

*silnik synchroniczny, magnetoelektryczny,
magnes hybrydowe, rozruch, symulacje polowo-obwodowe,
technologia wykonania, metalurgia proszków*

Paweł ZALAS*, Ludwik ANTAL*

MAGNETOELEKTRYCZNY SILNIK MAŁEJ MOCY WZBUDZANY MAGNESAMI HYBRYDOWYMI

W pracy przedstawiono wybraną konstrukcję silnika magnetoelektrycznego z kompaktowym wirnikiem hybrydowym, przystosowanego do rozruchu bezpośredniego. Analizowany teoretycznie wirnik składa się z kompozytu magnetycznie miękkiego, magnesów spiekany Nd-Fe-B i magnesów spajanych – dielektromagnesów Nd-Fe-B oraz tulei aluminiowej lub miedzianej pełniącej funkcję klatki rozruchowej. Wykonano wstępne badania właściwości rozruchowych z uwzględnieniem wpływu wartości całkowitego momentu bezwładności układu napędowego oraz rodzaju charakterystyki i wartości momentu obciążenia na przebiegi podstawowych wielkości elektromechanicznych. Analizę numeryczną wykonano wykorzystując opracowany w tym celu dwuwymiarowy polowo-obwodowy model maszyny, korzystający z metody elementów skończonych.

1. WSTĘP

Opracowanie złożonych algorytmów sterowania, również bezczujnikowych [1], [3], [4] oraz szybki rozwój energoelektronicznych układów zasilania przy jednoczesnym znacznym obniżeniu ich ceny sprzyjają popularyzacji silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi. Nowoczesne konstrukcje silników magnetoelektrycznych znajdują zastosowanie w układach napędowych różnego typu oraz różnej mocy. Zazwyczaj, ze względu na koszty, silniki tego typu są wykonywane w technologii stosowanej w produkcji typowych silników indukcyjnych [2], [10]. Zastosowanie magnesów trwałych wymusza oczywiście pewne konieczne zmiany technologiczne [7], [9]. Oprócz konstrukcji bazujących na typowym silniku indukcyjnym projektowane są również maszyny o budowie hybrydowej wykorzystujące technologię proszkową [5]. Technologia proszkowa zwiększa możliwości kształtowania geometrii obwodu

* Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, 50-372 Wrocław, ul. Smoluchowskiego 19, ludwik.antal@pwr.wroc.pl, pawel.zalas@pwr.wroc.pl

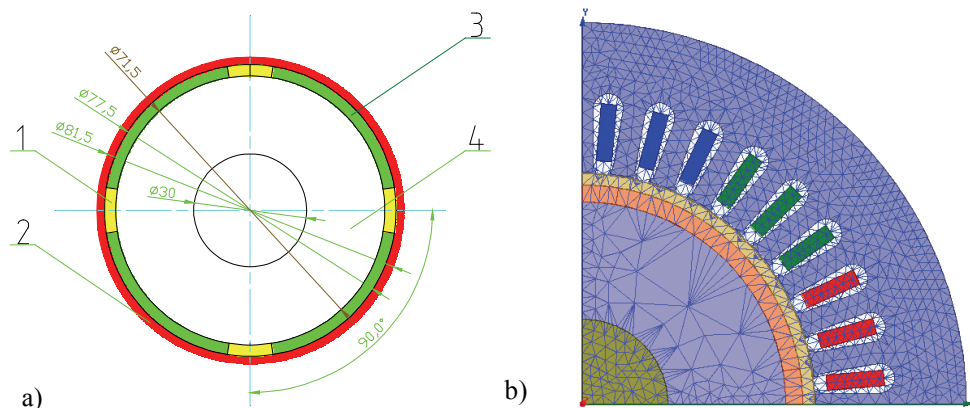
magnetycznego oraz zmniejsza liczbę procesów technologicznych związanych z wytworzeniem rdzenia magnetycznego wirnika oraz magnesów hybrydowych. Pozwala więc na obniżenie sumarycznego kosztu produkcji maszyny. Zastosowanie magnesów o konstrukcji hybrydowej różnicuje parametry magnetyczne różnych fragmentów magnesów. Takie rozwiązanie pozwala zwiększyć indukcję w szczeliny silnika, ukształtować sinusoidalną zmianę indukcji i zwiększyć odporność skrajnych obszarów magnesu na odmagnesowanie. Elementem wytwarzającym moment rozruchowy może być tuleja przewodząca osadzona na cylindrycznym rdzeniu wirnika z magnesami. Rozwiązanie to uzasadniają względy technologiczne. W analizowanej konstrukcji hybrydowego silnika magnetoelektrycznego zwiększenie momentu początkowego i zdolności synchronizacji oraz jednoczesne osiągnięcie dobrych właściwości eksploatacyjnych stanu ustalonego jest trudne. Wymaga to starannego dobrania odpowiednich grubości i materiału tulei rozruchowej oraz rodzaju, wielkości i rozmieszczenia magnesów trwałych o budowie hybrydowej.

