

М.А. КОВАЛЕНКО, А.С. БУРЛАКОВ, І.Я. КОВАЛЕНКО

МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПРИВОДУ ПАЛИВНОЇ СИСТЕМИ АВТОМОБІЛЯ

У роботі розглянуто питання підвищення надійності та вдосконалення характеристик низьковольтного двигуна постійного струму з постійними магнітами, що використовуються у приводах паливної системи автомобіля. Двигуни постійного струму із постійними магнітами використовуються в якості привідних двигунів в автомобільному транспорті, оскільки мають високу надійність, простоту конструкції та обслуговування. В рамках проведеного дослідження розроблено тривимірну польову математичну модель для дослідження розподілу електромагнітного поля та характеристик досліджуваного двигуна. Розробка саме тривимірної польової математичної моделі обумовлена тим, що дана модель у повній мірі враховує складний тривимірний характер розподілу поля та може врахувати наявність повздовжніх та поперечних кінцевих ефектів. Представлено результати моделювання електромагнітних процесів у базовій конструкції двигуна, виявлено суттєвий вплив кінцевих ефектів на розподіл магнітної індукції, що призводить до збільшення втрат, нерівномірного нагріву, підвищення вібрацій та зниження надійності. Запропоновано методи оптимізації конструкції, зокрема збільшення осьової довжини магнітів статора, що дозволяє зменшити вплив поперечних кінцевих ефектів та профілювання полюсів, що дозволяє зменшити поперечні кінцеві ефекти і покращити характеристики двигуна. Результати досліджень підтверджують ефективність запропонованих підходів та можуть бути використані при проектуванні електромеханічних перетворювачів енергії для автомобільної та іншої техніки.

Ключові слова: математичне моделювання, постійні магніти, кінцеві ефекти, електромеханічний перетворювач, електробензонасос, колекторний двигун постійного струму.

М.А. KOVALENKO, A.S. BURLAKOV, I.Y. KOVALENKO

SIMULATION THE DC MOTOR CHARACTERISTICS DRIVING A VEHICLE FUEL SYSTEM

The paper considers the issue of increasing the reliability and improving the characteristics of a low-voltage DC motor with permanent magnets, which is used in the drives of the car fuel system. DC motors with permanent magnets are used as drive motors in motor transport, as they have high reliability, simplicity of design and maintenance. As part of the research, a three-dimensional field mathematical model was developed to study the distribution of the electromagnetic field and the characteristics of the engine under study. The development of a three-dimensional field mathematical model is due to the fact that this model fully takes into account the complex three-dimensional nature of the field distribution and can take into account the presence of longitudinal and transverse end effects. The results of modeling electromagnetic processes in the basic design of the engine are presented, a significant influence of end effects on the distribution of magnetic induction is revealed, which leads to increased losses, uneven heating, increased vibrations and reduced reliability. Methods for optimizing the design are proposed, in particular, increasing the axial length of the stator magnets, which allows reducing the influence of transverse end effects and profiling the poles, which allows reducing transverse end effects and improving engine characteristics. The research results confirm the effectiveness of the proposed approaches and can be used in the design of electromechanical energy converters for automotive and other equipment.

Key words: mathematical simulation, permanent magnets, end effects, electromechanical converter, electric fuel pump, DC brush motor.

Вступ. Сучасні системи впорскування пального в автомобільних двигунах внутрішнього згорання оснащуються електричними бензонасосами, що працюють від двигунів постійного струму [1]. Дані привідні насоси встановлюються як поза паливним баком, під днищем кузова, так і безпосередньо всередині бака, заправленими в паливо [2, 3].

Для забезпечення ефективної роботи інжекторних систем живлення, бензонасос повинен подавати необхідну кількість пального під відповідним тиском на всіх режимах роботи двигуна. Традиційні насоси із діфрагмою [4], які використовувалися в карбюраторних двигунах, не підходять для систем впорскування через їхню недостатню продуктивність і тиск [5], а також через механічний привід, що активується лише після запуску двигуна. Натомість, електричні бензонасоси, що працюють від бортової мережі автомобіля (12 В), забезпечують необхідний тиск пального ще до запуску двигуна, що є критично важливим для інжекторних систем [6].

Конструкція електробензонасоса, як правило, інтегрує електродвигун і насосний вузол в одному корпусі. При цьому бензин не проводить електричний струм, а отже не впливає на електромагнітні процеси в двигуні і забезпечує ефективне його охолодження та змащення рухомих частин, зокрема щіткового-колекторного вузла і осі обертання ротора [7, 8]. Використання втулок

ковзання замість підшипників кочення підвищує надійність конструкції, а постійне охолодження бензином запобігає перегріву двигуна, забезпечуючи його довговічність до 200 тисяч кілометрів пробігу [9]. Однак, необхідно пам'ятати, що регулярна експлуатація автомобіля з низьким рівнем палива в баку призводить до погіршення його охолодження та передчасному виходу з ладу [10].

