

Konstrukcja i badania eksperymentalne silnika reluktancyjnego 3D z ultralekkim biegnikiem wykonanym z waty ferromagnetycznej

Construction and experimental research 3D reluctance stepper with ultralightweight runner made of ferromagnetic wool

Streszczenie. Przedstawiono budowę silnika reluktancyjnego 3D z ultralekkim biegnikiem wykonanym z waty ferromagnetycznej wraz z układem jego zasilania i sterowania. Silnik został wykonany w technologii druku 3D. Przeprowadzono badania eksperymentalne, potwierdzające możliwość realizacji szerokiego wachlarza różnych trajektorii „odcinkowych”, „przekątniowych” i „odcinkowo-przekątniowych” w kartezjańskim układzie współrzędnych XYZ.

Abstract. The construction of a 3D reluctance motor with an ultralight runner made of ferromagnetic wool along with its power supply and control system is presented. The motor was made in 3D printing technology. Experimental studies were carried out, confirming the possibility of implementing a wide range of different "segmental", "diagonal" and "segmental-diagonal" trajectories in the XYZ Cartesian coordinate system.

Słowa kluczowe: silnik reluktancyjny 3D z ultralekkim biegnikiem, kartezjańska przestrzeń robocza, wata ferromagnetyczna, technologia druku 3D.

Keywords: reluctance motor with ultralightweight runner, Cartesian workspace, ferromagnetic wool, 3D printing technology.

Rozdział 1 Wstęp

Postęp w dziedzinie wytwarzania przetworników elektromechanicznych, zwłaszcza tych o budowie niekonwencjonalnej, w znacznym stopniu dokonuje się dzięki wykorzystaniu nowych materiałów konstrukcyjnych, w szczególności nowych materiałów magnetycznych oraz dzięki zaangażowaniu do ich wytwarzania metod szybkiego prototypowania, przede wszystkim technologii druku 3D [1,7,8,9]. Celowe jest podejmowanie w powyższym zakresie prac rozpoznawczych oraz prac o charakterze studialnym, ukierunkowanych na określenie możliwości nowych technologii, jak też na badania właściwości nowych nietypowych materiałów oraz ich zachowań w polu magnetycznym.

Nurt ten jest przedmiotem zainteresowań grupy badawczej Infotronika i Elektromobilność na Wydziale Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej i skutkowało rozpoznaniem możliwości wykorzystania cieczy magnetoreologicznych w sprzęgłach tarczowych [2,3,4,5] oraz opracowaniem własnej laboratoryjnej metody wytwarzania proszków ferromagnetycznych [10] i elastycznych materiałów o właściwościach magnetycznych [11]. Podjęto też badania ukierunkowane na określenie możliwości sterowania swobodną chmurą proszku ferromagnetycznego oraz skrawkami magnetycznych elastomerów w elektromagnetycznej komorze 3D o wymiarach 10x10x10 mm [11]. Uzyskane wyniki potwierdziły celowość kontynuacji powyższych badań.

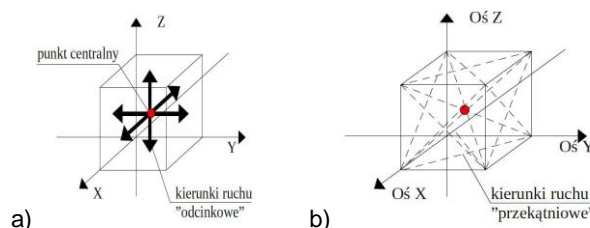
W niniejszej pracy jest przedstawiony projekt i konstrukcja silnika reluktancyjnego 3D, którego biegnik porusza się w kartezjańskiej przestrzeni roboczej o wymiarach 80x80x80 mm. Biegnik został wykonany z waty ferromagnetycznej, co uzasadnia określenie go mianem biegnika ultralekiego. Wełna stalowa jest materiałem ferromagnetycznym, który składa się z bardzo drobno splecionych cienkich nitki stali. Producentem wełny stalowej jest m.in. firma DREL działająca w Polsce. Gęstość materiału jest niewielka i zależy od stopnia upakowania włókien (mieści się

w granicach 0,04 – 0,1 g/cm³). Wełna wykazuje dobre właściwości magnetyczne, dzięki czemu można z niej formować kłęбки, będące odpowiednikami ferromagnetycznych zębów, czy też wydatnych biegunów w konwencjonalnych maszynach reluktancyjnych (synchronicznych lub skokowych).

