УДК 621.313.84

ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНОГО РЕДУКТОРА ДЛЯ АВТОНОМНОЇ ВІТРОУСТАНОВКИ ПРИ ЗМІНІ ШВИДКОСТІ ВІТРУ

КОВАЛЕНКО М.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електромеханіки національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" Київ, Україна, e-mail: kovalenko_ma@i.ua;

ЧУМАК В.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електромеханіки національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" Київ, Україна, e-mail: chumack_kpi@ukr.net;

КОВАЛЕНКО І.Я. асистент кафедри відновлювальних джерел енергії національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" Київ, Україна,e-mail: 2048141@ukr.net;

ТКАЧУК І.В. аспірант кафедри електромеханіки національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" Київ, Україна, e-mail: baja0073@gmail.com;

ХАРФОРД А.Г. аспірант кафедри електротехнічних пристроїв та електротехнологічних комплексів національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" Київ, Україна, e-mail: mojaverocketman@gmail.com.

Мета роботи. *Провести оцінку параметрів та характеристик магнітного редуктора при постійній та змінній швидкості вітру у складі автономної вітроелектроустановки.*

Методи дослідження. *Аналіз існуючих методів математичного моделювання магнітних редукторів. Чисельні методи математичного моделювання на основі скінченних елементів. Чисельні методи обробки отриманих результатів.*

***Отримані* результати.** *Розроблено двовимірну польову математичну модель для оцінки параметрів та характеристик магнітного редуктора при змінній та постійній швидкості вітру. За допомогою розробленої моделі проаналізовано електромагнітне поле, параметри та характеристики магнітного редуктора як при постійній, так і при змінній швидкості обертання. Зокрема, було виявлено, що магнітна система редуктора не досягає насичення, при цьому середні значення магнітної індукції в конструктивних елементах редуктора залишаються в межах допустимих значень для використовуваних матеріалів та марок сталі. Отримані дані про середні значення електромагнітних моментів зовнішнього (високошвидкісного) ротора та внутрішнього ротора дозволяють зрозуміти взаємозв'язок між ними та їх вплив на роботу системи. Зроблено висновок про нерівномірний розподіл індукції вздовж середньої лінії в повітряному проміжку, який зумовлений присутністю модулятора в конструкції редуктора. Крім того, відповідно до отриманих результатів, зміна швидкості вітру впливає на швидкість обертання магнітного редуктора та величини електромагнітних моментів високошвидкісного та низькошвидкісного роторів. Такі відомості допомагають зрозуміти динаміку роботи системи при різних умовах зовнішнього середовища. Отримані в дослідженні результати мають важливе значення для подальшого вдосконалення конструкції магнітного редуктора та забезпечення більш ефективної роботи вітроустановки малої потужності. Вони можуть бути використані для оптимізації конструкції та підвищення його продуктивності, що сприятиме розвитку вітроенергетики та зеленій енергетичній промисловості в цілому. Середнє значення електромагнітного моменту зовнішнього (високошвидкісного) ротора становить приблизно 7,4 Н·м, тоді як для внутрішнього ротора величина електромагнітного моменту складає близько 66 Н·м. Відношення моментів зовнішнього та внутрішнього роторів становить 8,92, що корелюється із коефіцієнтом редукції досліджуваного редуктора.*

Наукова новизна. *Розроблено двовимірну польову математичну модель, що враховує зміну параметрів та характеристик магнітного редуктора при зміні швидкості вітру та випадкової швидкості обертання ротора вітрогенератора.*

Практична цінність. *Результати дослідження магнітного редуктора для вітроустановки малої потужності мають важливий внесок у розвиток вітроенергетики, сприяють підвищенню ефективності та надійності виробництва енергії та сприяють створенню більш сталого та екологічно чистого енергетичного комплексу..*

Ключові слова: магнітний редуктор, вітроустановка, польова математична модель, електромагнітне поле, оптимізація конструкції, вітроенергетика.

© Коваленко М.А., Чумак В.В., Коваленко І.Я., Ткачук І.В., Харфорд А.В., 2023
DOI 10.15588/1607-6761-2023-2-4

I. ВСТУП

Системи, які перетворюють механічну енергію вітру в електричну, є актуальним науково-практичним напрямком. Одним з прикладів таких систем є вітроелектроустановки, які складаються з ротора вітроустановки, редуктора та електрогенератора. Ротор вітроелектроустановки має нелінійну характеристику з явно вираженими максимумами активної потужності при різних швидкостях вітру [1].

Вітроенергетика стала одним із найважливіших напрямків розвитку сталої та екологічно чистої енергетики. Вона спирається на використання вітрових турбін для перетворення кінетичної енергії вітру в електричну енергію. Одним із важливих компонентів у вітроустановках є магнітний редуктор, який забезпечує передачу енергії від вітрового колеса до електрогенератора.

Традиційні вітроелектроустановки з мультиплікатором і без нього працюють на різних точках механічної характеристики ротора вітроустановки при зміні навантаження та швидкості вітру [2]. Вітроелектроустановки з мультиплікатором використовують класичні електрогенератори з постійними магнітами та радіальним основним магнітним потоком, тоді як безмультиплікаторні системи використовують електрогенератори з осьовим магнітним потоком, що мають ряд переваг.

Автори попередніх робіт провели чисельні моделювання вітроелектроустановки з генератором із постійними магнітами. За результатами цих моделювань виявлено високу ефективність використання підмагнічування додатковою ємністю обмотки якоря генератора та використання підмагнічування додатковою обмоткою магнітоелектричного генератора. Застосування додаткової ємності дозволяє збільшити вихідну активну потужність генератора на приблизно 7-16%. А ефект підвищення активної потужності генератора за рахунок підмагнічування додатковою обмоткою складає приблизно 32-35%. Однак, незважаючи на незаперечні переваги, які забезпечує використання зубчастих передач в технічних пристроях, вони мають ряд недоліків, таких як; високий рівень шуму, низьку надійність, необхідність мастила, необхідність у регулярних технічних оглядах, нестійкі до раптових поривчастих вітрів, а також мають низьку перевантажувальну здатність [3]. Крім того, під час швидкості вітру, що перевищує 12-14 м/с необхідно застосування спеціальних гальмівних пристроїв, щоб забезпечити механічний редуктор від виходу з ладу [4].