Крім того, якість пального відіграє важливу роль у надійності роботи електробензонасоса [11]. Використання бензину з високим вмістом присадок або домішок може підвищити його електропровідність, що може призвести до замикання обмоток двигуна. Крім того, наявність абразивних частинок у паливі може спричинити зношування деталей насоса, особливо при недостатній фільтрації [12].

Найбільш поширеними конструкціями двигунів, що використовуються в якості електробензонасосів є двигуни постійного струму із постійними магнітами. Це обумовлено як простотою конструкції і надійністю таких двигунів, так і наявністю бортової напруги постійного струму транспортного засобу 12 чи 24 В.

Використання двигунів постійного струму із постійними магнітами в електробензонасосах обумовлено наявністю низки переваг: високої ефективності, компактністю, стабільністю збудження, простотою керування та відсутністю втрат у обмотках збудження. Ці

характеристики роблять їх ідеальними для застосування не лише в автомобільній промисловості, а і у авіаційних системах та системах автоматики.

Актуальність. Актуальність даного дослідження зумовлена необхідністю підвищення надійності та вдосконалення характеристик двигуна постійного струму із постійними магнітами шляхом розробки його тривимірної польової математичної моделі для дослідження повздовжніх та поперечних кінцевих ефектів у тому числі. Такий підхід забезпечує можливість детального аналізу параметрів і технічних характеристик наявного двигуна з можливістю його подальшого удосконалення. У якості базового зразка для дослідження обрано двигун, що є приводом бензонасоса і може бути адаптований для застосування в якості гідронасоса, наприклад в теплових машинах.

Наявність повздовжніх та поперечних кінцевих ефектів у електромеханічних перетворювачах в цілому призводить до ряду негативних факторів. Зокрема, це порушення однорідності розподілу електромагнітного поля: у крайових зонах магнітне поле викривляється, що знижує точність обчислень в аналітичних моделях та призводить до нерівномірного розподілу електромагнітних сил; наявність додаткових втрат призводить до збільшених вихрових струмів у магнітному осерді, що підвищує втрати і відповідно, нагрів двигуна.

За рахунок підвищення локальних втрат відбувається зниження загального ККД: через неоднорідність розподілу електромагнітного поля зменшується і електромагнітний момент. Крім того, нерівномірність розподілу електромагнітного поля призводить до нерівномірності розподілу електромагнітних зусиль, що призводить до появи додаткових некомпенсованих термомеханічних напруженостей, може викликати небажані механічні деформації або шум.

Метою роботи є розробка тривимірної польової математичної моделі двигуна із постійними магнітами приводу паливної системи автомобіля.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є низьковольтний двигун із постійними магнітами. Основні складові прототипу досліджуваного двигуна наведено на рис. 1.

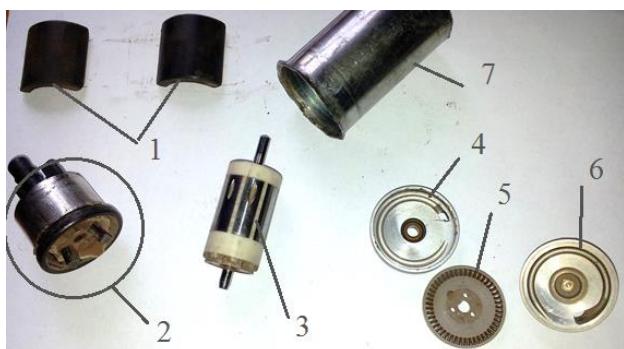


Рис. 1. Демонтований електробензонасос марки BOSCH типу 0580454035

Математичне моделювання в рамках даного дослідження, проведено із використанням реального прототипу електродвигуна постійного струму із постійними магнітами відомого виробника BOSCH. Для отримання основних конструктивних розмірів та параметрів обмотки праведно демонтаж. При цьому виконано повний демонтаж електробензонасоса та вимір необхідних для моделювання геометричних і електричних параметрів. На рис. 1 показано: 1 – постійні магніти статора, 2 – щітковий вузол, 3 – ротор із обмоткою якоря, 4 – підшипниковий щит, 5 – турбіна, 6 – кришка турбіни.

Основні параметри та геометричні дані досліджуваного прототипу двигуна постійного струму зведені в табл. 1. [13].

Таблиця 1 – Основні геометричні розміри досліджуваного двигуна

Параметр	Величина
довжина ротора – L_p	25мм
довжина магнітів – L_m	25мм
діаметр ротора – D_p	22,5мм
кількість пазів – Z	8
внутрішній діаметр магнітів – $D_{внм}$	23мм
зовнішній діаметр магнітів – $D_{змм}$	35мм
зовнішній діаметр корпусу – $D_{знк}$	37мм
довжина корпусу – L_k	65мм
висота паза h_n	4.5 мм
ширина широкої частини паза b_1	3.5 мм
ширина вузької частини паза b_2	2.2 мм
діаметр валу D_v	5 мм
довжина валу L_v	70 мм

Загальний вигляд розрахункової області досліджуваного двигуна у тривимірному виконанні, побудований за даними, наведеними в табл.1 представлений на рис. 2.

