

**О. В. Макаrchук**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,  
oleksandr.v.makarchuk@lpnu.ua

**Б. І. Крохмальний**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,  
bohdan.i.krokhmalnyi@lpnu.ua

**І. О. Зубчик**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,  
iryna.zubchyk.ee.2018@lpnu.ua

**Д. Цалус**

Ченстоховський політехнічний університет (Польща),  
факультет електричної інженерії,  
dc@el.pcz.czyst.pl

## АНАЛІЗ МАГНІТНИХ МОМЕНТІВ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО МАГНІТНОГО РЕДУКТОРА

<http://doi.org/10.23939/sepes2022.01.062>

© Макаrchук О. В., Крохмальний Б. І., Зубчик І. О., Цалус Д., 2022

Розглянуто принцип дії, конструкцію та особливості розрахунку магнітних моментів безконтактного одноступеневого магнітного редуктора, що відрізняється від механічних зубчастих передач необмеженим ресурсом, високим рівнем надійності та відсутністю потреби в обслуговуванні.

Метою дослідження є розроблення алгоритму розрахунку величини магнітних моментів магнітного редуктора коаксіального типу.

Методи дослідження, які застосовують для досягнення поставленої мети, поєднують у собі переваги аналітичних підходів та числового симуляційного моделювання. Розроблення алгоритму обчислення моментів та аналіз отриманих технічних показників здійснено на підставі методів класичної електротехніки та теорії магнітних кіл, а верифікацію прийнятих рішень, пов’язаних зі структурою заступної схеми магнітного кола редуктора, виконано за допомогою методу скінченних елементів.

Розроблений алгоритм ґрунтується на припущенні про взаємодію двох гармонічних хвиль магніторушійних сил швидкохідної та тихохідної обертових частин редуктора з результируючим магнітним полем, модульованим за амплітудою за допомогою магнітопровідного кільця зі змінною магнітною провідністю у тангенціальному напрямі.

Інтегральні показники такої взаємодії, зокрема магнітні моменти, визначаються через похідну енергії магнітного поля за кутом повороту відповідного ротора.

Виконаний FEM-аналіз магнітного поля дав змогу розробити заступну схему магнітного кола такого редуктора, параметри якої визначаються на підставі розмірів частин магнітопроводу та магнітних властивостей використаних матеріалів. Розв'язок системи лінійних рівнянь, які описують цю заступну схему, – це величини, що характеризують магнітне поле редуктора (магнітні потоки, МРС полюсів, спади магнітних напруг). Саме їх безпосередньо використовують у алгоритмі розрахунку магнітних моментів.

У статті описано конструкцію та принцип дії магнітного редуктора коаксіального типу. Наведено порівняння результатів розрахунку максимальних моментів таких редукторів з різним передавальним числом, отриманих із використанням пропонованого аналітичного алгоритму та FEM-аналізу.

**Ключові слова:** *магнітний редуктор; коаксіальний редуктор; передавальне число; принцип дії магнітного редуктора; магнітний момент; FEM-аналіз.*

### **Вступ**

Пристрої, що дають змогу перетворювати параметри механічного руху, наприклад редуктори (мультиплікатори), завжди викликатимуть зацікавленість, тому що вони є невід'ємною складовою більшості технічних об'єктів відповідного функціонального призначення, передусім транспортних засобів, різноманітних технологічних ліній, верстатів та багатьох інших.

Циліндричні зубчасті редуктори, попри усі їхні переваги порівняно з іншими перетворювачами параметрів обертального руху, мають і чимало недоліків, зокрема низьке передавальне число для одноступеневої передачі, порівняно високий рівень шуму, наявність втрат енергії на тертя (особливо за високих частот обертання), потреба змащування, можливість експлуатації тільки в неагресивному та вибухобезпечному середовищі. Основними ж недоліками таких редукторів вважають обмежений ресурс та потребу в періодичному обслуговуванні.

Магнітний редуктор (МР), що здійснює перетворення обертального моменту за рахунок безконтактної взаємодії феромагнітних елементів у магнітному полі постійних магнітів, повністю або частково позбавлений вищезгаданих недоліків.

### **Аналіз останніх досліджень**

Спроби створити безконтактну магнітну передачу дослідники робили вже доволі давно. Перші згадки про це трапляються у публікаціях, датованих кінцем 60-х років XX ст. Ці проекти використовували порівняно невдалу топологію магнітопроводу та неефективні магнітотверді матеріали, тому не розвивались надалі.

