

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Коновалов Олег Ярославич

УДК 621.318:538.3

ВИЗНАЧЕННЯ ФОРМИ МАСИВНИХ СОЛЕНОЇДІВ ТА ЕЛЕКТРОДІВ,
ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ЗАДАНИЙ РОЗПОДІЛ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Спеціальність 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат дисертації
на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2010

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі інженерної електрофізики Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Михайлов Валерій Михайлович,
Національний технічний університет
„Харківський політехнічний інститут”,
професор кафедри інженерної електрофізики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Васецький Юрій Макарович,
Інститут електродинаміки НАН України,
м. Київ,
провідний науковий співробітник

доктор технічних наук, професор
Юферов Володимир Борисович,
Національний науковий центр
«Харківський фізико-технічний інститут» НАН
України, начальник відділу криогенної електрофізики

Захист відбудеться 20.05.2010 р. о 14 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті „Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий 09.04.2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О. Ю. Юр'єва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку багатьох промислових технологій галузь застосування електромагнітних полів дуже різноманітна та водночас продовжує інтенсивно розширюватись. Загальною рисою більшості електрофізичних установок, що використовуються для реалізації цих технологій, є наявність електродів або соленоїдів, утворюючих електричне або магнітне поле, яке діє на оброблювану заготовку (або на речовину в робочому об'ємі). Сильні електромагнітні поля генеруються зазвичай масивними соленоїдами й електродами, котрі мають високу механічну стійкість до дії великих електродинамічних зусиль.

У переважній більшості випадків форма соленоїда або електрода визначається з емпіричних міркувань, підкріплених оціночними обчисленнями задач аналізу й технологічними експериментами. Для реалізації останніх виготовляється прототип, який поступово корегується на підставі порівняння даних експериментів й технічних умов, котрим має задовольняти полеутворюючий елемент. Останнє є причиною зависокого витрачання часу, матеріалів і енергії. Крім того, конфігурація полеутворюючого елемента значно впливає на якість продукту, що виготовляється за технологією, для реалізації якої створюється соленоїд або електрод.

Прикладом технології, якій притаманні такі особливості, є магнітно-імпульсна обробка металів тиском (МІОМ), яка основана на взаємодії сильного імпульсного магнітного поля струму, що протікає по соленоїду, та вихрових струмів, котрі наводяться в заготовці. Відповідність утворюваного й заданого просторових розподілів магнітного поля та відповідних електродинамічних зусиль, діючих на оброблювану заготовку, значно впливає на якісні показники деталей, що виготовлені за цією технологією.

Таким чином, актуальною є задача визначення форми електродів й соленоїдів, що забезпечують задані розподіли полів на поверхнях оброблюваних заготовок (граничних поверхнях), яка складає напрямок дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі інженерної електрофізики НТУ “ХПІ” у рамках завдань прикладних держбюджетних НДР МОН України „Дослідження електрофізичних технологій, оснований на дії імпульсного електромагнітного поля” (ДР № 0106U001494) й “Дослідження магнітно-імпульсної обробки матеріалів, оснований на силах притягання до індуктора та заданому розподілі тиску” (ДР № 0109U002401), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета й задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є визначення форми масивних одновиткових соленоїдів, провідників й електродів, що забезпечують задані просторові розподіли електромагнітних полів та поверхневої густини електродинамічних зусиль на граничних поверхнях.

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні задачі:

- аналіз існуючих типів й конструкцій соленоїдів і електродів, а також методів визначення їх форми, що забезпечує заданий розподіл відповідно імпульсного магнітного або електричного полів;
- визначення форми масивного одновиткового соленоїда, що утворює на бічній поверхні циліндричної провідної заготовки задані розподіли осьової складової індукції й тиску імпульсного магнітного поля;
- визначення форми масивного провідника або електрода, що утворює на пласкій граничній поверхні заданий розподіл дотичної складової індукції імпульсного магнітного поля або нормальної складової напруженості електричного поля;
- експериментальне дослідження розподілу імпульсного магнітного поля, що утворюється масивним соленоїдом обчисленої форми на зовнішній поверхні трубчастої металевої заготовки, та оцінка його відповідності заданому розподілові;
- експериментальне дослідження розподілу деформацій трубчастих заготовок, утворюваних за допомогою масивного соленоїда обчисленої форми, що живиться від магнітно-імпульсної установки.

Об'єкт дослідження – електрофізичні процеси обробки матеріалів за допомогою сильних електричних та магнітних полів.

Предмет дослідження – масивні одновиткові соленоїди, провідники й електроди, що утворюють заданий розподіл імпульсного магнітного або електричного поля на циліндричній або пласкій граничній поверхні.