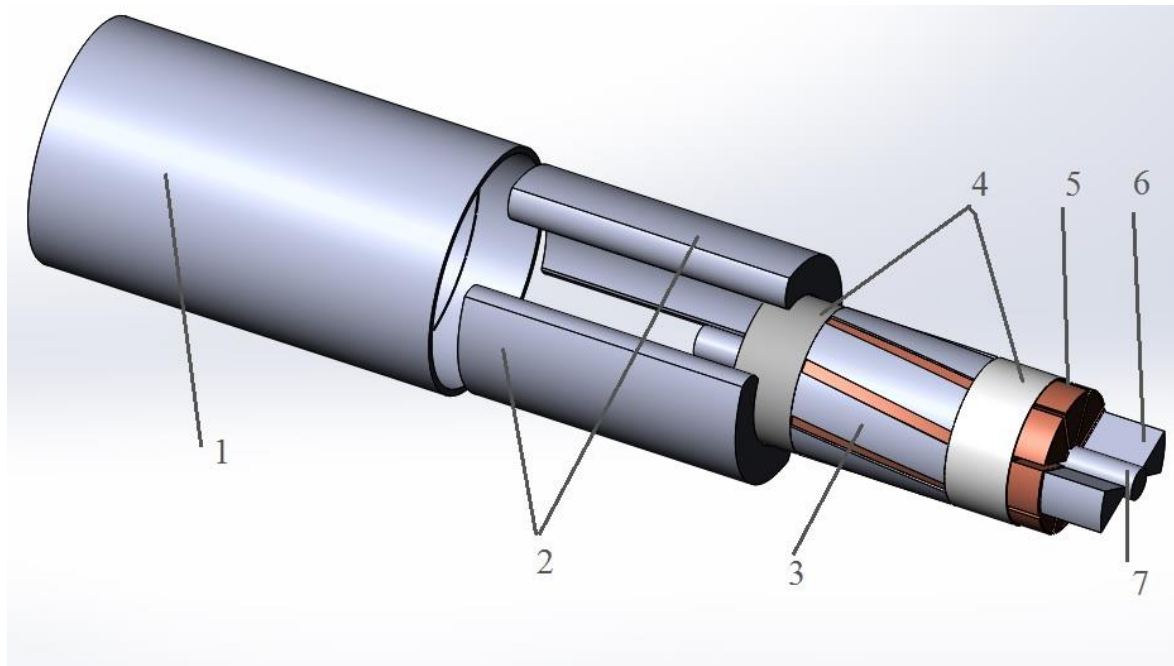


Рис. 2. Загальний вигляд розрахункової області досліджуваного двигуна постійного струму із постійними магнітами

Математична модель. Розробка тривимірної польової математичної моделі пов'язана із появою певних труднощів, які залежать як від можливості розрахункової потужності обчислювальної машини так і з характером поставленого завдання. При розробці математичної моделі досліджуваного двигуна прийняті певні припущення, а саме:

- магнітне осердя ротора виконано не електропровідним;
- з метою заощадження апаратних ресурсів ПЕОМ не враховується нелінійні характеристики магнітного осердя ротора.

Рівняння, що описує розподіл електромагнітного поля в розрахунковій області досліджуваного двигуна, відносно векторного магнітного потенціалу A записується у наступному вигляді [14]:

$$\nabla \times \left(\frac{\nabla A - B_r}{\mu} \right) = J_c, \quad (1)$$

де B_r – залишкова індукція постійного магніту; J_c – густини струмів в обмотці ротора; μ – магнітна проникність.

Диференціальне рівняння в часткових похідних формулюється в межах розрахункової області, що відображає конструкцію ДПС. Ця область включає в себе конструктивні елементи двигуна.

Електромагнітний момент досліджуваного двигуна приводу бензонасоса паливної системи автомобіля розраховується за наступним виразом [15]:

$$M_{EM} = \frac{2 \cdot p \cdot R_2}{\mu_0} \int_S B_n B_\tau ds, \quad (2)$$

де B_n , B_τ – нормальна і тангенціальна до поверхні ротора складові магнітної індукції; R_2 , L_p – радіус і довжина ротора; p – число пар полюсів; τ – полюсна поділка ротора.

Розрахунок електромагнітного моменту досліджуваного двигуна проводиться за методикою, що передбачає розрахунок поверхневого вектору густини магнітного зусилля (2).

Для отримання однозначного розв'язку на межах розрахункової області задаються граничні умови першого роду:

$$A(x, y, z, t)|_{G_1=0}, \{x, y, z\} \in G_1, \quad (3)$$

це означає прийняття припущення про відсутність магнітних потоків, що проходять через виділену межу G_1 розрахункової області.

