

Rdzeń bezszczotkowego silnika prądu stałego wykonany z amorficznego materiału miękkiego magnetycznego

Streszczenie. W artykule porównano dwa prototypy bezszczotkowych silników prądu stałego (PM BLDC), których rdzenie wykonano z materiału amorficznego (ASMM) i blachy elektrotechnicznej (Fe-Si). Badania porównawcze wykonano korzystając z symulacji komputerowej w programie ANSYS i eksperymentu laboratoryjnego. Uzyskane wyniki potwierdzają, że silnik z rdzeniem amorficznym charakteryzuje się niższymi stratami i niższą temperaturą obudowy silnika.

Abstract. This paper compares two prototypes of brushless dc motors (PM BLDC) with cores made of amorphous material (ASMM) and electrical sheet metal (Fe-Si). Comparative studies were performed using computer simulation in ANSYS and laboratory experiment. The results obtained confirm that the motor with an amorphous core has lower losses and a lower motor case temperature. (**Core of brushless DC motors made of amorphous soft magnetic material**).

Słowa kluczowe: Bezszczotkowy silnik prądu stałego (PM BLDC), amorficzny materiał magnetycznie miękki (ASMM), Metglas, rdzeń silnika, straty w rdzeniu.

Keywords: Brushless DC motor (PM BLDC), amorphous soft magnetic material (ASMM), Metglas, motor core, core loss.

Wstęp

Pogłębiający się kryzys energetyczny spowodował pojawienie się wielu regulacji dotyczących produkcji i sprzedaży wszystkich urządzeń i źródeł energii. Wzrost wymagań odnośnie sprawności i innych parametrów jakościowych jest szczególnie widoczny w zakresie produkcji silników elektrycznych.

Silnik elektryczny jest elementem przekształcającym energię elektryczną na energię mechaniczną lub przy odzyskiwaniu energii, przetwornikiem energii mechanicznej na energię elektryczną. Wykorzystywany w układach napędzających począwszy od urządzeń ogólnodostępnych typu AGD, przez pojazdy elektryczne i linie technologiczne, a skończywszy na zaawansowanej technice kosmicznej. Wykorzystanie silników, w tak wielu dziedzinach, spowodowało zapotrzebowanie na nowoczesne silniki elektryczne o coraz to lepszych właściwościach.

Jednym ze sposobów poprawy właściwości silników (zwiększenie sprawności) jest zastąpienie powszechnie stosowanych materiałów magnetycznie miękkich takich jak stal elektrotechniczna i stopy Fe-Ni typu permalloy wykorzystywanych do budowy rdzeni, nową generacją materiałów amorficznych i nanokrystalicznych [1].

Materiał magnetycznie miękki

Rozwój systemów sterowania i przemienników częstotliwości umożliwił realizację napędów od prędkości bardzo wolnych po setki tysięcy obrotów na minutę. Praca przy wysokich częstotliwościach wymaga zarówno odpowiedniej konstrukcji mechanicznej silnika, jak również doboru odpowiedniego materiału dla obwodu magnetycznego pracującego przy częstotliwościach przemagnesowania dochodzących do kiloherców.

W rdzeniu stojana, występuje pole magnetyczne przemienne o częstotliwości przemagnesowania wynikającej z prędkości obrotowej silnika o zadanej liczbie biegunów. Przemienny strumień magnetyczny przenikający rdzeń silników przenosi energię, której część jest zamieniana na ciepło. Powstające w ten sposób straty magnesywania rdzenia są bardzo ważnym parametrem opisującym właściwości stalowych taśm magnetycznych i blach elektrotechnicznych. Znajomość strat jest niezbędna do prawidłowego zaprojektowania każdej maszyny

elektrycznej. Moc odpowiadająca traconej w ten sposób energii jest nazywana stratami magnetycznymi lub stratami w żelazie P_{Fe} . Straty magnetyczne powstają wskutek zjawiska histerezy magnetycznej i prądów wirowych [2-4].

Klasyczne materiały elektrotechniczne wykorzystywane do budowy rdzeni silników i transformatorów, dławików oraz zasilaczy impulsowych zastępuje się z powodzeniem materiałami amorficznymi [5-11]. Otrzymywane są one ze stopów na bazie żelaza lub kobaltu, w postaci cienkich taśm o grubości rzędu kilkudziesięciu mikrometrów. Charakteryzują się dużą indukcją nasycenia, wąską pętlą histerezy, dużą rezystywnością i małą stratnością oraz mogą pracować przy częstotliwości do kilkuset kHz [12].

Głównym wyzwaniem wykonania rdzenia stojana z amorficznego materiału (ASMM) jest technologia. Rdzeń, przedstawiony na rys.7a, składa się z pierścieni wyciętych z amorficznej wstęgi Metglas 2605 SA1 o grubości około 25 nm i szerokości 142 mm za pomocą wycinarki laserowej. W wyniku naprężeń termicznych wywołanych procesem skrawania dochodzi do deformacji otrzymanych pierścieni (rys.1). W celu uformowania rdzenia pierścienie zostają następnie ułożone w stos. Po kilku procesach technologicznych obejmujących m.in. kompresję, obróbkę cieplną w odpowiedniej temperaturze i impregnację, uzyskuje ostateczną formę rdzenia (rys.7a) [5].