Методи досліджень. Для аналізу магнітних та електричних полів використані теорія електромагнітного поля, методи математичної фізики (метод відокремлення змінних для задач з безперервним спектром, інтегральних рівнянь, інтегральне перетворення Фур'є), обчислювальної математики (метод хорд для побудови ізоліній, метод квадратур для розв'язання інтегральних рівнянь, метод Гауса для рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь, метод золотого перерізу для розв'язання задачі оптимізації профілю соленоїда). Експериментальні дослідження проводилися на магнітно-імпульсній установці НТУ “ХПІ” з максимальною напругою нагромаджуючого блоку 8,6 кВ і енергією до 7 кДж та на спеціальному генераторі імпульсних струмів. Для вимірювання струму в соленоїді використано пояс Роговського, для вимірювання напруженості магнітного поля на поверхні заготовки – індукційний перетворювач.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- уперше розроблено метод визначення форми масивного одновиткового соленоїда для МІОМ, у якому центральна ділянка головної частини контуру профілю визначається розв'язком оберненої задачі розрахунку магнітного поля, а периферійні ділянки – мінімізацією розбіжностей заданого та обчислювального граничних розподілів індукції на поверхні оброблюваної заготовки;

- доведено, що розбіжності між заданим та отримуваним розподілами поля можуть бути суттєво зменшені, якщо усереднена сума цих розбіжностей на сукупності точок поверхні оброблюваної заготовки визначається з урахуванням вагових коефіцієнтів;

- отримав подальший розвиток метод визначення профілю масивного одновиткового соленоїда, провідника або електрода, що утворюють заданий розподіл поля на циліндричній або пласкій металевій поверхні, при якому невласні інтеграли аналітичного розв'язку задачі продовження поля з поверхні оброблюваної заготовки аналітично не інтегруються.

Практичне значення одержаних результатів для техніки сильних електричних та магнітних полів полягає у наданні практичних рекомендацій щодо вибору форми масивних полеутворюючих елементів, що забезпечують заданий розподіл сильного електромагнітного поля. Результати дисертаційної роботи впроваджені у науково-дослідній лабораторії МІОМ НТУ «ХПІ» для створення масивних одновиткових соленоїдів, що забезпечують задані за технологічними завданнями розподіли імпульсного магнітного поля, відповідних електродинамічних зусиль й деформацій заготовок.

Результати дисертаційної роботи використовуються на кафедрі інженерної електрофізики НТУ «ХПІ» в навчальному процесі у дисципліні “Методи моделювання електричних та магнітних полів” при виконанні лабораторних, курсових і дипломних робіт для підготовки бакалаврів та магістрів за напрямком «Електротехніка та електротехнології».

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати, що викладено у дисертації, отримано здобувачем особисто. Серед них: для визначення форми соленоїда або електрода у разі недостатності протяжності ділянки лінії поля, що продовжено з граничної поверхні, запропоновано добудовувати до неї периферійні ділянки контуру профілю за допомогою мінімізації розходжень отриманого та заданого розподілів. Запропоновано співвідношення для вибору кроків чисельного інтегрування й детально досліджено збіжність невласних інтегралів розв'язків. Створено модель для фізичного моделювання магнітного поля, що генерується соленоїдом обчисленої форми, й проведено вимірювання утворюваних розподілів імпульсного магнітного поля на поверхні трубчастої заготовки. Виконано технологічні експерименти на високовольтній магнітно-імпульсній установці.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися та обговорені на: Міжнародних симпозіумах „Проблеми вдосконалення електричних машин та апаратів. Теорія й практика” (SIEMA'2005 – SIEMA'2009) (Харків, 2005 – 2009 рр.); Міжнародних наукових конференціях “Моделювання-2006” та “Моделювання-2008” (Київ, 2006 р., 2008 р.); Міжнародних науково-практичних конференціях “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, обладнання, здоров'я” (Харків, 2006 – 2009 рр.); X міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми сучасної електротехніки” (Київ, 2008 р.) та на науковому семінарі в Інституті електродинаміки НАН України (Київ, 2009 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 8 наукових публікаціях, з них 5 статей у наукових фахових виданнях ВАК України.

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, додатку та списку використаних джерел. Повний об'єм дисер-

таційної роботи становить 159 сторінок, серед них: 9 ілюстрацій на 9 окремих сторінках, 37 ілюстрацій по тексту, 6 таблиць на 6 окремих сторінках, 8 таблиць по тексту, додаток на 4 сторінках, список використаних джерел зі 103 найменувань на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень. Показано наукову новизну, а також викладено основні наукові та практичні результати, що були отримані при виконанні роботи. Наведено дані щодо апробації та публікацій результатів досліджень.

У **першому розділі** проведено аналіз існуючих типів й конструкцій соленоїдів та електродів, що утворюють сильні електромагнітні поля в технологічному обладнанні, а також методів визначення їх конфігурацій, що забезпечують задані розподіли полів на граничних поверхнях або в робочих об'ємах електрофізичного устаткування. Відмічено, що в переважній більшості випадків форма полеутворюючої системи визначається з евристичних міркувань, підкріплених оціночними розрахунками й технологічними експериментами.

