

В.П. ШАЙДА, О.Ю. ЮР'ЄВА

ЗАСТОСУВАННЯ ГІБРИДНОГО ЗБУДЖЕННЯ В ДВИГУНІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ДЛЯ ПРИВОДА ТРАНСПОРТНИХ ВАЛКІВ У МЕТАЛУРГІЙНІЙ ПРОМИСЛОВІСТІ

Переваги, що надає застосування гібридного збудження, замість традиційного електромагнітного, спонукало авторів на оцінку можливості його застосування для двигунів постійного струму середньої потужності. Дослідження виконувалося з використанням математичного моделювання магнітного поля двигуна постійного струму типу Д812М, призначеного для привода транспортних валків. Умовою дослідження було збереження незмінними габаритів двигуна, його обмоток збудження та додаткових полюсів. Для розрахунків магнітного поля використовувалася програма FEMM, що базується на методи скінченних елементів. Проаналізовано вплив місця розташування постійного магніту на осерді головного полюса на величину магнітного потоку збудження, що ним наводиться. Встановлено, що застосування гібридного збудження дозволяє підвищити магнітний потік збудження на 11 %. При цьому зменшується струмове навантаження обмотки збудження та зменшуються електричні втрати на збудження. Найкращим варіантом розташування постійного магніту, за критерієм максимуму магнітного потоку збудження, є його розташування на полюсному наконечнику осердя головного полюса уздовж повітряного проміжку. Отримані результати дозволять проєктувальникам двигунів постійного струму з гібридним збудженням уникнути хибних рішень при подальшому дослідженні та розробці вказаних двигунів.

Ключові слова: двигун постійного струму середньої потужності, гібридне збудження, метод скінченних елементів, постійні магніти Nd-Fe-B, розташування магнітів на осерді головного полюса, магнітний потік збудження.

V.P. SHAYDA, O.Yu. YURIEVA

APPLICATION OF HYBRID EXCITATION IN A DC MOTOR FOR DRIVE OF TRANSPORT ROLLS IN METALLURGICAL INDUSTRY

Purpose. To determine the effectiveness of the application of hybrid excitation for DC motors of medium power. Estimate the influence of the location of the permanent magnet of the main pole core on the magnitude of the magnetic flux created by it. **Methodology.** The classical theory of electric machines, the calculation of the magnetic field by the finite element method and analytical comparison were used to conduct the research. **Results.** The feasibility of using hybrid excitation for DC motors of medium power has been confirmed. The use of hybrid excitation in an experimental direct current motor made it possible to increase the excitation magnetic flux by 11%. This will make it possible to reduce the current load of the excitation winding, increase the reliability of the motor and reduce electrical losses on the excitation. The optimal location of the permanent magnet, according to the criterion of the maximum magnetic excitation flux, is its location at the main pole shoe along the air gap. **Originality.** The difference between the conducted research and others is that the condition of the research was to keep the dimensions of its motor, the excitation winding and the interpoles winding unchanged. **Practical value.** The obtained results will allow the designers of dc motors with hybrid excitation to avoid wrong decisions during further research and development of these motors.

Keywords: medium power direct current motor, hybrid excitation, finite element method, Nd-Fe-B permanent magnets, placement of magnets on the core of the main pole, magnetic excitation flux.

Вступ. Переважну частину світового ринку електричних машин займають електричні машини змінного струму [1]. Фактично двигуни постійного струму (ДПС) рік за роком втрачали свої позиції. Але з розвитком виробництва постійних магнітів, появою магнітів на основі сплаву *Nd-Fe-B* та сучасних систем керування ця ситуація дещо змінилася. З'явилися як безколекторні ДПС (у англійській транскрипції BLDC), так і щіткові або контактні ДПС (у англійській транскрипції PMDC), разом їх поєднує система збудження від постійних магнітів.

Основна частка вказаних ДПС припадає на мікродвигуни та двигуни малої потужності. І це зрозуміло, тому що перехід від електромагнітного збудження на збудження від постійних магнітів дозволяє зменшити габарити ДПС та усунути втрати на збудження [2, 3]. Тому напрямок дослідження ДПС зі збудженням від постійних магнітів доволі актуальний. Значна кількість наукових робіт присвячена дослідженню саме цих ДПС, прикладом є робота [4], у якій поєднано експериментальне дослідження характеристик ДПС зі збудженням від постійних магнітів та подальше їх моделювання у середовищі Simulink з пакету програм MATLAB. Або робота [5], де досліджувалася продуктивність сильно насичених ДПС з постійними магнітами, і також використовувалася комбінація експериментального дослідження разом з моделюванням магнітного поля

електродвигуна методом скінченних елементів. У більшості наукових робіт виконується розрахунок магнітного поля ДПС, що є необхідним елементом або частиною дослідження, як це показано у роботі [2].

Традиційні ДПС, що мають електромагнітне збудження, також наявні на ринку електричних машин, що підтверджується їх присутністю у каталогах продукції таких відомих виробників як «Siemens» Німеччина [6] та «Baldor» США (у 2011 році вона приєдналася до широко відомої компанії «ABB», але зберегла свій бренд) [7]. Номенклатура та області призначення ДПС з електромагнітним збудженням доволі широкі. Наприклад, «Siemens» виготовляє ДПС потужністю від 0,45 кВт до 1610 кВт.

Цілком логічним кроком подальшого розвитку ДПС стало створення систем гібридного збудження (англійською hybrid excitation) які є поєднанням традиційного збудження із збудженням від постійних магнітів [8]. Фактично застосування гібридного збудження у ДПС дозволяє зменшити габарити електродвигуна та зберегти можливість регулювання магнітного потоку збудження і відповідно частоти обертання [8, 9].

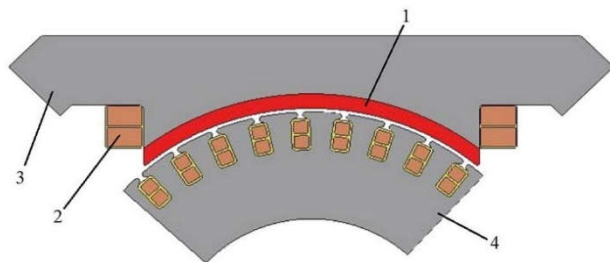
Окрім ДПС, концепція гібридного збудження широко використовується в синхронних електричних машинах [8], а також у генераторах на базі вентильно-індукторних двигунів відомих як switched reluctance machine (SRM) [10].