Умови періодичності, які задають у випадках, коли заздалегідь відомо, що розподіл поля періодично повторюється уздовж вибраного напрямку в розрахунковій області.

Результати моделювання базової конструкції. Розподіл електромагнітного поля в розрахунковій області досліджуваного двигуна наведено на рис. 3.

Для спрощення процесу візуалізації, підвищення інформативності рисунка та подачі ілюстративного матеріалу на рис. 3 не показані лобові частини, колектор зі щітками та вал.

Базовий двигун постійного струму із постійними магнітами характеризується наступними геометричними та конструктивними параметрами:

- довжина ротора – $L_p = 25$ мм;
- діаметр ротора – $D_p = 22,5$ мм;
- кількість пазів – $N = 8$;
- внутрішній діаметр магнітів – $D_{внм} = 23$ мм;
- зовнішній діаметр магнітів – $D_{знм} = 35$ мм;
- зовнішній діаметр корпуса – $D_{знк} = 37$ мм;
- довжина корпуса – $L_k = 65$ мм.
- густина струму в обмотці – $j = 9 \cdot 10^6$ А/м².
- висота паза $h_p = 4,5$ мм;
- ширина широкої частини паза $b_1 = 3,5$ мм;
- ширина шліца $b_{ш} = 2,0$ мм;
- висота шліца $h_{ш} = 0,5$ мм.
- магніти – SmCo.

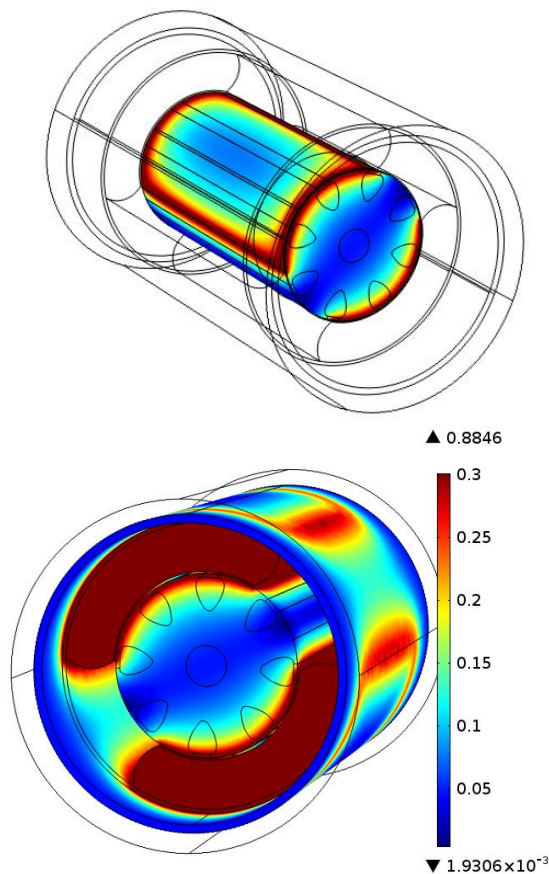


Рис. 3. Розподіл магнітної індукції в розрахунковій області досліджуваного двигуна

Величина втрат, нагріву, електромагнітного моменту та інші експлуатаційні характеристики залежать від конструкції електроmechanічного перетворювача енергії в цілому. Важливим показником, що впливає на дані величини є повздовжні та поперечні кінцеві ефекти, які притаманні практично всім конструкціям електроmechanічних перетворювачів. Розроблена польова математична модель дозволяє дослідити повздовжні та поперечні кінцеві ефекти досліджуваного двигуна, оскільки характер розподіл електромагнітного поля є тривимірним. Для аналізу кінцевих ефектів на роторі досліджується величина магнітної індукції на лінії, що проходить по поверхні ротора в осьовому напрямку. Розподіл магнітної індукції на поверхні ротора вздовж його осьового розміру показано на рис. 4.

