

Побудова тривимірної кінцево-елементної моделі автоматизованого комплексу індукційного нагріву металевих деталей

Володимир Грицюк¹, Марко Чугай¹, Данііл Нерсесян¹

1.Кафедра КІТАМ, Харківський національний університет радіоелектроніки,
Харків, пр. Науки, 14, УКРАЇНА, e-mail: volodymyr.hrytsiuk@nure.ua

Анотація: В роботі представлено основні етапи побудови тривимірної кінцево-елементної моделі автоматизованого комплексу індукційного нагріву металевих деталей.

Ключові слова: комплекс індукційного нагріву, вихрові струми, тривимірна модель, метод кінцевих елементів, теплопередача.

I. ВСТУП

При розробці автоматизованих комплексів індукційного нагріву металевих деталей необхідно на етапі проектування виконати кількісний аналіз основних характеристик електротеплового процесу та виробити рекомендації щодо вибору раціональних параметрів та режимів нагріву. Це дозволить обрати найбільш раціональний режим нагріву, а отримані значення потужностей можуть слугувати орієнтирами при подальшому налагодженні технологічного циклу [1].

Найвища точність аналізу електротеплового процесу забезпечується при розрахунку тривимірної задачі. Це стає можливим при врахуванні більшості фізичних ефектів, які глибше проявляються в умовах повноцінного відтворення геометрії пристрою.

Сучасні установки індукційного нагріву є складними комплексними пристроями. Їх основними складовими є: індуктор із деталлю або заготовкою, система управління, система електроживлення, система подачі деталей та інше [2, 3]. Змінне магнітне поле індуктора збуджує в середині деталі або заготовки вихрові струми тієї ж частоти, які створюють у деталі внутрішні джерела тепла. У промисловості використовуються наступні основні типи конструктивного виконання установок індукційного нагріву – періодичний нагрів, методичний і безперервний, а також періодичний нагрів зі зворонь-поступальним переміщенням заготовки.

Просторово-часовий розподіл температури по об'єму заготовки в процесі індукційного нагріву описується досить складною системою рівнянь Максвелла і Фур'є для електромагнітного та температурного полів. Рішення системи цих рівнянь може бути реалізовано лише чисельними методами [1]. Для проведення чисельних розрахунків обрано програмний комплекс Comsol Multiphysics.

Метою роботи є представлення основних етапів побудови тривимірної кінцево-елементної моделі

автоматизованого комплексу індукційного нагріву металевих деталей.

II. ВИКЛАДЕННЯ МАТЕРІАЛУ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО РОЗРАХУНКУ

В процесі підготовки розрахунку можна виділити кілька етапів.

Перший етап – синтез моделі в середовищі Comsol Multiphysics. Починається цей етап з вибору розмірності моделі та фізичних модулів. У нашому випадку – це тривимірна модель (3D). На рис. 1 показано вікно навігатора вибору розмірності моделі. Далі в загальному випадку обираємо фізичний модуль «Heat Transfer Module» (Теплопередача), а в ньому розділ «General Heat Transfer». У модель додається другий модуль «AC/DC» > Quasi-Statics, Magnetic > Induction Currents, Vector Potential. (Модуль «AC/DC» > Квазистатика, Магнетизм > Індуковані струми, Векторний потенціал).

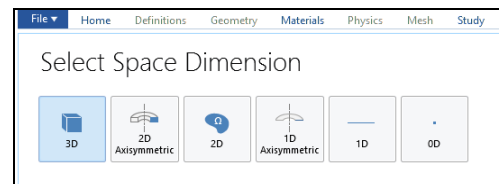


Рис.1. Вікно навігатора розмірності моделі

Проте, в нових версіях Comsol Multiphysics є можливість обрати модуль, що вже максимально адаптований для розрахунків в пристроях індукційного нагріву – «Induction Heating». Це можна зробити через гілку «Electromagnetic Heating», як показано на рис. 2.

