

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт з дисципліни
«Прикладні комп'ютерні пакети програм в електромеханіці»
для студентів спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
освітньої програми «Електричні машини і апарати»
усіх форм навчання
Частина 2

2023

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Прикладні комп'ютерні пакети програм в електромеханіці» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньої програми «Електричні машини і апарати» усіх форм навчання. Частина 2 / Укл. Д.С. Яримбаш, С.О. Лапкіна. – Запоріжжя: НУЗП, 2023. – 47 с.

Укладачі: Д.С. Яримбаш, проф., д.т.н.
С.О. Лапкіна, асистент

Відповідальний
за випуск: С.О. Лапкіна, асистент

Затверджено
на засіданні кафедри
«Електричні машини»
Протокол №1
від 14.08.2023 р.

Рекомендовано до видання
НМК Електротехнічного
факультету
Протокол №1
від 21.09.2023 р.

ЗМІСТ

Лабораторна робота №3 Задача електростатичного поля.....	66
3.1 Загальні відомості.....	66
3.2 Порядок виконання роботи.....	67
3.3 Індивідуальні завдання.....	79
3.4 Звіт має містити.....	83
Лабораторна робота №4 Розрахунок теплового режиму силового трансформатора.....	84
4.1 Загальні відомості.....	84
4.2 Порядок виконання роботи.....	84
4.3 Звіт має містити.....	98
Лабораторна робота №5 Задача розтікання струму у FEMM.....	99
5.1 Загальні відомості.....	99
5.2 Порядок виконання роботи.....	100
5.3 Звіт має містити.....	108
Перелік джерел посилань.....	109

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ЗАДАЧА ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ

Мета роботи: побудувати модель установки високої напруги, побудувати криву зміни напруженості поля, розрахувати коефіцієнт неоднорідності поля, визначити ступінь неоднорідності поля, виконати індивідуальне завдання.

3.1 Загальні відомості

3.1.1 Рівняння електростатичного поля

Електростатична задача полягає у визначенні напруженості електричного поля E та вектора щільності електричного потоку D (вектор електричного зміщення). Є дві умови, які мають виконуватися для статичного електричного поля. Перша умова – потік електричного зміщення через довільну замкнену поверхню дорівнює алгебраїчній сумі сторонніх зарядів, заключених всередині цієї поверхні. Цю умову виражає теорема Гаусса в диференційній формі для вектора D :

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho, \quad (3.1)$$

де ∇ – оператор набла;

\vec{D} – вектор електричного зміщення;

ρ – об'ємна щільність сторонніх зарядів;

Друга умова – це закон Ампера для статичного електричного поля у диференційній формі:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0, \quad (3.2)$$

де ∇ – оператор набла;

\vec{E} – вектор напруженості електричного поля.

Електричне Зміщення D пов'язане з напруженістю E електричного поля наступним співвідношенням:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \vec{E}, \quad (3.3)$$

ϵ_0 – абсолютна діелектрична проникність

ϵ_r – відносна діелектрична проникність.

Співвідношення (3.3) справедливе лише для ізотропних діелектриків.

Програма FEMM розглядає лише лінійні залежності між вектором напруженості і вектором зміщення. Для спрощення обчислення поля та задоволення двох вищевказаних умов програма використовує наступне співвідношення:

$$\vec{E} = -\nabla \cdot V, \quad (3.4)$$

де V – різниця потенціалів.

В цьому випадку умова (3.2) виконується завжди, бо $\nabla \times \nabla \cdot V \equiv 0$, а умова (3.1) призводить до наступного рівняння:

$$-\nabla \cdot (\epsilon \cdot \nabla \cdot V) = \rho. \quad (3.5)$$

Отримане рівняння має бути доповнене відповідними граничними умовами.

3.1.2 Граничні умови

До граничних умов електростатичного поля відносяться: граничні умови Діріхле, умова Неймана, умова Робіна, періодична умова, аперіодична умова. Для отримання єдиного рішення граничні умови повинні бути завжди однозначно визначені. Для плоских задач за замовчуванням на границі задаються умови Неймана. Для осесиметричних задач значення $A = 0$ наказано лінії $r=0$. У цьому випадку задавати граничну умову не потрібно. Для електростатичних задач необхідно задавати граничну умову, щоб задати потенціал на лінії $r=0$.

3.2 Порядок виконання роботи

3.2.1 Попередня підготовка

Зобразимо модель досліджуваного об'єкта спочатку на міліметровій сітці із зазначенням координат її опорних точок. У якості об'єкта дослідження маємо два електроди, на які подається напруга: електрод, що має форму стрижня, та електрод, що має форму площини. На рисунку 3.1 зображений досліджуваний об'єкт із зазначенням основних розмірів.

На стрижень будемо подавати напругу $U=12\text{кВ}$.

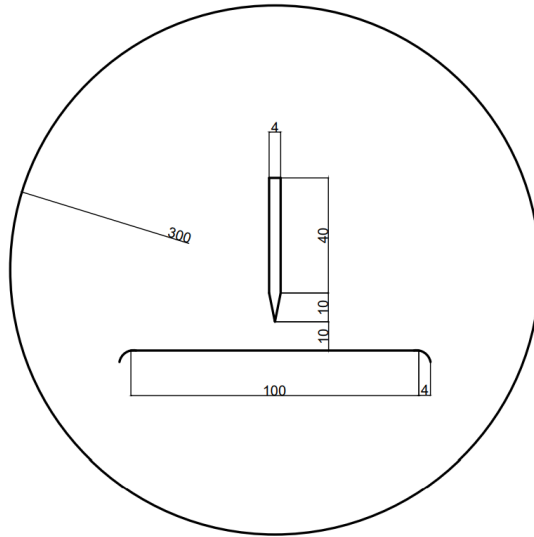



Рисунок 3.1 – Об’єкт дослідження для задачі електростатичного поля

3.2.2 Формулювання задачі (Problem definition)

Запустити програму FEMM. У вікні femm клацнути кнопку з піктограмою у вигляді чистого аркуша паперу із загнутим правим верхнім кутом . Виникне діалог **Create a new problem** (Створення нового завдання), у полі якого необхідно обрати **Electrostatics Problem** (електростатична задача).

Натисніть **Problem** (Завдання) головного меню. Відкриється діалог **Problem Definition** (рис. 3.2), в якому необхідно заповнити поля **Problem Type** (Тип завдання), **Length Units** (Одиниці виміру), **Depth** (Товщина), **Solver Precision** (точність ітераційного розв’язання), **Min Angle** (мінімальний кут елементарної трикутної області), **Smart Mesh**. Згідно до умов задачі обираємо: плоска задача (**Panar**), одиниці виміру обираємо міліметри (**mm**), інші дані залишаємо за замовчуванням.

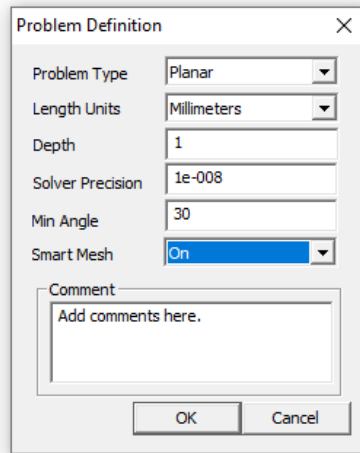




Рисунок 3.2 - Діалог **Problem Definition**

Після створення задачі необхідно зберегти її під назвою: Л.Р.3_Прізвище_група. Наприклад: Л.Р.3_Іваненко_Е-222.

3.2.3. Побудова контурів моделі

Натискаємо кнопку **Snap to grid** . Далі натискаємо кнопку **Grid size** , на боковій панелі інструментів вона знаходиться першою знизу. У діалоговому вікні, що виникне обираємо Grid size = 1, Coordinates – Cartesian. Натискаємо ОК.

Для побудови опорних точок має бути втоплена кнопка  на горизонтальній панелі інструментів. Після чого вводимо координати опорних точок. Натискаємо кнопку **Tab** на клавіатурі, з'явиться вікно **Enter point** (рис. 3.3), у яке необхідно вводити координати опорних точок досліджуваної моделі. Після введення точки натискаємо кнопку ОК та на екрані має з'явитися точка. Якщо точку не видно, необхідно за допомогою кнопок збільшення, зменшення, стрілок верх, вниз, вправо, вліво розмістити досліджувану область так, щоб її було видно повністю.

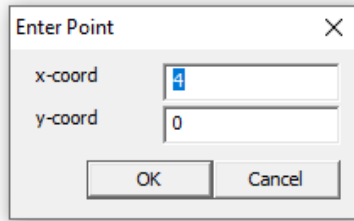




Рисунок 3.3 – Вікно для введення опорних точок

Якщо введена невірна точка та її необхідно видалити, натискаємо на точку правою кнопкою миші, точка стає червоного кольору та натискаємо кнопку **Delete** з клавіатури. Після побудови геометрії моделі необхідно призначити умовні границі, які будуть обмежувати розрахункову область. Прийнемо, що наша область обмежена квадратом зі стороною 300 мм.

Після того як всі опорні точки побудовані переходимо до побудови прямих. Для цього активуємо режим роботи з прямими натисканням кнопки . При втопленій кнопці роботи з прямими з'єднуємо відповідні точки натисканням лівою кнопкою миші. Таким чином будемо відрізки AB, AE, DE, BC, CD, FL, GK.

Для побудови дуг GF, LK, PN та NP активуємо режим побудови дуги кола натискання кнопки  на горизонтальній панелі інструментів. При затопленій кнопці побудови дуг натискаємо на точки F та G лівою кнопкою миші, побудова дуги відбувається проти годинникової стрілки, тому якщо натиснути ці кнопки у зворотньому напрямку вигин дуги буде у іншу сторону. Після натискання точок F та G з'явиться вікно Arc segment properties, у якому встановлюємо **Arc angle** (кут дуги) рівним 90, інші значення залишаємо за замовчуванням. Аналогічним чином будемо дуги PN та NP.

Результати побудови наведені на рисунку 3.4.

3.2.4 Введення властивостей

Для розв'язання електростатичної задачі необхідно визначити властивості задачі такі як: матеріали, граничні умови, значення потенціалу та ін.

