

ВІДГУК  
офіційного опонента  
Щерби Максима Анатолійовича  
на дисертаційну роботу Ликтей Вікторії Володимирівни  
«Удосконалення способу формування ядер інтегральних рівнянь в методі  
вторинних джерел для аналізу магнітних полів в нелінійних середовищах»,  
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 05.09.05 — теоретична електротехніка

### 1. Актуальність теми дисертації

В процесі експлуатації таких електротехнічних пристроїв як електричні машини та апарати і елементи автоматики у окремих областях їх складових елементів значення магнітної індукції можуть перевищувати допустимі, незважаючи на те, що у всіх інших областях значення магнітної індукції буде далеким від насичення для магнітом'яких матеріалів. Таким особливими областями наприклад є кутові зони та тонкі феромагнітні перекладки. Тому при розрахунку магнітного поля в таких пристроях необхідно враховувати нелінійні характеристики матеріалу згідно кривої намагнічування  $B(H)$ .

Корисним для отримання розв'язку крайової задачі розрахунку магнітного поля з урахуванням нелінійних характеристик матеріалу є зокрема метод вторинних джерел, оскільки він дозволяє звести задачу до системи інтегральних рівнянь, що в свою чергу дозволяє звузити область пошуку невідомих. З використанням цього методу можна спростити формування ядер інтегральних рівнянь і підвищити точність їх розрахунку шляхом вираження функції градієнта магнітної проникності матеріалу через густину джерел магнітного поля.

У зв'язку з цим тема дисертації Ликтей В. В., яка спрямована на подальше вдосконалення методу інтегральних рівнянь в напрямку зменшення кількості складових у ядрах рівнянь, які містять функцію градієнту від магнітної проникності, для розрахунку неоднорідних магнітних полів у нелінійних середовищах, зокрема у електротехнічних пристроях є актуальною.

Тема дисертації пов'язана з науково-дослідними роботами «Розвиток теорії електрофізичних процесів в імпульсних системах електромагнітної обробки електропровідних середовищ («Бар'єр-2»)» (номер державної реєстрації 0117U007714), яка виконувалася в Інституті електродинаміки НАН України та «Розробка методів і засобів підвищення енергоефективності і екологічної безпеки електрообладнання в технологіях АПК» (номер державної реєстрації 0115U003344), яка виконувалася у Національному університеті біоресурсів і природокористування України. В цих роботах Ликтей В. В. приймала участь у виконанні окремих етапів та отримала конкретні індивідуальні теоретичні та практичні результати.

## **2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.**

Використання в дисертації фундаментальних положень теоретичної електротехніки, теорії електромагнітного поля, методів математичної фізики, числових методів моделювання є коректними, що свідчить про теоретичну та технічну обґрунтованість наукових положень та висновків, наведених в дисертації.

Отримані в дисертації теоретичні результати підтверджуються збігом з експериментальними результатами і корелюють з іншими науковими роботами в цій області, що є підтвердженням обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

## **3. Достовірність результатів досліджень.**

Достовірність та обґрунтованість наукових результатів забезпечується коректним використанням фундаментальних теоретичних положень, успішним практичним застосуванням при розрахунках характеристик магнітного поля в електротехнічних пристроях та співпадінням отриманих результатів в граничних випадках з відомими результатами, описаними в інших наукових роботах.

## **4. До основних наукових результатів дисертації слід віднести:**

1. Отримав подальший розвиток метод інтегральних рівнянь для розрахунку характеристик магнітного поля в нелінійних середовищах в напрямі зменшення кількості складових у ядрах інтегральних рівнянь, які містять функцію градієнту від магнітної проникності, та подальшого явного виразу цієї функції через густини джерел магнітного поля, що дає змогу замінити процедуру чисельного диференціювання при апроксимації функції градієнту від магнітної проникності на процедуру чисельного інтегрування, що має суттєве значення для підвищення точності розрахунку ядер інтегральних рівнянь в методі інтегральних рівнянь.

2. Розроблено нову математичну модель і відповідний розрахунковий метод для чисельного розрахунку магнітного поля в безколекторному двигуні постійного струму з неявнополюсним гладким статором, що містить тонкі феромагнітні перекладки між обмоткою статора і зазором між статором та явнополюсним ротором з постійними магнітами, що дозволяють враховувати нелінійні властивості феромагнітних елементів магнітної системи двигуна.

3. Доведено, що при номінальному режимі роботи безколекторного двигуна постійного струму феромагнітний матеріал, з якого виготовлено перекладки між обмоткою статора і зазором між статором та ротором, входять у стан близький до магнітного насичення з неоднорідним розподілом магнітної проникності, що суттєво знижує шунтування магнітного потоку струмів статора і постійних магнітів цими перекладками.