Перспективним є використання магнітних редукторів [5]. Вони дозволяють відмовитись від механічного редуктора на користь магнітного редуктора і використовувати на вихідному валі вітроустановки класичний високошвидкісний та більш компактний електрогенератор.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Електричні машини, включені в серію з механічними редукторами, широко використовуються для виробництва економічно ефективних і легких рішень трансмісії, для застосувань, у яких потрібний високий крутний момент на низькій швидкості, наприклад у вітрових турбінах [6]. Компонент редуктора передає низькошвидкісний високий крутний момент у вихідний високошвидкісний (HS) з низьким крутним моментом і, таким чином, дозволяє значно зменшити розмір порівняно з рішеннями з прямим приводом. Механічні редуктори часто використовуються для цієї мети, однак вони схильні до невід'ємних проблем, таких як пошкодження в ситуації перевантаження, шум, періодичне змащування та складне технічне обслуговування. Проблеми, пов'язані з надійністю та вартістю з їх несправністю, створили топології трансмісії, які повністю виключають механічні редуктори або зменшують їх складність за рахунок зменшення кількості редукторів.

Магнітний редуктор - це механізм, який використовує магнітне поле для передачі обертального моменту між двома валами з різними швидкостями обертання. Він забезпечує зменшення швидкості обертання та збільшення обертового моменту від вітрового колеса до електрогенератора, що дозволяє ефективніше генерувати електричну енергію [9], [10]. Магнітний редуктор складається з двох основних складових - зовнішнього та внутрішнього роторів, які містять постійні магніти. Зовнішній ротор пов'язаний з вітровим колесом, тоді як внутрішній ротор пов'язаний з електрогенератором. Між роторами створюється магнітне поле, яке передає обертальний момент від зовнішнього ротора до внутрішнього.

Магнітні редуктори (MG) можуть запропонувати привабливу альтернативу механічним редукторам і останнім часом викликають підвищений інтерес як з боку промисловості, так і з боку досліджень [7], [8]. Топологія MG, здатна мати високу щільність крутного моменту, була досліджена в [9], [10], [11]. Він демонструє безконтактну передачу крутного моменту, властивий захист від перевантаження, надлишкове змащування зачеплення та знижену механічну вібрацію, тому має потенціал для подолання проблем, пов'язаних з механічними редукторами. MG також можна механічно та магнітно інтегрувати з машиною з постійними магнітами (PM), тим самим зменшуючи кількість ступенів механічного редуктора або повністю виключаючи редуктор [12]. Інтегровані PM-машини MG також здатні демонструвати щільність крутного моменту, більшу, ніж еквівалентні машини з прямим приводом PM з радіальним полем, і, отже, можуть дозволити реалізувати легкі та економічно ефективні рішення для приводу вітрових турбін [13].

Магнітна передача має малу в порівнянні з зубчастими передачами торсіонну жорсткість, являючи собою пружний елемент, що негативно позначається

на динамічних характеристиках. Для збільшення торсійної жорсткості магнітної передачі [14] запропоновано технічне рішення, згідно з яким циліндрична магнітна передача складається з двох ступенів, які зміщені один щодо одного на певний кут.

Для проектування коаксіальних планетарних магнітних передач зазвичай використовується два підходи до розрахунку властивостей магнітного поля – аналітичний і чисельний. Історично першим з них з'явився аналітичний метод розрахунку у двомірному наближенні [10], [11], застосування якого передбачало прийняття низки припущень. Основні з них - це лінійність магнітних властивостей матеріалів, еквіпотенційність поверхонь зубцевих елементів, нехтуванням до кінцевих ефектів і дотичної складової магнітного поля в повітряних зазорах.

Основним недоліком сучасних аналітичних методів є низька точність розрахунку, обумовлена принциповою неможливістю точного обліку нелінійності властивостей магнітних матеріалів, що може призводити до виникнення похибки у визначенні амплітуди робочої гармоніки магнітного поля до 40% [12], змушуючи проектувати магнітну таким чином , щоб елементи залишалися на лінійній ділянці основної кривої намагнічування [14]. Для досягнення максимальної густини моменту в коаксіальній планетарної магнітної передачі необхідно, щоб окремі сегменти модулятора знаходилися в насиченому стані, в результаті чого цей недолік принципово не дозволяє спроектувати максимально ефективний пристрій.

До переваг аналітичних методів розрахунку можна віднести значно менший у порівнянні з чисельними методами час розрахунку [13].

Другий підхід до розрахунку магнітного поля базується на чисельному розв'язанні диференціальних рівнянь Максвелла і дозволяє вводити мінімальну кількість припущень і цим отримувати результат з високим ступенем точності. Найбільш поширеними методами розв'язання цих диференціальних рівнянь є метод кінцевих елементів та метод просторових інтегральних рівнянь. Розрахунок магнітних передач за допомогою чисельних методів із постановкою завдання у тривимірному наближенні дозволяє отримати точність при розрахунку електромагнітного моменту до 5% [7], [10], а також дає можливість більш точно враховувати магнітні втрати.

Узагальнюючи результати літературного пошуку можливо зробити висновок, що основна мета наукових досліджень в даному напрямку полягає в дослідженні параметрів та характеристик магнітних редукторів, що використовуються в якості мультиплікаторів/редукторів або у складі автономних енергоустановок, таких як вітроелектричні системи.

Тому актуальним науково-практичним завданням є оцінка параметрів та характеристик магнітного редуктора при змінній швидкості вітру. Це дасть можливість відмовитись від механічного редуктора на користь магнітного із подальшим підвищенням експлуатаційної надійності та ефективності такої системи.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є розробка чисельної польової математичної моделі магнітного редуктора, що працює у складі вітроустановки при змінній швидкості обертання вхідного валу та змінній швидкості вітру. При цьому досліджувалися основні вихідні параметри та характеристики магнітного редуктора: характер розподілу електромагнітного поля, електромагнітний момент ведучого та веденого роторів, розподіл магнітної індукції низькошвидкісного, високошвидкісного ротора та модулятора.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розробка математичної моделі проводиться для варіанта магнітної системи магнітної передачі, виконаної за коаксіальною планетарною топологією (рис. 1). Основні розміри магнітної системи наведено на рис. 2.