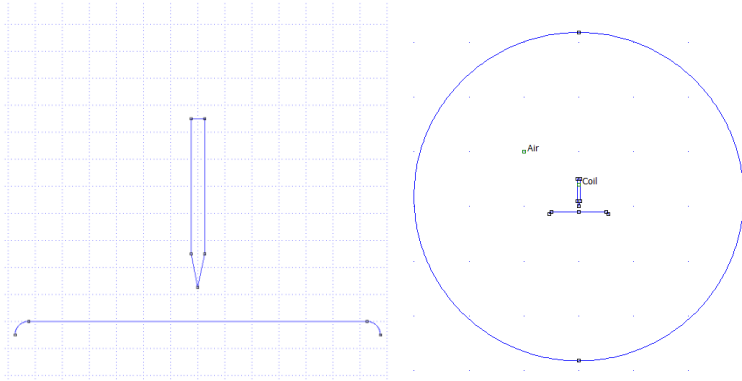


Рисунок 3.4 Геометрія моделі

3.2.4.1 Властивості точки (Nodal Property)

Для задання властивостей точки необхідно задати: Ім'я точки (**New point Property**), значення потенціалу точки (**specified potential property**) або значення заряду точки (**point charge density property**). Вікно задання властивостей точки наведено на рисунку 3.5.

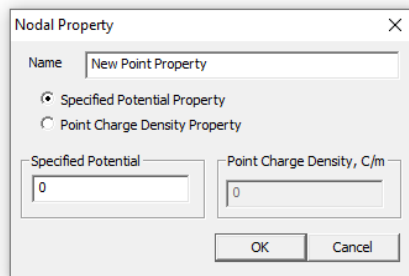


Рисунок 3.5 – Вікно введення властивостей точки

3.2.4.2 Властивості границі (Boundary Property)

За границі приймаються відрізки та сегменти дуг, які знаходяться у розрахунковій області. Згідно до рисунка 3.6 на границях задаються наступні властивості:

- Name – ім'я, яке необхідно привласнити до границі.

- BC Type - у вкладці обираємо вид умови, їх перелік наведено нижче.
- Fixed Voltage – фіксована напруга, задається потенціал уздовж границі.
- Surface Charge Density – поверхнева щільність заряду. Задає поверхневу щільність заряду на лініях та сегментах. Властивість може бути використана і на внутрішніх границях між матеріалами.
- Mixed BC parameters: задання коефіцієнтів c_0 coefficient, c_1 coefficient. Змішана умова визначається співвідношенням:

$$\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{\partial V}{\partial n} + c_0 \cdot V + c_1 = 0. \quad (3.6)$$

В залежності від значення коефіцієнтів ця умова може бути або умовою Неймана, або умовою Робіна. Обираючи відповідним чином коефіцієнт c_0 при $c_1=0$ можливо задавати «відкриту» границю області.

- Periodic – періодична умова, найчастіше виконується для двох сегментів окружності. Цей вид граничної умови також застосовується у випадку симетрії системи відносно деякої границі для зменшення розмірів розрахункової області, а також для задання відкритої границі.

- Anti-periodic – анти періодична умова, застосовується для зменшення розмірів розрахункової області.

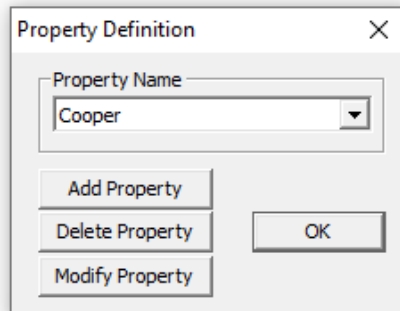



Рисунок 3.6 – Вид вікна «Граничні умови»

Необхідно задати властивості зовнішнього контуру. Натискаємо **Properties**→**Boundary**→**Add property**. У вікні, що з’явилося: Name –

External, BC Type – Fixed Voltage. Інші поля залишаємо за замовчуванням. Тепер необхідно привласнити дугам PN та NP граничні умови. Для цього активуємо режим роботи із дугами . Правою кнопкою миші натиснемо на обидві дуги та натиснемо пробіл. Виникне **вікно Arc segment properties**, у якому для **Boundary cond.** Обираємо властивості границі **External**. ОК.

3.2.4.3 Властивості матеріалів (Materials Property)

Натискаємо **Properties**, обираємо вкладку **Materials**. У вікні **Property definition** натискаємо на кнопку **Add property**. У вікні, що виникне (рис. 3.7) задаємо наступні значення: Name: Cooper. Значення залишаємо за замовчуванням.

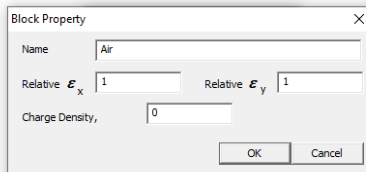



Рисунок 3.7 – Введення властивостей матеріалу

Значення навколишнього середовища обираємо із бібліотеки матеріалів. Для того щоб відкрити бібліотеку матеріалів натискаємо **Properties** → **Materials Library**. На екрані з'явиться вікно **Materials Library**, у якому нам потрібно перетягнути лівою кнопкою миші позицію із назвою **Air** у праву сторону.

Для того, щоб привласнити властивості матеріалів відповідним блокам натискаємо кнопку  на горизонтальній панелі інструментів. Натискаємо всередину блоку металевого стрижня, з'являється точка з надписом <None>, натискаємо на цю точку правою кнопкою миші, її колір стає червоним. Натискаємо пробіл. На екрані з'являється вікно **Properties for selected block**. У цьому вікні для стрижня задаємо: Block type – Cooper, інші параметри залишаємо незмінними. Таким само чином привласнюємо властивості Air для середовища, що оточує стрижень.

3.2.4.4 Властивості провідника (Properties Conductors)

Властивості провідника дозволяють задати на границі конкретні значення напруги та обчислити його ємність. Натискаємо **Properties**→**Conductors**→**Add property**, у вікні, що відкривається (рис. 3.8) маємо можливість задати:

- Замкнутій границі – напруга всередині границі постійна.
- Незамкненій границі – напруга уздовж лінії постійна.
- Точці – напруга в точці постійна.

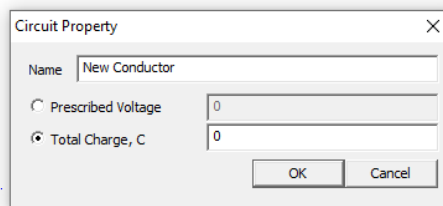



Рисунок 3.8 – Задання властивостей провідника

Метою створення властивостей провідника є забезпечення однаковості потенціала по границям та всередині деякої області. В цьому випадку можна визначити заряд та ємність провідника.


У відкритому вікні **Circuit Property** задаємо значення потенціалів для стрижня та для площини. Заповнюємо **Name** – HighVoltage. **Prescribed Voltage** = 12000. Натискаємо ОК.

Повторюємо задання властивості **Circuit Property** для площини.

Натискаємо **Properties**→**Conductors**→**Add property**, та вводимо значення **Name** – LowVoltage. **Prescribed Voltage** = 0. Натискаємо ОК.

Тепер необхідно привласнити задані умови для об'єктів випробування. Обираємо режим роботи з прямими . Натискаємо по черзі на границі стрижня та натискаємо пробіл. В окні, що з'явиться в полі **In conductor** обираємо HighVoltage. Таким самим чином задаємо границі площини значення LowVoltage.

3.2.5 Аналіз та розв'язання задачі

Побудуємо кінцево-елементну сітку за допомогою кнопки . На екрані виникне інформативне вікно, на якому буде зображена загальна кількість побудованих вершин кінцево-елементної сітки.

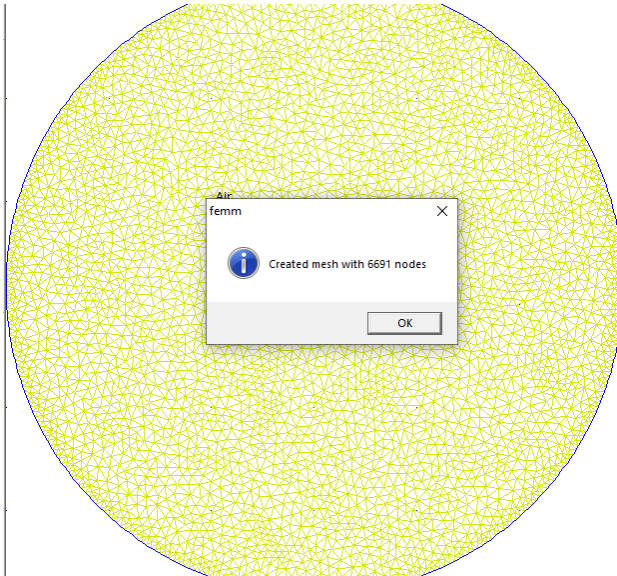




Рисунок 3.9 – Побудова кінцево-елементної сітки моделі

Прибрати сітку можна натиснувши Mesh→Show Mesh.

Для запуску розв'язання натискаємо на кнопку  на горизонтальній панелі інструментів. Після закінчення розрахунку та для просмотра результатів натискаємо кнопку  на горизонтальній панелі інструментів. На екрані з'явилося розв'язання задачі у вигляді побудованої картини поля розподілу напруги (рис 3.10).

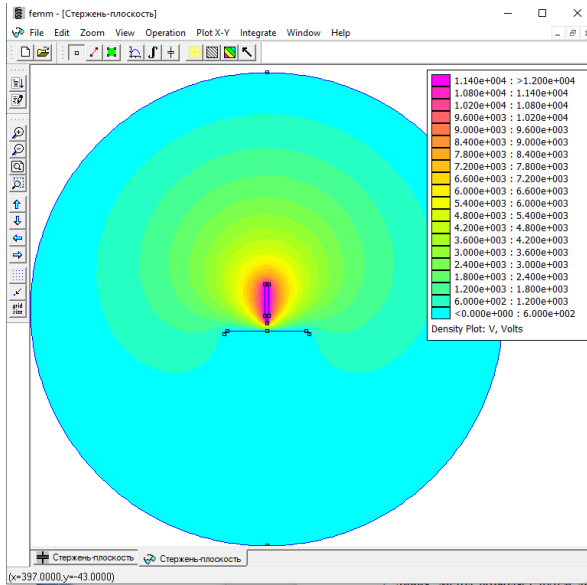



Рисунок 3.10 – Картина поля розподілу напруги у об’єкті дослідження

При розв’язанні задачі електростатики ми можемо отримати картину поля напруги (V, В), напруженості електричного поля (E, В/м) та щільності потоку (D, С/м²). Щоб побачити картину поля натискаємо на кнопку  горизонтальної панелі задач. У вікні, що виникне на екрані (рис. 3.11), можемо обрати досліджувану величину та вивести її на екран, поставити галочку для відображення кольорової картини поля (Show density plot), відображення легенди із значеннями (Show Legend), відображення картини поля в градаціях сірого (Greyscale), також написано мінімальне значення досліджуваної величини (Lower Bound) та максимальне значення досліджуваної величини (Upper Bound).