Rys.1. Pierścienie wycięte z taśmy amorficznej

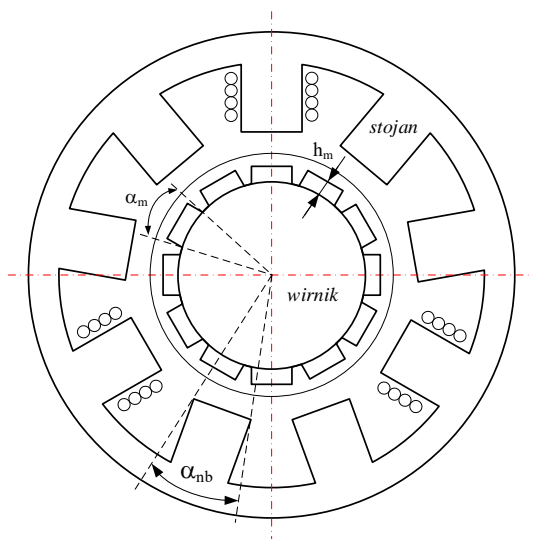
Bezczotkowy silnik prądu stałego (PM BLDC)

Aby przeprowadzić ocenę wpływ częstotliwości na pracę silnika jak i wyznaczyć straty w materiale magnetycznym postanowiono zbudować dwa identyczne model/prototypy silników, różniących się tylko materiałem magnetycznym

wykorzystanym do budowy rdzenia silnika. W jednym z silników postanowiono zastosować materiał magnetyczny miękki znany pod nazwą Metglas, a w drugim blachę elektrotechniczną. Badania eksperymentalne poprzedzono badaniami komputerowymi wykonanymi w programie ANSYS Electronics Desktop Environment.

Jako silnik wybrano bezszczotkowy silnik prądu stałego z magnesami trwałymi (PM BLDC). Silniki PM BLDC charakteryzują się stosunkowo prostą konstrukcją, dużą gęstością mocy i dobrymi właściwościami dynamicznymi. Mają mniejsze wymiary i prostsze układy sterowania, w porównaniu z innymi silnikami w tym z silnikami indukcyjnymi, a co najważniejsze są bardzo niezawodne [3, 13, 14]. Zalety te spowodowały, że silniki PM BLDC są chętnie wykorzystywane w napędach pracujących z dużą prędkością obrotową [15, 16].

Postanowiono zbudować model trójfazowego silnika PM BLDC o mocy około 2 kW i maksymalnej prędkości obrotowej około 8 000 obr/min. Zdecydowano się na wykonanie rdzenia z żłobkami otwartymi (o trzech parach biegunów – 9 kolumn) i wirnika z magnesami osadzonymi na powierzchni wirnika (6 par biegunów) (rys.2). W tabeli 1 przedstawiono ważniejsze wymiary geometryczne przyjętego modelu silnika.



Rys.2. Uproszczony przekrój modelu/prototypu silnika PM BLDC

Tabela 1. Wymiary modelu/prototypu silnika PM BLDC

| Stojan silnika | |
|------------------------------------|---|
| Ilość żłobków/kolumn | 9 |
| Średnica wewnętrzna | 104 mm |
| Średnica zewnętrzna | 50,4 mm |
| Długość rdzenia | 80 mm |
| Kąt nabiegumnika (α_{nb}) | 30° |
| Materiał rdzenia silnika | Metglas (ASMM) lub Fe-Si |
| Wirnik silnika | |
| Liczba magnesów | 12 |
| Rodzaj magnesu | Magnesy neodymowe N38 ($B_r=1,244$ T, $H_c=-947$ kA/m) |
| Średnica wirnika (bez magnesów) | 40 mm |
| Wysokość magnesu (h_m) | 3 mm |
| Kąt magnesu (α_m) | 25° |
| Materiał jarzma wirnika | Stal 45 |

