

МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИЙ ГЕНЕРАТОР З АКСІАЛЬНИМ МАГНІТНИМ ПОТОКОМ ТА ПОДВІЙНИМ СТАТОРОМ ДЛЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ НИЗЬКОПОТЕНЦІАЛЬНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Отримано 22 березня. 2024 р.; рекомендовано до публікації 21 чер. 2024 р.
Доступно онлайн 01 лип. 2024 р.

**Коваленко М. А.¹, Ткачук І. В.², Коваленко І. Я.³,
Жук С. О.⁴, Кришньов О. О.⁵**

Автор для кореспонденції: Коваленко Михайло,
e-mail: kovalenko_ma@i.ua

Проведено аналіз використання магнітоелектричних генераторів для систем перетворення низькопотенціальної механічної енергії на електричну. Такими системами можуть бути: вітроустановки, міні-ГЕС, малопотужні енергетичні комплекси, коливання хвиль і т. ін. Проведено аналіз існуючих математичних моделей магнітоелектричних генераторів з аксіальним магнітним потоком різноманітної конструкції та конфігурації. Розроблено тривимірну польову математичну модель досліджуваного генератора. За допомогою розробленої моделі досліджено статичні характеристики цього генератора, а також величини магнітної індукції в усіх конструкційних елементах. Додаткова обмотка використовується для стабілізації вихідної напруги при зміні швидкості обертання ротора генератора. Застосування конструкції з подвійним статором дозволяє ефективніше використовувати корисний об'єм генератора, підвищити його потужність та стабілізувати вихідну напругу обмотки статора.

Ключові слова: магнітоелектричний генератор з аксіальним магнітним потоком, подвійний статор, математичне моделювання, відновлювана енергетика, електромеханічний перетворювач.

¹ канд. тех. наук, доцент.
<https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>

² асистент.
<https://orcid.org/0000-0002-5717-2458>

³ PhD, асистент.
<https://orcid.org/0000-0003-1097-2041>

⁴ інженер.
<https://orcid.org/0009-0002-0409-5580>

⁵ студент.
<http://orcid.org/0009-0008-1140-5544>

^{1, 2, 3, 5} Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ.

⁴ ТОВ "НТТ Енергія"

DOUBLE STATOR AXIAL FLUX MAGNETOELECTRIC GENERATOR FOR CONVERSION OF LOW POTENTIAL MECHANICAL ENERGY

Received Mar. 22, 2024; accepted Jun. 21, 2024
Available online Jul. 01, 2024

**Kovalenko M.¹, Tkachuk I.², Kovalenko I.³,
Zhuk S.⁴, Kryshnov O.⁵**

Author for correspondence: Kovalenko Mykhailo,
e-mail: kovalenko_ma@i.ua

An analysis of the use of magnetoelectric generators for systems of converting low-potential mechanical energy into electrical energy was carried out. Such systems can be: wind turbines, mini hydroelectric power plants, low-power energy complexes, wave oscillations, etc. The analysis of existing mathematical models of magnetoelectric generators with axial magnetic flux of various designs and configurations was carried out. A three-dimensional field mathematical model of the studied generator was developed. With the help of the developed model, the static characteristics of this generator, as well as the values of magnetic induction in all structural elements, were investigated. An additional winding is used to stabilize the output voltage when the speed of

¹ Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.
<https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>

² Assistant.
<https://orcid.org/0000-0002-5717-2458>

³ PhD, assistant.
<https://orcid.org/0000-0003-1097-2041>

⁴ Engineer.
<https://orcid.org/0009-0002-0409-5580>

⁵ Student.
<http://orcid.org/0009-0008-1140-5544>

^{1, 2, 3, 5} NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine.

⁴ BLLC "NTT Energy".

rotation of the generator rotor changes. The use of a design with a double stator allows more efficient use of the useful volume of the generator, increasing its power and stabilizing the output voltage of the stator winding.

Keywords: *magnetoelectric generator with axial magnetic flux, double stator, mathematical modeling, renewable energy, electromechanical converter.*

Перелік використаних позначень та скорочень.

МГАМП – магнітоелектричний генератор з аксіальним магнітним потоком

ККД – коефіцієнт корисної дії

Вступ. Низькопотенціальною механічною енергією можна представити форму механічної енергії, яка має невелику потенціальну енергію (або низьку ентропію) або потенційний вплив на систему, або потенціальна енергія розподілена у значному за об'ємом просторі. Вона має місце при низьких швидкостях або силах і не виявляє значного впливу без додаткового перетворення або підсилення. Низькопотенціальна механічна енергія може бути перетворена на інші форми енергії, наприклад електричну енергію, за допомогою пристроїв, таких як генератори або турбіни.

Поняття системи перетворення низькопотенціальної механічної енергії на електричну описує процес або пристрій, який перетворює механічну енергію з обмеженим рівнем потенціалу на електричну енергію. Джерелами низькопотенціальної механічної енергії можуть бути різноманітні природні або штучні джерела, які забезпечують можливість генерувати механічну енергію зі зниженим рівнем потенціалу. Можливо виділити деякі основні приклади таких механічних джерел: вітроенергетика, гідроенергетика, теплові двигуни, кінетична енергія об'єктів тощо. Очевидно, що найрозповсюдженішим прикладом використання низькопотенціальної механічної енергії є енергія вітру.