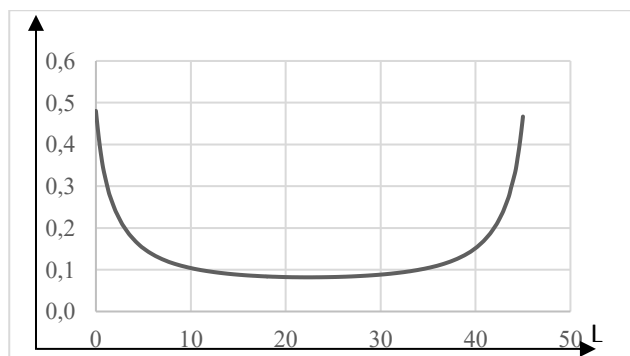
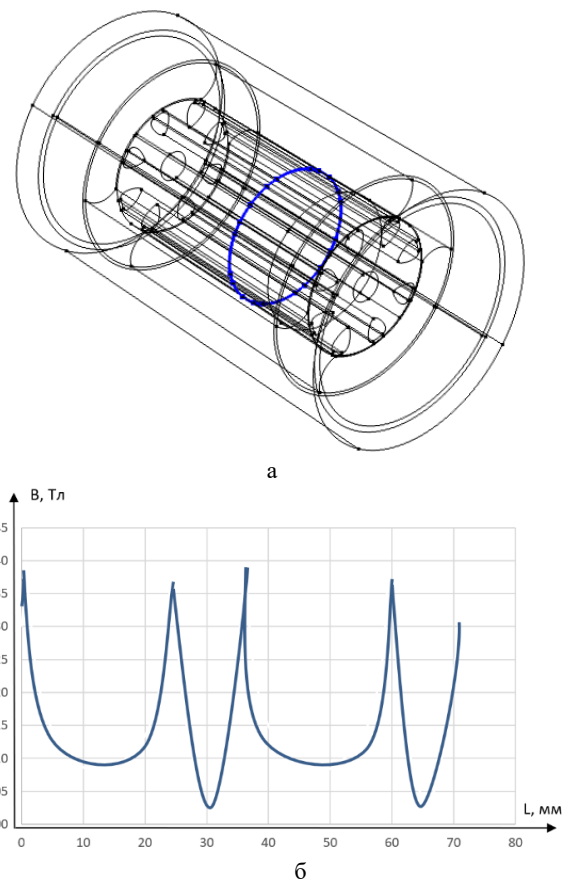


Рис. 4. Розподіл магнітної індукції вздовж повітряного проміжку на поверхні ротора

Крива розподілу магнітної індукції, що показана на рис. 4 ілюструє наявність повздовжніх кінцевих ефектів. Поява повздовжніх кінцевих ефектів обумовлена кінцевою довжиною електроmechanічного перетворювача в осьовому напрямку. Для більш очевидного фізичного явлення причин виникнення повздовжніх кінцевих ефектів достатньо пригадати приклад з шкільної фізики з голкою, на кінці якої відбувається максимальна концентрація заряджених частинок. Певні аналогічні процеси відбуваються і з повздовжніми кінцевими ефектами в електроmechanічних перетворювачах енергії, оскільки магнітний потік концентрується на межі двох середовищ: в даному випадку магнітопровідної електротехнічної сталі та повітря.

Це явище добре видно по рис. 3. Причому величина збурень магнітної індукції на торцях ротора та статора (рис. 4) в $\approx 4,5$ -5 разів більша від номінальної величини індукції ($\approx 0,1$ Тл) у повітряному проміжку на досліджуваній ділянці $\approx 0,47$ -0,5 Тл.

Розподіл магнітної індукції в радіальному напрямку досліджуваного двигуна показано на рис. 5.



а – лінія, на якій побудовано розподіл магнітної індукції;
б – розподіл магнітної індукції в радіальному напрямку
Рис. 5. Поперечні кінцеві ефекти

По рис. 5. видно, що розподіл середнього значення індукції в повітряному проміжку відрізняється від характеру розподілу, що описаний в літературних джерелах по проектуванню електричних машин постійного струму. Це обумовлено тим, що в тривимірній польовій математичній моделі в повній мірі враховуються

кінцеві ефекти, що викликані індивідуальними особливостями конструкції об'єкту дослідження.

Отримані залежності відображають вплив кінцевих ефектів на параметри та характеристики досліджуваного двигуна. По отриманим результатам дослідження видно, що індукція на краях ротора та напроти торців постійних магнітів перевищує середнє значення магнітної індукції в повітряному проміжку приблизно в 4 – 5 разів, це призводить до збільшення втрат в магнітному осерді ротора, є причиною підвищеного та нерівномірного нагріву. Також, це призводить до підвищення пульсацій електромагнітного моменту двигуна.

Нерівномірний нагрів бочки ротора призводить до підвищення вібрації, прискореного зносу підшипникових вузлів та передчасного виходу працюючого ДПС з ладу. Вплив кінцевих ефектів призводить до загального зниження надійності двигуна та до зменшення енергетичних показників.

На рис. 6 зображено тензор магнітного натягу для досліджуваного ДПС із постійними магнітами – це тензор другого рангу, використовується в класичному електромагнетизмі, для представлення взаємодії між електричними чи магнітними силами та механічним імпульсом.

