

Napęd mieszadła z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego

Streszczenie. W pracy przedstawiono konstrukcję i wybrane wyniki badań bezszczotkowego silnika prądu stałego z magnesami trwałymi przeznaczonego do napędu przemysłowego mieszadła granulatu tworzyw sztucznych. Obliczenia obwodu magnetycznego silnika przeprowadzono w programie FEMM 4.2. Do budowy stojana silnika wykorzystano typowe blachy o symbolu 100D, zaś wirnik wykonano w postaci stalowego walca, na którym przyklejono neodymowe magnesy segmentowe. W silniku zastosowano optyczne czujniki położenia wirnika przystawiane wirującą przystoną. Silnik zasilany jest z niskonapięciowego falownika zbudowanego na bazie specjalizowanego układu sterowania. Wymagany w mieszadle duży moment obrotowy uzyskano przez zastosowanie przekładni ślimakowej o przełożeniu 25:1.

Abstract. The paper presents the construction and chosen testing results of DC brushless motor used to drive industrial stirrer. The FEMM 4.2. has been used to perform calculations for magnetic circuit of the motor. The stator of the motor has been made of the steel sheets 100D and the rotor has been made of steel cylinder with neodymium magnets being glued. The motor is fitted with optic position sensors shielded by shutter. The motor is supplied by low voltage converter based on special integrated circuit. High torque required has been obtained using worm gear of the ratio 25:1. (The driver of DC brushless motor for the stirrer).

Słowa kluczowe: bezszczotkowy silnik prądu stałego.

Keywords: brushless DC motor.

Wstęp

W maszynach produkujących granulaty tworzyw sztucznych, w końcowej fazie produkcji, używa się mieszadeł rozdrabniających bryły zlepiającego się granulatu. W mieszadłach tych stosuje się dotychczas silniki komutatorowe prądu stałego zasilane z napięcia o poziomie 24 V. Silniki te pracujące w sposób ciągły wymagają częstego serwisowania związanego z wymianą szczotek oraz przeglądem komutatora, a serwisowanie takie wymaga zatrzymania procesu produkcji. Poniższy artykuł pokazuje konstrukcję silnika, który może być serwisowany znacznie rzadziej, a jego trwałość jest ograniczona praktycznie trwałością użytych łożysk. Silniki tego typu (bezczotkowe) mają wysoką sprawność [1], [3], [5], [6] szeroki zakres zmian prędkości obrotowej [2], [4], [7], [8], [9] oraz dużą trwałość. Ponadto charakteryzują się cichą pracą oraz ze względu na brak iskrzenia możliwością pracy w atmosferach zagrożonych wybuchem. Z uwagi na najlepszy stosunek mocy do masy są chętnie wykorzystywane w pojazdach o napędzie hybrydowym lub elektrycznym.