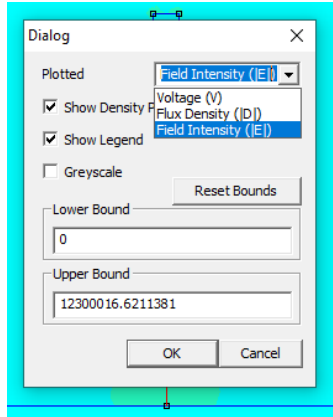





Рисунок 3.11 – Вікно для дослідження отриманих картин поля

Виведемо графік розподілу напруженості поля на екран по повітряному проміжку між стрижнем та площиною. Для цього відкриємо вікно із результатами розрахунків і у нашій моделі побудуємо точку T, яка знаходиться посередині площини, рівно навпроти середини стрижня. Після перерахунку задачі натискаємо на кнопку побудови лінії  на горизонтальній панелі інструментів та з'єднуємо точки TA. З'явиться відрізок червоного кольору. Натискаємо на кнопку побудови графіка  на горизонтальній панелі задач, у вікні, що виникне на екрані обираємо величину напруженості поля (**Magnitude of field intensity**) та натискаємо ОК. Таким чином отримали графік розподілу напруженості поля у газовому проміжку між стрижнем і площиною (рис. 3.12).

Натиснемо на кнопку , на екрані з'явиться вікно **Vector Plot Options**, у якому обираємо **Electric Field Intensity** (Напруженість електричного поля) та натискаємо ОК. На картини поля з'являться вектори розподілу напруженості магнітного поля. Як видно із рисунка 3.13 напрям розподілу напруженості поля максимальний прикладений від стрижня до площини.

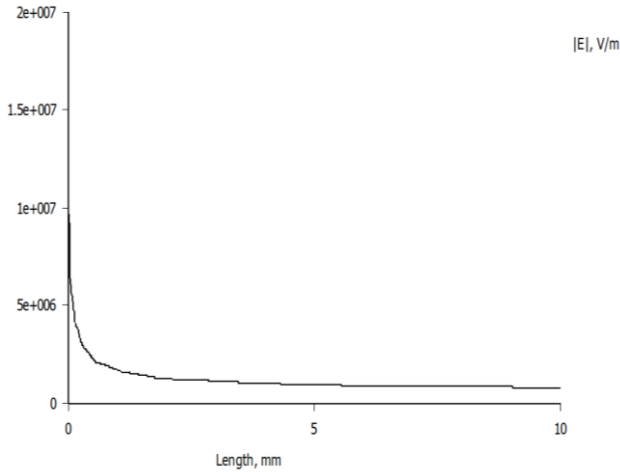


Рисунок 3.12 - Графік розподілу напруженості поля у газовому проміжку між стрижнем і площиною

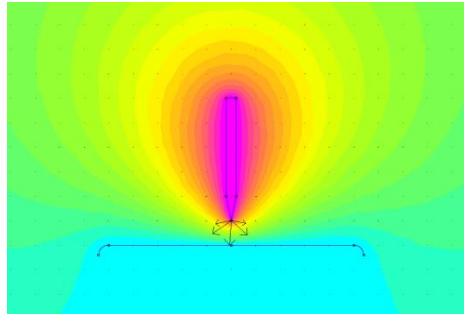


Рисунок 3.13 – Вектор розподілу напруженості поля

Коефіцієнт неоднорідності поля визначається за формулою:

$$k = \frac{E_{max}}{E_{cp}}, \quad (3.7)$$


де E_{max} – максимальна напруженість електричного поля,
 E_{cp} – середня напруженість електричного поля.

$$E_{cp} = \frac{U}{S}, \quad (3.8)$$

де U – прикладена напруга,
 S – відстань між електродами.

Для нашого досліджу:

$$E_{cp} = \frac{12000}{10} = 1200 \text{ В/мм.}$$

E_{max} визначимо з результатів задачі у ПЗ FEMM. Натискаємо кнопку , обираємо Plotted – Field Intensity (|E|) та у вікні побачимо максимальне значення напруженості електричного поля, яке дорівнює $E_{max} = 12300016,6211381 \text{ В/м.}$

Розраховуємо коефіцієнт напруженості поля за (3.7):

$$k = \frac{E_{max}}{E_{cp}} = \frac{12300,0166211381}{1200} = 10,25 \text{ в. о.}$$

Таким чином для проміжку стрижень-площина характерне різко неоднорідне поле. У такому випадку розрядні напруги значно нижчі, ніж у повітряних проміжках з однорідним та слабо неоднорідним полями.

3.3 Індивідуальні завдання

Варіант 1.

Для існуючої моделі установки високої напруги дослідити зміну коефіцієнту неоднорідності для дослідних даних, наведених у таблиці 1.1.

Таблиця 3.1 – Дослідні та розрахункові дані визначення розрядної напруги у проміжку стрижень – площина.

Відстань між електродами S, мм	2	4	6	8	10
Розрядна напруга, U_p , кВ	5	6	8	10,5	12
Коефіцієнт неоднорідності, K_n					10,25

Варіант 2.

Побудувати картину напруженості електричного поля та визначити коефіцієнт неоднорідності для електродів стрижень-стрижень, які наведено на рисунку 3.14. $U_p=8\text{кВ.}$

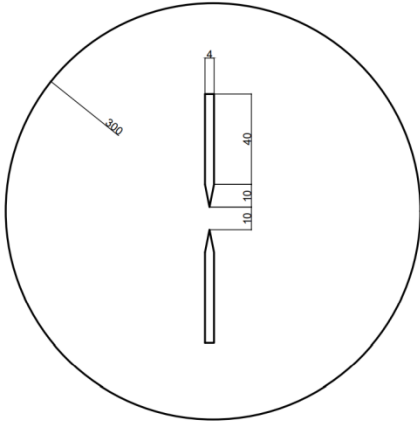


Рисунок 3.14 – Ескіз об'єкта дослідження

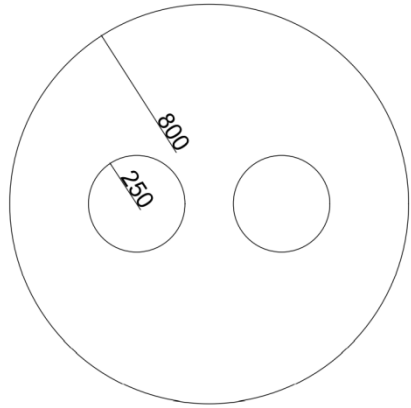


Рисунок 3.15 - Ескіз об'єкта дослідження

Варіант 3.

Побудувати картину напруженості електричного поля та визначити коефіцієнт неоднорідності для електродів шар-шар, які наведено на рисунку 3.14. $U_p=60\text{кВ}$. Відстань між електродами 20 мм.

Варіант 4.

Побудувати картину напруженості електричного поля та визначити коефіцієнт неоднорідності для електродів стрижень-площина, які наведено на рис. 3.16. $U_p=7\text{кВ}$.

Варіант 5.

Побудувати картину напруженості електричного поля та визначити коефіцієнт неоднорідності для електродів шар-шар, які наведено на рис. 3.17. $U_p=8,5\text{кВ}$. Відстань між електродами 2 мм.

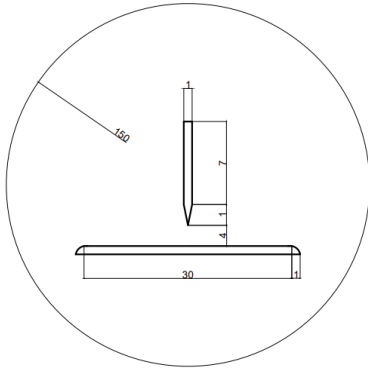


Рисунок 3.16 - Ескіз об'єкта дослідження

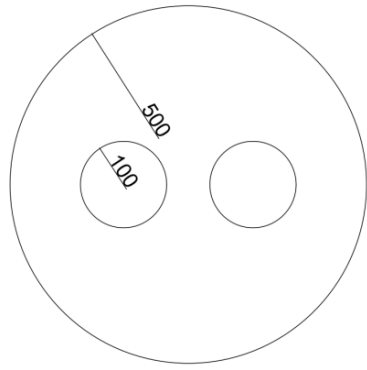


Рисунок 3.17 – Ескіз об'єкта дослідження

Варіант 6.

Побудувати картину напруженості електричного поля та визначити коефіцієнт неоднорідності для електродів площина-площина, які наведено на рис. 3.18. $U_p=21$ кВ. Потім змінити відстань між стрижнями, щоб вона дорівнювала 20 мм, та визначити коефіцієнт неоднорідності для напруги $U_p=26,4$ кВ.

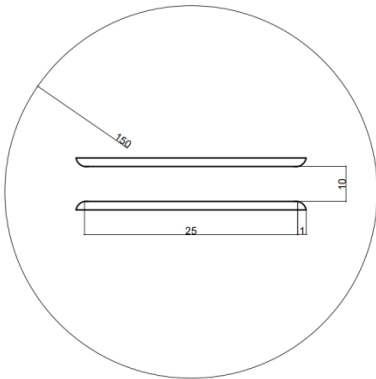


Рисунок 3.18 - Ескіз об'єкта дослідження

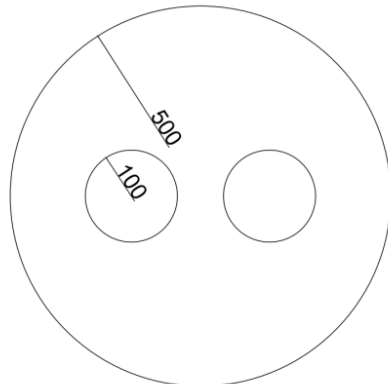


Рисунок 3.19 - Ескіз об'єкта дослідження

Варіант 7.