## **5. Значимість отриманих результатів і практичного використання.**

Практичне значення результатів, отриманих в дисертації, полягає у запропонованому алгоритмі розрахунку магнітного поля в безколекторному двигуні постійного струму з неявнополюсним гладким статором, що містить тонкі феромагнітні перекладки між обмоткою статора і зазором між статором та явнополюсним ротором з постійними магнітами, що дозволяє враховувати нелінійні властивості феромагнітних елементів магнітної системи двигуна. На його основі було написано комп'ютерну програму, яка дозволяє за відомими вхідними даними (геометричні параметри системи, електрофізичні параметри матеріалів, характеристики постійних магнітів, струму у обмотках) розрахувати магнітне поле у робочому зазорі електричного двигуна та провести оптимізацію за обраними критеріями.

Результати роботи також використовуються у навчальному процесі на кафедрі електротехніки, електромеханіки та електротехнологій Національного університету біоресурсів і природокористування України, зокрема розроблені математичні моделі для розрахунку характеристик магнітного поля у нелінійних середовищах з використанням методу вторинних джерел.

## **6. Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.**

Результати досліджень опубліковані у 6 наукових працях. З них 5 статей опубліковані у наукових фахових виданнях України та 1 стаття в іноземному виданні (з них 2 – у виданнях, які включені до міжнародної наукометричної бази SCOPUS). Опубліковано матеріали доповідей на 6 науково-технічних конференціях.

Основні положення і результати досліджень за темою дисертації доповідались та були підтримані на міжнародних наукових конференціях, зокрема: МНПК «Актуальні питання сталого розвитку сільськогосподарського виробництва» (Бережани, 2014); МНТК «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (Кременчук, 2014); МНПК молодих вчених «Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані технології в біотехнічних системах АПК» (Київ, 2014); МНТК «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)» (Київ, 2015, 2016 та 2018); МНТК «Проблеми сучасної електротехніки» (Київ, 2018).

## **7. Оцінка змісту дисертаційної роботи.**

Дисертаційна робота Ликтей В. В. складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та трьох додатків.

Вступ містить обґрунтування актуальності теми дисертації, аналіз стану наукового завдання, що досліджується, обґрунтування доцільності проведення досліджень, зв'язок роботи з науковими програмами та планами, формулювання мети і завдання досліджень, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, дані стосовно особистого внеску здобувачки, апробації роботи та публікації її результатів у наукових виданнях.

Перший розділ містить огляд підходів та етапів математичного моделювання електротехнічних пристроїв для розрахунку характеристик створюваного ними електромагнітного поля, зокрема використовуючи різні чисельні методи. Показано, що хоча номінальні режими роботи таких пристроїв реалізуються зазвичай далеко від насичення магнітом'яких матеріалів, але у деяких областях (наприклад, кутові зони, тонкі феромагнітні перекладки) значення магнітної індукції можуть перевищувати допустимі, що вимагає врахування нелінійної залежності кривої намагнічування. Наведено переваги використання методу інтегральних рівнянь, зокрема методу вторинних джерел для розрахунку характеристик магнітного поля в нелінійних середовищах. Обґрунтовано необхідність розвитку методу вторинних джерел у напрямку зменшення кількості складових у ядрах інтегральних рівнянь, які містять функцію градієнту від магнітної проникності.

У другому розділі розроблена математична модель електромагнітних процесів у нелінійних феромагнітних середовищах, в основі якої лежить метод вторинних джерел, що дозволило звести задачу визначення розподілу магнітної проникності у феромагнітних елементах тіл до розв'язання системи інтегральних рівнянь для густини простого шару та густини об'ємних магнітних зарядів. Запропоновано ітераційний метод знаходження магнітної проникності з урахуванням її нелінійної залежності. На основі методу вторинних джерел крайова задача в плоскопаралельному наближеному розрахунку характеристик магнітного поля у безколекторному двигуні постійного струму з урахуванням нелінійних магнітних властивостей матеріалу зведена до системи інтегральних рівнянь для фіктивних магнітних зарядів, розташованих по границі та об'єму феромагнітних тіл, що дозволяє суттєво звужити область пошуку невідомих.

