

М.А. КОВАЛЕНКО, В.В. ЧУМАК, О.Л. ТИМОЩУК, І.Я. КОВАЛЕНКО, О.В. ВИШНЕВСЬКИЙ

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ СПЕЦІАЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ НИЗЬКОПОТЕНЦІАЛЬНИХ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

У статті розглянуто конструкцію та принцип дії електромеханічного перетворювача спеціального призначення, призначеного для роботи в умовах низькопотенціальних механічних систем, де традиційні генератори є малоефективними. Розроблено тривимірну польову математичну модель, що використовується для оцінки розподілу електромагнітного поля та зусиль досліджуваного генератора. Представлено результати моделювання магнітного поля та аналізу розподілу електромагнітних зусиль у робочій зоні пристрою. Основну увагу приділено впливу геометричних параметрів і магнітних властивостей матеріалів на формування основного магнітного потоку, його замикання та ефективність перетворення енергії. Встановлено, що регулювання параметрів, таких як відстань між магнітом і феромагнітним елементом, товщина та магнітна проникність останнього, дозволяє керувати рівнем магнітного насичення і втратами в повітряному проміжку, що безпосередньо впливає на щільність потужності й ККД генератора. Проведений аналіз підтвердив можливість ефективного застосування розробленого перетворювача в автономних і мобільних системах електроживлення, зокрема в установках із низькою швидкістю обертання вітрових турбін, системах рекуперації енергії та сенсорних пристроях. Запропонована конструкція відрізняється простотою реалізації, компактністю та відсутністю складних рухомих частин, що в перспективі підвищує її надійність і довговічність. Отримані результати створюють підґрунтя для подальшого вдосконалення магнітної системи та оптимізації параметрів для підвищення ефективності енергоперетворення в низькопотенціальних енергетичних режимах.

Ключові слова: постійні магніти, низькопотенціальні системи, електромеханічний перетворювач спеціального типу, електромагнітні зусилля, чисельне моделювання.

M.A. KOVALENKO, V.V. CHUMAK, O.L. TYMOSCHUK, I.Y. KOVALENKO, O.V. VISHNEVSKY

SPECIALLY DESIGNED ELECTROMECHANICAL CONVERTER FOR LOW-POTENTIAL MECHANICAL SYSTEMS

The article considers the design and principle of operation of a special-purpose electromechanical converter designed to operate in conditions of low-potential mechanical systems, where traditional generators are inefficient. A three-dimensional field mathematical model has been developed, which is used to estimate the distribution of the electromagnetic field and forces of the studied generator. The results of modeling the magnetic field and analyzing the distribution of electromagnetic forces in the working area of the device are presented. The main attention is paid to the influence of geometric parameters and magnetic properties of materials on the formation of the main magnetic flux, its closure and the efficiency of energy conversion. It has been established that the adjustment of parameters, such as the distance between the magnet and the ferromagnetic element, the thickness and magnetic permeability of the latter, allows you to control the level of magnetic saturation and losses in the air gap, which directly affects the power density and efficiency of the generator. The analysis confirmed the possibility of effective application of the developed converter in autonomous and mobile power supply systems, in particular in installations with low speed of rotation of wind turbines, energy recovery systems and sensor devices. The proposed design is distinguished by simplicity of implementation, compactness and absence of complex moving parts, which in the future increases its reliability and durability. The obtained results create a basis for further improvement of the magnetic system and optimization of parameters to increase the efficiency of energy conversion in low-potential energy modes.

Keywords: permanent magnets, low-potential systems, special-type electromechanical converter, electromagnetic forces, numerical simulation.

Вступ. Розвиток електромеханічних систем пов'язаний із науково-практичним пошуком та розробкою нових конструктивно, альтернативних компактних, високоефективних генераторів для альтернативної енергетики, автономних приводів та спеціалізованого обладнання [1]. Особливо перспективними є спеціальні конструкції електромеханічних перетворювачів енергії, що поєднують низьку інерційність, високу питому потужність та можливість інтеграції в різні механічні агрегати [2]. Проте ефективність такої машини значною мірою залежить від коректного конструктивного виконання, конфігурації та габаритів магнітного кола, який включає постійні магніти, повітряні проміжки, феромагнітні компоненти, тип, конфігурацію та геометрію обмоток. Тому, існує потреба в детальному аналізі взаємозв'язку геометричних параметрів (наприклад, відстань від магніту до феромагнітного осердя, товщина ярма, зубців, величина повітряних проміжків) та характеристик активних матеріалів з магнітним потоком, індукцією, коефіцієнтом використання магнітів і, як наслідок, на вихідній потужності та крутному моменті.

Електричні машини є ключовими елементами сучасної енергетики, промисловості, транспорту та

побутової техніки, адже саме вони забезпечують перетворення електричної енергії в механічну і навпаки [3]. Постійне зростання вимог до ефективності, компактності, надійності та екологічності електромеханічних систем зумовлює потребу в розробці нових типів електричних машин, здатних забезпечити високі показники енергоефективності при мінімальних габаритах та масі [4]. Тому, значний інтерес викликають електричні машини спеціального виконання, які завдяки своїй конструктивній специфіці мають суттєві переваги порівняно з електромеханічними перетворювачами традиційного виконання.

