

***V.V. CHUMAK, M.A. KOVALENKO, I.Y. KOVALENKO, I.V. TKACHUK***

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІБРИДНОГО МАГНІТНОГО РЕДУКТОРА ДЛЯ АВТОНОМНОЇ ВІТРОУСТАНОВКИ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ**

В традиційних вітрових турбінах для передачі крутного моменту використовується механічний редуктор. Цей пристрій перетворює малу швидкість обертання лопатей вітрової турбіни у високу швидкість обертання валу генератора. Механічні коробки передач відрізняються низькою надійністю. Вони складаються з обертових шестерень, весь крутний момент між якими передається через контакт зубів в одній точці, що супроводжується тертям. Магнітні мультиплікатори ефективніші за зубчасті редуктори. Вони не містять деталей, що зношуються, і мають відносно високу щільність крутного моменту. Модулятор перетворює магнітне поле між внутрішнім і зовнішнім ротором, за рахунок чого змінюється швидкість обертання. Цей пристрій має ряд переваг перед механічною коробкою передач - взаємодія між обертовими елементами (передача крутного моменту) відбувається по всій їх площі, при цьому шестерні механічних коробок передач сприймають все передане зусилля в одній точці контакту між собою. Актуальним напрямком є дослідження автономних вітроустановок, побудованих на основі магнітних редукторів. Це дозволить знизити експлуатаційні витрати, підвищити ефективність перетворення енергії вітру в електричну та підвищити надійність роботи вітроустановки в цілому. Метою роботи є розробка двовимірної польової математичної моделі гібридного магнітного редуктора для оцінки його параметрів та характеристик і проведення оптимізації його геометричних розмірів. Генератор з вбудованим магнітним мультиплікатором є об'єктом даного дослідження. Магнітний мультиплікатор під час роботи створює обертове магнітне поле, яке можна використовувати для індукції ЕРС в обмотці генератора. Такий генератор компактніший за редукторний привід, тому такий варіант обрано в якості прототипу в даному дослідженні. Розроблено геометричні моделі гібридного генератора з магнітним редуктором та розроблено числові польові математичні моделі для аналізу його параметрів і характеристик. Проведено аналіз електромагнітного поля та характеристик базового генератора в програмному комплексі COMSOL Multiphysics, на основі якого проведено оптимізацію його геометричних розмірів для оптимізації масогабаритних показників.

**Ключові слова:** безмультиплікаторна вітроелектроустановка, магнітний редуктор, гібридний генератор, постійні магніти, параметрична оптимізація.

***V.V. CHUMAK, M.A. KOVALENKO, I.Y. KOVALENKO, I.V. TKACHUK***

## **MATHEMATICAL MODELING OF A HYBRID MAGNETIC GEAR FOR AN AUTONOMOUS LOW-POWER WIND TURBINE**

In traditional wind turbines, a mechanical gearbox is used to transmit the torque. This device converts the low rotation speed of the wind turbine blades into the high rotation speed of the generator shaft. Mechanical gearboxes are characterized by low reliability. They consist of rotating gears, all the torque between which is transmitted through the contact of the teeth at one point, which is accompanied by friction. Magnetic multipliers are more efficient than gear reducers. They contain no wearing parts and have a relatively high torque density. The modulator transforms the magnetic field between the inner and outer rotor, due to which the speed of rotation changes. This device has a number of advantages over a mechanical gearbox - the interaction between rotating elements (torque transmission) occurs over their entire area, while the gears of mechanical gearboxes perceive all the transmitted force at one point of contact between them. Research of autonomous wind turbines built on the basis of magnetic gearboxes is a relevant direction. This will reduce operating costs, increase the efficiency of converting wind energy into electricity, and increase the reliability of the wind turbine as a whole. The purpose of the work is the development of a two-dimensional field mathematical model of a hybrid magnetic gearbox for the evaluation of its parameters and characteristics and the optimization of its geometric dimensions. A generator with a built-in magnetic multiplier is the object of this study. The magnetic multiplier during operation creates a rotating magnetic field that can be used to induce emf in the generator winding. Such a generator is more compact than a gear drive, so this option was chosen as a prototype in this study. Geometrical models of a hybrid generator with a magnetic gearbox were developed and numerical field mathematical models were developed for the analysis of its parameters and characteristics. An analysis of the electromagnetic field and characteristics of the basic generator was carried out in the COMSOL Multiphysics software complex, on the basis of which optimization of its geometric dimensions was carried out to optimize mass and dimensional indicators

**Keywords:** multiplierless wind power plant, magnet reducer, hybrid generator, permanent magnets, parametric optimization.

**Вступ.** Використання відновлюваних джерел енергії є перспективним напрямком розвитку електроенергетики. Враховуючи постійно зростаюче споживання електроенергії, зростаючий рівень забруднення та виснаження викопних природних ресурсів, існує нагальна потреба збільшити темпи заміни традиційних джерел електроенергії відновлюваними джерелами енергії в глобальному масштабі. Одним із способів використання відновлюваних джерел енергії для виробництва електроенергії є використання вітрових турбін. Цей напрямок отримав широке застосування в світі, а в останнє десятиліття і в Україні, особливо в регіонах з високим вітроенергетичним потенціалом.