Tak, jak w przypadku prototypu komory 3D opisanej w [11], przyjęto, że korpus, na którym zostaną umieszczone wzbudniki silnika reluktancyjnego, musi być w całości wykonany z filamentu w technologii druku 3D. Takie samo założenie przyjęto w stosunku do ultralekiego biegnika: jego stelaż jest złożony z bardzo lekkich, odpowiednio dopasowanych, elementów drukowanych.

Ultralekki biegnik ma możliwość wykonywania w kartezjańskiej przestrzeni roboczej skoków w trzech wzajemnie prostopadłych osiach XYZ tak, jak to przedstawiono na rysunku 1a.

Podjęto również próby sterowania przemieszczaniem się biegnika wzdłuż trajektorii „przekątniowych”, pokazanych na rysunku 1b, a więc takich, przy pokonywaniu których biegnik przeskakuje pomiędzy wzbudnikami z pominięciem punktu centralnego (bez zmiany orientacji przestrzennej).

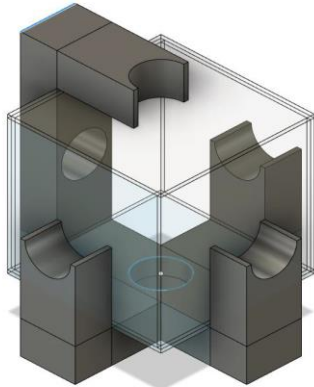


Rys.1. Trajektorie liniowych ruchów biegnika w kartezjańskim układzie współrzędnych XYZ a) "odcinkowych" b) "przekątniowych" z pominięciem punktu centralnego

Siła powodująca ruch biegnika jest siłą reluktancyjną, będącą wynikiem oddziaływania pola magnetycznego wzbudnika na umieszczony naprzeciwko niej kłębek waty ferromagnetycznej. Zawieszenie biegnika zostało zrealizowane w sposób mechaniczny za pomocą zespołu gumek. W przyszłości przewiduje się wykorzystanie do tego celu zjawiska lewitacji magnetycznej.

Rozdział 2 Projekt i wykonanie reluktancyjnego silnika 3D w technologii druku 3D

Aby umożliwić realizację trajektorii „odcinkowych”, przedstawionych na rysunku 1a oraz trajektorii „przekątniowych”, uwidocznionych na rysunku 1b, silnik wyposażono w 6 jednakowych wzbudników. Na każdą oś kartezjańskiego układu współrzędnych przypadają 2 wzbudniki, które pozwalają na wykonywanie następujących ruchów biegnika: ruch do przodu i do tyłu (oś X), ruch w lewo i w prawo (oś Y) oraz ruch do góry i do dołu (oś Z). Na podstawie wstępnych obliczeń magnetycznych dobrano jako wzbudniki tzw. elektromagnesy trzymające liniowo o znamionowym napięciu zasilania 12V-DC, które są powszechnie stosowane w układach zabezpieczeń. Ich wymiary geometryczne to: średnica 25 mm i długość 20 mm, zaś siła trzymania (siła nośna) – 3 kG. Uwzględniając przyjęte założenia oraz biorąc pod uwagę wyniki wstępnych obliczeń magnetycznych, opracowano wizualizację korpusu silnika 3D w programie Fusion 360, uwidocznioną na rysunku 2a oraz dokonano kilka próbnych monolitycznych wydruków korpusu z filamentu PLA. Aby ułatwić montaż wzbudników zdecydowano się ostatecznie na konstrukcję 2-częściową (przedstawioną na rysunku 2b), złożoną z dwóch oddzielnych fragmentów: górnego i dolnego, połączonych ze sobą na wcisk.