Питання перетворення низькопотенціальної механічної енергії на електричну є складнішим науково-практичним завданням порівняно з перетворенням високопотенціальної механічної енергії. Для перетворення низькопотенціальної енергії необхідно застосовувати спеціальні методи, засоби й технічні прийоми, що є актуальним науково-практичним завданням.

Одним з ефективних методів перетворення механічної енергії вітру на електричну енергію є використання безмультіплікаторних вітроелектричних установок з тихохідними багатополісними генераторами.

Магнітоелектричні машини з аксіальним магнітним потоком (ММАМП) широко застосовуються в різних сферах діяльності: електротранспорті, відновлюваній енергетиці, для приводів вентиляторів, насосів, в авіаційній техніці, робототехніці тощо [1–3]. ММАМП також використовуються як тихохідний високомоментний привод, оскільки вони мають компактну структуру, що дозволяє інтеграцію їх з різноманітними пристроями [4, 5].

Магнітоелектричні генератори з аксіальним магнітним потоком (МГАМП) поєднують переваги генераторів з постійними магнітами з можливістю регулювання

вихідних параметрів, таких як напруга й потужність, за допомогою додаткової обмотки. Такі генератори мають низьку принципових переваг у порівнянні з генераторами традиційної конструкції: висока питома потужність, невисока аксіальна довжина при значному діаметрі; мінімальні пульсації електромагнітного моменту, невисока номінальна швидкість обертання [6].

Залежно від конфігурації статора та ротора, конструктивно МГАМП бувають: односторонні або двосторонні, одностаторні або багатостаторні та інші [7]. В цій роботі розглядається МГАМП з подвійним статором та одним ротором. Така конструкція дозволяє максимально ефективно використовувати корисний об'єм постійних магнітів та активних матеріалів генератора й підвищити питому потужність генератора.

За результатами огляду літератури проведено аналіз існуючих математичних моделей МГАМП. У роботі [8] представлено тривимірну модель циліндричного магнітоелектричного генератора з постійними магнітами. В моделі не враховується насичення, а обертання ротора моделюється дискретними чисельними розрахунками. В роботах [1–3, 5, 7, 9] представлені математичні моделі генераторів з аксіальним магнітним потоком та постійними магнітами різноманітної конфігурації. Однак у них відсутня інформація про математичне моделювання МГАМП з додатковою обмоткою. Окремою задачею є розрахунок параметрів та характеристик таких генераторів при обертанні ротора.

У роботах [10–14] наведено різні варіанти конструкційного виконання електричних машин з аксіальним магнітним потоком без магнітного осердя статора. В роботах [10, 11] розроблено математичну модель генератора з подвійним статором та потрійним ротором для оцінки вихідної напруги при застосуванні не магнітопровідного матеріалу статора. З метою зменшення ваги багатостаторних та багатороторних конструкцій генераторів авторами в роботах [12–14] розроблено математичні моделі, призначені для аналізу та порівняння різних варіантів конструкційних виконань таких генераторів.

Розрахунок тривимірної польової математичної моделі чисельними методами підвищує вимоги до параметрів обчислювальної машини. Тобто для розрахунку поставленого завдання з використанням складної конфігурації розрахункової області необхідно застосовувати потужний комп'ютер або навіть суперкомп'ютер. Розрахунок моделі в повному об'ємі збільшує час розрахунку,

вимагає погіршення точності сітки скінченних елементів, що негативно впливає на точність отриманих результатів.

Актуальним напрямом є розробка безконтактних МГАМП для вітрогенерувальних систем, малих гідроелектростанцій та систем перетворення низькопотенціальної механічної енергії на електричну в цілому. В конструкціях такого типу роль регулятора основного магнітного потоку виконує додаткова обмотка. Зміна амплітуди основного магнітного потоку в повітряному проміжку відбувається за рахунок використання конструктивного прийому: частина постійних магнітів на роторі замінюється магнітом'яким матеріалом, що називається магнітним шунтом. Відсутність на сьогодні математичних моделей для оцінки МГАМП з подвійним статором також обумовлює актуальність розробки такої моделі.

Мета роботи. Метою роботи є розробка тривимірної вісесиметричної польової математичної моделі МГАМП з подвійним статором та аналіз його параметрів і характеристик.

На рис. 1 показано конструкцію та переріз досліджуваного МГАМП. Основні розміри представленого генератора вибирали наближено на основі розрахунків за класичними методиками та з використанням практичного досвіду інженерів-дослідників [15]. Для спрощення подачі матеріалу алгоритм і методику розрахунку в цій роботі не наведено.