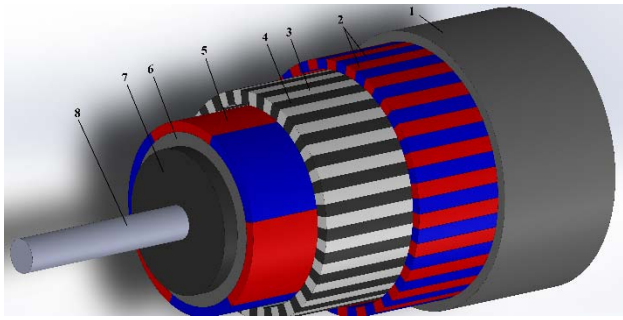

Рисунок 1. Основні розміри магнітної системи досліджуваного варіанта магнітної передачі

На рис. 1 позначено: 1 – ярмо зовнішнього, низькошвидкісного ротора; 2 – постійні магніти зовнішнього ротора; 3 – немагнітопровідні вставки модулятора; 4 – магнітопровідні вставки магнітного модулятора (полюсні накінечники); 5 – постійні магніти внутрішнього (високошвидкісного) ротора; 6 – ярмо внутрішнього ротора; 7 – немагнітний сплав внутрішнього ротора; 8 – вал.

Зовнішнє магнітне колесо прийнято нерухомим і надалі називається статором. Внутрішнє та проміжне магнітні колеса складають високошвидкісний та низькошвидкісний ротори відповідно. Відповідно до співвідношення швидкостей для коаксіальної планетарної магнітної передачі передатне відношення визначається як

$$i = \frac{p_c + p_в}{p_н} \quad (1)$$

де p_c – число пар полюсів на статорі;

$p_в$ – число пар полюсів на високошвидкісному

роторі або, зважаючи на вираз (9)

$$i = \frac{N_c}{p_в} \quad (2)$$

Передатне відношення позитивне, що свідчить про спрямоване обертання роторів магнітної передачі.

За прототип використано варіант магнітної передачі з 26 парою полюсів на статорі, двома парами полюсів на високошвидкісному роторі та 30 сегментами низькошвидкісного ротора. Таким чином, згідно (1, 2) передатне відношення становило 15. Основні параметри магнітної системи моделі наведені в табл. 1. Постійні магніти виконані секторальними з однорідною намагніченістю в радіальному напрямку зі сплаву неодим-залізо-бір марки N38UH з залишковою магнітною індукцією 1,26 Т при 20 °С. Крива розмагнічування постійних магнітів наведена на рис. 2.

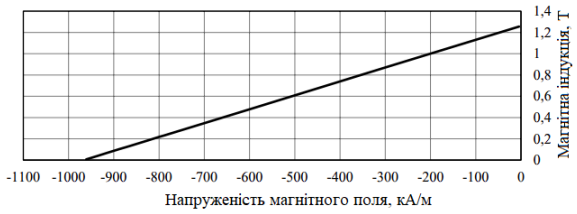

Рисунок 2. Крива розмагнічування постійного магніту N38UH при 20°С

Ярмо магнітопроводу статора виконано з холоднокатаної ізотропної електротехнічної сталі марки 2411, ярмо магнітопроводу високошвидкісного ротора - з електротехнічної сталі марки 21850. Сегменти низькошвидкісного ротора виконані з композитного магнітом'якого матеріалу на базі Somaloy. Вал високошвидкісного ротора виконаний з конструкційної сталі марки 45.

Таблиця 1. Основні параметри магнітної системи

Число пар полюсів високошвидкісного ротора	3
Число пар полюсів низькошвидкісного ротора	26
Кількість сталевих сегментів модулятора	29
Аксіальна довжина, мм	80
Залишкова магнітна індукція ПМ, Тл	1,26 (N38UH)
Передавальне відношення	8,67
Матеріал магнітопроводу статора	Сталь 2411
Матеріал магнітопроводу низькошвидкісного ротора	Samoloy
Матеріал магнітопроводу високошвидкісного ротора	Сталь 21850
Електропровідність постійних магнітів, МСм/м	0,56
Електропровідність Somaloy, МСм/м	0,14

Основні етапи при розробки польової математичної моделі полягають в наступному:

1) Побудова геометрії моделі в системі автоматизованого проектуван-ня AutoCAD;

2) Імпорт геометрії моделі в програмне середовище COMSOL Multiphysics;

3) Задання матеріалів та їх властивостей;

4) Задання змінних для керування параметрами дослідження;

5) Задання фізики розрахунку та граничних умов;

6) Побудова сітки скінченних елементів;

7) Проведення розрахунку;

8) Обробка отриманих результатів;

COMSOL Multiphysics – це пакет програмного забезпечення для аналізу кінцевих елементів, розв'язування та симуляції для різноманітних фізичних та інженерних програм.

Моделювання статичних характеристик магнітної передачі переважно проводилося у двовимірному наближенні.

Розрахунок статичного магнітного поля в двовимірному наближенні проводився з урахуванням таких припущень:

1. Не враховуються кінцеві ефекти;

2. Показники магніто-м'яких матеріалів задавалися з допомогою основної кривої намагнічування без урахування магнітного гістерезису;

3. Властивості постійних магнітів визначалися залишковою магнітною індукцією та кутом нахилу лінеаризованої кривої розмагнічування при постійній температурі Т=20 град. ^{0}С;

4. Розрахунок навантажувальної властивості проводився покроковим шляхом без урахування магнітних втрат;

5. Розрахункова область обмежена немагнітним колом, у будь-якій точці якої вектор магнітної індукції прийнятий дотичним.

Розрахункові рівняння та граничні умови формувалися щодо векторного магнітного потенціалу та відомих джерел магнітного поля:

$$\Delta^2 A = \mu \Delta \times M \quad (3)$$

$$n \times \left(A_1 - A_2\right) = 0 \quad (4)$$

$$n \times \left(\left[\mu_0^{-1} \Delta \times A - M\right] - \left[\mu_0^{-1} \Delta \times A - M\right]\right) = 0 \quad (5)$$

$$n \times A_{вн} = 0 \quad (6)$$

де M – вектор намагніченості, А/м;

A – векторний магнітний потенціал, Вб/м;

A_1, A_2 – векторні магнітні потенціали на межі суміжних областей 1 і 2, Вб/м;

$A_{вн}$ – векторний магнітний потенціал на зовнішній межі розрахункової області, Вб/м;

n – вектор нормалі.