Електричні машини спеціального виконання можуть характеризуватися меншим шляхом для замикання основного магнітного потоку, високою питомою потужністю, меншими втратами в магнітному осерді та можливістю інтеграції у компактні енергетичні системи [5]. Такі переваги роблять їх перспективними для застосування у безпілотних системах, автономних електроустановках, вітроенергетичних модулях, електромобілях, системах рекуперації енергії та мобільних генераторах [6]. Проте ефективність роботи таких машин значною мірою залежить від точності розрахунку їх основних геометричних параметрів і магнітної системи,

© М.А. Коваленко, В.В. Чумак, О.Л. Тимошук, І.Я. Коваленко, О.В. Вишневецький, 2025

зокрема параметрів магнітопроводу, величини повітряного проміжку, параметрів постійних магнітів та властивостей характеристик ферромагнітних елементів [7].

Одним із ключових завдань у процесі проектування генераторів спеціального виконання є визначення оптимальних співвідношень геометричних і електромагнітних параметрів, що забезпечують максимальну ефективність енергоперетворення. При цьому особливу увагу приділяють аналізу розподілу магнітного потоку в повітряному проміжку, впливу товщини магнітопроводу та проникності матеріалу на магнітну індукцію, а також втрати у сталі, які можуть знижувати загальний коефіцієнт корисної дії генератора [8].

З огляду на це, актуальним є завдання розробки чисельної математичної моделі для оцінки оптимальності геометричних розмірів генераторів спеціального виконання та його основних експлуатаційних показників: величини електрорушійної сили, електромагнітного моменту і т.ін [9]. Такі моделі повинні враховувати фізичні закономірності розподілу магнітного поля та давати можливість провести оптимізацію конструкції для заданих умов роботи.

Слід відзначити, що значна частина сучасних досліджень присвячена чисельному моделюванню магнітних полів у таких електромеханічних перетворювачах за допомогою методів скінченних елементів, зокрема у середовищах ANSYS Maxwell, COMSOL Multiphysics, Matlab-Simulink/Simscape [10]. Ці підходи дозволяють досліджувати вплив окремих параметрів на роботу електромеханічного перетворювача, однак потребують достовірних аналітичних моделей для попереднього розрахунку геометрії, що скорочує час та вартість розробки [11]. У зв'язку з цим методика аналітичного або напівемпіричного розрахунку основних розмірів машин такого типу залишається важливою складовою процесу проектування.

З конструктивної точки зору, електромеханічний перетворювач спеціального виконання складається з ротора з постійними магнітами, статора з обмотками та магнітного осереддя, що забезпечує замикання магнітного потоку. Магнітна система в таких машинах зазвичай має один або два магнітопроводи, між якими розташована робоча обмотка. Використання сучасних висококоерцитивних постійних магнітів (типу NdFeB) дозволяє суттєво підвищити магнітну індукцію в повітряному проміжку, однак вимагає точного вибору геометричних параметрів для запобігання насиченню та надмірним втратам [12].

Важливим аспектом є також вплив властивостей матеріалів, з яких виготовлено магнітопровід. Відносна магнітна проникність ферромагнітних компонентів визначає ступінь насичення магнітного потоку, що безпосередньо впливає на коефіцієнт корисної дії та потужність генератора [13]. Надмірне зменшення повітряного проміжку між постійним магнітом і магнітопроводом може призвести до локального насичення сталі, а занадто велика відстань – до втрат частини

магнітного потоку [14]. Таким чином, для забезпечення оптимального енергетичного балансу необхідно провести всебічний аналіз впливу геометрії та параметрів активних матеріалів на показники та ефективність спеціального електромеханічного перетворювача.

Отже, у даній роботі розглядається електрична машина спеціального виконання, призначена для використання в автономних або мобільних енергетичних системах для перетворення енергії механічних коливань в електричну.

Актуальність. Актуальність теми даної роботи зумовлена зростаючою потребою у високоефективних та надійних електромеханічних перетворювачах енергії спеціального типу, призначених для роботи у складі систем відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії. Сучасні тенденції розвитку енергетики спрямовані на підвищення частки використання низькопотенційних джерел механічної енергії – таких як енергія вітру, хвиль, малих течій, коливань або поступальних рухів – для їх подальшого перетворення в електричну енергію. Використання традиційних електричних машин у таких системах часто є малоефективним через їхню громіздкість, складність конструкції та обмежену ефективність при роботі в низькошвидкісних режимах [15].

У зв'язку з цим актуальним завданням є розробка компактних, легких та високоефективних електромеханічних перетворювачів спеціального типу, здатних забезпечувати стабільне енергопостачання від джерел з низьким механічним потенціалом. Особливе місце серед таких пристроїв займають генератори з аксіальним магнітним потоком, які характеризуються високою питомою потужністю, малою масою, спрощеною конструкцією та можливістю ефективного роботи при малих швидкостях обертання. Завдяки використанню висококоерцитивних NdFeB постійних магнітів, такі генератори можуть забезпечувати високі значення магнітної індукції при менших габаритах, що робить їх перспективними для інтеграції в автономні енергетичні системи, системи резервного живлення та переносні електрогенератори.

