

Emil Król, Marcin Maciążek  
BOBRME KOMEL, Katowice

## WPLYW ALGORYTMU STEROWANIA PRZEKSZTAŁTNIKA NA WŁAŚCIWOŚCI NAPĘDU Z SILNIKIEM BEZSZCZOTKOWYM

### INFLUENCE OF THE INVERTER CONTROL-ALGORITHM ON THE PROPERTIES OF DRIVE SYSTEM WITH BRUSHLESS MOTOR

**Abstrakt:** W artykule przedstawiono podstawowe typy silników z magnesami trwałymi stosowane w napędach elektrycznych. Omówiono budowę wirników, różnice konstrukcyjne oraz wskazano podstawowe wady i zalety silników synchronicznych z magnesami trwałymi (PMSM) oraz silników bezszczotkowych prądu stałego (BLDC). W dalszej części artykułu przedstawiono wyniki badań układu napędowego z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi (wirnik IPM) oraz wirnikiem BLDC, który zasilany był z falowników z zaimplementowanymi różnymi algorytmami sterowania tj. BLDC, PMSM SPM, PMSM IPM.

**Abstract:** In the paper was a described basic type of permanent magnet motors used in electric drives. Rotors construction differences and points the basic advantages and disadvantages of permanent magnets synchronous motors (PMSM) and brushless DC motors (BLDC) was described. In the rest of the article results of tests the drive system of synchronous motor with permanent magnet (IPM rotor) and a BLDC rotor was presented. Drive system was powered by the inverter with implemented different control algorithms ie the BLDC, PMSM SPM, PMSM IPM.

**Słowa kluczowe:** PMSM, BLDC, silnik z magnesami trwałymi, optymalne sterowanie silników z magnesami trwałymi

**Key words:** PMSM, BLDC, permanent magnet synchronous motor, optimal control of permanent magnet motors

#### 1. Wstęp

Napędy z silnikami bezszczotkowymi średniej mocy są najczęściej wykorzystywane jako napędy trakcyjne pojazdów lub innych maszyn trakcyjnych. Jako silniki w takich napędach coraz częściej używane są silniki z magnesami trwałymi, i to zarówno silniki bezszczotkowe prądu stałego (BLDC), jak również silniki synchroniczne z magnesami trwałymi (PMSM) [1]. Silniki te stosowane są ze względu na ich wysoką sprawność oraz korzystny stosunek masy do momentu. Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi mogą być wykorzystywane zarówno, jako prądnice oraz jako silniki. W tym artykule przedstawione zostaną zagadnienia związane głównie z pracą silnikową.

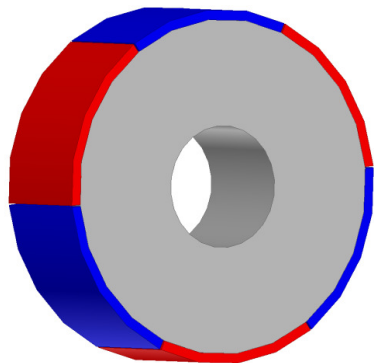
Silniki elektryczne z magnesami trwałymi można podzielić na kilka grup w zależności od sposobu i miejsca umieszczenia magnesów trwałych w maszynie oraz ze względu na sposób sterowania maszyny. Silniki z magnesami umieszczonymi na wirniku dzielą się ze względu na sposób sterowania na silniki BLDC i PMSM. Silniki z magnesami umieszczonymi wewnątrz wirnika najczęściej są silnikami syn-

