

ВІДГУК

офіційного опонента д.т.н., проф. В.М. Сидорця
на дисертаційну роботу ГЕТЬМАНА Андрія Володимировича
«АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ СТРУКТУРИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТЕХНІЧНИХ
ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ ПРОСТОРОВИХ ГАРМОНІК», представлену на
здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю
05.09.05 – теоретична електротехніка

Актуальність обраної теми дисертації.

Завдання по створенню технічних об'єктів, конфігурація просторового розподілу їх магнітного поля яких відповідає заданим вимогам, є актуальним як для науки так і для промислового використання. Практичне забезпечення необхідного просторового розподілу створюваного технічним об'єктом стаціонарного магнітного поля складається з трьох етапів. Перший етап – це моделювання та аналіз існуючої просторової структури магнітного поля, які базуються на характеристиках його просторового розподілу. Другий етап передбачає створення необхідних змін розподілу поля завдяки синтезу, спрямованого на досягнення потрібних величин просторових характеристик поля. Нарешті третій етап – це експериментальний контроль величин застосованих характеристик просторового розподілу магнітного поля створеного таким чином технічного об'єкту, або його прототипу. Такий загальний підхід до розробки технічних об'єктів із заданою просторовою структурою магнітного поля зумовлює необхідність створення теоретично-методичної бази для аналізу, синтезу та експериментального визначення характеристик просторового розподілу поля. Зазвичай в науці та техніці в якості характеристик просторового розподілу магнітного поля застосовують просторові гармоніки скалярного магнітного потенціалу. Тому тема дисертації, що стосується розширення можливостей практичного використання просторового гармонічного аналізу при створенні технічних об'єктів із заданою структурою магнітного поля є актуальною і потребує наукового вирішення.

Актуальність дисертаційної роботи підтверджує її зв'язок з науковими роботами Національної академії наук України та Міністерства освіти та науки України. Дисертація виконувалась у відповідності до планів НДР в яких автор був виконавцем окремих розділів, або відповідальним виконавцем, чи науковим керівником.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх значущість для науки і практики.

Ступінь обґрунтованості положень, що сформульовано у дисертації, є достатнім та підтверджується коректністю постановок задач та прийнятих припущень. Достовірність отриманих результатів підтверджується зв'язком експериментальних і теоретичних досліджень, збіжністю експериментальних і розрахункових даних щодо характеристик просторової структури магнітного поля технічних об'єктів, узгодженням результатів числового та аналітичного

модельовання. Значущість результатів для науки і практики визначається тим, що в дисертації вирішена актуальна науково-прикладна проблема розроблення теоретичних основ, методів і засобів аналізу та синтезу структури магнітного поля технічних об'єктів на основі просторових гармонік скалярного потенціалу. В дисертації отримані нові науково обґрунтовані теоретичні і практичні результати, які є суттєвими при вирішенні проблем забезпечення магнітної чистоти космічних апаратів, магнітної сумісності електрообладнання, забезпечення транспортування і формування пучка частинок в прискорювачах, забезпечення магнітного захисту кораблів і підводних човнів. Висновки дисертаційної роботи є повними, логічними і відображають її сутність.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи полягає у подальшому розвитку методів просторового гармонічного аналізу та синтезу, спрямованого на створення необхідної просторової структури магнітного поля технічних об'єктів. Проведено узагальнення моделі магнітного поля на основі витягнуто-сфероїдальних, сферичних та сплюснуто-сфероїдальних гармонік, що дозволило уніфікувати процес експериментального дослідження просторової структури зовнішнього магнітного поля поблизу технічних об'єктів різної форми та запропонувати для цього спільну теоретично-методичну базу визначення амплітудних коефіцієнтів гармонік. Створені наукові основи побудови засобів експериментального визначення просторових гармонік магнітного поля. Запропоновано нові математичні моделі магнітного поля електромагнітів, які враховують особливості просторового розподілу індуктивної намагніченості ярма та електричного струму обмотки, що дозволило розраховувати параметри їх конструкції при забезпеченні необхідних значень магнітних характеристик. Розвинуто теорію математичного моделювання магнітного поля створюваного комплектуючими космічного апарату для забезпечення його «магнітної чистоти».