© В.П. Шайда, О.Ю. Юр'єва, 2023

Впровадження систем гібридного збудження у ДПС на електромашинобудівних підприємствах України стримується як ускладненням наявної технології виготовлення двигуна, так і деяким упередженням до них із боку виробників і споживачів.

За кордоном ситуація дещо інша, бо не нема упередження на впровадження змін і застосування нового. Судячи із того, що публікуються роботи присвячені класифікації та категоризації систем гібридного збудження електричних машин [8, 10], дослідження та впровадження цих систем є доволі актуальним питанням.

Аналіз попередніх досліджень. У роботі [9] представлено розробку ДПС із гібридним збудженням для привода аварійного насоса для аварійно-пожежних установок. Потужність цього ДПС 5 кВт при номінальній частоті обертання 2000 об/хв та номінальній напрузі 110 В (живлення здійснюється від акумуляторної батареї). Впровадження цього ДПС дозволило зменшити його габарити та підвищити надійність його роботи. На рис. 1 показано чверть поперечного перерізу цього ДПС, що дозволяє зрозуміти будову гібридного збудження.



1 – постійний магніт; 2 – котушка обмотки збудження;
3 – станина; 4 – якір

Рис. 1. Будова гібридної системи збудження ДПС [9]

У роботі [11] досліджувався генератор постійного струму із гібридним збудженням, що використовується як аварійне джерело живлення літака. Сам генератор обертається від повітряної турбіни, яку розміщено на валу генератора і у разі застосування висувається на зовнішню поверхню літака. Потужність генератора становить 7 кВт при напрузі 270 В і частоті обертання 4000–5000 об/хв.

У обох роботах [9, 11] застосовується метод скінченних елементів для проведення статичного та динамічного аналізу магнітного поля цих машин постійного струму. На підставі результатів цього аналізу проводиться його подальша оптимізація.

Дослідження щіткового ДПС з гібридним збудженням, що призначений для роботи стартер-генератором у автомобілі, виконувалися у роботі [12]. Розглядалися наявні конструктивні рішення, проводилося моделювання тривимірного магнітного поля ДПС та подальша його оптимізація. Для моделювання магнітного поля використовувався пакет програм Ansys Maxwell 3D. Потужність ДПС становила 7 кВт, напруга 24 В та частота обертання 3400 об/хв. На рис. 2 показано схематичну будову цього стартер-генератора із гібридним збудженням.

У роботі [6] вказано, що при розробці гібридного збудження може використовуватися дві концепції їх

застосування. Перша концепція, назвемо її «підтримка», розглядає постійні магніти як основну складову системи збудження, а складова електромагнітного збудження другорядна, лише для регулювання величини магнітного потоку, хоча може бути і навпаки. Саме ця концепція застосована у роботі [9].

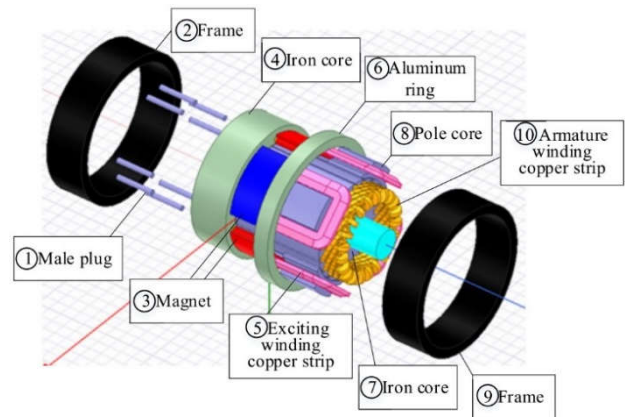


Рис. 2. Схематична будова гібридної системи збудження стартер-генератора [12]

Друга концепція розглядає гібридне збудження як рівноправну комбінацію електромагнітного збудження та збудження від постійних магнітів. В [6] пропонується використовувати коефіцієнт гібридизації

$$k_{Gib} = \frac{\Phi_{PM}}{\Phi_{max}}, \quad (1)$$

де Φ_{PM} – магнітний потік збудження від постійних магнітів; Φ_{max} – максимальний магнітний потік, який необхідно створити системою гібридного збудження.

Коефіцієнт гібридизації можна використовувати для оцінки роботи системи гібридного збудження і розподілу потоків від його складових.

Як бачимо спектр застосування гібридного збудження у ДПС доволі широкий, але він обмежується за потужністю. У більшості це електричні машини постійного струму малої потужності. І це цілком зрозуміло, бо саме у такому випадку можна відмовитися від обмотки додаткових полюсів, що суттєво спростить конструкцію ДПС, дасть більше простору для розташування обмотки збудження та дозволить зменшити його габарити.

Нас зацікавило питання застосування гібридного збудження для ДПС середньої потужності зі збереженням обмотки додаткових полюсів. Такий ДПС має незалежне або паралельне збудження. Котушки обмотки збудження виконуються багатовитковими, кількість витків може становити від 1500 до 2000. Виникають проблеми із охолодженням і перегрівом таких котушок, а відповідно забезпеченням надійності роботи ДПС. Застосування гібридного збудження в таких ДПС дозволить зменшити кількість витків обмотки збудження або зменшити струмове навантаження обмотки та електричні втрати в ній.

Проблему застосування постійних магнітів для гібридного збудження таких ДПС вбачаємо у тому, що вартість постійних магнітів доволі значна. А магніторушійна сила (МРС), що створюється

котушками обмотки збудження, доволі велика. Також значні габарити має осердя головного полюса, яке також необхідно для створення МРС збудження. Враховуючи це, необхідно встановити доцільність застосування гібридного збудження та визначити місце розташування постійних магнітів в осерді головного полюса.

Метою статті є дослідження гібридної системи збудження у ДПС середньої потужності спеціалізованого призначення методом математичного моделювання магнітного поля та аналізування його основних параметрів, що характеризують роботу ДПС. А також оцінка впливу місця розташування постійних магнітів на осерді головного полюса на величину магнітного потоку.

Об'єкт дослідження. Для досліджень було обрано ДПС типу Д812М, що призначено для безредукторного привода обертання валків транспортних рольгангів у металургійному цеху. Вибір об'єкту дослідження обумовлений тим, що ми вже знайомі з цим ДПС і статичний аналіз його магнітного поля було вже виконано у роботі [13], під керівництвом одного із авторів статті. Фактично ми вже мали базову розрахункову модель цього ДПС з електромагнітним збудженням. Що дозволяло зменшити обсяг роботи і до того ж ДПС відповідають вказаним нами критеріям.

