

*silnik bezszczotkowy, magnesy trwałe,  
przebiegi czasowe, obliczenia, pomiary*

Marek CIURYS\*, Ignacy DUDZIKOWSKI\*, Paweł KMIEĆ\*

## **ANALIZA WPLYWU SPOSOBU NAMAGNESOWANIA MAGNESÓW NA PRZEBIEGI CZASOWE WIELKOŚCI ELEKTRYCZNYCH I MECHANICZNYCH W SILNIKU BEZSZCZOTKOWYM**

Opracowano modele polowo-obwodowe silnika bezszczotkowego z magnesami namagnesowanymi promieniowo oraz średnicowo. Wyznaczono przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych w silniku przy różnym namagnesowaniu magnesów. Wykonano pomiary przebiegów czasowych. Obliczone przebiegi czasowe porównano ze zmierzonymi.

### 1. WSTĘP

Rozwój energoelektroniki i technik mikroprocesorowych oraz tendencja do stosowania energooszczędnych układów napędowych powoduje coraz szersze zastosowanie silników bezszczotkowych z magnesami trwałymi (BLDC). Silniki z komutacją elektroniczną wykazują wiele zalet w porównaniu z innymi silnikami elektrycznymi. Charakteryzuje je przede wszystkim duża sprawność oraz duża wartość momentu i mocy przypadającą na jednostkę objętości [3, 4].

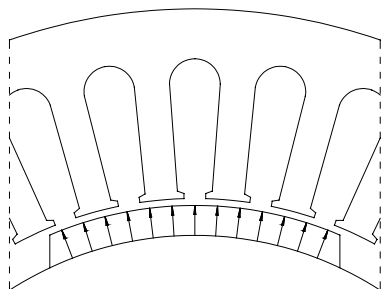
Silniki bezszczotkowe mają dużą przeciążalność momentem. Zależy ona od dopuszczalnego prądu tranzystorów przekształtnika zasilającego silnik oraz od odporności magnesów na odmagnesowanie. Duża przeciążalność momentem i relatywnie mały moment bezwładności zapewniają dobre właściwości dynamiczne.

Przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych w silniku bezszczotkowym zależą m.in. od kształtu i wymiarów obwodu magnetycznego oraz od sposobu namagnesowania magnesów. W dostępnej literaturze istnieją liczne publikacje dotyczące analizy wpływu geometrii obwodu magnetycznego na parametry silnika BLDC.

---

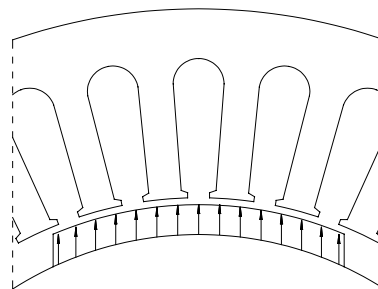
\* Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, marek.ciurys@pwr.wroc.pl, ignacy.dudzikowski@pwr.wroc.pl

Tylko nieliczne publikacje np. [6, 7] dotyczą analizy wpływu sposobu namagnesowania magnesów na parametry tych silników. Najczęściej stosowanymi sposobami namagnesowania jest namagnesowanie promieniowe (rys. 1) i średnicowe (rys. 2).



Rys. 1. Silnik z magnesami namagnesowanymi promieniowo

Fig. 1. Motor with radial magnetized magnets



Rys. 2. Silnik z magnesami namagnesowanymi średnicowo

Fig. 2. Motor with parallel magnetized magnets

Celem pracy jest wyznaczenie wpływu sposobu namagnesowania magnesów (rys. 1, 2) na przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych w silniku BLDC.

Zakres pracy obejmuje:

- pracowanie modeli połowo-obwodowych silnika BLDC z magnesami namagnesowanymi promieniowo oraz średnicowo,
- obliczenie przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w silniku przy namagnesowaniu promieniowym i średnicowym,
- analizę porównawczą parametrów silnika namagnesowanego średnicowo oraz promieniowo,
- pomiary przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych,
- analizę porównawczą wyników obliczeń z wynikami badań laboratoryjnych.