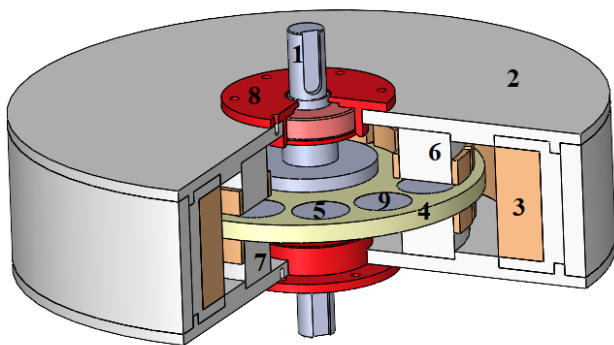


Рис. 1. Ескіз досліджуваного МГАМП: 1 – вал ротора генератора; 2 – корпус (капсула) генератора, виконаний з магнітопровідного матеріалу; 3 – додаткова обмотка; 4 – ротор генератора, виконаний з немагнітного матеріалу; 5 – постійні магніти типу NdFeB N38H; 6, 7 – два статори досліджуваного генератора з обмоткою якоря; 8 – фланці з підшипниками; 9 – магнітний шунт

Fig. 1. Sketch of the investigated MGAMF: 1 –shaft; 2 –housing (capsule) of the generator, made of magnetically conductive material; 3 – additional winding; 4 – generator rotor made of non-magnetic material; 5 – permanent magnets of the NdFeB N38H type; 6, 7 – two stators of the studied generator with an armature winding; 8 – flanges with bearings; 9 – magnetic shunt

Магнітний шунт виготовляють з магнітопровідного матеріалу: суцільного шматка сталі, композитного феромагнітного матеріалу або з феромагнітного порошкового матеріалу. Шунт утворює шлях для замикання основного магнітного потоку постійних магнітів з одного боку, а з іншого – утворює шлях для замикання магнітного потоку додаткової обмотки.

Основні параметри досліджуваного електрогенератора наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Основні параметри досліджуваного генератора

Table 1. Main parameters of the studied generator

№	Параметр	Величина	Одиниці виміру
1	Повна номінальна потужність	700	В·А
2	Розрахункова напруга генератора	48	В
3	Кількість фаз	3	–
4	Частота обертання	1000	об/хв
5	Кількість пар полюсів	6	–
6	Тип постійних магнітів	NdFeB N38H	–
7	Діаметр / осьова довжина постійних магнітів	25/8	мм
8	Коефіцієнт потужності	0,9	–
9	Діаметри магнітного осердя статора	135/85	мм
10	Довжина осердя статора	23,0	мм
11	Осьова довжина ротора	8,0	мм
12	Зовнішній діаметр генератора	270,0	мм
13	Величина повітряного проміжку	0,5	мм
14	Розрахунковий ККД	92	%
15	Кількість пазів на статорі	18	–
16	Марка сталі	3416	–

За даними, наведеними в табл. 1 проводиться побудова геометрії досліджуваного генератора з подальшим імпорт у середовище для чисельного моделювання.

Матеріали і результати досліджень

Для зменшення потужності обчислювальної машини, зменшення часу, затраченого на кожну ітерацію чисельного розрахунку, підвищення ефективності використання чисельних методів у межах цієї роботи розроблено вісесиметричну модель. Модель має 2 типи симетрії: геометричну (секторальну) симетрію та дзеркальну симетрію відносно площини, що перпендикулярна

до осі. Це дозволяє зменшити геометрію повної розрахункової області, як це показано на рис. 2.

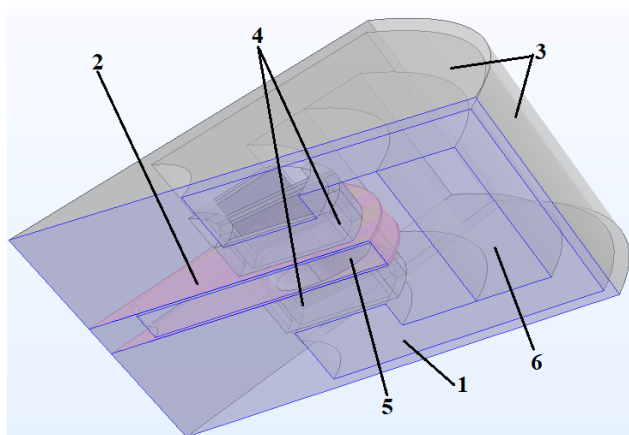


Рис. 2. Розрахункова область досліджуваного МГАМФ: 1 – періодичні граничні умови; 2 – граничні умови між статором і ротором; 3 – нульові граничні умови першого роду; 4 – обмотка якоря; 5 – ротор генератора з постійними магнітами; 6 – додаткова обмотка

Fig. 2. The calculation area of the investigated MGAMF: 1 – periodic boundary conditions; 2 – boundary conditions between the stator and the rotor; 3 – zero boundary conditions of the first kind; 4 – armature winding; 5 – generator rotor with permanent magnets; 6 – additional winding

На рис. 2 показано відповідні граничні умови розробленої моделі та окремі конструкційні елементи:

1. Періодичні граничні умови застосовуються на межах симетричних секторів розрахункової області. Модель відповідає умові періодичності, оскільки залишкова намагніченість постійних магнітів міняє свій знак між сусідніми секторами моделі. Математично умова для векторного магнітного потенціалу $\mathbf{A}$ виражається в такий спосіб:

$$\mathbf{A}_{12} = -\mathbf{A}_{21} \quad (1)$$

2. Граничні умови між статором та ротором. Мають збігатися з граничними умовами (1).