Розрахунок електромагнітного моменту проводився через тензор натягу Максвелла. Вектор густини сили визначається за наступним виразом:

$$f = \mu(nH)H - 0{,}5nH^2 \qquad (7)$$

де H - вектор напруженості магнітного поля, А/м.

$$H = \mu^{-1}\Delta \times A - M \qquad (8)$$

Електромагнітний момент, що діє на внутрішній та зовнішній ротори магнітної передачі визначається за наступним виразом:

$$T = \oint_{S_Г} (r - r_0) \times f dS \qquad (9)$$

де $S_г$ – довільна замкнута поверхня, що обмежує елемент, на який провадиться розрахунок електромагнітного моменту.

Загальна кількість елементів сітки у розробленій двовимірній моделі становить 296840 трикутних елементів, 880 вершинних елементів, 62661 крайових елементів. Загальний вигляд фрагменту сітки скінченних елементів розробленої моделі магнітного редуктор а показано на рис. 3.

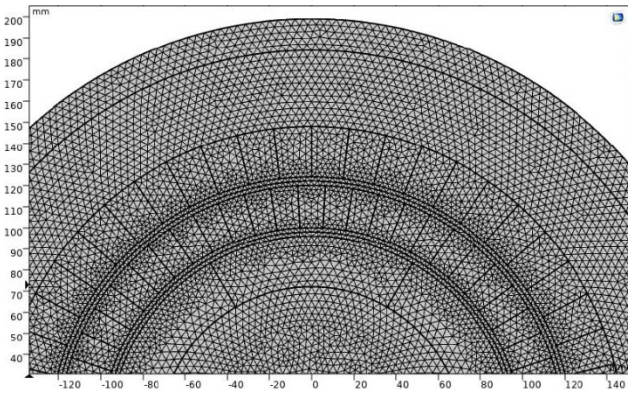

Рисунок 3. Сітка скінченних елементів фрагмента розрахункової області досліджуваного магнітного редуктора

Розподіл магнітної індукції ***B*** та векторного магнітного потенціалу ***A*** в розрахунковій області досліджуваного магнітного редуктора показано на рис. 4.

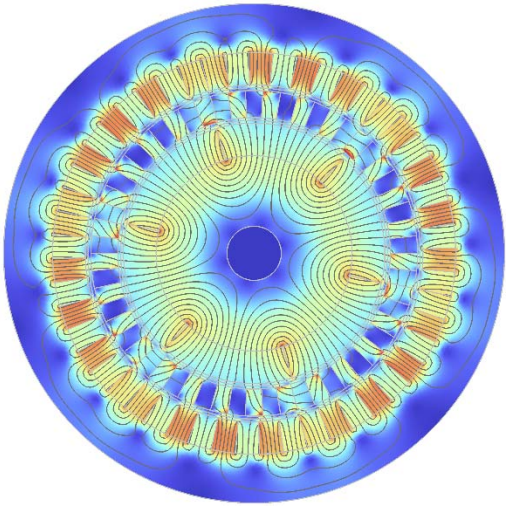

Рисунок 4. Розподіл магнітної індукції та векторного магнітного потенціалу досліджуваного магнітного редуктора

Із рис. 4 видно, що магнітна система не є насиченою, в той же час середнє значення магнітної індукції в конструктивних елементах редуктора не перевищує допустимі значення для вибраних матеріалів та марки сталі. А саме: в ярмі високошвидкісного ротора середнє значення магнітної індукції становить 0,91 Тл, в ярмі низькошвидкісного ротора середнє значення магнітної індукції становить 0,47 Тл, в феромагнітних осердях модулятора магнітного потоку середнє значення магнітної індукції становить 0,94 Тл, середнє значення індукції в повітряному проміжку, що межує між високошвидкісним ротором та модулятором становить 0,75 Тл, середнє значення індукції в повітряному проміжку, що межує між низькошвидкісним ротором та модулятором становить 0,63 Тл.

Розподіл магнітної індукції в повітряному проміжку, що межує з зовнішнім та внутрішнім ротором і модулятором магнітного потоку показано на рис. 5.

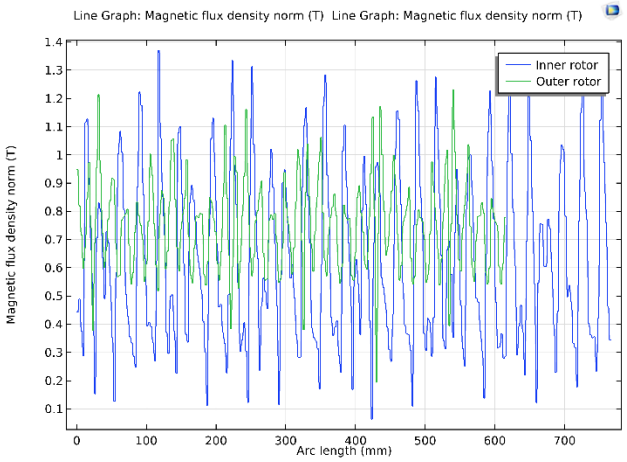

Рисунок 5. Розподіл модуля магнітної індукції в повітряному проміжку зовнішнього та внутрішнього роторів

Згідно з рис. 5, середня індукція у повітряному проміжку, що розділяє високошвидкісний ротор від модулятора, складає 0,75 Тл, тоді як середня індукція у повітряному проміжку між низькошвидкісним ротором та модулятором становить 0,63 Тл. Нерівномірність розподілу індукції вздовж середньої лінії в повітряному проміжку пояснюється наявністю модулятора, який є дискретним елементом в конструкції будь-якого магнітного редуктора.

На рис. 6 показано розподіл магнітної індукції в зовнішньому низькошвидкісному роторі досліджуваного магнітного редуктора при швидкості обертання ≈200 об/хв.

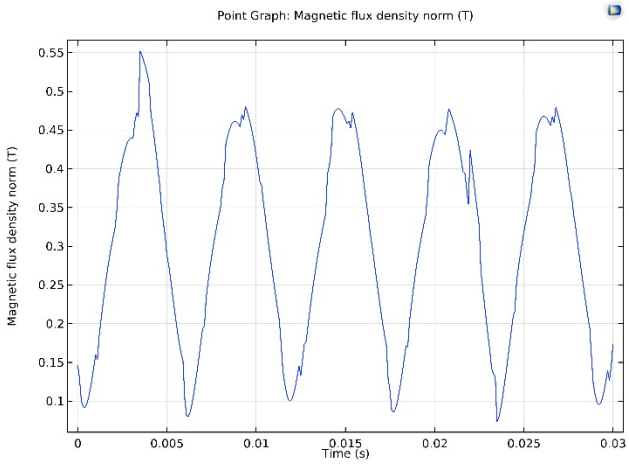

Рисунок 6. Розподіл магнітної індукції в зовнішньому низькошвидкісному роторі

На рис. 7 показано розподіл магнітної індукції в внутрішньому високошвидкісному роторі досліджуваного магнітного редуктора при швидкості обертання ≈1750 об/хв.

