

Minimalizacja strat w wysokoobrotowych silnikach PM BLDC przez wykorzystanie nowoczesnych materiałów magnetycznych w stojanie i zmianę konstrukcji wirnika

Minimization of losses in high-speed PM BLDC motors by using modern magnetic materials in the stator and changing the rotor design

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki prac nad wykorzystaniem materiałów miękkich w rdzeniach bezszczotkowych silników prądu stałego (PM BLDC). Na podstawie analiz komputerowych i badań laboratoryjnych wskazano źródła strat w silnikach PM BLDC oraz sposoby zmniejszenia strat przez zastosowanie materiału amorficznego (ASMM) w rdzeniu silnika oraz wirnika pakietowanego. Weryfikację laboratoryjną przeprowadzono z wykorzystaniem dwóch silników PM BLDC o prędkościach maksymalnych 8 000 obr/min i 30 000 obr/min.

Abstract. The article presents the results of work on the use of soft materials in the cores of brushless DC motors (PM BLDC). Based on computer analyses and laboratory tests, the sources of losses in PM BLDC motors and methods of reducing losses by using amorphous material (ASMM) in the motor core and the packaged rotor were indicated. Laboratory verification was carried out using two PM BLDC motors with maximum speeds of 8 000 rpm and 30 000 rpm.

Słowa kluczowe: Bezszerotkowy silnik prądu stałego (PM BLDC), amorficzny(ASMM), materiał magnetycznie miękki, Metglas, rdzeń silnika
Keywords: Brushless DC motor (PM BLDC), amorphous (ASMM), soft magnetic material, Metglas, motor core

Wstęp

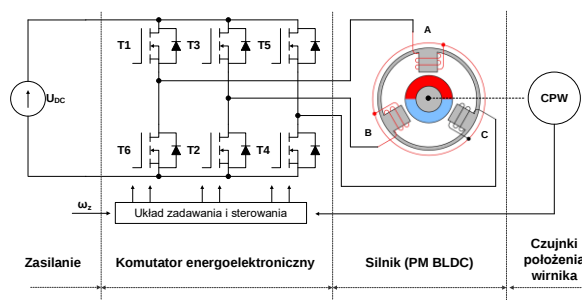
W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat prowadzono intensywne badania nad wysokoobrotowymi silnikami z magnesami trwałymi (High Speed Permanent Magnet Machines - HSPMM) do zastosowań przemysłowych i domowych, w tym nad sprężarkami, pompami próżniowymi, obrabiarkami, kinetycznymi magazynami energii i innymi [5].

W porównaniu z konwencjonalnymi maszynami elektrycznymi o niskich i umiarkowanych prędkościach, silniki o wysokich prędkościach charakteryzują się wysoką gęstością mocy, małymi rozmiarami i niewielkim ciężarem. Co ważniejsze, wysokoobrotowe silniki mogą być bezpośrednio podłączone do wysokoobrotowych obciążeń, a konwencjonalne skrzynie przekładniowe nie są już potrzebne. Pozwala to uniknąć stosowania skomplikowanych systemów skrzyń przekładniowych, poprawia niezawodność i wydajność systemu oraz zmniejsza wibracje, hałas i koszty. Wraz z rozwojem w dziedzinie przekształtników energoelektronicznych zasilanie silników wysokoobrotowych nie stanowi już ograniczenia. Rozwój wysokoobrotowych maszyn elektrycznych jest również wspierany przez rozwój układów łożyskowych o dużej wytrzymałości, mniejszych stratach i dłuższej żywotności [8, 22].

Silniki z magnesami trwałymi (PMM) w porównaniu z silnikami indukcyjnymi (IM) i silnikami reluktancyjnymi (SRM) mają największą sprawność i gęstość mocy, najmniejszą masę i najkrótszą długość czynną stojana. Dodatkowo, silniki z magnesami trwałymi są znacznie mniej wrażliwe na wielkość szczeliny powietrznej, co jest pożądane przy pracy z dużymi prędkościami. Dlatego też silniki z magnesami trwałymi są najatrakcyjniejszym typem maszyny do zastosowań przy dużych prędkościach obrotowych. Silniki z magnesami trwałymi występują w dwóch wersjach: bezszczotkowe (PM BLDC) i synchroniczne (PMSM). Różnią się przebiegiem prądu (quasi-prostokątnego w silnikach PM BLDC i sinusoidalnego w silnikach PMSM) oraz przebiegiem siły elektromotorycznej (trapezowej w PM BLDC i sinusoidalnej w silniku PMSM).

Bezszerotkowy silnik prądu stałego (PM BLDC)

Najczęściej spotykanym układem pracy silnika PM BLDC w aplikacjach przemysłowych jest układ z silnikiem 3-fazowym o uzwojeniach połączonych w gwiazdę i komutatorem elektronicznym w układzie mostka 3 fazowego (rys.1) [13, 15, 18]. Poszczególne uzwojenia fazowe silnika są przełączane sekwencyjnie przez tranzystory komutatora elektronicznego i wytwarzają pole magnetyczne, którego wektor może przyjmować sześć położeń. Funkcja przełączeń zaworów komutatora elektronicznego jest wypracowywana na podstawie sygnałów pochodzących z dyskretnych czujników położenia wirnika (CPW), którymi najczęściej są czujniki Halla.

