

**Marek Ciurys, Ignacy Dudzikowski**

**Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych**

## **ANALIZA BEZSZCZOTKOWEGO SILNIKA PRĄDU STAŁEGO Z MAGNESAMI NdFeB**

### **ANALYSIS OF A BRUSHLESS DC MOTOR WITH NdFeB MAGNETS**

**Abstract:** Two-dimensional, field-circuit, model of a brushless DC motor excited by NdFeB magnets was developed. A computational analysis, in dynamic and steady states, of the impact of load and temperature changes on: the magnetic field distribution, the value of the magnetic flux and its pulsations, the value of the electromagnetic torque and its pulsations, the electrical and mechanical quantities transients in the power supply – converter – three phase BLDC motor system was performed. Permanent magnets demagnetisation resistance was analysed.

#### **1. Wstęp**

Systematyczne zmniejszanie się ceny magnesów trwałych o dużej energii, rozwój energoelektroniki i technik mikroprocesorowych oraz tendencja do stosowania energooszczędnych układów napędowych powoduje coraz szersze zastosowanie silników bezszczotkowych z magnesami trwałymi. Silniki z komutacją elektroniczną wykazują wiele zalet w porównaniu z innymi silnikami elektrycznymi. Charakteryzuje je przede wszystkim duża sprawność. Jest to szczególnie istotne przy zasilaniu akumulatorowym, ponieważ przekłada się na mniejszy pobór energii i dłuższą pracę maszyny lub możliwość zastosowania akumulatorów o mniejszej masie i pojemności. Sprawność maszyn z komutacją elektroniczną (BLDC) jest większa niż silników indukcyjnych i maszyn komutatorowych o magnesach trwałych [2, 4]. Do wzbudzenia silników bezszczotkowych aktualnie używane są głównie magnesy neodymowe [3, 5, 6]. Zastosowanie wysokoenergetycznych magnesów trwałych jest przyczyną tego, że maszyny bezszczotkowe mają dużą wartość momentu i mocy przypadającą na jednostkę objętości. Przy tej samej mocy charakteryzują się mniejszą masą i mniejszymi wymiarami niż inne maszyny. Umieszczenie uzwojenia w stojanie, który w najbardziej rozpowszechnionych konstrukcjach jest częścią zewnętrzną maszyny, poprawia zdolność odprowadzania ciepła i ułatwia chłodzenie. Z tego powodu gęstość prądu w uzwojeniu może być większa. Na uwagę zasługuje również fakt, że w wirniku maszyn bezszczotkowych praktycznie nie występują straty mocy.

Silniki bezszczotkowe mają dużą przeciążalność momentem. Zależy ona od dopuszczalnego prądu tranzystorów przekształtnika zasilają-

cego silnik oraz od odporności magnesów na odmagnesowanie.

Duża przeciążalność momentem i relatywnie mały moment bezwładności zapewniają dobre właściwości dynamiczne.

Do wad maszyn bezszczotkowych zaliczyć można m.in.: możliwość odmagnesowania magnesów trwałych, problemy z regulacją wartości strumienia, duży koszt przekształtnika, który wzrasta wraz ze wzrostem mocy maszyny. Wadą silników bezszczotkowych są również pulsacje momentu elektromagnetycznego.

Pomimo dość licznych publikacji na temat silników BLDC stosunkowo mało prac dotyczy analizy zjawisk elektromagnetycznych, np. analizy pola magnetycznego, odporności na odmagnesowanie i wpływu temperatury. Analiza pulsacji momentu dotyczy zwykle momentu zaczepowego.

Celem pracy jest analiza pola magnetycznego oraz przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych przy różnym obciążeniu silnika w różnej temperaturze w stanach dynamicznych i ustalonych oraz analiza odporności magnesów na odmagnesowanie.