Зовнішній вид електродвигуна показано на рис. 3, його було розроблено на АТ «Електромашина» (м. Харків) [14]. Він повинен був замінити вже застарілий електродвигун типу ДС-812, що відноситься до тихідних рольгангових двигунів серії «Д».

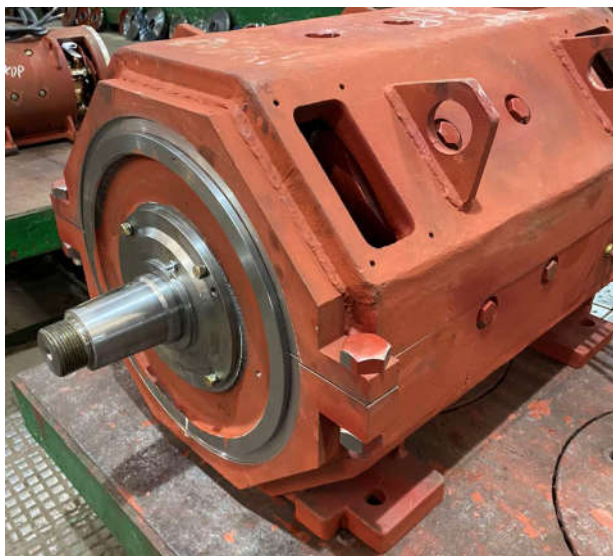


Рис. 3. Двигун постійного струму типу Д812М виробництва АТ «Електромашина» (м. Харків)

Номінальна потужність електродвигуна типу Д812М становить 17 кВт, номінальна напруга 220 В, номінальна частота обертання 115 об/хв, збудження паралельне, хоча зразки, що були виготовлені підприємством, мали незалежне збудження.

Основний режим роботи електродвигуна тривалий S1 за ДСТУ EN 60034-1. ДПС має закрите виконання, ступінь захисту IP55 за ДСТУ EN 60034-5. Охоло-

дження незалежне, ІС3А7 за ДСТУ EN 60034-6, з подачею повітря через спеціальні труби від повітряної магістралі.

Станина виконується монолітною, має восьмигранну форму, виконана з листової сталі марки Ст.3 і роз'ємна у горизонтальній площині. Осердя якоря виготовлено із електротехнічної сталі марки 2212 товщиною 0,5 мм. Осердя головних полюсів шихтують з листів електротехнічної сталі марки 3411, осердя додаткових полюсів монолітні з листової сталі Ст.3. Обмотка якоря – проста хвильова. Параметри обмоток наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри обмоток ДПС Д812М

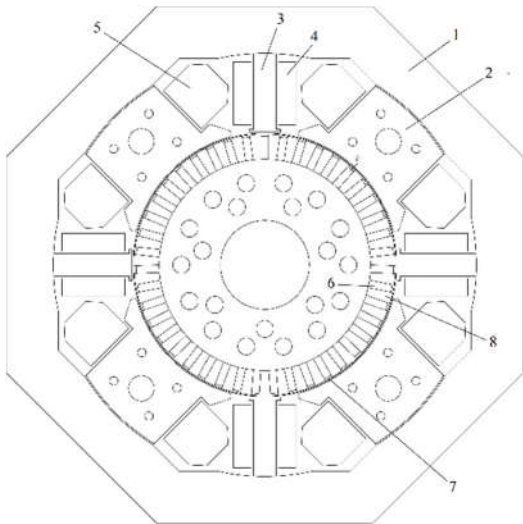
Назва обмотки	Параметри обмоток			
	Обмотковий провід	Кількість витків на полюс	Густина струму, А/мм ²	Опір обмотки при 20 °С, Ом
Обмотка якоря	ПСДКТ-Л (1,4×7,1) мм	430/4	5,4	0,279
Обмотка збудження	ПЭТ-200 Ø1,8 мм	1350	1,4	42,24
Обмотка додаткових полюсів	ЛММ (1,45×25)	54	3,0	0,096

Розрахунок магнітного поля у ДПС. Наразі для розрахунків магнітного поля електричних машин широкого застосовуються програмні комплекси, що використовують метод скінченних елементів. Серед них такі відомі програмні комплекси як Ansys Maxwell, FEMM та ін. Для розрахунку магнітного поля у поперечному перерізі ДПС використовуємо програму FEMM [15], яка належить до програм вільного поширення і до того ж саме вона використовувалася у роботі [13], де проводився попередній аналіз обраного для досліджень ДПС.

Етапи та порядок розрахунків магнітного поля в ДПС з використанням програми FEMM доволі відомі і докладно розглянуті у роботах [16–18], а у роботі [19] – ДПС із збудженням від постійних магнітів. Тому не будемо їх описувати і одразу перейдемо до їх виконання.

Фізичну модель ДПС в поперечному перерізі було створено за допомогою стороннього графічного редактора, її показано на рис. 4. Різномірність структури магнітопроводу ДПС по аксіальній довжині, а саме довжину станини було враховано фіктивним збільшенням товщини станини в 1,85 рази. Базова довжина дорівнює довжині осердя якоря 315 мм.

Далі фізичну модель ДПС було імпортовано до програми FEMM, і задано відповідні властивості матеріалів, з яких складається двигун. На рис. 5 показано розрахункову модель двигуна Д812М у програмі FEMM з відповідно позначеними блоками. Блоки з назвою «Соорег» є елементами обмоток двигуна, блоки з назвою «Air» – це охолодні канали всередині ДПС. Також було задано відповідні струмові кола, фактично задавалася МРС обмоток, але з урахуванням відповідного коефіцієнта заповнення для кожної обмотки окремо. Досліджувався режим номінального навантаження.