В традиційних вітрових турбінах для передачі крутного моменту використовується механічний редуктор. Цей пристрій перетворює малу швидкість обертання лопатей вітрової турбіни у високу швидкість обертання валу генератора. Механічні коробки пере-

дач відрізняються низькою надійністю. Вони складаються з обертових шестерень, весь крутний момент між якими передається через контакт зубів в одній точці, що супроводжується тертям. Ці механізми необхідно періодично змащувати і ремонтувати, що негативно позначається на експлуатаційних витратах. Зі зниженням температури рідке мастило в механічних редукторах густіє, а метал зубчастих коліс стає більш крихким, що сильно обмежує використання вітрогенераторів, особливо у холодних кліматичних умовах. Крім того, виготовлення зубчастих коліс великої потужності підвищує вартість редуктора, а організація їх виробництва в умовах вітчизняної промисловості складна.

Магнітні мультиплікатори ефективніші за зубчасті редуктори [1]. Вони не містять деталей, що зношуються, і мають відносно високу щільність крутного моменту близько  $200 \text{ кН} \cdot \text{м} / \text{м}^3$  [2], що дозволяє їм конкурувати з механічними коробками передач за масою та розмірами. Таким чином, використання генераторів з

© В.В. Чумак, М.А. Коваленко, І.Я. Коваленко, І.В. Ткачук, 2023

інтегрованим магнітним мультиплікатором підвищить надійність, термін служби, зменшить витрати на технічне обслуговування, а також покращить вагу та розміри вітрогенераторів порівняно з традиційними системами прямого приводу.

Використання магнітних передач забезпечує багато технологічних та експлуатаційних переваг, таких як низький рівень шуму та вібрації, менші вимоги до обслуговування та вищу надійність та ефективність порівняно з механічними системами. Магнітні передачі широко використовуються в промисловості [3], транспорті [4], автономних енергетичних установках [5, 6], в різноманітному електричному та електромеханічному обладнанні [7]. За конструктивним виконанням магнітні редуктори бувають [8, 9]: циліндричні, осьові, конічні, сферичні та лінійні. За характером замикання основного магнітного потоку: з радіальним магнітним потоком, аксіальним магнітним потоком і радіально-осевим магнітним потоком [10, 11, 12]. Переважно більшість складають системи з радіальною (коаксіальною) магнітною системою, яка активно обговорюється в літературі [8, 9, 13, 14], оскільки вона забезпечує більш високе значення передавального крутного моменту порівняно з іншими конфігураціями магнітних передач.

Принцип дії магнітних передач відомий давно і досить детально описаний у літературі [15, 16]. Він заснований на взаємодії постійних магнітів на внутрішньому і зовнішньому роторі, магнітні потоки яких взаємодіють через спеціальний пристрій – модулятор. Модулятор розташований між внутрішнім і зовнішнім ротором і складається з феромагнітних сегментів, розділених немагнітопровідними вставками.

Модулятор перетворює магнітне поле між внутрішнім і зовнішнім ротором, за рахунок чого змінюється швидкість обертання. Цей пристрій має ряд переваг перед механічною коробкою передач - взаємодія між обертовими елементами (передача крутного моменту) відбувається по всій їх площі, при цьому шестерні механічних коробок передач сприймають все передане зусилля в одній точці контакту між собою. У пристрої магнітного мультиплікатора, за винятком підшипників, немає деталей, що швидко зношуються, тому він не вимагає постійного обслуговування, змащування і частих ремонтів. Крім того, при перевищенні максимального крутного моменту колеса починають крутитися, що може захистити механізми від перевантаження. Механічна коробка передач просто виходить з ладу при перевантаженні і вимагає тривалого і дорогого ремонту.

На відміну від електричної машини, де момент створюється від взаємодії струму і постійних магнітів, в магнітному редукторі він створюється від взаємодії постійних магнітів внутрішнього і зовнішнього ротора один з одним через модулятор. Постійні магніти можна еквівалентно замінити обмоткою з щільністю струму близько  $100 \text{ А/мм}^2$ , а такі значення в електричних машинах практично неможливі або вимагають дуже складних систем охолодження. Тому крутний момент одиниці об'єму магнітного редуктора значно більше, ніж у сучасних синхронних машин з постійними магнітами.

Проте конструкція магнітних редукторів має суттєвий недолік – коливання передавального моменту [17, 18], що негативно впливає на точність і надійність системи, знижує якість електроенергії в системах автономного живлення та ресурс підшипників. Для дослідження пульсацій магнітного потоку використовуються математичні моделі на основі методу скінченних елементів [19]. Також, до недоліків можливо віднести досить високу вартість висококоерцитивних постійних магнітів без яких робота магнітних редукторів є практично неможлива.

**Актуальність.** Магнітний редуктор є відносно новим електромеханічним перетворювачем енергії. Його активне використання та обговорювання в останні десятиліття стало можливим завдяки стрімкому розвитку постійних магнітів, їх потужності, параметрів та характеристик.

Актуальним напрямком є дослідження автономних вітроустановок, побудованих на основі магнітних редукторів. Це дозволить знизити експлуатаційні витрати, підвищити ефективність перетворення енергії вітру в електричну та підвищити надійність роботи вітроустановки в цілому.

Особливий інтерес для дослідження представляють гібридні магнітні редуктори, які являють собою органічне поєднання магнітного редуктора та електрогенератора в одному перетворювачі.

**Метою** роботи є розробка двовимірної польової математичної моделі гібридного магнітного редуктора для оцінки його параметрів та характеристик і проведення оптимізації його геометричних розмірів.