Zakres pracy obejmuje:

- opracowanie dwuwymiarowego, polowo-obwodowego, modelu bezszczotkowego silnika wraz z przekształtnikiem,
- analizę obliczeniową wpływu zmian obciążenia i zmiany temperatury na:
  - rozkład pola magnetycznego,
  - wartość strumienia magnetycznego i jego pulsacje,
  - wartość momentu elektromagnetycznego i jego pulsacje,
  - przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie: źródło zasilania – przekształtnik – silnik,

- analizę odporności na odmagnesowanie.

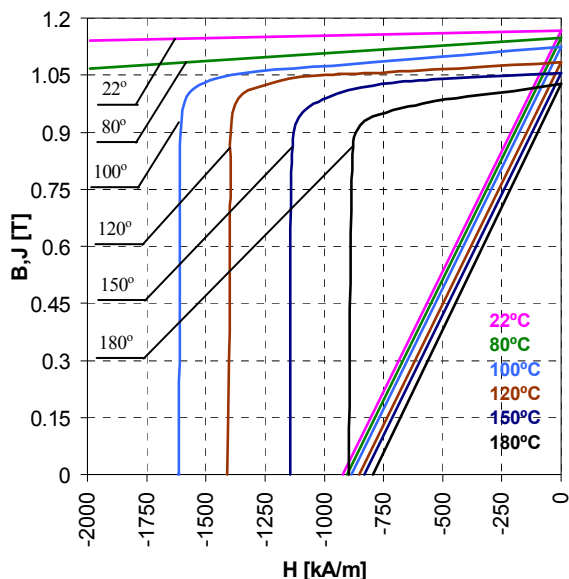
## 2. Model polowo-obwodowy silnika

Analizę przeprowadzono na przykładzie zaprojektowanego silnika BLDC przeznaczonego do pracy w zakresie zmian temperatury ( $-40 \dots 150^\circ\text{C}$ ).

Główne parametry silnika:

- napięcie znamionowe  $U_n = 36\text{ V}$ ,
- moment znamionowy  $T_n = 7,8\text{ N}\cdot\text{m}$ ,
- prędkość znamionowa  $n_n = 3800\text{ obr/min}$ ,
- liczba par biegunów  $p = 2$ .

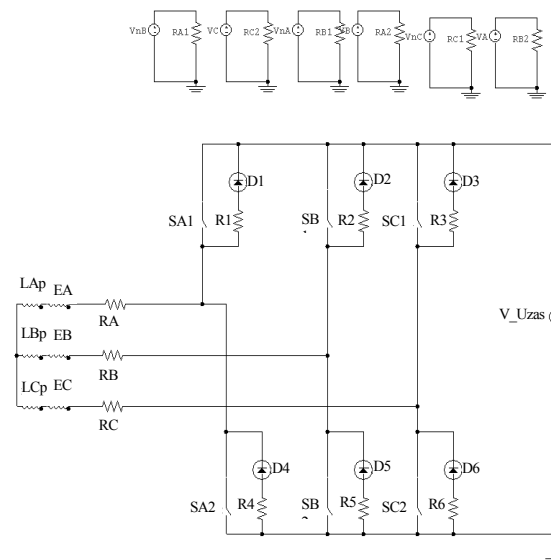
Podane parametry silnika dotyczą temperatury  $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ . Zastosowano magnesy neodymowe typu N33EH (rys.1) o promieniowym kierunku namagnesowania.



Rys. 1. Charakterystyki odmagnesowania magnesów N33EH w różnej temperaturze [7]