1 – станина; 2 – осердя головного полюса; 3 – осердя додаткового полюса; 4 – обмотка додаткового полюса; 5 – обмотка збудження; 6 – пази осердя якоря; 7 – склобандаж; 8 – зубці осердя якоря
Рис. 4. Фізична модель ДПС типу Д812М

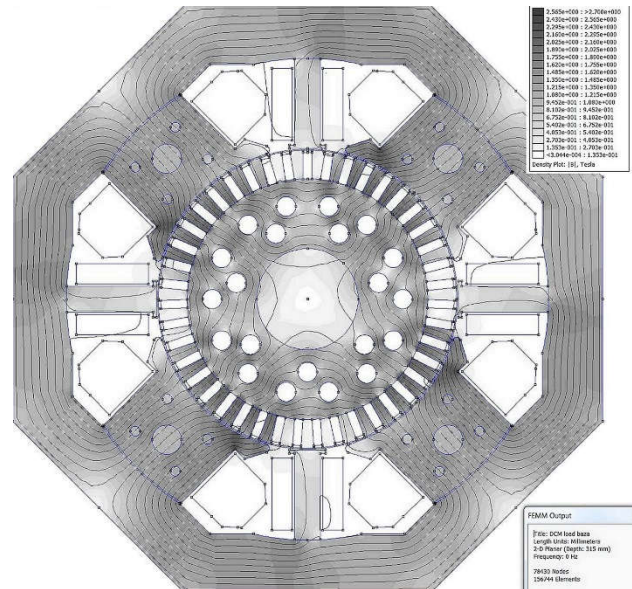


Рис. 6. Картина магнітного поля у поперечному перерізі двигуна Д812М, у режимі навантаження (базова)

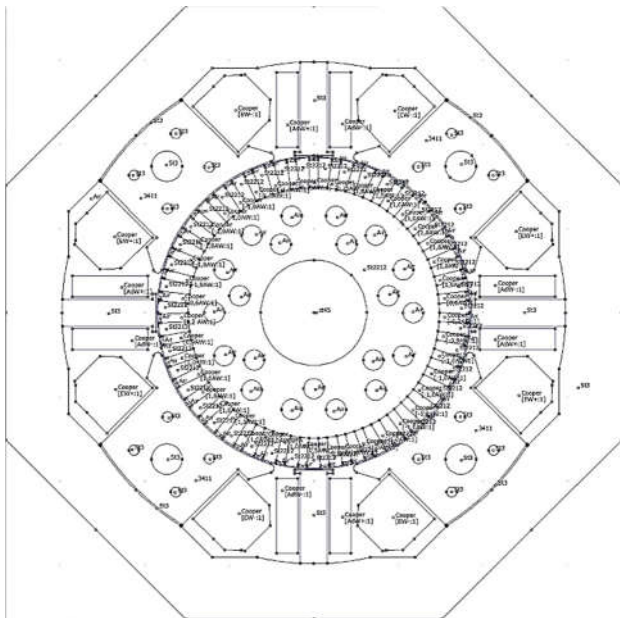


Рис. 5. Розрахункова модель ДПС у програмі FEMM

Кінцево-елементна структура або «сітка» моделі ДПС мала 78430 вузлів та 156744 елементів (трикутників). Кількість елементів у подальшому дослідженні буде незначно коливатися через введення у конструкцію постійних магнітів.

Після розрахунку магнітного поля, будемо його картину, яку показано на рис. 6.

Величина магнітного потоку у повітряному проміжку, для двовірної структури магнітного поля, визначається за формулою [16–18]:

$$\Phi_{\delta} = (A_{z1} - A_{z2}) \cdot l_a, \quad (2)$$

де A_{z1} , A_{z2} – значення векторного магнітного потенціалу у двох точках поперечного перерізу ДПС, через які проходять бокові ділянки магнітного кола; l_a – довжина осердя якоря, у нашому випадку 315 мм.

Але програма FEMM, як й інші аналогічні програми, має вбудовані інструменти, що автоматично розраховують величину магнітного потоку, якщо користувач вказує крайні точки кола.

На рис. 7 подано визначення магнітного потоку та нормальної складової магнітної індукції у повітряному проміжку на його середній лінії на одному полюсному кріці.

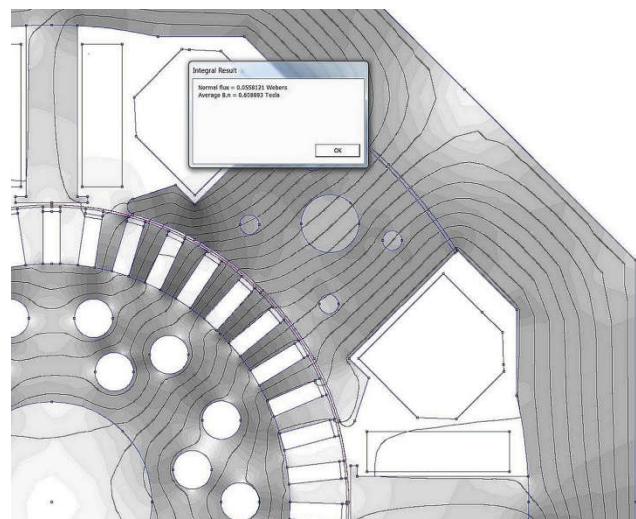


Рис. 7. Визначення магнітного потоку у повітряному проміжку за допомогою вбудованих інструментів

Відповідно для базової конструкції ДПС типу Д812М величина магнітного потоку становила 0,0558 Вб, а магнітної індукції – 0,609 Тл. Також було визначено магнітної індукції у обох крайніх частинах полюсного наконечника (так званих «рогах»). Під краєм наконечника, що підмагнічується, вона становила 2,26 Тл, а під краєм, що розмагнічується, – 1,206 Тл. Це проілюстровано на рис. 8, де показано поєднану картину визначення магнітної індукції (горизонтальна червона лінія – лінія поєднання).

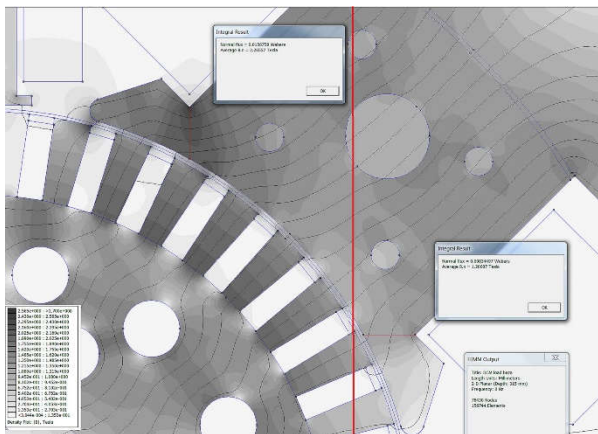


Рис. 8. Графічна комбінація поєднання визначення величини магнітної індукції у двох частинах полюсного наконечника

Також визначалося значення магнітної індукції у станині, вона становила 1,285 Тл.

Наступним кроком дослідження стало розташування постійного магніту в осерді головного полюса. Аналізуючи роботи виконані попередниками [9, 11, 12], було вирішено моделювати розташування постійних магнітів у чотирьох положеннях. Перший варіант – магніт розташовано на поверхні полюсного наконечника над повітряним проміжком між осердям головного полюса та якорем, як це показано на рис. 9, позначено цифрою 1, аналогічно використаному у роботі [9].