Для пошуку оптимальних геометричних співвідношень досліджуваного гібридного магнітного редуктора, величини повітряного проміжку, використовується параметризована модель, яка дозволяє змінювати геометрію під час електромагнітного розрахунку і побудована на основі математичної моделі базового магнітного редуктора.

**Об'єкт дослідження.** Існує два основних напрямки, що дозволяють відмовитись від використання механічних мультиплікаторів в автономних вітроустановках. Перший напрямок – використання магнітного мультиплікатора для заміни механічного для створення приводу генератора. Другий – розробка генератора з вбудованим магнітним мультиплікатором. Магнітний мультиплікатор під час роботи створює обертове магнітне поле, яке можна використовувати для індукції ЕРС в обмотці генератора. Такий генератор компактніший за редукторний привід, тому такий варіант обрано в якості прототипу в даному дослідженні.

Як і магнітний редуктор, генератор має два ротори – основний тихохідний і допоміжний швидкохідний. Статор генератора складається з двох частин – внутрішніх постійних магнітів і трифазної обмотки. Загальні параметри інтегрованого магнітного редуктора та генератора наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри інтегрованого магнітного редуктора

Параметр	Величина
Кількість пазів статора	12
Аксiальна довжина статора	100 мм
Зовнішній діаметр статора генератора	350 мм
Зовнішній діаметр ротора генератора	265 мм
Товщина постійних магнітів генератора	10 мм
Товщина феромагнітних вставок магнітного редуктора	6 мм
Зовнішній радіус внутрішнього ротора магнітного редуктора	92,5 мм
Товщина постійних магнітів ротора магнітного редуктора	10 мм
Внутрішній та зовнішній повітряний проміжок	0,5 мм

На рис. 1 показано структуру розробленого базового гібридного генератора з вбудованим магнітним редуктором.

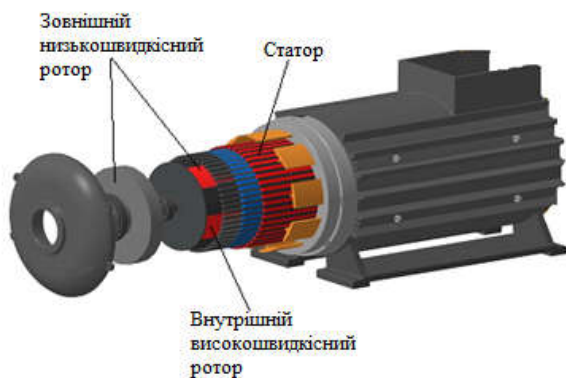


Рис. 1. Базова конструкція гібридного магнітного редуктора-генератора

Статор генератора гібридного магнітного редуктора складається з шихтованого магнітного осердя з пазами, в яких розміщується трифазна обмотка.

Магнітний редуктор знаходиться у внутрішній розточці статора і виконує роль мультиплікатора, тобто підвищує вхідну швидкість ротора вітроустановки то номінального або близького до номінального значення обертання магнітного поля статора генератора.

**Математична модель.** Моделювання статичних характеристик гібридного магнітного редуктора та генератора виконується із використанням засобів двовимірного польового математичного моделювання. Розрахунок магнітного поля в статичному режимі та двовимірному наближенні проводився з урахуванням наступних припущень:

- не враховуються кінцеві ефекти;
- магнітом'які матеріали задані за основною кривою намагнічування без урахування магнітного гістерезису;
- властивості постійних магнітів визначаються за залишковою магнітною індукцією та кутом нахилу лінеаризованої кривої розмагнічування;
- властивість навантаження генератора розраховувалась крок за кроком без урахування магнітних втрат;

– область розрахунку обмежена немагнітним колом, у будь-якій точці якого вектор магнітної індукції вважається дотичним.

Рівняння та граничні умови відносно векторного магнітного потенціалу  $A$  та джерел магнітного поля записуються в наступному вигляді:

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

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

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

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

де  $M$  – вектор намагнічування, A/m;  $A$  – векторний магнітний потенціал, Vb/m;  $A_1, A_2$  – векторні магнітні потенціали на межі суміжних областей 1 і 2, Vb/m;  $A_i$  – вектор магнітного потенціалу на зовнішній межі розрахункової області, Vb/m;  $n$  – вектор нормалі.

При моделюванні методом скінчених елементів обертання ротора забезпечується технікою смуги руху, а метод віртуальної роботи Кулона використовувався для розрахунку крутного моменту в рухомих областях досліджуваного гібридного редуктора:

$$T_e = \frac{L}{\mu_0} \sum_{e=1}^N \int_{\Omega} \left( -B^T G^{-1} \frac{\partial G}{\partial \theta} + \frac{1}{2} \frac{B^2}{|G|} \frac{\partial |G|}{\partial \theta} \right) d\Omega \quad (5)$$

В рівнянні (5):  $B = [B_x, B_y]$ ,  $B = \|B\|$ ,  $G$  – матриця Якобі глобальних координат відносно локальних координат елементів та  $[G]$  є визначником  $G$ .

