

Bezszczotkowy silnik prądu stałego z rdzeniem wykonanym z materiału amorficznego i nanokrystalicznego

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki prac nad wykorzystaniem materiałów miękkich w rdzeniach bezszczotkowych silników prądu stałego (PM BLDC). W celu porównania właściwości silników zbudowano trzy jednakowe prototypy o prędkości znamionowej 8 000 obr/min, różniące się tylko materiałem z którego wykonano rdzeń. W budowie rdzeni wykorzystano materiał amorficzny (ASMM), materiał nanokrystalicznego (NSMM) oraz blachę elektrotechniczną (Fe-Si). W pracy opisano również technologie wytwarzania rdzeni silników z materiałów magnetycznie miękkich.

Abstract. The article presents the results of work on the use of soft materials in the cores of brushless DC motors (PM BLDC). In order to compare the properties of electric motors, three identical prototypes with a rated speed of 8,000 rpm were built, differing only in the material from which the core was made. In the construction of the cores, amorphous material (ASMM), nanocrystalline material (NSMM) and electrotechnical sheet (Fe-Si) were used. The paper also describes technologies for manufacturing motor cores from soft magnetic materials. (**Brushless DC motors with core made of amorphous and nanocrystalline material**)

Słowa kluczowe: Bezszczotkowy silnik prądu stałego (PM BLDC), amorficzny(ASMM) i nanokrystaliczny (NSMM) materiał magnetycznie miękki, Metglas, rdzeń silnika, technologia wytwarzania rdzeni.

Keywords: Brushless DC motor (PM BLDC), amorphous (ASMM) and nanocrystalline (NSMM) soft magnetic material, Metglas, motor core, core manufacturing technology.

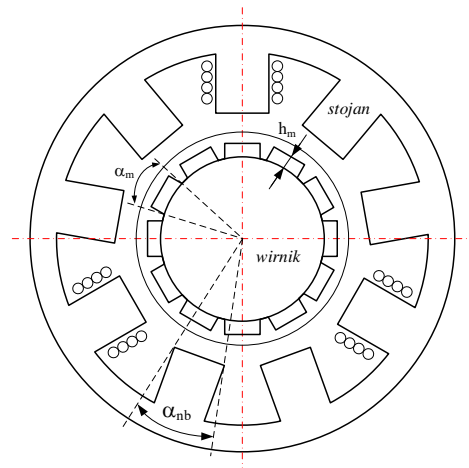
Wstęp

Silnik elektryczny jest elementem przekształcającym energię elektryczną na energię mechaniczną lub przy odzyskiwaniu energii, przetwornikiem energii mechanicznej na energię elektryczną. 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, 2]. Materiały te charakteryzują się dużą indukcją nasycenia, wąską pętlą histerezy, dużą rezystywnością i małą stratnością oraz mogą pracować przy częstotliwości do kilkuset kHz [3].

Bezszczotkowe silniki prądu stałego z magnesami trwałymi (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 [4-6]. Wymienione zalety spowodowały, że silniki PM BLDC są chętnie wykorzystywane w napędach pracujących z dużą prędkością obrotową [7-10]. Wykorzystanie rdzeni z materiałów amorficznych lub nanokrystalicznych umożliwia budowanie silników o zmniejszonych stratach i pracujących z dużymi prędkościami obrotowymi [11].

Bezszczotkowy silnik prądu stałego (PM BLDC)

Aby ocenić wpływ materiału magnetycznego rdzeni na właściwości silników przygotowano trzy identyczne model/prototypy bezszczotkowych silników prądu stałego z magnesami trwałymi (PM BLDC) o mocy około 2 kW i maksymalnej prędkości obrotowej około 8 000 obr/min. Rdzeń silnika wykonano z żłobkami otwartymi (o trzech parach biegunów – 9 kolumn) i wirnika z magnesami osadzonymi na powierzchni wirnika (6 par biegunów) (rys.1). Konstrukcja silnika jest podobna do silników stosowanych w napędach dysków HDD. W tabeli 1 przedstawiono ważniejsze wymiary geometryczne modelu silnika.



