

## Wpływ położenia czujników hallotronowych na symetrię sygnałów sterujących silnikiem BLDC

*W pracy przedstawione zostały wyniki badań symetrii stanów pozwalających określić położenie kątowe wału silnika dla dwóch różnych czujników. Pierwszy z nich zamontowany został wewnątrz silnika i składał się z sześciu czujników hallotronowych rozmieszczonych w żłobkach silnika. Drugi z przebadanych czujników składał się również z sześciu hallotronów rozmieszczonych względem siebie tak samo jak w przypadku czujnika pierwszego, ale zabudowanych na zewnątrz silnika i współpracujących z dodatkowym nadajnikiem magnetycznym odzwierciedlającym magnesy wirnika silnika. Na potrzeby badań wykonany został rejestrator pozwalający rejestrować czasy trwania poszczególnych stanów położenia wału silnika.*

### Wstęp

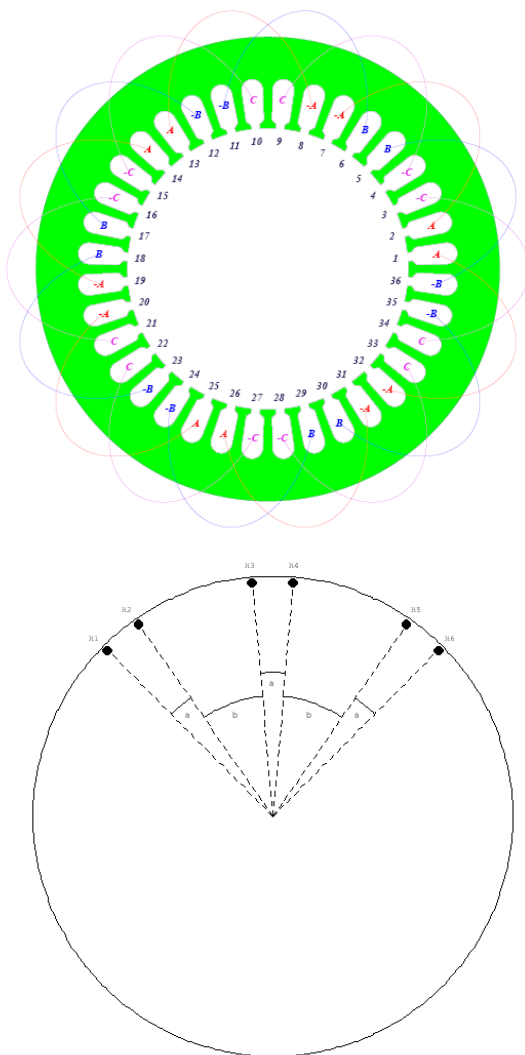
Zasilanie trójfazowego silnika wzbudzanego magnesami trwałymi wymaga sekwencyjnego przełączania tranzystorów, poprzez które zasilane są uzwojenia silnika ze źródła napięcia stałego. Sekwencja zasilania silnika wzbudzanego magnesami trwałymi jest ściśle zdeterminowana położeniem osi magnetycznej wirnika względem osi pasm uzwojenia stojana. Z tego względu konieczne jest wyznaczenie położenia kąтового wirnika w trakcie pracy silnika. Znane są dwie metody określania położenia wirnika: czujnikowe i bezczujnikowe. Metoda czujnikowa wykorzystuje czujniki dołączone do silnika (np. hallotроны, enkodery absolutne lub inkrementalne), zaś metoda bezczujnikowa bazuje na sygnale pochodzącym z uzwojeń silnika, przez co nie wymaga dodatkowego osprzętu. O ile podobne rezultaty otrzymuje się podczas pracy silnika dla obydwóch metod, to w przypadku startu i nawrotu metodą lepszą jest metoda czujnikowa z czujnikami absolutnymi określającymi położenie wirnika przy prędkości równej zero. Szczególnie istotną rolę odgrywa to w przypadku napędów trakcyjnych, gdyż one nie powinny wykonywać kroku wstecz i wymagają znacznego momentu startu.