Одним із основних напрямів досліджень у цій галузі є підвищення ефективності перетворення енергії за рахунок оптимізації магнітної системи, зокрема вибору геометричних параметрів магнітів, товщини магнітопроводів, відстаней між елементами та матеріалів з різною магнітною проникністю. Від правильності розрахунку цих параметрів залежить величина магнітного потоку в робочому повітряному проміжку, рівень втрат у магнітному осерді, тепловий режим і т.ін.

Крім того, сучасні умови експлуатації вимагають створення генераторів, здатних працювати в змінних або непостійних умовах навантаження, характерних для відновлюваних джерел енергії. Наприклад, у вітроенергетичних системах або системах перетворення енергії хвиль механічна потужність має пульсуючий характер, що потребує стабільної роботи електромеханічного перетворювача навіть при нерівномірному механічному впливі. Для цього необхідно забезпечити достатню магнітну інерційність системи, мінімізувати вихрові струми та втрати на гістерезис, а також

підібрати конструкційні параметри таким чином, щоб забезпечити лінійність залежності між магнітним потоком і електрорушійною силою.

Таким чином, розробка та дослідження електро-механічного перетворювача спеціального типу з аксіальним магнітним потоком є актуальним науково-технічним завданням, спрямованим на підвищення ефективності систем перетворення низькопотенційної механічної енергії в електричну. Результати таких досліджень можуть бути використані для створення нових типів генераторів у сфері малої енергетики, автономних систем живлення, морських та вітрових енергетичних установок. Реалізація подібних рішень сприятиме зменшенню енергетичної залежності, розвитку розподіленої генерації та розширенню використання екологічно чистих джерел енергії, що повністю відповідає сучасним тенденціям розвитку енергетичної галузі та концепції сталого розвитку.

Метою роботи є розробка чисельної імітаційної моделі електро-механічного перетворювача спеціального виконання для оцінки його параметрів та характеристик. Отримані результати можуть бути використані при створенні генераторів малої потужності для систем відновлюваної енергетики, портативних пристроїв живлення та інших застосувань, де критичними є малі габарити, висока ефективність та надійність.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є генератор із постійними магнітами спеціального виконання.

Ескіз запропонованого досліджуваного прототипу спеціального електро-механічного перетворювача механічних коливань зображено на рис.1.

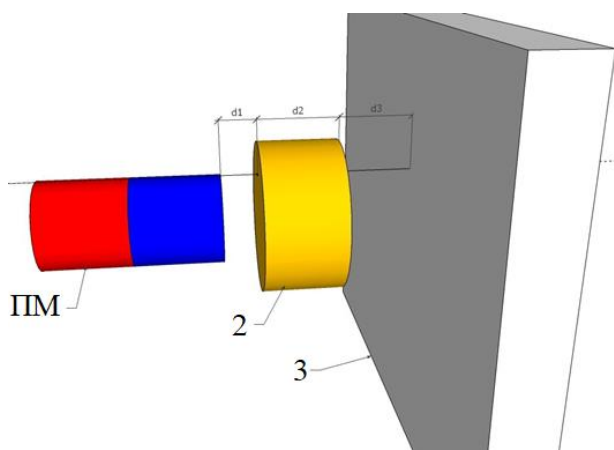


Рис. 1. Ескіз досліджуваного прототипу спеціального електро-механічного перетворювача

На рис. 1 показано:

- Циліндричний (може використовуватись інша форма і конфігурації) ПМ – постійний магніт;
- 2 – залізний або пластиковий композитний матеріал, що складається з 10 ... 80% порошку із вмістом феромагнітного матеріалу та пластику зв'язуючого елемента, як використовується у пропонованому прототипі електро-механічного перетворювача. На даному елементі може розташовуватись обмотка якоря, в якій наводиться знакозмінна електрорушійна сила;

- 3 – шихтоване магнітне осердя, виготовлене із електротехнічної сталі, яка зазвичай використовується в трансформаторах, електродвигунах, електричних генераторах, реле і т.ін.

Основні елементи схеми досліджуваного спеціального електро-механічного перетворювача, що відповідає рис. 1 показано у табл. 1.

Таблиця 1 – Основні елементи схеми досліджуваного спеціального електро-механічного перетворювача

№ п/п	Найменування елемента	Примітка
1	Постійні магніти	Циліндрична (чи інша форма), матеріал, що використовується в даному дослідженні – N42, залишкова намагніченість $B_r=1,3$ Т
2	Розміри магніту	діаметр D (м)=10 мм, довжина l = 20 мм
3	d_1 : Відстань від магніту до елемента 2 (перший повітряний проміжок)	Коливання амплітудою від 1 до 40 мм
4	d_2 : Аксіальна довжина елемента 2 (рис.1)	від 1 до 50 мм
5	d_3 : Відстань від елемента 2 до магнітного осердя (другий повітряний проміжок)	від 1 до 35 мм
6	Відносна магнітна проникність елемента 2 (рис. 1)	Може змінюватись, в залежності від типу матеріалу $\mu_r \approx 10 - 1000$
7	Оцінка величини робочих частот (аксіальних коливань), f	від 0 до 100 Гц

Принцип дії даного генератора наступний і його можна описати в декілька етапів:

1. Утворення основного магнітного потоку: постійний магніт створює магнітний потік вздовж осі машини (в аксіальному напрямку);
2. Магнітний потік проходить через феромагнітний або пластиковий композитний матеріал (п. 2, рис. 1), далі – через повітряний проміжок (між магнітом та пластиною 3) і повертається через лист 3 (що вважається великою плоскою частиною магнітного кола) або інші феромагнітні конструктивні елементи;

Якщо магнітна система, що складається з магніту та магнітопроводу разом з системою обмоток, обертається або здійснює зворотно-поступальні рухи (наприклад, від коливання хвиль, чи дії температурних впливів розширення/звуження), виникає електрорушійна сила (ЕРС) в обмотках (п. 2 рис. 1, залежно від положення магніту відносно обмоток) відповідно до класичного закону електромагнітної індукції.

Зміна параметрів d_1 , d_2 , d_3 і μ_r з метою оптимізації відіграють ключову роль у забезпеченні високої ефективності та стабільності роботи електро-механічного перетворювача. Зокрема, геометричні розміри (величина повітряного проміжку, висота ПМ, ширина

магнітопроводу) визначають розподіл магнітного поля, рівень магнітного опору кола та величину магнітної індукції. Невдалий вибір цих параметрів може призвести до підвищених втрат, надмірного насичення феромагнітних ділянок або, навпаки, до недовикористання магнітного матеріалу.

Відносна магнітна проникність μ_r визначає, наскільки ефективно матеріал проводить магнітний потік, що безпосередньо впливає на рівень намагнічування та величину магнітного потоку. Оптимізація цього параметра дає змогу зменшити втрати на гістерезис і вихрові струми, що особливо важливо для машин із високою частотою робочих процесів або для систем, які працюють у змінних режимах навантаження.

Таким чином, правильний вибір параметрів d_1 , d_2 , d_3 і μ_r дозволяє досягти високої ефективності електро-механічної системи, знизити втрати енергії, підвищити надійність та довговічність пристрою, а також забезпечити оптимальне співвідношення між масогабаритними показниками та вихідними характеристиками перетворювача.

Математична модель. Моделювання статичних характеристик запропонованого електро-механічного перетворювача спеціального типу, який працює в режимі генератора, виконувалися із застосуванням методів тривимірного польового математичного аналізу. Розрахунок магнітного поля у стаціонарному режимі здійснювався у тривимірному наближенні з урахуванням низки припущень, що дозволяють спростити задачу без суттєвого зниження точності результатів:

- магнітом'які матеріали описуються основною кривою намагнічування без урахування гістерезисних явищ;

- властивості постійних магнітів визначалися за залишковою магнітною індукцією та нахилом лінеаризованої ділянки кривої розмагнічування;

- область моделювання обмежувалася немагнітним контуром, у межах якого вектор магнітної індукції вважався дотичним до межі.

Оскільки математична модель є тривимірною, то можливо в повному обсязі врахувати повздовжні та поперечні кінцеві ефекти.

Для опису процесів у магнітній системі пристрою використовувалися рівняння магнітного поля у формі відносно векторного потенціалу A та граничних умов, що відображають взаємодію між джерелами магнітного поля та феромагнітними розрахунковими областями. Такий підхід забезпечує можливість дослідження розподілу магнітної індукції B , аналізу насичення магнітопроводу та оцінки ефективності передавання енергії в магнітній системі перетворювача:

$$\nabla^2 A = \mu \nabla \times M \quad (1)$$

$$n \times (A_1 - A_2) = 0 \quad (2)$$

$$n \times ([\mu_0^{-1} \nabla \times A - M] - [\mu_0^{-1} \nabla \times A - M]) \quad (3)$$

$$n \times A_i = 0 \quad (4)$$

де M – вектор намагнічування, A/m; A – векторний магнітний потенціал, Vb/m; A_1, A_2 – векторні магнітні потенціали на межі суміжних областей, Vb/m; A_i – вектор магнітного потенціалу на зовнішній межі розрахункової області, Vb/m; n – вектор нормалі.

Модель розроблена в програмному пакеті для мультифізичного моделювання COMSOL Multiphysics®. Сітка скінченних елементів розрахункової області досліджуваного генератора показана на рис. 2.

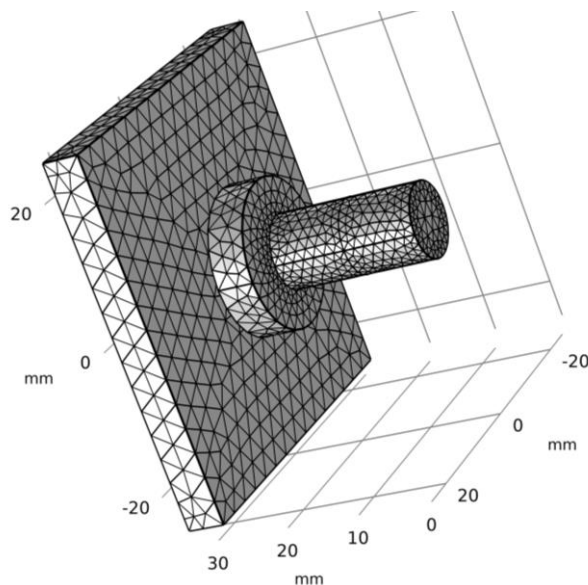


Рис. 2. Сітка скінченних елементів розрахункової області досліджуваного генератора

Результати моделювання. Розподіл магнітної індукції в об'ємі розрахункової області досліджуваного генератора в довільний момент часу показано на рис. 3.

