

УДК 621.313.17: 621.313.8

**РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВІ
ПРОГРАМНОГО ПАКЕТУ „ANSYS”****Білий П.М., к.т.н., доц.; Опришко В.В., інженер****Кременчуцький державний політехнічний університет**

Україна, 39614, Полтавська обл., м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20, КДПУ, кафедра “Електричні машини та апарати”

E-mail: ke@polytech.poltava.ua

В даній статті приводиться загальний алгоритм для розрахунку магнітних полів за допомогою програмного пакету ANSYS.

Ключові слова: програмний пакет ANSYS, магнітна система, постійний магніт, розрахунок магнітного поля.

In given clause the general algorithm for calculation of magnetic fields by means of a software package ANSYS is resulted.

Key words: software package ANSYS, magnetic system, permanent magnet, calculation of magnetic field.

Вступ. В останній час для рішення різноманітних задач з електромеханіки, головним чином польових, а саме: дослідження розподілу магнітного поля (вектора магнітної індукції, \vec{B} ; вектора напруженості, \vec{H} ; магнітного потенціалу \vec{A}), а також основних електромагнітних характеристик (індуктивності L ; електромагнітної сили, F_{em}) застосовується пакет ANSYS.

Він представляє собою сукупність програмних кодів, побудованих за методом кінцевих елементів для великого кола інженерних задач. Пакет поставляється в різних конфігураціях, які можуть мати обмеження на число кінцевих елементів, кількість областей і т. п. За допомогою графічного інтерфейсу пакету ANSYS здійснюється діалоговий (інтерактивний) режим роботи користувача та комп'ютера. Даний інтерфейс представляє собою сукупність вікон вводу/виводу в різних меню. Існує ще так званий пакетний режим роботи програми. В цьому режимі всі дії, починаючи від побудови моделі до знаходження результатів рішення і виводу їх в текстовій або графічній формі в файл, здійснюються автоматично програмою, написаною на мові APDL (ANSYS Parametric Design Language – мова параметричної розробки ANSYS). Цей режим добрий тим, що не потребує взаємодії програми і моделювальника. Таким чином, підготовлена задача може бути розв'язана, наприклад, на віддаленому комп'ютері, який має велику виробничу потужність, або на кластері (декілька комп'ютерів поєднаних мережею). В будь-якому режимі роботи пакету створений опис задачі записується програмою у файл бази даних, який має розширення *.db. Результати розрахунків і проміжні дані матриці системи лінійних алгебраїчних рівнянь записуються у файл з іншим розширенням. Це відноситься до резервування результатів роботи, а саме „нелінійних задач”, які при великій кількості кінцевих елементів вимагають значного часу для розрахунків.

Робота в пакеті ANSYS, як і в будь-якій програмі по комп'ютерному інжинірингу розділяється

на три етапи: підготовка моделі (передпроцесування); рішення задачі моделювання; аналіз результатів. Перед рішенням задачі моделювання магнітного поля задаються ділянки зі струмовими навантаженнями (визначається густина струму) і граничні умови.

Кінцевий процес полягає в отриманні результатів розрахунків: ліній векторного магнітного потенціалу (ВМП), вектора магнітної індукції, вектора напруженості магнітного поля і т. п., причому як для скалярних значень (модулів), так і для векторів. Результати можна вивести як у графічному вигляді, так і у вигляді таблиці розподілу по вузлам моделі.

Можна також розрахувати інтегральні параметри, наприклад, індуктивність обмотки зі струмом, інтегральну електромагнітну силу, магніторушійну силу.

Рішення польових задач в даному пакеті здійснюється на основі відомого методу кінцевих елементів (МКЕ). Двомірні задачі магнітостатики розв'язуються відносно z-складової магнітного векторного потенціалу. Отримана в результаті перетворень по МКЕ вихідних диференціальних рівнянь система, розраховується ітераційним методом Ньютона-Рафсона. Об'ємні моделі розраховуються на основі векторного або скалярного магнітних потенціалів (це залежить від типу дроблення на кінцеві елементи області, що досліджується).

Мета роботи. В статті показано загальний алгоритм по застосуванню програмного пакету ANSYS для розрахунку магнітних полів магнітних систем з висококоерцитивними постійними магнітами.

Матеріал та результати досліджень. Математичний опис магнітного поля здійснюється на основі диференціальних рівнянь в приватних похідних (рівняння математичної фізики). Розрізняють стаціонарні (які є сталими у часі) та нестаціонарні (які змінюються у часі) процеси.

Стаціонарні. Найчастіше застосовуються еліптичні рівняння – це рівняння Лапласа та Пуассона.

До рівнянь еліптичного типу відносяться рів-

няння Пуассона, яке для лінійних ізотропних середовищ має вигляд:

$$\nabla^2 \bar{A} = -\mu_a J,$$

де \bar{A} – векторний магнітний потенціал; J – вектор густини струму; μ_a – абсолютна магнітна проникність середовища моделювання.