Побудувати картину напруженості електричного поля та визначити коефіцієнт неоднорідності для електродів шар-шар, які наведено на рисунку 3.14. $U_p=15,5\text{кВ}$. Відстань між електродами 6 мм.

Варіант 8.

Побудувати картину напруженості електричного поля та визначити коефіцієнт неоднорідності для електродів шар-шар, які наведено на рисунку 3.20. $U_p=107\text{кВ}$. Відстань між електродами 40 мм.

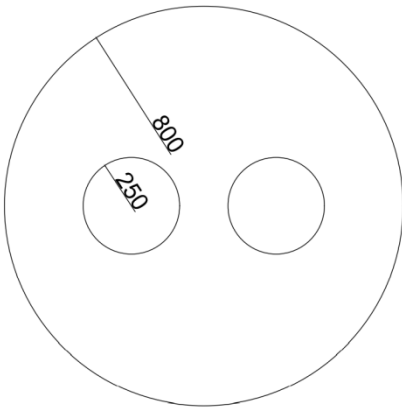


Рисунок 3.20 - Ескіз об'єкта дослідження

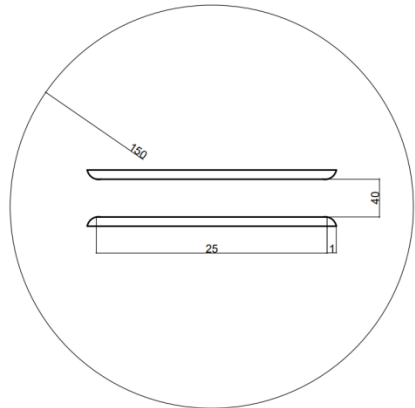


Рисунок 3.21 - Ескіз об'єкта дослідження

Варіант 9.

Побудувати картину напруженості електричного поля та визначити коефіцієнт неоднорідності для електродів площина-площина, які наведено на рис. 3.18. $U_p=42\text{кВ}$. Потім змінити відстань між стрижнями, щоб вона дорівнювала 30 мм, та визначити коефіцієнт неоднорідності для напруги $U_p=33,6\text{кВ}$.

Варіант 10.

Побудувати картину напруженості електричного поля та визначити коефіцієнт неоднорідності для електродів шар-шар, які

наведено на рисунку 3.14. $U_p=22,5\text{кВ}$. Відстань між електродами 10 мм.

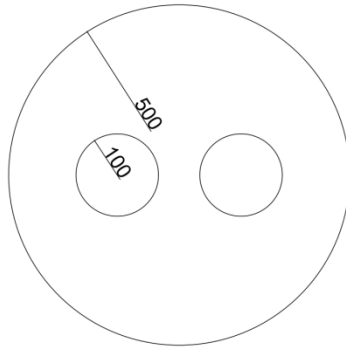


Рисунок 3.22 - Ескіз об'єкта дослідження

3.4 Звіт має містити

- Тему, мету, основні етапи виконання роботи, графіки, картини поля.
- Розрахунки коефіцієнта неоднорідності поля.
- Висновки.
- Індивідуальне завдання.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 РОЗРАХУНОК ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Мета роботи: побудувати модель силового трансформатора, розрахувати його теплові параметри.

4.1 Загальні відомості

Основою розрахунку двомірних стаціонарних температурних полів методом кінцевих елементів є загальне диференціальне рівняння теплопровідності, яке в декартовій системі координат має вигляд

$$\frac{\partial T}{\partial x} \cdot (r\lambda_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{1}{r}\lambda_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_y \cdot \frac{\partial T}{\partial x}) = q . \quad (4.1)$$

З граничними умовами, які враховують конвективний теплообмін

$$\lambda_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot e_x + \lambda_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \cdot e_y - \alpha(T - T_{oc}) = 0 . \quad (4.2)$$

При граничних умовах першого роду

$$T|_x = T^* . \quad (4.3)$$

З граничними умовами другого роду

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 . \quad (4.4)$$

4.2 Порядок виконання роботи

4.2.1 Попередня підготовка

Розглянемо дослідження силового трансформатора, виконаного на стрічковому Ш-подібному осерді сталі 3414 товщиною 0.35 мм. Трансформатор розрахований для роботи від мережі змінного струму

частотою 50 Гц. На рисунку 4.1 зображено розрізи силового трансформатора з позначеними розмірами. Згідно до малюнка: а

- a – ширина осердя ($a=32$ мм);
- b – товщина осердя ($b=32$ мм);
- c – ширина вікна осердя ($c=32$ мм);
- g_1 – товщина первинної обмотки ($g_1 = 11,3$ мм);
- g_2 – товщина вторинної обмотки ($g_2 = 11,8$ мм);
- g_k – товщина стінок каркасу ($g_k = 1,5$ мм);
- g_0 – товщина між обмотковою ізоляцією ($g_0 = 0,24$ мм);
- $h_{\text{сл}}$ – висота обмотки ($h_{\text{сл}} = 68$ мм);
- h – висота вікна осердя ($h = 80$ мм);
- z_b – зазор між зовнішньою стороною обмотки та осердям ($z_b = 6,7$ мм);
- z_k – зазор між краєм обмотки та каркасом ($z_k = 4$ мм);
- z_H – зазор між осердям та каркасом ($z_H = 0,5$ мм).

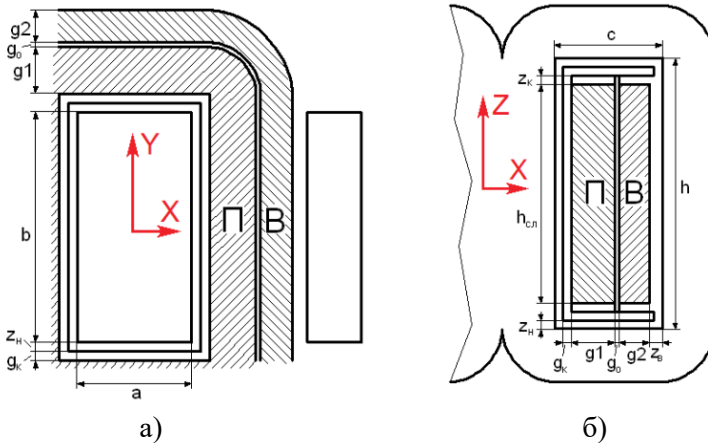



Рисунок 4.1 – Розрізи трансформатора: а) перпендикулярно площині осердя; б) паралельно площині осердя

Завичай при дослідженні трансформатора ставиться завдання визначення найбільш напружених в тепловому відношенні елементів його конструкції. Втрати провідності в обмотках трансформатора, а

також втрати перемагнічування осердя є джерелами тепла в трансформаторі. Теплові потоки, що утворюються при цьому, рухаються до поверхні трансформатора і далі розсіюються в навколишньому просторі.

Сталевий сердечник трансформатора має низький тепловий опір. Тому його температура майже однакова на всіх ділянках. Тепловий потік, що йде з ділянки осердя покритого обмоткою, легко перетікає у зовнішні ділянки сердечника і розсіюється там у просторі. На відміну від осердя, обмотка має відносно високий тепловий опір. Тому температури різних областей обмотки дуже відрізняються. Крім цього, поточні у різних напрямках теплові потоки долають ділянки, що мають різні теплові опори. Наприклад, у напрямку X (рис.1), тепловий потік обмотки частково протікає через тепловий опір обмотки, тепловий опір повітряного зазору між обмоткою і сердечником, і далі, через тепловий опір осердя-простір, розсіюється в навколишньому просторі. У напрямку Y (рис.1) тепловий потік обмотки частково протікає через тепловий опір обмотки і далі розсіюється в навколишньому просторі через тепловий опір обмотка-простір. Вздовж осі Z (рис.1) тепловий потік відчуває набагато більший тепловий опір. Це відбувається з кількох причин. По-перше, у напрямках X і Y довжина обмотки менше, ніж у напрямку Z . По-друге, у напрямку Z , тепловий потік змушений додатково протікати через стінки каркаса, що мають високий тепловий опір. Насправді, згідно з перелічених міркувань, вважається, що тепловий потік вздовж осі Z відсутня. Це дозволяє звести дослідження до двовимірної планарної задачі. Однак, щоб врахувати особливості конструкції трансформатора, дослідження доведеться проводити у два етапи. На першому етапі моделюються теплові поля у площині $X-Z$ та на другому у площині $X-Y$. Це з тим, що у першому етапі визначається тепловий режим сердечника, але в другому етапі тепловий режим обмотки. Як говорилося вище, у деяких випадках FEMM дозволяє моделювати поля тривимірних об'єктів за один раз.

4.2.2 Формулювання задачі (Problem definition)

Запустити програму FEMM. У вікні femm клацнути кнопку з піктограмою у вигляді чистого аркуша паперу із загнутим правим верхнім кутом . Виникне діалог **Create a new problem** (Створення

нового завдання), у полі якого необхідно обрати **Heat Flow Problem** (Проблема теплового потоку).

Натисніть **Problem** (Завдання) головного меню. Відкриється діалог **Problem Definition** (рис. 4.2), в якому необхідно заповнити поля **Problem Type** (Тип завдання), **Length Units** (Одиниці виміру), **Depth** (Товщина), **Solver Precision** (точність ітераційного розв'язання), **Min Angle** (мінімальний кут елементарної трикутної області), **Smart Mesh**. Згідно до умов задачі обираємо: плоска задача (**Panar**), одиниці виміру обираємо міліметри (**mm**), **Depth** – 32 мм (товщина осердя), (інші дані залишаємо за замовчуванням).

Після створення задачі необхідно зберегти її під назвою: Л.Р.4_Прізвище_група. Наприклад: Л.Р.4_Іваненко_Е-222.