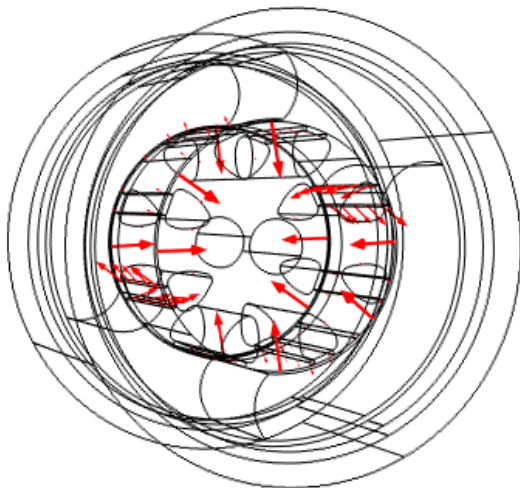


Рис. 6. Тензор магнітного натягу досліджуваного ДПС із постійними магнітами

По рис. 6 видно нерівномірний характер розподілу тензору магнітного натягу вздовж осі ротора досліджуваного двигуна, що викликано наявністю повздовжніх та поперечних кінцевих ефектів.

Дослідження способу зменшення впливу повздовжніх кінцевих ефектів. Для зменшення впливу повздовжніх кінцевих ефектів пропонується змінювати співвідношення між активною довжиною ротора та статора. Теоретично, це призведе до зменшення напружень електромагнітного поля на торцях досліджуваного двигуна.

Для зменшення впливу кінцевих ефектів на торцях ротора проведено дослідження ДПС із постійними магнітами, в рамках розробленої тривимірної польової математичної моделі, в якому поетапно варіювалась довжина постійних магнітів і досліджено вплив цього засобу на величину кінцевих ефектів. Проводились

дослідження варіантів із збільшенням осевої довжини магнітів понад довжини ротора у співвідношенні $L_{\text{рот}}/L_{\text{маг}}$: 1,1; 1,3; 1,6; 1,8 рази. Попередні дослідження показали, що збільшення довжини магнітів в 2 рази не призводить до подальшого зменшення кінцевих ефектів.

При збільшенні тільки на 10% довжини магнітів можна спостерігати зменшення стрибків індукції майже на 20%. Проаналізувавши графіки за оптимальний варіант було обрано модель з довжиною магнітів на 30% більше від прототипу (внутрішній об'єм електробензонасоса дозволяє реалізувати таке вдосконалення), так як при цьому суттєво зменшуються краєві ефекти.

На рис. 7 показано розподіл магнітної індукції на торці повітряного проміжку при коефіцієнтах збільшення 1, 1.1, 1.3, 1.6, 1.8 зверху до низу відповідно.

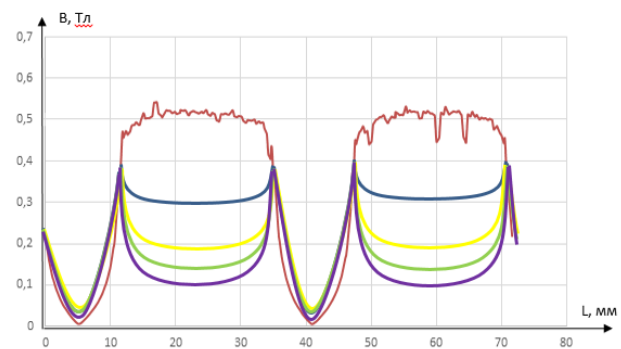
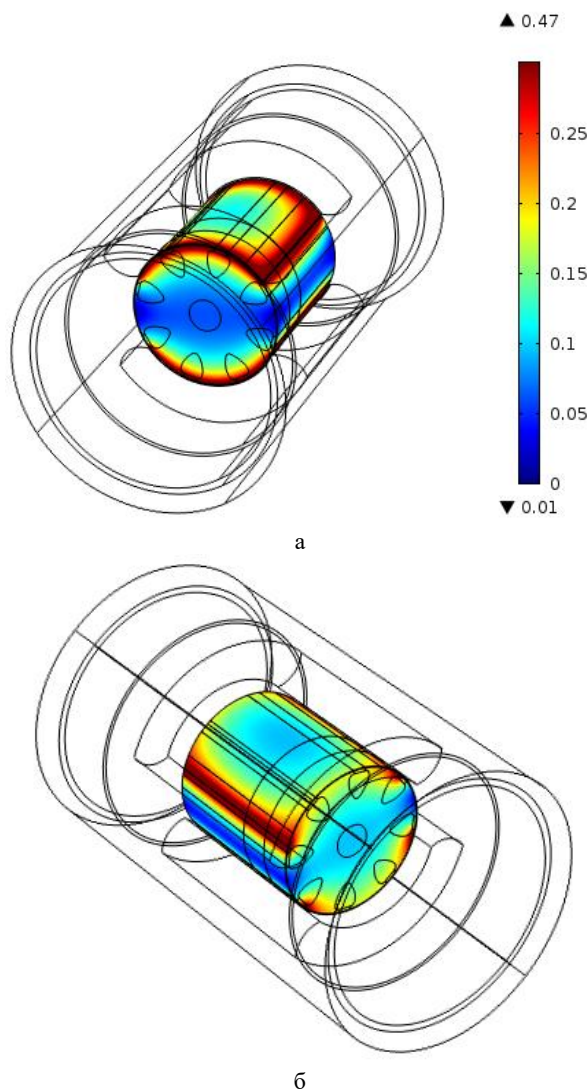


Рис. 6. Розподіл магнітної індукції на торці повітряного проміжку при коефіцієнтах збільшення 1, 1.1, 1.3, 1.6, 1.8

По результатам аналізу залежностей, що показані на рис. 6 розподілу магнітної індукції на кінці повітряного проміжку обрано оптимальне співвідношення $L_{\text{маг}}/L_{\text{рот}} = 1,3$.