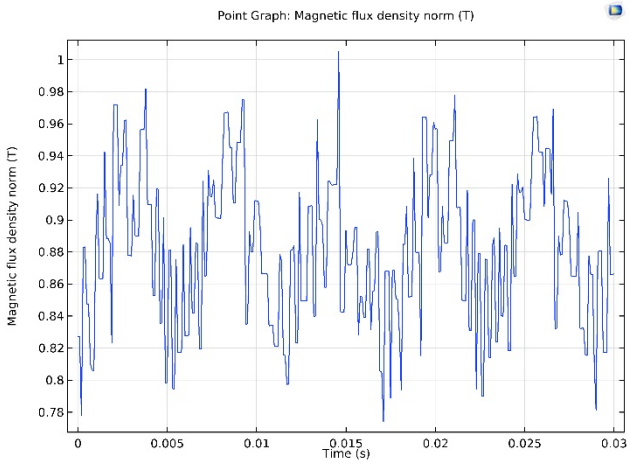

Рисунок 7. Розподіл магнітної індукції в зовнішньому високошвидкісному роторі

На рис. 8 показано розподіл магнітної індукції в магнітному модуляторі досліджуваного магнітного редуктора при швидкості обертання внутрішнього ≈1750 об/хв та зовнішнього роторів 200 об/хв.

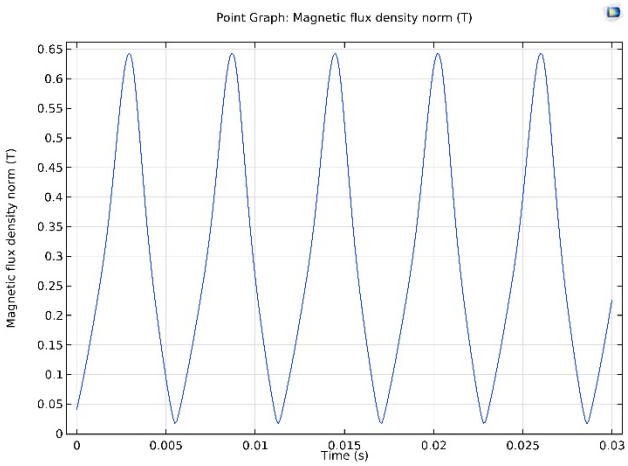

Рисунок 8. Розподіл магнітної індукції в модуляторі магнітного потоку

Залежність електромагнітного моменту внутрішнього та зовнішнього роторів магнітного редуктора при постійній швидкості обертання внутрішнього та зовнішнього роторів від часу показано на рис. 9.

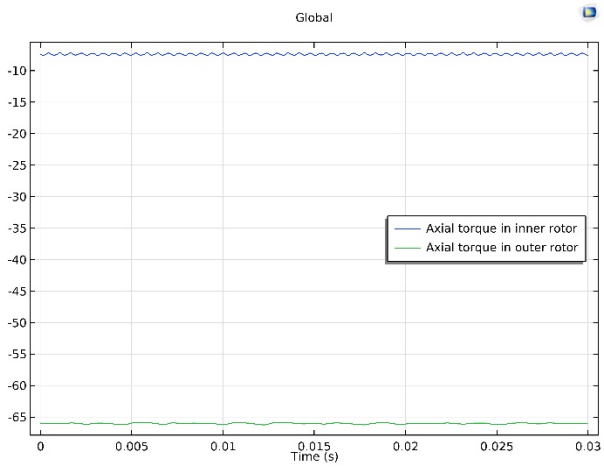

Рисунок 9. Залежність електромагнітного моменту роторів від часу

По рис. 9 видно, що середнє значення електромагнітного моменту зовнішнього (високошвидкісного) ротора становить ≈7,4 Н·м, тоді як величина електромагнітного моменту для зовнішнього ротора становить ≈66 Н·м. відношення моментів зовнішнього та внутрішнього роторів становить 8,92, що корелюється із коефіцієнтом редукції досліджуваного редуктора (табл. 1).

При зміні швидкості вітру змінюється швидкість обертання валу ротора вітроустановки і відповідно швидкість обертання низькошвидкісного ротора магнітного редуктора. Імітація зміни швидкості вітру

реалізована шляхом додавання до розробленої моделі у програмному пакеті COMSOL Multiphysics параметризованої функції. Характер зміни кутової швидкості показано на рис. 10.

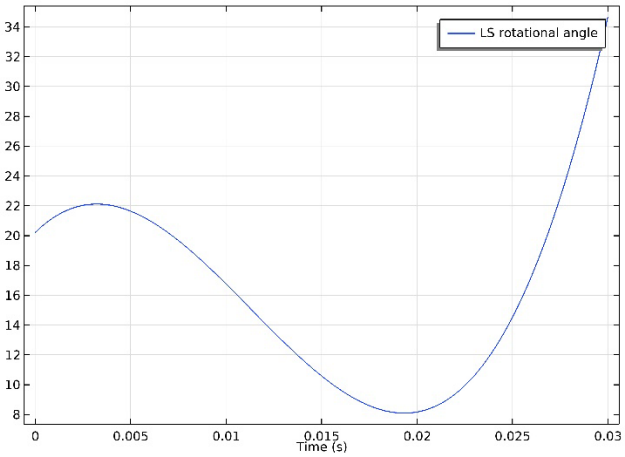

Рисунок 10. Характер зміни кутової швидкості вхідного ротора магнітного редуктора при зміні швидкості вітру

При зміні швидкості вітру змінюється і електромагнітний момент магнітного редуктора, що видно на рис. 11.