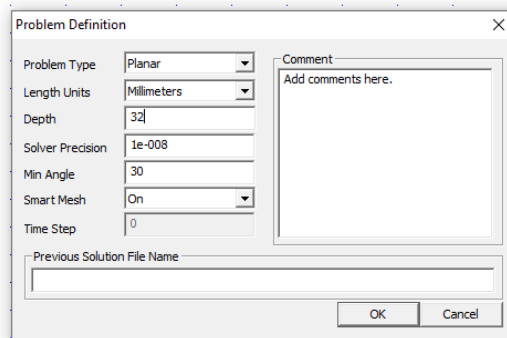



Рисунок 4.2 – Завдання властивостей задачі

4.2.3. Побудова контурів моделі



Спершу виконаємо розрахунки для площини **X-Z**. Броньовий трансформатор, у площині **X-Z**, має симетрію. Тому достатньо моделювати лише одну з його симетричних половинок. Наприклад, виберемо праву половинку та введемо координати вузлових точок блоків. У FEMM блоками називаються області, заповнені певним матеріалом.

Для побудови опорних точок має бути втоплена кнопка  на горизонтальній панелі інструментів. Після чого вводимо координати опорних точок. Натискаємо кнопку **Tab** на клавіатурі, з'явиться вікно **Enter point** (рис. 3.3), у яке необхідно вводити координати опорних

дочок досліджуваної моделі. Після введення точки натискаємо кнопку ОК та на екрані має з'явитися точка. Якщо точку не видно, необхідно за допомогою кнопок збільшення, зменшення, стрілок верх, вниз, вправо, вліво розмістити досліджувану область так, щоб її було видно повністю. Координати точок моделі вказані у таблиці 4.1

Таблиця 4.1 – Координати точок моделі

X	16	48	16	48	16	0	0	16	48	48	64
Y	16	16	96	96	0	16	96	112	112	0	16
X	64	16.5	16.5	41.1	41.1	18	18	41.1	41.1	41.1	41.1
Y	96	16.5	95.5	95.5	90	90	22	22	16.5	16	96

Після того як всі опорні точки побудовані переходимо до побудови прямих. Для цього активуємо режим роботи з прямими натисканням кнопки . Після чого з'єднуємо точки, натисканням лівої кнопки миші. Для побудови дуг активуємо режим побудови дуги кола натисканням кнопки  на горизонтальній панелі інструментів.

Результати побудови наведені на рисунку 4.3.

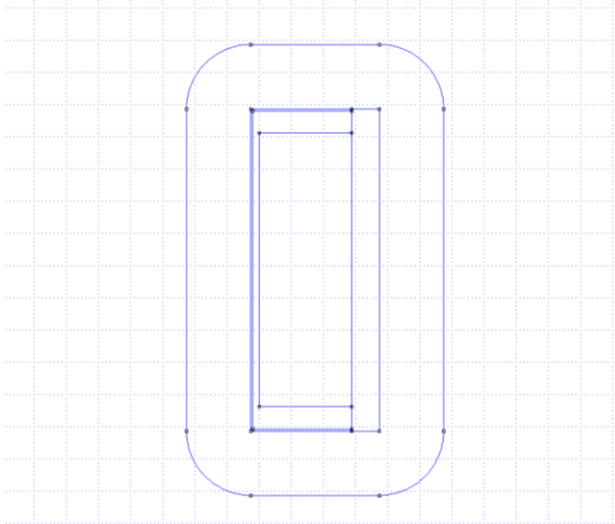


Рисунок 4.3 – Геометрична модель

4.2.4 Введення властивостей

Для розв'язання електростатичної задачі необхідно визначити властивості задачі такі як: матеріали та граничні умови.

4.2.4.1 Визначення властивостей матеріалів

Для введення властивостей матеріалів натискаємо Properties → Materials → Add Property. Отримаємо вікно Block Property для введення властивостей блоку, у якому задаються:

- **Name**- назва блоку.

- **T-k Curve** – крива температури. Є 2 можливих варіанта:

Constant Thermal Conductivity (постійна теплопровідність, яка не залежить від температури) та **Thermal Conductivity Depends on Temperature** (теплопровідність, що має залежність від температури).

У властивості матеріалів враховується кондуктивний механізм передачі тепла (теплопровідність), але не враховуються механізми передачі тепла шляхом конвекції (тепловіддачі) та випромінювання. Останні два механізми передачі тепла можна встановити для граничних умов.

Якщо теплопровідність не залежить або слабо залежить від температури, вибирається режим Constant Thermal Conductivity (Постійна теплопровідність). Для цього режиму, в рамці Thermal Conductivity (Теплопровідність) є можливість визначити різну теплопровідність матеріалу K_x (на осі X) і K_y (на осі Y). Якщо теплопровідність має значну залежність від температури, обирається режим Thermal Conductivity Depends on Temperature (Теплопровідність залежить від температури). І тут можна визначити залежність теплопровідності від температури як таблиці.

- **Volumetric Heat Capacity** - Об'ємна теплоємність. Необхідно ввести величину теплоємності матеріалу. Якщо потрібно визначити сталий режим, то теплоємність дорівнює нулю.
- **Volume Heat Generation** - Об'ємне тепловиділення.

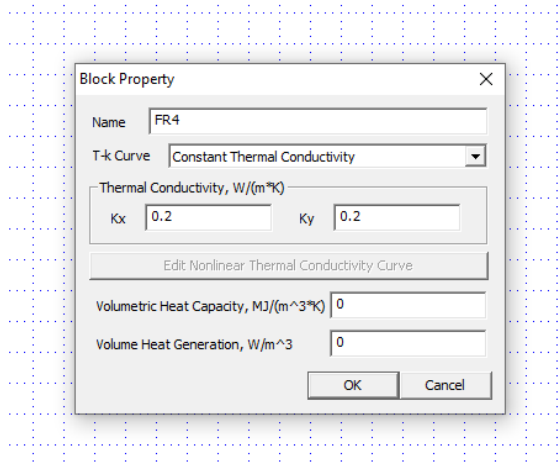


Рисунок 4.4 – Визначення властивостей матеріалу каркасу

Визначимо властивості повітря для кондуктивного механізму передачі тепла. На відміну від твердих тіл, у газах та рідинах існує не тільки кондуктивний, а й конвективний механізм передачі тепла. Проте існують умови, коли конвективна теплопередача вимикається. Це може статися, якщо нагріта поверхня розташована зверху. Або якщо конвективні потоки змушені протікати в дуже вузькому зазорі. У зазначених випадках залишається лише кондуктивний механізм передачі тепла. Вважатимемо, що в зазорі між сердечником і каркасом $z_n = 0.5$ мм, зважаючи на його незначну величину, конвективний механізм передачі тепла практично відсутній. Це припущення дозволить задати властивості повітря так само як для твердого тіла.

На рисунку 4.5 зображені властивості мітки блоку Air.

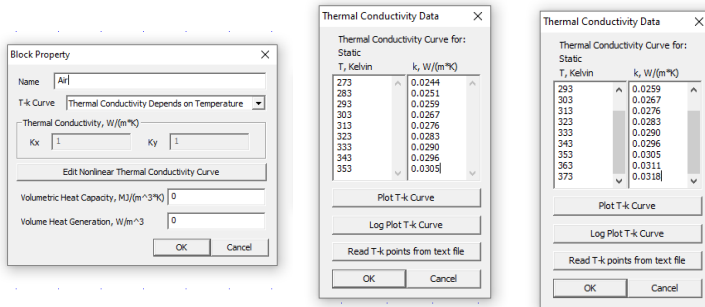


Рисунок 4.5 – Введення властивості блока Air

Визначимо властивості блока Air-1 для конвективного механізму передачі тепла. Згідно даних табл.4.1, між обмоткою трансформатора і осердям є значний зазор. Завдяки цьому зазору утворюється обмежений простір шириною $z_b = 6.7$ мм, висотою $h = 80$ мм і глибиною $b = 32$ мм. У цьому просторі поряд з кондуктивним відбувається конвективний теплообмін. Температура зовнішньої поверхні обмотки $t_1 \approx 90$ °С, а внутрішньої поверхні сердечника $t_2 \approx 70$ °С. Ці температури орієнтовно визначені при конструктивному розрахунку трансформатора і в процесі моделювання вимагають уточнення. Якщо спробувати задати конвективний теплообмін за допомогою граничних умов, доведеться додатково вказати температуру самого повітря в зазорі. Необхідність вказівки додаткового параметра ускладнить моделювання. Щоб уникнути цієї проблеми, поставимо конвективно кондуктивний теплообмін за допомогою еквівалентної теплопровідності. Для початку розрахуємо усереднений розмір:

$$l = \sqrt{h \cdot b}, \quad (4.1)$$

$$l = \sqrt{80 \cdot 32} = 50.6 \text{ (мм)}$$

Коефіцієнт тепловіддачі розраховується за такою формулою:

$$\alpha = N \left[6.25 - 5.25 \left(1 + \frac{z_b}{l} \right)^{-1.67} \right] \times A^4 \sqrt{\frac{t_1 - t_2}{z_b}} \quad (4.2)$$

$$\alpha = 1 \cdot \left[6.25 - 5.25 \left(1 + \frac{0.0067}{0.0506} \right)^{-1.67} \right] \times 0.57^4 \sqrt{\frac{90 - 70}{0.0067}}$$

$$\alpha = 8.017 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Еквівалентну теплопровідність обмеженого простору можна розрахувати за такою формулою:

$$K = \alpha \cdot z_B, \quad (4.3)$$

$$K = 8.017 \cdot 0.0067 = 0.056 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$$

На рисунку 4.6 показані дані властивостей блоку Air-1.