Найвдалішою виявилася конструкція так званого коаксіального МР, запропонованого у [1, 2], яка відрізняється високими значеннями ефективності та питомих енергетичних показників.

На початкових етапах розвитку теоретичних засад цього різновиду безконтактних передач зусилля дослідників були спрямовані на способи розрахунку магнітного поля в такій нетиповій структурі, якою є магнітопровід коаксіального МР, та на розгляд гармонічного спектра цього поля.

У сучасних розробках автори [3] використовують розклад складових вектора магнітної індукції у ряд Фур'є для аналітичного визначення магнітного моменту. Отримані результати верифікують за допомогою FEM-аналізу.

Підхід до визначення основних характеристик МР, що ґрунтується на теорії розрахунку магнітних кіл, запропоновано у [4]. Автори назвали його “коловим мережевим методом” й, на нашу думку, він є доволі складним серед аналітичних методів і займає деякий проміжний щабель між коловими та польовими методами.

Аналіз розподілу магнітного поля МР у [5] виконано на підставі розв'язання системи диференціальних рівнянь у частинних похідних, записаних у термінах скалярного магнітного потенціалу. Також автори наголошують на важливості аналітичних підходів у методиках синтезу безконтактних магнітних передач.

Експериментальні дослідження та вдосконалення конструкції МР описано у працях [6–8]. Зокрема, у [7, 8] подано аналітичну модель для прогнозування розподілу магнітного поля в повітряних проміжках і полюсах великих МР із радіальним полем та розкладкою Хальбаха.

Оптимізацією конструкцій коаксіальної магнітної передачі з радіальним потоком займалися автори [9], які використовували у дослідженнях генетичний алгоритм.

Нині переважну більшість задач проєктування МР розв'язують за допомогою FEM-аналізу, що, вочевидь, потребує використання відповідного програмного забезпечення. Багато досліджень зосереджені на задачі підвищення об'ємної густини обертального моменту – відношення обертального моменту до одиниці об'єму. З іншого боку, багато питань цього напрямку залишаються невирішеними, зокрема відсутня повноцінна методика проєктування коаксіальних МР, яка, використовуючи мінімум вхідних даних (наприклад, момент та частоту обертання вихідного вала, передавальне відношення), давала би змогу отримати його розміри й параметри, що однозначно окреслюватимуть структуру магнітопроводу та характеризуватимуть необхідні магнітні властивості застосовуваних матеріалів. Потреба в такій методиці очевидна, адже саме вона давала би можливість генерувати необхідний набір вхідних даних для подальшого використання у високоадекватних математичних моделях, які на підставі розв'язання польових рівнянь уточнюватимуть весь спектр характеристик таких машин.

**Метою** пропонованого дослідження є розроблення алгоритму наближеного аналітичного обчислення величин магнітних моментів магнітного редуктора коаксіальної конструкції та перевірка працездатності такого алгоритму за допомогою порівняння з результатами математичних експериментів, здійснених на підставі FEM-аналізу магнітного поля такого редуктора.

### Конструкція та принцип дії магнітного редуктора

Конструкцію активної зони МР коаксіального типу зображено на рис. 1. Вона складається з двох роторів (індукторів) – швидкохідного та тихохідного з відповідними кількостями полюсів, й так званого модулятора магнітного поля. Він являє собою нерухоме кільце, магнітна провідність якого стрибкоподібно змінюється у тангенціальному напрямі. Цього досягають за рахунок колового розташування потрібної кількості феромагнітних елементів, відокремлених один від одного немагнітними проміжками.