Rys.1. Uproszczony przekrój modelu/prototypu silnika PM BLDC

Tabela 1. Wymiary modelu/prototypu silnika PM BLDC

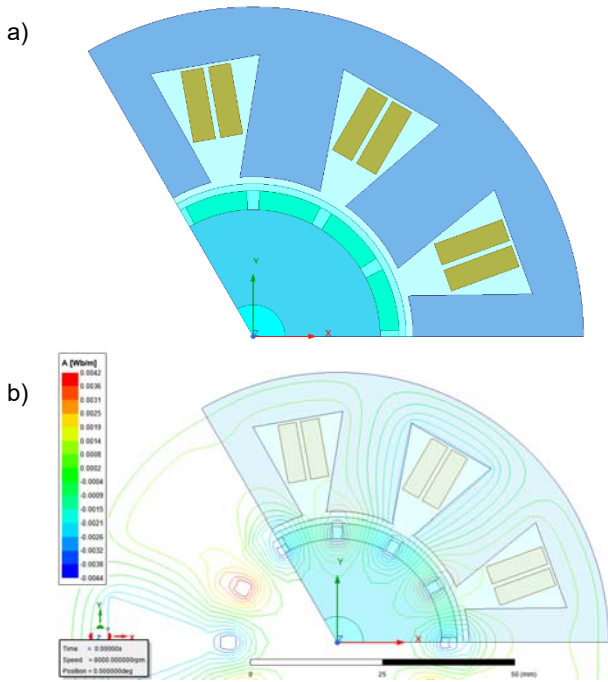
| Stojan silnika | |
|------------------------------------|---|
| Ilość żłobków/kolumn | 9 |
| Średnica wewnętrzna | 104 mm |
| Średnica zewnętrzna | 50,4 mm |
| Długość rdzenia | 80 mm |
| Kąt nabiegumnika (α_{nb}) | 30° |
| Materiał rdzenia silnika | Amorficzny (ASMM), Nanokrystaliczny (NSMM) Żelazo – krzem (Fe-Si) |
| Wirnik silnika | |
| Liczba magnesów | 12 |
| Rodzaj magnesu | Magnes 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 |

Technologia wytwarzania rdzeni silników

Rozwój systemów sterowania i przemienników częstotliwości umożliwił realizację napędów pracujących z prędkościami rzędu 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. Coraz częściej klasyczne materiały elektrotechniczne wykorzystywane do budowy rdzeni silników i transformatorów, dławików oraz zasilaczy impulsowych zastępuje się z powodzeniem materiałami amorficznymi i nanokryształicznymi [12].

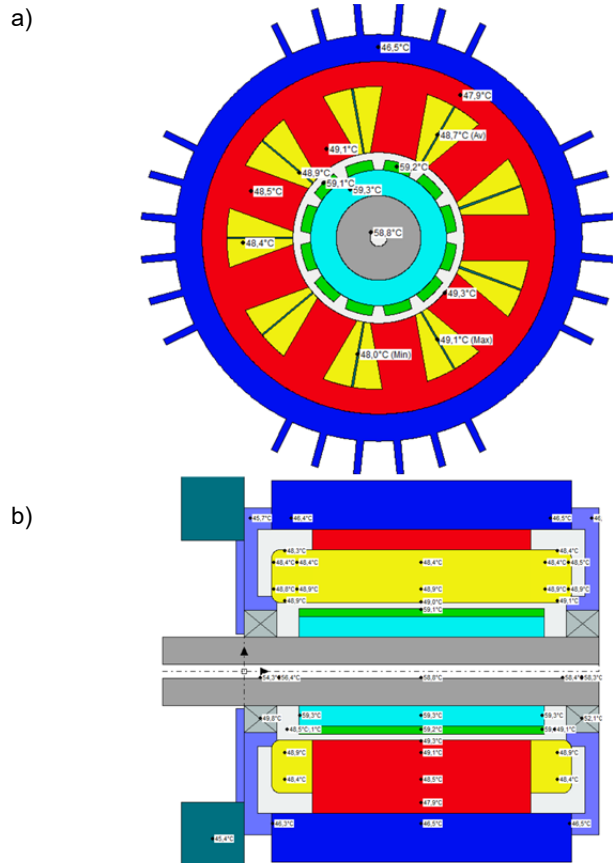
W procesie wytwarzania obwodów magnetycznych (rdzeni) przeznaczonych dla silników elektrycznych i innych elementów pasywnych można wyróżnić etapy: obliczeniowy, projektowy, wykonawczy oraz weryfikacyjny.