На рисунку 4.7 показано заповнення блоку для електротехнічної сталі 3414. Припустимо, що максимальна індукція в сталі буде 1.5 Тл, тоді відповідно до довідникових даних питомі втрати будуть складати $P_{1.5/50} = 1.1 \text{ Вт/кг}$. Щільність сталі складає $\rho_s = 7650 \text{ кг/м}^3$. Відповідно об'ємне тепловиділення в сердечнику трансформатора складе

$$P_v = P_{1.5/50} \cdot \rho_s, \quad (4.4)$$

$$P_v = 1.1 \cdot 7650 = 8415 \text{ Вт/м}^3$$

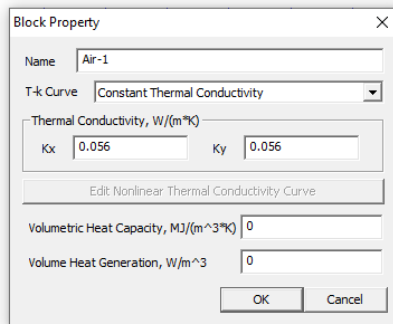


Рисунок 4.6 – Властивості блоку Air-1

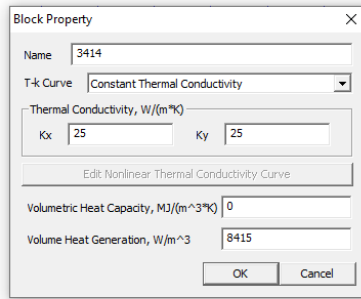


Рисунок 4.7 – Введення властивостей блоку для сталі 3414

Визначимо властивості блоку для обмотки – Winding. Коефіцієнт теплопровідності для просочених обмоток знаходиться в діапазоні від 1 до 2 Вт/(м·К). Оберемо для параметра Thermal Conductivity середнє теплопровідності — 1.5 Вт/(м·К). Як і сердечник, обмотка трансформатора є джерелом тепла. Об'ємне тепловиділення в обмотці можна розрахувати за такою формулою:

$$P_v = K_w \cdot \rho_c \cdot J^2 \cdot 10^{12}, \quad (4.5)$$

де K_w – Коефіцієнт заповнення обмотки проводом ($K_w=0.353$);
 ρ_c – питомий опір мідного дроту для температури 90°C ($\rho_c=0.02243$ мкОм·м);
 J – щільність струму в дроті обмотки (2.5 А/мм²).

$$P_v = 0.353 \cdot 0.02243 \cdot 10^{-6} \cdot 2.5^2 \cdot 10^{12} = 49486 \text{ Вт/м}^3.$$

На рисунку 4.8 показані параметри блоку Winding.

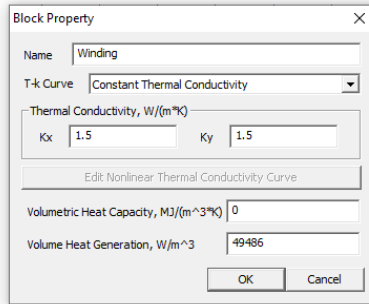


Рисунок 4.8 – Властивості блока обмотки

Далі необхідно привласнити мітки блоків до геометричної моделі згідно рисунку 4.9.

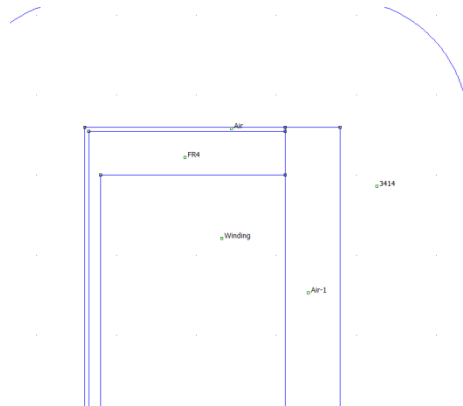


Рисунок 4.9 – Мітки блоків для моделі трансформатора

4.2.4.2 Визначення граничних умов

Тепло, що генерується всередині трансформатора, досягає його граничних (зовнішніх) поверхонь та розсіюється в навколишньому просторі за рахунок конвекції або випромінювання. Щоб моделювати цей процес, потрібно визначити граничні умови для всіх зовнішніх поверхонь. Для цього активуємо пункт меню **Properties** → **Boundary**

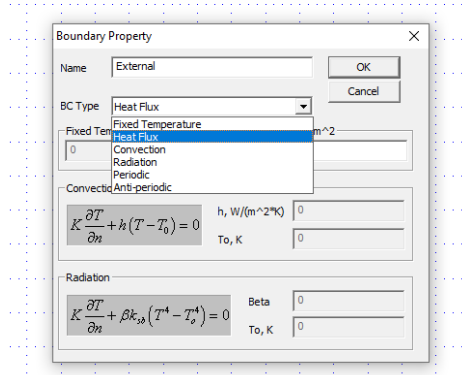


Рисунок 4.10 – Задання властивостей границь

У рядку Name (Ім'я) вводиться найменування граничної умови. У рядку BC Type вводиться тип граничної умови. Можливі такі типи граничних умов:

У рядку Name (Ім'я) вводиться найменування граничної умови. У рядку BC Type вводиться тип граничної умови. Можливі такі типи граничних умов:

- Fixed Temperature (Фіксована температура) – вздовж кордону встановлюється задане значення температури;
- Heat Flux (Тепловий потік) – задається тепловий потік через кордон;
- Convection (Конвекція) – задається конвективний теплообмін через кордон;
- Radiation (Випромінювання) — задається теплообмін за рахунок випромінювання;
- Periodic (Періодична) – це гранична умова, що з'єднує два кордони разом. Т. е., граничні значення у відповідних точках двох кордонів встановлюються рівними один одному;
- Antiperiodic (Антиперіодична) – це гранична умова також з'єднує два кордони разом. Однак, граничні значення у відповідних точках двох кордонів встановлюються рівними один одному за модулем, але протилежними за знаком.

Якщо гранична умова не визначена явно, то за умовчанням встановлюється ізолювана умова (відсутність теплового потоку через границю).

Межова умова відповідного випадку природної конвективної тепловіддачі зовнішніх поверхонь трансформатора наведена на рисунку 4.11.

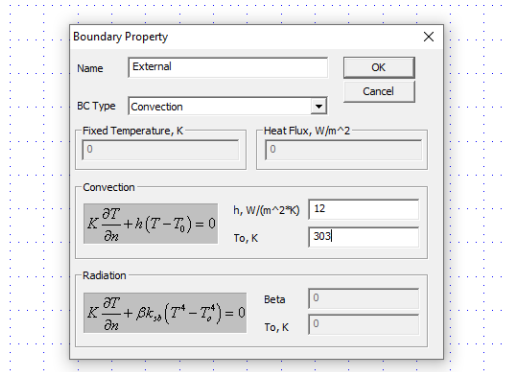





Рисунок 4.11 – Граничні умови для зовнішньої границі

Привласнюємо граничні умови для зовнішніх відрізків та дуг.

4.2.5 Аналіз та розв’язання задачі

Побудуємо кінцево-елементну сітку за допомогою кнопки . На екрані виникне інформативне вікно, на якому буде зображена загальна кількість побудованих вершин кінцево-елементної сітки.

Прибрати сітку можна натиснувши Mesh→Show Mesh.

Для запуску розв’язання натискаємо на кнопку  на горизонтальній панелі інструментів. Після закінчення розрахунку та для перегляду результатів натискаємо кнопку  на горизонтальній панелі інструментів.

У вікні FEMM Output відображаються координати курсору, а також вказана температура в цих координатах (рис.4.13), $T = 355.21$ K. У цьому випадку курсор наведений на найбільш нагріту ділянку обмотки. Щоб дізнатися температуру в будь-якому іншому місці моделі, достатньо навести на це місце курсор і натиснути лівою кнопкою мишки. Результат вимірів з’явиться у вікні FEMM Output.

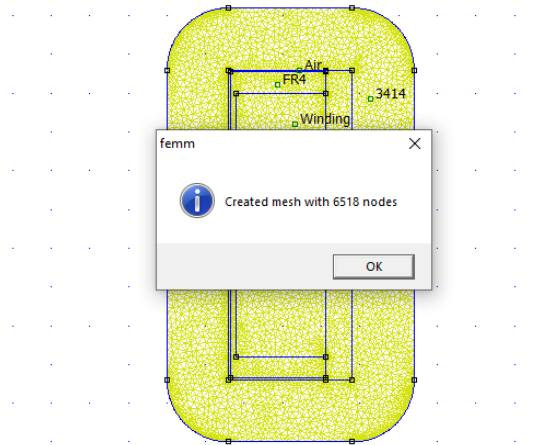




Рисунок 4.12 – Сітка кінцевих елементів

Зведемо температури елементів досліджуваного трансформатора у таблицю 4.2. Для визначення середньої температури обмотки використаємо визначення за блоком, натискаємо кнопку  та виділяємо обмотку, після чого натискаємо , **Average Temp over volume**.

Таблиця 4.2 – Результати моделювання

Блок моделі	Температура, К	Температура, °C
Середня температура обмотки	352.582	79.582
Сердечник всередині обмотки	333.8	60.8
Зовнішня сторона сердечника	331.8	58.8

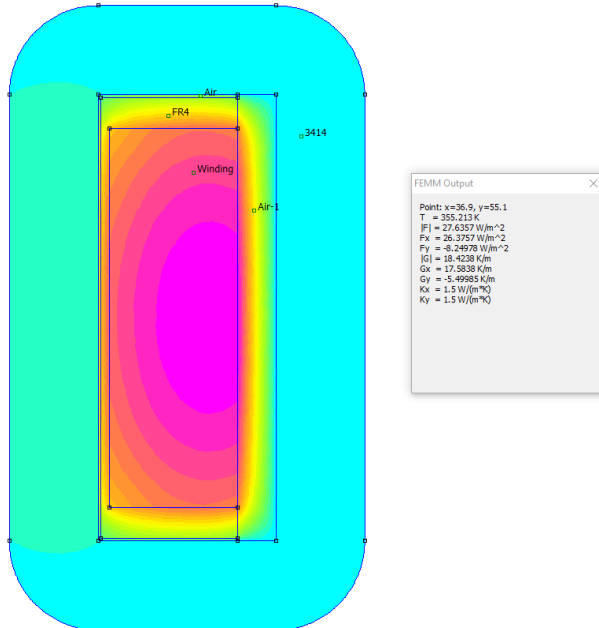


Рисунок 4.13 – Результати розрахунку теплового поля

4.3 Звіт має містити:

- Тему, мету, основні етапи виконання роботи, графіки, картини поля.
- Розрахунки.
- Висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 ЗАДАЧА РОЗТІКАННЯ СТРУМУ У FEMM

Мета роботи: побудувати геометричну модель, розв'язати задачу, визначити параметри провідника при протіканні по ньому змінного струму промислової частоти.