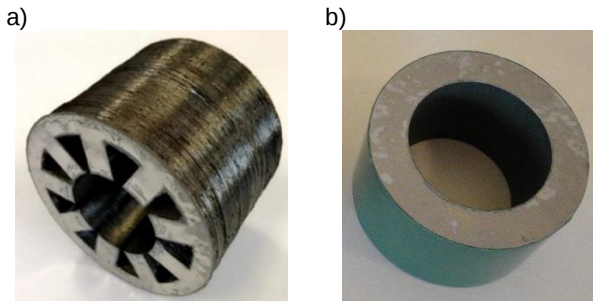


Rys.1. Układ połączeń 3 fazowego, 2 biegunowego silnika PM BLDC

Trójfazowe silniki PM BLDC mają różne konstrukcje stojana i konfiguracje uzwojeń. W celu spełnienia zróżnicowanych wymagań stosowane są rdzenie ułożkowe i bezłożkowe. Dla silników PM BLDC o dużej mocy i dużych gabarytach wydaje się być uzasadnione zastosowanie stojanu ułożkowego, natomiast struktura bezłożkowa stojana wydaje się być właściwa dla silników ultraszybkich oraz o małej mocy i małych gabarytach (rys.2b). Dlatego w projektach silników należy rozważyć kombinację liczby łożków i biegunów, która wpływa na straty wirowe wirnika, współczynnik uzwojenia oraz niezrównoważoną siłę magnetyczną. Rozłożone i skupione konfiguracje uzwojenia mają odmienne charakterystyki przy

łączeniu z różnymi kształtami rdzeni stojana. Uzwojenia rozłożone obejmują uzwojenia średnicowe i skrócone, natomiast uzwojenia skupione można podzielić na koncentryczne, toroidalne i uzwojenia skośne dla silników bezżłobkowych [1, 2, 7].

Zasadniczo w silnikach dużej mocy (>10 kW) stosuje się wielożłobkową strukturę rdzenia stojana, tj. o liczbie żłobków większej od 6 ($N_{\text{slot}} > 6$), natomiast w silnikach małej mocy strukturę stojana o liczbie żłobków mniejszej lub równej 6 ($N_{\text{slot}} \leq 6$) oraz struktury bezżłobkowe.



Rys.2. Rdzeń silnika PM BLDC: a) użłobkowany; b) bezżłobkowy

W silnikach pracujących z dużymi prędkościami, powszechnie stosuje się 2- i 4-biegunowe wirniki w celu ograniczenia częstotliwości podstawowej i zmniejszenia strat w żelazie stojana oraz strat przy przełączaniu w komutatorze elektronicznym. Przy pracy z dużymi prędkościami, siła odśrodkowa prowadzi do ogromnych naprężeń mechanicznych w wirniku i może zniszczyć magnesy oraz laminaty wirnika. Z tego powodu różne konstrukcje wirników w silnikach typu interior PM (IPM), surface-mounted PM (SPM) i solid PM są zaprojektowane tak, aby wytrzymać siłę odśrodkową. W celu zwiększenia wytrzymałości mechanicznej wirnika w silnikach IPM, stosuje się pełny wirnik ze stali nierdzewnej lub kombinacje stali krzemowej i nierdzewnej [8,11,17]. W silnikach SPM do ochrony magnesów przed dużą siłą odśrodkową stosowane są niemagnetyczne tuleje o wysokiej wytrzymałości, włókna szklane, węglowe i inne materiały (rys.3).



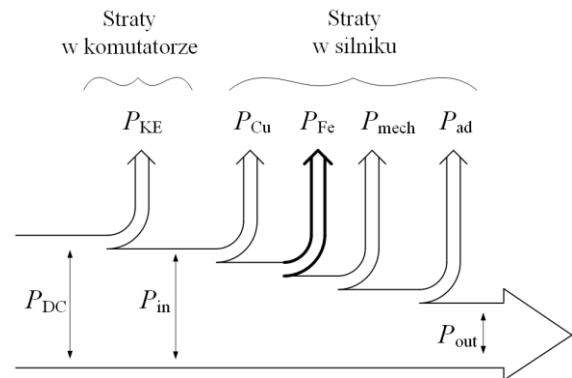
Rys.3. Wirnik prototypowego silnika PM BLDC z dodatkową opaską zwieszającą wytrzymałość na działanie siły odśrodkowej

Straty w obwodach magnetycznych

Główne rodzaje strat w silnikach elektrycznych to straty w uzwojeniach P_{Cu} (potocznie zwane stratami w miedzi) oraz straty w obwodach magnetycznych P_{Fe} (zwane stratami w żelazie lub rdzeniu silnika). W silnikach wysokoobrotowych znaczną rolę odgrywają również straty mechaniczne P_{mec} , na które składają się straty w łożyskach oraz tarcia o powietrze. Pozostałe straty nazywane są stratami dodatkowymi P_{ad} (rys.4) [7, 15, 21]. Sumę strat można opisać wzorem:

$$(1) \quad P_{\text{losM}} = P_{\text{Cu}} + P_{\text{Fe}} + P_{\text{mec}} + P_{\text{ad}}$$

Dodatkowo, w silnikach z komutacją elektroniczną, dodatkowo występują straty w komutatorze elektronicznym P_{KE} , które nie zależą bezpośrednio od konstrukcji silnika i nie mają wpływu na jego nagrzewanie jednak wpływają na sprawność całkowitą silnika.