Etap obliczeniowy polega na stworzeniu modelu komputerowego silnika elektrycznego. Dla przyjętych wymiarów geometrycznych stojana i wirnika, kształtu i rodzaju materiału z jakiego ma być wykonany rdzeń silnika oraz cech typowych dla przyjętej konstrukcji silnika przeprowadza się szereg symulacji korzystając z programów polowych tj. ANSYS, Maxwell, ANSYS Motor-CAD i innych [13]. Na rys.2 i rys.3 przedstawiono wyniki badań zrejstrowane w trakcie symulacji w programach ANSYS i ANSYS Motor-CAD dla tego samego modelu silnika PM BLDC o parametrach jak w tab.1.



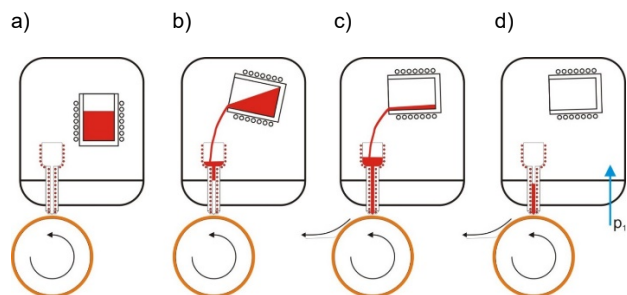
Rys.2. Model komputerowy modelu silnika PM BLDC z rdzeniem amorficznym w programie ANSYS: a) model 2D FEM; b) rozkład pola magnetycznego

Modelowanie silników elektrycznych w programach polowych pozwala na symulację ich pracy w różnych warunkach obciążenia, pozwala również na określenie wpływu różnych zmian parametrów elektrycznych, mechanicznych w tym materiałowych na właściwości silnika, oraz umożliwia optymalizację konstrukcji, w celu zwiększenia efektywności energetycznej konstrukcji. Zakończenie etapu obliczeniowego rozpoczyna etap projektowy, który zakłada wykonanie rysunków technicznych wszystkich elementów silnika wraz z geometrią rdzenia silnika.



Rys.3. Model komputerowy modelu silnika PM BLDC z rdzeniem amorficznym w programie ANSYS Motor-CAD dla silnika bez obciążenia, 50 V, 8800 obr/min. - rozkład temperatur: a) na przekroju silnika; b) wzdłuż konstrukcji silnika

W etapie wykonawczym najpierw przygotowujemy jest stop, którego skład chemiczny jest zgodny z projektowanym a następnie odlewana jest taśma. Taśmy do 30 mm odlewa się metodą „melt-spinning” na odlewarce z tygłem kwarcowym z uformowaną szczeliną odlewniczą, który stanowi jednocześnie tygiel topliny. Taśmy powyżej 30 mm szerokości odlewane są za pomocą odlewarki StripCaster z ceramicznym tygłem toplinym, ceramiczną misą przelewową oraz dyszą odlewniczą (rys.4)



Rys.4. Zasada działania odlewarki StripCaster

Proces odlewania taśmy (rys.4) za pomocą odlewarki StripCaster możemy podzielić na cztery etapy:

- Stop wstępnie jest topiony i rozgrzewany metodą indukcyjną do założonej temperatury.
- Ciekły stop przelewany jest z tygla toplinowego do tygla pośredniego połączonego z kolumną i dyszą odlewniczą.
- Wypływ ciekłego metalu inicjowany jest poprzez wytworzenie ciśnienia w dyszy odlewniczej przez

ciśnienie hydrostatyczne ciekłego metalu wypełniającego kolumnę odlewniczą.

d) Odlew taśmy odbywa się tak aby ciśnienie metalu w dyszy odlewniczej było stałe (regulowane) i równe p_1 .

Odlana taśma jest scharakteryzowana przez grubość i szerokość, oceniana jest jakość powierzchni i krawędzi. Za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej potwierdzana jest struktura amorficzna lub nanokrystaliczna taśmy. Uformowana taśma jest przekazywana do kolejnej operacji formowanie rdzenia magnetycznego czyli pakietowania formatek taśmy (rys.5).

a)



b)



Rys.5. Odlana taśma amorficzna: a) rolka taśmy; b) pierścienie rdzenia silnika wycięte z taśmy amorficznej

Operacja pakietowania formatek taśmy polega na złożeniu odcinków taśmy w stos o określonych wymiarach będącym wynikiem etapu projektowania. Tak ułożone odcinki taśm podlegają obróbie cieplnej lub cieplno-magnetycznej, zabezpieczeniu mechanicznemu pakietu - polegającemu na nasączeniu pakietu po obróbce cieplnej żywicą elektrotechniczną. Po utwardzeniu się żywicy i zdjęciu elementów zabudowy dokonujemy wycięcia kształtu rdzenia magnetycznego. Jeżeli wysokość pakietu rdzenia jest nie wystarczająca wykonuje się odpowiednią liczbę segmentów rdzenia i na koniec składa się wszystkie segmenty w całość (rys.6). Powtarzając cały proces zabezpieczenia mechanicznego.