5.1 Загальні відомості

Задача розтікання струму по своїй суті є квазіелектростатичною задачею, у якій складовими магнітного поля у рівняннях Максвела можна знехтувати, але в яких значення значення струму зміщення (які не враховувались у задачах магнітостатики та вихрових струмів) є доречними. Електричні та магнітостатичні поля мають підкорятися умовам, які описують рівняння Максвела:

$$\nabla \times H = J + \dot{D}, \quad (5.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0, \quad (5.2)$$

$$\nabla \times E = -\dot{B}, \quad (5.3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho, \quad (5.4)$$

де

$$J = E\sigma, \quad (5.5)$$

$$D = \varepsilon E. \quad (5.6)$$

Розбіжність (5.1) може прийматися такою, що дає

$$\nabla \cdot (\nabla \times H) = \nabla \cdot J + \nabla \cdot \dot{D}. \quad (5.7)$$

Застосовуючи стандартну векторну тотожність ліва частина рівняння (5.7) дорівнює нулю. Також припускаємо що зв'язок електричного потенціалу з напруженістю поля виражається наступним чином

$$E = -\nabla V, \quad (5.8)$$

$$-\nabla \cdot ((\sigma + j\omega\varepsilon)\nabla V) = 0. \quad (5.9)$$

Спростивши вираз та прийнявши, що властивості матеріалу кусково безперервні маємо

$$-(\sigma + j\omega\varepsilon)\nabla^2 V = 0. \quad (5.10)$$

FEMM вирішує рівняння (5.10) для аналізу поточних задач розтікання потоку, а також для розв'язання задач протікання постійного струму. При нульовій частоті рівняння буде мати вигляд

$$-\sigma\nabla^2 V = 0. \quad (5.11)$$

5.2 Порядок виконання роботи

5.2.1 Попередня підготовка

У лабораторній роботі необхідно визначити параметри тонкого мідного провідника, що має розміри 40×10 мм (рис. 5.1) при протіканні по ньому струму $I=100$ А промислової частоти $f=50$ Гц.

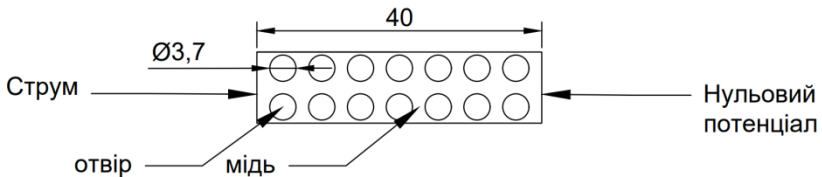



Рисунок 5.1 – Об’єкт випробування

5.2.2 Формулювання задачі (Problem definition)

Запустити програму FEMM. У вікні femm клацнути кнопку з піктограмою у вигляді чистого аркуша паперу із загнутих правим верхнім кутом . Виникне діалог **Create a new problem** (Створення нового завдання), у полі якого необхідно обрати **Current Flow Problem** (Задача розтікання струму).

Натисніть **Problem** (Завдання) головного меню. Відкриється діалог **Problem Definition** (рис. 5.2), в якому необхідно заповнити поля **Problem Type** (Тип завдання), **Length Units** (Одиниці виміру), **Frequency** (частота), **Depth** (Товщина), **Solver Precision** (точність ітераційного розв’язання), **Min Angle** (мінімальний кут елементарної трикутної області), **Smart Mesh**. Згідно до умов задачі обираємо: плоска задача (**Panar**), одиниці виміру обираємо міліметри (**mm**), **Frequency** – 0, **Depth** – 1 мм, (інші дані залишаємо за замовчуванням).

Після створення задачі необхідно зберегти її під назвою:

Л.Р.5_Прізвище_група. Наприклад: Л.Р.5_Іваненко_Е-222.

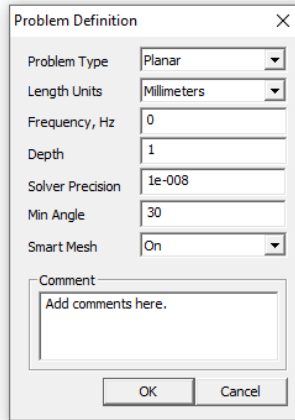


Рисунок 5.2 – Завдання властивостей задачі

5.2.3. Побудова контурів моделі

Для побудови геометрії моделі можна використати інтерфейс програми FEMM, а можна завантажити модель, побудовану у іншому програмному засобі. Для цього після побудови моделі згідно розмірів зберігаємо креслення у форматі .dxf. У ПЗ FEMM натискаємо File→Import DXF та обираємо файл з кресленням.


Або будуємо геометрію моделі у ПЗ FEMM. Для побудови опорних точок має бути втоплена кнопка на горизонтальній панелі інструментів. Після чого вводимо координати опорних точок. Натискаємо кнопку **Tab** на клавіатурі, з'явиться вікно **Enter point**, у яке необхідно вводити координати опорних точок досліджуваної моделі (табл. 5.1). Після введення точки натискаємо кнопку ОК та на екрані має з'явитися точка. Якщо точку не видно, необхідно за допомогою кнопок збільшення, зменшення, стрілок верх, вниз, вправо, вліво розмістити досліджувану область так, щоб її було видно повністю.


Якщо введена невірна точка та її необхідно видалити, натискаємо на точку правою кнопкою миші, точка стає червоного кольору та натискаємо кнопку **Delete** з клавіатури. Після побудови геометрії моделі необхідно призначити умовні границі, які будуть

обмежувати розрахункову область. Прийнемо, що наша область обмежена квадратом зі стороною 300 мм.

Таблиця 5.1 – Координати опорних точок

x	0	0	40	40	3.8	3.8	3.8	3.8
y	0	10	10	0	0.9	4.6	5.4	9.1
x	9.2	9.2	9.2	9.2	14.6	14.6	14.6	14.6
y	0.9	4.6	5.4	9.1	0.9	4.6	5.4	9.1
x	20	20	20	20	25.4	25.4	25.4	25.4
y	0.9	4.6	5.4	9.1	0.9	4.6	5.4	9.1
x	30.8	30.8	30.8	30.8	36.2	36.2	36.2	36.2
y	0.9	4.6	5.4	9.1	0.9	4.6	5.4	9.1

Після того як всі опорні точки побудовані переходимо до побудови прямих. Для цього активуємо режим роботи з прямими натисканням кнопки . При втопленій кнопці роботи з прямими з'єднуємо відповідні точки натисканням лівою кнопкою миші.

Для побудови дуг активуємо режим побудови дуги кола натисканням кнопки  на горизонтальній панелі інструментів. При затопленій кнопці побудови дуг натискаємо на точки лівою кнопкою миші, побудова дуги відбувається проти годинникової стрілки, тому якщо натиснути ці кнопки у зворотньому напрямку вигин дуги буде у іншу сторону. Після натискання точок з'явиться вікно Arc segment properties, у якому встановлюємо **Arc angle** (кут дуги) рівним 180, інші значення залишаємо за замовчуванням.

Результати побудови геометрії моделі наведені на рисунку 5.3.

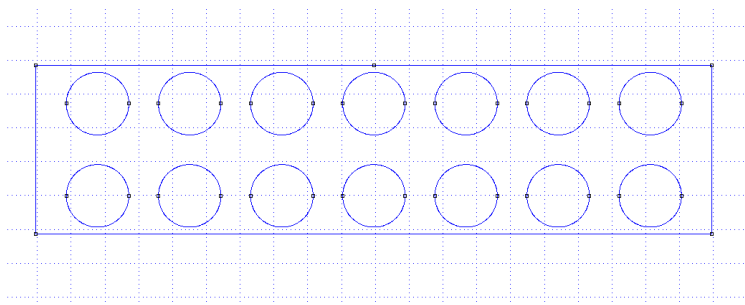


Рисунок 5.3 – Геометрична модель

5.2.4 Введення властивостей

Для розв'язання задачі розтікання струму необхідно визначити властивості задачі такі як: матеріали, провідники, граничні умови.

5.2.4.1 Визначення властивостей матеріалів

Властивості мідного провідника задамо з бібліотеки матеріалів. Натискаємо Properties → Materials Library. Лівою кнопкою миші перетаскуємо матеріал під назвою Copper у праву частину вікна (рис. 5.4).

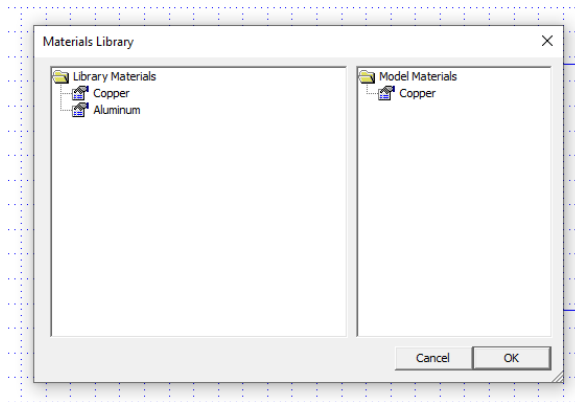


Рисунок 5.4 – Бібліотека матеріалів

Для введення властивостей матеріалів натискаємо Properties → Materials → Add Property. Отримаємо вікно Block Property для введення властивостей блока, у якому задаються:

- **Name** - ім'я, яке необхідно привласнити до границі.
- **Electrical Conductivity** – електропровідність.
- **Relative Electrical Permittivity** - відносна електрична проникність.
- **Loss Tangent of Electrical Permittivity** - тангенс втрат електричної проникності.

На рисунку 5.4 зображені властивості мітки блоку Air.