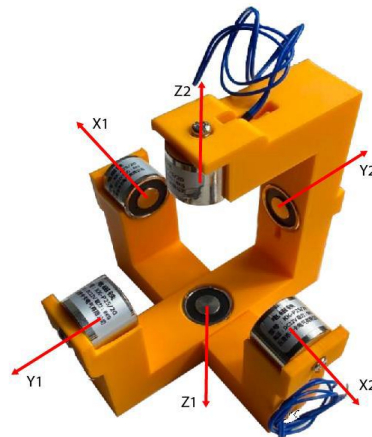
a)



b)

Rys.2. Budowa korpusu silnika reluktancyjnego 3D
a) wizualizacja korpusu z uwidocznioną przestrzenią roboczą
b) fragmenty korpusu: dolny i górny, wykonane w technologii druku 3D

Wzbudniki są mocowane do korpusu za pomocą śrub M4. Wygląd korpusu ze wzbudnikami z naniesionymi oznaczeniami poszczególnych 6-wzbudników: X1 X2, Y1 Y2 i Z1 Z2 pokazano na rysunku 3. Całkowita masa korpusu wraz ze wzbudnikami wynosi 488 g, zaś masa samych elementów drukowanych to 164 g.

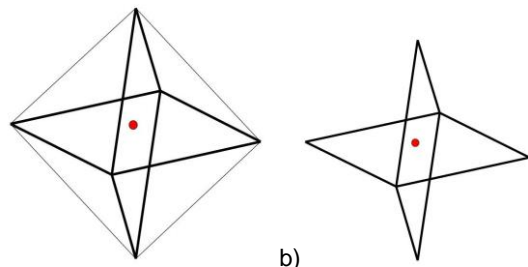


Rys.3. Korpus reluktancyjnego silnika 3D z zamontowanymi wzbudnikami i oznaczeniami wzbudników X1 X2, Y1 Y2 i Z1 Z2

Rozdział 3 Projekt i wykonanie ultralekkiego biegnika reluktancyjnego

Jak wspomniano, siła reluktancyjna wywołująca ruch biegnika jest wynikiem oddziaływania pola magnetycznego wzbudników na kłębki waty ferromagnetycznej. Biorąc pod uwagę łatwość formowania kłębków poprzez nawijanie kolejnych pasm waty stalowej, jak też i to, w jaki sposób muszą one być rozmieszczone w obrębie kartezjańskiej przestrzeni roboczej względem wzbudników (rys. 3), zdecydowano się na biegnik w kształcie ośmiościanu foremnego (oktaedru), zawierającego 8 trójkątów i 6 wierzchołków (rys. 4a). W przestrzeni roboczej komory wierzchołki ośmiościanu z nawiniętymi pasmami waty stalowej muszą być tak zorientowane, aby wierzchołki ośmiościanu znalazły się naprzeciwko wzbudników.

Ośmiościan foremny (oktaedr) posiada 12-krawędzi. Aby uczynić stelaż biegnika lżejszym, a jego konstrukcję prostszą do wykonania w technologii druku 3D, postanowiono zrezygnować z 4-krawędzi (rys. 4b), dzięki czemu możliwe stało się złożenie biegnika z dwóch jednakowych prostokątnych ramek pokazanych na rysunku 5a.

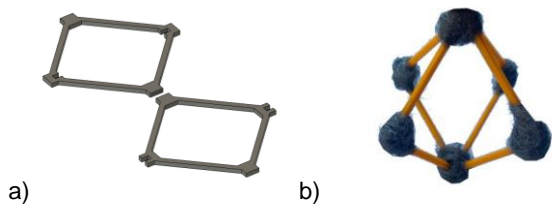


a)

b)

Rys.4. koncepcja ultralekkiego wirnika reluktancyjnego,
a) ośmiościan foremny, na bazie którego opracowano kształt biegnika b) ośmiościan z usuniętymi 4 krawędziami

Złożone ramki tworzą wielościan, wokół narożników którego zostały nawinięte pasma waty stalowej, tworzące 6 magnetycznych kłębków-biegunów (wielkość kłębków dobrano w sposób eksperymentalny). Gotowy biegnik z nawiniętymi ferromagnetycznymi kłębkami przedstawia rysunek 5b.