Hybrydyzacja magnesów, niesie ze sobą kilka poważnych wyzwań technologicznych. Przykładowym problemem jest montaż magnesów hybrydowych na powierzchni wirnika silnika magnetoelektrycznego. W zadawalający sposób rozwiązuje go technologia opracowana w Instytucie Tele-i Radiotechnicznym z Warszawy [6], [8].

W artykule przedstawiono wyniki wstępnej analizy numerycznej wpływu materiału oraz grubości tulei rozruchowej na właściwości rozruchowe silnika synchronicznego małej mocy o kompaktowej budowie wirnika wzbudzanego magnesami hybrydowymi, przeznaczonego do rozruchu bezpośredniego. Obliczenia wykonano metodą elementów skończonych (FEM) wykorzystując opracowany polowo-obwodowy model obliczeniowy wybranej konstrukcji silnika.

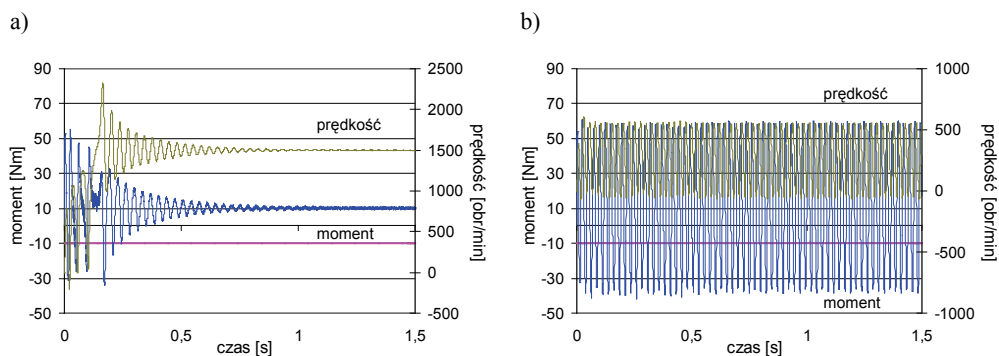
2. OBLICZENIA NUMERYCZNE

Opracowano polowo-obwodowy model obliczeniowy silnika magnetoelektrycznego z kompaktowym wirnikiem hybrydowym wykorzystując komercyjny program Maxwell 2D (Ansys Corp). W modelu przyjęto, że część magnetowodu magnetycznie miękka (rys. 1a-4) jest wykonana z proszku żelaza Somaloy 500, a magnesy hybrydowe złożone są z silniejszego magnesu neodymowego o parametrach $H_c = 909000$ A/m, $B_r = 1,05$ T typu N42SH (rys. 1a-3) oraz dielektromagnesu wykonanego z proszku MQP-A o parametrach $H_c = 404970$ A/m, $B_r = 0,6$ T (rys. 1a-1). Elementem obwodu wirnika wytwarzającym moment rozruchowy jest tuleja (rys. 1a-2) wykonana z miedzi lub aluminium, nasadzona na cylindryczny wirnik wykonany technologią hybrydową. W budowie rozpatrywanego silnika wykorzystano stojan i elementy konstrukcyjne silnika indukcyjnego typu Sh90L-4. Konstrukcję mechaniczną wirnika oraz fragment magnetowodu wraz z siatką dyskretyzacyjną pokazano na rysunku 1.