3. Для цієї границі розрахункової області задають нульові граничні умови першого роду для дотичної складової магнітного потенціалу:

$$\mathbf{N} \times \mathbf{A} = 0 \quad (2)$$

Для зменшення кількості рівнянь у розрахунковій області та скорочення часу, необхідного для кожної ітерації, використовується комбінований підхід. Для областей, які не проводять електричний струм (неелектропровідних), розв'язання виконується відносно скалярного магнітного потенціалу V_m . Для векторного магнітного потенціалу $\mathbf{A}$ застосовуються класичні рівняння електромагнітного поля. Цей підхід дозволяє також підвищити точність розрахунків магнітного потоку на границях. Для всіх неелектро-

провідних компонентів (як-от повітря, ротор і деякі частини корпусу) використовується система рівнянь відносно скалярного магнітного потенціалу V_m :

$$\begin{cases} -\nabla \cdot (\mu_0 \nabla V_m - \mu_0 \mathbf{M}) = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \mathbf{H} \\ \mathbf{H} = -\nabla V_m \end{cases} \quad (3)$$

де: μ_0 , μ_r – магнітна проникність вакууму та відносна магнітна проникність матеріалу області; V_m – скалярний магнітний потенціал; $\mathbf{B}$ – вектор магнітної індукції; $\mathbf{H}$ – вектор напруженості магнітного поля; $\mathbf{M}$ – вектор намагніченості.

Електромагнітне поле, що утворюється постійними магнітами, також розв'язується відносно скалярного магнітного потенціалу, однак рівняння набуває іншого вигляду з урахуванням властивості постійних магнітів:

$$\begin{cases} \mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mu_m \mathbf{H} + \mathbf{B}_r \\ \mathbf{B}_r = \|\mathbf{B}_r\| \frac{\mathbf{e}}{\|\mathbf{e}\|} \end{cases} \quad (4)$$

де: μ_m – магнітна проникність постійного магніту; $\mathbf{B}_r$ – залишкова намагніченість постійного магніту; $\mathbf{e}$ – напрямком вектора залишкової намагніченості магніту (x, y або вісь z).

Магнітне осердя статора, корпус генератора та вал виготовлені з магнітом'якого матеріалу, якому властива нелінійна залежність між магнітною індукцією $\mathbf{B}$ та напруженістю магнітного поля $\mathbf{H}$. Рівняння електромагнітного поля для цих областей та нелінійність феромагнітного матеріалу описуються такими рівняннями:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \\ \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \\ \mathbf{B} = f(\|\mathbf{H}\|) \frac{\mathbf{H}}{\|\mathbf{H}\|} \end{cases} \quad (5)$$

де: $\mathbf{J}$ – вектор густини струмів в елементах розрахункової області; $\mathbf{E}$ – вектор напруженості електричного поля; σ – електропровідність матеріалу.

Для трифазної обмотки якоря досліджуваного генератора справедливі перші чотири рівняння системи (5). Водночас густина струму в обмотках якоря, індукована ЕРС, та інші параметри обмотки визначаються такою системою рівнянь:

$$J_e = \frac{N(V_e + V_{ind})}{S_c \cdot R_c} \quad (6)$$

$$R_c = \int_A \frac{N \cdot L}{\sigma_c \cdot a_c \cdot S_c} dA$$

$$V_{ind} = N \cdot \sum_{S_c} \frac{L}{S_c} \cdot \left(\int_{S_c} E_{zA} ds - \int_{S_c} E_{zX} ds \right)$$

де: J_e – величина густини стуму в обмотці якоря, яка залежить від величини навантаження та характеру роботи генератора; N – кількість витків в обмотці якоря; S_c – площа поперечного перерізу, що займає обмотка з провідниками; R_c – активний опір фази обмотки статора; L – середня довжина витка фази обмотки статора; σ_c , a_c – електропровідність матеріалу обмотки статора та площа поперечного перерізу елементарного провідника; V_{ind} – величина індукованої ЕРС в обмотці статора генератора; V_e – напруга, що характеризує навантаження генератора; E_{zA} , E_{zX} – напруженість електричного поля в місцях розташування фазних зон «А» та «х».

Іншим способом для зменшення часу розрахунку генератора за запропонованою математичною моделлю та зменшення потужності обчислювальної машини є використання авторами в цій моделі прямого методу розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь, а не ітеративного [5]. Для забезпечення єдиного розв'язку системи диференціальних рівнянь (3–6) для всіх областей з векторним магнітним потенціалом $\mathbf{A}$ задається додаткова умова [5]:

$$\nabla \cdot (\sigma \mathbf{A}) = 0 \quad (7)$$

У рівняннях системи (3) використовується тільки градієнт потенціалу, а не сама величина потенціалу. Для отримання єдиного рішення поставленої задачі застосовується умова Діріхле, що задається для однієї з границь розрахункової області [6].