Rys.6. Pakietowany rdzeń silnika PM BLDC o wysokości 80mm

Tak otrzymany rdzeń silnika (rys.7a) podlega uzwojeniu zgodnie z danymi wynikającymi z etapu obliczeniowego i projektowego (rys.7b).

a)



b)



c)



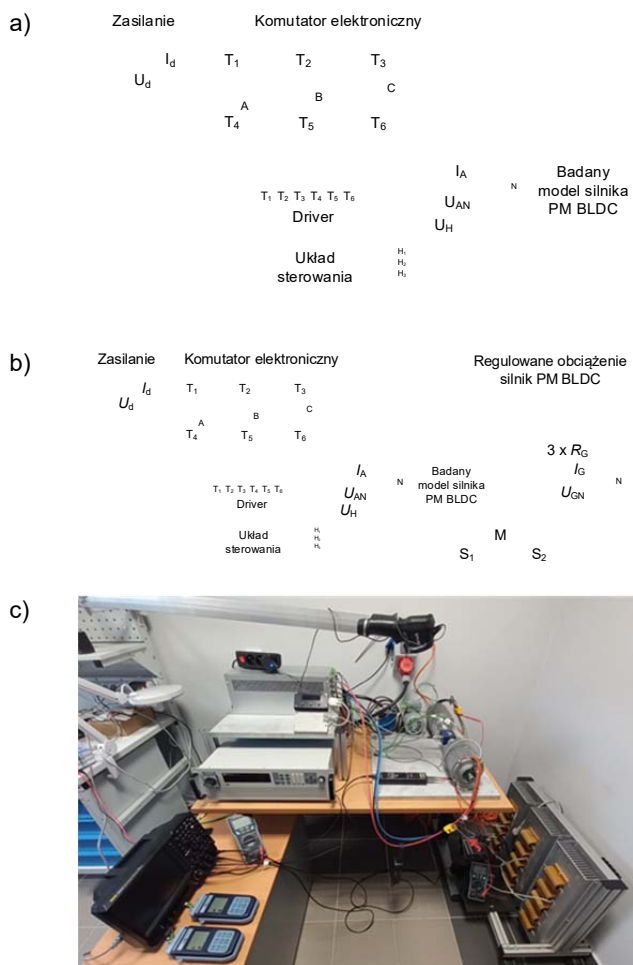
Rys.7. Elementy prototypu silnika PM BLDC: a) rdzeń wykonany z materiału amorficznego; b) uzwojony rdzeń silnika; c) prototyp

Ostatni etap polega na weryfikacji rzeczywistych parametrów ruchowych prototypu modelu silnika (rys.7c) na stanowisku laboratoryjnym pozwalającym określić parametry silnika pracującego na biegu jałowym, w stanie obciążenia i zwarcia [4-6].

Badania eksperymentalne

Badania testowe zostały przeprowadzone na stanowisku umożliwiającym przeprowadzenia badań biegu jałowego (rys.8a) i badań obciążeniowych (rys.8b). Jako obciążenie badanego silnika wykorzystano silnik z rdzeniem amorficznym pracujący jako generator z trójfazowym rezystorem (rys.8) Badany silnik PM BLDC były zasilany 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 momentu obciążenia silnika mierzono momentomierzem M (T21WN), a prędkości obrotową badanego silnika wyznaczano, mierząc częstotliwość sygnału czujnika położenia wirnika badanego silnika.

Pomiar temperatury badanych rdzeni silników (na czołach i w środku rdzenia silnika) mierzono za pomocą sond typu K oraz dodatkowo rejestrowano obraz za pomocą kamery termowizyjnej Flir 8.