Значення індукованої ЕРС в обмотці якоря генератора описується наступним рівнянням:

$$E_1 = \frac{\sqrt{2}\pi^2}{4} a_i \cdot k_w \cdot k_s \cdot N_1 \cdot B \cdot D_1^2 (1 - k_d^2) n_s \quad (6)$$

де  $N_1$  та  $n_s$  – кількість витків котушки на фазу в обмотці статора та швидкість ротора в об/хв відповідно;  $a_i$  – відношення ширини полюса до кроку полюса,  $k_w$  – обмотувальний коефіцієнт,  $k_s$  – коефіцієнт скосу,  $B$  – амплітудне значення магнітної індукції в повітряному проміжку,  $D_1$  – діаметр генератора,  $k_d$  – відношення внутрішнього діаметра генератора до зовнішнього.

Математична модель гібридного магнітного редуктора з генератором, показана на рис. 2. Модель розроблена в програмному забезпеченні COMSOL Multiphysics®.

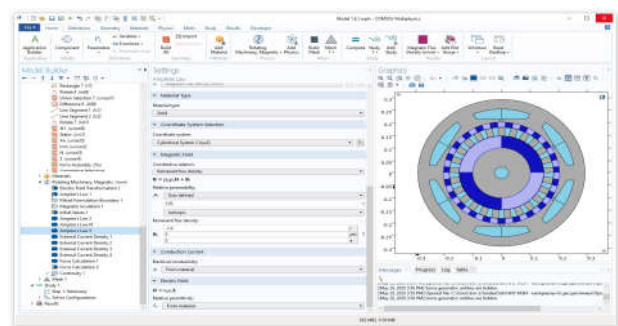


Рис. 2. Робоче вікно COMSOL Multiphysics®: щільність струму в обмотках якоря, параметри постійних магнітів та інших елементів конструкції

Модель розглядається в поперечному перерізі, під час розрахунків виконується поправка, яка враховує аксіальну довжину генератора та магнітного редуктора. Модель налаштована параметрично – усі її параметри можна змінювати в розділі змінних, показаному на рис. 2. Це зроблено для того, щоб мати можливість

оптимізувати такі параметри, як кількість пар магнітних полюсів, діаметри статорів і роторів, розташування і переріз обмоток і т.ін.

У двовимірній математичній моделі не враховувалися втрати на вихрові струми та гістерезис. Нелінійні властивості електротехнічної сталі встановлюються за допомогою основної кривої намагнічення.

Намагнічування всіх постійних магнітів у моделі здійснювалося вздовж радіальних напрямків (від центру або до центру залежно від полюса магніту). Як матеріал для постійних магнітів обрано магніти N-42 NdFeB. Залишкова магнітна індукція приймається рівною 1,39 Тл на основі характеристик матеріалу.

Сітка скінченних елементів досліджуваного об'єкта показано на рис. 3.

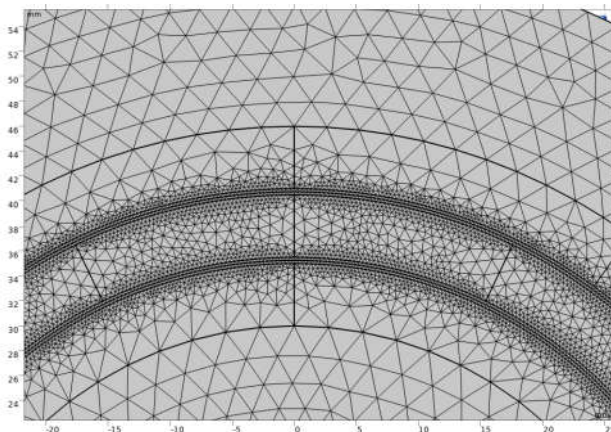


Рис. 3. Сітка скінченних елементів фрагмента розрахункової області гібридного редуктора

Загальна кількість елементів сітки у двовимірній моделі 29684 трикутних елементів, 88 вершинних елементів, 6266 крайових елементів.

Побудова сітки необхідна для відображення кінцевого результату розрахунку та дискретного представлення криволінійної геометрії.

Використовується автоматичний генератор сіток скінченних елементів. За основний елемент під час побудови сітки вибрано трикутний елемент. Так як точність розрахунку електромагнітного поля залежить від похибок апроксимації шуканої функції, то для обґрунтування кінцево-елементної моделі потрібні дослідження необхідної частоти розбиття елементів магнітної системи.

Як показує досвід, з найменшим кроком слід розбивати області, якими проходить інтегрування при розрахунку електромагнітного моменту, а також елементи з різкою зміною магнітного поля. З цієї точки зору визначальним елементом магнітної системи є низькошвидкісний ротор, оскільки саме в ньому відбувається модуляція магнітного поля з утворенням великої кількості просторових гармонік, отже, розподіл магнітного поля в цій області має різко неоднорідний характер.

**Результати моделювання.** Для визначення величини навантаження задавалось амплітудне значення щільності струму в обмотках на рівні 3 А/мм<sup>2</sup>. У фазах В і С щільність встановлювалася як половина пікового

значення – точки на графіку трифазної системи. Розподіл густини струму в гібридному магнітному редукторі показано на рис. 4.

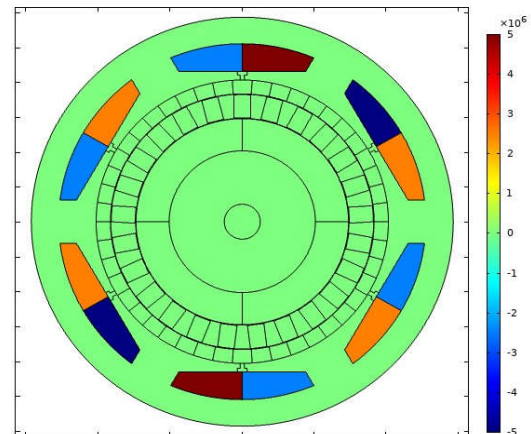


Рис. 4. Розподіл густини струму в обмотках гібридного магнітного редуктора

Розподіл та магнітної індукції та векторного магнітного потенціалу в поперечному перерізі розрахункової області гібридного магнітного редуктора показано на рис. 5.