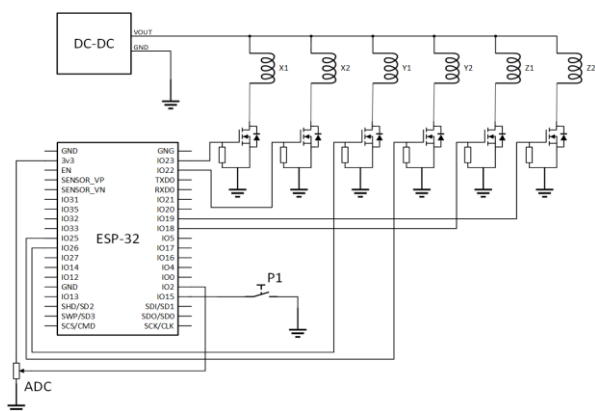


Rys.5. Budowa ultralekkiego wirnika reluktancyjnego
a) ramki biegnika wykonane w technologii druku 3D b) złożony biegnik z kłębkami waty ferromagnetycznej nawiniętymi wokół wierzchołków stelaża

Jego masa wynosi 3,8 g, przy czym masa samych kłębków ferromagnetycznych to 3 g. Masa biegnika w stosunku do masy komory elektromagnetycznej ze wzbudnikami to zaledwie 0,7 %, co uzasadnia użycie terminu: ultralekki biegnik.

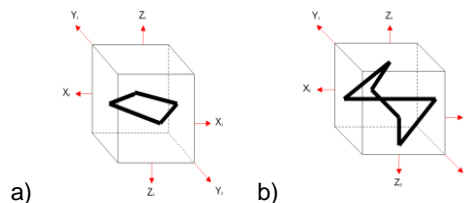
Rozdział 4 Projekt i wykonanie układu zasilania i układu sterowania silnikiem reluktancyjnym 3D

Zespół 6 wzbudników jest zasilany z przetwornicy DC-DC Step, pozwalającej na płynną regulację napięcia poprzez 6 tranzystorów MOSFET. Bramkami tranzystorów steruje mikrokontroler ESP-32. Sygnały sterujące z mikrokontrolera są podawane na tranzystory poprzez transoptory, zapewniające galwaniczną separację obwodu sterowania od obwodu zasilania (obwodu mocy). Opracowano algorytm sterowania, uwzględniający szeroką gamę różnych trajektorii, które są wywoływane za pomocą odpowiedniego przycisku. Algorytm został napisany w środowisku programistycznym Visual Studio Code z zainstalowaną nakładką PlatformIO, dzięki czemu możliwe jest kompilowanie i wgranie programu do dowolnego mikrokontrolera. Strukturę układu sterowania przedstawia rysunek 6. Przycisk P1 umożliwia wybór pożądanej trajektorii, a potencjometr ADC pozwala na płynną nastawę częstotliwości poruszania się biegnika po zadanej trajektorii.



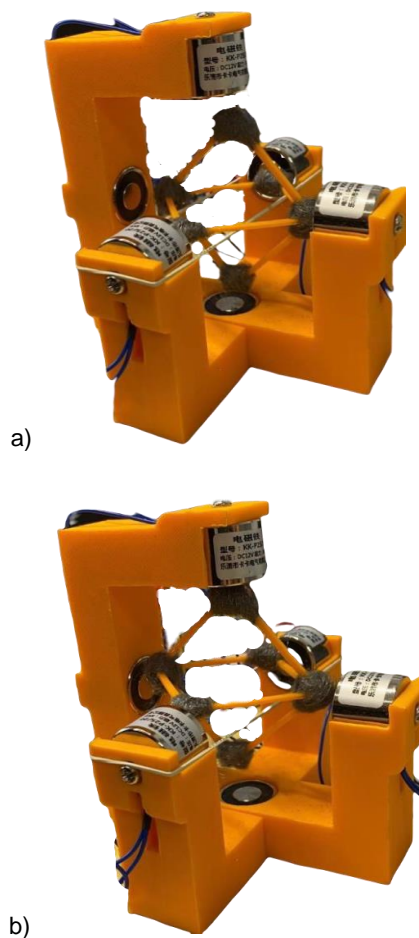
Rys.6. Schemat mikroprocesorowego układu sterowania silnikiem reluktancyjnym z ultralekkim biegnikiem