## 2. MODELE POŁOWO-OBWODOWE SILNIKA

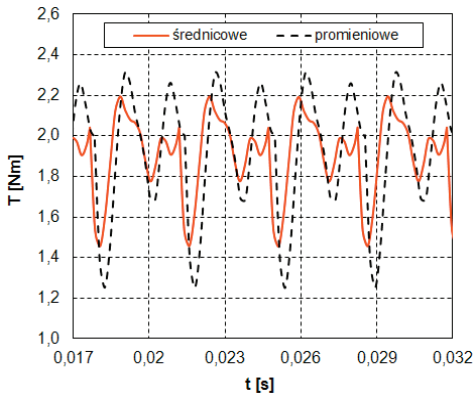
Analizę przeprowadzono na przykładzie trójfazowego silnika o parametrach:  $U_n = 24 \text{ V}$ ,  $P_n = 300 \text{ W}$ ,  $n_n = 1500 \text{ obr/min}$ . Silnik wzbudzany jest magnesami neodymowymi o parametrach  $B_r = 1,15 \text{ T}$ ,  $H_c = 850 \text{ kA/m}$ .

Modele połowo-obwodowe silnika magnesowanego promieniowego oraz średnicowo opracowano w programie Maxwell 2D. Wymiary obwodu magnetycznego, uzwojenie oraz parametry magnesów w obydwu przypadkach były takie same. Opracowane modele składały się z części połowej i części obwodowej. W części obwodowej zamodelowano źródło zasilania, przekształtnik oraz silnik BLDC. Uwzględniono indukcyjność i rezystancję połączeń czołowych uzwojenia oraz wpływ temperatury:

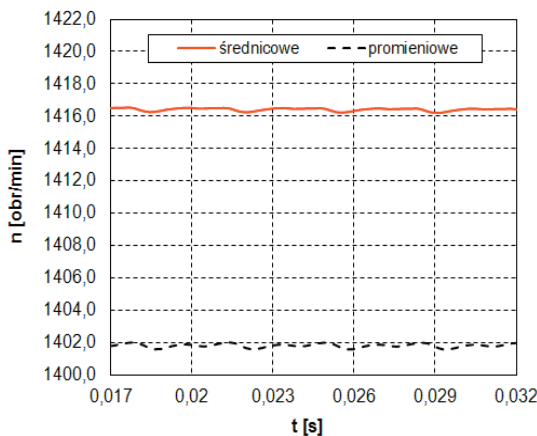
na parametry magnesów trwałych, parametry diod i tranzystorów przekształtnika oraz rezystancję uzwojeń twornika. Tranzystory przekształtnika, ze względu na liniową zależność napięcia na tranzystorze od wartości prądu drenu, zamodelowano jako przełączniki o odpowiednio dobranej (dla rozpatrywanej temperatury pracy) rezystancji. Opracowany model polowo-obwodowy silnika szczegółowo przedstawiono w [2].

### 3. WYNIKI OBLICZEŃ

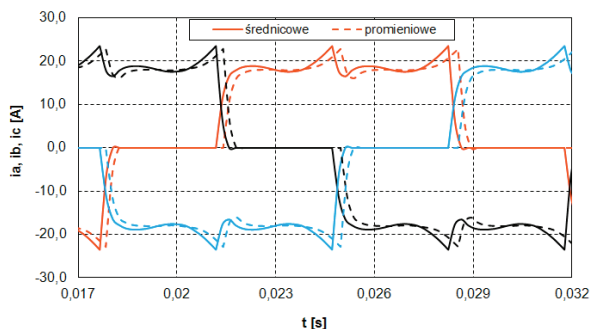
Korzystając z opracowanych modeli obliczono przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych w silniku. Obliczenia wykonano przy różnych zadanych wartościach momentu obciążenia silnika. Przykładowe wyniki obliczeń, przy obciążeniu silnika momentem znamionowym, przedstawiono na rysunkach 3–5.



Rys. 3. Przebiegi czasowe momentu silnika namagnesowanego średnicowo i promieniowo  
Fig. 3. Torque transients at parallel and radial magnetization