При цьому варіанті розташування величина повітряного проміжку та конфігурація обмотки збудження не змінюються. Тобто розташування постійного магніту виконується при зменшенні висоти осердя головного полюса, фактично осердя полюса разом із котушкою підіймаються угору, контур показано штриховою лінією на рис. 9.

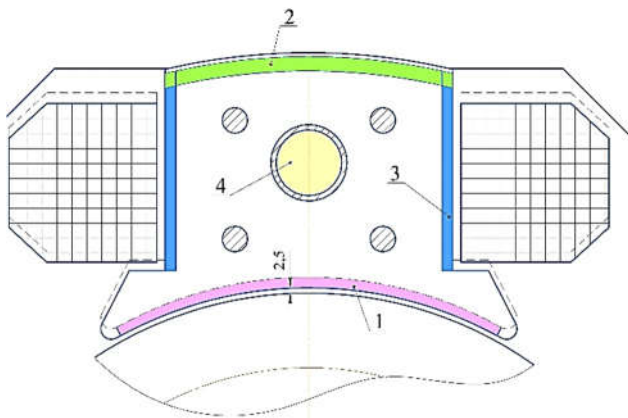


Рис. 9. Розташування постійного магніту на осерді головного полюса, цифрами позначено номер варіанту розташування постійного магніту

Другий варіант розташування постійного магніту зверху осердя головного полюса між станиною та осердям головного полюса «зверху», показано на рис. 9, позначено цифрою 2. Таке розташування також виконувалося при зменшенні висоти осердя головного полюса та умови збереження повітряного проміжку і обмотки збудження незмінними. При цьому намагалися

залишати незмінною величину площі поперечного перерізу постійного магніту.

Третім варіантом розташування постійних магнітів стало їх розташування по боках осердя головного полюса, при цьому також зберігався незмінною сумарна площа поперечного перерізу постійних магнітів. Розташування магнітів на полюсі показано на рис. 9, позначено цифрою 3.

Наступний, четвертий варіант розташування постійного магніту, усередині осердя головного полюса, показано на рис. 9, позначено цифрою 4. Для цього замість стрижня, що використовується для кріплення головного полюса встановили постійний магніт діаметром 34 мм, що має приблизно однакову площу поперечного перерізу з іншими варіантами магнітів.

Для постійних магнітів обрано сплав $Nd-Fe-B$. Такі магніти виготовляються харківським підприємством «Полюс-Н» [19]. Представники підприємства гарантували забезпечення коерцитивної сили магнітів 1100 кА/м та мінімальну товщину магніту 5 мм. Параметри постійного магніту було введено у розрахунковий файл програми FEMM, як це показано на рис. 10.

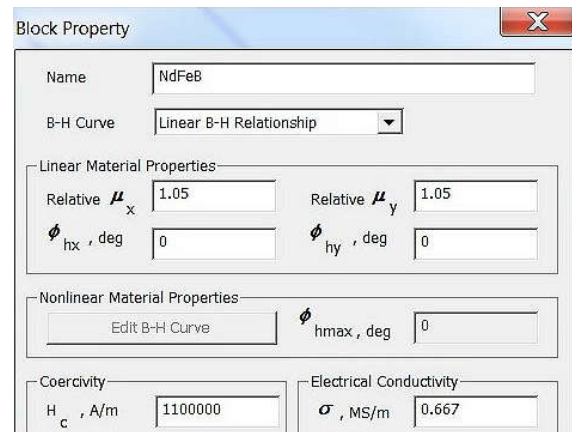


Рис. 10. Вікно задання параметрів матеріалу

Далі було виконано розрахунок магнітного поля у поперечному перерізі ДПС, але вже із гібридним збудженням. Після цього була побудована картина магнітного поля у ДПС, яка наведена на рис. 11.

Аналогічно базовому варіанту були визначені значення магнітного потоку та магнітної індукції у вказаних раніше ланках кола. На рис. 12 показано визначення магнітного потоку у повітряному проміжку.

Також нас цікавило порівняння дії збудження лише від наявних постійних магнітів. Для цього було вимкнено струмове коло обмотки збудження, а потім розраховано та побудовано магнітне поле у поперечному перерізі ДПС для першого варіанту розташування постійних магнітів. Для більшої зручності порівняння наведемо лише частину картини магнітного поля для випадку визначення магнітного потоку рис. 13 (порівняно з рис. 12).

Для варіанту вимкненої обмотки збудження також було отримано значення магнітної індукції на цікавих нам ланках магнітного кола.

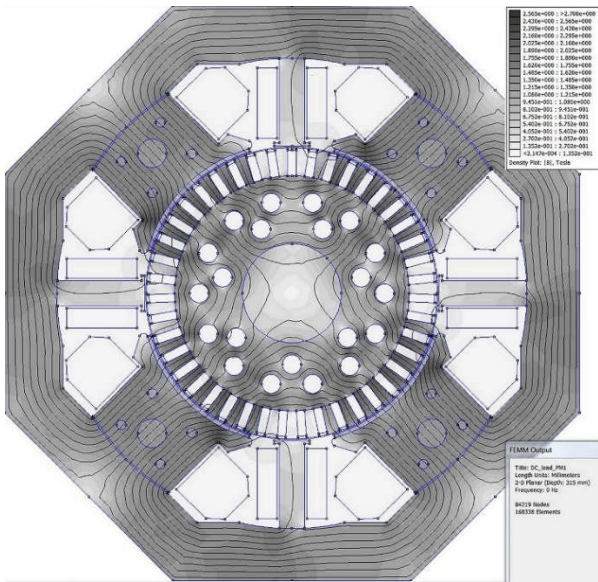


Рис. 11. Картина магнітного поля у поперечному перерізі ДПС із гібридним збудженням, магніти встановлено на полюсному наконечнику знизу

у повітряному проміжку показано на рис. 14, для третього варіанту – рис. 15 і для четвертого – рис. 16.