Максимальне значення індукції близько 1,5 Т спостерігається на стику між двома постійними магнітами. В феромагнітній плиті магнітний потік практично відсутній. В композитному диску усереднене значення магнітної індукції знаходиться на рівні $\approx 0,4$ Тл. Величина проміжку між диском та магнітами і феромагнітною пластиною в даному розрахунку прийнята рівною 5 мм.

Червоні плями фонового зафарбування уздовж осі вказують на ділянки з насиченням матеріалу, що виникають у результаті підвищення магнітної індукції на місцях стику декількох постійних магнітів та прояву повздовжніх кінцевих ефектів. Це свідчить про ефективне використання енергії постійного магніту, проте вимагає подальшої оптимізації конструкції для зменшення локальних зон насичення та покращення рівномірності розподілу поля.

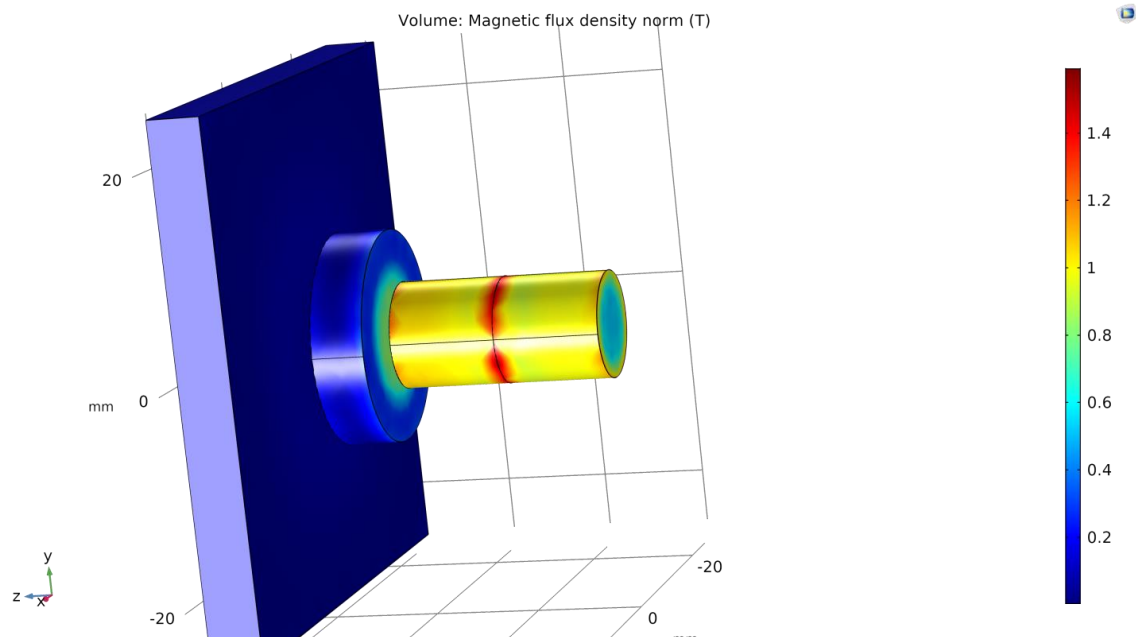


Рис. 3. Розподіл магнітної індукції в об'ємі розрахункової області досліджуваного генератора

Феромагнітний композит (2, рис.1) забезпечує передачу магнітного потоку від магніту до основного елемента конструкції (3, рис. 1) з мінімальними втратами, водночас впливаючи на характер замикання магнітних силових ліній і ступінь насичення магнітного потоку. Параметри d_2 , повітряного проміжку d_1 та відстані до основної феромагнітної пластини d_3 мають суттєвий вплив на магнітний зв'язок між елементами та ефективність енергоперетворення.

Характер замикання основного магнітного потоку досліджуваного генератора відображено на рис. 4.

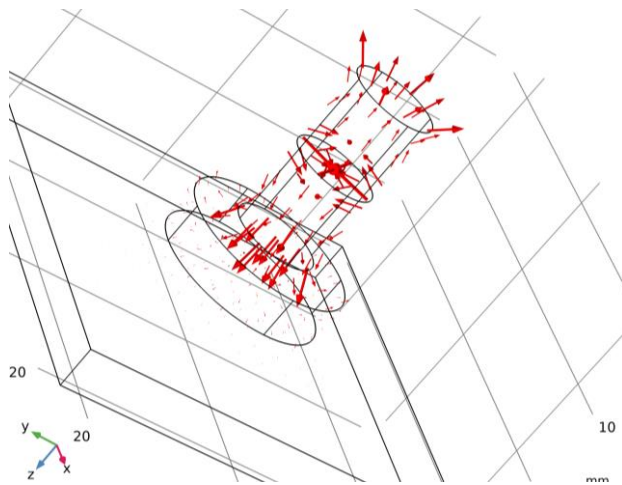


Рис. 4. Замикання основного магнітного потоку в системі

По рис. 4 видно, що магнітний потік виходить із північного полюса постійного магніту, проходить через повітряний проміжок та концентрується у феромагнітному елементі, після чого замикається на південний полюс через зворотну гілку магнітопроводу. Величина векторів магнітного потоку прямопропорційна їх величині, таким чином можливо оцінити його величину в тій чи іншій частині розрахункової області. Така структура ліній магнітної індукції є типовою для

аксіальних систем, де поле має виражену осьову симетрію та формується вздовж осі обертання.