Rys.4. Rozdział strat w silniku PM BLDC (wykres Sankey'a)

Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej (częstotliwości) straty mechaniczne i straty w obwodach magnetycznych szybko rosną, co powoduje ogólny wzrost strat w silniku. Strat mechanicznych nie da się całkowicie wyeliminować a jedynie w pewnym stopniu zmniejszyć przez stosowanie wysokosprawnych łożysk oraz stosując konstrukcje, w których straty tarcia o powietrze są najmniejsze. Strat P_{Fe} (w obwodach magnetycznych) zależą nie tylko od częstotliwości ale również od indukcji. Jeśli częstotliwość, rodzaj przemagnesowania oraz rozkład pola magnetycznego w próbnym pakiecie badawczym jest taki sam, jak w wykonanym z niego rdzeniu, to straty mocy z wystarczającą dokładnością oblicza się ze wzoru [3]:

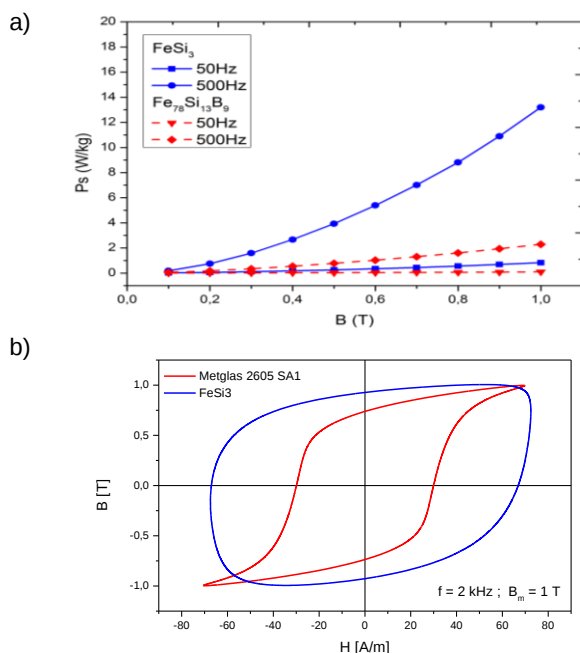
$$(2) \quad P_{\text{Fe}} = k_t \Delta p_{B,f} \left(\frac{B_{\text{Fe}}}{B_p} \right)^\alpha m_{\text{Fe}}$$

w którym:

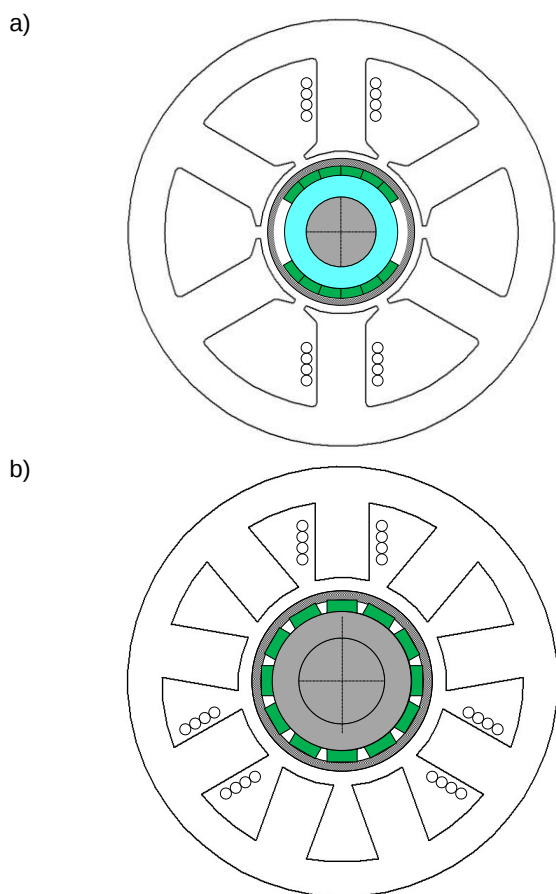
- k_t – współczynnik uwzględniający wpływ czynników konstrukcyjno-technologicznych,
- $\Delta p_{B,f}$ – stratność, mierzona przy indukcji B_p i częstotliwości f wyrażona w W/kg,
- B_{Fe} – indukcja w rdzeniu,
- m_{Fe} – masa rdzenia, wyrażona w kg,
- α – wykładnik potęgi w przybliżeniu $\alpha \approx 2$.