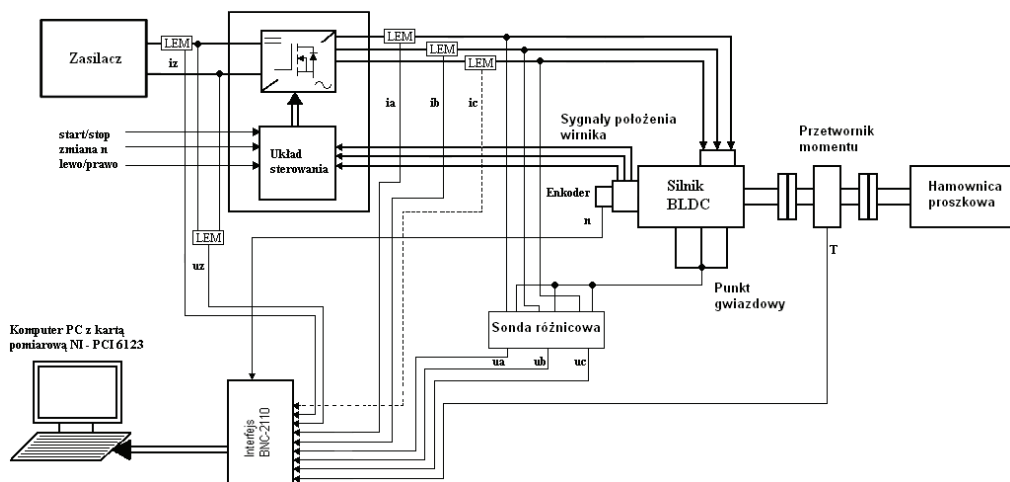
Rys. 4. Przebiegi czasowe prędkości obrotowej silnika namagnesowanego średnicowo i promieniowo  
Fig. 4. Rotational speed transients at parallel and radial magnetization



Rys. 5. Przebiegi czasowe prądów pasmowych silnika namagnesowanego średnicowo i promieniowo  
 Fig. 5. Transients of the phases currents at parallel and radial magnetization

#### 4. UKŁAD POMIAROWY

Badania eksperymentalne wykonano w celu weryfikacji opracowanego modelu polowo-obwodowego silnika bezszczotkowego. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 6. Stanowisko składa się z badanego silnika wraz z falownikiem, hamownicy proszkowej wraz z urządzeniami peryferyjnymi, przetwornika momentu, zasilacza stabilizowanego, enkodera, komputera PC wraz z kartą pomiarową oraz opracowanego w środowisku LabVIEW programu umożliwiającego rejestrację przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych.



Rys. 6. Schemat układu pomiarowego  
 Fig. 6. Diagram of the laboratory stand

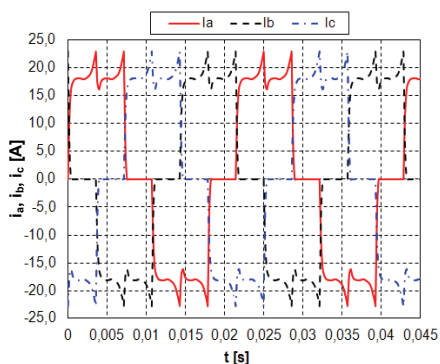
Karta pomiarowa posiada 8 wejść analogowych symultanicznie próbkowanych z częstotliwością 500 kHz na każdy kanał pomiarowy. Pomiar wartości chwilowych prądu pobieranego z zasilacza oraz prądów pasmowych silnika wykonano przy użyciu przetworników LEM typu HAL 100-S. Wartości chwilowe napięć pasmowych mierzone za pomocą sondy różnicowej. Moment mechaniczny mierzone za pomocą przetwornika momentu S-0260DM50W.

Do pomiaru prędkości obrotowej zastosowano enkoder Sendix serii 5020 (3600 impulsów na obrót). Silnik obciążony był hamownicą proszkową. Wartości chwilowe mierzonych sygnałów podawane były za pośrednictwem modułu łączeniowego BNC 2110 do karty pomiarowej. Do zasilania układu zastosowano stabilizowany zasilacz napięcia 6692A. Układ zasilająco-sterujący silnika BLDC (falownik ZG01) zawiera tranzystory MOSFET typu IRFI3205 połączone w typowym układzie mostka 6-pulsowego. Umożliwia on m.in. zmianę kierunku wirowania silnika oraz regulację prędkości obrotowej poprzez modulację PWM. W układzie występują dwie pętle sprzężenia zwrotnego: położeniowa – wymagana do poprawnej pracy silnika oraz prądowa zabezpieczająca silnik przed skutkami zbyt dużych prądów [5].

Do załączania odpowiednich pasm uzwojenia twornika wykorzystywano sygnały położenia wirnika uzyskiwane z transoptorów odbiciowych współpracujących z tarczą odbijającą promieniowanie podczerwone. W środowisku LabVIEW opracowano oprogramowanie umożliwiające komunikację z kartą pomiarową, podgląd oraz rejestrację mierzonych przebiegów czasowych oraz ich wartości średnich i skutecznych. Opracowany program przedstawiono w [1].

