4 \sqrt{3}}{3 \cdot 2} = 1,1547$$

Wynika z niej, że moc znamionowa silnika PM BLDC jest około 15% większa od silnika PMSM, w przypadku porównywalnych gabarytów i materiałów.

Uwzględniając zależność (10) i karty katalogowe omawianych silników można wysnuć wniosek, że silniki te, wykonane jako PM BLDC są mniejsze i lżejsze co potwierdzają również wagi tych silników. Waga silnika o sterowaniu sinusoidalnym wynosi 5,8 kg, a PM BLDC 2,2kg.

Przed zastosowaniem silnika PM BLDC, układ specjalnej frezarki (frezarka służąca do frezowania końcówek zgrzewających karoserie samochodowe) – rys. 3, był zasilany silnikiem firmy Besel typu SKh 71-6B2 przedstawionym w tabeli 1. Silnik ten, podczas pracy z zasilaniem trójfazowym (3x400V), pracował z obciążeniem 1000N na specjalnym frezie umiejscowionym w osłonie (kolor żółty) z odciążeniem (wąż elastyczny) wiór po frezowaniu – rys. 2. Praca frezarki przebiega w trzech okresach, które przedstawiają się następująco:

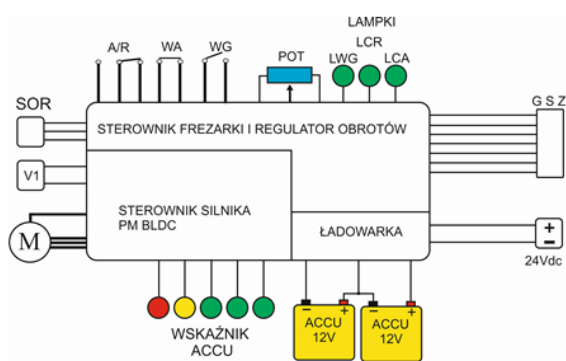
1. Rozruch (czas około 2s) i uzyskiwanie nominalnej prędkości obrotowej,
2. Frezowanie (2s),
3. Wyłączenie, redukcja obrotów (3s).

Zgodnie z parametrami przedstawionymi w tabeli 1, maksymalny czas pracy pod obciążeniem, nie powinien być

dłuższy niż 4 sekundy, a przerwa nie krótsza niż 124 sekundy, co oznacza, że frezarka w tym cyklu może pracować maksymalnie 29 razy/godzinę. Taki sposób pracy frezarki, zapewnia wykorzystanie maksymalnej mocy (0,75kW) i jednocześnie wystarczająco długi okres postoju, pozwalający na wychłodzenie silnika do tego stopnia, że po kolejnych uruchomieniach frezarki, nie ma przyrostu temperatury powodującego zwiększanie temperatury silnika wraz z kolejnymi uruchomieniami. Zasilanie tego stanowiska wymaga pełnego zasilania 3x400V o mocy minimum 0,75 kW i w przypadku zaniku zasilania w trakcie cyklu powoduje niewłaściwe sfrezowanie (niedokończenie) końcówek zgrzewarki. Zastosowane zasilanie ma również inną, negatywną cechę, mianowicie jego poziom jest poziomem niebezpiecznym ze względu na wartość napięcia (3x400V).



Rys. 3 Frezarka z silnikiem PM BLDC



Rys. 4 Schemat poglądowy frezarki z silnikiem PM BLDC

Opis skrótów do rysunku 4:

LWG - Lampka wyłącz. Głównego, LCR - Lampka cyklu ręcznego, LCA - Lampka cyklu automatycznego, SOR - Gniazdo czujnika obrotów, V1 - Gniazdo zaworu elektromagnetycznego, GSZ - Gniazdo sterowania zewnętrznego, WG - Włącznik główny, WA - Włącznik awaryjny, A/R - Praca automatyczna /ręczna, POT - Potencjometr

Układ napędu do frezarki, bazujący na silniku bezszczotkowym PM BLDC firmy Dunkermotoren BG

75x50 (rys. 3, rys. 4), został opracowany i wykonany na zlecenie firmy LASKA Tychy przez firmę MEGATECH Kalety. Układ ten zawiera 24V bezszczotkowy silnik prądu stałego o nominalnej mocy 505W i prędkości obrotowej 3700 obr/min. Zgodnie z tabelą 2, maksymalna moc wyjściowa z zachowaniem warunków, które są podane poniżej tabeli 2 wynosi 860W, a moc szczytowa 2s – 2352W. W celu zapewnienia właściwych warunków pracy, przyjęto założenie, że silnik i komutator będzie zasilany z akumulatorów o napięciu 24V stanowiących magazyn energii. Pozwala to na pobranie ze źródła zasilania wysokiego prądu o wartości 98A i wykorzystanie w ten sposób mocy szczytowej, 2 sekundowej. Taki sposób zasilania całego napędu powoduje, że do zasilania frezarki wymagany jest niewielki prąd ładowania ok 1,5A i napięciu nie wyższym niż 27,5V. Taki sposób zasilania (ładowania) akumulatorów powoduje, że mamy do czynienia z napięciem bezpiecznym, a jednocześnie prąd 1,5A nie wymaga przewodów zasilających o dużych przekrojach. Ładowanie akumulatorów żelowych 2x12V następuje w sposób ciągły w systemie ładowania buforowego do napięcia 13,7V na akumulator. Wskaźnik naładowania akumulatora ACCU pokazuje stan naładowania baterii 24V, kontrolując indywidualnie każdy z akumulatorów oddzielnie. Zastosowany magazyn energii w postaci akumulatorów, pozwala na pracę po zaniku napięcia zasilania co skutkuje doprowadzeniem każdego procesu frezowania zawsze do końca.