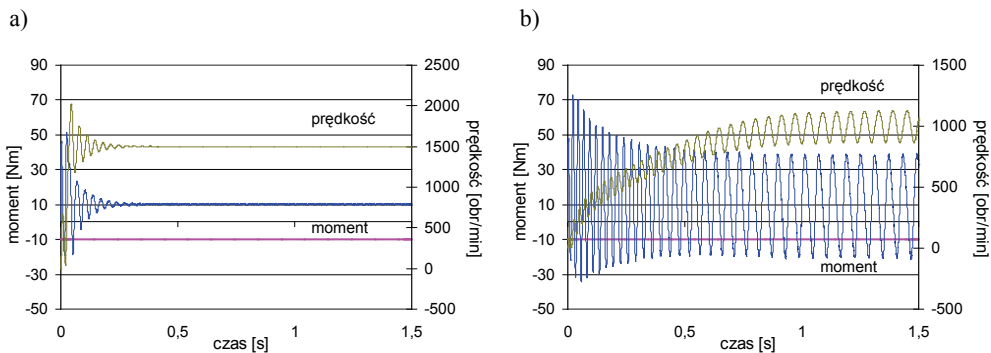


Rys. 1. Konstrukcja mechaniczna (a) oraz fragment magnetowodu z siatką dyskretyzacyjną (b) modelowanego silnika; 1 – magnes spajany, 2 – tuleja aluminiowa lub miedziana, 3 – magnes spiekany, 4 – Somaloy 500

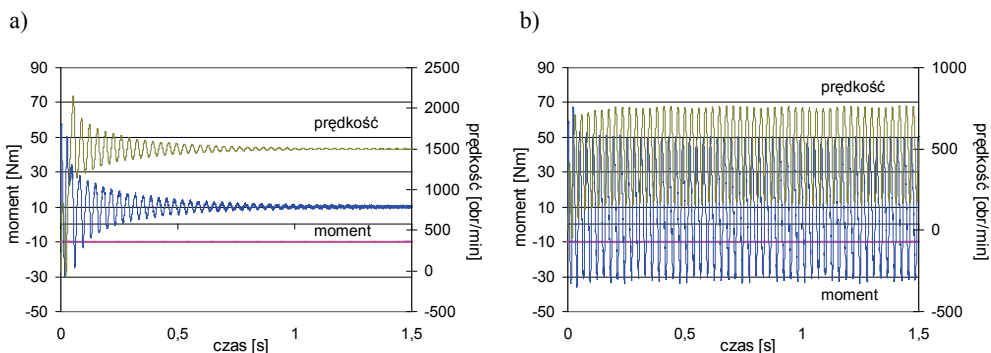
Przy pomocy opracowanego modelu wykonano obliczenia procesu rozruchu i synchronizacji badanego silnika. W obliczeniach przyjęto wentylatorowy moment obciążenia o wartości znamionowej 10,16 N·m oraz moment stały o takiej samej wartości. Obliczenia wykonano dla różnych krotności momentu bezwładności wirnika wynoszącego $J_w = 0,0029 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. Uwzględniono również różną grubość oraz różny materiał tulei wytwarzającej moment rozruchowy. Wyniki obliczeń prędkości obrotowej, momentu elektromagnetycznego oraz momentu obciążenia pokazano na rysunkach 2–9.