Розподіл магнітної індукції в розрахунковій області базового та оптимізованого двигуна постійного струму із постійними магнітами показано на рис. 7.

По рис. 7 видно відмінність в торцевих зонах двох досліджуваних варіантів виконання ДПС. Так, в двигуні із оптимальним співвідношенням активних довжин ротора та статора (постійних магнітів) значення індукції на торці суттєво зменшено.



а – двигуна базової конструкції; б – двигуна оптимізованої конструкції

Рис. 7. Розподіл електромагнітного поля

Результати дослідження способу зменшення впливу поперечних кінцевих ефектів. На основі обраного оптимального співвідношення довжин ротора та магнітів ($L_{\text{маг}}/L_{\text{рот}} = 1.3$), досліджується вплив профілювання магнітів на радіальні кінцеві ефекти. Радіальними кінцевими ефектами називаються такі, що викликані збуренням магнітного потоку в напрямку обертання основного потоку.

Профілювання полюсів передбачає збільшення повітряного проміжку на краю полюса (в даному випадку магніту) – δ_2 , по відношенню до заданого – δ_1 (рис. 8).

Досліджувались наступні коефіцієнти профілювання:

$$k_{\delta} = \frac{\delta_{\text{max}}}{\delta_{\text{min}}} = 1.2; 1.3; 1.4; 1.6.$$

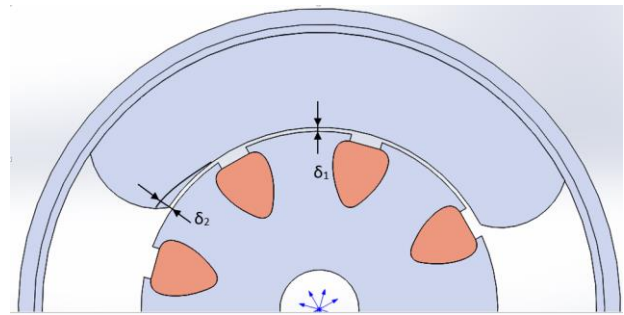


Рис. 8. Відношення повітряного проміжку δ_1 до δ_2 при профілюванні магнітів

Для дослідження радіальних кінцевих ефектів та порівняння результатів розрахунку введено коефіцієнт зміни магнітної індукції $k_{\text{рк}}$:

$$k_{\text{рк}} = \frac{B_{\delta \text{max}}}{B_{\delta \text{сер}}}$$

Відношення $k_{\text{рк}}$ визначається для заданого діапазону k_{δ} . По отриманим даним із розрахунків побудовано залежність коефіцієнта зміни магнітної індукції від коефіцієнта профілювання, що показано на рис. 9.

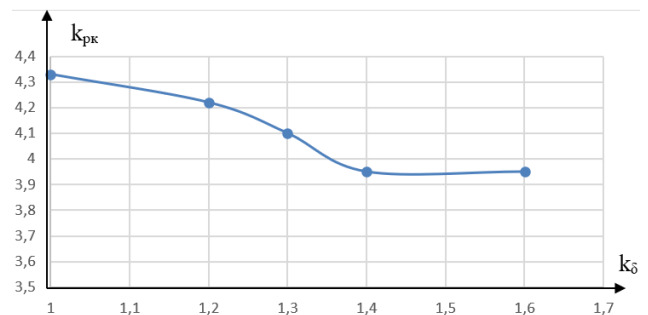


Рис. 9. Залежність коефіцієнта зміни магнітної індукції від коефіцієнта профілювання

На основі отриманих результатів можливо зробити висновок, що найкращий результат досягається при коефіцієнті профілювання $k_{\delta} = 1.4$. Подальше збільшення коефіцієнта не призводить до суттєвого зменшення кінцевих ефектів.

Висновки.

1. Розроблено тривимірну польову математичну модель, що дозволяє визначити розподіл електромагнітного поля та електромагнітних зусиль досліджуваного двигуна із постійними магнітами для привода паливної системи автомобіля.

2. Аналіз базової конструкції показав, що їй притаманні значні повздовжні та поперечні кінцеві ефекти, що призводить до збільшення втрат в магнітному осерді, нерівномірного нагріву бочки ротора, підвищення вібрації двигуна в цілому, зниження надійності.