Komutator energoelektroniczny [1], [4], [5] silnika, współpracuje z układem hallotronów, powodując bardzo precyzyjneysterowanie tranzystorów komutatora od małych prądów poczynając, w zakresie startu silnika poprzez czas rozbiegu i pracę pod dużym obciążeniem w zakresie prądów dochodzących do 100A. Uwzględniając fakt, że prędkość nominalna tego silnika wynosi 3700obr/min, a stabilizowana prędkość obrotowa silnika powinna wynosić ok. 900obr/min, skutkuje tym, że szczytowa wartość prądu pobieranego z akumulatora wynosi 98A przez 2s odpowiadając wartości wypełnienia PWM. Układ stabilizuje prędkość obrotową poprzez zmianę współczynnika wypełnienia przebiegu PWM, startując z małym wypełnieniem bez obciążenia, a znacznie zwiększając jego wartość podczas maksymalnego obciążenia, utrzymując w ten sposób zadaną prędkość obrotową. Układ sterujący kontroluje wartość prądu w każdej z trzech faz, w każdym impulsie PWM, powodując jego zwiększenie lub zmniejszenie do nastawionej wartości prądu. Taki system pracy pozwolił na zwiększenie siły docisku do 4000N na frez, co jest czterokrotną wartością w stosunku do pracy z silnikiem asynchronicznym i zmniejszeniem czasu frezowania o 1/3 czasu.

#### Porównanie silników

W szeregu publikacji, w tym również w pracy [2], [3] można się spotkać z opinią, że bezszczotkowe silniki prądu stałego (PM BLDC), mogą zastąpić każdy dotychczasowy inny rodzaj maszyny elektrycznej i można je uznać za napęd przyszłościowy. Niektóre z cech charakterystycznych, są unikalnymi cechami tego rodzaju silnika w porównaniu do innych. Ważne i wyjątkowe cechy bezszczotkowych silników PM BLDC to:

- przeciężalność momentem do około 5-7 razy w zależności od wykonania w stosunku do momentu nominalnego,
- mniejsze gabaryty i masa,
- proste sterowanie prędkością obrotową, włączając stabilizację prędkości,
- możliwość pracy grupowej z indywidualną korektą prędkości,

- moment hamujący nieruchomego silnika,
- charakterystyka mechaniczna, liniowa niezależna od prędkości obrotowej,
- wyższa dynamika działania,
- mniejszy wpływ wielkości szczeliny powietrznej,
- prostsze układy hamowania ze zwrotem energii,
- większa sprawność całkowita łącznie z układem regulacji,
- niższy koszt łożysk w zakresie porównywalnych prędkości obrotowych.

Cechy silników PM BLDC porównywalne z innymi typami:

- Przeciążalność prądem do prądu zwarcia włącznie,
- zasilanie, wszystkich rodzajów silnika wymaga układów energoelektronicznych.

Jedyną niekorzystną cechą silników PM BLDC w stosunku do pozostałych, jest trochę wyższy koszt, ze względu na konieczność stosowania magnesów trwałych, jednak pozytywnym aspektem, są ciągle spadające ceny tych magnesów.

#### Podsumowanie

Wykorzystanie silników PM BLDC w zakresie ekstremalnych warunków i parametrów pracy pozwala na powstanie wielu nowych urządzeń. Przykładem takiego urządzenia jest prezentowana frezarka do zastosowania w przemyśle samochodowym, ale zapewne istnieje wiele innych możliwych przypadków wykorzystania tego lub bardzo podobnych urządzeń z wykorzystaniem silnika PM BLDC w zakresie pracy przerywanej okresowej S3. Wykorzystując wiele cennych zalet pracy silników PM

BLDC możemy uzyskać rozwiązania o mniejszych gabarytach z zachowaniem napięć bezpiecznych oraz w niektórych przypadkach, szczególnie gdzie jest ważne bezpieczeństwo ludzi lub procesów mieć pewność, że proces rozpoczęty po zaniku zasilania zostanie doprowadzony do swojego końca. Bardzo ważną własnością opisanego napędu jest to, iż silnik ze zredukowaną elektronicznie prędkością obrotową, wraz z przekładnią, jest mniejszym urządzeniem w porównaniu do silnika asynchronicznego na odpowiednią prędkość obrotową [3]. Dodatkowo zachowuje wszystkie korzystne cechy jak regulacja prędkości, miękki start, hamowanie , ograniczenie prądowe oraz inne.

**Autor:** mgr inż. Patryk Gałuszkiewicz, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektrotechniki Przemysłowej, Zakład Sterowania i Odnawialnych Źródeł Energii, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: patryk.galuszkiewicz@gmail.com

#### LITERATURA

- [1] Krykowski K., Silnik PM BLDC w napędzie elektrycznym – analiza, właściwości, modelowanie, *Monografia, Gliwice 2011*
- [2] Krykowski K., *Silniki PM BLDC, Wydawnictwo BTC, Gliwice 2015*
- [3] Glinka T., Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi, *Monografia, Gliwice 2002*
- [4] Barlik R., Nowak M., Energoelektronika – elementy, podzespoły, układy, *Oficina Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014*
- [5] Hetmańczyk J., Gałuszkiewicz Z., Krykowski K., Mikiewicz R., *Wysokoobrotowy silnik PM BLDC, Przegląd Elektrotechniczny, 02/2010, 160*