

Нові рішення у сучасній техніці та технологіях

УДК 621.3.042.2

DOI: 10.31471/1993-9868-2022-1(37)-97-102

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ 3D-ДРУКУ БЕЗКОЛЕКТОРНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Г. І. Стахів*, О. В. Соломчак

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,
e-mail: hryhorii.stakhiv@nung.edu.ua, oleg.solomchak@nung.edu.ua

У документі описано етапи з проектування та виготовлення безколекторного електродвигуна з використанням технології 3D-друку. Описано основні способи створення 3D-моделей та технології, які можна використати для 3D-друку окремих частин безколекторного електродвигуна. Розглянуто шляхи створення основних частин електродвигуна, таких як: ротор, статор, кріплення ротора та ін. Описано властивості матеріалів, з яких було виготовлено основні частини 3D-друкованого електродвигуна. Зображено шляхи балансування ротора та схему намотки статора. Проведено тести виготовленого електродвигуна на спеціально створеному стенді, який містив як електричне, так і механічне навантаження у вигляді груп з'єднаних зіркою резисторів з опором 1 Ом та комерційного електродвигуна приєднаного до отриманого за допомогою технології 3D-друку електродвигуна валу. Наведено осцилограми тестових режимів: двигунного та генераторного. В ході лабораторних досліджень було встановлено реальні параметри отриманого виробу, а саме: максимальну та мінімальну потужності споживання, максимально можливу потужність генерації, максимальну швидкість обертання ротора та параметри механічної і теплової стійкості матеріалу, з якого було виготовлено електричну машину. Також, було проведено дослідження методом скінченних елементів, в ході якого було розроблено фізичну модель торoidalного осердя для визначення параметрів, необхідних для внесення у математичну модель симуляції розподілу магнітного потоку у магнітопроводі статора. В ході симуляції розподілу магнітного потоку в двигуні методом скінченних елементів було встановлено величину магнітної проникності матеріалу, використаного для виготовлення статора. У підсумку, зроблено висновки про можливість проектування та створення обертової електричної машини і використання її в експериментальних електроустановках.

Ключові слова: тривимірний друк; безщіткові машини; магнітні сердечники; статори; метод скінченних елементів.

The main steps for designing and building brushless direct current (BBDC) motor by using 3D printing technology is described in the paper. The main methods of creating 3D models and technologies that can be used for 3D printing of individual parts of a brushless electric motor are described. The ways of creating the main parts of the electric motor, such as: rotor, stator, rotor mounting, etc. are presented. The properties of the materials from which the main parts of the 3D-printed electric motor were made are described. The ways of balancing the rotor and the scheme of stator winding are shown. Tests of the manufactured electric motor were performed on a specially created stand, which contained both electric and mechanical load in the form of groups of resistors with a resistance of 1 Ohm connected by a star and a commercial electric motor connected to the shaft obtained by 3D printing technology. Oscillograms of test modes: motor and generator are given. In the course of laboratory research the real parameters of the obtained product were established, namely: maximum and minimum power

consumption, maximum possible generation power, maximum rotor speed and parameters of mechanical and thermal stability of the material from which the electric machine was made. Also, a finite element study was conducted, during which a physical model of the toroidal core was developed to determine the parameters required for inclusion in the mathematical model of the simulation of the magnetic flux distribution in the stator magnetic circuit. During the simulation of the distribution of the magnetic flux in the motor by the finite element method, the value of the magnetic permeability of the material used for the manufacture of the stator was determined. As a result, conclusions are made about the possibility of designing and creating a rotating electric machine and its use in experimental electrical installations.

Keywords: three-dimensional printing; brushless machines; magnetic cores; stator; finite element method (FEM).

Вступ

Технологія 3D-друку розвивається швидкими темпами. Процес 3D-друку буде тривимірні об'єкти з комп'ютерної моделі шляхом послідовного накладання шарів матеріалу, тому технологію 3D-друку також називають адитивною [1]. Процес 3D-друку протилежний до процесів механічної обробки, лиття чи кування, коли матеріал поступово видаляється або заливається у форму чи формується за допомогою штампів [2].