Model polowo-obwodowy, opracowany w programie Maxwell 2D, składa się z części polowej i części obwodowej. Przekrój poprzeczny silnika wraz z rozkładem indukcji magnetycznej przedstawiono na rysunku 3. W części obwodowej (rys. 2) zamodelowano źródło zasilania, przekształtnik oraz silnik BLDC. Uwzględniono indukcyjność i rezystancję połączeń czołowych uzwojenia oraz wpływ temperatury: na parametry magnesów trwałych (rys.1), parametry diod i tranzystorów przekształtnika oraz rezystancję uzwojeń twornika (rys.2). 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 (rys.2). Sposób

uwzględniania wpływu temperatury na parametry elementów półprzewodnikowych zamieszczono w [1]. Schemat elektryczny części obwodowej silnika wraz z przekształtnikiem przedstawiono na rysunku 2. Na rysunku 2 poszczególne symbole oznaczają:  $RA, RB, RC$  – rezystancję pasm uzwojenia silnika,  $EA, EB, EC$  – sumaryczną siłę elektromotoryczną indukowaną w pasmach uzwojenia silnika będącą wynikiem rotacji, samoindukcji i indukcyjności wzajemnej,  $LAp, LBp, LCp$  – indukcyjność połączeń czołowych pasm uzwojenia silnika;  $SA1, SB1, SC1, SA2, SB2, SC2$  – klucze tranzystorowe przekształtnika,  $D1 - D6$  – diody zwrotne (model idealnego złącza p-n) przekształtnika,  $R1 \dots R6$  – rezystancje wewnętrzne diod zwrotnych przekształtnika,  $V\_Uzas$  – źródło zasilania. Obwody z elementami  $VA, VB, VC, VnA, VnB, VnC, RA1, RA2, RB1, RB2, RC1, RC2$  służą do sterowania pracą kluczy tranzystorowych przekształtnika w funkcji kąta obrotu wirnika.



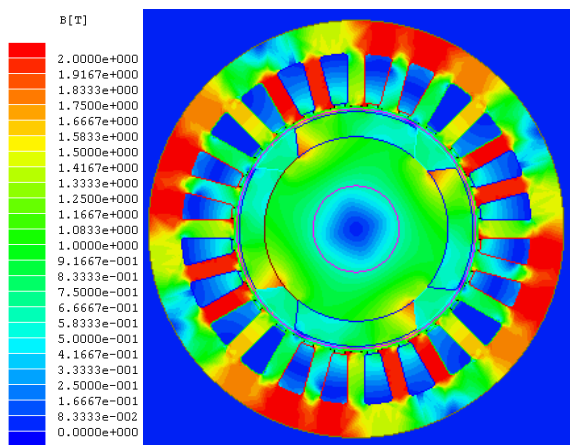
Rys. 2. Część obwodowa modelu polowo-obwodowego silnika wraz z przekształtnikiem

## 3. Wyniki badań

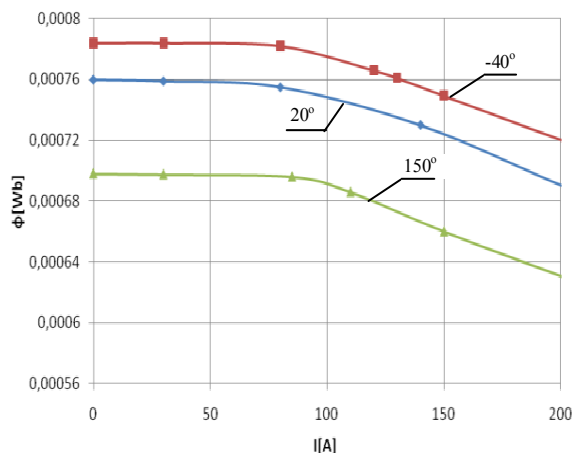
Obliczenia wykonano przy wartościach temperatury  $\vartheta = (-40), 20, 150^\circ\text{C}$  oraz przy momencie obciążenia  $T_o = 0; 0,5; 0,7; 1,0; \text{ i } 1,4 T_n$ .