Характер замикання силових ліній підтверджує утворення магнітного кола, у якому основна частина потоку проходить через активну зону перетворювача. Водночас спостерігається незначне розсіювання поля у периферійних ділянках, що пояснюється наявністю двох повітряних проміжків та відмінністю магнітних проникностей матеріалів, що можливо віднести до недоліків конструкції.

Усереднену величину магнітного потоку, що замикається в розрахунковій області досліджуваного спеціального перетворювача показано на рис. 5.

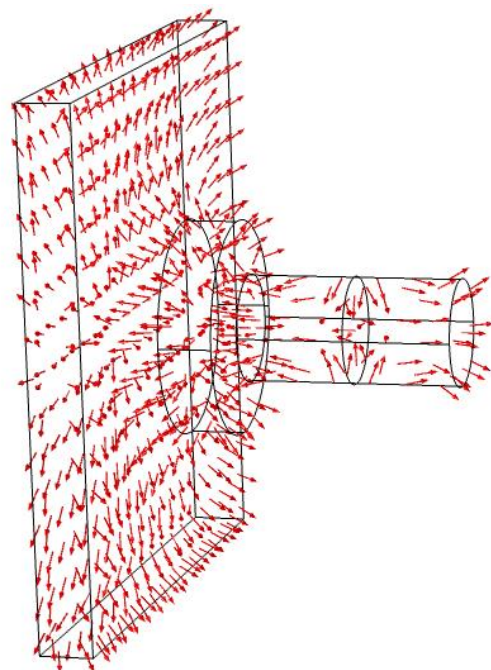


Рис. 5. Усереднена величина основного магнітного потоку в системі

Таким чином, аналіз розподілу магнітних ліній дозволяє підтвердити працездатність запропонованої конструкції, забезпечення замикання основного магнітного потоку та правильність вибору геометричних параметрів системи. Форма та густина силових ліній свідчать про стабільність поля у робочій зоні, що є необхідною умовою для ефективного енергетичного перетворення.

Для оцінки величини електромагнітного зусилля проведено окремий розрахунок. Розподіл електромагнітних зусиль, що діють на елементи конструкції досліджуваного генератора показано на рис. 6.

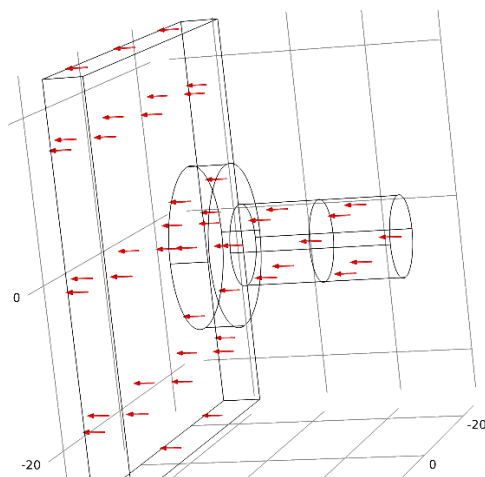


Рис. 6. Розподіл електромагнітних зусиль

Видно, що вектори електромагнітних зусиль мають найбільшу щільність в зоні повітряного проміжку, де спостерігається взаємодія магнітного поля рухомого елемента з полем обмотки. Це свідчить про інтенсивне передавання електромагнітної енергії між цими елементами та підтверджує наявність високих механічних напружень у даній області. Структура зусиль має переважно тангенціальну складову, що пов'язана з утворенням електромагнітного моменту, який забезпечує перетворення електромагнітної енергії у механічну.

Магнітні силові лінії основного потоку замикаються через магнітопровід, утворюючи симетричну систему, що характерна для генераторів із аксіальним напрямком потоку. При цьому силові лінії прагнуть мінімізувати магнітний опір кола, проходячи через ділянки з максимальною магнітною проникністю. Наявність незначних відхилень напрямків векторів у крайових зонах може бути зумовлена впливом кінцевих (повздовжніх) ефектів, які викликають спотворення магнітного поля в зоні переходу від активної частини до торцевої.

Отриманий розподіл дає можливість оцінити просторову структуру магнітного поля та механічних навантажень у вузлах конструкції. Такий аналіз є важливим для визначення оптимальних параметрів магнітопроводу, мінімізації вібрацій і шумів, а також підвищення загальної надійності електрогенератора спеціального призначення.

Величина електромагнітної сили буде суттєво залежати від магнітної проникності композитного матеріалу (№ 2, рис. 1). Результати розрахунку

електромагнітного зусилля, в залежності від величини відносної магнітної проникності показано у табл. 2.