Znaczące zmniejszenie strat w obwodach magnetycznych można uzyskać stosując niskostratne materiały magnetyczne miękkie na bazie żelaza [9, 12, 19]. Jednym z materiałów charakteryzujących się niskimi stratami przy podwyższonych częstotliwościach pracy jest stop amorficzny $\text{Fe}_{76}\text{Si}_{13}\text{B}_9$ znany jako Metglas 2605 SA1 [4]. Stratności materiału amorficznego i materiału żelazokrzemowego (polikrystalicznego) wyznaczoną dla częstotliwości 500 Hz przedstawiono na rys.5a. Częstotliwość ta odpowiada prędkości 30 000 obr/min dla silnika PM BLDC o jednej parze biegunów. Materiały magnetycznie miękkie charakteryzują się węższą pętlą histerezy (mała wartość natężenia koercji H_c oraz indukcji remanentu B_r) w stosunku do innych materiałów, co umożliwia jego bardzo łatwe przemagnesowywanie przy zmianach kierunku zewnętrznego pola magnetycznego (rys.5b).

Wpływ strat na sprawność silnika oraz udziału strat w silniku można wyznaczyć korzystając z symulacji komputerowej lub przeprowadzając eksperyment [6,14].



Rys.5. Charakterystyki: a) stratności $\Delta p=f(B)$; b) magnesowania $B=f(H)$ dla materiału amorficznego oraz materiału żelazokrzemowego



Rys.6. Uprozczone przekroje modeli silników PM BLDC: a) 2 kW i 8 000 obr/min; b) 3 kW i 30 000 obr/min

Wybrane badania komputerowe i laboratoryjne

Korzystając z metody elementów skończonych (MES) istnieje możliwość budowy modelu polowego silnika elektrycznego. Model polowy umożliwia wyznaczenie istotnych parametrów oraz wyznaczenie strat w każdym elemencie projektowanego silnika w tym strat w materiale magnetycznym.

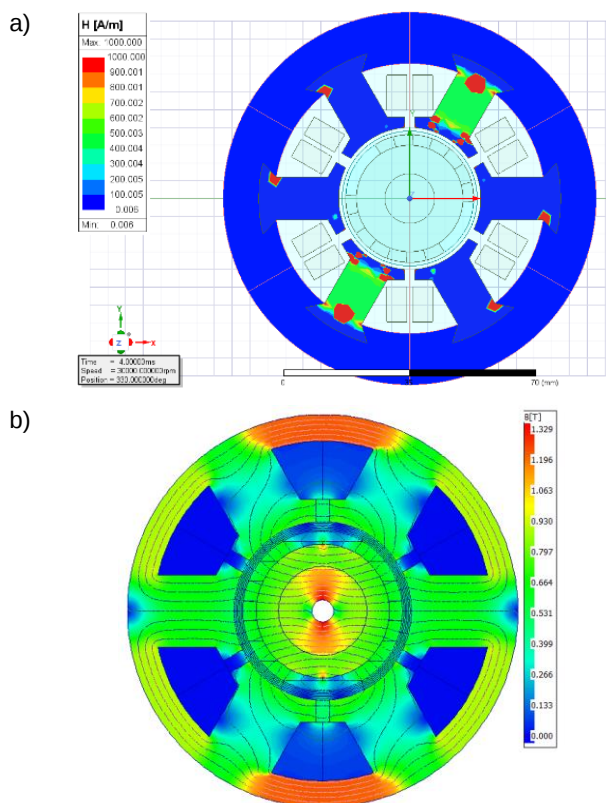
Przedstawione wyniki badań zostały przeprowadzone dla dwóch prototypów bezszczotkowych silników prądu stałego z magnesami trwałymi o mocy i maksymalnej prędkości obrotowej odpowiednio 2 kW i 8 000 obr/min oraz 3 kW i 30 000 obr/min. Rdzenie obu silników wykonano z żłobkami otwartymi i z magnesami osadzonymi powierzchniowo. Dodatkowo, rdzeń silnika na 8 000 obr/min tworzy 9 kolumn (trzy pary biegunów) i wirnikiem o 6 parach biegunów (rys.6a), zaś rdzeń silnika na 30 000 obr/min tworzy 6 kolumn (dwie pary biegunów) i wirnik o jednej parze biegunów (rys.6b). Istotne dane modeli przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Ważniejsze wymiary stojana i wirnika modeli/prototypów silników PM BLDC