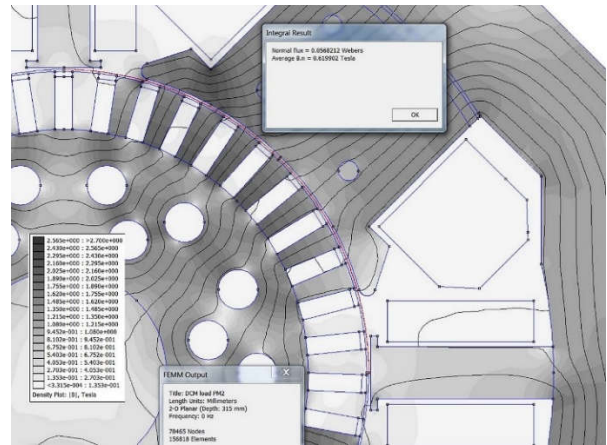


Рис. 14. Визначення магнітного потоку у повітряному проміжку в ДПС із гібридним збудженням (другий варіант)



Рис. 12. Визначення магнітного потоку у повітряному проміжку в ДПС з постійними магнітами (перший варіант)

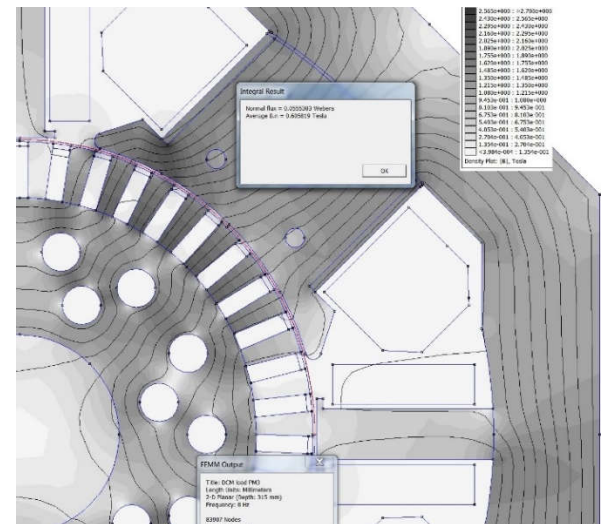


Рис. 15. Визначення магнітного потоку у повітряному проміжку в ДПС із гібридним збудженням (третій варіант)

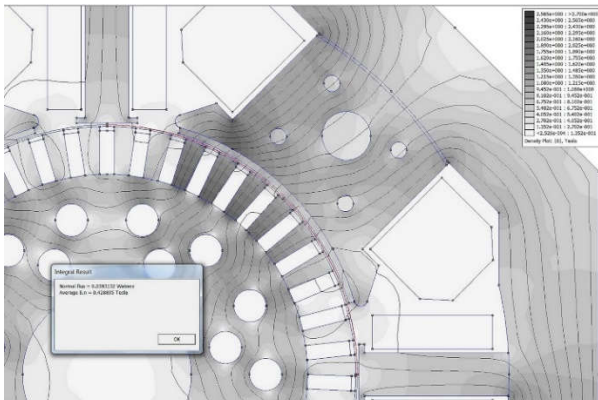


Рис. 13. Визначення магнітного потоку у повітряному проміжку в ДПС зі збудженням лише від постійних магнітів при вимкненій обмотці збудження (перший варіант)

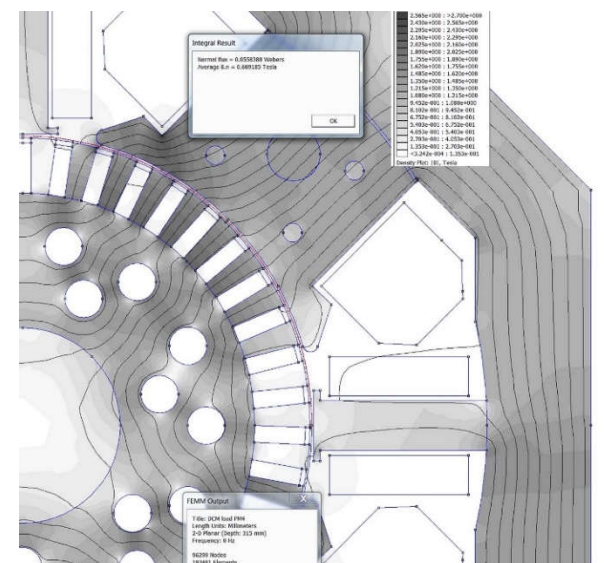


Рис. 16. Визначення магнітного потоку у повітряному проміжку в ДПС із гібридним збудженням (четвертий варіант)

Так само для кожного варіанту розташування постійних магнітів було виконано розрахунки магнітного поля, побудовано картини магнітного поля та визначено параметри магнітного поля ДПС у поперечному перерізі.

Для другого варіанту розташування постійного магніту процес визначення величини магнітного потоку

Для кожного варіанту розташування постійних магнітів визначалися величина магнітного потоку у повітряному проміжку та значення магнітної індукції на ланках магнітного кола, які зведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Параметри магнітного поля ДПС для різних варіантів розташування постійних магнітів

Розташування постійних магнітів	Параметри			
	Магнітний потік у повітряному проміжку, Вб	Магнітна індукція, Тл		
		у повітряному проміжку	в «рогах» наконечника	у станині
Без магнітів, базовий варіант	0,0558	0,609	2,26 / 1,206	1,285
1-й варіант	0,0608	0,662	2,26 / 1,206	1,164
1-й варіант, лише постійні магніти	0,0393	0,429	1,99 / 0,06	0,63
2-й варіант	0,0568	0,62	2,26 / 1,3	1,08
3-й варіант	0,0555	0,606	2,18 / 1,04	1,05
4-й варіант	0,0558	0,609	2,275 / 1,21	1,056

Примітка: у колонці «Магнітна індукція у «рогах» наконечника» першим йде значення боку з підмагнічуванням.

Аналіз результатів дослідження свідчить, що найкращим варіантом розташування постійних магнітів є їх розташування у проміжку між полюсним наконечником та осердям якоря, так званий перший варіант. Він забезпечує збільшення магнітного потоку у повітряному проміжку на 11 %, у порівнянні із базовим варіантом при лише електромагнітному збудженні.

Виробники постійних магнітів можуть виготовити постійні магніти ще з більшою коерцитивною силою, тобто цей приріст магнітного потоку може збільшитися. Також приріст магнітного потоку дає другий варіант розташування постійних магнітів, але лише 1,8 %. Інші варіанти не дають ніякої переваги, а третій варіант призводить навіть до зменшення магнітного потоку. Хоча необхідно враховувати, що вага постійного магніту для одного полюса (в ДПС їх чотири) для першого варіанту розташування становитиме 2,1 кг.

Якщо оцінювати перший варіант розташування постійних магнітів за коефіцієнтом гібридизації, то він становив 0,594. Фактично ДПС буде працювати навіть у тому випадку, якщо обмотка збудження вийде з ладу, хоча частота обертання суттєво зросте.