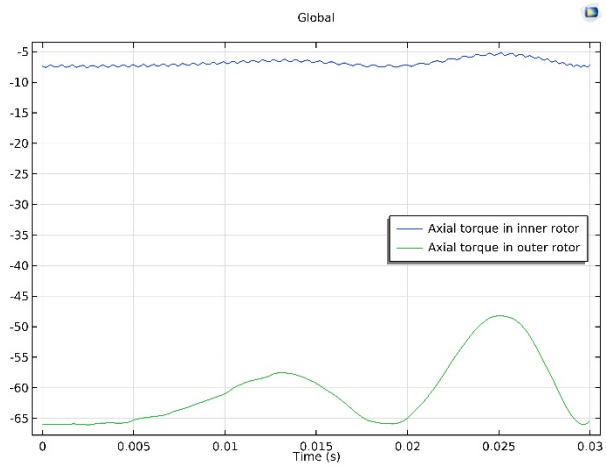

Рисунок 11. Момент низькошвидкісного (зелена крива) та високошвидкісного (синя крива) роторів магнітного редуктора

По рис. 11 видно, що при збільшенні швидкості вітру відбувається зменшення величини електромагнітного моменту, тоді як при зменшенні швидкості електромагнітний момент як внутрішнього так і зовнішнього роторів збільшуються пропорційно коефіцієнту редукції (табл. 1).

Розподіл електромагнітного поля та векторного магнітного потенціалу ***A*** при зміні швидкості вітру та швидкості обертання магнітного редуктора в довільний момент часу показано на рис. 12.

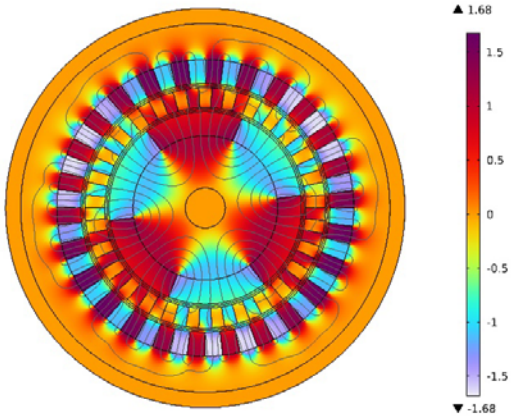

Рисунок 12. Розподіл вектора магнітної індукції ***B*** та вектороного магнітног опотенціалу ***A*** (лінії) при зміні швидкості обертання

При зменшенні швидкості обертання відносно номінальної, спостерігається зменшенні рівня магнітної індукції та насичення в окремих конструктивних елементах магнітної системи магнітного редуктора (рис. 4), що чітко корелюється з відомими теоретичними відомостями. Так, в ярмі високошвидкісного ротора середнє значення магнітної індукції становить 0,84 Тл, в ярмі низькошвидкісного ротора середнє значення магнітної індукції становить 0,42 Тл, в феромагнітних осердях модулятора магнітного потоку середнє значення магнітної індукції становить 0,83 Тл, середнє значення індукції в повітряному проміжку, що межує між високошвидкісним ротором та модулятором становить 0,69 Тл, середнє значення індукції в повітряному проміжку, що межує між низькошвидкісним ротором та модулятором становить 0,57 Тл.

Нормальна складова магнітної індукції в повітряному проміжку між низькошвидкісним ротором та модулятором магнітного потоку показано на рис. 13.

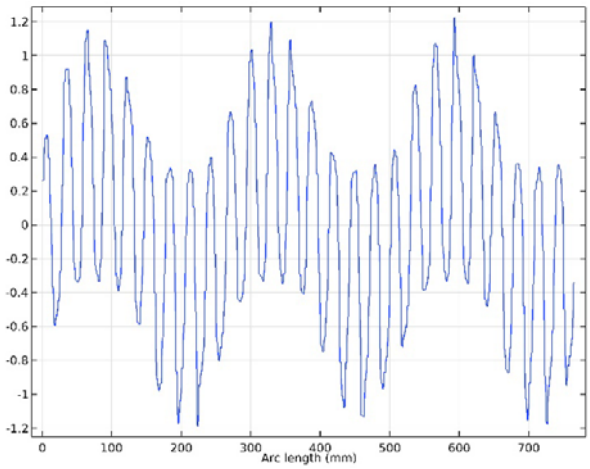

Рисунок 13. Нормальна складова магнітної індукції в повітряному проміжку низькошвидкісного ротора

По рис. 13 видно, що амплітуда магнітної індукції в повітряному проміжку становить ≈1,2 Тл. Пульсації магнітної індукції відповідають дискретному розміщенню постійниих магнітів на внутрішній розточці низькошвидкісного ротора.

Нормальна складова магнітної індукції в повітряному проміжку між високошвидкісним ротором та модулятором магнітного потоку показано на рис. 14.

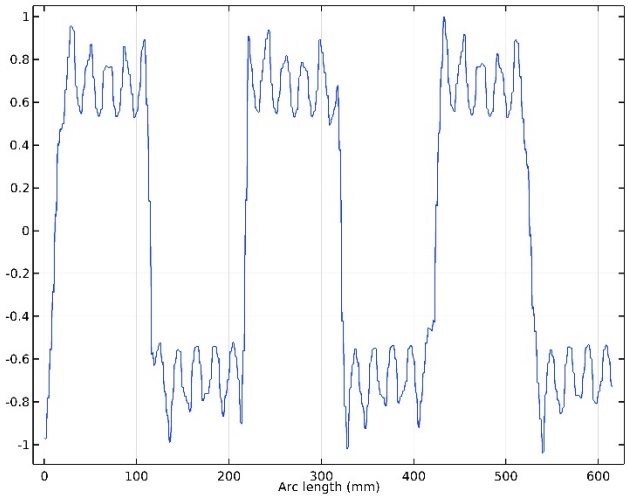

Рисунок 14. Нормальна складова магнітної індукції в повітряному проміжку високошвидкісного ротора

По рис. 14 видно, що амплітуда магнітної індукції в повітряному проміжку становить ≈0,8 Тл. Пульсації магнітної індукції відповідають дискретному розміщенню постійниих магнітів на зовнішній розточці високошвидкісного ротора.

Розподіл нормальної складової магнітної індукції в модуляторі магнітног опотоку при змінній швидкості обертання показано на рис. 15.