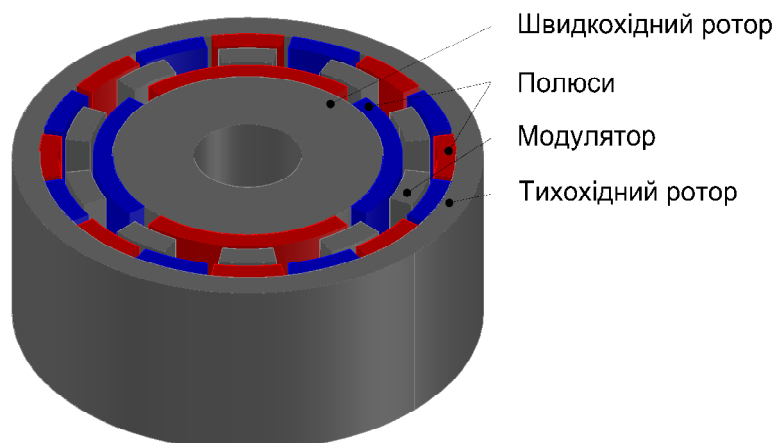


Рис. 1. Конструкція активної зони коаксіального магнітного редуктора

Принцип роботи такого редуктора полягає у штучному створенні просторової гармоніки магнітного поля, яка, з одного боку, взаємодіє із полюсними системами обох роторів, а з іншого – обертається відносно нерухомого кільця модулятора із частотою, що визначається співвідношенням кількостей пар полюсів цих роторів.

Введемо такі позначення:

$p_h, p_l$  – кількості пар полюсів швидкохідного та тихохідного роторів, відповідно;

$m_s$  – кількість магнітопровідних ділянок модулятора.

Нехай рушійний обертовий момент прикладений до вала швидкохідного ротора. Тоді магнітний потік взаємодіятиме із модулятором, який має періодичну структуру зі змінною магнітною провідністю, що призведе до появи гармонічної складової із полюсністю  $m_s$ , накладеної на обертову гармоніку магнітного поля полюсності  $p_h$ . Якщо її прийняти за основну, то модулятор в полі породжує гармонічну порядку  $m_s / p_h$ , причому  $m_s = p_l + p_h$ . Її просторове розташування в проміжку тихохідного ротора змінюватиметься за рахунок різниці у кількості пар полюсів  $p_l$  та кількості елементів модулятора  $m_s$ .

Передавальне число такого редуктора становить

$$k_r = \frac{p_l}{p_h}. \quad (1)$$

Повітряний проміжок між зовнішньою поверхнею швидкохідного ротора та внутрішньою поверхнею модулятора надалі називатимемо внутрішнім повітряним проміжком  $d_h$ , а проміжок між модулятором та тихохідним ротором – зовнішнім повітряним проміжком  $d_l$ .

### Магнітні моменти

Розглянемо лінійну розгортку магнітопроводу такого редуктора. Прив'яжемо до неї систему координат (СК), початок якої належить нерухомій осі  $M$  (див. рис. 2), що є радіальною віссю симетрії будь-якого феромагнітного елемента модулятора. Початкове зміщення положення полюса швидкохідного ротора визначатиме кут  $\gamma_h$  між віссю  $M$  та поздовжньою віссю, що обертається разом із полюсом з частотою  $\omega_h$ . Аналогічно окреслимо зміщення для тихохідного полюса. Його визначатимуть кут  $\gamma_l$  та поздовжня вісь, що обертається з частотою  $\omega_l$ .

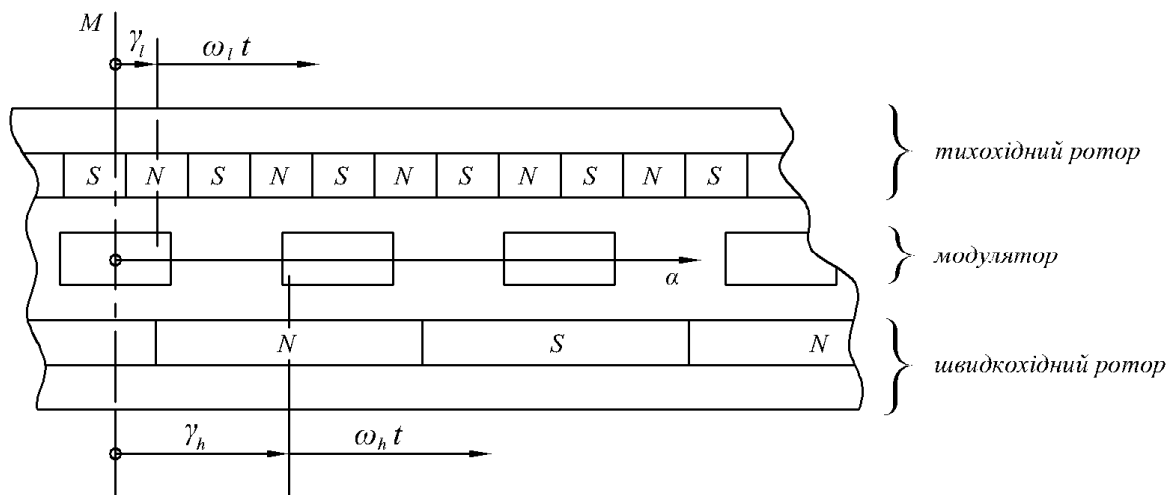


Рис. 2. Координатна система магнітного редуктора

Положення швидкохідного та тихохідного полюсів у будь-який момент часу  $t$  визначатимуть

кути  $w_h t$  та  $w_l t$ , відповідно.