Показано, що ефективний підхід, який може бути застосований для обчислення форм масивних полеутворюючих елементів, полягає у продовженні заданого розподілу поля з граничної поверхні у навколишній простір й «металізації» однієї з ізоляційних продовженого поля. Для продовження поля над заготовкою доцільно використовувати метод відокремлення змінних, що безперервно залежать від параметра l . Область, в якій невластні інтеграли рішень, що отримані зазначеним методом, збігаються, обмежена радіусом збіжності, що залежить від розподілу поля на граничній поверхні.

Математичні формулювання й розв'язки задач визначення профілів масивних провідників, електродів та соленоїдів, що утворюють поля з плоскопаралельною або вісесиметричною геометрією, мають відомі подібності, що дає змогу досліджувати особливості розв'язку однієї з цих задач та узагальнювати отримані результати на рішення інших задач (результати таких досліджень наведені в працях проф. В. М. Михайлова).

Вказані положення обумовлюють актуальність подальших досліджень електромагнітних полів, що утворюються масивними провідниками, соленоїдами й електродами складних профілів, направлених на визначення таких форм, що забезпечують задані розподіли електричного та імпульсного магнітного полів й відповідної поверхневої густини електродинамічних зусиль (ЕДЗ) на поверхнях оброблюваних заготовок. Ці дослідження проведено у двох напрямках:

- визначення форми полеутворюючої системи за умови, коли ділянки ізоляції, що належить області збіжності аналітичного розв'язку задачі продовження поля з граничної поверхні, недостатньо для побудови контуру соленоїда або електрода, що утворюють заданий розподіл;

- визначення контуру профілю полеутворюючого елемента, що утворює заданий розподіл поля, за якого невластні інтеграли аналітичного розв'язку задачі продовження поля аналітичними методами не інтегруються.

У другому розділі створено й досліджено метод визначення форми масивного одновиткового соленоїда, що утворює заданий розподіл $B_z(R, z)$ – осьової складової індукції імпульсного магнітного поля на поверхні співвісної внутрішньої провідної циліндричної заготовки. При цьому використано наступні припущення: 1) електромагнітне поле є квазістаціонарним; 2) в соленоїді та заготовці має місце ідеальний поверхневий ефект; 3) утворюване соленоїдом магнітне поле має плоскомеридіанну симетрію, а вісь системи соленоїд-заготовка співпадає з віссю Oz циліндричної системи координат; 4) провідники нерухомі й не деформуються.

Контур профілю соленоїда умовно поділено на головну частину, що звернена до поверхні оброблюваної заготовки, та неголовну. Перша з них в основному визначає розподіл поля на заготовці, тому має складну форму. Друга – добудовується з конструктивних міркувань. Центральна ділянка головної частини визначається розв'язанням оберненої задачі розрахунку магнітного поля, а периферійні ділянки – мінімізацією розбіжностей заданого та обчислюваного граничних розподілів індукції магнітного поля. Запропонований у цьому розділі метод дає змогу визначити форму полеутворюючої системи за умови, коли ділянки ізолінії, що належить області збіжності розв'язку оберненої задачі, недостатньо для побудови соленоїда, що утворює заданий розподіл.

Запропоновано реалізувати метод наступним чином. Спочатку визначається довжина соленоїда, що має дорівнювати довжині ділянки оброблюваної заготовки, на якій необхідно забезпечити заданий розподіл поля (або бути дещо більшою для зменшення похибок відтворення поля під торцем соленоїда). Потім віднаходиться межа області збіжності невластних інтегралів розв'язку оберненої задачі. Далі, використовуючи рішення оберненої задачі, обчислюються ділянки силових ліній магнітного поля, за формою однієї з яких виконується центральна ділянка головної частини. Поміж центральною ділянкою та торцевими частинами добудовуються периферійні ділянки. Змінюючи форму цих ділянок та обчислюючи утворювані розподіли, визначається форма, що забезпечує максимальну відповідність розподілів.

Математичне формулювання оберненої задачі – задачі продовження магнітного потоку $\Psi(r, z)$ з поверхні заготовки радіуса R у навколишнє середовище складається з рівняння

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

$$-\infty < z < \infty, \quad r > R$$

та граничних умов:

$$\Phi(R, z) = 0; \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right|_{r=R} = 2\pi R B_z(R, z). \quad (3)$$

Приймаючи припущення щодо аналітичності $B_z(R, z)$, у відповідності з теоремою С. Ковалевської встановлено існування та однозначність розв'язку задачі (1)

– (3). Рішення цієї задачі, яке отримано у припущенні парності $B_z(R, z)$ методом частинних рішень, що безперервно залежать від параметру l , має вигляд

$$\Phi(r, z) = 2rR\sqrt{2\pi} \int_0^{\infty} \mathbb{1}(\lambda r) K_1(\lambda R) - I_1(\lambda R) K_1(\lambda r) \bar{F}(\lambda) \cos(\lambda z) d\lambda, \quad (4)$$

де $I_1(\lambda r)$, $K_1(\lambda r)$ – модифіковані функції Бесселя першого та другого роду першого порядку; $\bar{F}(\lambda)$ – косинус-перетворення Фур'є розподілу $B_z(R, z)$.