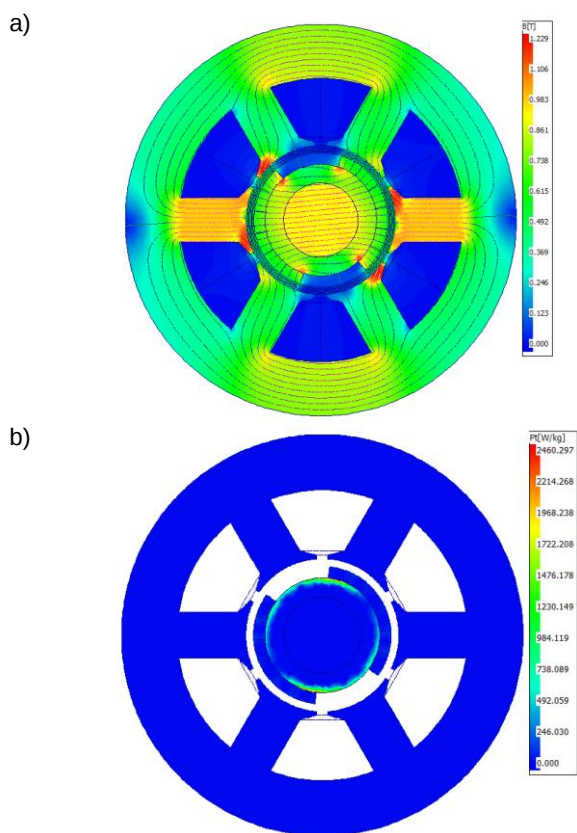
Stojan silnika		
	2kW 8 000 obr/min	3kW 30 000 obr/min
Ilość żłobków/kolumn	9	6
Średnica wewnętrzna	104 mm	105 mm
Średnica zewnętrzna	50,4 mm	40 mm
Długość rdzenia	80 mm	60 mm
Szerokość zęba (bieguna)	12 mm	12 mm
Głębokość żłobka	18 mm	18 mm
Materiał rdzenia silnika	Metglas (ASMM)	Metglas (ASMM)
Wirnik silnika		
Liczba magnesów	12	12
Rodzaj magnesu	Magnes neodymowe N38 ($B_r=1,244$ T, $H_c=-947$ kA/m)	
Średnica wirnika (bez magnesów)	40 mm	40 mm
Kąt magnesu (bieguna)	25°	120°
Materiał jarzma wirnika	Stal 45	

Przedstawione wyniki badań komputerowych zostały wykonane w programie ANSYS Motor-Cad dla silnika o prędkości 30 000 obr/min zaś badania laboratoryjne dla silnika o prędkości 8 000 obr/min. W badaniach komputerowych jaki i laboratoryjnych przyjęto klasyczny algorytm sterowania (przewodzenie przez 120 stopni) i zasilanie silnika z źródła napięcia stałego o wartości 50 V [10,11].

Na rysunku 7a przedstawiono rozkład natężenia pola magnetycznego H w rdzeniu silnika tuż po uruchomieniu oraz rozkład indukcji B dla biegu jałowego (rys.7b). Celem badań było pokazanie wpływu nasycenia się rdzenia w różnych warunkach pracy i stanach pracy silnika. Wyniki z rys.7a, przedstawiają rozkład natężenia pola gdy temperatura silnika jest równa temperaturze otoczenia (przyjęto 20°C).



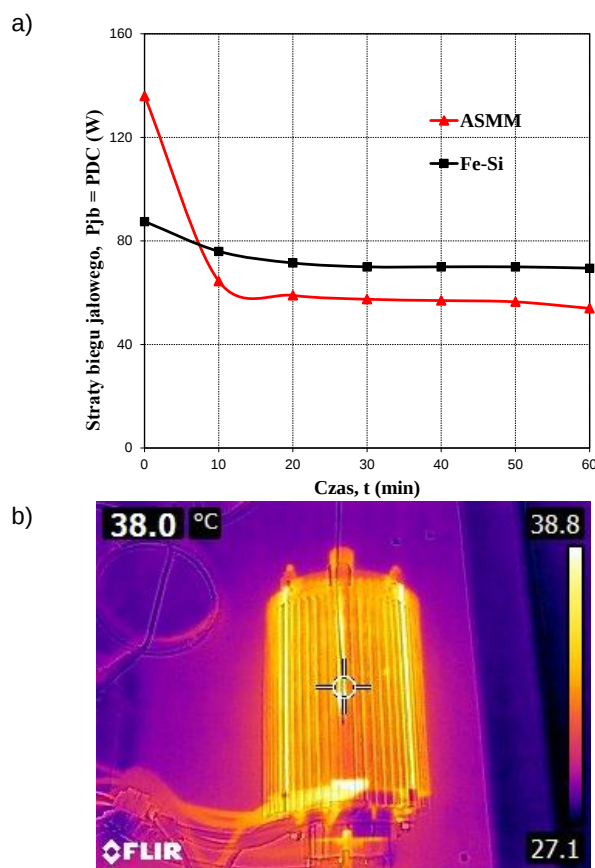
Rys. 7. Wykresy: a) natężenie pola magnetycznego w warunkach startu silnika; b) rozkład indukcji w silniku dla prędkości 30 000 obr/min (bieg jałowy)



Rys. 8. Wykresy: a) rozkładu indukcji; b) gęstości strat całkowitych dla warunków znamionowych

Ze względu na wykorzystany materiał amorficzny w trakcie badań (rys.8a), dbano aby wartości indukcji w rdzeniu stojana nie przekraczały 1 T (rys.5b). Analizując wyniki zwrócono uwagę, że maksymalna gęstość strat w wirniku silnika wyniosła 2 492 W/kg, a straty w wirniku i rdzeniu silnika były tego samego rzędu. Przeprowadzono eksperyment, który miał potwierdzić, czy rzeczywiście straty w wirniku i rdzeniu silnika wykonanego z materiału amorficznego są tego samego rzędu, i czy rozkład temperatur jest również podobny.