У промислових масштабах 3D-принтери спікають металевий порошок для створення компонентів, які неможливо створити за допомогою лиття, зварювання або будь-якого іншого процесу механічної обробки. Створені деталі мають дуже хороші механічні властивості, але це відбувається за рахунок повільного і дорогого технологічного процесу. Висока вартість обумовлена відсутністю масштабних та швидких темпів виробництва деталей та необхідністю використання спеціальних матеріалів для 3D-друку, який зазвичай використовує лазер для розплавлення матеріалу [1-3].

Існує доволі багато процесів (технологій) 3D-друку [3]:

- пошаровий струменевий друк;
- стереолітографія;
- селективне лазерне спікання;
- моделювання плавленням;
- пошарове формування об'ємних моделей з листового матеріалу;
- струменева полімеризація.

Існують 3D-принтери з моделюванням за допомогою пошарового наплавлення матеріалу (FDM), які використовують різні типи пластмас та полімерів, такі як полілактид (PLA), акрилонітрилбутадієн-стирол (ABS), поліетилентерефталат-гліколь (PETG) та багато інших. Такі 3D-принтери відносно дешеві і продаються як принтери для домашнього використання [3], [4], [5].

Завдяки широкій доступності FDM 3D-принтерів, кожен може створювати різноманітні проєкти, починаючи з моделей мистецтва,

робочих механізмів і закінчуючи електродвигунами [7].

Аналіз закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Через доступність FDM 3D-друку дослідників зацікавила проблема виготовлення більш складних механізмів, як-от електродвигунів. Так, у роботі [5] описується процес друку з використанням FDM 3D-друку. Машина, представлена у роботі [5], володіє високим крутним моментом, але в порівнянні з заводським прототипом було виявлено збільшення втрат осердя на 48 %.

Ще один приклад вдалого виготовлення безколекторного електродвигуна потужністю 600 Вт з ККД близько 80 % опубліковано на сайті instructables.com [9]. Основні частини цього двигуна, такі як ротор і кріплення, були надруковані з PLA, а статор – зі спеціального матеріалу під назвою Proto-pasta Magnetic PLA. Двигун працює зі стандартним регулятором швидкості, який широко використовується в радіомодельованні (для дронів, літаків, моделей авто та ін.) [8].

Проте жоден з вищезгаданих прототипів не розглядався як привод в агрегатах, які можливо було б застосувати для стиснення чи перекачування газів.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Виявлення та узагальнення ефективного алгоритму створення 3D-моделі електродвигуна за методом FDM 3D-друку.

Виявлення переваг, конструктивних недоліків та/або обмежень при 3D-друку електродвигуна.

Дослідження властивостей обраних матеріалів та перевірка їх придатності чи доцільності використання.

Дослідження магнітної провідності пластику з ферромагнітними частинками методом скінченних елементів.

Мета та завдання досліджень

Метою даної роботи є виявлення можливості використання швидкого та доступного методу виготовлення об'ємних виробів на основі цифрових моделей – 3D-друку при створенні експериментальних електроприводів. А саме, перспективи застосування безколекторних електродвигунів, які можуть бути виготовлені за технологією 3D-друку.

Задачами дослідження є: вибір оптимальної конструкції електродвигуна, яка найбільш придатна для 3D-друку; експериментальні дослідження ефективності матеріалів для виготовлення елементів статора та ротора двигуна.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Процес створення та тестування безколекторного електродвигуна

Було прийнято рішення створити двигун із зовнішнім розташуванням ротора [9]. Побудувати двигун даного типу складніше через низьку жорсткість конструкції та допуски 3D-друку. Для збільшення стійкості ротора електродвигуна було вирішено встановити додатковий підшипник (рис. 1). Також, було прийнято рішення розбити ротор на дві частини, одна з яких буде утримувати магніти, а інша стабілізуючий підшипник (рис. 1).