Таблиця 2 – Залежність усередненої електромагнітної сили від відносної магнітної проникності композитного диску

Відносна магнітна проникність	Величина електромагнітної сили, Н
10	12,35
100	14,81
500	15,055
750	18,12
1000	21,73

Із зростанням відносної магнітної проникності μ_r від 10 до 1000 спостерігається суттєве збільшення електромагнітної сили від 12,35 Н до 21,73 Н. Це пояснюється зменшенням магнітного опору кола та, відповідно, збільшенням індукції магнітного поля в активних зонах генератора. Найбільше зростання сили спостерігається в діапазоні $\mu = 500\text{--}1000$, де матеріал наближається до насичення і починають проявлятися нелінійні властивості матеріалу.

Висновки.

1. В роботі розроблено тривимірну чисельну математичну модель електрогенератора спеціального призначення з аксіальним магнітним потоком, яка дає змогу дослідити розподіл електромагнітного поля та зусиль у досліджуваному генераторі. За допомогою розробленої тривимірної моделі визначено характер замикання основного магнітного потоку та проаналізовано вплив геометричних і конструктивних параметрів на ефективність її роботи.

2. Встановлено, що параметри магнітної системи, зокрема відносна магнітна проникність матеріалу магнітопроводу, суттєво впливають на величину електромагнітних зусиль у робочій зоні досліджуваного генератора. Із зростанням відносної магнітної проникності μ від 10 до 1000 величина сили збільшується з 12,35 Н до 21,73 Н, що пояснюється зниженням магнітного опору кола та підвищенням індукції магнітного поля.

3. Аналіз розподілу електромагнітних зусиль показав наявність нерівномірностей у кінцевих зонах магнітопроводу, пов'язаних із локальними ефектами насичення. Це потребує врахування при подальшій оптимізації конструкції генератора для забезпечення рівномірного поля та мінімізації механічних зусиль та деформацій.

Список літератури

1. Chumak V.V., Kovalenko M.A., Tsvinskiy S.S., Tkachuk I.V., Ponomarev O.I. Mathematical modeling of a Synchronous generator with combined excitation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. №1/5(103). С. 30–36.
2. Chumack, Vadim and Bazenov, Volodymyr and Tymoshchuk, Oksana and Kovalenko, Mykhailo and Tsyvinskiy, Serhii and Kovalenko, Iryna and Tkachuk, Ihor, 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.
3. Ostroverkhov, M., Chumack, V., Falchenko, M., & Kovalenko, M. (2022). Development of control algorithms for magnetoelectric generator with axial magnetic flux and double stator based on