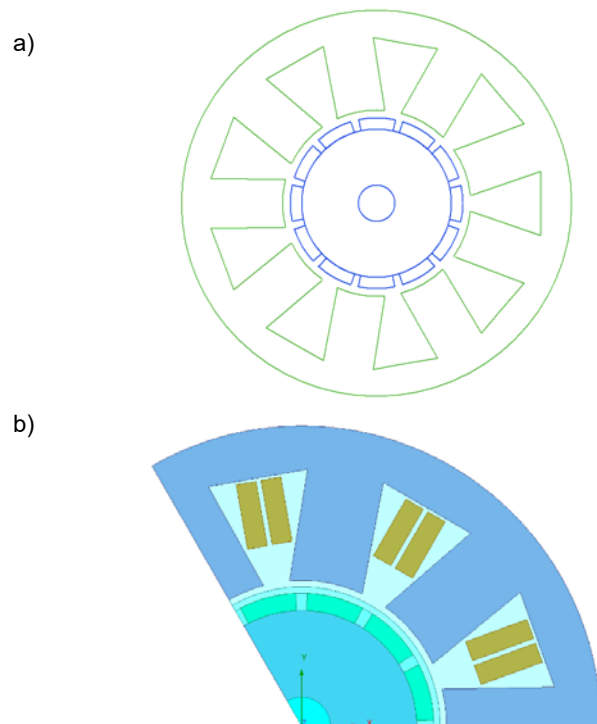
We wcześniejszych pracach, prowadzonych w Sieci Badawczej Łukasiewicz - Instytucie Metali Nieżelaznych w Gliwicach przy współpracy z Katedrą Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki Politechniki Śląskiej, w

projekcie silnika wysokoobrotowego zastosowano rdzeń z żłobkami półotwartymi [5]. Bardzo duża prędkość obrotowa (do 60 000 obr/min) utrudniała, ze względu na bezpieczeństwo, prowadzenie badań testowych. Dlatego zaproponowano nową konstrukcję silnika, bardzo różniącą się od typowych konstrukcji silników wysokoobrotowych [17]. Konstrukcja jest podobna do silników stosowanych w napędach dysków HDD [18, 19]. W zaproponowanej konstrukcji częstotliwość pola magnetycznego w rdzeniu maszyny jest wysoka dzięki sześciu parom biegunów wirnika. Teoretycznie straty w rdzeniach ASMM są nawet 10 razy mniejsze niż w rdzeniach ze stali Fe-Si, ale ze względu na skomplikowaną obróbkę cieplną i mechaniczną stosunek ten maleje [20].

Model i badania komputerowe w programie ANSYS

Głównym celem badań komputerowych była budowa modelu umożliwiającego wyznaczenie strat w materiale magnetycznym oraz wyznaczenie istotnych parametrów poprzedzających wykonanie prototypu silnika PM BLDC.

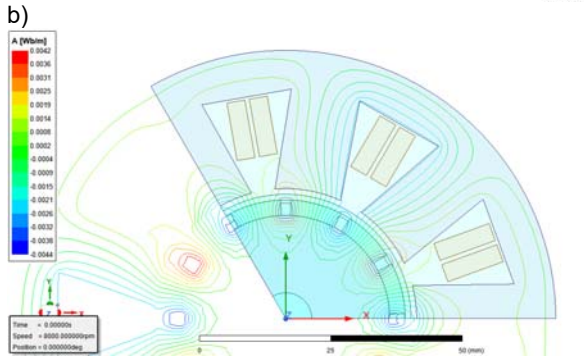
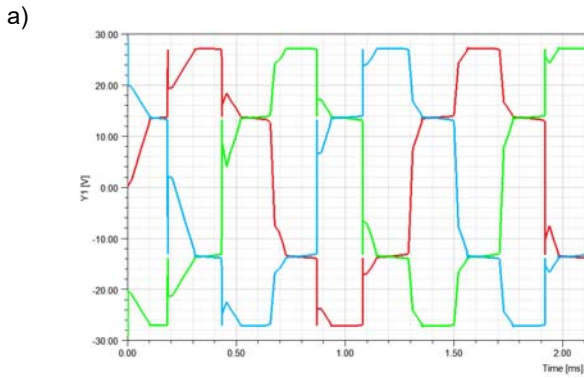
Badania zostały przeprowadzone przy użyciu modeli analitycznych (RMxprt) i 2D FEM (Maxwell) w programie ANSYS Electronics Desktop pokazanym na (rys.3b). Model MES pokrywa 1/3 przekroju maszyny dzięki odpowiednim warunkom brzegowym [21, 22].



Rys.3. Model komputerowy silnika modelowego PM BLDC w programie ANSYS Electronics Desktop Environment: a) RMxprt; b) 2D FEM

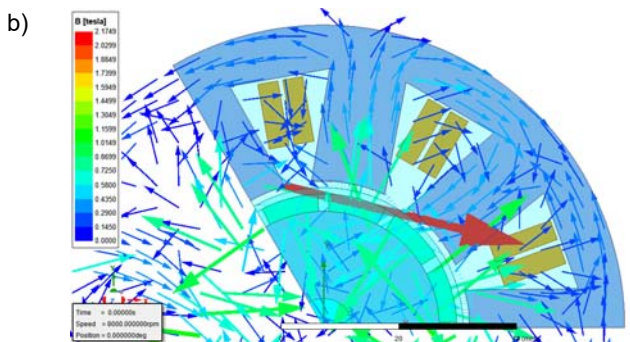
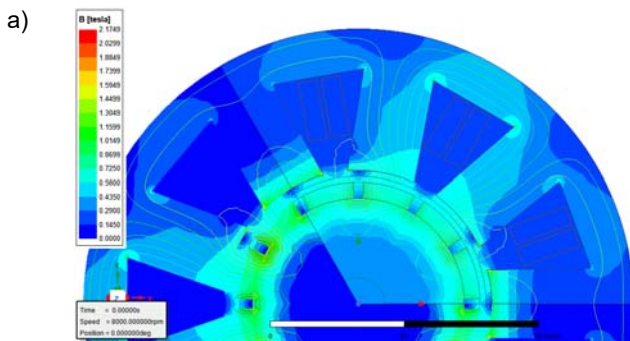
Algorytm sterowania silnikiem PM BLDC został oparty na klasycznym trybie przewodzenia 120 stopni (algorytm bipolarny) z wyidealizowanym przetwornikiem dla napięcia obwodu prądu stałego 50 V [3]. Układ sterowania został tak przygotowany, aby odzwierciedlał rzeczywisty układ sterowania silnikiem, tak jak w stanowisku laboratoryjnym.