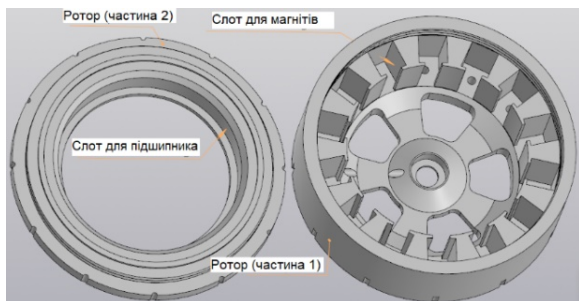


Рисунок 1 – Вид ротора

Для прокладання проводів та утримання двигуна на місці було розроблено підставку-тримач (рис. 2).

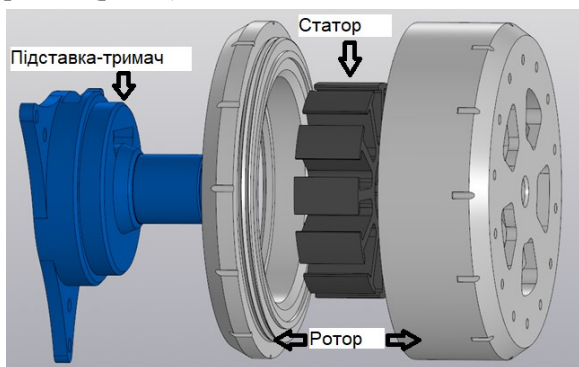


Рисунок 2 – Друковані компоненти двигуна

Усі вищезгадані частини (дві частини ротора та підставка-тримач) були роздруковані з PLA. Статор ж було надруковано з Proto-pasta Magnetic PLA. Даний матеріал містить феромагнітні частки, тому не тільки покращує механічні та термічні властивості полілактиду, а і служить хорошим провідником магнітного поля.

У роторі, який складається з 12 слотів, було встановлено неодимові магніти розмірами 20x20x10 мм у спеціальних пазах (рис. 3).

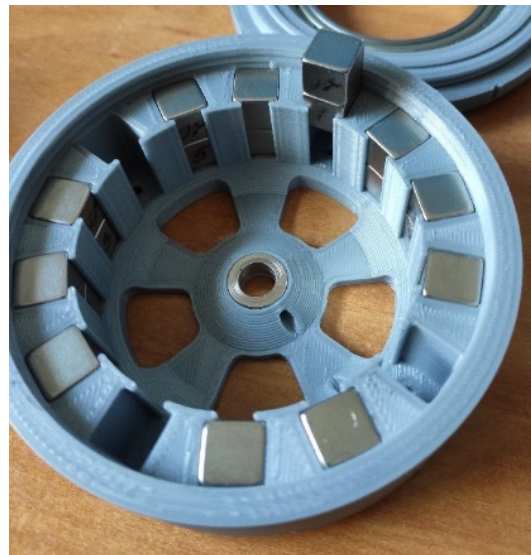


Рисунок 3 – Розміщення магнітів у статорі

А на 14-ти полюсний статор було намотано мідний провід у лаковій ізоляції перерізом 0.75 мм². Конфігурація обмотки статора (наведена на рисунку 4) характеризується можливістю створення симетричної схеми обмотки з рівномірним прольотом. Таким чином, можна звести до мінімуму опір обмотки, а також зменшити витрати міді. Шаблон обмотки можна символічно описати як aBbcSAabBcc, де велика буква означає напрямок намотування за годинниковою стрілкою, а мала – протилежний (рис. 4).