У моделі зроблені такі припущення: не враховуються втрати на гістерезис і вихрові струми в магнітному осерді; не проводиться аналіз теплових режимів, оскільки він потребує постановки та розв'язання окремої задачі; не проводиться розрахунок електромагнітного моменту та зусиль.

Основні параметри ПОМ, на якій проведено розрахунок поставленої задачі: процесор Intel® Core™ i7-9700F, об'єм оперативної пам'яті 16 Гб, тип – DDR5, операційна система Win 10 Pro. Параметри вибраної ССЕ дають змогу зменшити час розрахунку до мінімального й отримати адекватні результати.

У табл. 2 наведено порівняння параметрів ССЕ та часу розрахунку для розробленої вісесиметричної (фрагментальної) моделі та повнооб'ємної моделі генератора.

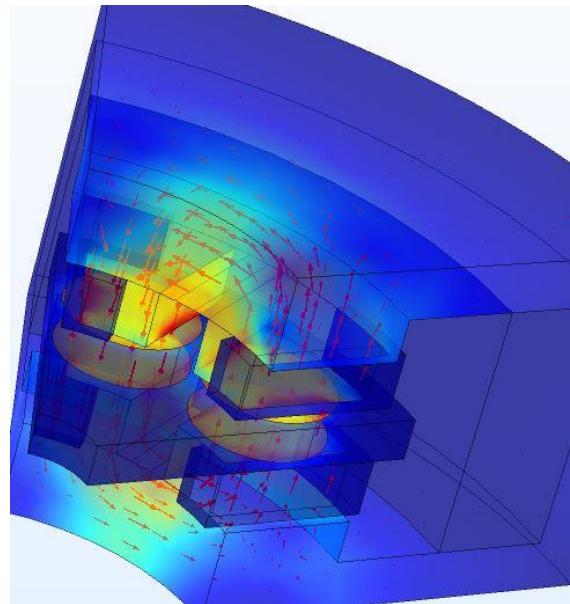
Таблиця 2. Порівняння параметрів ССЕ

Table 2. Comparison of FEM parameters

Параметр	Фрагментальна модель МГАМП	Повнооб'ємна модель МГАМП
Загальна кількість тетраедрів, що покривають розрахункову область	58 948	371 372
Кількість граничних поверхневих елементів ССЕ	19 601	90 164
Кількість лінійних елементів ССЕ	1882	9727
Середній час розрахунку поставленої задачі, с	348	2604

Результати моделювання

Під час моделювання використовується стандартна швидкість обертання ротора в режимі 500 обертів на хвилину. На зображенні (рис. 3) представлено розподіл магнітної індукції (фонове фарбування) та лінії замикання основного магнітного потоку (показані стрілками) для двох моментів часу: початкового та 0,02 секунди. Сила струму в обмотці збудження становить $I_e = 0$ А.



а)

Рис. 3. Розподіл магнітної індукції (фонове зафарбування) та магнітного потоку (стрілки) в розрахунковій області МГАМП при $I_e = 0$ А

Fig. 3. Distribution of magnetic induction (background coloring) and magnetic flux (arrows) in the calculation area of MGAMF at $I_e = 0$ A

Середнє значення магнітної індукції в зубцях статора становить $\approx 1,49$ Тл, у ярмі статора $\approx 1,04$ Тл, у повітряному проміжку $\approx 0,376$ Тл. Розрахункові значення магнітної індукції в конструкційних елементах досліджуваного генератора перебувають у допустимому діапазоні, що свідчить про коректний вибір основних геометричних розмірів. Для вибраної марки сталі допустима індукція в зубцях може становити $\approx 1,9$ Тл. Це дозволяє використовувати додаткову обмотку для підмагнічування магнітного осердя й забезпечує відповідний діапазон регулювання напруги.

Постійні магніти на роторі та магнітні шунти розташовуються в такому порядку й у такий спосіб, що утворюється такий шлях для замикання основного магнітного потоку постійних магнітів (при $I_e = 0$ А): постійний магніт-повітряний проміжок 1-зубець статора 1-ярмо статора 1-корпус генератора 1-спинка корпусу-корпус генератора 2-ярмо статора 2-зубець статора 2-повітряний проміжок 2-постійний магніт. Такий характер замикання основного магнітного потоку обумовлений тим, що конструктивні елементи генератора (корпус, спинка корпусу) є ненасиченими і, відповідно, при $I_e = 0$ А магнітний опір цієї ділянки є істотно меншим, ніж очікуваний, через повітряний проміжок і магнітний шунт. Це особливість магнітоелектричного генератора з аксіальним магнітним потоком та подвійним статором.

Чисельні розрахунки досліджуваного генератора проводили для двох режимів роботи: при струмі в обмотці збудження $I_e = 0$ А та при поданні струму на додаткову обмотку $I_e = 1$ А.