Na kolejnych rysunkach przedstawiono przebiegi napięć indukowanych w silniku z rdzeniem amorficznym, rozkład izolinii potencjału wektorowego pola magnetycznego A (rys.4), oraz rozkład indukcji i wektora indukcji magnetycznej B (rys.5).



Rys.4. Przebiegi napięć indukowanych oraz rozkład pola magnetycznego dla modelu silnika z materiałem ASMM

Gotowy model komputerowy pozwolił wykonać symulację wpływu rodzaju materiału wykorzystanego w budowie rdzenia stojana na straty w tym materiale. W symulacji przyjęto dane materiałowe zawarte w tabeli 2.



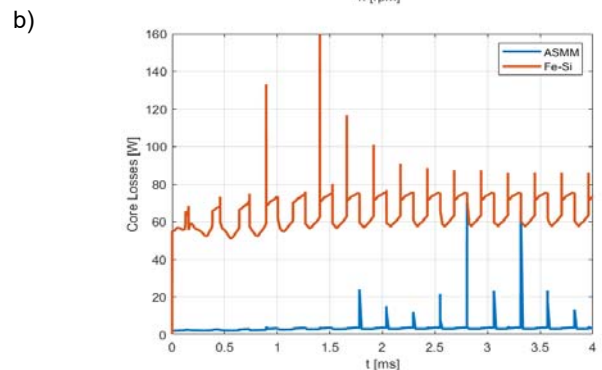
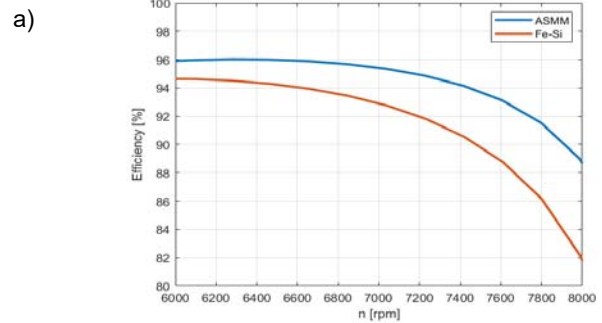
Rys.5. Rozkład indukcji oraz wektora indukcji magnetycznej B dla silnika z materiałem ASMM

Przyjęte parametry współczynniki materiałowe k_h , k_c i k_e w programie ANSYS pozwalają na wyznaczenie stratności pochodzących od strat histerezowych, wirowych i nadmiarowych, a w ostateczności ocenę strat w rdzeniu badanego silnika [23, 24].

Na kolejnych rysunkach przedstawiono wpływ zastosowanego materiału na sprawność (rys.6a) oraz straty w rdzeniu silnika PM BLDC (rys.6b) gdy w modelu komputerowym zmieniono jedynie dane materiału amorficznego (ASMM) na blachę elektrotechniczną (Fe-Si). Z wykresów jednoznacznie wynika, że silniki z rdzeniami wykonanymi z materiałów amorficznych mają mniejsze straty i wyższą sprawność.

Tabela 2. Dane materiałowe ASMM i Fe-Si wykorzystane w symulacji w programie ANSYS

| Nazwa | Wartość | Jednostka |
|---|-----------|-------------------|
| Metglas (ASMM) | | |
| Przewodność materiału | 833 333 | S/m |
| Współczynniki | | W/m ³ |
| k_h | 22,2919 | |
| k_c | 0 | |
| k_e | 1,17294 | |
| Gęstość materiału | 7 330 | kg/m ³ |
| Blacha elektrotechniczna (Fe-Si) | | |
| Przewodność materiału | 1 960 000 | S/m |
| Współczynniki obliczeniowe | | W/m ³ |
| k_h | 164,2 | |
| k_c | 1,3 | |
| k_e | 1,72 | |
| Gęstość materiału | 7 650 | kg/m ³ |