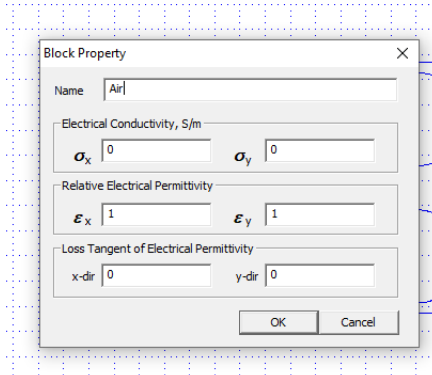



Рисунок 5.4 – Визначення властивостей матеріалу повітря (Air)

Далі необхідно привласнити мітки блоків до геометричної моделі згідно рисунку 5.5. Для того, щоб привласнити властивості матеріалів відповідним блокам натискаємо кнопку  на горизонтальній панелі інструментів. Натискаємо всередину блоку, з'являється точка з надписом <None>, натискаємо на цю точку правою кнопкою миші, її колір стає червоним. Натискаємо пробіл. На екрані з'являється вікно **Properties for selected block**. У цьому вікні для стрижня задаємо: Block type – Cooper, інші параметри залишаємо незмінними. Таким само чином привласнюємо властивості Air для середовища повітря.

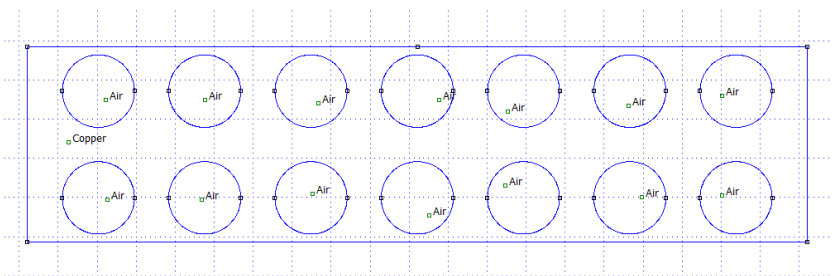


Рисунок 5.5 – Мітки блоків

5.2.4.2 Визначення граничних умов

Граничні умови у задачі розтікання струмів можна задати двома способами: за допомогою властивостей границь (**Properties** → **Boundary**), або за допомогою провідників (**Properties** → **Conductor**).

Натискаємо **Properties** → **Boundary**.

У рядку Name (Ім'я) вводиться найменування граничної умови. У рядку BC Type вводиться тип граничної умови. Можливі такі типи граничних умов:

- Fixed Voltage (Фіксована напруга) – вздовж кордону встановлюється задане значення потенціалу;
- Mixed (змішана) - ;
- Surface Current Density (Поверхнева щільність струму) – задається значення поверхневої щільності струму;
- Periodic (Періодична) – це гранична умова, що з'єднує два кордони разом. Т. е., граничні значення у відповідних точках двох кордонів встановлюються рівними один одному;
- Antiperiodic (Антиперіодична) – це гранична умова також з'єднує два кордони разом. Однак, граничні значення у відповідних точках двох кордонів встановлюються рівними один одному за модулем, але протилежними за знаком.

Натискаємо **Properties** → **Conductor**. Після чого задаємо умови провідників, що наведені на рисунку 5.6 та 5.7.

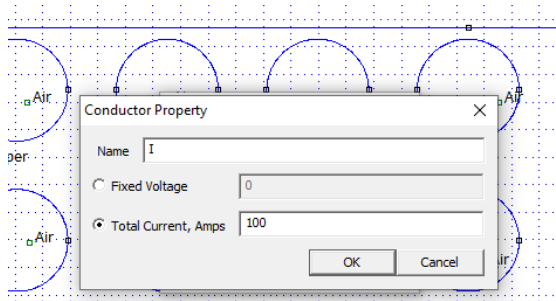


Рисунок 5.6 – Задання властивостей провідника I

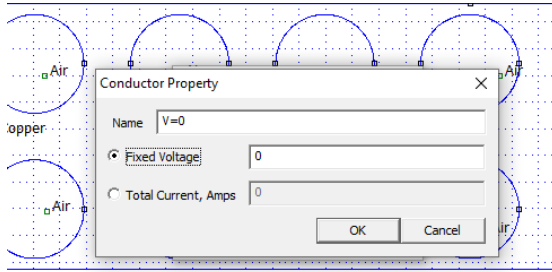



Рисунок 5.6 – Задання властивостей провідника з нульовим потенціалом

Привласнюємо граничні умови для зовнішніх відрізків.

5.2.5 Аналіз та розв’язання задачі

Побудуємо кінцево-елементну сітку за допомогою кнопки . На екрані виникне інформативне вікно, на якому буде зображена загальна кількість побудованих вершин кінцево-елементної сітки.

Прибрати сітку можна натиснувши Mesh→Show Mesh.

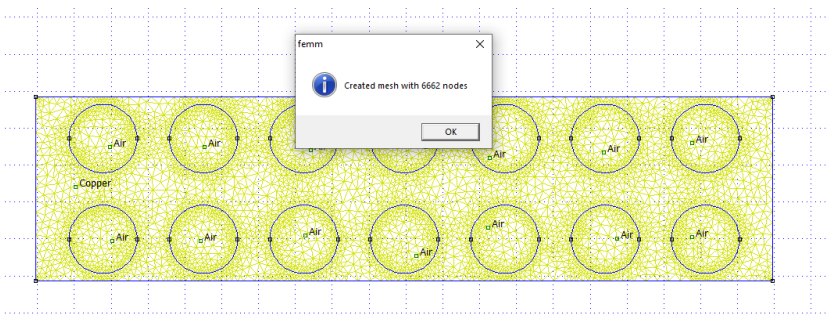




Рисунок 5.7 – Сітка кінцевих елементів

Для запуску розв’язання натискаємо на кнопку  на горизонтальній панелі інструментів. Після закінчення розрахунку та для просмотра результатів натискаємо кнопку  на горизонтальній панелі інструментів.

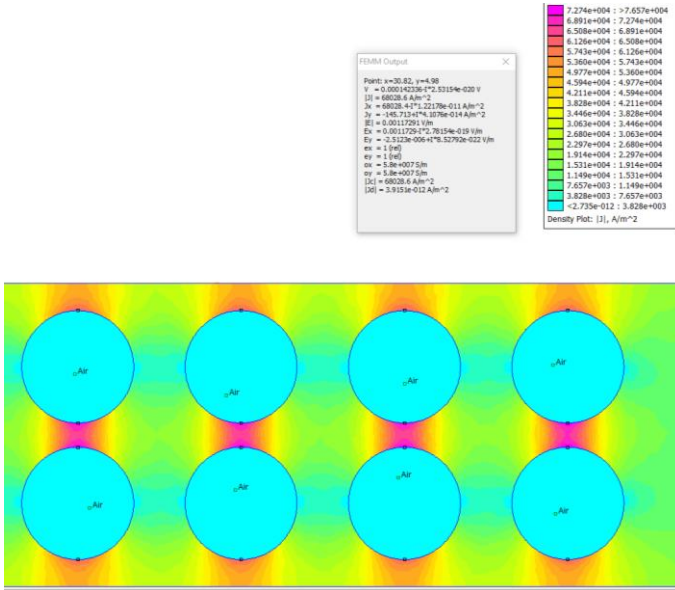



Рисунок 5.8 – Розподіл щільності струму у досліджуваній моделі

У вікні FEMM Output відображаються координати курсору, а також вказані параметри об'єкту в цих координатах (рис.5.8). Щоб дізнатися параметри в будь-якому іншому місці моделі, достатньо навести на це місце курсор і натиснути лівою кнопкою мишки. Результат вимірів з'явиться у вікні FEMM Output.

Натискаємо на кнопку  на горизонтальній панелі інструментів, з'явиться інформаційне вікно **Conductor Properties**, у якому можемо подивитись дані за вибраним провідником (рис. 5.9).

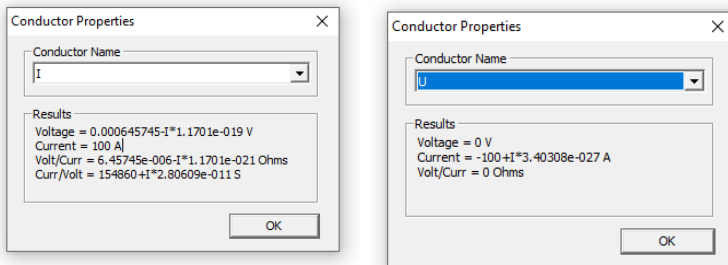



Рисунок 5.9 – Параметри провідників

Використаємо визначення за блоком, натискаємо кнопку  та виділяємо мідний провідник, після чого натискаємо \int , **Real power** (рис. 5.10).

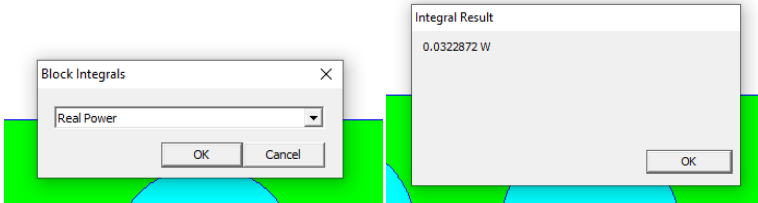


Рисунок 5.10 – Значення потужності в провіднику

Також є можливість визначити такі дані як (рис. 5.11):

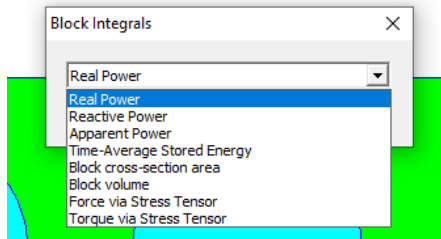


Рисунок 5.11 – Визначення блоку інтегралів для задачі розтікання струмів

5.3 Звіт має містити:

- Тему, мету, основні етапи виконання роботи, графіки, картини поля.
- Висновки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Електромагнітні поля, параметри та процеси в електротехнічних пристроях : підручник / В. І. Міліх. Харків : ФОП Панов А. М., 2020. 396 с
2. Расчет электромагнитных и тепловых полей с помощью программы FEMM: Учебно - методическое пособ. / Е.И.Байда. Х. : 2015. – 147 с.
3. Пакети прикладних програм для моделювання електромагнітних полів електричних машин «Використання комп'ютерних систем математичних розрахунків MATLAB та FEMM для аналізу електричних машин» [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньою програмою «Електричні машини і апарати» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Ю.М. Васьковський, Ю.А. Гайденко, С.С. Цивінський. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,45 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022 - 106 с.