chronicznymi PMSM, wynika to z otrzymanego przebiegu indukcji magnetycznej w szczelinie oraz możliwości wykorzystania asymetrii magnetycznej wirnika. Sterowanie pracą silnika synchronicznego PMSM (pomimo podobnej konstrukcji maszyny) jest zupełnie inne, od sposobu sterowania silnika bezszczotkowego BLDC, jeden wymaga sinusoidalnego, a drugi prostokątnego (trapezowego) kształtu napięcia zasilającego. Różnią się również sposobem detekcji położenia wirnika względem stojana (informacja ta jest niezbędna do prawidłowego sterowania). Natomiast w obu rodzajach silników wektory siły elektromotorycznej stojanów wirują wraz z wirnikami. Odpowiednie wartości przesunięcia kąтового strumienia wzbudzenia i siły elektromotorycznej stojana uzyskuje się poprzez odpowiednie sterowanie przekształtnikiem energoelektronicznym (falownikiem) [2]. Silniki z magnesami trwałymi dzięki zastosowaniu przekształtników energoelektronicznych mają kilka zalet w stosunku do maszyn komutatorowych prądu stałego: brak komutatora i węzła szczotkowego, wyższą sprawność i większą gęstość mocy tzn. mniejszą objętość i ma-

sę przy jednakowych parametrach elektromechanicznych w porównywalnych warunkach chłodzenia. Komutator mechaniczny i węzeł szczotkowy ograniczają maksymalne prądy silnika prądu stałego i maksymalną prędkość obrotową maszyny. Ograniczeń tych nie ma w silnikach z magnesami trwałymi zasilanych z przetwórców energoelektronicznych, które można przeciążać znacznie bardziej. Ograniczeniem prądu maksymalnego dla zespołu silnik z magnesami trwałymi plus falownik jest prąd struktur półprzewodnikowych przetwórcznika oraz odporność magnesów na odmagnesowanie. Czas przeciążenia determinują warunki cieplne falownika i silnika. Silniki BLDC i PMSM różnią się poza sposobem sterowaniem również budową wirnika.

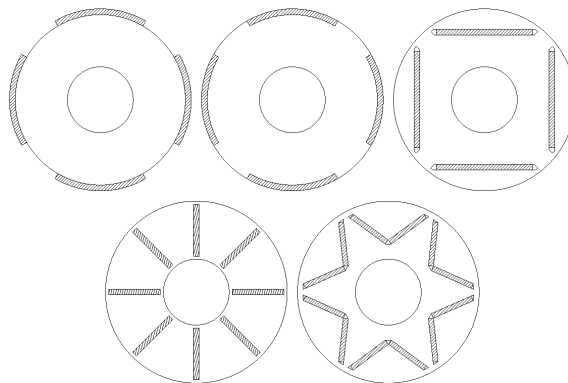
## 2. Wirniki silników z magnesami trwałymi

W silnikach BLDC rozkład pola magnetycznego determinuje budowę wirnika, aby uzyskać przebieg indukcji zbliżony do prostokątnego (w praktyce uzyskuje się przebieg trapezowy) wirnik silnika BLDC ma całkowicie wypełnioną podziałkę biegunową magnesami trwałymi. Wirnik taki przedstawiono na rysunku poniżej.



Rys. 1. Wirnik silnika BLDC

W silnikach PMSM dążymy do sinusoidalnego rozkładu pola magnetycznego w szczelinie. Aby uzyskać przebieg indukcji magnetycznej zbliżony do sinusoidalnego dla wirników z magnesami na powierzchni podziałka biegunowa powinna być wypełniona w 2/3. W przypadku wirników z magnesami umieszczonymi wewnątrz wirnika oprócz dążenia do osiągnięcia przebiegu indukcji magnetycznej zbliżonej do sinusoidalnego należy uwzględnić wpływ różnicy reaktancji w osiach poprzecznej i podłużnej maszyny.



Rys. 2. Typowe wirniki silników PMSM

Rozwiązania wirników w maszynach BLDC i PMSM są różne i różny jest sposób sterowania, który determinuje charakterystyki napędowe silników oraz dopasowanie do wymagań napędu, przez co silniki te mają różne właściwości elektromechaniczne.