Якщо мова йде про нелінійні середовища моделювання, тобто $\mu_a \neq const$, то з рівнянь Максвелла отримаємо:

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu_a} \operatorname{rot} \bar{A} = \mu_0 \bar{J},$$

або

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \bar{A} + \operatorname{grad} \left(\frac{1}{\mu} \right) \times \operatorname{rot} \bar{A} = \mu_0 \bar{J}.$$

Якщо в моделі електромеханічного перетворювача прийняти, що струм, а відповідно і векторний потенціал мають тільки z -складову, то отримаємо плоскопаралельну або асиметричну задачу. Для плоскопаралельного магнітного поля в декартовій системі координат можна записати рівняння Пуассона таким чином:

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} \right) = \mu_0 J_z.$$

Для того, щоб рівняння Лапласа-Пуассона мало єдине рішення, воно доповнюється граничними умовами [1].

1. Граничні умови першого роду (Діріхле) – на границі розділу двох середовищ задаються значеннями шуканої функції, тобто $\varphi = f_1(x, y, z)$, де точки з декартовими координатами (x, y, z) мають приналежність границі. Умова $\varphi = 0$ є однорідною.

2. Граничні умови другого роду (Неймана). Для них задається значення шуканої функції по нормалі \bar{n} до границі, тобто $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = f_2(x, y, z)$. Умова $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$ є також однорідною.

3. Граничні умови третього роду $\frac{\partial \varphi}{\partial n} + f(\varphi) = f_4(x, y, z)$.

На границі електромеханічного перетворювача можуть бути задані змішані граничні умови, а саме першого, другого та третього роду.

Короткий огляд методу кінцевих елементів, його застосування.

На сьогоднішній день моделювання магнітних полів здійснюється на основі чисельних або проекційно-сіткових методів, до яких відноситься метод кінцевих елементів як модифікація проекційних

методів (Ритца та Гальоркіна). Суть проекційних методів полягає у спробі апроксимувати рішення диференційного рівняння кінцевою лінійною комбінацією базисних пробних функцій (функцій форми). Тобто, щоб знайти проекцію або наближене рішення в кінцевомірному просторі для безперервного рішення в безкінечному функціональному просторі. Форма базисної функції і критерій розрахунку коефіцієнтів лінійної комбінації визначають проекційний метод.

Дискретна модель безперервної області будується наступним чином.

1. В області моделювання фіксується кінцеве число точок. Ці точки називаються вузлами розрахункової сітки, якою покривається область моделювання.

2. Значення безперервної величини в кожній вузловій точці вважається змінним, яке і визначається.

3. Область моделювання безперервної величини розбивається на кінцеве число підобластей, які називаються елементами. Ці елементи мають загальні вузли, апроксимують форму області і представляють собою розрахункову або триангуляційну сітку.

4. Безперервна величина апроксимується на кожному елементі поліномом, який визначається за допомогою вузлових значень цієї величини. Для кожного елемента визначається свій поліном. Вони підбираються таким чином, щоб поздовж границі елемента величина була безперервна.

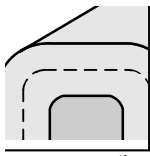
МКЕ базується на апроксимації безперервної функції, наприклад, магнітного потенціалу, температури і т.п. на дискретній моделі, яка базується на множині кусочно-безперервних функцій, визначених на кінцевому числі під областей, які називаються кінцевими елементами. Як функцію елемента, найчастіше застосовують поліном, за допомогою якого і здійснюється класифікація кінцевих елементів: симплекс-, комплекс- та мультиплекс-елементи [2].

Як правило, використовується послідовна нумерація вузлів проти годинникової стрілки, починаючи з деякого i -го вузла, який вибирається довільним чином. Вузлові значення скалярної величини φ позначаються через Φ_i , Φ_j та Φ_k , а координати трьох вузлів – через (X_i, Y_i) , (X_j, Y_j) , (X_k, Y_k) , що дозволяє визначити функції форми через координати вузлів розрахункової сітки.

Створення моделі.

Геометричні елементи моделі можуть бути створені в програмі ANSYS [3, 4] набором із декількох геометричних фігур – примітивів (точки, лінії, прямокутники, кола, циліндри, сфери і т.п.).

Для того, щоб програма коректно сприймала геометричну модель, користувач зобов'язаний вказати, в яких відношеннях знаходяться створені елементи, тобто як програма повинна сприймати накладення двох об'єктів: як окремий об'єкт чи як відсутність об'єкту (область може бути „вирізана” з моделі); вважати фігури, що доторкаються однією



більш складною, чи ці області будуть розглядатися окремо. Після того, як відносини між геометричними об'єктами задані, необхідно поставити у відповідність кожному об'єкту властивості того матеріалу, деталь якого моделюється даним об'єктом. Для цього користувач повинен задати базу даних матеріалів, що використовуються.