### 3.1. Analiza pola magnetycznego w silniku

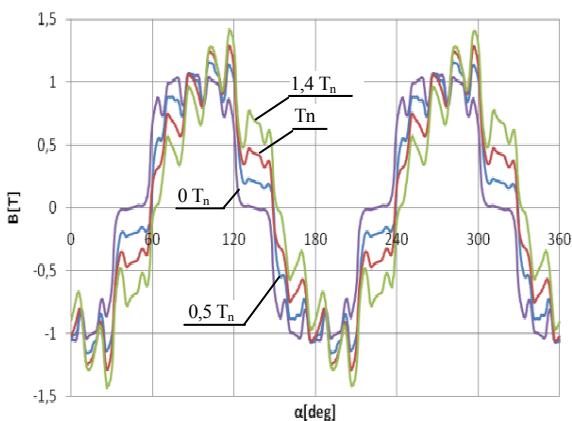
Przykładowe wyniki obliczeń rozkładu pola magnetycznego w silniku zamieszczono na rysunkach 3 - 9. Rozkłady indukcji magnetycznej zamieszczone na rysunkach 3 - 5 dotyczą położenia wirnika w połowie cyklu pracy pasm uzwojeń silnika (pomiędzy przełączeniami).



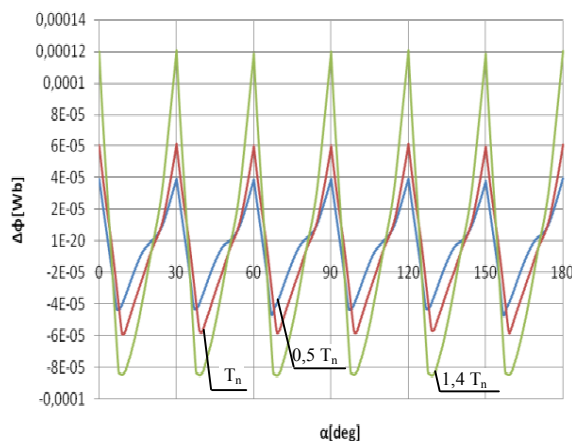
Rys. 3. Przekrój poprzeczny silnika wraz z rozkładem modułu indukcji magnetycznej w stanie obciążenia;  $T_o=1,4 T_n$ ,  $\vartheta=20^\circ C$



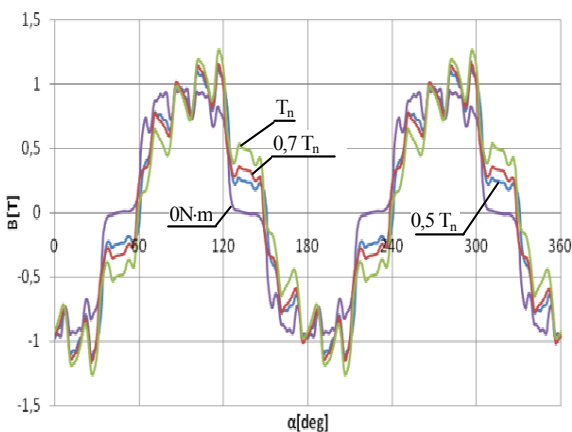
Rys. 6. Zależność wartości średniej strumienia magnetycznego, w różnej temperaturze, od prądu obciążenia



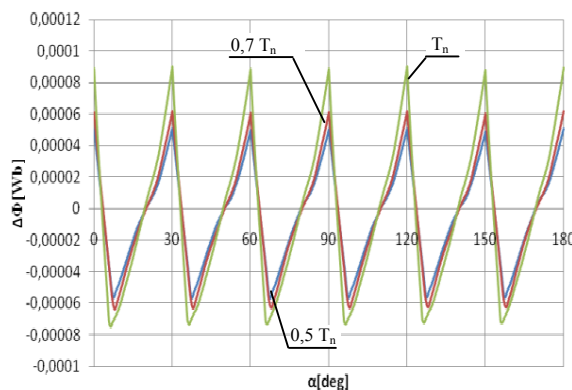
Rys. 4. Rozkład składowej promieniowej indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej przy różnej wartości momentu obciążenia;  $\vartheta=20^\circ C$