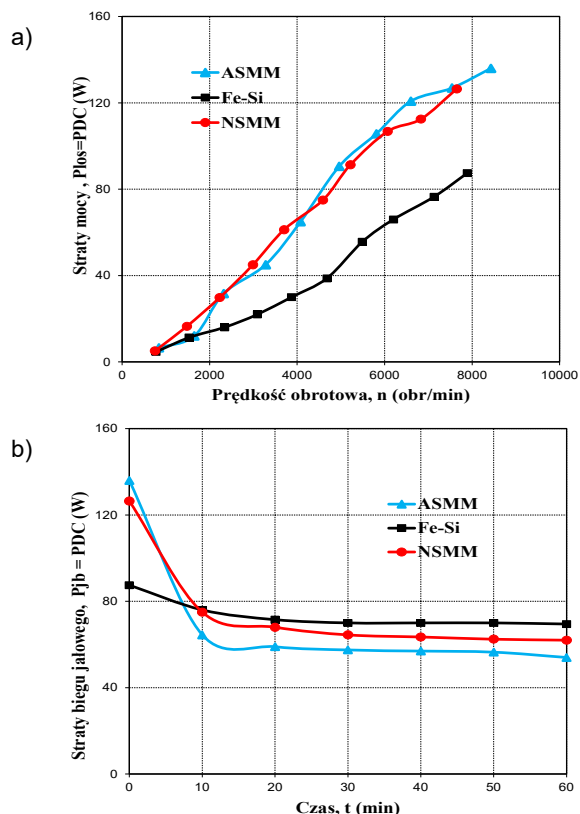


Rys.8. Stanowisko laboratoryjne: a) schemat do badania biegu jałowego; b) schemat do badania obciążenia; c) widok

W eksperymencie wykorzystano trzy identyczne prototypy silników PM BLDC różniące się tylko rodzajem materiału użytego do budowy rdzenia silnika. Ponieważ artykuł jest kontynuacją badań przedstawionych [14] sposób przeprowadzenia badania oraz sposób przedstawienia wyników został zachowany. W [14] 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.9).

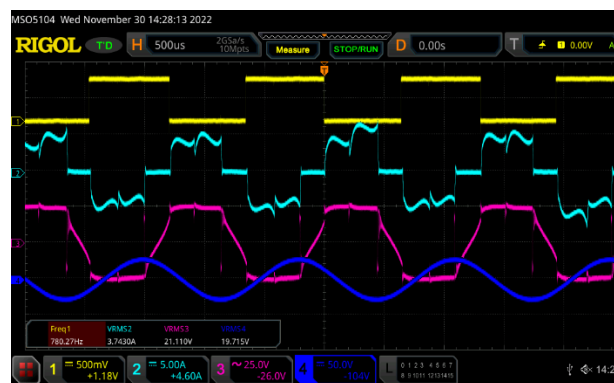
Pomiary biegu jałowego rozpoczęto dla zimnych silników, które w trakcie pomiarów się nagrzewały (rys.9a). Po osiągnięciu napięcia zasilania 50V, w odstępach 10 minutowych, kontynuowano pomiary silników przy stałym napięciu źródła zasilania (rys.9b).

Po godzinie, w temperaturze otoczenia 25 °C, wielkości opisujące pracę silników były prawie ustalone i wynosiły odpowiednio dla silnika ASMM (Metglas) około 40 °C, a silnik pobierał moc około 54 W. Silnik wykonany z materiału nanokrystalicznego (NSMM) pobierał moc około 58W i nagrzął się również do temperatury ok. 40 °C, zaś silnik wykonany z Fe-Si w tych samych warunkach nagrzął się do temperatury około 50 °C i pobierał moc około 70 W (rys.9b).