Badania laboratoryjne zostały przeprowadzone na stanowisku o układzie jak na rys.1. Badany silnik PM BLDC były zasilane z regulowanego źródła napięcia stałego IT6005C - 80 – 150 poprzez komutator elektroniczny (falownik). Wartości prądów i napięć mierzono za pomocą oscyloskopu MSO5104 oraz sond napięciowych i prądowych (D2-25, E3N). Pomiar temperatury badanych rdzeni silników mierzono za pomocą sond typu K oraz dodatkowo rejestrowano obraz za pomocą kamery termowizyjnej Flir 8. Prędkość obrotową badanego silnika wyznaczano, mierząc częstotliwość sygnału czujnika położenia wirnika badanego silnika [9].

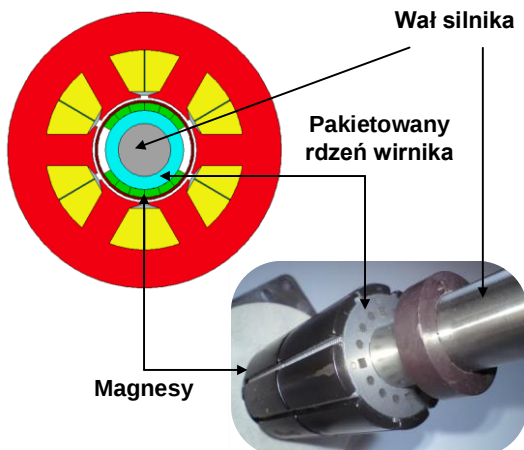


Rys.9. Charakterystyka nieobciążonych prototypów silników PM BLDC: a) $P_{\text{DC}} = f(t)$; b) zdjęcie z kamery termowizyjnej gdzie ASMM - silnik z rdzeniem amorficznym, Fe-Si silnika z rdzeniem wykonanym z blachy żelazokrzemowej

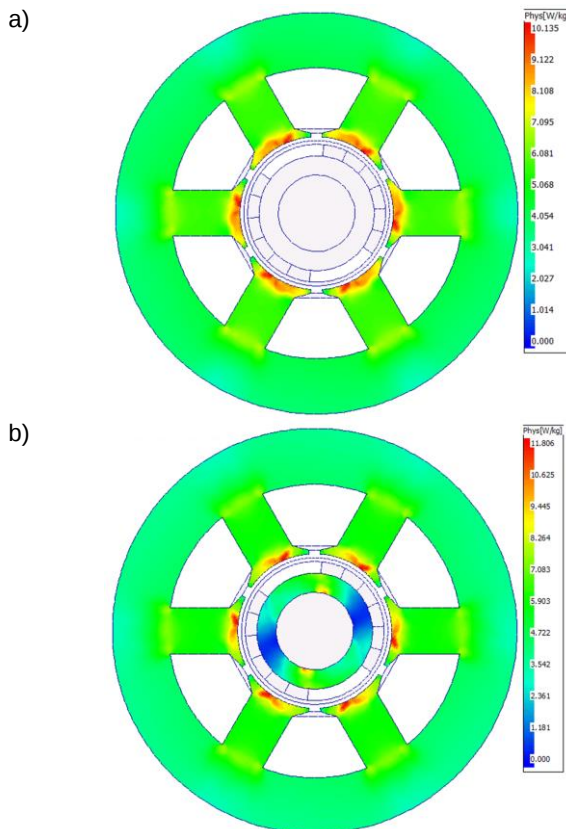
Z przeprowadzonych badań dla dwóch identycznych silników różniących się tylko materiałem użytym do budowy rdzenia (rys.9a), straty biegu jałowego dla silnika z rdzeniem wykonanym z materiału amorficznego (ASMM) były niższe niż dla silnika, którego rdzeń został wykonany z blachy żelazokrzemowej (Fe-Si).

Zakładając, że głównym źródłem strat w nieobciążonym silniku są straty w rdzeniu poza stratami w uzwojeniach wywołane przepływem prądu to bilans strat potwierdzał istnienie znacznego źródła strat w wirniku. Dodatkowo, badania z wykorzystaniem kamery termowizyjnej i czujników pomiarowych potwierdzały nagrzewanie się wirnika od zewnętrznego pola.