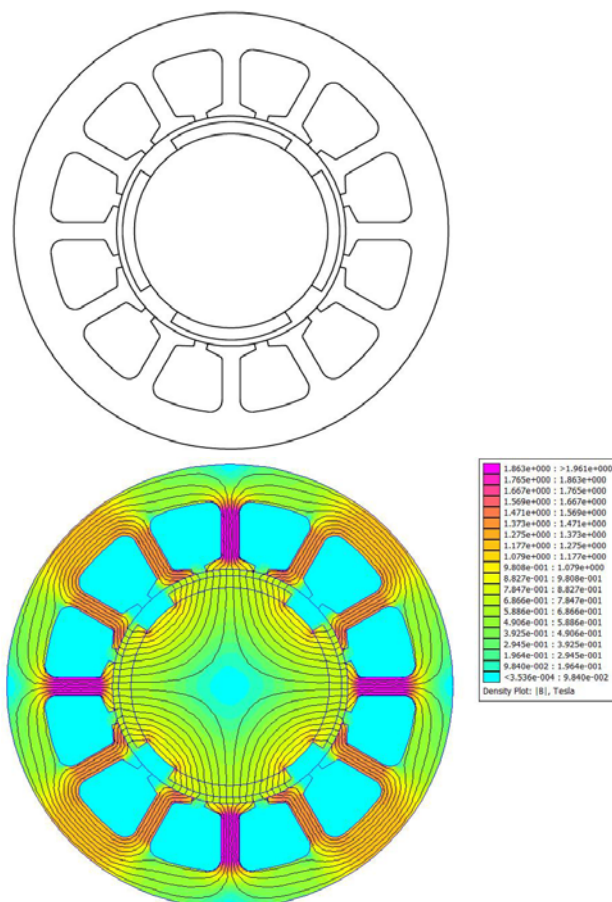
Założenia konstrukcyjne

Przy projektowaniu silnika założono wykorzystanie seryjnych blach stojana o symbolu 100D oraz użycie wysokoenergetycznych magnesów neodymowych o wysokiej temperaturze pracy (magnesy N38UH). Ze względu na duże zapylenie przy procesie mieszania zastosowano szczelną obudowę silnika. Do określania położenia wirnika względem stojana wykorzystano sprawdzone, optyczne czujniki położenia przesłaniane wirującą tarczą umieszczoną na wale wirnika. Mocowanie silnika i wałek przystosowano do współpracy z istniejącą przekładnią ślimakową. Przyjęto także podstawowe parametry silnika: moc 120 W, prędkość obrotową 3000 obr/min. oraz napięcie zasilania 24 V.

Konstrukcja i działanie napędu

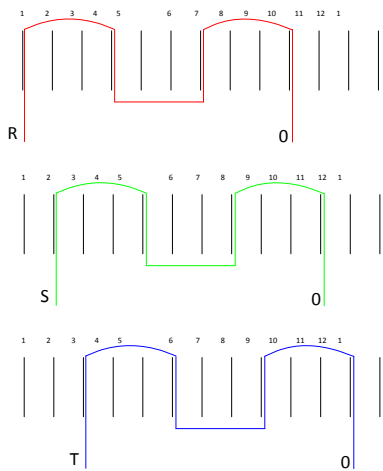
W skład nowego układu napędowego wchodzi bezszczotkowy silnik prądu stałego z magnesami trwałymi i niskonapięciowy, trójfazowy falownik wyposażony w tranzystory CMOS. Obliczenia obwodu magnetycznego silnika przeprowadzono w ostatnio zmodyfikowanym programie FEMM 4.2. Na rysunku 1 pokazano obwód magnetyczny zaprojektowanego silnika i przykładowy rozkład pola magnetycznego w wybranym położeniu

wirnika. Średnica zewnętrzna blach stojana wynosi 80 mm, szerokość jarzma 8 mm, szerokość zęba 4,5 mm, zaś średnica wewnętrzna stojana to 40 mm. Szczelina powietrzna ma szerokość 1 mm. Na wirniku naklejo cztery magnesy neodymowe typu N38UH zajmujące 75 % podziałki biegunowej. Magnesy mają wysokość 1,5 mm. Rysunki nr 3 i 4 przedstawiają wewnętrzną konstrukcję silnika, zaś rysunek 5 optyczne czujniki położenia wirnika.



Rys. 1. Obwód magnetyczny nowego silnika i przykładowy rozkład pola magnetycznego

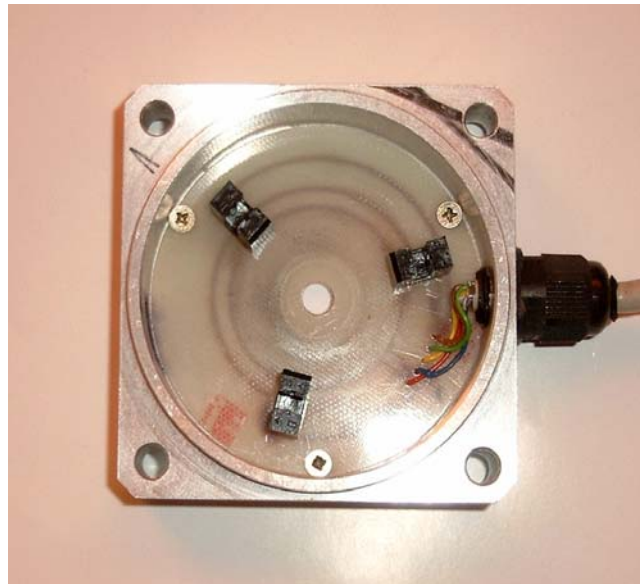
Na podstawie założonych parametrów silnika i opracowanego obwodu magnetycznego obliczono liczbę zwojów i średnicę drutu nawojowego jednowarstwowego uzwojenia, którego schemat pokazuje rysunek nr 2.