### Metoda czujnikowa

Sterowanie silnikiem BLDC nie wymaga ciągłego śledzenia położenia wirnika, wystarczy aby układ pomiarowy kąta położenia wirnika dał sygnał w którym momencie należy załączyć napięcie na dane pasmo uzwojenia. Do tego celu można wykorzystać enkodery. Enkoder jest precyzyjnym miernikiem określającym położenie kątowe wirnika, ale podnosi koszt napędu, przy tym przekazuje znaczny nadmiar informacji, które dla potrzeb sterowania silnikiem

BLDC nie są wykorzystywane. Enkodery nie są przedmiotem artykułu. Do sterowania silnikiem BLDC można wykorzystać tanie czujniki hallotronowe. W artykule omówione zostaną dwa warianty określania położenia wirnika z wykorzystaniem czujników hallotronowych: hallotроны umieszczone w żłobkach stojana i czujnik hallotronowy umieszczony na zewnątrz silnika. W badaniach wykorzystano trójfazowy, sześciobiegunowy silnik BLDC typu SMZT80-6, który został zbudowany w ramach projektu badawczego finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N N510 326637. Czujnik pierwszy składał się z sześciu hallotronów umieszczonych w żłobkach stojana. Odległość kątaowa pomiędzy kolejnymi żłobkami silnika wynosi 10 stopni, zatem hallotроны rozmieszczono zgodnie ze schematem przedstawionym na Rysunku 1. Jest to optymalne rozmieszczenie hallotronów (ze względu na geometrię) pozwalające wykryć 12 symetrycznych stanów określających jeden cykl sterowania. W przypadku silnika sześciobiegunowego przypada 36 stanów na jeden obrót wału (trzy pełne sekwencje sterowania). Analiza sygnałów hallotronów umieszczonych w żłobkach silnika BLDC, określających położenie wirnika, wykazała, że stany określone przez te hallotроны nie są symetryczne. Alternatywnie wykonano drugi czujnik o takim samym kątowym rozmieszczeniu hallotronów jak w żłobkach silnika (Rysunek 1), lecz hallotроны umieszczono na zewnętrznej tarczy. Hallotроны znajdowały się w polu magnetycznym sześciobiegunowej tarczy z naklejonymi magnesami trwałymi mechanicznie sprzęgniętej z wałem silnika. Zewnętrzny nadajnik magnetyczny wykonano w taki sposób, aby przerwa pomiędzy magnesami

była minimalna, co odróżnia go do wirnika silnika BLDC, w którym pomiędzy magnesami trwałymi występuje przerwa międzybiegunowa.



Rys. 1 Wykrój blachy stojana silnika BLDC o liczbie biegunów  $2p=6$  (rysunek z lewej – źródło: BOBRME KOMEL Katowice) i schemat rozmieszczenia sześciu hallotronów, gdzie  $\alpha=10^\circ$ ,  $b=30^\circ$  (rysunek z prawej)

Opisane czujniki wykorzystano do badań porównawczych sygnałów sterujących pracą silnika BLDC. Podczas pracy silnika ze stałą prędkością obrotową czas trwania każdego ze stanów określających położenie wirnika powinien być taki sam. Korzystając z powyższego założenia stworzono rejestrator, pozwalający zarejestrować czas trwania kolejnych stanów. Rejestrator został wykonany w taki sposób, żeby pomiary były wykonywane zawsze dla tej samej ustalonej kolejności stanów (rejestracja rozpoczyna się zawsze od ustalonego położenia wału silnika, wyznaczanego dodatkowym czujnikiem). Rejestrator wykonuje pomiar czasu trwania każdego ze stanów składających się na jeden obrót wału silnika (trzy pełne sekwencje sterowania). Ponadto możliwa jest wielokrotna rejestracja w trakcie pracy silnika, dzięki czemu można

przeprowadzić pomiary wielokrotne dla tych samych warunków pracy silnika. Rejestrator został zbudowany w oparciu o mikroprocesor, który po wykonaniu jednej rejestracji wysyła dane portem szeregowym do komputera. Po stronie komputera napisany został program współpracujący z mikroprocesorem i obliczający statystyki dla otrzymanych wyników pomiaru. Narzędzie to pozwala z dużą dokładnością zbadać symetrię sygnałów sterowania.