На рис. 4 показано розподіл магнітної індукції та основного магнітного потоку при поданні струму на додаткову обмотку величиною $I_e = 1$ А.

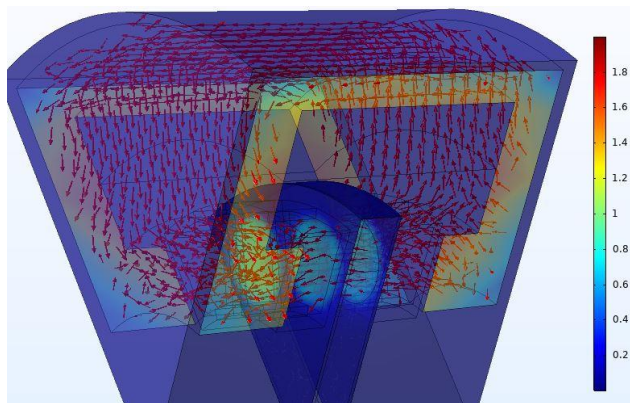


Рис. 4. Розподіл магнітної індукції та магнітного потоку в розрахунковій області МГАМФ

при $I_e = 1$ А

Fig. 4. Distribution of magnetic induction and magnetic flux in the calculation area of MGAMF at $I_e = 1$ А

При поданні струму на додаткову обмотку в корпусі (капсулі) магнітного осердя досліджуваного генератора з'являється значна за величиною магнітна індукція

$\approx 1,28$ Тл. При цьому збільшується середнє значення індукції в зубцях статора до $\approx 1,91$ Тл, в ярмі статора $\approx 1,54$ Тл, у повітряному проміжку $\approx 0,477$ Тл.

На рис. 5 показано розподіл аксіальної складової магнітної індукції B_δ у повітряному проміжку δ для двох випадків: 1 – при струмі в обмотці підмагнічування $I_e = 0$ А; 2 – при поданні струму на додаткову обмотку $I_e = 1$ А.

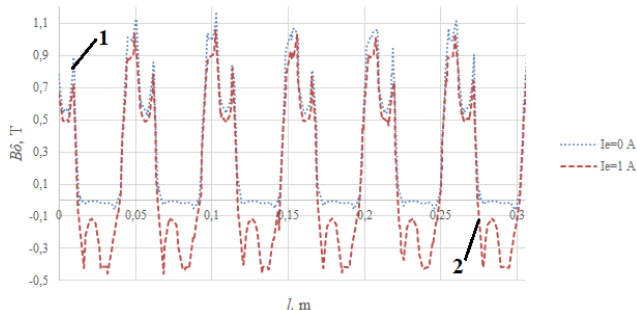


Рис. 5. Розподіл нормальної складової магнітної індукції в повітряному проміжку:
крива 1: $I_e = 1$ А, крива 2: $I_e = 0$ А

Fig. 5. Distribution of the normal component of magnetic induction in the air gap: curve 1: $I_e = 1$ А, curve 2: $I_e = 0$ А

При поданні струму на додаткову обмотку $I_e = 1$ А (рис. 5, крива 2) з'являється шлях для замикання магнітного потоку додаткової обмотки через магнітні шунти, а саме: спинка корпусу-корпус генератора 1-ярмо статора 1-зубець статора 1-повітряний проміжок 1-магнітний шунт-повітряний проміжок 2-зубець статора 2-ярмо статора 2-корпус генератора 2-спинка корпусу.

Магнітний потік додаткової обмотки частково зменшує основний магнітний потік під полюсами з постійними магнітами (рис. 6, крива 1) і підмагнічує магнітні шунти ротора. Внаслідок цього середнє значення ЕРС у повітряному проміжку зростає, а отже, зростає і величина індукованої в обмотках якоря ЕРС. За рахунок конструкції генератора з подвійним статором та схеми з'єднання обмоток на виході отримують ЕРС практично синусоїдальної форми, що буде доведено в наступних роботах авторів.

Нормальна складова магнітної індукції B_n у повітряному проміжку відповідає за величину ЕРС, що індукується в обмотці якоря досліджуваного генератора. При поданні струму $I_e = 1$ А на додаткову обмотку величина нормальної складової індукції B_n у повітряному проміжку збільшується приблизно на 27 %. Це значення корелюється зі збільшенням індукції в повітряному проміжку та в конструкційних елементах генератора (рис. 4).

Зміни параметрів та характеристик вивченого генератора при введенні струму в додаткову обмотку чітко відповідають теоретичним концепціям про функціонування генераторів цього типу. Це підтверджує відповідність розробленої моделі фізичним процесам та її здатність для використання у подальших наукових дослідженнях.

Висновки

Результати проведених досліджень підтвердили ефективність використання додаткової обмотки в конструкції генератора з аксіальним магнітним потоком для регулювання вихідних параметрів магнітоелектричного генератора. Це можна використовувати для підвищення ефективності перетворення низькопотенціальної механічної енергії на електричну. Цей метод ґрунтується на зміні робочого магнітного потоку шляхом регулювання величини магнітного потоку, що проходить через магнітний шунт.