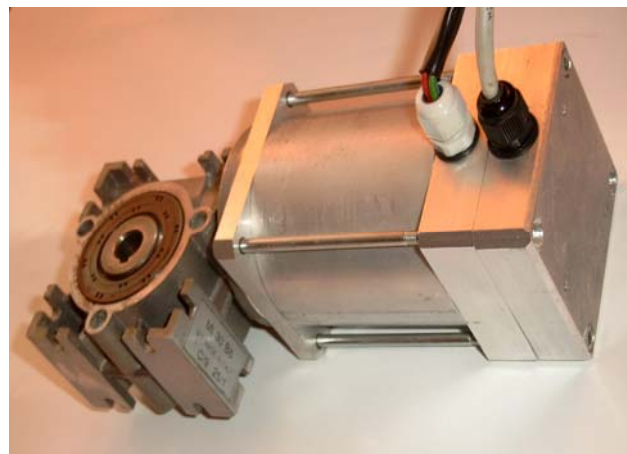
Rys. 2. Schemat uzwojenia silnika



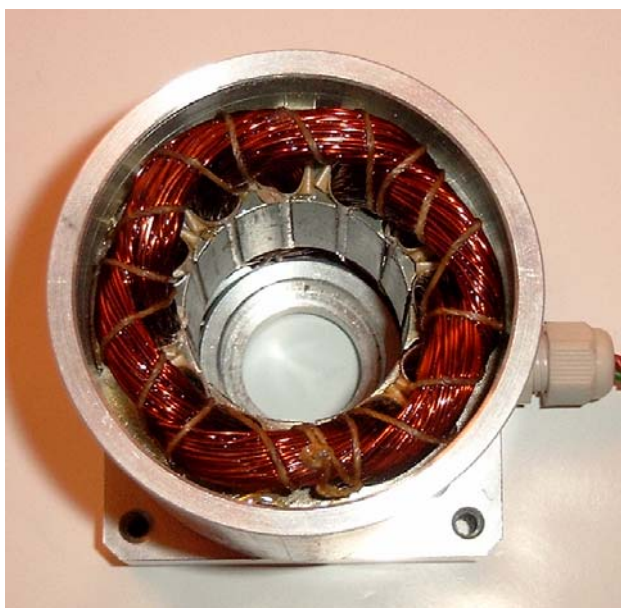
Rys. 3. Wirnik z naklejonymi magnesami segmentowymi



Rys. 5. Optyczne czujniki położenia wirnika



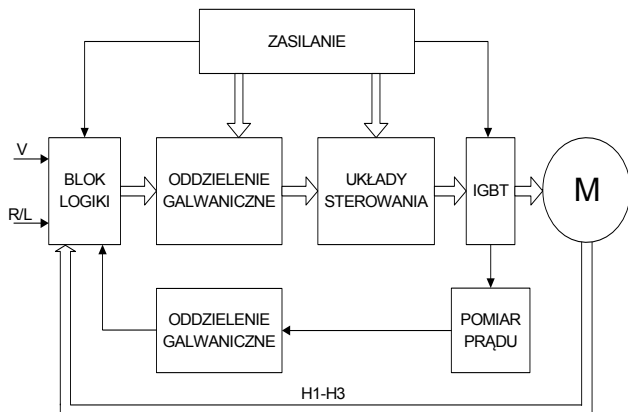
Rys. 6. Napęd mieszadła – silnik z przekładnią



Rys. 3. Uzwojony stojan silnika

W wielu współczesnych napędach z silnikami BLDC stosuje się układy sterowania pozbawione czujników [10], [11], [12], [13], [14]. Układy te bazują na ogół na pomiarze napięcia w aktualnie niezasilanym paśmie uzwojenia, a dokładniej mówiąc na pomiarze przejścia przez zero napięcia rotacji powstającego w niezasilanym paśmie [15], [16], [17]. W takim przypadku przy rozruchu silnika należy stosować specjalne algorytmy gdyż napięcie rotacji w chwili włączenia nieruchomego silnika jest równe zero. Bezczujnikowe układy sterowania są tańsze niż układy z czujnikami i mają mniejszą liczbę połączeń silnika z układem sterowania. Ich wadą jest jednak mały moment rozruchowy napędu i dlatego są one powszechnie używane gdy moment obciążenia przy rozruchu jest mały na przykład w pompach i wentylatorach. W omawianym zastosowaniu napędu – mieszadle granulatu występuje duży, początkowy moment oporowy i w takich przypadkach powszechnie stosuje się metody sterowania z użyciem czujników położenia wirnika [4], [7], [9]. Współpracujący z silnikiem falownik wykorzystuje informację o położeniu wirnika względem stojana uzyskiwaną z optycznych czujników pokazanych na rysunku 5. Czujniki optyczne są dokładniejsze niż czujniki Halla i są odporne na zakłócenia elektromagnetyczne pochodzące od dużych prądów płynących w uzwojeniach silnika (np. przy nawrocie silnika). Zbudowany na tranzystorach VMOS niskonapięciowy falownik umożliwia płynną regulację prędkości obrotowej