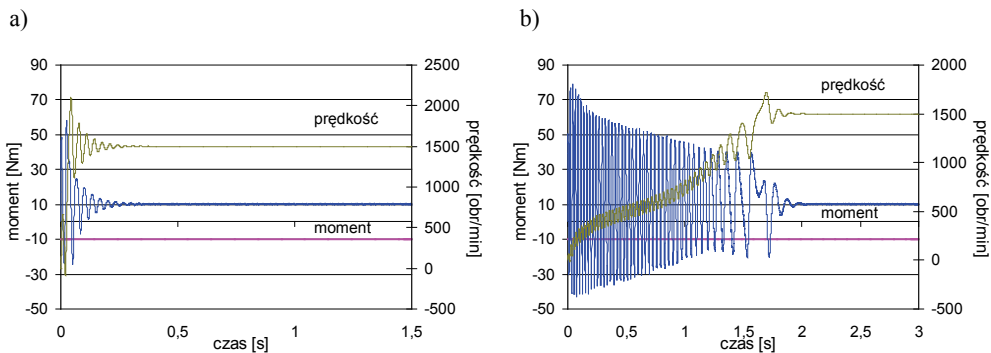
Rys. 2. Rozruch silnika z tuleją aluminiową o grubości 1 mm, obciążonego momentem o wartości stałej przy różnych momentach bezwładności J_w (a) oraz $2J_w$ (b)



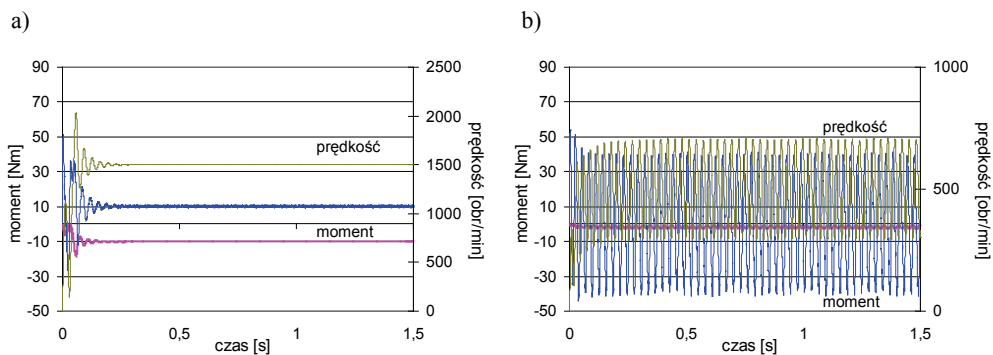
Rys. 3. Rozruch silnika z tuleją aluminiową o grubości 3 mm, obciążonego momentem o wartości stałej przy różnych momentach bezwładności J_w (a) oraz $7J_w$ (b)



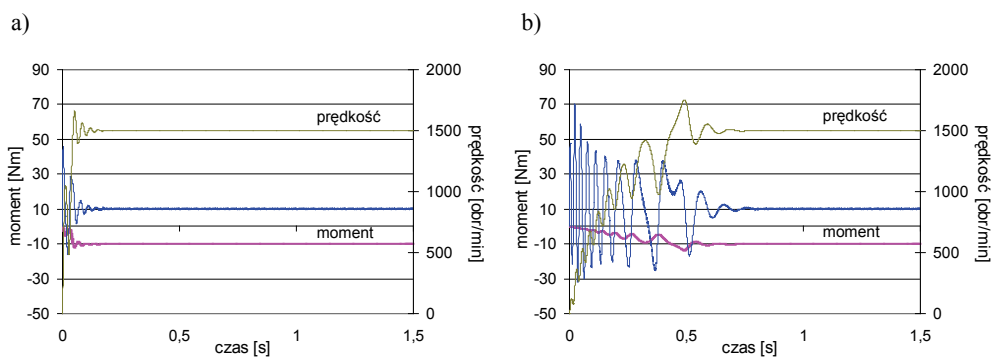
Rys. 4. Rozruch silnika z tuleją miedzianą o grubości 1 mm, obciążonego momentem o wartości stałej przy różnych momentach bezwładności J_w (a) oraz $2J_w$ (b)