Розроблено тривимірну польову математичну модель МІГАМП з подвійним статором, яка дає змогу отримати розподіл електромагнітного поля генератора та дозволяє проаналізувати його параметри й характеристики.

Модель повністю враховує особливості конструкції досліджуваного генератора, а саме наявність осьового потоку від обмотки статора та потоку, що утворюється додатковою обмоткою.

Проведено аналіз магнітної індукції в повітряному проміжку та в інших конструкційних елементах досліджуваного генератора. При поданні струму $I_e = 1$ А на додаткову обмотку величина індукції в повітряному проміжку зростає на 27 %, що приводить до відповідного росту вихідної напруги та потужності.

При поданні струму на додаткову обмотку в капсулі магнітного осердя з'являється магнітна індукція $\approx 1,28$ Тл. Водночас збільшується індукція в інших сталевих елементах магнітопроводу: в зубцях статора на ≈ 28 %, ярмі статора ≈ 48 %, в повітряному проміжку ≈ 27 %. Це необхідно враховувати в разі зміни конструктивних розмірів генератора, оскільки регулювальні можливості будуть обмежуватись як діапазоном зміни магнітної індукції, так і габаритними розмірами магнітного осердя й магнітними властивостями сталі.

ПОСИЛАННЯ

1. Wang W., Mi H., Longbo M. Study and Optimal Design of a Direct-Driven Stator Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator with Improved Dynamic Performance. *Energies*, 2018, no. 11, p. 3162. doi:10.3390/en11113162.
2. Radwan-Pragłowska N., Wegiel T., Borkowski D. Modeling of Axial Flux Permanent Magnet Generators. *Energies*, 2020, no. 13 (21), p. 5741. doi:10.3390/en13215741.
3. Radwan-Pragłowska N. Parameters identification of coreless axial flux permanent magnet generator / Natalia Radwan-Pragłowska, Tomasz Wegiel, Dariusz Borkowski. *Archives of Electrical Engineering*, 2018, vol. 67(2), p. 391–402. doi:10.24425/119648.
4. Eldoromi M. Improved design of axial flux permanent magnet generator for small-scale wind turbine /

Mojtaba Eldoromi, Sajjad Tohidi, Mohammad Reza Feyzi. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2017, no. 26, p. 3084–3099. doi:10.3906/elk-1711-402.

5. Dehghanzadeh A., Behjat V., Banaei M. Dynamic modeling of wind turbine based axial flux permanent magnetic synchronous generator connected to the grid with switch reduced converter / Ali Reza Dehghanzadeh, Vahid Behjat, Mohamad Reza Banaei. *Ain Shams Engineering Journal*, 2018, vol. 9(1), p. 125–135. doi: 10.1016/j.asej.2015.11.002.
6. Janon A. Making a case for a Non-standard frequency axial-flux permanent-magnet generator in an ultra-low speed direct-drive hydrokinetic turbine system / Akraphon Janon, Krittattee Sangounsak, Warat Sriwannarat. *AIMS Energy*, 2019, № 8(2), p. 156–168. doi: 10.3934/energy.2020.2.156.
7. Zhang Z. Design Optimization of ironless multi-stage axial-flux permanent magnet generators for offshore wind turbines / Zhaoqiang Zhang, Robert Nilssen, S. M. Muyeen, Arne Nysveen, Ahmed Al-Durra. *Engineering Optimization*, 2017, vol. 49, p. 815–827. doi:10.1080/0305215X.2016.1208191.
8. Chumack, V., Tsyvinskyi, S., Kovalenko, M., Ponomarev, A., Tkachuk, I. 2020. Mathematical modeling of a synchronous generator with combined excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 1, 5 (103) (Feb. 2020), 30–36. doi: 10.15587/1729-4061.2020.193495.
9. Головки В. М., Коваленко М. А., Коваленко І. Я., Галасун І. Р. Математичне моделювання автономної вітроустановки з синхронним генератором магнітоелектричного типу. *Відновлювальна енергетика*, 2020, № 4(63). С. 50–58. doi: 10.36296/1819-8058.2020.4(63).
10. Mehmet Recep Minaz, Mehmet Çelebi Design and analysis of a new axial flux coreless PMSG with three rotors and double stators. *Results in Physics*, 2017, vol. 7, p. 183–188. doi:10.1016/j.rinp.2016.10.026.
11. Sahib Khan, Syed Sabir Hussain Bukhari, Jong-Suk Ro Design and Analysis of a 4-kW Two-Stack Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine for Low-Speed Applications. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, p. 173848–173854. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2957046.
12. Byung-Oh Tak, Jong-Suk Ro Analysis and Design of an Axial Flux Permanent Magnet Motor for in-Wheel System Using a Novel Analytical Method Combined With a Numerical Method. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, p. 203994–204011. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3036666.
13. Li T., Zhang Y., Liang Y., Ai Q., Dou H. "Multiphysics analysis of an axial-flux in-wheel motor with an amorphous alloy stator", *IEEE Access*, 2020, vol. 8, p. 27414–27425. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2972017.