## 5. PORÓWNANIE WYNIKÓW OBLICZEŃ Z WYNIKAMI POMIARÓW

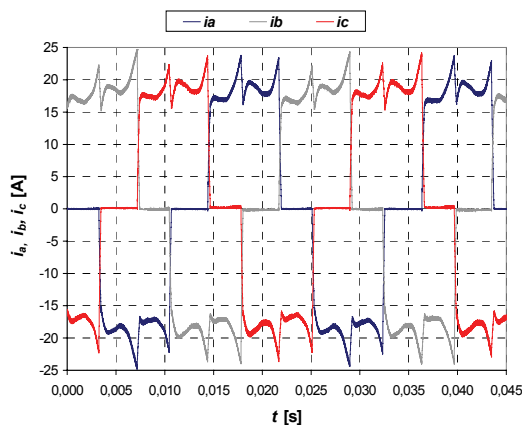
Przykładowe obliczone i zmierzone przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych silnika namagnesowanego promieniowo przy obciążeniu momentem znamionowym przedstawiono na rysunkach 7–12. Czas  $t = 0$  na przedstawionych rysunkach oznacza chwilę rozpoczęcia rejestracji przebiegów.



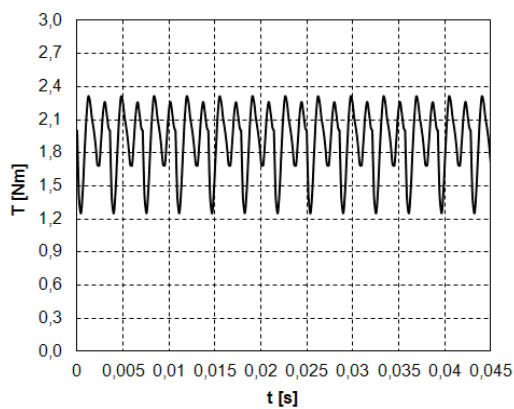
Rys. 7. Obliczone przebiegi czasowe prądów pasmowych

Fig. 7. Computed transients of the phases currents

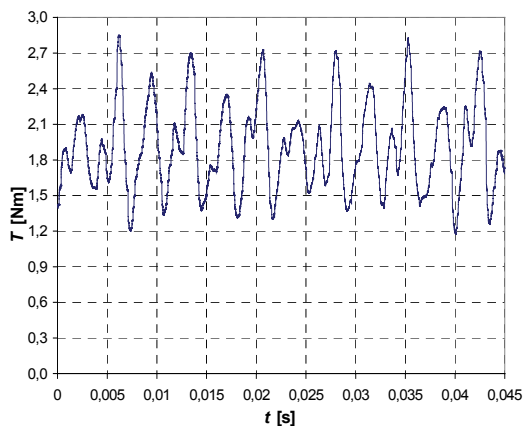
Rys. 8. Zmierzone przebiegi czasowe prądów pasmowych  
 Fig. 8. Measured transients of the phases currents

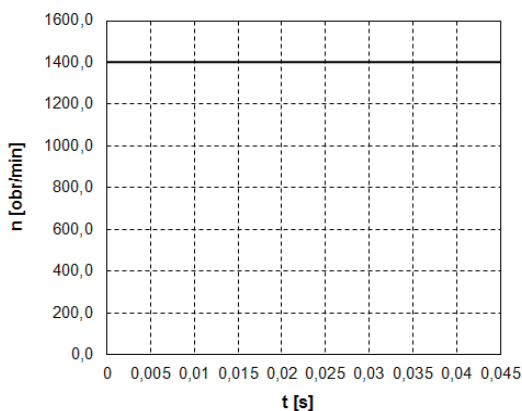


Rys. 9. Obliczony przebieg czasowy momentu mechanicznego silnika  
 Fig. 9. Computed transient of the mechanical torque

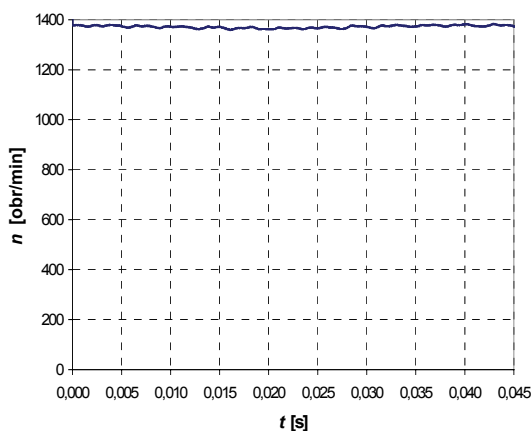


Rys. 10. Zmierzony przebieg czasowy momentu mechanicznego silnika  
 Fig. 10. Measured transient of the mechanical torque





Rys. 11. Obliczony przebieg czasowy prędkości obrotowej silnika  
Fig. 11. Computed transient of the rotational speed