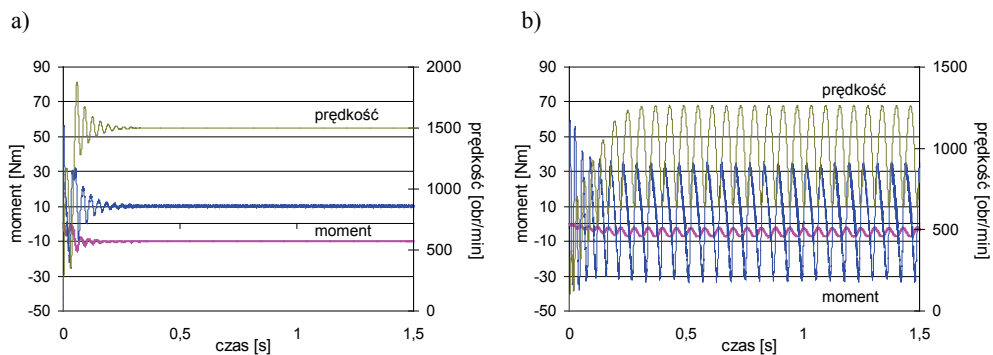
Rys. 5. Rozruch silnika z tuleją miedzianą o grubości 3 mm, obciążonego momentem o wartości stałej przy różnych momentach bezwładności J_w (a) oraz $10J_w$ (b)



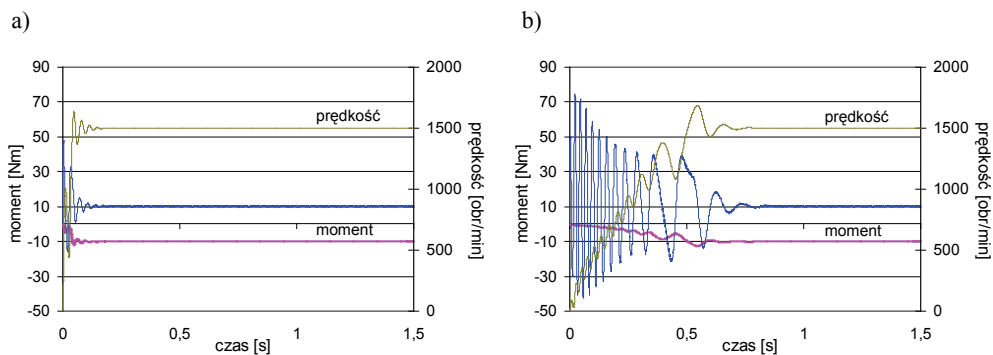
Rys. 6. Rozruch silnika z tuleją aluminiową o grubości 1 mm, obciążonego momentem wentylatorowym przy różnych momentach bezwładności J_w (a) oraz $3J_w$ (b)



Rys. 7. Rozruch silnika z tuleją aluminiową o grubości 3 mm, obciążonego momentem wentylatorowym przy różnych momentach bezwładności J_w (a) oraz $7J_w$ (b)



Rys. 8. Rozruch silnika z tuleją miedzianą o grubości 1 mm, obciążonego momentem wentylatorowym przy różnych momentach bezwładności J_w (a) oraz $3J_w$ (b)



Rys. 9. Rozruch silnika z tuleją miedzianą o grubości 3 mm, obciążonego momentem wentylatorowym przy różnych momentach bezwładności $J_w \cdot 1$ (a) oraz $J_w \cdot 10$ (b)

Dla tulei o grubości 1 mm, zarówno aluminiowej jak i miedzianej, moment rozruchowy jest bardzo mały i nie umożliwia rozruchu i synchronizacji przy realnych wartościach momentu bezwładności układu napędowego (rys. 2, 4, 6, 8).

Zwiększenie grubości tulei do 3mm poprawia właściwości rozruchowe (rys. 3, 5, 7, 9). W przypadku zastosowania tulei miedzianej skuteczny rozruch i synchronizacja może być dokonana dla bezwładności układu napędowego 10-ciokrotnie większej niż bezwładność samego wirnika (rys. 9b). Zwiększenie grubości elementu przewodzącego zmniejsza wartość momentu zaczepowego ale obniża jednocześnie przeciążalność silnika. Analizowana konstrukcja silnika szczególnie nadaje się do zastosowań, w których bardzo istotne jest ograniczenie pulsacji momentu silnika, nawet kosztem pogorszenia właściwości eksploatacyjnych.