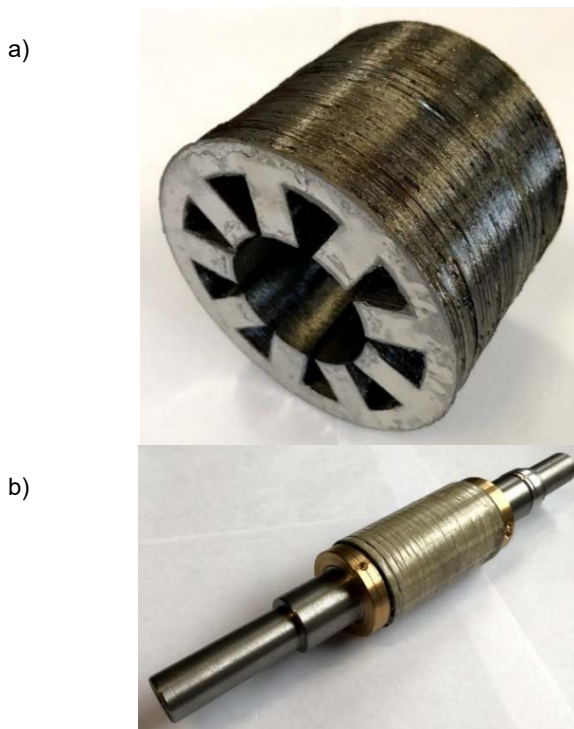


Rys.6. Charakterystyki wyznaczone na podstawie modelu komputerowego w programie ANSYS: a) $\eta = f(n)$; b) $P_{los} = f(t)$

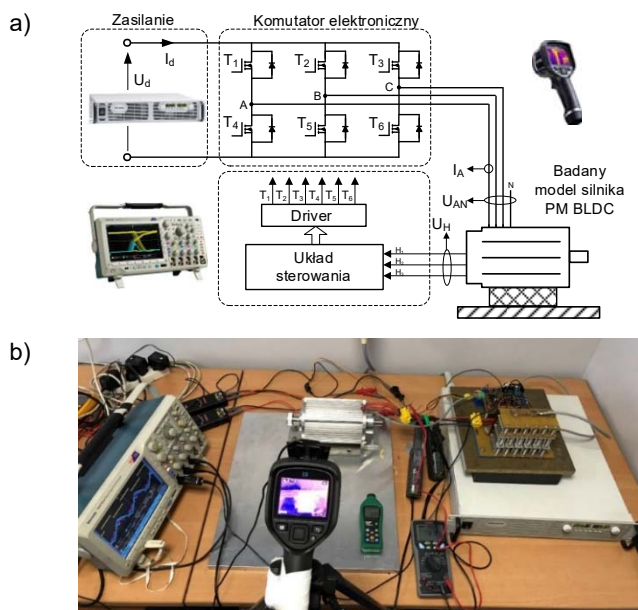
Laboratoryjna weryfikacja strat w rdzeniu silnika

Aby potwierdzić uzyskane wyniki z symulacji komputerowej zbudowano również dwa prototypy silników PM BLDC różniące się tylko materiałem wykorzystanym do budowy rdzenia silnika (rys.7). Pozostałe parametry jak wirnik, sposób uzwojenia, łożyska, obudowa, sposób sterowania i zasilania były takie same.

Badania testowe zostały przeprowadzone na stanowisku (rys.8). Badany silnik PM BLDC były zasilane z regulowanego źródła napięcia stałego GEN-40-85-3P400 poprzez komutator elektroniczny (falownik). Wartości prądów i napięć mierzono za pomocą oscyloskopu MSO3014, zaś pomiar temperatury był realizowany za pomocą kamery termowizyjnej Flir 8.



Rys.7. Gotowe elementy prototypu silnika PM BLDC: a) rdzeń wykonany z materiału amorficznego; b) wirnik



Rys.8. Stanowisko laboratoryjne: a) schemat; b) widok

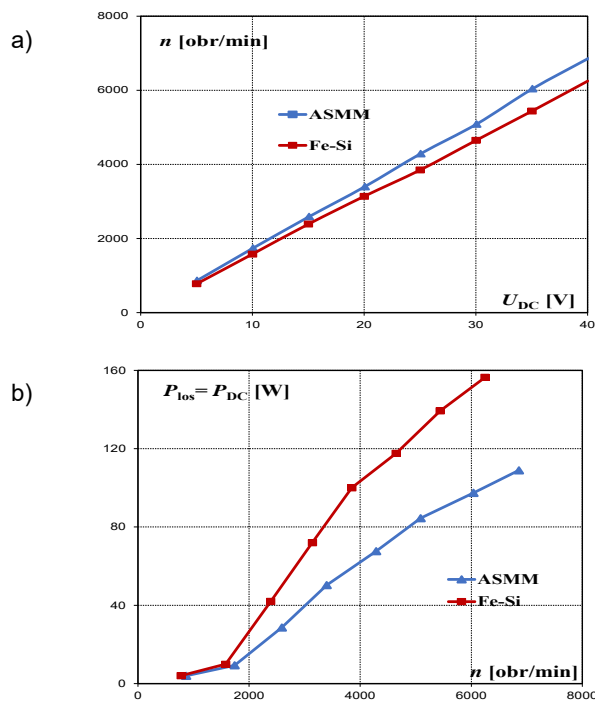
Całkowite straty nieobciążonego silnika PM BLDC (bieg jałowy) są sumą strat elektrycznych (straty w uzwojeniach P_{Cu} i straty w rdzeniu (żelazie) P_{Fe}) i strat mechanicznych (straty w łożyskach P_{mbe} i straty tarcia o powietrze $P_{f,air}$) oraz strat innych P_{add} [3]. Straty te można opisać zależnością:

$$(1) \quad P_{los} = P_{Cu} + P_{Fe} + P_{mbe} + P_{f,air} + P_{add}$$

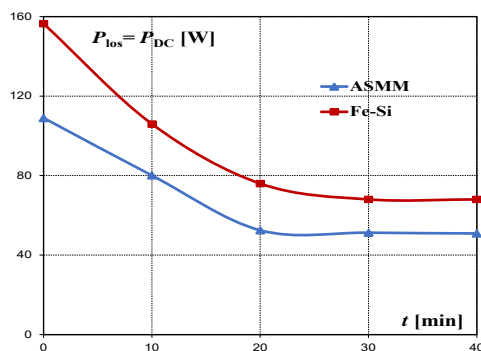
W eksperymencie wykorzystano dwa identyczne prototypy silników PM BLDC różniące się tylko rodzajem materiału użytego do budowy rdzenia silnika. Założono, że straty (tarcia o powietrze, straty łożyskowe i inne) wyznaczone dla tych samych prędkości - będą takie same,

a różnica w wynikach, wynika z różnych strat w rdzeniu silnika czyli z rodzaju zastosowanego materiału. Dlatego jako wyniki badań nieobciążonych silników przedstawiono moc dostarczaną do badanych silników ze źródła prądu stałego (rys.9b i rys.10). Takie przedstawienie wyników pozwala porównać wyniki badań eksperymentalnych z wynikami badań symulacji komputerowej (rys.6).

Charakterystykę prędkości obrotowej w funkcji napięcia zasilania oraz moc pobieraną przez nieobciążone silniki w funkcji zmian prędkości obrotowej przedstawiono na rysunku 9a.



Rys.9. Charakterystyki nieobciążonych prototypów silników PM BLDC: a) $n = f(U_{DC})$; b) $P_{DC} = f(n)$



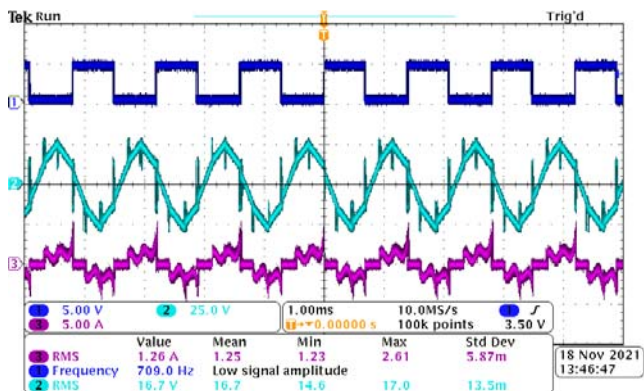
Rys.10. Charakterystyka mocy pobieranej przez badane prototypy silników PM BLDC

Pomiary rozpoczęto dla zimnych silników, które w trakcie pomiarów się nagrywały. Podwyższenie temperatury powodowało polepszenie właściwości smarnych i przy wzroście temperatury prąd zasilania silników malał. Po osiągnięciu napięcia zasilania 40V, w odstępach 10 minutowych, kontynuowano pomiary silników przy stałym napięciu źródła zasilania (rys.10).

Po 40 minutach, w temperaturze otoczenia 25°C, wielkości opisujące pracę silników były prawie ustalone i wynosiły odpowiednio dla silnika ASMM (Metglas) około 38°C, a silnik pobierał moc około 50 W. Silnik wykonany z Fe-Si w tych samych warunkach nagrzał się do

temperatury około 43 °C i pobierał moc około 68 W (rys.10 i rys.12).

Zarejestrowane przebiegi jednego sygnału hallotronu, napięcia i prądu silnika dla prędkości obrotowej 7 090 obr/min przedstawiono na rysunku 11.



