

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Ликтей Вікторії Володимирівни

«Удосконалення способу формування ядер інтегральних рівнянь в методі вторинних джерел для аналізу магнітних полів в нелінійних середовищах»,
поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.09.05 – теоретична електротехніка

Актуальність обраної теми. Однією з основних задач при проектуванні електромеханічних пристроїв, таких як електричні машини, тягові електромагніти або трансформатори, є розрахунок їх електромагнітного поля.

На сьогодні існують різні методи розрахунку магнітних полів з урахуванням реальних електрофізичних властивостей матеріалів, які різняться за постановкою, складністю чисельної реалізації, можливістю повного урахування геометрії системи та реальних магнітних властивостей її компонентів.

Багато електротехнічних пристроїв містять феромагнітні елементи, що обумовлює можливість насичення їх окремих ділянок з малим перетином та, відповідно, вимагає врахування нелінійної залежності між магнітними властивостями при розрахунку магнітного поля.

Зазначене обумовлює актуальність розвитку нових методів розрахунку магнітних полів у нелінійних середовищах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота безпосередньо пов'язана з тематикою науково-дослідних робіт, виконаних у Національному університеті біоресурсів і природокористування України та Інституті електродинаміки НАН України, у яких авторка був співвиконавцем.

Наукова цінність роботи полягає у розвитку методу інтегральних рівнянь для розрахунку магнітних полів у нелінійних середовищах за наявності насичення окремих ділянок.

Наукова новизна одержаних результатів не викликає сумнівів і полягає у подальшому розвитку методу інтегральних рівнянь у задачах розрахунку характеристик магнітного поля в нелінійних середовищах при зменшенні кількості складових у ядрах інтегральних рівнянь, які містять функцію градієнту від магнітної проникності, та подальшому вираженні цієї функції через густини джерел магнітного поля, що дозволяє підвищити точність розрахунку таких ядер.

Розроблено нові метод та модель для чисельного розрахунку магнітного поля в безколекторному двигуні постійного струму з неявнополюсним гладким статором та тонкими феромагнітними перекладками між обмоткою статора і зазором між статором та явнополюсним ротором з постійними магнітами, що дозволяють враховувати нелінійні властивості феромагнітних елементів магнітної системи двигуна та доведено, що при номінальному режимі його роботи феромагнітний матеріал таких перекладок входить у стан, близький до магнітного насичення з неоднорідним розподілом магнітної проникності, що суттєво знижує шунтування ними магнітного потоку струмів статора і постійних магнітів.

Практичне значення одержаних результатів. Основними практичними результатами дисертаційної роботи є розроблений алгоритм розрахунку магнітного поля у 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, який дозволяє враховувати нелінійні властивості феромагнітних елементів магнітної системи двигуна та програмне забезпечення на його основі, яке надає можливість провести за відомими вхідними даними, що характеризують геометричні параметри конструкції та електрофізичні властивості матеріалів і характеристики постійних магнітів, розрахувати магнітне поле у робочому зазорі та провести оптимізацію електричного двигуна за обраними критеріями.

Також у роботі розроблено засади щодо застосування математичних моделей для розрахунку характеристик магнітного поля у нелінійних

середовищах з використанням методу вторинних джерел, що може бути використано в навчальному процесі на кафедрі електротехніки, електромеханіки та електротехнологій Національного університету біоресурсів і природокористування України.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у задачі встановлення співвідношень потужності електромагнітного індуктора з кількістю феромагнітних труб, що є завантаженням теплогенератора. Це дозволило реалізувати дослідний зразок електротехнічної системи для нагріву повітря до заданої температури. Впровадження підтверджено відповідним актом.

Ступінь обґрунтованості основних положень, висновків та результатів роботи. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується коректним застосуванням відомих методів розрахунків, збігом теоретичних досліджень з даними моделювання та впровадженням результатів роботи.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею. Основний зміст дисертації викладено на 136 сторінках друкованого тексту, що містять вступ, три розділи та висновки.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, розкрито сутність досліджуваної задачі, обґрунтовано доцільність проведення досліджень, відображено зв'язок роботи з науковими програмами та планами НДР Інституту електродинаміки НАН України та Національного університету біоресурсів і природокористування України, сформульовано мету і завдання досліджень, розкрито наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача, наведено апробації роботи та публікації її результатів у наукових виданнях.

У *першому* розділі проведено аналіз існуючих видів електротехнічних і електроенергетичних пристроїв, що виявив широку їх різноманітність та обумовив необхідність всебічного дослідження їх передбачуваних техніко-економічних характеристик на етапі розрахунків та проєктування. Це передбачає дослідження засобами математичного моделювання основних характеристик розроблюваних пристроїв з урахуванням як геометричних

параметрів так і фізичних властивостей використовуваних в їх конструкції матеріалів для створення сучасної конкурентоспроможної продукції.