Невласний інтеграл розв'язку (4) рівномірно збігається на сегменті $r \leq R(1 + \alpha)$ (таким чином, сталий параметр α характеризує радіус збіжності невластного інтеграла розв'язку), якщо виконується умова

$$|F(\lambda)| < C\lambda \exp(-\lambda\alpha). \quad (5)$$

Створено два основних алгоритми визначення периферійних ділянок: в першому вони мають форму відрізків прямих, а в другому – виконані у вигляді сегментів кривої. У кожному з них розв'язується задача однопараметричної оптимізації для двох функцій мети $\chi^{(s)}$ (s – номер ітерації, $s = 0, 1, 2, \dots$). Перша з функцій $\chi^{(s)}$ характеризує усереднену з ваговими коефіцієнтами суму абсолютних розходжень поміж заданим $B_z(R, z_i)$ й отримуваним $B_z(R, z_i)|_0^{(s)}$ розподілами у сукупності i -тих контрольних точок на поверхні заготовки ($i = 1 \dots n$)

$$\chi_1^{(s)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} q_i \left[B_z(R, z_i) - B_z(R, z_i)|_0^{(s)} \right]^2}, \quad (6)$$

де n – загальна кількість контрольних точок; q_i – вагові коефіцієнти,

$$q_i = \frac{B_z^2(R, z_i)}{\sum_{i=1}^{i=n} B_z^2(R, z_i)}. \quad (7)$$

Друга функція мети – сума відносних розбіжностей ζ_i у тих же точках,

$$\chi_2^{(s)} = \sum_{i=1}^{i=n} \left| \frac{B_z(R, z_i) - B_z(R, z_i)|_0^{(s)}}{B_z(R, z_i)} \right| \cdot 100\%. \quad (8)$$

При визначенні форми периферійних ділянок, що мають форму відрізків прямих, для попередження крайового ефекту на стику центральної та периферійної ділянок твірна останньої спрямовується по дотичній до центральної. Переміщуючи точку стику у відповідності з методом золотого перетину, на кожному ітераційному кроці обчислюється розподіл $B_z(R, z_i)|_0^{(s)}$ (для цього за допомогою чисельних методів розв'язується інтегральне рівняння Фредгольма першого роду) та значення $\chi^{(s)}$.

При визначенні форми периферійних ділянок, що мають форму сегментів кривої, в точці центральної ділянки, що розташована поблизу границі області збіжності невластного інтеграла розв'язку, проводиться дотична до перетину з твірною

торцевої частини й отримується контур периферійної ділянки профілю першого наближення. Точки, що належать ділянці, визначаються координатами:

$$z_i = z_{i-1} + h_z, \quad r_i^{(s)} = r_{i-1}^{(s)} + h_i^{(s)}, \quad h_i^{(s)} = h_{i-1}^{(s)} + \xi^{(s)} h_i^{(1)}, \quad i = 1 \dots N_{\Pi},$$

де h_z – сталий крок, $h_i^{(s)}$ – приріст радіальної координати поміж сусідніми вузловими точками периферійної ділянки профілю s -того наближення; $\xi^{(s)}$ – варійований параметр.

Змінюючи параметр $\xi^{(s)}$ у відповідності з методом ділення навпіл, на кожному ітераційному кроці обчислюється розподіл $B_z(R, z_i) \Big|_0^{(s)}$ та значення $\chi^{(s)}$ доки не отримано профіль, що забезпечує $\min \chi^{(s)}$.

Порівнюючи потім профілі, що отримано за різними алгоритмами й при різних функціях мети, для виготовлення вибирається варіант виконання соленоїда, що забезпечує розподіл, більш відповідний заданому за технічним завданням.

За наведеними алгоритмами визначено форму соленоїда для магнітно-імпульсного складання двох металевих труб радіуса R за допомогою з'єднувальної деталі (рис. 1). Для забезпечення міцності на з'єднувальній деталі проточуються пази, що мають заповнитися при виконанні технологічної операції деформованими ділянками з'єднуваних труб. Для цього просторовий розподіл тангенціальної складової вектора індукції імпульсного магнітного поля задано такою безрозмірною формулою

$$B_z(R, z) = \frac{b}{b^2 + (a - z)^2} + \frac{b}{b^2 + (a + z)^2}, \quad (9)$$

де a, b – сталі, z – безрозмірна координата уздовж вісі Oz .

Прийнято $a = 0,7$, $b = 0,5$ (рис. 2, крива 1), $R = 15$ мм.

Відомо, що, оскільки поверхнева густина ЕДЗ пропорційна $B_z^2(R, z)$, максимальні її значення припадають на ділянки з'єднувальних труб над вказаними пазами.

Відомо, що для розподілу (9) параметр b дорівнює сталій b .