Цікавим є факт того, що застосування постійних магнітів приводить до незначного зменшення величини магнітної індукції у станині, відповідно її розвантаженню. Загалом можна зробити висновок, що для ДПС середньої потужності можна застосовувати гібридне збудження.

Висновки.

1. Результати розрахунків показали, що гібридне збудження можна застосовувати для ДПС середньої потужності. Про це свідчить зростання величини магнітного потоку у повітряному проміжку на 11 % (для розташування постійних магнітів у полюсному наконечнику уздовж повітряного проміжку), у порівнянні зі звичайним збудженням.

2. Місце розташування постійного магніту відносно осердя головного полюса суттєво впливає на величину магнітного потоку. Найкращим був перший варіант, який дав зростання на 11 %, а найгіршим – третій варіант, який призвів до незначного зменшення магнітного потоку.

3. Результати, отримані у цьому дослідженні, дають напрямок для подальших досліджень, дозволяють відмовитися від провальних варіантів. Але можна зробити однозначний висновок, що для застосування гібридного збудження треба проектувати магнітну систему ДПС наново.

Список літератури

1. Electric Motor Market Size, Share & COVID-19 Impact Analysis, By Motor Type (AC Motor, DC Motor, Hermetic Motor), By Power Output (Fractional Horsepower (Up to 1HP), Integral Horsepower (Above 1HP)), By Voltage (Up to 1kV, 1kV - 6.6kV, Above 6.6kV), By Application (Industrial Machinery, Motor Vehicles, HVAC Equipment, Electrical Appliances, Others), By End-User (Industrial, Commercial, Residential, Agriculture, Transportation) and Regional Forecast, 2021-2028 / Fortune Business Insights // <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/electric-motor-market-100752>.
2. Zhao Wang. Research on Simulation of Electromagnetic Field of DC Motor Based on Finite Element Analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1549, 052102, pp. 1-7. doi: 10.1088/1742-6596/1549/5/052102.
3. Гавдьо І.Р. Оцінка стійкості до розмагнічування двигуна постійного струму зі збудженням від постійних магнітів. // Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2020, № 2(1). – С. 36–42. doi: 10.23939/sepes2020.01. 036.
4. Salah. I. S. Tnatin, Seliman A. Mohamed and Fatma R. M. Abdalati. Experimental and simulation study of a permanent magnet dc motor at a study state. *Al-mukhtar journal of engineering research*, 2017, vol. 1, no. 11, pp. 1-11. Available from: <http://mjer.omu.edu.ly/volume-1-1-9-2017>.
5. Tarviridulu-Asl R., Zeinali R. & Ertan H. B. An approach for performance prediction of saturated brushed permanent magnet direct current (DC) motor from physical dimensions. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2022, vol. 30, no. 1, pp. 127-139. doi: 10.3906/elk-2008-10.
6. Mörée, G.; Leijon, M. Overview of Hybrid Excitation in Electrical Machines. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 19: 7254. doi: 10.3390/en15197254.
7. Продукти та рішення: Двигуни постійного струму SIMOTICS DC / Офіційний сайт ДП «Сіменс Україна». <https://new.siemens.com/ua/uk/produktu/teknolohiyi-pryvodiv/elektrodvyhuny/dvyhuny-postiynoho-strumu.html>, 04.05.2023.
8. Products: DC motor / Official site ABB Motors and Mechanical Inc. // <https://www.baldor.com/brands/baldor-reliance/products/dc-motors/integral-hp-and-rpm-iii>, 04.05.2023.
9. Bolognesi P, Bruno O. & Papini F. Analysis of a hybrid excitation DC motor. *2008 18th International Conference on Electrical Machines*, Vilamoura, Portugal, 2008, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICELMACH.2008.4800143.
10. Wang Y., Deng Z. Hybrid Excitation Topologies and Control Strategies of Stator Permanent Magnet Machines for DC Power System. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2012, vol. 59, no. 12, pp. 4601-4616. doi: 10.1109/TIE.2012.2183842.
11. Bolognesi P., Papini F. & Taronecco L. Hybrid-excitation DC machines as highly reliable generators for ram air turbines. *2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Porto, Portugal, 2009, pp. 2569-2574. doi: 10.1109/IECON.2009.5415239.
12. Chen Guan Rong, Hsiao Horng Ching, Hsiao Chun Yu. Three-Dimensional Finite-Element Analysis and Optimal Design of Hybrid-Excitation DC Brush Motor for Automotive Engine Start Applications. *IEEJ Journal of Industry Applications*, 2023, vol. 12, no. 1, pp. 65-72. doi: 10.1541/ieejia.22004507.
13. Орлов А. Д. Модернізація двигуна постійного струму паралельного збудження потужністю 17 кВт для привода обертання вал-

- ків [Електронний ресурс] : кваліфікаційна робота освітньо-кваліфікаційного рівня магістр / Орлов Артем Дмитрович ; наук. керівник Шайда В. П. ; Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". – Е-M220A.07. – Харків, 2021. – 124 с.
14. Електродвигуни постійного струму краново-металургічні типу Д12М-Д812М: продукція / Офіційний сайт АТ «Електромашина» // https://electromashina.com.ua/pdf/catalog/65-69_D12M-D812M.pdf /, 04.05.2023.
 15. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, September 26, 2006. <http://femm.berlios.de>
 16. Мильх В.И., Дзеніс С.Е. Численно-полевой анализ эффективности эксцентриситета зазора под главными полюсами в двигателе постоянного тока с последовательным возбуждением. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х.: НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 4–13.
 17. Мильх В. И., Дзеніс С. Е. Сравнительный численно-полевой анализ мощности магнитных потерь в двигателе постоянного тока // Технічна електродинаміка. – 2019. – №2. – С. 23–33. doi: 10.15407/techmed2019.02.023.
 18. Kostenko, Ivan. Improvement of the Method of Calculation of Mechanical Characteristics of a Traction Motor of Direct Current with Combined Excitation. *Technology Audit and Production Reserves*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 4-10. doi:10.15587/2312-8372.2018.141384.
 19. Продукція та послуги: Постійні магніти на основі сплаву Nd-Fe-B / Офіційний сайт ТОВ НВФ «Полус-Н», Україна // http://www.polus-n.com/post_magn.html. – Дата звертання 15.04.2023.