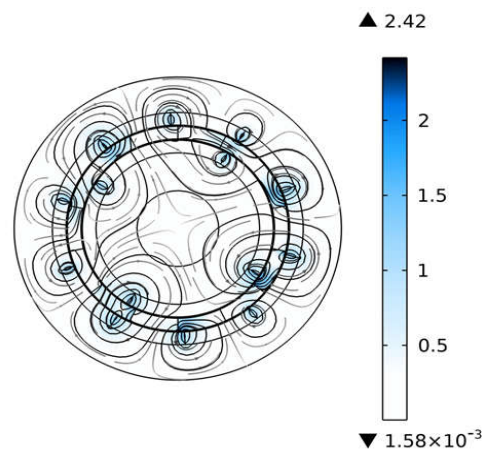


Рис. 5. Розподіл магнітної індукції та векторного магнітного потенціалу гібридного магнітного редуктора

Магнітна індукція (рис. 5) в межах досліджуваної області розподілена рівномірно, що свідчить про адекватність розрахунку та відсутність похибок у результатах моделювання. Середнє значення магнітної індукції в ярмі генератора складає 1,2-1,4 Тл, а в найбільш насичених областях полюсних наконечників модулятора близько 2 Тл.

Амплітудне значення густини струму в обмотці якоря генератора складає близько  $\pm 5$  А/мм<sup>2</sup>, що знаходиться в межах допустимих для мідного матеріалу обмотки якоря.

У результаті чисельного моделювання отримано статичний момент внутрішнього, зовнішнього ротора та модулятора магнітної передачі, як показано на рис. 6. Статичний момент має синусоїдальний характер.

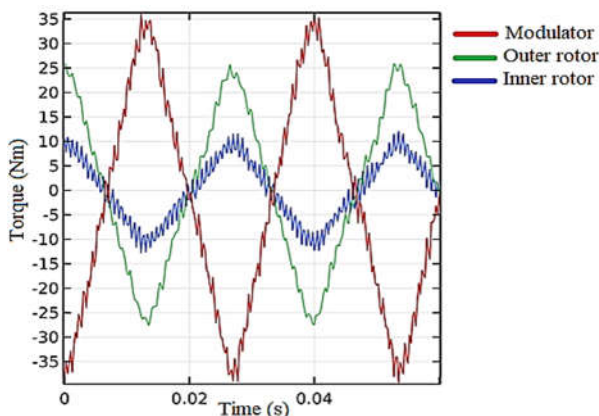


Рис. 6. Статичний крутний момент внутрішнього, зовнішнього ротора та модулятора

Статичний крутний момент модулятора становить 38,4 Н·м, що є сумою внутрішнього і зовнішнього магнітного крутного моменту ротора.

Аналізуючи рис. 6 бачимо, що статична крива крутного моменту на внутрішньому роторі не є стандартною синусоїдальною через наявність постійних магнітів. Також бачимо що статичний момент на зовнішньому ротора складає 25,9 Н·м, що більше на 140% за момент на внутрішньому роторі, який складає  $\approx 10,5$  Н·м.

Період хвилі визначається кількістю пар полюсів на внутрішньому роторі  $T_1$ ,  $T_1 = 2p/N_1$ .

Хвилі також мають пульсації. Ці пульсації пов'язані з наявністю так званого зубцевого моменту – електромагнітного моменту, викликаного взаємодією постійних магнітів ротора із сталевими елементами модулятора. Для магнітного редуктора зубцевий момент кожного з роторів визначається як момент, необхідний для утримання відповідного ротора в заданому положенні, тоді як інший ротор перебуває в положенні магнітної рівноваги.

**Параметрична оптимізація гібридного магнітного редуктора.** Параметрична оптимізація геометричних розмірів досліджуваного генератора та магнітного редуктора проводилась шляхом зміни таких параметрів, як: кількість полюсів на статичній і рухомій частинах, діаметри роторів і товщина постійних магнітів. Критерієм оптимізації досліджуваного об'єкту є максимальна вихідна потужність при мінімальних масогабаритних показниках. Для модифікованої конструкції була обрана нова схема з'єднання обмоток, що наведена на рис. 7.

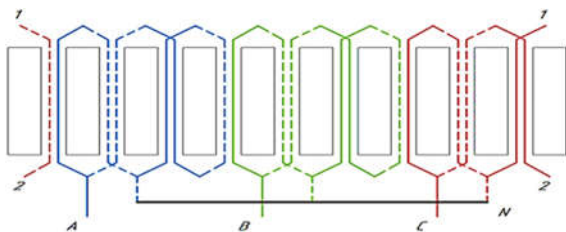


Рис. 7. Схема обмотки генератора

Цей тип обмоток виконаний по типу багат шарової обмотки з декількома періодами дає найкращі характеристики та дозволяє знизити рівень магнітних пульсацій [20, 21].

На рис. 8 показано розподіл густини струму в обмотках нової, оптимізованої моделі генератора.