Центральна ділянка головної частини (її симетрична половина зображена на рис. 2 кривою fg) побудована за формою ділянки силової лінії, якій відповідає безрозмірне значення потоку магнітного поля $\Phi_0 = 3,5$. Зауважимо, що значення координат r, z на рис. 2 та x, y на подальших рис., де використано такі позначення, безрозмірні. Обмеження довжини соленоїда протяжністю центральної ділянки (його симетрична половина зображена на рис. 2 контуром $abgf$) призводить до різкого збільшення розбіжностей поміж заданим та отримуваним розподілами поля під його торцями (рис. 2, крива 2). Для їх зменшення добудовувались периферійні ділянки, позначені на рис. 2 лініями ge, gd, gc й gh .

Використовуючи перший з наведених алгоритмів, отримано два варіанти виконання профілю: контур $alcgf$ та відповідні відносні розбіжності ζ_i (крива 3) – значенням екстремуму функції мети (8), контур $aldgf$ та розбіжності ζ_i (крива 4) –

мінімізацією функції мети (6), вагові коефіцієнти в якій визначено за формулою (7). Під торцем відносні розбіжності, що забезпечуються контуром adl_{gf} , дещо більші, ніж обчислені для контуру al_{cgf} , але поблизу центральної ділянки менші значення розбіжностей забезпечуються контуром ald_{gf} . Зважаючи, що значення $B_z(R, z)$ й ЕДЗ під стиком ділянок значно більші, ніж під торцем, виконання контуру ald_{gf} для реалізації технологічної операції є доцільнішим.

За допомогою другого алгоритму отримано периферійну ділянку, позначену на рис. 2 як gh , а відповідні такому контуру профілю соленоїда ζ_i не перевищують часток відсотку (рис. 2, крива 6). Чисельними експериментами також встановлено, що змінювання форми периферійних ділянок при реалізації обох алгоритмів неістотно впливає на значення ζ_i під центральною ділянкою (рис. 2, криві 2 – 6). Порівнюючи профілі, отримані при реалізації обох алгоритмів, показано, що виготовлення соленоїда з периферійними ділянками у вигляді відрізків прямої технологічно простіше та дешевше, але менші відносні розбіжності ζ_i забезпечуються соленоїдом з периферійними ділянками у вигляді сегментів кривої. Перед виготовленням соленоїда слід оцінити співвідношення «похибка відтворення розподілу – затрати на виточування» та вибрати той профіль, що є більш раціональним.

У третьому розділі, використовуючи аналітичний розв'язок задачі продовження поля з граничної поверхні, визначено форму масивного провідника або електрода, що забезпечують заданий розподіл відповідно дотичної складової вектора індукції імпульсного магнітного поля або нормальної складової вектора напруженості електричного поля $E_y(x, 0)$ на пласкій граничній поверхні. Оскільки аналітичне обчислення невластних інтегралів відомого аналітичного розв'язку можливе лише при деяких функціях граничного розподілу та тільки за умови їх аналітичного завдання, метою досліджень, що викладені в цьому розділі, було створення алгоритму чисельного обчислення інтегралів розв'язку й подальшого використання числових даних для визначення контуру профілю полеутворюючого елемента. Враховуючи зазначену в першому розділі подібність математичних формулювань, що описують імпульсне магнітне та електричне поля за пласкої симетрії утворюваного поля, більшу увагу було приділено визначенню форми електрода та надано рекомендації по використанню отриманих рекомендацій при обчисленні контуру профілю провідника.

При розв'язанні задачі визначення форми металевого електрода, що утворює заданий розподіл електричного поля, прийнято наступні припущення: 1) гранична поверхня еквіпотенціальна; 2) поле над граничною поверхнею плоскопаралельне, до того ж вісь Ox декартової системи координат належить цій поверхні, а вісь Oy нормальна до неї; 3) зовнішнє середовище має сталі електрофізичні характеристики. Математичне формулювання задачі продовження поля з граничної поверхні за таких умов складається з рівняння Лапласа

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0, \quad (10)$$

$$-\infty < x < \infty, \quad y > 0$$

й граничних умов:

$$\varphi(x, 0) = U_0; \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right|_{y=0} = -E_y(x, 0), \quad (12)$$

де φ – потенціал електричного поля; U_0 – потенціал поля на границі $y = 0$.

Існування та однозначність розв'язку задачі (10) – (12) забезпечуються припущенням аналітичності $E_y(x, 0)$ та зазначеною у другому розділі теоремою С. Ковалевської. Використовуючи метод частинних рішень, що безперервно залежать від параметру λ , та припущення щодо парності $E_y(x, 0)$, розв'язок задачі (10) – (12) отримано у вигляді

$$\varphi(x, y) = U_0 - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{\infty} [F(\lambda)/\lambda] \cos(\lambda x) \operatorname{sh}(\lambda y) d\lambda, \quad (13)$$

де $F(\lambda)$ – косинус-перетворення Фур'є заданого розподілу $E_y(x, 0)$.

Встановлено, що областю збіжності інтеграла в (13) є полоса $y < b$, ширина якої характеризується параметром b , який визначається умовою (5).