3. Для зменшення впливу поперечних кінцевих ефектів досліджено спосіб, що полягає у зміні співвідношення між активними довжинами ротора та статора із постійними магнітами. В рамках розробленої тривимірної польової математичної моделі визначено оптимальне співвідношення між $L_{\text{маг}}/L_{\text{рот}}$, при якому поперечні кінцеві ефекти проявляються значно менше.

4. Досліджено технічні рішення, направлені на зменшення повздовжніх кінцевих ефектів. Зокрема,

проаналізовано вплив профілювання постійних магнітів на статорі. Визначено оптимальну величину профілювання магнітів для даного класу двигунів із постійними магнітами.

References

- 1 Zheng Ma, Jingwei Ai, Yamei Yue, Kun Wang, Bin Su, A superhydrophobic magnetoelectric generator for high-performance conversion from raindrops to electricity, *Nano Energy*, Volume 83, 2021, 105846, ISSN 2211-2855, <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105846>.
- 2 Radwan-Pragłowska, N., Wegiel, T., Borkowski, D. (2020). Modeling of Axial Flux Permanent Magnet Generators. *Energies*, no. 13(21), 5741-5745. <https://doi.org/10.3390/en13215741>.
- 3 Sadullaev, N & Nematov, Sh & Sayliev, F. (2022). Evaluation of the technical parameters of the generator for efficient electricity generation in low-speed wind and water flows. *Journal of Physics: Conference Series*. 2388. 012142. 10.1088/1742-6596/2388/1/012142.
- 4 S. Djebarri, J. F. Charpentier, F. Scuiller and M. Benbouzid, "Design and Performance Analysis of Double Stator Axial Flux PM Generator for Rim Driven Marine Current Turbines," in *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 41, no. 1, pp. 50-66, Jan. 2016, doi: 10.1109/JOE.2015.2407691.
- 5 M. A. Noroozi Dehdez and J. Milimonfared, "A Novel Radial-Axial Flux Switching Permanent Magnet Generator," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 12, pp. 12096-12106, Dec. 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3128901.
- 6 F. Yu et al., "Design and Multiobjective Optimization of a Double-Stator Axial Flux SRM With Full-Pitch Winding Configuration," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 4, pp. 4348-4364, Dec. 2022, doi: 10.1109/TTE.2022.3173938.
- 7 J. Zhao, Y. Wang, J. Li and H. Hu, "Comparative Study on Torque Performance of Five-phase Single-Stator and Double-Stator Permanent Magnet Synchronous Motors," in *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 46-52, March 2022, doi: 10.30941/CESTEMS.2022.00007.
- 8 Sun, Y. & Yu, F. & Yuan, Y. & Huang, Z. & Huang, Y. & Zhu, Z. (2019). A Hybrid Double Stator Bearingless Switched Reluctance Motor. *Diangong Jishu Xuebao/Transactions of China Electrotechnical Society*. 34. 1-10. 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80363.
- 9 Cendoya, M. & Talpone, Juan & Puleston, P.F. & Barrado, José Antonio & Martinez-Salamero, L. & Battaiotto, P.E. (2021). Management of a Dual-Bus AC+DC Microgrid Based on a Wind Turbine with Double Stator Induction Generator. *Wseas transactions on power systems*. 16. 297-307. 10.37394/232016.2021.16.30.
- 10 Li, Zheng et al. 'Design and Analysis of Underwater Power Generation Characteristics of Deflected Double-stator Switched Reluctance Generator'. 1 Jan. 2022 : 1 – 20.
- 11 Widyanto, Aji & Ariwidayat, Rahmat & Husnayaian, Faiz & Rahardjo, Amien & Utomo, A.R. & Ardita, I. (2022). Designing Air-Cored Axial Flux Permanent Magnet Generator with Double Rotor. *ELKHA*. 14. 46. 10.26418/elkha.v14i1.53048.
- 12 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>.
- 13 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>.
- 14 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 (2021). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5 (114), 56–62. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.246601 (ISSN 1729-3774).
- 15 Chumack, V., Katsadze, T., Bazenov, V., Kovalenko, M., & Geraskin, O. (2025). Determining the impact of a magnetoelectric generator on the operation of a local distribution network. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(8 (133), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322917>.

Надійшла (received) 15.04.25

Відомості про авторів / About the authors

Коваленко Михайло Анатолійович (Kovalenko Mykhaylo) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри електромеханіки, тел.: (067) 656-36-51; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>; e-mail: kovalenko_ma@i.ua.

Бурлаков Анатолій Сергійович (Burlakov Anatolii) – магістр електромеханіки, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", тел.: (095) 350-23-62; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1586-2339>; e-mail: brlkv.anatol@gmail.com.

Коваленко Ірина Яківна (Kovalenko Iryna) – асистент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", аспірант кафедри нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії, тел.: (097) 939-96-73; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1097-2041>; e-mail: 2048141@ukr.net.