Так як одним із найважливіших і відповідальних етапів процедури математичного моделювання є розрахунок характеристик створюваних пристроями електромагнітних полів, було досліджено різні методи їх розрахунку, що враховують реальні електрофізичні властивості матеріалів та різняться за постановкою, складністю чисельної реалізації, можливістю повного урахування геометрії системи та реальних магнітних властивостей компонентів. Показано, що, не зважаючи на високі можливості використовуваної у розрахунках обчислювальної техніки, для більшості методів моделювання електромагнітних процесів зберігається необхідність підвищення точності, зниження трудомісткості і скорочення часу розрахунків.

Так як електротехнічні пристрої переважно містять феромагнітні елементи, за умови обмеження перетину їх окремих частин, наприклад, у кутових зонах та тонких феромагнітних перекладках, значення магнітної індукції можуть перевищувати допустимі, що вимагає додаткового врахування нелінійної залежності $B(H)$ при розрахунку магнітного поля.

Показано можливість зведення крайової задачі розрахунку характеристик магнітного поля з урахуванням нелінійності магнітної характеристики сталі при використанні методу вторинних джерел до системи інтегральних рівнянь, наприклад, фіктивних магнітних зарядів, розташованих по границі та об'єму феромагнітних тіл, що дозволяє суттєво звузити область пошуку її розв'язку. Доведено, що при використанні методу вторинних джерел у цьому випадку суттєво спрощується формування ядер інтегрального рівняння та підвищується точність розрахунків при чисельному розв'язку системи інтегральних рівнянь, що дозволило розвинути метод інтегральних рівнянь для розрахунку характеристик магнітного поля в нелінійних середовищах в напрямі зменшення кількості складових у ядрах.

У *другому* розділі крайова задача розрахунку характеристик магнітного поля у безколекторному двигуні постійного струму на основі методу вторинних джерел, з урахуванням нелінійних магнітних властивостей матеріалу, зведена

до системи інтегральних рівнянь для фіктивних магнітних зарядів, розташованих по границі та об'єму феромагнітних тіл, що дозволило суттєво звужити область пошуку невідомих.

Вдосконалено математичну модель розрахунку компонент магнітного поля у безколекторному двигуні постійного струму з урахуванням нелінійних властивостей феромагнітних матеріалів шляхом спрощення виду ядер інтегральних рівнянь за рахунок зменшення кількості їх складових, що дозволяє спростити подальший чисельний розв'язок цих рівнянь.

Розроблено методику розрахунку функції з урахуванням явного представлення напруженості магнітного поля через густини магнітних зарядів, що дозволило реалізувати процес її апроксимації скінченновимірним аналогом, виконати інтегрування за джерелами поля та зменшити її похибку на відміну від процедури чисельного диференціювання безпосередньо самої функції.

За результатами інтегрування виразів для компонент напруженості магнітного поля, що створюється системою струмів провідників, розташованих у пазах форми криволінійний трапеції, отримано аналітичні вирази для їх визначення, що дозволило усунути похибку чисельного розрахунку поля струмів обмоток статора безколекторного двигуна постійного струму. Розв'язано крайову задачу для скалярного магнітного потенціалу розрахунку магнітного поля постійного однорідно-намагніченого магніту циліндричної форми в площині феромагнетика. Виведено аналітичний вираз для магнітного потоку, що створюється магнітною системою, який дозволив встановити межі зміни внутрішнього радіусу феромагнітної вставки, на поверхні якої розміщені постійні магніти, з умови заданого відхилення магнітного потоку від його максимального значення.

У *третьому* розділі представлено розробку методики розрахунку характеристик магнітного поля в електротехнічних пристроях з тонкими перекладками або насиченими в магнітному відношенні областями. Обґрунтовано можливість зведення такої задачі до розрахунку магнітного поля в кусково-однорідному середовищі з урахуванням нелінійності в окремих локалізованих областях, що дозволяє суттєво зменшити область пошуку

розв'язку на відміну від застосування методів скінченних різниць або скінченних елементів, для яких розв'язок шукається в усьому необмеженому просторі.

Доведено, що вхід у стан магнітного насичення феромагнітного матеріалу перекладок при зниженні магнітної проникності до значення магнітної проникності повітря у номінальному режимі роботи досліджуваного безколекторного двигуна постійного струму суттєво знижує шунтування ними магнітного потоку струмів статора і постійних магнітів,

У висновках по роботі узагальнено основні отримані наукові та практичні результати. Висновки пов'язані із матеріалом роботи та висновками за окремими розділами.