При чисельному інтегруванні (13) та перетворення $F(\lambda)$ задля виключення похибок, що можуть виникнути через занадто великі кроки інтегрувань осцилюючих функцій, рекомендовано вибирати ці кроки з наступних співвідношень:

$$h_\lambda \ll \frac{\pi}{x}, \quad h_x \ll \frac{\pi}{\lambda}. \quad (14)$$

При формульному завданні розподілу $E_y(x, 0)$ та неможливості аналітично обчислити вираз (13) та перетворення $F(\lambda)$ для отримання розв'язків запропоновано чисельно обраховувати невластні інтеграли із відповідним врахуванням співвідношень (14). Всі наведені вище зауваження справедливі й для вибору кроків інтегрувань в (4), якщо у відповідних викладах змінити x на z , а $E_y(x, 0)$ на $B_z(R, z)$.

Порівняльний аналіз запропонованого алгоритму та різницевого методу, що також використовується для розв'язання розглянутої задачі, підтвердив факт збільшення похибки розрахунку явною різницевою схемою при віддаленні від граничної поверхні (рис. 3). Те, що розв'язок (13) дозволяє у межах області збіжності виконувати розрахунки за будь-якої заданої точності, є суттєвою перевагою запропонованого алгоритму.

Реалізацію розробленого алгоритму проілюстровано на декількох прикладах з табличним і з аналітичним завданням граничного розподілу.

У четвертому розділі представлено результати фізичного моделювання магнітного поля системи соленоїд обчисленої форми – заготовка й технологічних експериментів з відтворення заданого розподілу деформацій на оброблюваній заго-

товці. За допомогою фізичного моделювання експериментально досліджено розподіл імпульсного магнітного поля, що утворюється соленоїдом обчисленої форми на поверхні оброблюваної заготовки, та оцінено його відповідність заданому розподілові. У технологічних експериментах досліджено просторовий розподіл ЕДЗ, деформуючих заготовки, що забезпечується соленоїдом обчисленої форми.

Було виготовлено соленоїд з фосфористої бронзи (рис. 8), профіль якого обчислено в другому розділі (рис. 2, контур *alhgf*). Для приєднання до джерел енергії у соленоїді зроблено радіальний розріз шириною 1 мм, а також виготовлено дві пари мідних виводів, що забезпечують рівномірний розподіл струму впродовж зовнішніх кромek розрізу (одна пара – для приєднання до генератора імпульсних струмів, інша – для з'єднання з магнітно-імпульсною установкою). Електричний пробій поміж виводами та в розрізі соленоїда було попереджено лавсановою плівкою. Мінімальна відстань поміж спроектованим соленоїдом та поверхнею оброблюваної заготовки у діелектричному проміжку змінної ширини складає близько 3 мм.

Для фізичного моделювання було створено експериментальний стенд (рис. 9), що складається з низьковольтного генератора імпульсних струмів 1, до якого через виводи 2 підключено соленоїд 3. Для забезпечення співвісності мідної труби 4, що імітує оброблювану заготовку, та соленоїда 3 використано діелектричну втулку 5. Індукція магнітного поля вимірювалася індукційним перетворювачем, котушка котрого була намотана мідним проводом ($d = 0,1$ мм) на органічно-скляний каркас прямокутного перетину ($0,5 \times 0,7$ мм) й мала 50 витків. Зовнішній діаметр котушки та її довжина складають відповідно 1,1 та 1 мм. Пристрій для вимірювання розподілу магнітного поля укомплектовано елементами для переміщення, реєстрації поточних координат місця знаходження перетворювача та його фіксації у визначених точках (позиції 5 – 10). Частота розряду генератора імпульсних струмів може бути змінена через варіювання його сумарної ємності від 1 до 27 мкФ у діапазоні 45 ... 220 кГц.

Для визначення утворюваних розподілів $B_z(R, z, t)$ реєструвалися осцилограми електрорушійної сили, що наводилася в індукційному перетворювачі, $e_z(R, z, t)$ в рівновіддалених точках на поверхні труби (відстань поміж ними складала 3 мм). Згідно методики, основаній на припущенні різкого поверхневого ефекту в провідниках, відносний розподіл осевої складової індукції магнітного поля представлено у вигляді

$$\frac{B_z(R, z, t_\phi)}{B_z(R, 0, t_\phi)} = \frac{e_z(R, z, t_\phi)}{e_z(R, 0, t_\phi)} = B_z^*(R, z),$$

де t_ϕ – деякий фіксований момент часу.

За t_ϕ було вибрано момент часу, що відповідає амплітуді першої додатної півхвилі електрорушійної сили.

Аналіз складових похибки вимірювання розподілу $B_z^*(R, z)$ свідчить, що сумарна похибка не перевищує 10,4 %. Відносні розбіжності поміж заданим та отримуваним розподілами у всіх проведених експериментах хоча й збільшуються

при зниженні частоти зовнішнього поля (рис. 10), але не перевищують похибки вимірювання.