Rys. 12. Zmierzony przebieg czasowy prędkości obrotowej silnika  
Fig. 12. Measured transient of the rotational speed

## 6. ANALIZA WYNIKÓW, PODSUMOWANIE

Przeprowadzono analizę obliczeniową wpływu sposobu namagnesowania magnesów trwałych na przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych silnika BLDC. W tym celu opracowano modele polowo-obwodowe i wykonano obliczenia silnika namagnesowanego promieniowo oraz średnicowo. Przeprowadzona analiza obliczeniowa wykazała, że przy tym samym momencie obciążenia:

- pulsacje momentu mechanicznego silnika namagnesowanego średnicowo wynoszą 38% wartości średniej, natomiast namagnesowanego promieniowo 55%,
- wartość średnia prędkości obrotowej przy magnesowaniu średnicowym jest o 1% większa niż przy promieniowym. Wynika to z większej wartości strumienia magnetycznego silnika namagnesowanego promieniowo. Z powodu różnicy prędkości obrotowej przebiegi prądów pasmowych są przesunięte,

- pulsacje prędkości obrotowej dla magnesowania średnicowego oraz promieniowego wynoszą ok. 0,03% wartości średniej.

W celu weryfikacji obliczeń połowo-obwodowych zbudowano stanowisko pomiarowe oraz opracowano oprogramowanie do monitorowania oraz rejestracji przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych silnika. Analiza porównawcza wykazała, że różnice między wartościami średnimi obliczonymi, za pomocą opracowanego modelu połowo-obwodowego, oraz wyznaczonymi ze zmierzonych przebiegów czasowych silnika, w zależności od wartości momentu obciążenia, wynoszą 1–4% i praktycznie mieszczą się w niepewności pomiaru. Również różnice między obliczonymi i zmierzonymi wartościami chwilowymi mieściły się w przedziale kilku procent. Największe różnice (ok. 20%) wystąpiły w przebiegach momentu mechanicznego. Wynikało to z niedokładności wyosiovania układu: silnik–sprzęgła–momentomierz–hamownica. Porównanie wyników obliczeń z wynikami pomiarów świadczy o poprawności opracowanego modelu połowo-obwodowego i jego przydatności do analizy pracy silników bezszczotkowych wraz z przekształtnikiem zasilającym. Analiza sposobu namagnesowania magnesów wykazała, że mniejsze pulsacje momentu występują w silniku z magnesami namagnesowanymi średnicowo. Nastąpiło to kosztem zmniejszenia strumienia magnetycznego o 1%. Pulsacje prędkości obrotowej są praktycznie takie same.

#### LITERATURA

- [1] CIURYS M., *Analiza pracy bezszczotkowego silnika prądu stałego przy zmiennym obciążeniu na przykładzie rozrusznika samochodowego*, rozprawa doktorska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych PWr., Wrocław 2009.
- [2] CIURYS M., DUDZIKOWSKI I., *Analiza bezszczotkowego silnika prądu stałego z magnesami Nd-FeB*, Branżowy Ośrodek Badawczo Rozwojowy Maszyn Elektrycznych KOMEL, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 93, 2011, 143–147.
- [3] DUDZIKOWSKI I., CIURYS M., *Komutatorowe i bezszczotkowe maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*, seria wydawnicza "Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011.
- [4] GIERAS J.F., *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*, CRC Press, 2009.
- [5] GORYCA Z., *Niskonapięciowy, wolnoobrotowy napęd z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego*, Branżowy Ośrodek Badawczo Rozwojowy Maszyn Elektrycznych KOMEL, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 74, 2006, 25–28.
- [6] MŁOT A., ŁUKANISZYN M., KORKOSZ M., *Wpływ skosu stojana na redukcję pulsacji momentu elektromagnetycznego w bezszczotkowym silniku prądu stałego*, Branżowy Ośrodek Badawczo Rozwojowy Maszyn Elektrycznych KOMEL, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 88, 2010, 41–45.
- [7] PHYU H.N., BI C., JIANG Q., *Effect of magnetization on torque pulsation of the PM BLDC motor*, Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS, 2008, 3685–3690.



#### ANALYSIS OF THE PERMANENT MAGNETS MAGNETIZATION ON THE TRANSIENTS OF THE ELECTRICAL AND MECHANICAL QUANTITIES OF A BRUSHLESS DC MOTOR

Circuit-field models of the brushless DC motor with parallel and radial magnets magnetization were developed. Transients of the electrical and mechanical quantities of the motor were determined at parallel and radial magnets magnetization. Experimental verification was carried out. The computed and the measured transients were compared.