Припустимо, що розподіли магніторушійних сил (МРС) обох роторів у вищезгаданий нерухомій СК можуть описуватися гармонічними функціями

$$F_h = F_{hm} \cos(p_h(\alpha - g_h - w_h t)); \quad F_l = F_{lm} \cos(p_l(\alpha - g_l - w_l t)), \quad (2)$$

де  $\alpha$  – кутова координата цієї СК;  $F_{hm}, F_{lm}$  – амплітуди МРС відповідних роторів.

Нехай шар, що належить модулятору, має магнітну провідність, яка вздовж координати  $\alpha$  розподілена за законом

$$l_s = l_{s0} + l_{sm} \cos(m_s \alpha), \quad (3)$$

де  $l_{s0}$  – стала складова магнітної провідності;  $l_{sm}$  – амплітуда періодичної складової цієї провідності.

Розподіл магнітного потоку в проміжку між двома роторами, що припадає на одну полюсну поділку швидкісного ротора  $t$ , визначатимемо як

$$F = \oint_0^t \mathcal{B}_{hl} d\alpha = (F_h + F_l) l_s. \quad (4)$$

Тоді середнє за оберт значення магнітного моменту визначатиме похідна енергії магнітного поля за кутовою координатою

$$M_m = \frac{\oint W_m}{\oint \alpha} = \frac{1}{2p} \frac{\partial F}{\partial \alpha} \oint \alpha d\alpha. \quad (5)$$

Отже, момент, що діятиме на швидкохідний ротор, дорівнюватиме

$$M_h = \frac{1}{2p} \frac{\partial F}{\partial \alpha} \oint \alpha d\alpha = \frac{1}{4} F_{hm} F_{lm} l_{sm} p_h \sin((p_h w_h - p_l w_l) t - p_h g_h - p_l g_l), \quad (6)$$

а на тихохідний

$$M_l = \frac{1}{2p} \frac{\partial F}{\partial \alpha} \oint \alpha d\alpha = \frac{1}{4} F_{hm} F_{lm} l_{sm} p_l \sin((p_h w_h - p_l w_l) t - p_h g_h - p_l g_l). \quad (7)$$

Беручи до уваги те, що  $p_h w_h - p_l w_l = 0$ , а також обставину, що максимального значення моменти обох роторів досягатимуть за умови кутового зсуву між осями полюсів у  $90^\circ$ , тобто  $|p_h g_h + p_l g_l| = \frac{p}{2}$ , амплітуди магнітних моментів роторів становитимуть

$$M_{mh} = \frac{1}{4} F_{hm} F_{lm} l_{sm} p_h, \quad M_{ml} = \frac{1}{4} F_{hm} F_{lm} l_{sm} p_l. \quad (8)$$

Отже, проблема визначення магнітних моментів, що діють на ротори, зводиться до визначення амплітуд МРС (2) та амплітуди періодичної складової магнітної провідності (3) структури, що містить модулятор та два проміжки – зовнішній та внутрішній.

### ФЕМ-аналіз магнітного поля МР

Для визначення вищезгаданих величин та з метою перевірки запропонованого способу розрахунку моментів здійснено ФЕМ-аналіз магнітного поля МР. Структурні показники, розміри та магнітні властивості матеріалів МР, вибраного для виконання математичних експериментів, наведено в табл. 1. Взаємне розташування роторів і модулятора відповідало положенню, за якого створюються максимальні магнітні моменти.