Testy, związane z określeniem możliwości sterowania ultralekkim biegnikiem reluktancyjnym wykonanym z waty ferromagnetycznej, przeprowadzono dla szerokiego wachlarza trajektorii, poczynając od prostych trajektorii „odcinkowych” i „przekątniowych” przedstawionych na rysunku 1a i 1b, skończąc na złożonych zamkniętych trajektoriach „odcinkowo-przekątniowych”, przyjmujących przykładowo postać kwadratu (rys. 7a), czy też przestrzennej ósemki (rys. 7b).



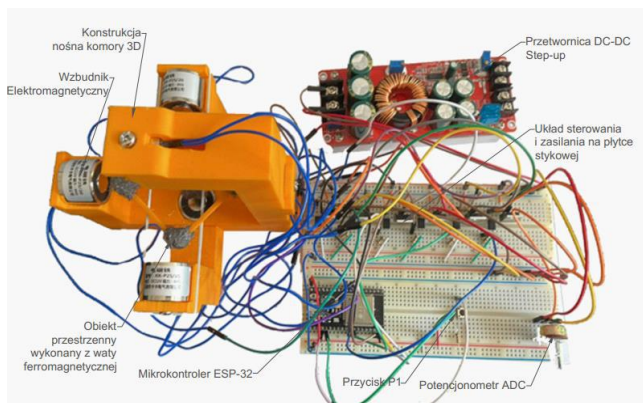
Rys.7. Przykładowe zamknięte trajektorie ruchu biegnika
a) trajektoria „przekątniowa” w postaci kwadratu w płaszczyźnie XY b) trajektoria „odcinkowo-przekątniowa” w postaci ósemki w przestrzeni XYZ

Przykładowe zdjęcia, pokazujące pozycjonowanie biegnika przez aktywowany wzbudnik Y1 oraz przez aktywowany wzbudnik Z2 są przedstawione odpowiednio na rysunkach 8a i 8b.



Rys.8. Sterowanie przemieszczaniem się ultralekkiego biegnika z wata ferromagnetyczną w obrębie kartezjańskiej przestrzeni roboczej a) biegnik pozycjonowany za pomocą wzbudnika Y1 b) biegnik pozycjonowany za pomocą wzbudnika Z2

Na rysunku 9 widoczne jest zdjęcie silnika reluktancyjnego 3D wraz z jego układem zasilania i sterowania (widok z góry).



Rys.9. Zdjęcie reluktancyjnego silnika skokowego wraz z układem zasilania i sterowania (widok z góry)

Rozdział 5 Wnioski

Pomyślnie zakończone testy, opisane w rozdziale 4, pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- jest możliwa budowa bezrzedniowego silnika (aktuatora) z ultralekkim biegnikiem wykonanym z waty ferromagnetycznej,
- w silniku reluktancyjnym 3D ultralekki biegnik wykonany z waty ferromagnetycznej jest zdolny do realizacji szerokiego wachlarza różnorodnych trajektorii w kartezjańskiej przestrzeni roboczej XYZ,

- jest możliwa budowa niekonwencjonalnego przetwornika elektromechanicznego, w którym wszystkie elementy konstrukcji nośnej są wykonane w technologii druku 3D.