silnika, zmianę kierunku wirowania i szybkie hamowanie. W przypadku utraty informacji z czujników położenia tranzystory falownika są blokowane i następuje wyłączenie silnika. Pomiar prądu pobieranego przez silnik umożliwia ochronę tranzystorów maci falownika oraz regulację tego prądu przy rozruchu i przeciążeniach silnika. Na rysunku 7 pokazano schemat blokowy klasycznego układu sterowania wykorzystujący informację z czujników położenia zaś na rysunku 8 widok wykonanego układu.



Rys. 7. Struktura klasycznego układu sterowania z czujnikami położenia

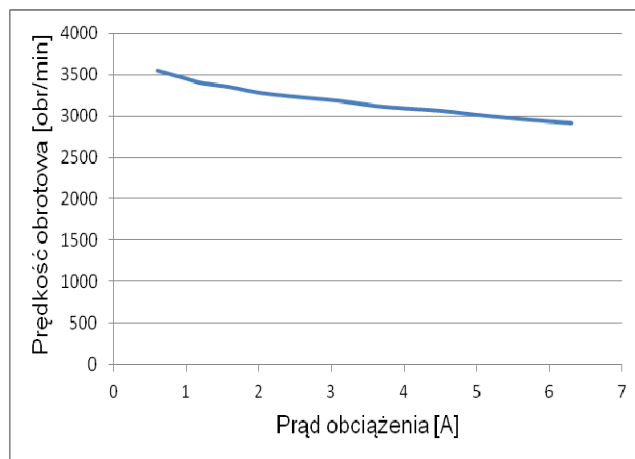


Rys. 8. Prototypowy falownik zasilający silnik

Badania silnika

Badania silnika obejmowały wyznaczenie jego charakterystyki mechanicznej, sprawdzenie zakresu regulacji prędkości obrotowej, próbę nagrzewania oraz sprawdzenie funkcji falownika – zmiany kierunku wirowania silnika i hamowania. Badany silnik obciążony był niewielką prądnicą prądu stałego, a z uwagi na brak momentomierza o odpowiednio małym zakresie prędkości obrotowa mierzona była w funkcji prądu obciążenia. Tak wyznaczoną zależność pokazano na rysunku 9. Zakres regulacji prędkości obrotowej silnika sprawdzano w warunkach przemysłowych – z obciążeniem silnika typowym mieszadłem. W tych warunkach prędkość obrotową silnika można regulować w zakresie od 60 do 2950 obr/min. Przy odpowiednio wydajnym źródle zasilania (powyżej 12 A) możliwy jest nawrót silnika przy znamionowej prędkości obrotowej. Przy mniejszej wydajności prądowej zasilacza następuje jego przeciążenie, spadek napięcia zasilania i

wyłączenie silnika. Po włączeniu sygnału hamowania następuje zwarcie uzwojenia silnika przez górne tranzystory falownika i dynamiczne hamowanie silnika. Po włączeniu tego sygnału silnik zatrzymuje się w czasie poniżej 0,1 s.



Rys. 9. Zależność prędkości obrotowej od prądu obciążenia silnika

Próbie nagrzewania silnika przeprowadzono przy obciążeniu mieszadłem i pracy silnika w czasie dwóch godzin. Przyrost temperatury uzwojenia wyznaczono na podstawie pomiaru rezystancji czujnika umieszczonego w uzwojeniu. Przyrost ten wyniósł 57,4^oK. Należy podkreślić, że przyrost temperatury współpracującej z silnikiem przekładni ślimakowej był wyższy i następowało grzanie silnika od przekładni. Badania napędu na typowym mieszadle wykazały jego pełną przydatność. Zmierzony podczas procesu mieszania prąd wahał się w zakresie od 4,8 A do 5,4 A.