Мультифізичний модуль (інтерфейс) «Induction Heating» використовується для розрахунків індукційного та вихрострумового нагріву і включає в себе інтерфейс магнітних полів та інтерфейс теплопередачі у твердих тілах. Мультифізичні зв'язки додають розсіювання електромагнітної потужності як джерела тепла, а електромагнітні властивості матеріалу можуть залежати від температури. Крім того, підтримуються комбінації моделювання в частотній області для інтерфейсу «Магнітні поля» і стаціонарного моделювання для інтерфейсу «Теплопередача в твердих тілах», що зветься частотно-стаціонарним і частотно-перехідним моделюванням.

Інтерфейс «Теплопередача в твердих тілах» надає функції для моделювання теплопередачі шляхом теплопровідності, конвекції та випромінювання. Твердотільна модель активна за замовчанням у всіх доменах. Рівняння температури, визначене у твердих областях, відповідає диференціальній формі закону Фур'є, який може містити додаткові джерела тепла.

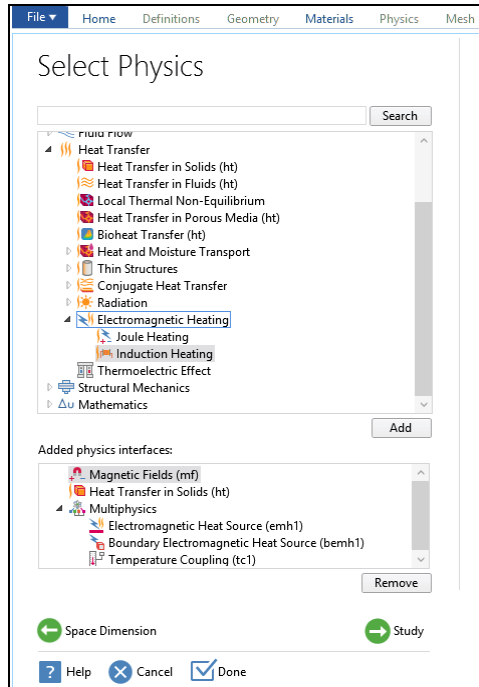


Рис.2. Вікно навігатора фізичних модулів та вибір

Синтез геометрії моделі.

Модель являє собою три циліндричні індуктори та деталь (заготовку). На рис. 3 зеленим кольором показані розрахункові ділянки індукторів.

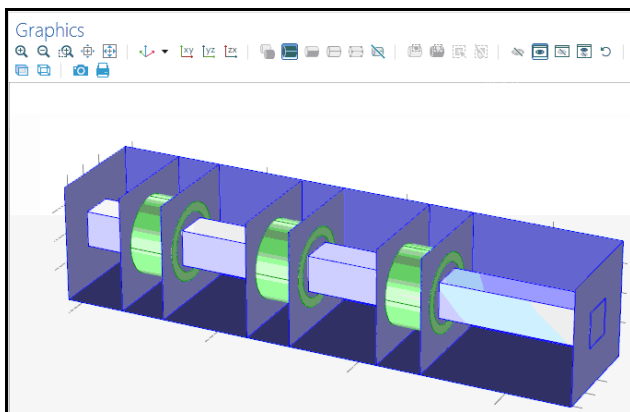


Рис.3. Тривимірна геометрія моделі та налаштування параметрів електромагнітної задачі

Задавались такі геометричні розміри індукторів і заготовки: довжина індуктора $l_1 = 0,13$ м; зовнішній радіус $r_2 = 0,14$ м; внутрішній радіус $r_1 = 0,11$ м; довжина заготовки $L_1 = 1,4$ м; розміри перетину – $0,1$ м \times $0,1$ м. Швидкість переміщення заготовки – 30 мм/с. На поверхні та всередині заготовки обираємо контрольні точки, які необхідні для аналізу процесу

нагріву заготовки. Таких точок може бути будь-яка кількість.

Геометрія модель може бути побудована як засобами Comsol Multiphysics, так і в середовищі AutoCAD з подальшим імпортом в Comsol Multiphysics. Довжину, перетин і матеріал деталі або заготовки можна досить легко змінити за необхідності. Після побудови геометричної моделі задаються константи. Застосування констант спрощує переналаштування моделі.