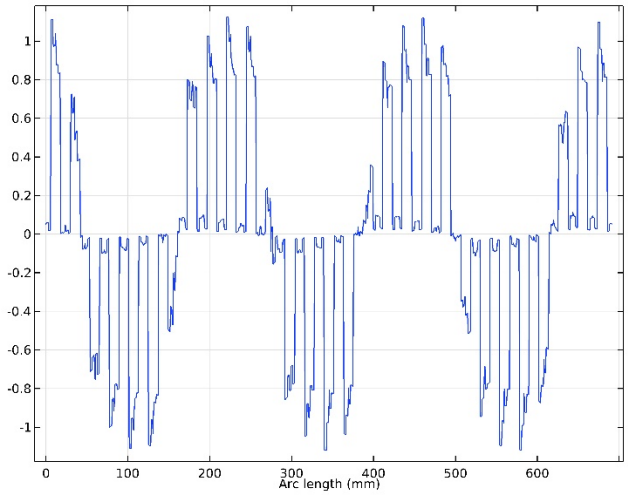

Рисунок 15. Нормальна складова магнітної індукції в модулторі магнітного потоку

По рис. 15 видно, що амплітуда магнітної індукції в модулторі магнітного потоку становить ≈0,8 Тл. Пульсації магнітної індукції відповідають дискретному розміщенню феромагнітних елементів модулятора.

V. ВИСНОВКИ

Розроблено двовимірну польову математичну модель магніт ного редуктора для роботи у складі вітроустановки малої потужності. За допомогою розробленої моделі проведено аналіз електромагнітного поля, параметрів та характеристик магнітного редуктора при постійній та змінній швидкості обертання.

Середнє значення електромагнітного моменту зовнішнього (високошвидкісного) ротора становить ≈7,4 Н·м, тоді як величина електромагнітного моменту для зовнішнього ротора становить ≈66 Н·м. відношення моментів зовнішнього та внутрішнього роторів становить 8,92, що корелюється із коефіцієнтом редукції досліджуваного редуктора.

При зміні швидкості вітру змінюється швидкість обертання магнітного редуктора і відповідні величини електромагнітних моментів високошвидкісного та низькошвидкісного роторів магнітного редуктора.

В даному дослідженні було показано, що магнітна система редуктора не досягає насичення. При цьому середні значення магнітної індукції в конструктивних елементах редуктора залишаються в межах допустимих значень для використовуваних матеріалів та марок сталі. Нерівномірний розподіл індукції вздовж середньої лінії в повітряному проміжку пояснюється наявністю модулятора, який є дискретним елементом в конструкції будь-якого магнітного редуктора. Це може впливати на роботу системи та вимагати удосконалення для підвищення її ефективності.

При збільшенні швидкості вітру відбувається зменшення величини електромагнітного моменту, тоді як при зменшенні швидкості електромагнітний момент як внутрішнього так і зовнішнього роторів збільшуються пропорційно коефіцієнту редукції.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] V.M.Golovko Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetoelectric generator / V.M.Golovko, M.Ya.Ostroverkhov, M.A.Kovalenko, I.Ya.Kovalenko, D.V.Tsyplenkov // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2022, (5): 074 – 079. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/074.

[2] Chumack V. Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation / Chumack V. Bazenov V., Tymoshchuk O., Kovalenko M., Tsyvinskyi S., Kovalenko I., Tkachuk I. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(5 (114), 56–62. (ISSN 1729-3774).

[3] Ostroverkhov, M. Development of the control system for taking off the maximum power of an autonomous wind plant with a synchronous magnetoelectric gen-

erator / Ostroverkhov, M., Chumack, V., Kovalenko, M., Kovalenko, I. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(2(118), 67–78. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263432.

[4] Jian, Huang. Design and realization of a novel magnetic nutation drive for industry robotic wrist reducer / Jian Huang, Yao Ligang Li, Wen-jian, Zhang, Jun // Industrial Robot: An International Journal. 44. 58-63. 10.1108/IR-04-2016-0130.

[5] Yu, W. The design method of a novel magnetic suction gear reducer / Yu, W & Wang, C & Xu, T. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 504. 012093. 10.1088/1757-899X/504/1/012093.

[6] S. Hasanpour Cycloidal Reluctance Magnetic Gears for High Gear Ratio Applications / S. Hasanpour, M. Johnson, M. C. Gardner, H. A. Toliyat // IEEE Transactions on Magnetics, vol. 58, no. 6, pp. 1-10, Art no. 8001210, doi: 10.1109/TMAG.2022.3163419.

[7] M. C. Gardner Optimization of Coaxial Magnetic Gear Design and Magnet Material Grade at Different Temperatures and Gear Ratios / M.C. Gardner, B. Praslicka, M. Johnson, H. A. Toliyat // IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 36, no. 3, pp. 2493-2501, doi: 10.1109/TEC.2021.3054806.

[8] B. Dai "Cogging Torque Reduction of Integer Gear Ratio Axial-Flux Magnetic Gear for Wind-Power Generation Application by Using Two New Types of Pole Pieces / B. Dai, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Tachiya and K. Kuritani // IEEE Transactions on Magnetics, vol. 58, no. 8, pp. 1-5, Art no. 8002205, doi: 10.1109/TMAG.2022.3159002.

[9] Чумак В. Корекція вихідної потужності генератора безмультиплікаторної вітроелектроустановки при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру / Чумак В., Островєрхов М., Коваленко М., Головко В., Коваленко І. // *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин І апаратів. Теорія І практика*, (2 (8), 39–46. https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.2.07.

[10] Чумак В. Порівняння синхронних генераторів для автономної бензинової установки / Чумак В., Коваленко М., Ткачук І., Коваленко І. // *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин І апаратів. Теорія І практика*, (2 (8), 32–38. https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.2.06.

[11] Moghimi, Ali. Triple-speed coaxial magnetic gear for wind turbine applications: introduction and comprehensive analysis. COMPEL / Moghimi Ali, Aliabadi, M., Farahani H. // The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. 41. 10.1108/COMPEL-01-2022-0001.

[12] K. Aiso A Novel Flux-Switching Magnetic Gear for High-Speed Motor Drive System / K. Aiso, K. Akatsu and Y. Aoyama // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 6, pp. 4727-4736, June 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.2988230.

[13] Ruiz-Ponce G. A Review of Magnetic Gear Technologies Used in Mechanical Power Transmission / Ruiz-Ponce G. Arjona, M.A., Hernandez, C., Escarela-Perez, R.A. // *Energies* **2023**, *16*, 1721. https://doi.org/10.3390/en16041721.