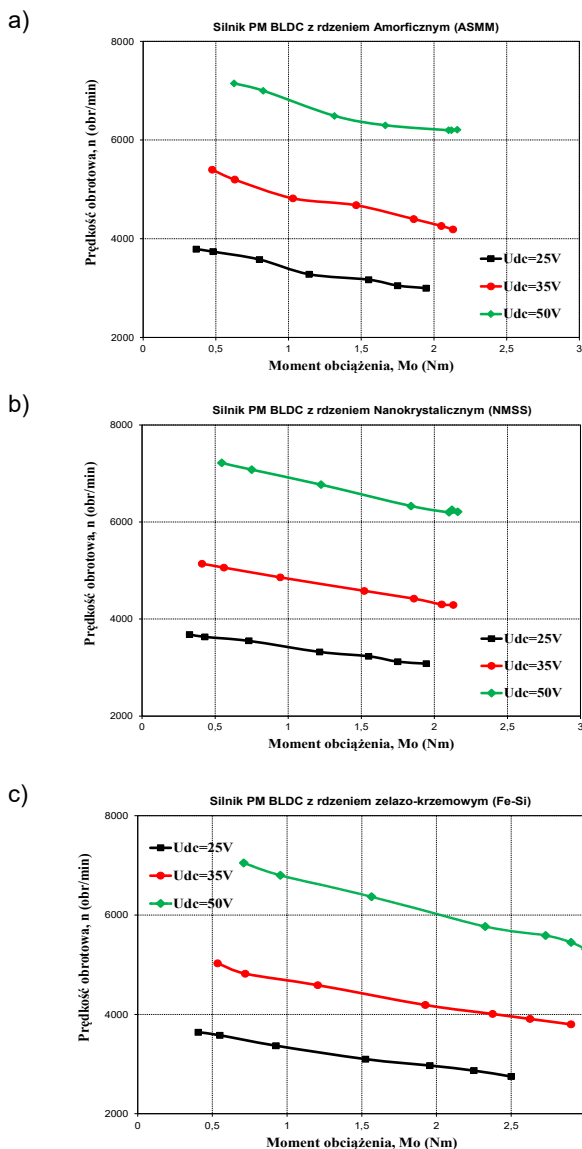
Rys.9. Charakterystyki nieobciążonych prototypów silników PM BLDC: a) $P_{DC} = f(n)$; b) $P_{DC} = f(t)$

Zarejestrowane przebiegi jednego sygnału hallotronu, napięcia i prądu silnika dla prędkości obrotowej 7 802 obr/min i niewielkiego obciążenia przedstawiono na rysunku 10.



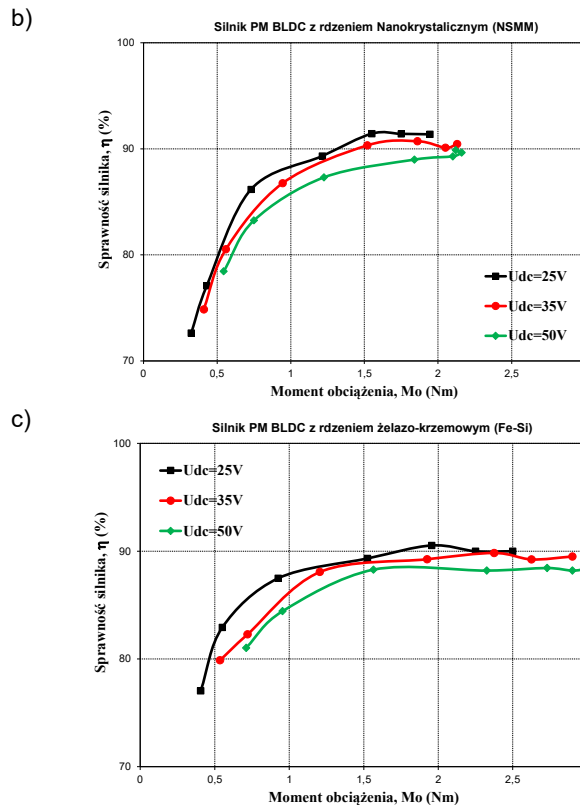
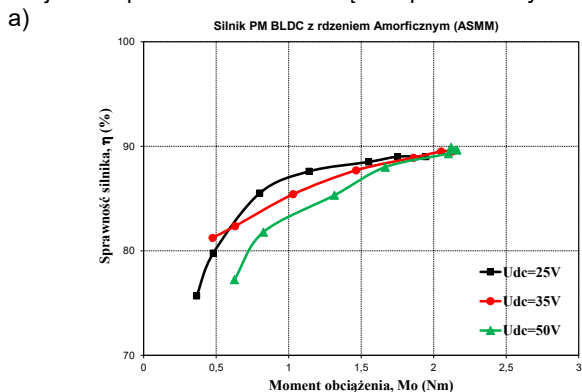
Rys.10. Przebiegi obciążonego silnika ASMM zarejestrowane przy prędkości 7 802 obr/min gdzie: 1) sygnał z czujnika Halla; 2) prąd fazowy silnika; 3) napięcie fazowe; 4) napięcie na rezystorze obciążającym

Charakterystyki obciążeniowe przedstawiono na rys.11, a na rys.12 charakterystyki sprawności silników. Uzyskane wyniki potwierdziły, że silniki wykonane z materiałów magnetycznie miękkich zachowują się inaczej niż silnik z rdzeniem wykonanym z blachy żelazo-krzemowej. Dla tych samych warunków zasilania i obciążenia silnik z rdzeniem Fe-Si obciąża się bardziej niż pozostałe dwa badane silniki (rys.11c). Świadczy to o występowaniu większych strat związanych z prędkością obrotową (częstotliwością) i wartością prądu płynącego przez uzwojenia silnika. Sprawność uzyskano na poziomie 90% dla badanych silników i były zgodne wartościami jakie otrzymano korzystając z symulacji komputerowej [15].