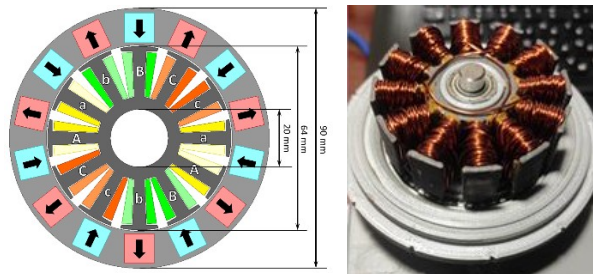
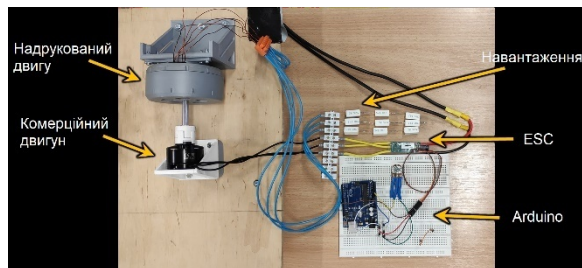


Рисунок 4 – Схема намотки (ліворуч) та обмотка статора (праворуч)

Проведення тестів

Для випробувань 3D-друкованого двигуна було створено простий випробувальний стенд, на якому вал виготовленого двигуна було при-

єднано до валу комерційного двигуна (рис. 5). Як навантаження було використано резистори, з'єднані зіркою [9]. Спершу друкований двигун був протестований у якості генератора, щоб перевірити цілісність обмоток. Для цього було подано напругу на виводи комерційного електродвигуна.



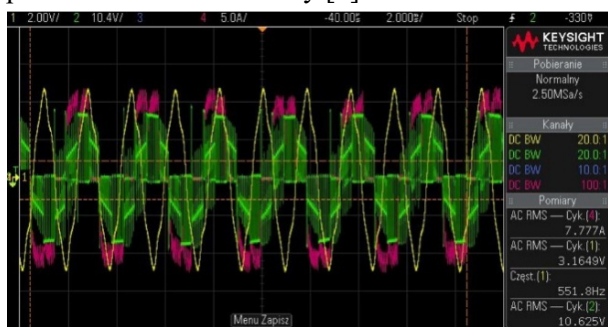
Рисунки 5 – Випробувальний стенд

Як виявилось, зворотна напруга друкованого двигуна є синусоїдальною, а тестування в умовах холостого ходу показало, що електрична стала двигуна складає близько 580 об/хв на 1 В (рис. 6).

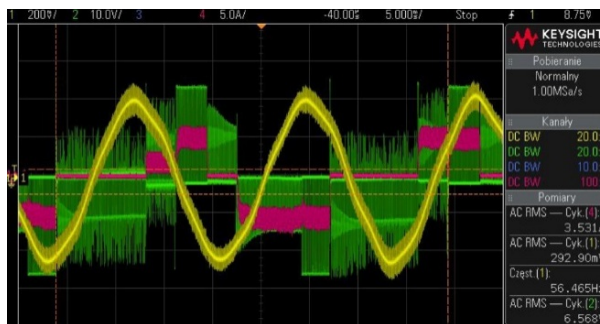


Рисунки 6 – Режим генератора у режимі холостого ходу

Під час тестування надрукованого двигуна у двигунному режимі при навантаженні у 10 Ом швидкість обертання становила 3000 об/хв (рис. 7), а зі зниженням опору навантаження до 3 Ом швидкість обертання різко впала до 300 об/хв (рис. 8). Високий опір обмотки призводить до значного падіння напруги, в той же час необхідна велика кількість витків для створення магнітного потоку [9].



Рисунки 7 – Двигунний режим з навантаженням 10 Ом



Рисунки 8 – Двигунний режим з навантаженням 3 Ом

На рисунках 6, 7 та 8 жовтим кольором позначено зворотну напругу, зеленим – вхідну напругу на двигун, рожевим – струм, який тече через обмотку двигуна.

Ще однією проблемою, яку було виявлено в ході тестування, виявилась нестабільність ротора та велика вібрація. Це пов'язано з різною вагою магнітів, вмонтованих у статор. Щоб відцентрова сила не розірвала ротор, довелося його армувати за допомогою стрічки. Також PLA не може працювати за високих температур, бо точка його кристалізації становить 60°C.