Wnioski

Zainteresowanie napędami małej mocy z bezszczotkowymi silnikami prądu stałego stale rośnie głównie za sprawą wzrostu cen energii elektrycznej. Wysoka sprawność tych silników w porównaniu z silnikami asynchronicznymi czy komutatorowymi powoduje, że przy długotrwałej eksploatacji oszczędzamy energię i napędy wyposażone w silniki bezszczotkowe są konkurencyjne cenowo w stosunku do innych rozwiązań. W przypadku silników wyposażonych w czujniki położenia układ sterujący może być wykonany w oparciu o specjalizowane układy co upraszcza jego konstrukcję, zmniejsza cenę i poprawia niezawodność. Opracowany układ napędowy jest niewiele droższy od dotychczas stosowanych silników komutatorowych z przekładnią, a zapewnia znacznie dłuższy okres bezserwisowej pracy oraz mniejsze zużycie energii. Pełny zakres regulacji prędkości obrotowej pozwala dostosować prędkość mieszania do wielkości i masy granulatu, a niskie napięcie zasilania umożliwia pracę mieszadła w przypadku awarii sieci energetycznej. Można wówczas zasilać silnik z akumulatorów i nie przerywać procesu mieszania. Niskie napięcie zasilania sprzyja także poprawie bezpieczeństwa obsługi. Opracowany układ napędowy może mieć wiele zastosowań np. w podajnikach paliwa stałego w piecach centralnego ogrzewania, w niewielkich podajnikach technologicznych, w małych pompach i wentylatorach itp. Obecnie trwają prace dotyczące adaptacji tego silnika do napędu wentylatorów oddymiających klatki schodowe i drogi ewakuacji podczas pożaru budynków.

Autorzy: dr hab. inż. Zbigniew Goryca prof. PŚk, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki, Aleja 1000-lecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: zgoryca@tu.kielce.pl, tel.: 601-25-05-30.

LITERATURA

- [1] Glinka T., *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [2] Goryca Z., Bojarczak P.: *Manner of controlling of three-winding brushless motor*, Forth International Conference Unconventional Electromechanical and Electrical Systems, St.Petersburg, Russia, June 21-24, 1999.
- [3] Goryca Z.: *Niskonapięciowy układ napędowy z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego*, X Konferencja „Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych”, Ustroń 28-30 maj, 2003, s. 59-61.
- [4] Goryca Z., Bojarczak P.: *Driving system of electric wheelchair*, International XIV Symposium Micromachines & Servodrives, Tuczno, Poland, 12 – 16.09.2004.
- [5] Goryca Z.: *Niskonapięciowy, wolnoobrotowy napęd z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego*, XV Konferencja „Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych”, Ustroń 17-19 maj, 2006.
- [6] Goryca Z.: *Bezczotkowe silniki prądu stałego – konstrukcje i sterowanie*, AUTOMATYKA, ELEKTRYKA, ZAKŁÓCENIA [ISSN 2082-4149] nr 13, 2013 r.7.
- [7] Krykowski K., *Silnik PM BLDC w napędzie elektrycznym analiza, właściwości, modelowanie*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
- [8] Wiśniewski J., Koczara W., Dobroń P., *Analiza momentu rozruchowego silnika z magnesami trwałymi przy zastosowaniu metody HPI*. Przegląd Elektrotechniczny nr 2/2010, s. 77-81.
- [9] Zawirski K., *Sterowanie silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005.
- [10] Chen H., Liaw C., *Current-mode control for sensorless BLDC drive with intelligent commutation tuning*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, No 5, 2002, p. 747-756.
- [11] Goryca Z., Pakosz A.: *Bezczotkowe sterowanie bezszczotkowego silnika prądu stałego*, Przegląd Elektrotechniczny nr 6, 2008, s. 172-174.
- [12] Park B.G., Kim T.S., Ryu J.S., Huyn D.S., *Fuzzy back EMF observer for improving performance of sensor less brushless DC motor drive*, Power Electronics Conference and Exposition 2006, APEC 06, p. 674-678.
- [13] Siostrzonek T., *Bezczotkowy układ napędowy z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego z magnesami trwałymi sterowany systemem proporcjonalnym do momentu*, Rozprawa doktorska, AGH, Kraków, 2008.
- [14] Wiśniewski J., Koczara W., Dobroń P., *Analiza momentu rozruchowego silnika z magnesami trwałymi przy zastosowaniu metody HPI*. Przegląd Elektrotechniczny nr 2/2010, s. 77-81.
- [15] Bilal A., Manish B., *Sensorless Trapezoidal Control of BLDC Motors*, Application Report Texas Instruments, September 2015, <http://www.ti.com/lit/an/sprabq7a/sprabq7a.pdf>, (2016.08.10).
- [16] Su G.J., McKeever J.W. *Low-Cost Sensorless Control of brushless dc Motors with Improved Speed Range*, <http://web.ornl.gov/~webworks/cppri/y2001/pres/112957.pdf> (2016.08.12).
- [17] AN1160, *Sensorless BLDC Control with Back-EMF Filtering Using a Majority Function*, <http://www1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01160A.pdf> (2016.08.14).