Таблиця 1

**Параметри, розміри та магнітні властивості матеріалів редуктора**

Назва та одиниці вимірювання	Позначення	Величина
Кількість пар полюсів швидкохідного ротора	$p_h$	2
Кількість пар полюсів тихохідного ротора	$p_l$	21
Кількість елементів модулятора	$m_s$	23
Величина зовнішнього повітряного проміжку, мм	$d_l$	1,0
Величина внутрішнього повітряного проміжку, мм	$d_h$	1,0
Зовнішній діаметр модулятора, мм	$d_l$	55
Внутрішній діаметр модулятора, мм	$d_h$	45
Аксіальна довжина магнітопроводу, мм	$l_d$	48
Залишкова індукція ПМ (NdFeB N33SH), Тл	$B_r$	1,2
Коерцитивна сила ПМ, кА/м	$H_c$	930
Матеріал елементів модулятора	-	ст. 2213

Уявлення про найімовірніші шляхи магнітного потоку сформовано на підставі безпосереднього аналізу зображень на рис. 3. Як видно з рис. 3, магнітний потік швидкохідного полюса розподіляється між магнітопровідними елементами модулятора та проходить до зовнішнього повітряного проміжку. Там, у зонах збігу напрямів цього потоку з потоком тихохідних полюсів він підсилюється та потрапляє у ярмо ротора. В зонах з опозитним напрямом потоків результуючий потік зменшується й замикається здебільшого між сусідніми елементами модулятора. Частина потоку в локальних зонах тихохідного ротора, що розташовані навпроти проміжків між елементами модулятора, замикається “шляхами розсіювання” на сусідній полюс протилежної полярності.

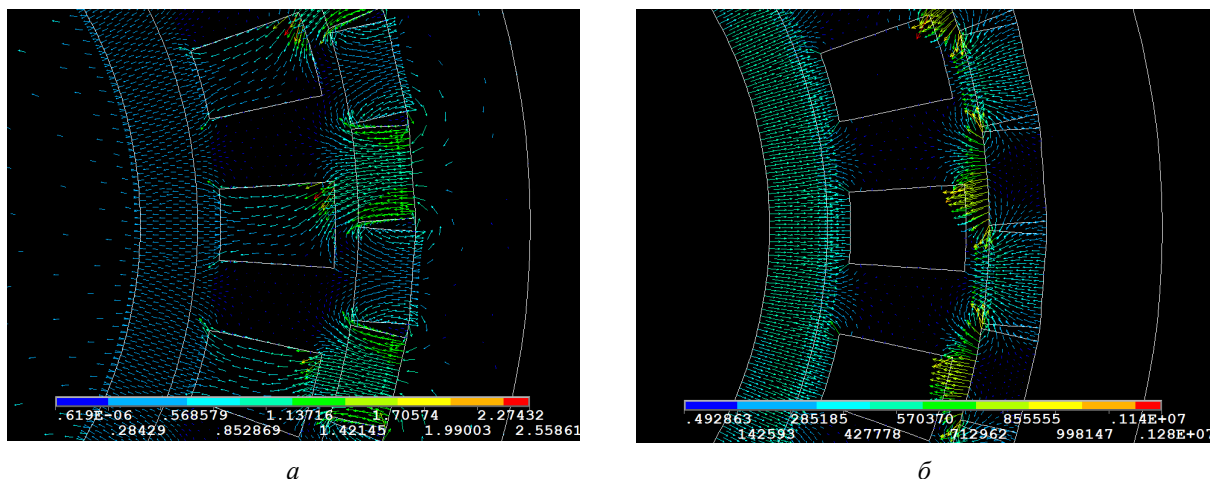


Рис. 3. Поле векторів магнітної індукції, Тл (а) та напруженості, А/м (б)

**Аналітичний розрахунок інтегральних показників магнітного поля**

Аналіз отриманих результатів дав можливість синтезувати заступну схему магнітного кола МР, показану на рис. 4. В основу математичного формулювання задачі визначення потоків та МРС у цій схемі покладено такі допущення:

- магнітне поле у внутрішньому повітряному проміжку є періодичним і для довільної пари точок, розташованих на віддалі однієї полюсної поділки, відрізняється лише знаком;
- усі ділянки магнітного кола замінено зосередженими лінійними магнітними провідностями;
- втрати в сталі відсутні.