Вибір типу кінцевих елементів. Для того, щоб зробити доступними потрібні кінцеві елементи, їх необхідно додати в список KE, які використовуються. Для цього слід вибрати в меню Preprocessor пункт Element type і в меню, що відкривається, обрати пункт Add/Edit/Delete, після чого відкривається вікно зі списком елементів, які використовуються.

Перепроцесування (Preprocessing):

- визначаємо ім'я (mpname) та заголовок (Title) задачі;
- вибираємо пункт меню: UM-File>change mpname;
- на моніторі з'явиться діалогове вікно із запрошенням "Enter new mpname" (введіть нове ім'я задачі);
- вводиться ім'я задачі, яке буде використовуватися як найменування бази даних задачі, а також ім'я інших файлів пов'язаних із задачею, що вирішується;
- в процесі роботи застосуємо наступні команди: UM-File>Resume from, UM-File>Save as mpname.db, де mpname – задане ім'я задачі.

Аналіз результатів. Постпроцесування. Побудова еквіпотенціальних ліній магнітного поля.

Еквіпотенціальні лінії магнітного поля для векторного магнітного потенціалу можна побудувати за допомогою команди меню: MM>General Postproc>Plot Results>Contour Plot 2D Flux Lines.

На екрані з'явиться вікно "Plot 2D Flux Lines". В цьому діалоговому вікні параметр "Number of contour lines" задає кількість еквіпотенціалей моделі у вікні графічного виводу.

Рішення трьохмірних задач за допомогою пакету ANSYS. В пакеті ANSYS реалізовані алгоритми для двох формулювань електромагнітних задач: векторної (Magnetic Vector Potential – MVP) та (Magnetic Scalar Potential – MSP).

Для рішення задач на основі скалярного магнітного потенціалу в пакеті ANSYS застосовуються три стратегії:

- Reduced Scalar Potential (RSP) Strategy – стратегія спрощеного скалярного потенціалу;
- Difference Scalar Potential (DSP) Strategy – стратегія різницевого скалярного потенціалу;
- General Scalar Potential (GSP) Strategy – стратегія загального скалярного потенціалу.

Розрахунок трьохмірної магнітостатичної задачі на прикладі малопотужного магнітоелектричного двигуна.

Наведено розрахунок трьохмірного магнітостатичного трьохмірного поля поздовж робочого зазору δ електромеханічного перетворювача (рис. 1). Досліджується трьохмірна модель в декартовій системі координат для скалярного магнітного потен-

ціалу (диференціальні рівняння поля записуються відносно скалярного магнітного потенціалу).

Результати розрахунків отримані для лінійної фізичної моделі індуктора МС двигуна в текстовому вигляді. Графік побудовано в системі MATHCAD (рис. 2). Це пов'язано з достатньо ємним для вивчення графічним інтерфейсом програмного пакету ANSYS.

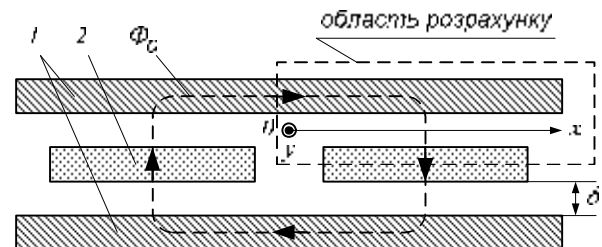


Рисунок 1 – Лінійна фізична модель індуктора:
1 – замикаючі ярма (магнітопровід); 2 – ПМ

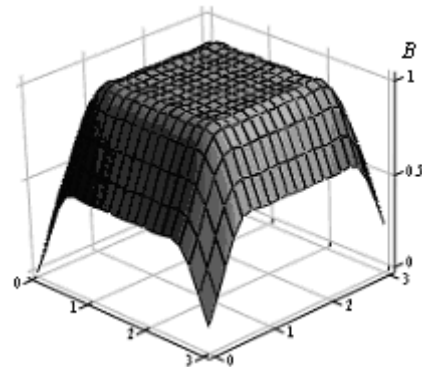


Рисунок 2 – Картина розподілу індукції B поздовж робочого зазору δ

Висновок. Приведений вище алгоритм може знайти широке застосування для оцінки, а також опису магнітного поля в магнітних системах з висококоерцитивними постійними магнітами.

БІБЛІОГРАФІЧНІ ДАНІ

1. Самарский А.А. Теория разностных схем.– М.: Наука: Гл. ред. Физ.-мат. Лит., 1983.– 616с.
2. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов.– М.: Мир, 1979.– 392с.
3. Андреева Е.Г., Шапец С.П., Колмогоров Д.В. Конечно-элементный анализ стационарных магнитных полей с помощью программного пакета ANSYS: Учеб. Пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002, 92с.
4. ANSYS electromagnetic field analysis guide. ANSYS Inc. 1998.

Стаття надійшла 29.01.07.

Рекомендовано до друку к.т.н., доц.
Мосьпаном В.О.