## 3. Silniki synchroniczne

Silniki PMSM najczęściej są wykonywane w wersji z wirnikiem IPM (interior permanent magnet), w takim typie wirnika magnesy trwałe są umieszczone wewnątrz wirnika. Silniki z wirnikami IPM dysponują dwoma składowymi momentami elektromagnetycznymi. Oprócz występującej we wszystkich konstrukcjach silników PMSM składowej związanej z siłą magnetyczną magnesów trwałych, w silnikach tych występuje jeszcze składowa reluktancyjna momentu synchronicznego. Składowa reluktancyjna związana jest z asymetrią magnetyczną wirnika. Cechą charakterystyczną asymetrii magnetycznej wirników w silnikach PMSM jest to, że reluktancja magnetyczna w osi d wirnika jest zwykle znacząco większa od reluktancji w osi q [3]. Im większą wartością ilorazu  $X_q/X_d$  charakteryzuje się zastosowana konstrukcja wirnika, tym większa jest wartość składowej reluktancyjnej momentu synchronicznego i tym samym jej udział w wypadkowym momencie synchronicznym  $T_e$  silnika może być większy. Zależnie od konstrukcji wirnika, składowa reluktancyjna ma zwykle od 5% do 30% udziału w wypadkowym momencie synchronicznym wytwarzanym przez silnik [3]. W silniku synchronicznym z wirnikiem IPM przy zastosowaniu odpowiedniego sterowania możemy wykorzystać moment reluktancyjny, który poprawia parametry silnika i pozwala ograniczyć masę i gabaryty. Zależność na moment elektromagnetyczny  $T_e$  3-fazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi

(PMSM) zasilanego sinusoidalną falą prądu przyjmuje postać:

$$T_e = \frac{3 \cdot p}{2} [\psi_d I_q - \psi_q I_d] \quad (1)$$

a po uwzględnieniu, że  $\psi_d = L_d I_d + \psi_{mag}$  oraz  $\psi_q = L_q I_q$  otrzymujemy:

$$T_e = \frac{3 \cdot p}{2} [I_q \psi_{mag} + (L_d - L_q) I_d I_q] \quad (2)$$

Gdzie:

$\psi_d$  – strumień skojarzony z uzwojeniem stojana w osi d;

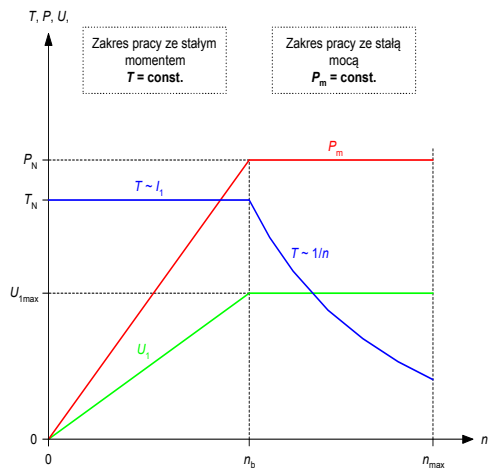
$\psi_q$  – strumień skojarzony z uzwojeniem stojana w osi q;

$\psi_{mag}$  – strumień wzbudzenia od magnesów trwałych skojarzony z uzwojeniem stojana;

$L_d, L_q$  – indukcyjności odpowiednio w osi d i q;

$p$  – liczba par biegunów;

Silniki PMSM mogą pracować w dwóch zakresach prędkości obrotowej (Rys.3): od zera do prędkości bazowej (praca przy stałym momencie) i w zakresie od prędkości bazowej do prędkości maksymalnej (praca przy stałej mocy) [4].