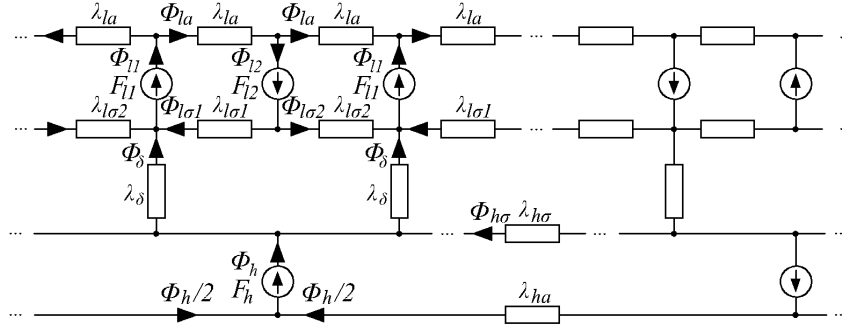


Рис. 4. Заступна схема магнітного кола коаксіального редуктора

У цій схемі виникають дев'ять магнітних потоків, а саме:

$F_{l1}$ ,  $F_{l2}$ ,  $F_h$  – потоки через нейтральні перерізи двох сусідніх полюсів тихохідного ротора та потік полюса швидкохідного ротора, відповідно;

$F_d$  – потік через сталевий елемент модулятора;

$F_{ls1}$ ,  $F_{ls2}$ ,  $F_{hs}$  – потоки розсіювання двох сусідніх полюсів тихохідного ротора та потік розсіювання полюса швидкохідного ротора, відповідно;

$F_{la1}$ ,  $F_{la2}$  – потоки в частинах ярма двох сусідніх полюсів тихохідного ротора.

Рівняння за законом повного струму для чотирьох незалежних контурів цієї схеми (рис. 4):

$$\begin{aligned} 2F_h + 2F_{l1} + 2F_d + k_r(F_{la1} + F_{la2}) + F_{ha} &= 0; \\ F_{l1} + F_{la1} + F_{l2} + F_{ls1} &= 0; \\ -F_{l2} + k_r F_{la2} + F_{l1} - k_r F_{ls2} &= 0; \\ 2F_d - k_r F_{ls1} + k_r F_{ls2} + F_{hs} &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

де  $F_{l1}$ ,  $F_{l2}$ ,  $F_h$  – МРС двох сусідніх полюсів тихохідного ротора та МРС полюса швидкохідного ротора, відповідно;  $F_d$  – спад магнітної напруги на сталевому елементі модулятора;  $F_{ls1}$ ,  $F_{ls2}$ ,  $F_{hs}$  – спади магнітних напруг на шляхах потоків розсіювання двох сусідніх полюсів тихохідного ротора та спад магнітної напруги полюса швидкохідного ротора, відповідно;  $F_{la1}$ ,  $F_{la2}$ ,  $F_{ha}$  – спади магнітних напруг у частинах ярм двох сусідніх полюсів тихохідного ротора та в ярмі швидкохідного ротора, відповідно.

Перше рівняння системи (9) записано для пари сусідніх полюсів швидкохідного ротора.

Для п'яти вузлів запропонованої схеми на підставі принципу неперервності магнітного потоку встановлено, що

$$\begin{aligned} F_d + F_{ls1} + F_{ls2} + F_{l1} &= 0; \\ F_{l1} + F_{la1} + F_{la2} &= 0; \\ -F_{l2} + F_{la1} - F_{la2} &= 0; \\ F_{l2} - F_{ls1} - F_{ls2} &= 0; \\ F_h + 2F_{hs} - k_r F_d &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Характеристики розмагнічування полюсів вважалися лінійними функціями

$$F_h = a_h F_h + b_h; \quad F_{l1} = a_l F_{l1} + b_l; \quad F_{l2} = a_l F_{l2} + b_l, \quad (11)$$

де  $a_{(h/l)} = \frac{hH_c}{SB_r}$ ;  $b_{(h/l)} = hH_c$  – коефіцієнти характеристик розмагнічування полюсів;  $h$ ,  $S$  – висота та площа нейтрального перерізу відповідного полюса.