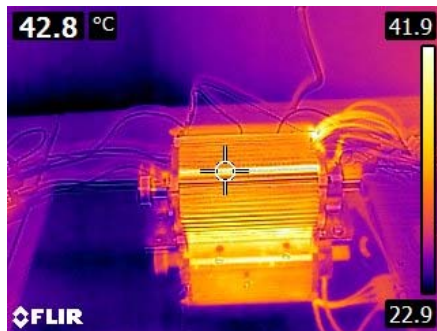
Rys.11. Przebiegi nieobciążonego silnika ASMM zarejestrowane przy prędkości 7 090 obr/min gdzie: 1) sygnał z czujnika Halla; 2) napięcie fazowe; 3) prąd fazowy silnika

Przedstawione na (rys.12) zdjęcia z kamery termowizyjnej pokazują, że silnik, w którym rdzeń wykonano z materiału amorficznego (ASMM), nagrzał się do temperatury niższej. Mierzona temperatura na obudowie silnika jest wynikiem oddziaływania zmiennego pola pochodzącego od magnesów trwałych umieszczonych na wirniku silnika, tarcia powietrza o rdzeń silnika oraz przepływającego prądu. W całym zakresie pomiarowym udział mocy wydzielonej w uzwojeniach silnika P_{Cu} nie przekroczył 1,5 % mocy obwodu prądu stałego P_{DC} (prąd ma tutaj najmniejszy udział w nagrzewaniu rdzenia). Pomijając procentowy udział poszczególnych składników źródła ciepła możemy stwierdzić, że materiał amorficzny nadaje się do aplikacji w silnikach, od których wymagana jest niska temperatura pracy.

a)



b)



Rys.12. Zdjęcia z kamery termowizyjnej badanych prototypów silników z rdzeniem wykonanym z: a) ASMM; b) Fe-Si

Podsumowanie. Uwagi końcowe

W pracy przedstawiono zagadnienia związane z wykorzystaniem materiału magnetycznie miękkiego w silniku elektrycznym na przykładzie bezszczotkowego silnika prądu stałego (PM BLDC). Uzyskane wyniki skonfrontowano z wynikami badań laboratoryjnych. Uzyskano dużą zbieżność wyników. Najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych badań:

- Wyniki uzyskane zarówno za pomocą analizy numerycznej, analitycznej i MES, jak i weryfikacji eksperymentalnej z wykorzystaniem przygotowanych prototypów dowodzą przewagi rdzenia wykonanego z materiału amorficznego (ASMM) nad klasycznymi blachami elektrotechnicznymi (Fe-Si).
- Straty nieobciążonego silnika (straty jałowe) dla rdzenia ASMM są o około 40% mniejsze niż w przypadku rdzenia Fe-Si przy prędkości obrotowej $n = 4\ 000$ obr/min. Stosunek ten zmniejsza się wraz z prędkością obrotową oraz spadkiem częstotliwości pola magnetycznego.
- Porównując wyniki 2D MES, pokazane na (rys.6b) i wyniki eksperymentalne, pokazane na (rys.10), można zauważyć, że różnica między stratami nieobciążonego silnika dla ASMM i Fe-Si przy prędkości obrotowej bliskiej 6 500 obr/min to około 70 W.
- Ponieważ pozostałe składowe strat, takie jak straty tarcia w łożyskach i straty tarcia o powietrze i inne, są takie same przy tej samej prędkości obrotowej, głównym źródłem różnicy są parametry materiału użytego na rdzeń stojana.

W przyszłości przewiduje się kontynuację badań dla silników wirujących z prędkością większą niż 10 000 obr/min oraz analizę relacji pomiędzy stratami w materiale (żelazie) a innymi rodzajami strat mocy zarówno dla stanu jałowego jak i obciążenia. Planuje się również weryfikację, czy możliwe jest zmniejszenie strat, poprzez zmianę metody skrawania stosowanej przy produkcji pierścieni rdzenia stojana. Obecnie stosowaną technologię laserową można zastąpić popularną już metodą water-jet lub nowo opracowaną technologią ultradźwiękową.

Artykuł jest finansowany z środków projektu nadawczego NCBiR pt.: „Nowoczesne technologie wytwarzania funkcjonalnych materiałów magnetycznych dla zastosowań elektro-mobilnych i medycznych” o numerze: TECHMATSTRATEG2/410941/4/NCBR/2019

Autorzy:

mgr inż. Marek Hreczka,
 dr hab. inż. Aleksandra Kolano-Burian, prof. IMN,
 dr inż. Roman Kolano,
 Sieć Badawcza Łukasiewicz, Instytut Metali Nieżelaznych,
 ul Sowińskiego 5 44-100 Gliwice E-mail:
Marek.Hreczka@imn.lukasiewicz.gov.pl
Aleksandra.Burian-Kolano@imn.lukasiewicz.gov.pl
Roman.Kolano@imn.lukasiewicz.gov.pl
 dr hab. inż. Wojciech Burlikowski, prof. PS,
 Politechnika Śląska, Katedra Mechatroniki, ul. Akademicka 10A,
 44-100 Gliwice. E-mail: Wojciech.Burlikowski@polsl.pl;
 dr inż. Janusz Hetmańczyk,
 Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice. E-mail: Janusz.Hetmanczyk@polsl.pl

LITERATURA

- [1] Silveyra J. M., Xu P., Keylin V., DeGeorge V., Leary A., McHenry, M. E., Amorphous and nanocomposite materials for energy-efficient electric motors, *Journal of Electronic Materials*, 2015, Vol. 45, No. 1, pp. 219-225, <https://doi.org/10.1007/s11664-015-3968-1>.
- [2] Azarewicz S., Węgliński B.: Parametry wybranych blach prądnicowych przy podwyższonej częstotliwości przemagnesowania. *Zeszyty Problemowe – Maszyny elektryczne*, Nr 80, 2008, s. 19-22.