4. PODSUMOWANIE

Analizowana konstrukcja silnika magnetoelektrycznego o rozruchu własnym charakteryzuje się niską wartością maksymalnego momentu zaczepowego, co jest następstwem braku żłobkowania wirnika. Odpowiednie dobranie grubości tulei rozruchowej zapewnia poprawę właściwości rozruchowych oraz zmniejszenie pulsacji momentu podczas pracy synchronicznej silnika. Zwiększenie grubości elementu przewodzącego wiąże się jednak z pogorszeniem właściwości eksploatacyjnych silnika.

LITERATURA

- [1] ANCUTI R., BOLDEA I., ANDREESCU G.-D., *Sensorless V/f control of high-speed surface permanent magnet synchronous motor drives with two novel stabilising loops for fast dynamics and robustness*, Electric Power Applications, IET, Vol. 4, Issue: 3, 2010, 149–157.
- [2] ANTAL L., ZALAS P., *Soft and synchronous starting of low-power SMPMSM motor*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 2b/2013, 173–176.
- [3] BUJACZ S., CICHOWSKI A., SZCZEPANKOWSKI P., NIEZNANSKI J., *Sensorless control of high speed permanent-magnet synchronous motor*, EPE '09, 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009, 1–10.
- [4] CHEN NING, WANG ZHIHONG, YU SHOUYI, GUI WEIHUA, GUO YUQIAN, *A new starting method of sensorless PMSM motors based on STM32F103B*, Control Conference (CCC), 2010, 29th Chinese, 2010, 4964–4968
- [5] JĘDRYCZKA C., NOWAK M., RADZIUK K., STACHOWIAK D., *Magnesy hybrydowe w silnikach synchronicznych o rozruchu własnym*, Materiały X Jubileuszowego Seminarium Naukowego Wybrane Zagadnienia Elektrotechniki i Elektroniki, 27–29 września 2012, Ustroń.
- [6] KAPELSKI D., JANKOWSKI B., KARBOWIAK M., PRZYBYLSKI M., ŚLUSAREK B., *Research of magnetic properties of hybrid composite elements*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 5a, 2012, 26–27.
- [7] KISIELEWSKI P., ANTAL M., GIERAK D., ZALAS P., *Zastosowanie magnesów trwałych w silnikach elektrycznych dużej mocy*, SME 2011, Szczecin, 19–22 czerwca 2011, Masz. Elektr. Zesz. Probl. BOBRME Komel, nr 92, 187–192.
- [8] ŚLUSAREK B., JANKOWSKI B., KAPELSKI D., KARBOWIAK M., PRZYBYLSKI M., ZAWILAK J., ANTAL L., ZALAS P., GOŹDZIEWICZ M., *Synchronous motor with hybrid permanent magnets on the rotor*, XVI International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, ISEF 2013, Ohrid, Macedonia, 12–14 September 2013.
- [9] ZALAS P., KISIELEWSKI P., *Zastosowanie magnesów trwałych w silnikach elektrycznych małej mocy*, Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych, PEMINE, Ryto, 25–27 maja 2011, Masz. Elektr. Zesz. Probl. BOBRME Komel nr 91, 109–112.
- [10] ZALAS P., *Magnesy trwałe w wirniku silnika synchronicznego małej mocy*, Prace Nauk. IMNiPE PWr. nr 65, Wrocław, 2011, 99–116.

MAGNETOELECTRIC LOW POWER SYNCHRONOUS MOTOR
WITH HYBRID MAGNETS – PRODUCTION TECHNOLOGY

The paper presents selected motor design with a compact permanent magnets hybrid rotor, adapted for line starting. Analyzed theoretically rotor consists of a soft magnetic composite, sintered Nd-Fe-B magnets, bonded Nd-Fe-B magnets and copper or aluminium sleeve as a squirrel cage. Performed initial study of the starting properties including the influence of the value of the total moment of inertia of the drive system and the characteristics and values of the load torque on waveforms of the basic electromechanical quantities. Numerical analysis were performed using a specially developed, two-dimensional field-circuit model of the motor, using the finite element method. It also presents a description of the mechanical design and the technology of producing motors of this type.