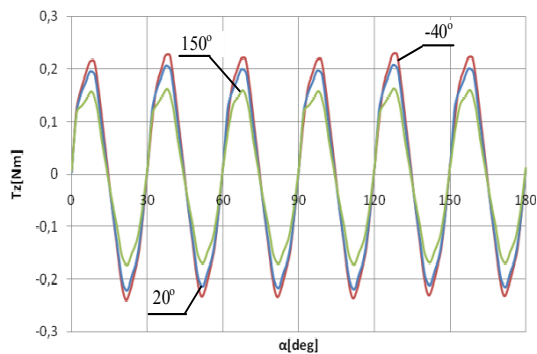
Rys. 7. Pulsacje strumienia magnetycznego w stanie ustalonym, jako funkcja kąta obrotu wirnika przy różnej wartości momentu obciążeniu;  $\vartheta=20^\circ C$



Rys. 5. Rozkład składowej promieniowej indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej przy różnej wartości momentu obciążenia;  $\vartheta=150^\circ C$

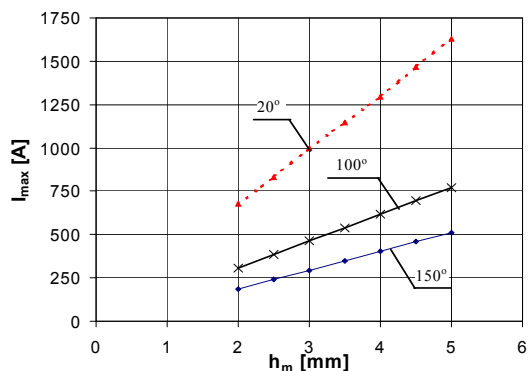


Rys. 8. Pulsacje strumienia magnetycznego w stanie ustalonym, jako funkcja kąta obrotu wirnika przy różnej wartości momentu obciążeniu;  $\vartheta=150^\circ C$

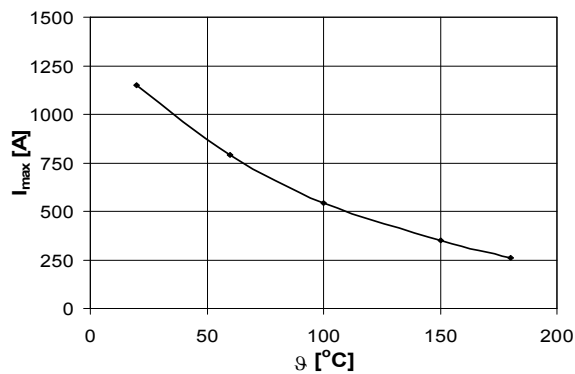


Rys. 9. Kątowa zależność momentu zaczepowego silnika w różnej temperaturze

W trakcie projektowania silnika sprawdzono jego odporność na odmagnesowanie. W tym celu przeprowadzono analizę wpływu wysokości magnesów na odporność na odmagnesowanie (rys.10). Dla dobranej wysokości magnesów  $h_m=3,5$  mm przeprowadzono także analizę wpływu temperatury na wartość dopuszczalnego prądu nie powodującego trwałego odmagnesowania magnesów (rys.11).



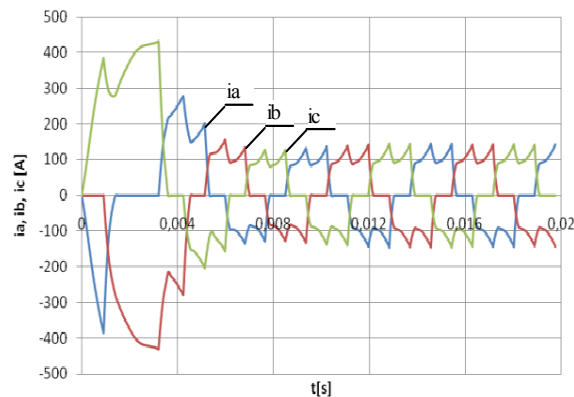
Rys. 10. Zależność dopuszczalnego prądu silnika niepowodującego trwałego odmagnesowania magnesów od ich wysokości