Rys.11. Ch-ki obciążeniowe silników: $n=f(M_o)$: a) ASMM; b) NSMM, c) Fe-Si

Przedstawione wyniki badań należy traktować jako wyniki ilościowe. W trakcie pomiarów obciążeniowych zaobserwowano, że każdy z silników, w trakcie cyklu pomiarowego, zachowywał się inaczej. Akustyka dźwięków, wibracje przy różnych prędkościach obrotowych mogą świadczyć, że w każdy z silników należy rozpatrzyć niezależnie (mimo tej samej konstrukcji). Dlatego postanowiono powtórzyć pomiary, w których silniki będą badane z tym samym wirnikiem - wirnik, wraz z łożyskami i czujnikiem położenia wirnika - będzie przekładany.



Rys.12. Ch-ki sprawności silników: $\eta=f(M_o)$: a) ASMM; b) NSMM, c) Fe-Si

Podsumowanie. Uwagi końcowe

W pracy przedstawiono zagadnienia związane z technologią wykonywania materiału magnetycznie miękkiego na rdzenie silników na przykładzie bezszczotkowego silnika prądu stałego (PM BLDC).

Przedstawione wyniki potwierdziły wyższość materiałów magnetycznie miękkich nad tradycyjnymi materiałami żelazo-krzemowymi. Straty nieobciążonych silników (straty jałowe) dla rdzeni wykonanych z materiałów amorficznych ASMM i nanokrystalicznych (NSMM) są o około 40% mniejsze niż w przypadku rdzenia Fe-Si przy prędkości obrotowej $n = 5000$ obr/min. Stosunek ten zmniejsza się wraz z prędkością obrotową oraz spadkiem częstotliwości pola magnetycznego.

Badania obciążeniowe potwierdziły, że silniki z rdzeniem wykonanym z materiałów magnetycznie miękkich wykazują mniejszą podatność charakterystyki obciążeniowej pod wpływem obciążenia.

Uzyskane wyniki planuje się zweryfikować przez zmianę sposobu prowadzenia badań. Badania zostaną powtórzone dla wszystkich silników z tym samym wirnikiem. Takie podejście pozwoli autorom określić, w jakim stopniu straty tarcia o powietrze, kondycja łożysk i inne czynniki związane z konstrukcją wirnika wpływają na uzyskane wyniki.

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-Institut 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 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.Hetmancyk@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, pp. 19-22.
- [3] Kolano-Burian A., Red., Innowacyjne materiały do zastosowań w energooszczędnych i proekologicznych urządzeniach elektrycznych. ul. Sobińskiego 5, 44-100 Gliwice: *Institut Metali Nieżelaznych*, 2015.
- [4] Krishnan R., Electric Motor Drives, Modelling, Analysis and Control, *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, NJ 2001
- [5] Krykowski K., Silniki PM BLDC właściwości, sterowanie, aplikacje, *Wydawnictwo BTC*, Legionowo 2015
- [6] Wach, P., Dynamics and Control of Electrical Drives, *Springer* 2021.
- [7] 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
- [8] 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.
- [9] Wolnik T. Materiały magnetyczne miękkie wykorzystywane w magnetowodach silników tarczowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 92, nr 7/2016, pp. 149-155.
- [10] Krykowski K., Gałuszkiewicz Z., Gałuszkiewicz P., Hetmańczyk J., Całus D., High-speed permanent magnet brushless DC motors, properties and prospective applications, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 95, nr 8/2019, pp. 139-145.
- [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 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.
- [13] Goryca Z., Korkosz M., Mazur D., Rossa R., Ziótek M., Przydatność wybranych programów polowych do obliczania momentu zaczepowego wielobiegunowej maszyny z magnesami trwałymi, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, Nr 3/2014 (103), pp.179- 183
- [14] 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
- [15] 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>