Текст дисертації викладено ґрунтовно та послідовно. Стиль викладення доказовий. Оформлення тексту дисертації та автореферату відповідає діючим стандартам та чинним вимогам. Зміст автореферату повною мірою відповідає змісту дисертації.

Апробація результатів дисертації підтверджується представленням та обговоренням її основних положень на міжнародних науково-технічних конференціях. Рівень апробації є достатнім.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Основний зміст дисертаційної роботи достатньо повно відображений у 12 публікаціях, з яких шість – у фахових виданнях України, три – у збірниках наукових праць конференцій, один патент України на корисну модель. Дві публікації опубліковані у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus.

Важливість одержаних у дисертаційній роботі результатів для науки й народного господарства полягає у розробці способу формування ядер інтегральних рівнянь в методі вторинних джерел для розрахунку характеристик магнітного поля у нелінійних середовищах та його застосуванні для розрахунку магнітних систем окремих видів електротехнічних пристроїв.

Недоліки та зауваження по роботі.

При ознайомленні з текстом дисертації виникло ряд запитань та зауважень, які потребують відповідних пояснень від її авторки.

1. Направленість досліджень на розкриття сутності і стану «... науково-технічної проблеми...», як це зазначено у першому абзаці на стор 3, більше відповідає докторській, а не кандидатській дисертації.

2. У другому пункті наукової новизни (стор. 7, другий абзац та п. 2 на стор. 23), краще було зробити акцент на розрахунковому методі, а не на моделі, яка по суті ближче до практичної реалізації.

3. Третій пункт наукової новизни роботи (стор. 7, третій абзац та п. 3 на стор. 23) за наведеним формулюванням більше відповідає отриманим практичним результатам.

4. Не зрозуміла необхідність приведення анотації на початку другого розділу роботи (стор. 50, перший абзац).

5. Отримані у третьому розділі способи апроксимації важко оцінити без наведення порівняльних кількісних результатів.

6. У роботі (стор. 133, останній абзац) не доведено, про що свідчить середньоквадратичне відхилення індукції магнітного поля в робочому зазорі електричного двигуна у 5,5%, отримане при застосуванні COMSOL Multiphysics, порівняно з методом інтегральних рівнянь – про похибку обчислень чи методичну похибку, закладену у самій моделі?

7. Висновки за третім розділом роботи сформовані у загальному виді та не характеризують усі отримані у ньому результати.

8. Робота містить ряд неточностей, а в окремих місцях – невірну та/або невживану технічну термінологію, наприклад: «шматково-однорідним середовищем» замість «кусково-однорідним середовищем» (стор. 43, четвертий абзац), СЛАУ замість СЛАР (стор. 44, перший абзац), «схеми заміщення» замість «заступної схеми» (стор. 65, перший абзац), FeNB замість FeNdB (стор. 99, другий абзац), «магнітної проникливості» замість «магнітної проникності» (стор. 112, третій абзац) та інше, що певним чином ускладнює ознайомлення з її матеріалами.

Загальний висновок.

Наведені зауваження і запитання щодо тексту дисертації не знижують рівня роботи та не впливають на основні одержані наукові результати. Дисертаційна робота Ликтей Вікторії Володимирівни «Удосконалення способу формування ядер інтегральних рівнянь в методі вторинних джерел для аналізу магнітних полів в нелінійних середовищах» є завершеною науково-дослідною роботою, яка вирішує важливе актуальне наукове завдання розвитку методу вторинних джерел при розрахунках характеристик магнітного поля в нелінійних середовищах шляхом мінімізації кількісного складу ядер інтегральних рівнянь, що пов'язують функцію градієнта з магнітною проникністю, та подальшого перевизначення цієї функції через густину джерел магнітного поля.

За актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем виконаних досліджень, повнотою вирішення наукових та практичних задач, новизною і ступенем обґрунтованості отриманих результатів та практичних висновків дисертаційна робота відповідає вимогам до кандидатських дисертацій, а за змістом поданого в ній матеріалу – паспорту спеціальності 05.09.05 – теоретична електротехніка.

Представлена дисертаційна робота відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів» щодо кандидатських дисертацій, затвердженого Постановою КМ України №567 від 24.07.2013 р. з чинними змінами, а здобувачка Ликтей Вікторія Володимирівна заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.05 – теоретична електротехніка.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, доцент,

завідувач кафедри електротехніки

Кременчуцького національного університету

імені Михайла Остроградського МОН України



В'ячеслав ПРУС
Лист. до СВР
30.06.23
Машу