- mathematical modeling . Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(5 (120), 6–17. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.267265>.
4. Коваленко, М., Бурлаков, А., & Коваленко, І. (2025). Моделювання характеристик двигуна постійного струму приводу паливної системи автомобіля. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика, 1(13), 37–43. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2025.1.08>.
 5. Чумак В.В., Коваленко М.А., Баженов В.А., Тимошук О.Л., Цивінський С.С. Математичне моделювання лінійного електромеханічного перетворювача енергії із постійними магнітами. електромеханічні і енергозберігаючі системи № 1/2023 (60). - с. 71-77. DOI <https://doi.org/10.32782/2072-2052.2023.1.60.7>.
 6. Hao, Z., Ma, Y., Wang, P., Luo, G., & Chen, Y. (2022). A review of axial-flux permanent-magnet motors: topological structures, design, optimization and control techniques. *Machines*, 10(12), 1178. <https://doi.org/10.3390/machines10121178>
 7. Ballestín-Bernad, V., Artal-Sevil, J. S., & Domínguez-Navarro, J. A. (2021). A review of transverse flux machines: topologies and design. *Energies*, 14(21), 7173. <https://doi.org/10.3390/en14217173>
 8. El-Hasan, T. S. (2023). Air-cored axial flux permanent-magnet generator for direct-driven micro wind turbines. *IET Renewable Power Generation*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12880>
 9. Yao, W.-S., Cheng, M.-T., & Yu, J.-C. (2020). Novel design of a coreless axial-flux permanent-magnet generator with three-layer winding coil for small wind turbines. *IET Renewable Power Generation*, 14(15), 2924–2932. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.0908>
 10. Todorov, G. D., Kamberov, K. H., & Zlatev, B. N. (2024). Research and development of a large-scale axial-flux generator for hydrokinetic power system. *Applied Sciences*, 14(22), 10564. <https://doi.org/10.3390/app142210564>
 11. Ruiz-Ponce, G., Arjona, M. A., Hernandez, C., & Escarela-Pérez, R. (2023). A review of magnetic gear technologies used in mechanical power transmission. *Energies*, 16(4), 1721. <https://doi.org/10.3390/en16041721>
 12. Yan, B., Li, X., Wang, X., & Yang, Y. (2024). A review on the field-modulated magnetic gears: development status, potential applications, and existent challenges. *IET Electrical Power Applications*, 18, 1–19. <https://doi.org/10.1049/elp2.12365>
 13. Abdel-Aziz, A., Elgenedy, M., & Williams, B. (2024). Review of switched reluctance motor converters and torque ripple minimisation techniques for electric vehicle applications. *Energies*, 17(13), 3263. <https://doi.org/10.3390/en17133263>
 14. Habib, A., et al. (2022). A systematic review on current research and developments on coreless / ironless axial-flux permanent-magnet machines. *IET Electrical Power Applications*. <https://doi.org/10.1049/elp2.12218>.
 - shunt and permanent magnet excitation (December 21, 2021). Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(5 (114), 56–62.
 3. Ostroverkhov, M., Chumack, V., Falchenko, M., & Kovalenko, M. (2022). Development of control algorithms for magnetoelectric generator with axial magnetic flux and double stator based on mathematical modeling . Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(5 (120), 6–17. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.267265>.
 4. Kovalenko, M., Burlakov, A., & Kovalenko, I. (2025). Modeliuvannya kharakterystyk dvyhuna postiinoho strumu pryvodu palyvnoi systemy avtomobilia. Visnyk NTU «KhPI». Seria: Problemy udoskonaluvannya elektrychnykh mashyn I apparativ. Teoriia I praktyka, 1(13), 37–43. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2025.1.08>.
 5. Chumak V.V., Kovalenko M.A., Bazhenov V.A., Tymoshchuk O.L., Tsyvinskyi S.S. Matematychnе modeliuвання liniinoho elektromekhanichnoho peretvoriuvacha enerhii iz postiinymy mahnitamy. elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy № 1/2023 (60). - s. 71-77. DOI <https://doi.org/10.32782/2072-2052.2023.1.60.7>.
 6. Hao, Z., Ma, Y., Wang, P., Luo, G., & Chen, Y. (2022). A review of axial-flux permanent-magnet motors: topological structures, design, optimization and control techniques. *Machines*, 10(12), 1178. <https://doi.org/10.3390/machines10121178>
 7. Ballestín-Bernad, V., Artal-Sevil, J. S., & Domínguez-Navarro, J. A. (2021). A review of transverse flux machines: topologies and design. *Energies*, 14(21), 7173. <https://doi.org/10.3390/en14217173>
 8. El-Hasan, T. S. (2023). Air-cored axial flux permanent-magnet generator for direct-driven micro wind turbines. *IET Renewable Power Generation*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12880>
 9. Yao, W.-S., Cheng, M.-T., & Yu, J.-C. (2020). Novel design of a coreless axial-flux permanent-magnet generator with three-layer winding coil for small wind turbines. *IET Renewable Power Generation*, 14(15), 2924–2932. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.0908>
 10. Todorov, G. D., Kamberov, K. H., & Zlatev, B. N. (2024). Research and development of a large-scale axial-flux generator for hydrokinetic power system. *Applied Sciences*, 14(22), 10564. <https://doi.org/10.3390/app142210564>
 11. Ruiz-Ponce, G., Arjona, M. A., Hernandez, C., & Escarela-Pérez, R. (2023). A review of magnetic gear technologies used in mechanical power transmission. *Energies*, 16(4), 1721. <https://doi.org/10.3390/en16041721>
 12. Yan, B., Li, X., Wang, X., & Yang, Y. (2024). A review on the field-modulated magnetic gears: development status, potential applications, and existent challenges. *IET Electrical Power Applications*, 18, 1–19. <https://doi.org/10.1049/elp2.12365>
 13. Abdel-Aziz, A., Elgenedy, M., & Williams, B. (2024). Review of switched reluctance motor converters and torque ripple minimisation techniques for electric vehicle applications. *Energies*, 17(13), 3263. <https://doi.org/10.3390/en17133263>
 14. Habib, A., et al. (2022). A systematic review on current research and developments on coreless / ironless axial-flux permanent-magnet machines. *IET Electrical Power Applications*. <https://doi.org/10.1049/elp2.12218>

References (transliterated)

1. Chumak V.V., Kovalenko M.A., Tsyvinskyi S.S., Tkachuk I.V., Ponomarev O.I. Mathematical modeling of a Synchronous generator with combined excitation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. №1/5(103). С. 30–36.
2. Chumack, Vadim Bazhenov, Volodymyr and Tymoshchuk, Oksana and Kovalenko, Mykhailo and Tsyvinskyi, Serhii and Kovalenko, Iryna and Tkachuk, Ihor, Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic

Надійшла (received) 03.10.2025

Відомості про авторів / About the authors

Коваленко Михайло Анатолійович (Mykhaylo Kovalenko) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри електромеханіки; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>; e-mail: kovalenko87ma@gmail.com.

Чумак Вадим Володимирович (Chumack Vadim Vladimirovich) – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри електромеханіки; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8401-7931>; e-mail: chumack_kpi@ukr.net.

Тимошук Оксана Леонідівна (TymoshchukOksana) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", кафедра математичних методів системного аналізу навчально-наукового, Інституту прикладного системного аналізу; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1863-3095>; e-mail: oxana.tim@gmail.com.

Коваленко Ірина Яківна (Kovalenko Iryna) – асистент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", аспірант кафедри нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1097-2041>; e-mail: 2048141@ukr.net.

Вишневецький Олексій Володимирович (Alexey Vishnevsky) – асистент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", асистент кафедри електромеханіки, <https://orcid.org/0000-0001-7814-9030>; E-mail: alexeyvishn1730@gmail.com.