У третьому розділі розроблено методику розрахунку характеристик магнітного поля в електротехнічних пристроях з тонкими перекладками або насиченими в магнітному відношенні областями, яка дозволяє виявити області з явно вираженою насиченістю феромагнітних елементів, вважати їх магнітну проникність як функцію напруженості магнітного поля, а для іншої частини феромагнітних елементів задати постійну магнітну проникність. Це дозволяє складну задачу розрахунку характеристик магнітного поля в електротехнічному пристрої з феромагнітними елементами з нелінійною магнітною характеристикою звести до задачі розрахунку магнітного поля в кусково-однорідному середовищі з постійними магнітними проникностями для одних областей, та враховувати нелінійності в окремих локалізованих областях. Це істотно зменшує область пошуку розв'язку на відміну від методу скінченних різниць або методу скінченних елементів.

Висновки до окремих розділів та до роботи загалом відповідають змісту та повністю висвітлюють отримані у дисертації наукові результати.

Список використаних джерел складається з 202 найменувань та містить сучасні публікації провідних дослідників та фундаментальні роботи з цього напрямку.

В анотації наведено основний зміст дисертації та в повному обсязі розкрито наукові результати та практичну цінність роботи.

У додатках наведені список публікацій здобувачки за темою дисертації, відомості про апробацію результатів, акт про впровадження та довідка про зв'язок дисертації з науково-дослідними роботами.

## **8. Академічна доброчесність**

Порушень академічної доброчесності в дисертаційній роботі та наукових публікаціях авторки, які висвітлюють основні наукові результати дисертації, не виявлено.

## **9. Зауваження по дисертації:**

1. У першому абзаці загальних висновків по дисертації зазначено, що «з використанням методу інтегральних рівнянь на підставі отриманих теоретичних і експериментальних результатів розв'язано актуальне наукове завдання подальшого розвитку методу вторинних джерел ...». Авторкою не зазначено чи мається на увазі чисельний експеримент, чи фізичний експеримент на лабораторному обладнанні.

2. У пункті 3 загальних висновків стосовно представлення напруженості магнітного поля через густини магнітних зарядів вказано, що це «дозволило зменшити похибку її апроксимації», проте не наведено кількісні показники зменшення похибки.

3. У параграфі 2.9 на 87 стр. дисертації наведено розрахунок магнітного потоку від постійного магніту у формі циліндру при наявності феромагнетиків, проте не вказано чому вибиралась саме така форма магніту і як ці розрахунки пов'язані з наведеними вище в розділі 2.

4. На стр. 133 дисертації зазначено, що «було проведено порівняльний аналіз розрахунків, виконаних з тією ж самою постановкою задачі, за допомогою програмного продукту COMSOL Multiphysics, середньо-квадратичне відхилення індукції магнітного поля в робочому зазорі електричного двигуна в порівнянні з методом інтегральних рівнянь не перевищує 5,5%», проте не наведено деталей цих розрахунків.

5. На сторінці 66 дисертації розрахунки проводяться у двовимірному представленні за умови, що «знехтувано розмірами електричного двигуна вздовж осі z», проте не зазначено допустимість такого припущення і чи не призведе воно, наприклад, до появи додаткової похибки обчислень.

6. На рис. 3.6 на стр. 130 дисертації наведено розподіл відносної магнітної проникності в перерізі статора електричного двигуна, проте не зазначено в якому програмному середовищі був побудований цей розподіл.

Зауваження до дисертації не стосуються її принципових положень і результатів, тому не знижують її цінності.

## Висновок

Дисертаційна робота Ликтей В. В. є завершеною науковою працею, в якій отримано нові обґрунтовані результати, які у сукупності вирішують актуальне для теоретичної електротехніки наукове завдання подальшого розвитку методу вторинних джерел для розрахунку характеристик магнітного поля в нелінійних середовищах у напрямку зменшення кількості складових у ядрах інтегральних рівнянь, які містять функцію градієнту від магнітної проникності, та подальшого явного виразу цієї функції через густини джерел магнітного поля.

Дисертація відповідає спеціальності 05.09.05 – теоретична електротехніка. Основні наукові положення у повному обсязі та об'єктивно викладені у публікаціях та авторефераті.

За змістом та одержаними результатами дисертаційна робота задовольняє вимогам п. 9, 11 "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого постановою Кабінету міністрів України № 567 від 24.07.2013 р., зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України № 656 від 19.08.2015 р., № 1159 від 30.12.2015 р. та № 567 від 27.07.2016 р., а її авторка Ликтей Вікторія Володимирівна, заслуговує присудження наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.05 – теоретична електротехніка.

Офіційний опонент:

професор кафедри теоретичної електротехніки  
Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»,

доктор технічних наук, професор



Максим ЩЕРБА

Лист до СВР  
29.06.2023р.  
Алекс