Jednym, ze sposobów zmniejszenia strat w wirniku jest zastosowanie wirnika pakietowanego, w którym to magnesy nie są przymocowane bezpośrednio do litego wirnika tylko są przymocowane do rdzenia pakietowanego wykonanego z blachy elektrotechnicznej (rys.10) tak jak w silniku BG75x50 firmy Dunkermotoren. Dla zmienionej struktury wirnika w modelu komputerowym (rys.10b) wykonano ponownie badania a wyniki przedstawiono w tabeli 2.

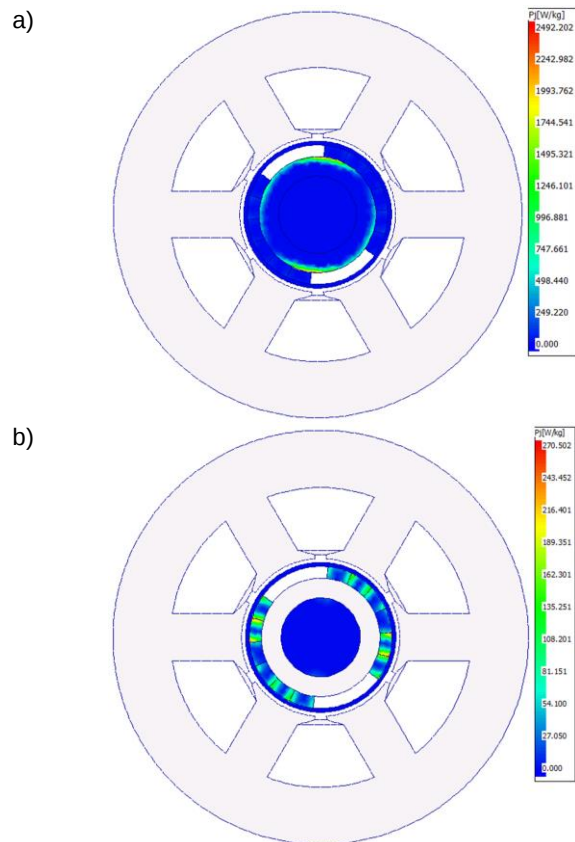


Rys.10. Sposób wykonania wirnika pakietowanego modelu na przykładzie silnika BG75x50



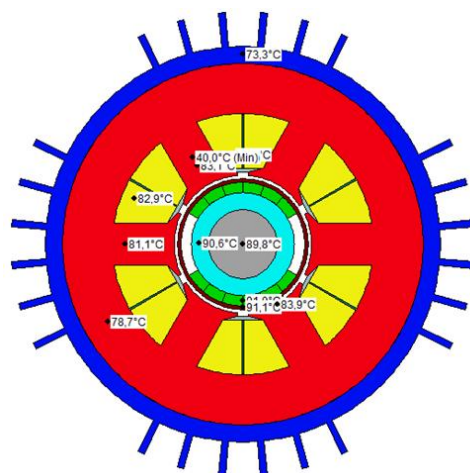
Rys.11. Wykresy rozkładu strat histerezy w wirniku wykonanym jako: a) lity, b) pakietowany

Na kolejnych rysunkach przedstawiono udział strat wydzielanych w wirniku pochodzących od prądów wirowych (rys.12) i strat histerezy (rys.11). Dodatkowo, zestawiono wyniki dla wirnika litego i wirnika pakietowanego. Straty histerezy, ze względu na swój charakter ujawniają się w materiałach pakietowanych (rys.11b) a prądy wirowe w materiałach stałych jak wały silników, magnesy (rys.12b).



Rys.12. Wykresy rozkładu strat wiroprowadowych w wirniku wykonanym jako: a) lity; b) pakietowany

W tabeli 2 zestawiono wybrane wartości strat silników z wirnikiem litym i pakietowanym uzyskane w wyniku symulacji komputerowej. Zmniejszenie strat w wirniku o niemalże 20 W jest zadawalające. Uzyskano również zmniejszenie temperatury wirnika o prawie 25°C, a obudowy silnika o 10 °C (rys.13).



Rys.13. Rozkład temperatur silnika z wirnikiem pakietowanym

Tabela 2. Wybrane wartości strat w modelu/prototypu silnika PM BLDC o prędkości 30 000 obr/min

Maksymalna gęstość strat w:	Silnik z wirnikiem litym	Silnik z wirnikiem pakietowanym
	W	W
uzwojeniu	36,67	28,25
stojanie	23,22	25,08
wirniku	23,5	1,1
inne	42,51	49,47
całkowite	125,9	103,9

Podsumowanie. Uwagi końcowe

W pracy przedstawiono zagadnienia związane z zastosowaniem materiału magnetycznie miękkiego w rdzeniach silników na przykładzie bezszczotkowych silników prądu stałego (PM BLDC).

Zastosowanie w rdzeniu silnika materiału amorficznego lub innego materiału magnetycznie miękkiego charakteryzującego się niskimi stratami dla wyższych częstotliwości pracy podnosi sprawność silnika. Dla uzyskania wysokiej sprawności silnika koniecznym jest zmniejszenie strat również w pozostałych elementach silnika jak wirnik czy łożyska.