Окреслюючи умови щодо технологічних експериментів, зауважено, що для ефективного магнітно-імпульсного складання відстань поміж пазами з'єднувальної деталі (рис. 1, позиція *c*) повинна дорівнювати відстані поміж максимумами розподілу $B_z(R, z)$.

Для експериментальної перевірки відповідності профілю виготовленого соленоїда заданому розподілові ЕДЗ, використовуючи МІОМ, обтискалась трубчаста заготовка (радіусом 17,5 мм, товщиною 1 мм) з алюмінієвого сплаву АМг2М (питома електропровідність $\gamma = 0,2 \cdot 10^8$ См/м) на діелектричну оправку з п'ятьма пазами I – V, що моделювала з'єднувальну деталь (рис. 11 *a*). Експерименти проводили на магнітно-імпульсній установці з такими основними параметрами: ємність нагромаджувача $C = 186$ мкФ, максимальна напруга заряду нагромаджувача становила 8,6 кВ. Відомо, що під впливом ЕДЗ заготовки можуть обтискатись або розширюватись. Характер впливу може бути визначений за значенням критерію τ^* , який пов'язує частоту імпульсу струму, геометричні показники заготовки й її електропровідність. Імпульс розрядного струму мав форму згасаючих коливань з частотою $f \cong 5,84$ кГц. При цьому для використаних заготовок значення критерію $\tau^* \approx 8,07$ вказує на переважно обтискаючу дію ЕДЗ, що свідчить про доцільність використання обчисленого соленоїда для магнітно-імпульсного складання.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі на основі досліджень електромагнітних полів обґрунтовано визначення форми профілів масивних соленоїдів, провідників і електродів, котрі забезпечують задані просторові розподіли полів й відповідних ЕДЗ, що діють на заготовку. Основні висновки полягають у наступному.

1. Аналіз типів й конструкцій соленоїдів та електродів, що використовуються в техніці сильних магнітних та електричних полів, засвідчив, що в більшості випадків форми їх профілів визначаються з евристичних й конструктивних міркувань, підкріплених оціночними обчисленнями й технологічними експериментами. Ефективним є метод визначення форми полеутворюючої системи для забезпечення заданого розподілу поля, що базується на аналітичному продовженні заданого розподілу з граничної поверхні. Однак відсутні алгоритми визначення контуру профілю соленоїда або електрода, що утворює заданий розподіл, у тих випадках, коли частки ізоляції продовженого поля недостатньо, а також коли задано граничний розподіл, за якого невластні інтеграли аналітичного розв'язку задачі продовження поля з граничної поверхні аналітичними методами не інтегруються.

2. Визначена форма масивного одновиткового соленоїда, що утворює на зовнішній поверхні циліндричної металевої заготовки заданий розподіл магнітного поля й поверхневої густини ЕДЗ. Максимальна довжина центральної ділянки головної частини контуру профілю соленоїда обмежена протяжністю частки ізоляції, що розташована в межах області збіжності невластного інтегралу розв'язку задачі Коші для рівняння еліптичного типу. Розмір цієї області обмежений в напрямку, перпендикулярному бічній поверхні оброблюваної заготовки, радіусом збіжності, що характеризується параметром b , який визначається з умови $|F(\lambda)| < C\lambda \exp(-\lambda\alpha)$.

3. Похибки відтворення заданого розподілу поля, що обумовлені недостатнім розміром області збіжності розв'язку задачі відтворення поля над граничною поверхнею, можуть бути істотно зменшені через вибір форми периферійних ділянок головної частини контуру профілю полеутворюючого елемента. Форма периферійних ділянок визначається мінімізацією функції мети, що характеризує усереднену суму розбіжностей поміж заданим й отримуваним розподілами, рахованих з ваговими коефіцієнтами, на сукупності контрольних точок граничної поверхні.

4. Визначена форма масивного електрода або індуктора-струмопровіда, що забезпечує заданий розподіл поля на пласкій граничній поверхні. Для виключення впливу осциляцій підінтегральних функцій на точність розв'язання задачі продовження поля з граничної поверхні кроки сіток з рівновіддаленими вузлами для чисельного інтегрування треба обирати значно меншими за відстань поміж двома сусідніми нулями функцій, що інтегруються.

5. Фізичним моделюванням експериментально підтверджена вірогідність основних положень розробленого методу визначення профілю масивного одновиткового соленоїда, що забезпечує заданий розподіл імпульсного магнітного поля на поверхні металевої трубчастої заготовки. Відносні розбіжності поміж заданим

та відтвореними розподілами у частотному діапазоні 40...220 кГц менші за 10 відсотків й не перевищують похибки вимірювання.

6. Технологічні експерименти, проведені на високовольтній магнітно-імпульсній установці МІУ-48 НТУ «ХП» з підключеним до неї соленоїдом обчисленого профілю, підтвердили відповідність відносних деформацій циліндричних трубчастих заготовок заданому розподілові електродинамічних зусиль.