### Badania i analiza wyników

Badania symetrii sygnałów określających położenie wirnika silnika zostały przeprowadzone dla dwóch przypadków pracy silnika: pierwszy - silnik był napędzany przez inny silnik (uzwojenia badanego silnika nie były zasilane), drugi - silnik był zasilany i utrzymywał zadaną prędkość. W pierwszym przypadku badania zostały przeprowadzone dla dwóch różnych prędkości wirowania: 340obr/min i 560obr/min (ze względu na parametry silnika napędzającego) oraz w drugim przypadku dla trzech prędkości wirowania: 340obr/min, 680obr/min i prędkości znamionowej 1000obr/min. Wynik każdego z pomiarów składa się z 36 liczb reprezentujących czas trwania każdego z 36 stanów przypadających na jeden obrót wału silnika. Każda liczba przedstawia zliczoną wartość licznika mikroprocesora w trakcie trwania jednego stanu. Przy stałej prędkości obrotowej dla idealnie pracującego układu czasy trwania wszystkich stanów będą takie same, co przełoży się na zarejestrowanie 36 takich samych liczb. W celu przeprowadzenia analizy wyników pomiarów wykonano obliczenia statystyczne czasów trwania poszczególnych stanów składających się na jeden obrót wału silnika: średnia arytmetyczna, odchylenie standardowe, wskaźnik zmienności oraz względne maksymalne odchylenie od średniej. Przyjmując, że  $k$ -tą liczbę w wyniku pomiaru oznaczono przez  $x_k$  wskaźniki statystyczne zostały zdefiniowane w następujący sposób:

- Średnia  $\bar{x} = \frac{1}{36} \sum_{k=1}^{36} x_k$
- odchylenie standardowe  $s = \sqrt{\frac{1}{36} \sum_{k=1}^{36} (x_k - \bar{x})^2}$
- wskaźnik zmienności  $v = 100\% \frac{s}{\bar{x}}$
- względne maksymalne odchylenie od średniej  $r = \max \left\{ 100\% \frac{|x_k - \bar{x}|}{\bar{x}}, k=1, \dots, 36 \right\}$

W Tabeli 1 przedstawiono przykład danych zarejestrowanych dla czujnika zewnętrznego oraz hallotronów zamontowanych w silniku napędzanym inną maszyną, gdzie kolejne kolumny przedstawiają czasy trwania tych samych stanów powtarzających się co 1/3 obrotu wału silnika.

**Tabela 1. Przykładowe wyniki pomiarów zarejestrowane dla dwóch czujników podczas napędzania silnika z prędkością 340obr/min**

Stan	Hallotrony w żłobkach silnika			Czujnik zewnętrzny		
	0-1/3 obr.	1/3-2/3 obr.	2/3-1 obr.	0-1/3 obr.	1/3-2/3 obr.	2/3-1 obr.
1	4531	4502	4832	5104	4727	5021
2	5823	5847	5828	5225	5208	5237
3	4982	4980	4982	5266	5588	5383
4	1682	2039	1471	5496	5514	5502
5	8768	8704	8962	5101	5267	5306
6	2127	1957	1979	5571	5557	5537
7	8424	8435	8510	5021	4876	4785
8	6316	6191	6211	5286	5274	5251
9	4571	4781	4630	5256	5389	5439
10	4665	4356	4574	5425	5413	5444
11	5934	6142	6124	5376	5156	5089
12	5546	5357	5539	5511	5545	5548

**Tabela 2. Zestawienie analizy wyników podczas napędzania silnika**

n Obr/min	Hallotrony w żłobkach silnika				Czujnik zewnętrzny			
	340		560		340		560	
Kierunek	0	1	0	1	0	1	0	1
$\bar{x}$	5286	5250	3186	3173	5299	5306	3176	3174
s	2026	1295	1198	767	223	204	126	134
v [%]	38.33	24.67	37.61	24.17	4.20	3.85	3.97	4.22
r [%]	72.17	68.93	71.38	67.76	10.80	9.12	9.99	9.69