Практична цінність одержаних результатів.

Результати дисертаційної роботи використані при виконанні низки госпдоговірних робіт, проведеними з ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля», Об'єднаним інститутом ядерних досліджень, НВП ХАРТРОН-АРКОС ЛТД, ДУ «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України», Інститутом технічної механіки НАН України і ДКА України, тощо.

Повнота викладу в опублікованих працях наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані і достатньо повно викладені у 36 наукових працях, з яких 29 статей у наукових фахових виданнях, 6 – у виданнях наукометричної бази SCOPUS, 18 статей без співавторів.

Ідентичність змісту автореферату та основних положень дисертації.

Дисертація та автореферат за своїм обсягом, структурою та змістом відповідають вимогам до оформлення дисертаційних робіт. Зміст автореферату ідентичний змісту основних положень дисертації.

Використання в докторській дисертації наукових результатів, на основі яких захищено кандидатську дисертацію.

На захист не виносяться результати і положення, за якими в 2004 р. здобувачем була захищена кандидатська дисертація.

Апробація роботи.

Результати роботи представлені та апробовані на 13 міжнародних науково-технічних конференціях та симпозіумах.

Оцінка структури та змісту дисертації.

Дисертаційна робота А.В. Гетьмана складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Обсяг дисертації становить 316 сторінок, включаючи 274 сторінки основного тексту, 98 рисунків, 13 таблиць, список використаних джерел з 224 найменувань та 2 додатки.

Вступ містить усі необхідні для докторської дисертації положення: обґрунтована актуальність теми, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовані мета і задачі дослідження, наукова новизна, практична цінність. Також оцінено особистий внесок здобувача і наведені дані щодо апробації основних результатів та їх публікації.

У першому розділі розглянуто напрямки традиційного застосування просторового гармонічного аналізу в науці і техніці. Описані основні підходи практичного застосування математичного апарату просторових гармонік скалярного потенціалу при моделюванні та аналізі магнітного поля. Проаналізовано проблеми та обмеження застосування моделі просторових гармонік зовнішнього магнітного поля поблизу поверхні технічних об'єктів різної форми. Розглянуто найвідоміші способи експериментального визначення величин сферичних гармонік магнітного поля об'єктів космічної техніки. Описано застосування моделей електромагнітів, які базуються на використанні циліндричних гармонік магнітного поля. Визначені основні напрямки, що потребують розвитку методів та створенню засобів просторового гармонічного аналізу магнітного поля технічних об'єктів.

В другому розділі обґрунтовані правила коректного застосування математичного апарату просторових гармонік при моделюванні зовнішнього магнітного поля технічних об'єктів. Запропоновано критерій раціонального вибору типу застосованих гармонік для використання моделі магнітного поля поблизу поверхні об'єкту дослідження в залежності від співвідношень його габаритних розмірів. Використання такого критерію дозволило наблизити область коректного використання моделі до поверхні технічного об'єкту, та запропонувати узагальнене зображення трьох типів гармонік магнітного поля. Використовуючи такий узагальнений вигляд просторових гармонік, отримано в узагальненій формі запису зображення для їх векторного потенціалу. Це дозволило провести синтез джерел однієї гармоніки скалярного потенціалу магнітного поля у вигляді поверхневого розподілу струму на відповідній сфероїдальній поверхні. Для отримання практичної можливості створення джерела довільної просторової гармоніки магнітного поля розроблено спосіб, що базується на розрахунку системи еліптичних контурів зі струмом, які розташовані на сфероїдальній поверхні по розробленим правилам.