Сукупність вебер-амперних характеристик ділянок магнітопроводу

$$\begin{aligned} F_d &= \frac{F_d}{l_d}; \quad F_{ls1} = \frac{F_{ls1}}{l_{ls1}}; \quad F_{ls2} = \frac{F_{ls2}}{l_{ls2}}; \quad F_{hs} = \frac{F_{hs}}{l_{hs}}; \\ F_{la1} &= \frac{F_{la1}}{l_{la}}; \quad F_{la2} = \frac{F_{la2}}{l_{la}}; \quad F_{ha} = \frac{0,5F_h}{l_{ha}}, \end{aligned} \quad (12)$$

де

$$\begin{aligned} I_d &= k_{s1} m_0 \frac{b_s l_d}{d_h + d_l}; & I_{ls1} &= m_0 \frac{4 p_l d_l l_d}{\pi a_l d_l}; & I_{ls2} &= k_{s2} I_{ls1}; \\ I_{hs} &= m_0 \frac{4 p_h d_h l_d}{\pi a_h d_h}; & I_{la} &= m_0 m_r \frac{2 p_l h_{la} l_d}{\pi d_{la}}; & I_{ha} &= m_0 m_r \frac{2 p_h h_{ha} l_d}{\pi d_{ha}} \end{aligned} \quad (13)$$

– магнітні провідності відповідних ділянок;

$b_s, h_{la}, h_{ha}, d_{la}, d_{ha}$  – середня ширина одного елемента модулятора, товщини ярм тихохідного та швидкохідного роторів, зовнішній та внутрішній діаметри кільця модулятора, відповідно;

$a_l, a_h$  – коефіцієнти полюсного перекриття тихохідного та швидкохідного роторів;

$k_{s1}, k_{s2}$  – розрахункові коефіцієнти, значення яких залежать від співвідношення розмірів частин магнітного кола (вони визначені на підставі опрацювання результатів математичних експериментів лише для п'яти типорозмірів магнітних редукторів й потребують подальшого дослідження та уточнення).

На підставі розв'язку лінійної системи рівнянь (9)–(12) визначено амплітуди МРС (2)

$$F_{hm} = |F_h|; \quad F_{lm} = \frac{|F_{l1}|}{2} \quad (14)$$

та амплітуду періодичної складової магнітної провідності (3)

$$I_{sm} = \frac{30 m_s}{p_l} \frac{d_{\max} + I_{d \min}}{2} \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi}, \quad (15)$$

де

$$I_{d \max} = m_0 \frac{b_s l_d}{d_h + d_l}; \quad I_{d \min} = m_0 \frac{b_{sd} l_d}{d_h + d_l + h_s} \quad (16)$$

– характерні магнітні провідності модулятора.

Запропоновану методику апробували, порівнюючи максимальні моменти МР з аналогічними величинами, отриманими із використанням вищезгаданої FEM-моделі. Результати такого порівняння для редукторів з п'ятьма різними передавальними числами зведено до табл. 2.

Таблиця 2

**Порівняльна характеристика розрахунку максимальних магнітних моментів**

Типорозмір магнітного редуктора, $p_h/p_l/m_s$	FEM-аналіз	Пропонований спосіб	Розбіжність, %
2/21/23	0,7643/8,032	0,6033/6,334	21,1
2/20/22	0,8296/8,261	0,6544/6,544	20,8
2/8/10	2,107/8,407	2,236/8,944	6,38
3/11/14	2,644/9,653	2,443/8,959	7,19
4/17/21	2,135/9,042	1,892/8,042	11,1

### Висновки

Запропонований спосіб визначення максимальних моментів вирізняється порівняно простим алгоритмом, що дає змогу оцінити значення магнітних моментів редуктора з точністю, не нижчою за 20–25 % щодо числових методів, які ґрунтуються на розрахунку магнітного поля.

Невисока точність пояснюється прийнятим рівнем допущень для описання магнітної системи редуктора. З іншого боку, реалізація запропонованого алгоритму не потребує використання спеціалізованого програмного забезпечення та дає змогу порівняно швидко отримати уявлення про основні проєктні показники МР. Згенеровано сукупність вхідних даних (розмірів та параметрів) для подальшого уточненого аналізу таких об'єктів.

### Перспективи подальших досліджень

Запропонований алгоритм плануємо використати для створення повноцінної методики синтезу магнітних передач такого типу, а саме методики, яка за мінімальною кількістю вхідної інформації,



наприклад, на підставі значень номінального моменту, частоти обертання вихідного вала та передавального відношення давала би змогу визначати структуру та розміри МР.

Іншим напрямом досліджень, у якому заплановано застосовувати отриманий алгоритм розрахунку магнітного моменту, є опрацювання питань проектування електричних двигунів із інтегрованими в їх структуру магнітними редукторами.