**Tabela 3. Zestawienie analizy wyników dla pracy na biegu jałowym**

n Obr/min	Hallotrony w żłobkach silnika						Czujnik zewnętrzny					
	340		680		1000		340		680		1000	
Kierunek	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
$\bar{x}$	5284	4777	2632	2416	1782	1485	5161	5277	2603	2629	1803	1791
s	2173	2022	1032	1149	701	856	187	182	101	80	64	51
v [%]	41.12	42.33	39.21	47.57	39.35	57.66	3.62	3.45	3.89	3.04	3.55	2.85
r [%]	70.08	91.27	67.25	90.67	74.63	107.31	7.65	6.99	6.96	6.42	7.27	5.88

W Tabeli 2 oraz Tabeli 3 przedstawione zostały wyniki analizy pomiarów odpowiednio dla silnika napędzanego i pracującego na biegu jałowym, wykonanych dla obydwóch kierunków wirowania oznaczonych przez 0 i 1 dla różnych prędkości obrotowych wirnika.

Z powyższych analiz wynika, że bez względu na to czy silnik był napędzany (uzwojenia nie były zasilane) czy pracował na biegu jałowym w przypadku czujników umieszczonych wewnątrz silnika symetria stanów położenia wirnika jest znacznie gorsza niż w przypadku czujnika zewnętrznego. Stąd wynika, że na symetrię stanów określających położenie wirnika wpływ ma nie tylko właściwe rozmieszczenie hallotronów. Analiza wyników dla przypadku, kiedy silnik był napędzany inną maszyną pozwala stwierdzić, że zaburzenia symetrii stanów nie są powodowane polem magnetycznym wywołanym przepływem prądu w uzwojeniach silnika. Na wirniku badanego silnika

BLDC pomiędzy magnesami trwałymi znajdują się przerwy, co może powodować asymetrię stanów wykrywanych przez czujniki hallotronowe umieszczone wewnątrz silnika. W przypadku czujnika zewnętrznego otrzymano znacznie lepsze rezultaty określania stanów położenia wirnika. W obu przypadkach użyto hallotronów tego samego typu, rozmieszczonych w takich samych odległościach kątowych (Rysunek 1). Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że znacznie dokładniejsze określenie stanów położenia wirnika uzyskano przy wykorzystaniu zewnętrznego czujnika, składającego się z 6 hallotronów i tarczy magnetycznej. Dodatkową korzyścią wynikającą z zastosowania czujnika zewnętrznego jest możliwość jego wymiany, bądź naprawy w przypadku uszkodzenia. Nie ma możliwości wymiany czujnika hallotronowego zabudowanego w żłobku silnika ze względu na impregnację czujnika wraz z uzwojeniem.

## Literatura

- [1]. Sikora A., Zielonka A.: Porównanie dwóch wariantów zasilania silnika bezszczotkowego. *Maszyny elektryczne Zeszyty Problemowe Nr 86/2010 PEMINE Komel, Rytro, maj 2010r. ISSN 0239-3646, str. 53-55.*
- [2]. Glinka T.: *Electric motors with permanent magnets. Przegląd Elektrotechniczny, PL ISSN 0033-2097, nr 7/2008, str. 1 – 7.*
- [3]. Bernatt J., Glinka T., Król E., Rossa R.: *Electric Motors with Permanent Magnets. ICRM 2008. IEEE Catalog Number: CFP0890B-CDR. ISBN: 978-1-4244-1736-0. Library of Congress Number: 2007906913. Poz.58.*
- [4]. Sikora A., Zielonka A.: Napęd łodzi motorowej z wykorzystaniem silnika bezszczotkowego zasilanego przez komutator elektroniczny. *Napędy i Sterowanie ISSN 1507-7764, nr 2'2010 str.46-48.*
- [5]. Jarzębowicz L., Karwowski K.: *Bezczujnikowe sterowanie trakcyjnym silnikiem IPMSM małej mocy. XIV Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej i VI Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie SEMTRAK'2010, Zakopane, październik 2010r. ISBN 978-83-86219-51-3, str. 271-278.*
- [6]. Sikora A., Zielonka A.: *Dwa warianty zasilania silnika BLDC. Wiadomości Elektrotechniczne ISSN 0043-5112, nr 6'2011 str.18-19.*