У нашому випадку рекомендується ввести дві константи – це J – густина струму в індукторі. Вона дорівнює добутку струму і числа витків індуктора, поділеній на площу області відповідну індуктора. А також f – частота струму в індукторі.

Завдання фізичних констант та властивостей. Електромагнітна задача.

Для цього в меню вибираємо Multiphysics > Azimuthal Induction ... Для початку відкриваємо меню Physics > Application Scalar Variables відкриється вікно введення. У вікні `mu_emqa` задаємо константу f . Це дозволить змінювати частоту мережі в експериментах. В нашому випадку це 50 Гц.

Відкриваємо вікно в меню Physics > Subdomain Settings. Вікно містить кілька вкладок. Нам необхідно заповнити вкладку Magnetic Parameteres. Активізуємо область завантаження та у вікні для `mu` задаємо відносну магнітну проникність. Якщо заготовка феромагнітна, але температура не перевищує точку Кюрі, цю величину можна задати постійної або у вигляді кривої, яка враховує насичення. З огляду на те, що вся теплова енергія виділяється в тонкому шарі, який дорівнює глибині проникнення струму, то для наближених розрахунків досить задати одне значення `mu`. Активуємо область «індуктор» і у вкладці Electric Parameters у вікні для `J_cp` вводимо значення J .

Налаштування теплової задачі Multiphysics > General Heat Transfer.

Активуємо панель Subdomain Settings. Обираємо області, які не відносяться до завантаження, і прибираємо прапорець у вікні Active in this domain – це виключить ці області з розрахунку. Для області «завантаження» задаємо фізичні властивості заготовки: Thermal conductivity (Теплопровідність), Density (Щільність) і Heat capacity at constant pressure (Теплоємність). Heat source (Джерело тепла). Цей параметр визначається в електромагнітному розрахунку. У вікно вводимо `Qav_emqa`. Граничні умови задаються через Physics > Boundary Settings або F7. Вибираємо необхідні границі в полі Boundary selection і задаємо Heat transfer coefficient (коефіцієнт тепловіддачі). У спокійному повітрі цей коефіцієнт можна прийняти рівним 25 Вт/м²·К. Вікно налаштувань фізичних параметрів теплової задачі на прикладі властивостей металеві деталі наведено на рис. 4.

Побудова сітки кінцевих елементів.

Найбільшу точність обчислень (при рівній кількості кінцевих елементів) забезпечують параболічні елементи, оскільки вони мають більш точні функції форми (апроксимуючі функції). Однак розрахунок із застосуванням кінцевих елементів (KE) високих порядків вимагає великих апаратних ресурсів.

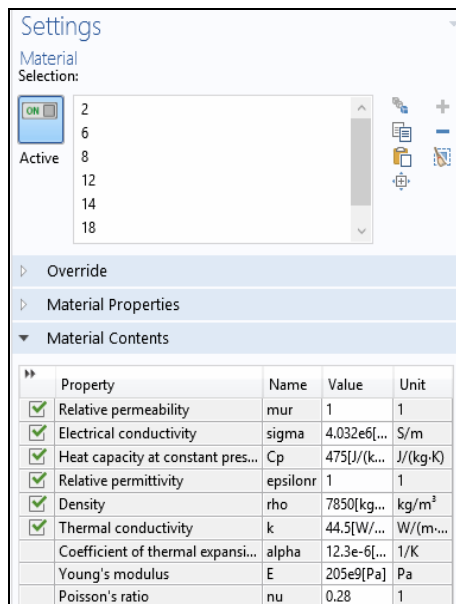


Рис.4. Вікно налаштувань фізичних параметрів теплової задачі

Найбільший вплив на час розрахунку (число ітерацій) крім наявності нелінійностей надають розміри KE і ступінь відповідних апроксимуючих функцій, що визначаються числом вузлів KE. Мінімальний розмір KE (при заданому порядку полінома апроксимуючої функції) і мінімум розрахункового часу необхідно приймати виходячи з умов здобуття необхідної точності розрахунку електромагнітного поля. Зі зменшенням розміру KE розрахунковий час збільшується, а рішення прагне до точного. На рис. 5 представлена кінцево-елементна сітка моделі. Вибір параметрів і оптимізація структури сітки здійснюються в ході чисельних експериментів шляхом встановлення компромісу між точністю моделювання і тимчасовими витратами на виконання розрахунків.