Rys. 3. Charakterystyki silnika PMSM z dwustrefową regulacją prędkości obrotowej

W silnikach PMSM stosuje się enkodery, które w sposób ciągły przekazują informacje do sterownika o położeniu kątowym wirnika względem osi uzwojenia stojana. Wykorzystuje się w tym celu enkodery inkrementalne oraz absolutne. Zastosowanie enkodera inkrementalnego wymaga zastosowania skomplikowanych metod detekcji położenia wirnika w pierwszych chwilach pracy silnika, które

mają umożliwić obrót wirnika w wybranym kierunku do czasu otrzymania z enkodera sygnału indeksu. W przypadku enkoderów inkrementalnych sygnał indeksu jest generowany raz na obrót wirnika. Dla enkoderów absolutnych nie trzeba stosować tak wyrafinowanych metod detekcji początkowego położenia wirnika silnika, gdyż ten typ enkodera zachowuje informację o położeniu nawet w przypadku chwilowego zaniku napięcia zasilającego. Zasadniczą wadą enkodera absolutnego jest jego cena, która ponad pięciokrotnie przekracza cenę enkodera inkrementalnego.

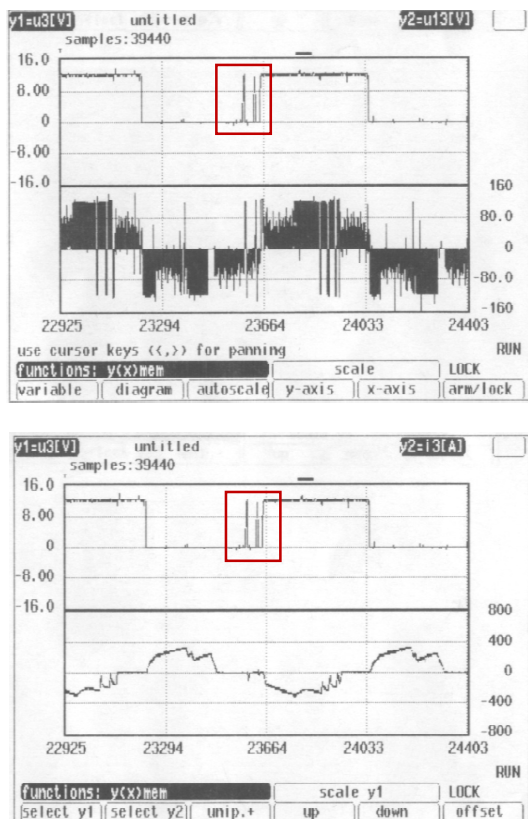
#### 4. Silniki BLDC

Silniki BLDC stosowane są w napędach, gdzie nie ma potrzeby regulacji prędkości obrotowej powyżej bazowej, jest to zakres pracy przy stałym momencie obciążenia. W przypadku silników BLDC do pomiaru kąta pomiędzy wektorem strumienia wzbudzenia, a uzwojeniem stojana najczęściej stosuje się hallotrony umieszczone w żłobkach stojana. Dla tego typu silnika stosuje się również enkodery z wyjściem typu UVW (tzw. enkodery komutacyjne) jednak są one znacznie droższe od hallotronów. Jednak na korzyść enkoderów przemawia fakt, że są one proste w montażu i konfiguracji oraz są odporne na zakłócenia powodujące nieprawidłowe działania hallotronów umieszczonych w żłobkach stojana (źródłem tych zakłóceń są prądy płynące w uzwojeniu). Ponadto w wielu przypadkach nie można zamontować hallotronów w żłobku stojana, taki przypadek występuje dla silników, w których liczba żłobków na biegun i fazę jest parzysta, w takim przypadku należy umieścić hallotrony w wyfrezowanych miejscach na zębach stojana – Rys.4.



Rys. 4. Jeden z hallotronów zamocowany w zębie stojana

Hallotrony zamontowane w żłóbkach lub w zębach stojana są podatne na zakłócenia pochodzące od prądu płynącego w uzwojeniach stojana, przykładowe przebiegi sygnału wyjściowego pokazano na Rys.5.



Rys. 5. Zakłócenia w sygnale hallotronów powodujące niestabilną pracę napędu

Zakłócenia takie powodują niestabilną pracę silnika, co w konsekwencji może nie pozwolić na uzyskanie wymaganych parametrów napędu.