Дослідження методом скінченних елементів (МСЕ)

Для проведення аналізу МСЕ необхідно спершу визначити властивості матеріалу. Єдиною невідомою величиною, що характеризує механізм електропривода, є магнітна проникність магнітного PLA. Для вимірювання проникності було надруковано осердя тороїдного типу зі 100 % заповненням [10]. Осердя має зовнішній діаметр 40 мм, внутрішній діаметр 24 мм і висоту в 15 мм зі знятою по контуру фаскою. На осердя була намотана обмотка з тонкого мідного дроту, що мінімізувати втрати (рис. 9). Індуктивність такого дроселя було виміряно для різної кількості витків [10]. Знання зв'язку між індуктивністю тороїдального осердя та його розмірами дозволило розрахувати магнітну проникність (1).



Рисунки 9 – Тороїдне осердя

$$L = \frac{N^2}{R} = \mu_r \mu_0 \frac{A_e}{l_e} N^2 ; \quad (1)$$

$$A_e = H \frac{\ln^2\left(\frac{OD}{ID}\right)}{2 \frac{ID}{OD}} ; \quad (2)$$

$$l_e = 2\pi \frac{\ln\left(\frac{OD}{ID}\right)}{2 \frac{ID}{OD}} . \quad (3)$$

Згідно з вимірами, зворотне значення магнітного опору $l=R$ оцінюється як $2:4nH=turn2$, що є результатом інтерполяції, показаної на рисунку 10 [10].

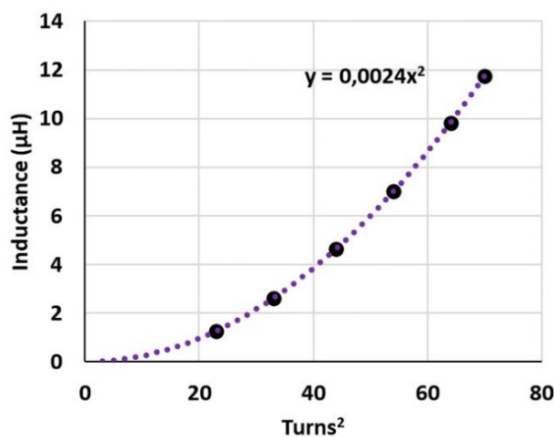


Рисунок 10 – Залежність індуктивності надрукованого осердя від кількості витків

Після розрахунку ефективної площі поперечного перерізу (2) та довжини магнітного шляху (3), обчислили магнітну проникність – $\mu = 1:55$. Це показує, що проникність цього матеріалу трохи вища, ніж у вакуумі, тому притягання між постійним магнітом і тороїдальним осердем з магнітного PLA є помітним [10].

Для моделювання методом скінченних елементів потрібно розв'язати рівняння часткових похідних (4) [10].

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = J + \nabla \times H_c , \quad (4)$$

де A – потенціал магнітного вектора;

$\mu = \mu_0$ – магнітна проникність;

J – щільність струму;

H_c – напруженість магнітного поля постійних магнітів.

Обчисливши потенціал магнітного вектору (5), отримуємо щільність магнітного потоку

$$B = \nabla \times A . \quad (5)$$

Як видно з рисунку 11, на розподіл магнітного потоку в двигуні майже не впливає наявність магнітного PLA. Навіть металевий вал, встановлений у центрі, не впливає на магнітне поле. Симуляція показує, що магнітний потік не протікає через статор, тому магнітний зв'язок між магнітами та котушкою є низьким [10]. Аналогічну ситуацію можна спостерігати при роботі друкованого двигуна в генераторному режимі.