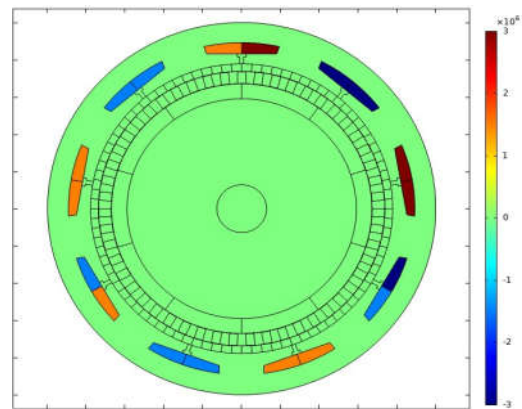


Рис. 8. Розподіл густини струму в оптимізованій конструкції генератора

Параметри магнітної системи оптимізованого гібридного генератора представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Параметри оптимізованого гібридного генератора та магнітного редуктора

Змінна	Параметр	Величина
$D_g$	Зовнішній діаметр статора генератора	100 мм
$L_g$	Аксіальна довжина генератора	150 мм
$n_g$	Швидкість обертання низькошвидкісного ротора	27 об/хв
$M_{max2}$	Максимальний момент генератора	25,4 Н·м
$M_m$	Питома густина моменту відносно ваги постійних магнітів	15,7 Н·м / кг
$M^*$	Величина питомого електромагнітного моменту	19,5 Н·м / м <sup>3</sup>
$M'$	Максимальна величина моменту редуктора	24,2 Н·м
$P_G$	Максимальна потужність генератора	5,0 кВт
$J_l$	Величина густини струму в обмотці якоря генератора	2,2 А/мм <sup>2</sup>

Розподіл вектору намагніченості та магнітної індукції в розрахунковій області оптимізованого гібридного генератора та магнітної передачі показано на рис. 9.

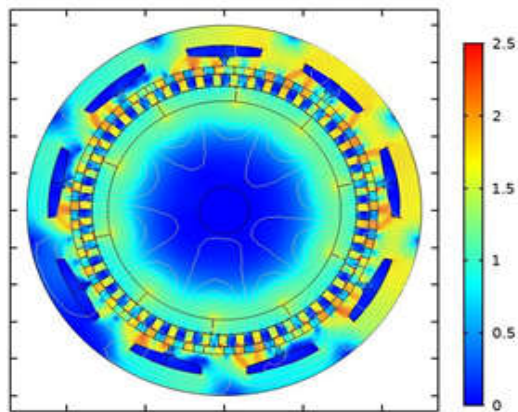


Рис. 9. Розподіл векторів намагніченості та магнітної індукції в оптимізованій конструкції генератора

Розроблений генератор є безщітковою синхронною електричною машиною без обмотки збудження. Він має 5 пар полюсів, що утворюються за допомогою постійних магнітів на внутрішньому роторі, 46 пар полюсів на статорі та 51 сталевих елементів в модуляторі.

**Висновки.** Розроблено геометричні моделі гібридного генератора з магнітним редуктором та розроблено числові польові математичні моделі для аналізу його параметрів і характеристик.

Проведено аналіз електромагнітного поля та характеристик базового генератора в програмному комплексі COMSOL Multiphysics, на основі якого проведено оптимізацію його геометричних розмірів для оптимізації масогабаритних показників. Розрахунковий крутний момент генератора становить 25,4 Н·м, а максимальний крутний момент магнітного редуктора становить 24,2 Н·м.

Розроблений гібридний електрогенератор є більш ефективним, ніж традиційна система генератора з механічною передачею, що підтверджується такими показниками: генератор з інтегрованим магнітним редуктором має величину питомого крутного моменту  $M=19,5$  Н·м/м<sup>3</sup> при розмірах 100×100×150 мм; базовий генератор має такі характеристики:  $M = 2,05$  Н·м/м<sup>3</sup> при розмірах 70×70×100 мм, що дозволяє використовувати його з коробкою передач з габаритними розмірами 100×110×150 мм.

Розміри нового генераторно-магнітного редуктора дозволяють встановлювати його в стандартну гондолу промислового вітрогенератора потужністю 5 кВт.

#### Список літератури

- Jian, Huang & Yao, Ligang & Li, Wen-jian & Zhang, Jun. (2017). Design and realization of a novel magnetic nutation drive for industry robotic wrist reducer. *Industrial Robot: An International Journal*. 44. 58-63. 10.1108/IR-04-2016-0130.
- Yu, W & Wang, C & Xu, T. (2019). The design method of a novel magnetic suction gear reducer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 504. 012093. 10.1088/1757-899X/504/1/012093.
- S. Hasanpour, M. Johnson, M. C. Gardner and H. A. Toliyat, "Cycloidal Reluctance Magnetic Gears for High Gear Ratio Applications," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 6, pp. 1-10, June 2022, Art no. 8001210, doi: 10.1109/TMAG.2022.3163419.
- M. C. Gardner, B. Praslicka, M. Johnson and H. A. Toliyat, "Optimization of Coaxial Magnetic Gear Design and Magnet Material Grade at Different Temperatures and Gear Ratios," in *IEEE Transactions on*