7. Результати дисертаційної роботи впроваджені у науково-дослідній лабораторії МІОМ НТУ «ХП» та використано у навчальному процесі кафедри інженерної електрофізики НТУ «ХП».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Коновалов О. Я. Определение формы электрода по дискретно заданному граничному распределению поля [Текст] / О. Я. Коновалов, В. М. Михайлов // Електронне моделювання. – К. : Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України. – 2007. – № 3. том 29. – С. 71–81.

Здобувач порівняв аналітичне та різницеве розв’язання задачі продовження поля з граничної поверхні, провів чисельні експерименти.

2. Коновалов О. Я. Магнитно-импульсное расширение цилиндрической проводящей оболочки и создание заданного распределения поля с помощью внешнего индуктора [Текст] / Н. Н. Бондина, О. Я. Коновалов, А. В. Легеза, В. Г. Макеев, В. М. Михайлов, А. В. Шовкопляс // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Частина 5. – Київ: ІЕД НАН України. – 2008. – С. 84–89.

Здобувачем виконано розрахунок форми соленоїда для магнітно-імпульсного складання, проведено аналіз результатів технологічних експериментів.

3. Коновалов О. Я. Определение формы соленоида по заданному граничному распределению магнитного поля [Текст] / О. Я. Коновалов // Електронне моделювання. – К. : Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України. – 2009. – № 1. том 31. – С. 116–127.

4. Коновалов О. Я. Экспериментальная проверка решения задачи определения формы одновиткового соленоида для магнитно-импульсной сборки [Текст] / О. Я. Коновалов // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків : НТУ «ХП». – 2009. – № 2. – С. 61–65.

5. Коновалов О. Я. Оптимизация периферийных участков контура профиля одновиткового соленоида, имеющих форму отрезков [Текст] / О. Я. Коновалов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХП». – 2009. – Вип. 7. – С. 49–57.

6. Моделирование электромагнитных полей. Лабораторный практикум: Учеб. пособие [Текст] / Н. Н. Бондина, Ю. И. Волчков, О. Я. Коновалов, О. В. Лучкин, Л. А. Лютенко, В. М. Михайлов, О. Т. Панасенко, Н. В. Тукеев; Под ред. В. М. Михайлова. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2007. – 168 с.

Здобувачем написані розділи № 6, 10, 11, в котрих викладено методику визначення форми електрода, що утворює заданий розподіл електричного поля на металевій поверхні, при використанні аналітичного (розділ 10) та різницевого (розділ 11) розв'язань задачі Коші для рівняння Лапласа.

7. Коновалов О. Я. Определение формы электрода по заданному граничному распределению поля [Текст] / О. Я. Коновалов, В. М. Михайлов // Збірник праць конференції SIMULATION-2006. – К.: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України. – 2006. – С. 269–272.

Здобувач проаналізував збіжність невластних інтегралів розв'язку та запропонував співвідношення для вибору кроків чисельного інтегрування.

8. Коновалов О. Я. Определение формы соленоида по заданному граничному распределению магнитного поля [Текст] / О. Я. Коновалов, В. М. Михайлов // Збірник праць конференції SIMULATION-2008. – К.: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України. – 2008. – том 2. – С. 582–587.

Здобувач запропонував алгоритм, що дозволяє зменшити розбіжності між заданим та утворюваним розподілами полів через виконання периферійних ділянок контуру профілю соленоїда.

АНОТАЦІЇ

Коновалов О. Я. Визначення форми масивних соленоїдів та електродів, що забезпечують заданий розподіл електромагнітного поля. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів. – Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2010.

В дисертації викладено результати наукових досліджень, спрямованих на розробку масивних соленоїдів та електродів складних форм, що забезпечують задані розподіли сильних імпульсного магнітного та електричного полів на граничних поверхнях. Визначено профіль соленоїда для магнітно-імпульсної обробки металів, що забезпечує на поверхні оброблюваної труби заданий розподіл імпульсного магнітного поля. Центральна ділянка головної частини контуру профілю соленоїда визначається розв'язком задачі продовження поля з поверхні оброблюваної заготовки та «металізацією» однієї з віднайдених ділянок ізольованого поля, а периферійні ділянки – мінімізацією розбіжностей заданого та обчислювального граничних розподілів поля. Отримав подальший розвиток метод розрахунку профілю масивного провідника або електрода, що утворює заданий розподіл імпульсного магнітного або електричного поля на площині, для випадку чисельного завдання граничних умов. Спроековано та виготовлено експериментальний стенд для вимірювання відносно розподілу магнітного поля впродовж твірної циліндричної оброблюваної заготовки. Проведено фізичне моделювання магнітного поля системи соленоїд обчисленої форми – провідна циліндрична заготовка, результати якого підтвердили вірогідність

основних положень розробленої методики. Проведено технологічні експерименти, що засвідчили ефективність використання обчисленого соленоїда для магнітно-імпульсного складання.

Ключові слова: сильні імпульсні магнітні та електричні поля, масивні соленоїди та електроди складних форм, розподіл поля на граничній поверхні, магнітно-імпульсна обробка металів, магнітно-імпульсне складання.