14. Takahashi T., Takemoto M., Ogasawara S., Hino W., Takezaki K. "Size and weight reduction of an in-wheel axial-gap motor using ferrite permanent magnets for electric commuter cars". *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2017, vol. 53, no. 4, p. 3927–3935. doi: 10.1109/TIA.2017.2684739.
15. Chumack V., Bazenov V., Tymoshchuk O., Kovalenko M., Tsyvinskyi S., Kovalenko I., Tkachuk I. Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation (December 21, 2021). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5 (114), 56–62. doi:10.15587/1729-4061.2021.246601.
7. Zhang Z. Design optimization of ironless multi-stage axial-flux permanent magnet generators for offshore wind turbines / Zhaoqiang Zhang, Robert Nilssen, S. M. Mueen, Arne Nysveen, Ahmed Al-Durra. *Engineering Optimization*, 2017, v. 49, p. 815–827. doi:10.1080/0305215X.2016.1208191.
8. Chumack, V., Tsyvinskyi, S., Kovalenko, M., Ponomarev, A., Tkachuk, I. 2020. Mathematical modeling of a synchronous generator with combined excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 1, 5 (103) (Feb. 2020), 30–36. doi: 10.15587/1729-4061.2020.193495.
9. Golovko V., Kovalenko M., Kovalenko I., Halasun I. Mathematical simulation of autonomous wind installation with synchronous magneto-electric type generator. *Vidnovluvana Energetika*, 2020, № 4(63), p. 50–58. doi: 10.36296/1819-8058.2020.4(63).50-58.
10. Mehmet Recep Minaz, Mehmet Çelebi Design and analysis of a new axial flux coreless PMSG with three rotors and double stators. *Results in Physics*, 2017, vol. 7, p. 183–188. doi:10.1016/j.rinp.2016.10.026.
11. Sahib Khan, Syed Sabir Hussain Bukhari, Jong-Suk Ro Design and Analysis of a 4-kW Two-Stack Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine for Low-Speed Applications. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, p. 173848–173854. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2957046.
12. Byung-Oh Tak, Jong-Suk Ro Analysis and Design of an Axial Flux Permanent Magnet Motor for in-Wheel System Using a Novel Analytical Method Combined With a Numerical Method. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, p. 203994–204011. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3036666.
13. Li T., Zhang Y., Liang Y., Ai Q., Dou H. "Multiphysics analysis of an axial-flux in-wheel motor with an amorphous alloy stator". *IEEE Access*, 2020, vol. 8, p. 27414–27425. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2972017.
14. Takahashi T., Takemoto M., Ogasawara S., Hino W., Takezaki K. "Size and weight reduction of an in-wheel axial-gap motor using ferrite permanent magnets for electric commuter cars. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2017, vol. 53, no. 4, p. 3927–3935. doi: 10.1109/TIA.2017.2684739.
15. Chumack V., Bazenov V., Tymoshchuk O., Kovalenko M., Tsyvinskyi S., Kovalenko I., Tkachuk I. Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation (December 21, 2021). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5 (114), 56–62. doi:10.15587/1729-4061.2021.246601.

REFERENCES

1. Wang W., Mi H., Longbo M. Study and Optimal Design of a Direct-Driven Stator Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator with Improved Dynamic Performance. *Energies*, 2018, no. 11, p. 3162. doi:10.3390/en11113162.
2. Radwan-Pragłowska N., Wegiel T., Borkowski D. Modeling of Axial Flux Permanent Magnet Generators. *Energies*, 2020, no. 13(21), p. 5741. doi:10.3390/en13215741.
3. Radwan-Pragłowska N. Parameters identification of coreless axial flux permanent magnet generator / Natalia Radwan-Pragłowska, Tomasz Wegiel, Dariusz Borkowski. *Archives Of Electrical Engineering*, 2018, vol. 67(2), p. 391–402. doi:10.24425/119648.
4. Eldoromi M. Improved design of axial flux permanent magnet generator for small-scale wind turbine / Mojtaba Eldoromi, Sajjad Tohidi, Mohammad Reza Feyzi. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2017, no. 26, p. 3084–3099. doi:10.3906/elk-1711-402.
5. Dehghanzadeh A., Behjat V., Banaei M. Dynamic modeling of wind turbine based axial flux permanent magnetic synchronous generator connected to the grid with switch reduced converter / Ali Reza Dehghanzadeh, Vahid Behjat, Mohamad Reza Banaei. *Ain Shams Engineering Journal*. 2018, vol. 9(1), p. 125–135. doi: 10.1016/j.asej.2015.11.002.
6. Janon A. Making a case for a Non-standard frequency axial-flux permanent-magnet generator in an ultra-low speed direct-drive hydrokinetic turbine system / Akraphon Janon, Krittattee Sangounsak, Warat Sriwannarat. *AIMS Energy*, 2019, no. 8(2), p. 156–168. doi: 10.3934/energy.2020.2.156.