- Energy Conversion*, vol. 36, no. 3, pp. 2493-2501, Sept. 2021, doi: 10.1109/TEC.2021.3054806.
- B. Dai, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Tachiya and K. Kuritani, "Cogging Torque Reduction of Integer Gear Ratio Axial-Flux Magnetic Gear for Wind-Power Generation Application by Using Two New Types of Pole Pieces," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 8, pp. 1-5, Aug. 2022, Art no. 8002205, doi: 10.1109/TMAG.2022.3159002.
- Moghim, Ali & Aliabadi, Mahmood & Farahani, Hassan. (2022). Triple-speed coaxial magnetic gear for wind turbine applications: introduction and comprehensive analysis. *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*. 41. 10.1108/COMPEL-01-2022-0001.
- K. Aiso, K. Akatsu and Y. Aoyama, "A Novel Flux-Switching Magnetic Gear for High-Speed Motor Drive System," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 6, pp. 4727-4736, June 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.2988230.
- Ruiz-Ponce, G.; Arjona, M.A.; Hernandez, C.; Escarela-Perez, R. A Review of Magnetic Gear Technologies Used in Mechanical Power Transmission. *Energies* 2023, 16, 1721. <https://doi.org/10.3390/en16041721>
- Y. Wang, M. Filippini, N. Bianchi and P. Alotto, "A Review on Magnetic Gears: Topologies, Computational Models, and Design Aspects," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 5, pp. 4557-4566, Sept.-Oct. 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2916765.
- S. S. Nielsen, H. Y. Wong, H. Baninajar, J. Z. Bird and P. O. Rasmussen, "Pole and Segment Combination in Concentric Magnetic Gears: Vibrations and Acoustic Signature," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 37, no. 3, pp. 1644-1654, Sept. 2022, doi: 10.1109/TEC.2022.3151654.
- E. -J. Park, S. -Y. Jung and Y. -J. Kim, "Torque and Loss Characteristics of Magnetic Gear by Bonded PM Magnetization Direction," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 57, no. 6, pp. 1-4, June 2021, Art no. 8001304, doi: 10.1109/TMAG.2021.3064705.
- Syam, Sudirman & Kurniati, Sri & Ramang, Ruslan. (2022). Design and Characteristics of Axial Magnetic Gear Using Rectangular Magnet. 10.31219/osf.io/5c724.
- Mizuana, Yuma & Nakamura, Kenji & Suzuki, Yuma & Oishi, Yuhei & Tachiya, Yuichi & Kuritani, Kingo. (2020). Development of spoke-type IPM magnetic gear. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 64. 771-778. 10.3233/JAE-209389.
- Cansiz, Ahmet & Akcyerden, Emre. (2019). The use of high temperature superconductor bulk in a co-axial magnetic gear. *Cryogenics*. 98. 10.1016/j.cryogenics.2019.01.008.
- Tzouganakis, Panteleimon & Gakos, Vasilios & Kalligeros, Christos & Papalexis, Christos & Tsolakis, Antonios & Spitas V. (2022). Torque ripple investigation in coaxial magnetic gears. *MATEC Web of Conferences*. 366. 01004. 10.1051/mateconf/202236601004.
- Misron, N.; Mohd Saini, L.; Aris, I.; Vaithilingam, C.A.; Tsuyoshi, H. Simplified Design of Magnetic Gear by Considering the Maximum Transmission Torque Line. *Appl. Sci.* 2020, 10, 8581. <https://doi.org/10.3390/app10238581>
- S. Ishikawa, T. Todaka, "Transient-operation phenomena of a magnetic reducer analyzed with the time-stepping FEM," 2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Hamamatsu, Japan, 2020, pp. 1898-1901, doi: 10.23919/ICEMS50442.2020.9291208.
- Tzouganakis, Panteleimon & Gakos, Vasilios & Kalligeros, Christos & Tsolakis, Antonios & Spitas, V. (2022). Fast and efficient simulation of the dynamical response of coaxial magnetic gears through direct analytical torque modelling. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 123. 102699. 10.1016/j.simpat.2022.102699.
- Чумак В., Островерхов М., Коваленко М., Головко В., Коваленко І. Корекція вихідної потужності генератора безмультиплікаторної вітроелектроустановки при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика, 2022, 2 (8), 39–46. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.2.07>.
- Ostroverkhov M., Chumack V., Falchenko M., Kovalenko M. (2022). Development of control algorithms for magnetolectric 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>.
- V.M. Golovko, M.Ya. Ostroverkhov, M.A. Kovalenko, I.Ya. Kovalenko, D.V. Tsyplenkov Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetolectric generator // *Naukovyi*