## 5. Porównanie parametrów napędu przy różnym sposobie zasilania silnika

W laboratorium BOBRME KOMEL przeprowadzono szereg prób i badań mających na celu zbadanie wpływu zastosowanego algorytmu sterowania silnika synchronicznego oraz silnika BLDC na parametry napędu. Dla silnika wzniosu mechanicznego 132 i mocy znamionowej 15 kW zaprojektowano wirnik IPM oraz wirnik z magnesami na powierzchni z pełnym wypełnieniem podziałki biegunowej (wirnik silnika BLDC). Podczas badań silnika z wirnikiem IPM zasilono go z falownika dedykowanego (oprogramowanie BOBRME KOMEL) przy zasilaniu falownika znamionowym napięciem stałym. Uzyskane wyniki (Tabela 1) stanowiły odnośnik dla porównania wpływu

algorytmu sterowania przekształtnikami na uzyskane parametry napędu, który wykorzystuje bezszczotkowy silnik z magnesami trwałymi.

Tabela 1

$I_{sr}$	$n$	$M$	$P_{mech}$	$\eta$
A	$\text{min}^{-1}$	Nm	kW	%
326,13	2958,3	95,69	29,64	90,26

W silniku umieszczono dodatkowo hallotrony dla zbadania parametrów silnika przy zasilaniu z przekształtnika z oprogramowaniem przystosowanym dla silników BLDC. Badania przeprowadzono dla maksymalnego prądu, przy jakim napęd pracował stabilnie i uzyskiwał zadaną prędkość obrotową (poniżej prędkości bazowej). W drugiej próbie silnik z wirnikiem IPM został zasilony z falownika sprzętowo identycznego jak w próbie pierwszej, jednak wykorzystano oprogramowanie dla silników IPM innej firmy. Wyniki tej próby zostały pokazane w Tabeli 2.

Tabela 2

$I_{sr}$	$n$	$M$	$P_{mech}$	$\eta$
A	$\text{min}^{-1}$	Nm	kW	%
237,15	2949,8	70,71	21,84	92,04

Uzyskana maksymalna moc na wale silnika jest niższa o ponad 7,5 kW, uzyskany wynik najprawdopodobniej wynikał z ograniczeń prądowych zaszytych w oprogramowaniu falownika.

W trzeciej próbie silnik z wirnikiem IPM został zasilony z falownika o parametrach prądowych i napięciowych identycznych, jak w próbie pierwszej, jednak przystosowanym do pracy z silnikami BLDC oraz wykorzystującym do pomiaru położenia wirnika hallotrony. Wyniki tej próby zostały pokazane w Tabeli 3.

Tabela 3

$I_{sr}$	$n$	$M$	$P_{mech}$	$\eta$
A	$\text{min}^{-1}$	Nm	kW	%
47,66	3053,9	11,06	3,53	87,33

Uzyskana maksymalna moc na wale silnika jest bardzo mała, pomimo dużej wydajności prądowej przekształtnika (400 A RMS), stabilną pracę napędu udało się utrzymać do prądu 47 A. Powyżej tego prądu zakłócenia sygnałów otrzymanych z hallotronów oraz niedopasowanie do wirnika IPM uniemożliwiały poprawną pracę silnika.

W czwartej próbie w silniku zmieniono wirnik IPM na wirnik z magnesami na powierzchni (Rys.1) z pełnym wypełnieniem podziałki biegunowej (BLDC). Silnik został zasilony z falownika o parametrach prądowych i napięcio-

wych identycznych, jak w próbie pierwszej jednak z oprogramowaniem wewnętrznym przystosowanym do pracy z silnikami BLDC oraz wykorzystującym do pomiaru położenia wirnika trzy hallotrony. Wyniki tej próby zostały pokazane w Tabeli 4.