- [3] Krykowski K., Silniki PM BLDC właściwości, sterowanie, aplikacje, *Wydawnictwo BTC*, Legionowo 2015
- [4] Dąbrowski M., Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego, *Wydawnictwo Naukowo-Techniczne*, Warszawa 1994.
- [5] Kolano R., Kolano-Burian A., Krykowski K., Hetmańczyk, J., Hreczka, M., Marcin P., Szynowski J., Amorphous Soft Magnetic Core for the Stator of the High-Speed PM BLDC Motor With Half-Open Slots, *IEEE Transactions On Magnetics*, 2016, Vol. 52, No. 6, pp. 1-5.
- [6] Yu W., Hua W., Zhang Z., High-Frequency Core Loss Analysis of High-Speed Flux-Switching Permanent Magnet Machines, *Electronics* 2021, Vol. 10, <https://doi.org/10.3390/electronics10091076>.
- [7] Dems M., Komezka K., Performance characteristics of a High-Speed Energy-Saving induction motor with an amorphous stator core, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61 No. 6, 2014 pp. 3046-3055.
- [8] Krykowski K., Gałuszkiewicz Z., Gałuszkiewicz P., Hetmańczyk J., Catus D., High-speed permanent magnet brushless DC motors, properties and prospective applications, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 95, nr 8/2019, pp. 139-145.
- [9] Ning S.R., Gao J., Wang Y.G., Review on applications of low-loss amorphous metals in motors, *Advanced Materials Research*, vol.129-131, 2010, pp.1366-1371.
- [10] Hasegawa R., Applications of amorphous magnetic alloys, *Materials Science and Engineering, A*, Vol. 375-377, 2004, pp. 90-97, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.258>.
- [11] Kolano R., Kolano-Burian A., Polak M., Szynowski J., Application of rapidly quenched soft magnetic materials in energy-saving electric equipment, *IEEE Transactions On Magnetics*, 2014, Vol. 50, No. 4 pp. 1-4, doi: 10.1109/TMAG.2013.2283918.
- [12] Kolano-Burian A., Red., Innowacyjne materiały do zastosowań w energooszczędnych i proekologicznych urządzeniach elektrycznych. ul. Sobińskiego 5, 44-100 Gliwice: *Instytut Metali Nieżelaznych*, 2015.
- [13] Krishnan R., Electric Motor Drives, Modelling, Analysis and Control, *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, NJ 2001
- [14] Miller T.J.E., Brushless Permanent and Reluctance Motors Drives, *Oxford University Press*, Oxford 1989.
- [15] Z. Wang, Y.Enomoto, M. Ito, R. Masaki, S. Morinaga, H. Itabashi and Sh. Tanigawa, Development of a permanent magnet motor utilizing amorphous wound cores, *IEEE Transactions On Magnetics*, vol. 46, no. 2, 2010, pp. 570-573
- [16] Y. Enomoto, M. Ito, H. Koharagi, R. Masaki, S. Ohiva, C. Ishihara and M.Mita, „Evaluation of experimental permanent magnet brushless motor utilizing new magnetic material for stator core teeth,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 1, 2005, pp. 4304-4308.
- [17] He T.; Zhu Z., Eastham F., Wang Y., Bin H., Wu D., Gong L., Chen J., Permanent Magnet Machines for High-Speed Applications, *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 13, No. 18, 2022, <https://doi.org/10.3390/wevj13010018>.
- [18] Ishak D., Zhu Z. Q., Howe D., Permanent-magnet brushless machines with unequal tooth widths and similar slot and pole numbers, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41, No. 2, 2005, pp. 584-590, doi: 10.1109/TIA.2005.844380.
- [19] United States Patent, No. 5, 804, 904, Date of Patent: Sep. 8, 1998, Samsung Electronics Co., Ltd..
- [20] Ertugrul N., Hasegawa R., Soong W. L., Gayler J., Kloeden S., Kahourzade, S., A Novel Tapered Rotating Electrical Machine Topology Utilizing Cut Amorphous Magnetic Material, *IEEE Transactions On Magnetics*, Vol. 51, No. 7, pp. 1-6, July 2015, doi: 10.1109/TMAG.2015.2399867.
- [21] Wach, P., Dynamics and Control of Electrical Drives, *Springer* 2021.
- [22] ANSYS Electromagnetics Suite 2021 R1, Manual - © ANSYS, Inc.
- [23] Bertotti G., General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, 24, 621-630, 1988.
- [24] Wolnik T. Materiały magnetyczne miękkie wykorzystywane w magnetowodach silników tarczowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 92, nr 7/2016, pp. 149-155.