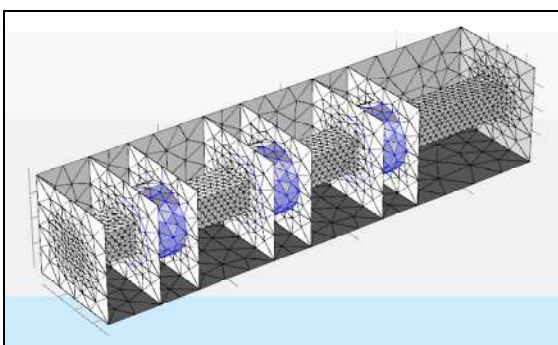


Рис.5. Кінцево-елементна сітка моделі

Налаштування вирішувача.

В меню Solve (Вирішити) обираємо Solver Parameters. У вікні Analysis types обираємо тип вирішувача. Для завдання Azimuthal > Time-harmonic, для General .. > Transient. На вкладці General в першому полі Times вводимо 0: 1,1. Натискаємо кнопку Solve.

Після закінчення розрахунку визначаємо температуру в контрольних точках. В меню Postprocessing > Point Evaluation у вікні Predefined

quantities обираємо Temperature і задаємо точки, в яких будемо контролювати температуру. Натискаємо кнопку Apply.

У нижній частині робочого вікна повинні з'явитися результати. Повторюємо розрахунок, але запускаємо розрахунок кнопкою Restart. Особливість такого запуску полягає в тому, що розрахунок повторюється, але початковими умовами є кінцеві результати попереднього розрахунку. Визначаємо температуру в тих же контрольних точках. Зберігаємо проведену серію розрахунків в форматі m-файлу.

Для моделювання нагріву, отриманий раніше m-файл необхідно відредагувати.

Знаходимо оператор

```
I4 = postint (fem, 'T', ...
            'Unit', 'K', ...
            'Recover', 'off', ...
            'Dl', 7, ...
            'Edim', 0, ...
            'Solnum', 'end');
```

Цим оператором визначається температура в точці 7. Цей оператор завершує перший цикл розрахунку. Подальший розрахунок рекомендується розмістити всередині циклу, наприклад оператора «for end».

Всередині циклу додаємо умови зміни струму індуктора – це може бути функція часу або температури. Припустимо, ім'я ідентифікатора струму в стрижні «Ist». Знаходимо оператор equ.Jerph1 = {0,0, 'I'}; Замінюємо текстову константу 'I' на Ist. Відредагований оператор має вид equ.Jerph1 = {0,0, Ist};

Результати визначення тривимірного розподілу електромагнітного та теплового полів всередині індукторів та деталі будуть представлені в наступних роботах.

III. ВИСНОВКИ

При розробці автоматизованих комплексів індукційного нагріву металевих деталей необхідно на етапі проектування виконати кількісний аналіз основних характеристик електротеплового процесу та виробити рекомендації щодо вибору раціональних параметрів та режимів нагріву. В роботі представлено основні етапи побудови тривимірної кінцево-елементної моделі автоматизованого комплексу індукційного нагріву металевих деталей.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

[1] Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике // Киев: Институт электродинамики НАН Украины. – 2015. – 305 с.

[2] Випанасенко С.І., Дрешпак Н.С. Аналіз способів регулювання потужності в електротехнологіях індукційного нагріву // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2018. – № 53. – С. 193-199.

[3] Kostyk K.O., Akimov O.V., Ostroverkhova K.V. Дослідження електромагнітних параметрів індукційної тигельної печі з кусковим завантаженням шихти для виплавки сталі 35л // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – 2020. – № 2. – С. 85-92.