Третій розділ присвячений методології експериментального визначення амплітудних коефіцієнтів просторових гармонік зовнішнього поля, що застосовують для контролю структури магнітного поля при створюванні технічних об'єктів. Проведено порівняльний аналіз методів експериментального визначення сферичних гармонік зовнішнього магнітного поля технічних об'єктів. Запропоновано узагальнений для трьох типів гармонік: витягнуто-сфероїдальних, сферичних та сплюснуто-сфероїдальних метод експериментального визначення амплітудних коефіцієнтів. Узагальнений метод базується на математичній обробці залежностей магнітного потоку, зареєстрованих при лінійному переміщенні об'єкту дослідження через контурні обмотки. В роботі обґрунтована конфігурація таких обмоток і показано, що вони являють собою апаратний фільтр, який виділяє гармоніки заданого порядку у відповідності до геометрії обмотки. Для експериментального визначення 24 амплітудних коефіцієнтів сферичних гармонік розроблено метод, що базується на залежностях магнітного потоку, отриманих при кутовому переміщенні технічного об'єкту всередині системи кругових контурних обмоток. Перевагою практичного застосування такого методу є спрощена конфігурація системи контурних обмоток та можливість її досить простої реалізації на магніто-вимірювальному стенді. Використовуючи споріднену сферичним гармонікам мультипольну модель зовнішнього магнітного поля узагальненого джерела, запропоновано метод визначення мультиполів до четвертого порядку включно. Метод ґрунтується на залежностях проекцій магнітної індукції, отриманих поблизу лінійного шляху переміщення технічного об'єкту. Практична цінність методу полягає в можливості його застосування поза межами магніто-вимірювального стенду для контролю структури магнітного поля невеликих технічних об'єктів, наприклад, комплектуючих космічного апарату.

У четвертому розділі проведено аналіз існуючих вимірювальних систем магнітного поля технічних об'єктів в плані їх застосування для визначення амплітудних коефіцієнтів просторових гармонік. Розглянуто принципи побудови універсальної системи для експериментального визначення просторових гармонік трьох типів: витягнуто-сфероїдальних, сферичних та сплюснуто-сфероїдальних. Описані попередні розрахунки основних параметрів, необхідних для створення універсальної вимірювальної системи, та наведено приклад її практичної реалізації та експериментального дослідження таких її характеристик, як мінімальна величина та відносна похибка визначення гармоніки. Розглянуті принципи побудови вимірювальної системи сферичних гармонік магнітного поля, яка базується на кутовому переміщенні об'єкту дослідження. Запропоновані структура та взаємодія основних елементів такої системи, а також розглянуті, як приклад втілення на магніто-вимірювальному стенді, експериментально отримані її характеристики щодо визначення величин сферичних гармонік магнітного поля технічних об'єктів з габаритами до 1 м.

Розділ п'ять присвячений практичному використанню математичного апарату циліндричних гармонік при створенні заданої просторової структури магнітного поля технічних об'єктів. Запропонована модель магнітного поля

циліндричного індуктивно намагніченого осердя, яка базується на циліндричному гармонічному аналізі індуктивної намагніченості. Для отримання просторового розподілу намагніченості використано зображення збуджуючого зовнішнього поля на основі циліндричних гармонік, що було використано при побудові моделі магнітного поля циліндричного електромагніту. Така модель дозволяє проводити пошук параметрів його конструкції, що відповідає максимальному створюваному магнітному моменту, який є основною робочою характеристикою магнітних виконавчих органів космічного апарату. Розглянуто модель дипольних та квадрупольних електромагнітів з надпровідною струмовою обмоткою. Запропонований спосіб вдосконалення їх конструкції може бути застосовано безпосередньо для вибору характеристик просторового розподілу магнітної індукції в апертурі.