References (transliterated)

1. Electric Motor Market Size, Share & COVID-19 Impact Analysis, By Motor Type (AC Motor, DC Motor, Hermetic Motor), By Power Output (Fractional Horsepower (Up to 1HP), Integral Horsepower (Above 1HP)), By Voltage (Up to 1kV, 1kV - 6.6kV, Above 6.6kV), By Application (Industrial Machinery, Motor Vehicles, HVAC Equipment, Electrical Appliances, Others), By End-User (Industrial, Commercial, Residential, Agriculture, Transportation) and Regional Forecast, 2021-2028. *Fortune Business Insights*. <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/electric-motor-market-100752>.
2. Zhao Wang. Research on Simulation of Electromagnetic Field of DC Motor Based on Finite Element Analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1549, 052102, pp. 1-7. doi: 10.1088/1742-6596/1549/5/052102.
3. Havd'o I. R. Otsinka stiykosti do rozmahnichuvannya dvyhuna postyynoho strumu zi zbudzhenniam vid postyynikh mahnitiv [Evaluation of resistance to demagnetization of a direct current motor with excitation from permanent magnets]. *Elektroenergetychni ta elektromekhanichni systemy*. 2020, vol. 2, no. 1, pp. 36–42. doi: 10.23939/sepes2020.01.036.
4. Salah. I. S. Tnatin, Seliman A. Mohamed and Fatma R. M. Abdalati. Experimental and simulation study of a permanent magnet dc motor at a study state. *Al-mukhtar journal of engineering research*, 2017, vol. 1, no. 11, pp. 1-11. Available from: <http://mjer.omu.edu.ly/volume-1-1-9-2017>.
5. Tarvirdilu-Asl R., Zeinali R. & Ertan H. B. An approach for performance prediction of saturated brushed permanent magnet direct current (DC) motor from physical dimensions. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2022, vol. 30, no. 1, pp. 127-139. doi: 10.3906/elk-2008-10.
6. Mörée, G.; Leijon, M. Overview of Hybrid Excitation in Electrical Machines. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 19: 7254. doi: 10.3390/en15197254.
7. Produkty ta rishennya: Dvyhuny postyynoho strumu SIMOTICS DC. (Ofitsiyyny sayt DP «Siemens Ukrayina»). Available at: <https://new.siemens.com/ua/uk/produkty/tekhnohohiyi-pryvodiv/elektrodvyhuny/dvyhuny-postyynoho-strumu.html>. (accessed 04.05.2023).
8. Products: DC motor. (Official site ABB Motors and Mechanical Inc.) Available at: <https://www.baldor.com/brands/baldor-reliance/products/dc-motors/integral-hp-and-rpm-iii>. (accessed 04.05.2023).
9. Bolognesi P, Bruno O. & Papini F. Analysis of a hybrid excitation DC motor. 2008 18th International Conference on Electrical Machines, Vilamoura, Portugal, 2008, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICELMACH.2008.4800143.
10. Wang Y., Deng Z. Hybrid Excitation Topologies and Control Strategies of Stator Permanent Magnet Machines for DC Power System. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2012, vol. 59, no. 12, pp. 4601-4616. doi: 10.1109/TIE.2012.2183842.
11. Bolognesi P., Papini F. & Taponecco L. Hybrid-excitation DC machines as highly reliable generators for ram air turbines. 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, Porto, Portugal, 2009, pp. 2569-2574. doi: 10.1109/IECON.2009.5415239.
12. Chen Guan Rong, Hsiao Hong Ching, Hsiao Chun Yu. Three-Dimensional Finite-Element Analysis and Optimal Design of Hybrid-Excitation DC Brush Motor for Automotive Engine Start Applications. *IEEJ Journal of Industry Applications*, 2023, vol. 12, no. 1, pp. 65-72. doi: 10.1541/ieejia.22004507.
13. Orlov A. D. Modernizatsiya dvyhuna postyynoho strumu paralel'noho zbudzhennya potuzhnisty 17 kVt dlya pryvoda obertannya valkiv [Modernization of the 17 kW parallel excitation DC motor for the roll rotation drive]. [Elektronnyy resurs]. kvalifikatsiyina robota osvith'no-kvalifikatsiyinoho rivnya mahistr Orlov Artem Dmytrovykh. nauk. kerivnyk Shayda V. P. Natsional'nyy tekhnichnyy universytet "Kharkivskyy politekhnichnyy instytut". E-M220A.07. Kharkiv, 2021, 124 p.
14. Elektrodvyhuny postyynoho strumu kranovo-metalurhichni typu D12M-D812M: produktsiya. (Ofitsiyyny sayt AT «Elektromashyna»). Available at: https://electromashina.com.ua/pdf/catalog/65-69_D12M-D812M.pdf. (accessed 04.05.2023).
15. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, September 26, 2006. <http://femm.berlios.de>.
16. Milyih V.I., Dzenis S.E. Chislenno-polevoy analiz effektivnosti eksentsriteta zazora pod glavnyimi polyusami v dvigatele postoyannogo toka s posledovatelym возбуждением [Numerical-field analysis of the efficiency of the eccentricity of the gap under the main poles in a DC motor with series excitation]. *Visnyk NTU «KhPI»*. Seriya: Elektrichni mashyny ta elektromekhanichne peretvorennya enerhiyi. 2018, vol. 5 no. 128, pp. 4–13.
17. Milyih V. I., Dzenis S. E. Sravnitelnyy chislenno-polevoy analiz moschnosti magnitnykh poter v dvigatele postoyannogo toka [Comparative numerical field analysis of the power of magnetic losses in a DC motor]. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2019, vol. 2. pp. 23–33. doi: 10.15407/techmed2019.02.023.
18. Kostenko, Ivan. Improvement of the Method of Calculation of Mechanical Characteristics of a Traction Motor of Direct Current with Combined Excitation. *Technology Audit and Production Reserves*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 4-10. doi:10.15587/2312-8372.2018.141384.
19. Produktsiya ta posluhy: Postyyni mahity na osnovi splavu Nd-Fe-B. (Ofitsiyyny sayt TOV NVF «Polyus-N», Ukrayina). Available at: http://www.polus-n.com/post_magn.html. (accessed 04.05.2023).

Надійшла (received) 22.04.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Шайда Віктор Петрович (Shaida Viktor Petrovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4281-5545>, тел. (057)707-68-44, e-mail: vpsh1520@gmail.com.

Юр'єва Олена Юріївна (Yurieva Olena Yuriyivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4156-8087>, тел. (057)707-68-44, e-mail: el6780@gmail.com.