[14] Wang Y. A Review on Magnetic Gears: Topologies, Computational Models, and Design Aspects / Y. Wang, M. Filippini, N. Bianchi, P. Alotto, // IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 5, pp. 4557-4566, doi: 10.1109/TIA.2019.2916765.

[15] Nielsen S. S. Pole and Segment Combination in Concentric Magnetic Gears: Vibrations and Acoustic Signature / S. S. Nielsen, H. Y. Wong, H. Baninajar, J. Z. Bird, P. O. Rasmussen // IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 37, no. 3, pp. 1644-1654, doi: 10.1109/TEC.2022.3151654.

[16] Перминов Ю.Н. Алгоритм расчета синхронных генераторов торцевой конструкции с двумя магнитными системами, расположенными по торцам статора, для ветроэнергетических установок / Перминов Ю.Н., Коханевич В.П., Зинченко Т.В. // Відновлювана енергетика. 2016. № 2. С. 45-49.

Стаття надійшла до редакції 31.07.2023

EVALUATION OF MAGNETIC GEAR PARAMETERS FOR AUTONOMOUS WIND INSTALLATION WITH CHANGING WIND SPEED

KOVALENKO M.A. — PhD, Associate Professor Department of Electromechanics National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", e-mail: kovalenko_ma@i.ua;

CHUMACK V.V. — PhD, Associate Professor Department of Electromechanics National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", chumack_kpi@ukr.net

KOVALENKO I.Y. — Assistant of Renewable Energy Sources, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" e-mail: 2048141@ukr.net;

TKACHUK I.V. — Postgraduate student, Department of Electromechanics National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", e-mail: baja0073@gmail.com;

HARFORD A.G. Postgraduate student, Department of Electrotechnical Devices and Electrotechnological Complexes National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", e-mail: mojaverocketman@gmail.com.

Purpose. *To evaluate the parameters and characteristics of the magnetic gearbox at constant and variable wind speed as part of an autonomous wind power plant.*

Methodology. *Analysis of existing methods of mathematical modeling of magnetic gearboxes. Numerical methods of mathematical modeling based on finite elements. Numerical methods of processing the obtained results.*

Findings. *A two-dimensional field mathematical model has been developed to estimate the parameters and characteristics of the magnetic gearbox at variable and constant wind speed. With the help of the developed model, the electromagnetic field, parameters and characteristics of the magnetic gearbox were analyzed both at a constant and at a variable speed of rotation. In particular, it was found that the magnetic system of the reducer does not reach saturation, while the average values of magnetic induction in the structural elements of the reducer remain within the permissible values for the used materials and grades of steel. The obtained data on the average values of the electromagnetic moments of the outer (high-speed) rotor and the inner rotor make it possible to understand the relationship between them and their influence on the operation of the system. A conclusion was made about the uneven distribution of induction along the middle line in the air gap, which is caused by the presence of a modulator in the design of the reducer. In addition, according to the obtained results, the change in wind speed affects the speed of rotation of the magnetic gearbox and the magnitude of the electromagnetic moments of the high-speed and low-speed rotors. Such information helps to understand the dynamics of system operation under different environmental conditions. The results obtained in the study are important for further improvement of the magnetic reducer design and ensuring more efficient operation of the low-power wind turbine. They can be used to optimize the structure and increase its productivity, which will contribute to the development of wind energy and the green energy industry in general. The average value of the electromagnetic moment of the outer (high-speed) rotor is about 7.4 N·m, while for the inner rotor the value of the electromagnetic moment is about 66 N·m. The ratio of the moments of the outer and inner rotors is 8.92, which correlates with the reduction factor of the gear under study.*

Originality. *A two-dimensional field mathematical model has been developed, which takes into account the change in the parameters and characteristics of the magnetic gearbox when the wind speed changes and the random rotation speed of the wind generator rotor.*

Practical value. *The results of the research of the magnetic reducer for a low-power wind turbine have an important contribution to the development of wind energy, contribute to increasing the efficiency and reliability of energy production, and contribute to the creation of a more sustainable and environmentally friendly energy complex.*

Keywords: magnetic gearbox, wind turbine, field mathematical model, electromagnetic field, design optimization, wind energy

REFERENCES

[1] V.M.Golovko, M.Ya.Ostroverkhov, M.A.Kovalenko, I.Ya.Kovalenko, D.V.Tsyplenkov. (2022). Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetoelectric generator // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu., (5): 074 – 079. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/074.

[2] Chumack, Vadim and Bazenov, 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 shunt and permanent magnet excitation (December 21, 2021). Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(5 (114), 56–62. (ISSN 1729-3774).

[3] Ostroverkhov, M., Chumack, V., Kovalenko, M., & Kovalenko, I. (2022). Development of the control system for taking off the maximum power of an autonomous wind plant with a synchronous magnetoelectric generator. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(2(118), 67–78. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263432.

[4] ian, 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.

[5] Yu, W & Wang, C & Xu, T. (2019). The design meth-od of a novel magnetic suction gear reducer. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 504. 012093. 10.1088/1757-899X/504/1/012093.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] Chumak, V., Ostrovierkhov, M., Kovalenko, M., Holovko, V., & Kovalenko, I. (2022). Korektsiia vykhidnoi potuzhnosti heneratora bezmultyplikatornoi vitroelektroustanovky pry dyskretnykh ta vypadkovykh znachenniakh shvydkosti vitru. Visnyk NTU «KhPI». Seriia: Problemy udoskonaliuvannia elektrychnykh mashyn I aparativ. Teoriia I prakty-ka, (2 (8), 39–46. https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.2.07.

[10] Chumak, V., Kovalenko, M., Tkachuk, I., & Kovalenko, I. (2022). Porivniannia synkhronnykh heneratoriv dlia avtonomnoi benzynovoi ustanovky. Visnyk NTU «KhPI». Seriia: Problemy udoskonaliuvannia elek-trychnykh mashyn I aparativ. Teoriia I praktyka, (2 (8), 32–38. https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.2.06.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] Permynov Yu.N., Kokhanevych V.P., Zynchenko T.V. (2016). Alhorytm rascheta synkhronnыkh heneratorov tor-tsevoi konstruktsyy s dvumia mahnytnыmy systema-my, raspolozhennыmy po tortsam statora, dlia vetroэnerhetycheskykh ustanovok. Vidnovliuvana enerhetyka. No 2, 45-49.