Tabela 4

$I_{sr}$	n	M	$P_{mech}$	$\eta$
A	$\text{min}^{-1}$	Nm	kW	%
198,25	3028,0	40,01	12,68	83,37

Uzyskana maksymalna moc na wale silnika jest niższa o 17 kW od napędu wzorcowego. Dalsze zwiększanie obciążenia silnika powodowało niestabilną pracę napędu (Rys.4) wywołaną zakłóceniami hallotronów. Umieszczenie hallotronów w innym miejscu silnika (np. dodatkowa tarcza) lub użycie enkodera z wyjściami UVW powinno pozwolić uzyskać wyższe parametry elektromechaniczne napędu.

W piątej próbie w silniku pozostał wirnik BLDC (Rys.1) z pełnym wypełnieniem podziałki biegunowej. Silnik został zasilony z falownika o parametrach prądowych i napięciowych identycznych jak w próbie pierwszej, jednak z oprogramowaniem wewnętrznym przystosowanym do pracy z silnikami synchronicznymi z magnesami umieszczonymi na powierzchni (SPM), do pomiaru położenia wirnika został użyty enkoder inkrementalny. Wyniki tej próby zostały pokazane w Tabeli 5.

Tabela 5

$I_{sr}$	n	M	$P_{mech}$	$\eta$
A	$\text{min}^{-1}$	Nm	kW	%
197,84	2273,5	46,21	11,00	89,15

Oprogramowanie falownika w tej próbie było zoptymalizowane do pracy z sinusoidalnym przebiegiem siły elektromotorycznej indukowanej w stojanie. W silniku z wirnikiem BLDC przebieg siły elektromotorycznej jest zbliżony do trapezowego, co było przyczyną niskiej prędkości obrotowej i małej mocy.

Przeprowadzono również badania w pozostałych możliwych konfiguracjach wirnika i przekształtnika jednak napęd nie pracował poprawnie lub w ogóle nie pracował (silnik z wirnikiem BLDC oraz przekształtnik z oprogramowaniem dla silników synchronicznych IPM).

## 6. Podsumowanie i wnioski

Z przeprowadzonych badań wynika, że parametry napędu wykorzystującego silniki bezszczotkowe z magnesami trwałymi zależą w bardzo

dużym stopniu od zastosowanego oprogramowania przekształtnika. Z badań wynika, że tylko prawidłowy dobór falownika do silnika gwarantuje wymagane parametry napędu. Należy również zaznaczyć, że pomimo bardzo dobrych parametrów silnika możliwych do uzyskania przy zastosowaniu odpowiedniego falownika, ten sam silnik ze źle dobranym przekształtnikiem będzie dostarczał zaledwie 12% mocy możliwej do uzyskania z silnika. Najbardziej niekorzystne wyniki otrzymano dla wirnika IPM zasilanego z falownika BLDC, gdzie moc maksymalna jaką uzyskano z silnika to jedynie 3,5 kW. Nieco lepiej przedstawia się sytuacja wirnika BLDC i falownika dla silników synchronicznych, ponieważ w takim układzie moc maksymalna to 11 kW. Przy odpowiednim doborze silnika i falownika moc maksymalną jaką można uzyskać z napędu to 30 kW.

## 7. Literatura

- [1]. Glinka T.: „Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi”. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [2]. Bernatt J.: „Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi” ISBN 978-83-910585-9-6.
- [3]. Król E, Rossa R.: „Silniki z magnesami trwałymi o dużej przeciążalności momentem”. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne. BOBRME KOMEL, nr 81/2009.
- [4]. Rossa R., Król E. “Dwustrefowa regulacja prędkości obrotowej w nowoczesnych napędach elektrycznych opartych na silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi”, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne. BOBRME KOMEL, nr 81/2009, str. 125-129.

## Autorzy

Emil Król, Marcin Maciążek  
BOBRME KOMEL  
al. Roździeńskiego 188  
40-203 Katowice  
e-mail: e.król@komel.katowice.pl  
m.maciazek@komel.katowice.pl