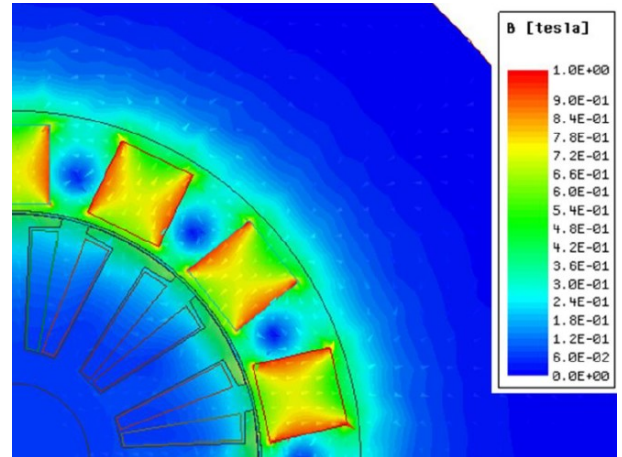


Рисунок 11 – Симуляція розподілу магнітного потоку в двигуні

Висновки

1. Конструкція електродвигуна, коли рухомий ротор розміщений ззовні, а нерухомий – всередині, є загалом вдалою для 3D-друку.

2. Виявлено нестабільність ротора та велику вібрацію, спричинені різною вагою вмонтованих в ротор магнітів. Щоб відцентрова сила не розірвала ротор, необхідно його армувати стрічкою.

3. Конструкція двигуна має дуже великі допуски, оскільки використана технологія 3D-друку не є ідеальною і потребує додаткової обробки. Це є причиною відносно великого повітряного зазору між статором і ротором.

4. Сконструйований електродвигун не може працювати в довготривалому режимі, бо PLA непридатний для використання за високих температур. Його точка плавлення становить 60°C .

5. Магнітний PLA не покращує проникність та провідність магнітного поля. Лиш невелика частка магнітного потоку проникає від постійних магнітів до котушки статора. Тому необхідно розробляти нові матеріали з більшою магнітною проникністю, які будуть придатними для 3D-друку.

Література / References

1. Zhang Z.-Y., Jhong K., Cheng C.-W., Huang P., Tsai M.-C., Lee W.-H. Metal 3d printing of synchronous reluctance motor. March 2016. 11251128.
2. Huang P.-W., Tsai M.-C., Jiang I.-H. 3-d structure line-start synchronous reluctance motor design based on selective laser melting of 3-d printing. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2018. Vol. 07. P. 1-4. doi: 10.1109/TMAG.2018.2849710.
3. Pyo H., Jeong J. W., Yu J., Lee S. G., Kim W. Design of 3d-printed hybrid axial-flux motor using 3d-printed smc core. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2020. Vol. 30, No 4. P. 1-4.
4. Zastrow M. 3d printing gets bigger, faster and stronger. *Nature*. 2020. Vol. 578. P. 20-23. doi: 10.1038/d41586-020-00271-6.
5. Shahrubudin N., Te Chuan L., Ramlan R. An overview on 3d printing technology. *Technological, materials, and applications*. 2019. Vol. 35, P. 1286-1296. doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.089.
6. Taufik. M., Jain P. Role of build orientation in layered manufacturing: A review. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*. 2014. Vol. 27. P. 47-73. doi: 10.1504/IJMTM.2013.058637.
7. Laimer C. 600 watt, 3d-printed, halbach array, brushless dc electric motor. *Instructables*. 2018. URL: <https://www.instructables.com/id/600-Watt-3d-printed-Halbach-Array-Brushless-DC-Ele/> [Access date: 28-May-2020].
8. Tyler-Wood T. L., Cockerham D., Johnson K. R. Implementing new technologies in a middle school curriculum: a rural perspective. *Smart Learning Env*. 2018. Vol. 5. doi: 10.1186/s40561-018-0073-y.
9. Stakhiv H., Solomchak O., Stepien M., Lasek P. Analysis and Experimental Investigation of 3D Printed Electric Motor with Permanent Magnets. *2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*. 2020. P. 1-5. doi: 10.1109/ICEPDS47235.2020.9249306.
10. Stakhiv H., Solomchak O., Lasek P., Stepien M. FEM Simulation and Analysis of a Concept 3D Printed Electric Motor with Permanent Magnets. *2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*. 2021. P. 656-660. doi: 10.1109/PEMC48073.2021.9432529.