У шостому розділі описані приклади практичного застосування методів сферичного гармонічного аналізу для забезпечення «магнітної чистоти» космічних апаратів. На прикладі датчика НКП наукового корисного навантаження космічного апарату «Січ-2» показано доцільність застосування сферичних гармонік в якості моделі зовнішнього магнітного поля комплектуючих космічного апарату. Обґрунтовано достатність використання обмежень величин дипольної, квадрупольної та октупольної гармонік для нормування магнітного поля при обмеженні магнітної завади бортовому магнітометру. Представлені результати робіт по створенню датчика космічної плазми зі складу космічного апарату «Мікросат» піддержують необхідність застосування високочутливих вимірювальних систем просторових гармонік для зменшення магнітної завади бортовому магнітометру, що створюють апаратура та комплектуючі супутника.

Резюмуючи, можна зазначити, що за змістом дисертаційна робота насичена розв'язаннями досить складних і різноманітних задач, пов'язаних з практичними потребами створення технічних об'єктів із заданою просторовою структурою магнітного поля. По мірі вирішення поставлених задач автор пропонує, розвиває і успішно апробує методи і засоби для подолання виникаючих проблем, що заважають отриманню потрібних результатів.

Оформлення дисертації.

Матеріал дисертації та автореферату викладено логічно, грамотно, науково та математично коректно.

Недоліки та зауваження.

1. У дисертації не наведені порівняльні дані щодо переваг та відмінностей запропонованих методів просторового гармонічного аналізу від інших аналітичних та числових методів забезпечення заданої структури магнітного поля створюваного технічними об'єктами.

2. Не має пояснень чому при описанні мікроконтролеру для керування кроковим двигуном універсальної системи експериментального визначення просторових гармонік, що у четвертому розділі, на рис. 4.12. наведено не повну, а лише частину принципової схеми. Чому для зв'язку з комп'ютером використовується СОМ-порт, який відсутній на сучасних моделях?

3. У третьому розділі роботи не наведено обґрунтування швидкості переміщення транспортного візку з об'єктом дослідження через контурні обмотки. Проте ЕРС, наведена в контурних обмотках завдяки зміні магнітного потоку, як відомо, залежить від швидкості руху джерела магнітного поля.

4. Стосовно оформлення роботи: не містять достатньої розшифровки рис. 4.25 та рис. 4.26, які на стор. 178, 179 дисертації, щоб зрозуміти яким чином було отримано експериментальні дані, тобто точки на відповідних графіках.

5. В авторефераті невдало виконано рис. 13 на якому зображено загальний вигляд системи експериментального визначення сферичних гармонік, проте з рисунку не зрозуміло які саме та яким чином застосовуються прилади.

Відмічу, що перелічені зауваження не стосуються принципових положень дисертаційної роботи.

Загальний висновок

Вважаю, що дисертаційна робота А.В.Гетьмана «Аналіз та синтез структури магнітного поля технічних об'єктів на основі просторових гармонік» є завершеною самостійною науково-дослідною роботою, в якій на основі виконаних досліджень отримані нові науково обґрунтовані теоретичні результати щодо створення технічних об'єктів із заданою просторовою структурою магнітного поля. Розроблені нові, вдосконалені існуючі та розширена область застосування методів просторового гармонічного аналізу магнітного поля технічних об'єктів.

Одержані результати у сукупності вирішують важливу для теоретичної електротехніки наукову проблему розроблення теоретичних основ, методів і засобів аналізу та синтезу структури магнітного поля технічних об'єктів на основі просторових гармонік скалярного потенціалу.

За актуальністю, науковим рівнем та практичною цінністю, змістом та оформленням дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 9 та 10 «Порядку присудження наукових ступенів...» щодо докторських дисертацій. Автор дисертації, **Гетьман Андрій Володимирович**, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за зазначеною спеціальністю 05.09.05 – теоретична електротехніка.

Офіційний опонент,
провідний науковий співробітник
відділу фізики газового розряду і техніки плазми
Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона
Національної академії наук України,
доктор технічних наук, професор
04.03.2019р.

В.М. Сидорець

Підпис проф. В.М. Сидорця засвідчую
Вчений секретар ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
к.т.н.

І.М. Клочков