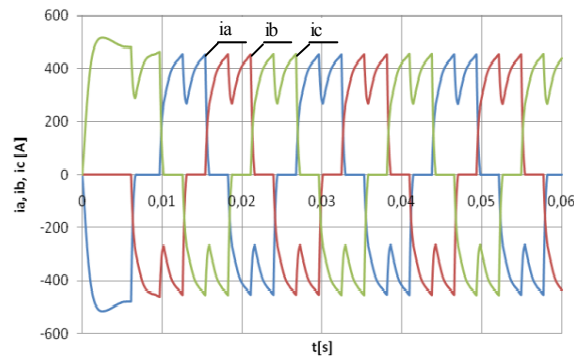
Rys. 11. Zależność dopuszczalnego prądu silnika niepowodującego trwałego odmagnesowania magnesów od ich temperatury;  $h_m=3,5$  mm

### 3.2. Przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych

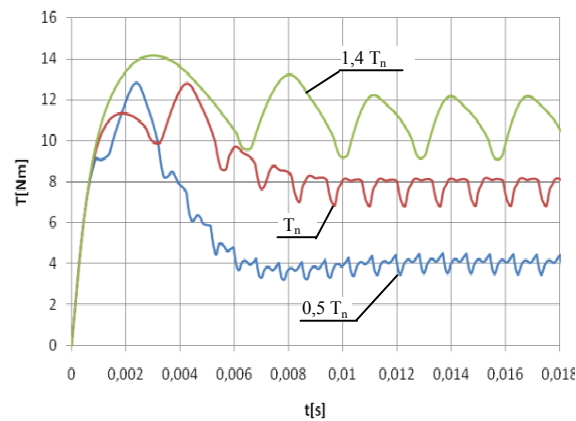
Obliczone przebiegi czasowe prądów pasmowych silnika, momentu elektromagnetycznego oraz prędkości silnika obciążonego różną wartością momentu przedstawiono na rysunkach 12...15.



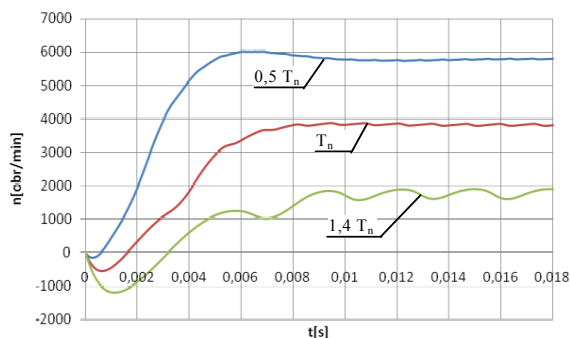
Rys. 12. Przebiegi czasowe prądów pasmowych w silniku podczas rozruchu;  $T_o=0,5 T_n$ ;  $\theta=20^\circ C$



Rys. 13. Przebiegi czasowe prądów pasmowych w silniku podczas rozruchu;  $T_o=1,4 T_n$ ;  $\theta=20^\circ C$



Rys. 14. Przebiegi czasowe momentu elektromagnetycznego silnika podczas rozruchu przy różnej wartości momentu obciążenia;  $\theta=20^\circ C$



Rys. 15. Przebiegi czasowe prędkości obrotowej silnika podczas rozruchu przy różnej wartości momentu obciążenia;  $\vartheta = 20^\circ\text{C}$

## 5. Podsumowanie

Wykonana analiza obliczeniowa wykazała:

- wpływ momentu obciążenia na rozkład pola magnetycznego szczególnie widoczny jest w strefie międzybiegunowej. Wartość indukcji w tej strefie w zależności od temperatury i momentu obciążenia, osiąga 50 – 70 % wartości indukcji w osi bieguna (rys. 4, 5),
- strumień magnetyczny zmienia się wraz ze zmianą temperatury (rys. 6), co jest związane ze zmianą parametrów magnesów (rys. 1). Zmniejszenie temperatury z  $20^\circ\text{C}$  do  $-40^\circ\text{C}$  powoduje zwiększenie wartości strumienia o 3,2%, natomiast wzrost temperatury z  $20^\circ\text{C}$  do  $150^\circ\text{C}$  powoduje jego zmniejszenie o 9% (rys. 6),
- wraz ze wzrostem momentu obciążenia silnika zmniejsza się wartość strumienia magnetycznego (rys. 6) oraz zwiększają się jego pulsacje (rys. 7,8). W zakresie prądu obciążenia do  $200\text{A}$  ( $2,0 I_n$ ) zmniejszenie wartości strumienia magnetycznego w zależności od temperatury wynosi 7,7% - 9,2 %,
- zwiększanie momentu obciążenia skutkuje wzrostem pulsacji momentu elektromagnetycznego (rys. 14), co jest spowodowane wzrostem zmian komutacyjnych prądu w pasmach uzwojenia (rys. 12,13),
- sumaryczne pulsacje momentu elektromagnetycznego silnika (rys. 14) w zależności od temperatury (przy znamionowym momencie obciążenia) są w stanie ustalonym 2,5 – 5,9 razy większe od momentu zaczepowego (rys. 9). Wynika z tego, że ograniczenie momentu zaczepowego nie rozwiązuje problemu pulsacji momentu elektromagnetycznego,
- wzrost temperatury magnesów z  $20^\circ\text{C}$  do  $150^\circ\text{C}$  powoduje ponad trzykrotne zmniejszenie się odporności magnesów na odma-

gniesowanie (rys. 10, 11). Fakt ten potwierdza konieczność sprawdzania odporności na odmagnesowanie w trakcie projektowania maszyn pracujących w szerokim zakresie zmian temperatury.

Opracowano model polowo-obwodowy bezszczotkowego silnika prądu stałego wraz z przekształtnikiem. Przeprowadzono analizę wpływu zmian wartości momentu obciążenia oraz wpływu zmian temperatury na: rozkład pola magnetycznego, wartość strumienia magnetycznego i jego pulsacje, wartość momentu elektromagnetycznego i jego pulsacje oraz na przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie: źródło zasilania – przekształtnik – silnik BLDC. Wyznaczono zależność odporności magnesów na odmagnesowanie od ich wysokości oraz od temperatury.

## Literatura

- [1] Ciurys M., Dudzikowski I.: *Transients of electrical and mechanical quantities of a brushless DC motor – computations, measurements*. Archives of Electrical Engineering 60 (1), 2011.
- [2] Gieras J.F., Wing M.: *Permanent Magnet Motor Technology*, Marcel Dekker, Inc. New York, Basel 2002.
- [3] Glinka T.: *Maszyny elektryczne zbudowane magnesami trwałymi*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [4] Glinka T., Polak A.: *Sprawność układów napędowych silników bezszczotkowych prądu stałego zbudowanych magnesami trwałymi*, Branżowy Ośrodek Badawczo Rozwojowy Maszyn Elektrycznych KOMEL, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, Nr 64/2002, ss. 157-163.
- [5] Hendershot J. R. Jr, Miller THE: *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford 1994.
- [6] Leonowicz M., Wysłocki J.: *Współczesne magnesy – technologie, mechanizmy koercji, zastosowania*, WNT, Warszawa 2005.
- [7] <http://www.chenyang-ism.com>

## Autorzy

dr hab. inż. Ignacy Dudzikowski, Prof. PWR,  
dr inż. Marek Ciurys  
Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-372 Wrocław  
Tel: 71 – 320-34-67  
marek.ciurys@pwr.wroc.pl  
ignacy.dudzikowski@pwr.wroc.pl

## Recenzent

Prof. dr hab. inż. Krystyna Macek-Kamińska