#### Список літератури

1. Atallah K., Howe D. A novel high-performance magnetic gear, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2001, Vol. 37, No. 4, pp. 2844–2846.
2. Atallah K., Calverley S. D., & Howe D. Design, analysis and realisation of a high-performance magnetic gear. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 2004, Vol. 151(2), pp. 135–143.
3. Niguchi N., Hirata K., Muramatsu M., & Hayakawa Y. Transmission torque characteristics in a magnetic gear. In *The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM (IEEE) 2010*, pp. 1–6.
4. Wu Y. C., & Jian B. S. Magnetic field analysis of a coaxial magnetic gear mechanism by two-dimensional equivalent magnetic circuit network method and finite-element method. *Applied Mathematical Modelling*, 2015, 39(19), pp. 5746–5758.
5. Jian L., & Chau K. T. Analytical calculation of magnetic field distribution in coaxial magnetic gears. *Progress In Electromagnetics Research*, 2009, 92, pp. 1–16.
6. Tallerico T. F., Scheidler J. J., & Cameron Z. A. Electromagnetic mass and efficiency of magnetic gears for electrified aircraft. In *2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS), (IEEE)*, 2019, pp. 1–25.
7. Jian L., Chau K. T., Gong Y., Jiang J. Z., Yu C., & Li W. Comparison of coaxial magnetic gears with different topologies. *IEEE Transactions on magnetics*, 2009, Vol. 45(10), pp. 4526–4529.
8. Penzkofer A., & Atallah K. Magnetic gears for high torque applications. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, Vol. 50(11), pp. 1–4.
9. Gardner M. C., Jack B. E., Johnson, M., & Toliyat, H. A. Comparison of surface mounted permanent magnet coaxial radial flux magnetic gears independently optimized for volume, cost, and mass. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, Vol. 54(3), pp. 2237–2245.
10. Aiso K., Akatsu K., & Aoyama Y. A novel reluctance magnetic gear for high-speed motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, Vol. 55(3), pp. 2690–2699.

**O. Makarchuk**

Lviv Polytechnic National University,  
Department of Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems,  
oleksandr.v.makarchuk@lpnu.ua

**B. Krokhmalnyi**

Lviv Polytechnic National University,  
Department of Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems,  
bohdan.i.krokhmalnyi@lpnu.ua

**I. Zubchik**

Lviv Polytechnic National University,  
Department of Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems,  
iryna.zubchik.ee.2018@lpnu.ua

**D. Calus**

Czestochowa University of Technology,  
Faculty of Electrical Engineering,  
dc@el.pcz.czyst.pl

#### MAGNETIC TORQUE ANALYSIS OF HIGH-PERFORMANCE MAGNETIC GEARS

© Makarchuk O., Krokhmalnyi B., Zubchik I., Calus D., 2022

The principle of operation, design and features of calculation of magnetic moments of non-contact single-stage magnetic gears, which differs from mechanical gears by unlimited resource, high level of reliability and lack of maintenance, is considered.

The aim of the study is to develop an algorithm for calculating the magnitude of the magnetic moments of coaxial magnetic gears.

Research methods that are used to achieve this goal combine the advantages of analytical approaches and numerical simulation methods. The calculating moments algorithm development and analysis of technical parameters are based on the magnetic circuit theory. Verification of the decisions related to the structure of the equivalent circuit of the magnetic core of the gear is made using the finite element method.

The designed algorithm is based on the assumption of an interaction between two harmonic waves of the magnetomotive force of high-speed and low-speed rotating parts of the gear with the resultant magnetic field, in which magnetic conductive ring with variable magnetic conductivity in tangential direction is located. Integral indicators of such interaction, in particular magnetic moments are determined through the derivative of energy of the magnetic field by the angle of rotation of the corresponding rotor.

The FEM-analysis of the magnetic field allow to develop the equivalent circuit of the magnetic core of the gear, the parameters of which are determined on the basis of the magnetic circuit parts size and the magnetic properties of used materials. The solution of the system of linear equations that describe this equivalent circuit gives values that characterize the magnetic field of the gear (magnetic fluxes, MMF poles, magnetic voltage drops). They are directly used in the algorithm for calculating magnetic moments.

The article contains a description of the design and operation principle of the coaxial magnetic gears. A comparison of the results of calculating the maximum moments of such gears with different gear ratios, obtained using the proposed analytical algorithm and FEM-analysis is given.

*Key words: magnetic gears; coaxial gears; gear ratio; principle of operation magnetic gears; magnetic moment; FEM-analysis.*