## References (transliterated)

- Jian, Huang & Yao, Ligang & Li, Wen-jian & Zhang, Jun. (2017). Design and realization of a novel magnetic nutation drive for industry robotic wrist reducer. *Industrial Robot: An International Journal*. 44. 58-63. 10.1108/IR-04-2016-0130.
- Yu, W & Wang, C & Xu, T. (2019). The design method of a novel magnetic suction gear reducer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 504. 012093. 10.1088/1757-899X/504/1/012093.
- S. Hasanpour, M. Johnson, M. C. Gardner and H. A. Toliyat, "Cycloidal Reluctance Magnetic Gears for High Gear Ratio Applications," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 6, pp. 1-10, June 2022, Art no. 8001210, doi: 10.1109/TMAG.2022.3163419.
- M. C. Gardner, B. Praslicka, M. Johnson and H. A. Toliyat, "Optimization of Coaxial Magnetic Gear Design and Magnet Material Grade at Different Temperatures and Gear Ratios," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 36, no. 3, pp. 2493-2501, Sept. 2021, doi: 10.1109/TEC.2021.3054806.
- B. Dai, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Tachiya and K. Kuritani, "Cogging Torque Reduction of Integer Gear Ratio Axial-Flux Magnetic Gear for Wind-Power Generation Application by Using Two New Types of Pole Pieces," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 8, pp. 1-5, Aug. 2022, Art no. 8002205, doi: 10.1109/TMAG.2022.3159002.
- Moghimi, Ali & Aliabadi, Mahmood & Farahani, Hassan. (2022). Triple-speed coaxial magnetic gear for wind turbine applications: introduction and comprehensive analysis. *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*. 41. 10.1108/COMPEL-01-2022-0001.
- K. Aiso, K. Akatsu, Y. Aoyama, "A Novel Flux-Switching Magnetic Gear for High-Speed Motor Drive System," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 6, pp. 4727-4736, June 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.2988230.
- Ruiz-Ponce G., Arjona M.A., Hernandez C., Escarela-Perez R. A Review of Magnetic Gear Technologies Used in Mechanical Power Transmission. *Energies* 2023, 16, 1721. <https://doi.org/10.3390/en16041721>
- Y. Wang, M. Filippini, N. Bianchi, P. Alotto, "A Review on Magnetic Gears: Topologies, Computational Models, and Design Aspects," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 5, pp. 4557-4566, Sept.-Oct. 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2916765.
- S.S. Nielsen, H.Y. Wong, H. Baninajar, J.Z. Bird, P. O. Rasmussen, "Pole and Segment Combination in Concentric Magnetic Gears: Vibrations and Acoustic Signature," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 37, no. 3, pp. 1644-1654, Sept. 2022, doi: 10.1109/TEC.2022.3151654.
- E.-J. Park, S.-Y. Jung, Y.-J. Kim, "Torque and Loss Characteristics of Magnetic Gear by Bonded PM Magnetization Direction," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 57, no. 6, pp. 1-4, June 2021, Art no. 8001304, doi: 10.1109/TMAG.2021.3064705.
- Syam, Sudirman & Kurniati, Sri & Ramang, Ruslan. (2022). Design and Characteristics of Axial Magnetic Gear Using Rectangular Magnet. 10.31219/osf.io/5c724.
- Mizuana, Yuma & Nakamura, Kenji & Suzuki, Yuma & Oishi, Yuhei & Tachiya, Yuichi & Kuritani, Kingo. (2020). Development of spoke-type IPM magnetic gear. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 64. 771-778. 10.3233/JAE-209389.
- Cansiz, Ahmet & Akyerden, Emre. (2019). The use of high temperature superconductor bulk in a co-axial magnetic gear. *Cryogenics*. 98. 10.1016/j.cryogenics.2019.01.008.
- Tzouganakis, Panteleimon & Gakos, Vasilios & Kalligeros, Christos & Papalexis, Christos & Tsolakis, Antonios & Spitas, V. (2022). Torque ripple investigation in coaxial magnetic gears. *MATEC Web of Conferences*. 366. 01004. 10.1051/mateconf/202236601004.
- Misron N., Mohd Saini L., Aris I., Vaithilingam C.A., Tsuyoshi H. Simplified Design of Magnetic Gear by Considering the Maximum Transmission Torque Line. *Appl. Sci.* 2020, 10, 8581. <https://doi.org/10.3390/app10238581>
- S. Ishikawa, T. Todaka, "Transient-operation phenomena of a magnetic reducer analyzed with the time-stepping FEM," 2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Hamamatsu, Japan, 2020, pp. 1898-1901, doi: 10.23919/ICEMS50442.2020.9291208.
- Tzouganakis, Panteleimon & Gakos, Vasilios & Kalligeros, Christos & Tsolakis, Antonios & Spitas, V. (2022). Fast and efficient simulation of the dynamical response of coaxial magnetic gears through direct analytical torque modelling. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 123. 102699. 10.1016/j.simpat.2022.102699.
- Chumak V., Ostroverkhov M., Kovalenko M., Holovko V., Kovalenko, I. (2022). Korektsiia vykhidnoi potuzhnosti heneratora bezmulyplikatornoi vitroelektrostanovky pry dyskretnykh ta vypadkovykh znachenniakh shvydkosti vitru. *Visnyk NTU «KhPI»*. Seriya: Problemy udoskonaluvannia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka, 2 (8), 39–46. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.2.07>.
- 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>.
- V.M. Golovko, M.Ya. Ostroverkhov, M.A. Kovalenko, I.Ya. Kovalenko, D.V. Tsyplenkov Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetoelectric generator. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022, (5): 074 – 079. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/074>.

Надійшло (received) 18.04.2023

## Відомості про авторів / About the Authors

**Чумак Вадим Володимирович (Chumak Vadim Vladimirovich)** – кандидат технічних наук, доцент, 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](mailto:chumack_kpi@ukr.net).

**Коваленко Михайло Анатолійович (Kovalenko Mykhaylo)** – 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: [kovalenko\\_ma@i.ua](mailto:kovalenko_ma@i.ua).

**Коваленко Ірина Яківна (Kovalenko Iryna Yakivna)** – 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](mailto:2048141@ukr.net).

**Ткачук Ігор Валерійович (Tkachuk Ihor)** – аспірант кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5717-2458>; e-mail: [baja0073@gmail.com](mailto:baja0073@gmail.com).