Prototyp silnika o mocy 3kW i prędkości 30 000 obr/min (rys.6b, tabela 1) został wykonany i wstępnie przebadany. Uzyskane wyniki potwierdziły rozkład strat jak dla silnika o prędkości 8 000 obr/min w tych samych zakresach

prędkości. Przygotowywane są różne rodzaje wirników pakietowanych w celu dalszych badań.

Artykuł jest wynikiem prac w ramach projektu badawczego NCBiR pt.: „Nowoczesne technologie wytwarzania funkcjonalnych materiałów magnetycznych dla zastosowań elektro-mobilnych i medycznych” o numerze: TECHMATSTRATEG2/410941/4/NCBR/2019 oraz projektu Doktorat Wdrożeniowy pt.: „Badanie wpływu wybranych warunków wytwarzania wielobiegunowych amorficznych i nanokrystalicznych rdzeni magnetycznie miękkich w aspekcie zastosowania ich w stojanach silników elektrycznych”.

Autorzy: mgr inż. Marek Hreczka, dr hab. inż. Aleksandra Kolano-Burian, prof. IMN, dr inż. Roman Kolano, Sieć Badawcza Łukasiewicz, Instytut Metali Nieżelaznych, ul. Józefa 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 hab. inż. Marta Dudek-Burlikowska, prof. PS, Politechnika Śląska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, ul. Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice E-mail: Marta.Dudek-Burlikowska@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] Bianchi N., Bolognani S., Luise F., Analysis and Design of a PM Brushless Motor for High-Speed Operations. *IEEE Transactions On Energy Conversion*. No. 3, September 2005, Tom Vol. 20, s. 629-637
- [2] Bianchi N., Bolognani S., Luise F.: High Speed Drive Using a Slotless PM Motor, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol 21, No 4, July 2006, s.1083-1090
- [3] Dąbrowski M., Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1994
- [4] Enomoto Y., Ito M., Koharagi H., Masaki R., Ohiva S., Ishihara C. and Mita M., „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.
- [5] Gilson, A., Tavernier, S., Gerber, M., Espanet, C., Dubas, F., & Depernet, D. (2015). Design of a cost-efficient high-speed high-efficiency pm machine for compressor applications. 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). <https://doi.org/10.1109/ecce.2015.7310204>
- [6] Glinka T., Polak A.: Sprawność układów napędowych silników bezszczotkowych prądu stałego wzbudanych magnesami trwałymi. *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne BOBRME KOMEL*, nr 64, 2002, s. 157-163.
- [7] Glinka T.: Maszyny elektryczne wzbudane magnesami trwałymi. *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*. Gliwice 2002.
- [8] He T., Zhu Z. i Eastham F. Permanent Magnet Machines for High-Speed Applications. *World Electr. Veh. J.* 2022, 13, 18.
- [9] Hreczka M., Burlikowski W., Hetmańczyk J., Kolano-Burian A., Kolano R., Rdzeń bezszczotkowego silnika prądu stałego wykonany z amorficznego materiału miękkiego magnetycznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 98 NR 9/2022 doi:10.15199/48.2022.09.67
- [10] Hreczka M., Kolano R., Kolano-Burian A., Burlikowski W., Hetmańczyk J., Analysis of losses in the high-speed PM BLDC motor with open slot stator core made of amorphous soft magnetic material, *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering* (2023), Vol. 42 No. 4, pp. 831-845, <https://doi.org/10.1108/COMPEL-09-2022-0310>
- [11] 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.
- [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] Krykowski K., Hetmańczyk J., Gałuszkiewicz Z., Makiela D., Straty w wysokoobrotowych silnikach PM BLDC, X Krajowa Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie elektrycznym SENE 2011- Łódź 2014
- [15] Krykowski K., Silniki PM BLDC właściwości, sterowanie, aplikacje, *Wydawnictwo BTC*, Legionowo 2015
- [16] 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
- [17] Uzhegov N., Kurvinen E., Nerg J., Pyrhönen J., Sopanen J. T. and Shirinskii S., Multidisciplinary Design Process of a 6-Slot 2-Pole High-Speed Permanent-Magnet Synchronous Machine, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 2, pp. 784-795, Feb. 2016, doi: 10.1109/TIE.2015.2477797
- [18] Wach, P., Dynamics and Control of Electrical Drives, *Springer* 2021.
- [19] Wang Z., Enomoto Y., Ito M., Masaki R., Morinaga S., Itabashi H. and Tanigawa Sh., Development of a permanent magnet motor utilizing amorphous wound cores, *IEEE Transactions On Magnetics*, vol. 46, no. 2, 2010, pp. 570-573
- [21] Zhang D., Wang F., Kong X., Air friction loss calculation of high speed permanent magnet machines, in *Proc. Int. Conf. Electrical Machines and Systems ICEMS 2008*, Wuhan, China, 2008, 320-323
- [22] Zwyssing C., Round S.D., Kolar J. W., Analytical and experimental investigation of a low torque, ultra-high speed driver system, *Industry Applications Conference*, 2006, vol. 3, 1507-1513