Opracowany przetwornik elektromechaniczny w postaci silnika reluktancyjnego 3D z ultralekkim biegnikiem wykonanym z waty ferromagnetycznej jest interesującym przykładem takiego właśnie niekonwencjonalnego aktuatora, pracującego w kartezjańskiej przestrzeni roboczej XYZ. Jego konstrukcja jest bardzo prosta i możliwa do zrealizowania w warunkach laboratoryjnych. Projekt i konstrukcja takiego silnika może być ciekawym zadaniem typu „case study” w procesie dydaktycznym na studiach technicznych. Stanowisko laboratoryjne z skokowym silnikiem reluktancyjnym może być również wykorzystywane na zajęciach dydaktycznych poświęconych algorytmom sterowania niekonwencjonalnych urządzeń elektromechanicznych. Odpowiednio udoskonalony prototyp może znaleźć zastosowanie jako szybko reagujący aktuator o ekstremalnie niskiej masie i pomijalnie małej bezwładności biegnika. Istnieje możliwość wykorzystania go w konstrukcji ultralekkiego, szybko reagującego manipulatora przestrzennego [6].

Autorzy: mgr inż. Krzysztof Sołtys, Politechnika Krakowska, Katedra Inżynierii Elektrycznej E-2, ul. Warszawska 24 31-155 Kraków, E-mail: krzysztof.soltys@pk.edu.pl ; prof. dr hab. inż. Krzysztof Kluszczyński, Politechnika Krakowska, Katedra Inżynierii Elektrycznej E-2, ul. Warszawska 24 31-155 Kraków, E-mail: krzysztof.kluszczyński@pk.edu.pl ; dr inż. Tomasz Makowski, Politechnika Krakowska, Katedra Inżynierii Elektrycznej E-2, ul. Warszawska 24 31-155 Kraków, E-mail: tomasz.makowski@pk.edu.pl; mgr inż. Bartłomiej Pniowski, Politechnika Krakowska, Absolwent na kierunku studiów Infotronika

LITERATURA

- [1] Kamiński G., Silniki elektryczne o ruchu złożonym, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, (1994)
- [2] Kluszczyński K.; Pilch Z., Porównanie sprzęgła magnetoreologicznego 1- i 2-tarczowego z punktu widzenia wymiarów gabarytowych, współczynników wykorzystania materiałów czynnych, poboru mocy elektrycznej oraz rozkładu przestrzennego temperatury, Przegląd Elektrotechniczny nr 9 (2022), 259-264
- [3] Kluszczyński K.; Pilch Z., The choice of the optimal number of discs in an MR clutch from the viewpoint of different criteria and constraints, Energies, vol. 14 (2021), 1-13
- [4] Kluszczyński K.; Pilch Z., A comparison study on magnetorheological multi-disc clutches in steady continuous-duty states from the viewpoint of electrical energy consumption and spatial temperature distribution, Applied Sciences, vol. 12 (2022), 1-13
- [5] Kluszczyński K.; Pilch Z., Integrated analytical-field design method of multi-disc magnetorheological clutches for automotive applications, Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, vol. 69, no. 6 (2021), 1-15
- [6] Knapczyk J.; Lebediew P., Teoria mechanizmów przestrzennych i manipulatorów. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, (1990)
- [7] Laithwaite E. R., Linear Electric Motors, Mills & Boon Limited London (1971)
- [8] Pawlak A. M., Sensors and Actuators in Mechatronics, Taylor & Francis Group, (2007)
- [9] Sochocki R., Mikromaszyny elektryczne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa (1998)
- [10] Sołtys K.; Bartel S.; Kluszczyński K., Instalacja do wytwarzania proszku ferromagnetycznego metodą elektrolizy w warunkach laboratoryjnych. Przegląd Elektrotechniczny, 98 (2022), nr 9, 77-81,
- [11] Sołtys K.; Bartel S.; Kluszczyński K., Laboratoryjna metoda wytwarzania proszków ferromagnetycznych i elastycznych materiałów magnetycznych oraz eksperymentalne badania ich zachowania w elektromagnetycznej komorze 3D. Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna: „Postępy w Elektrotechnice Stosowanej” PES-16, Warszawa-Zakopane (2022)