

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 1

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 1 / Укл. Д.С. Яримбаш, С.О. Лапкіна. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023. – 62 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

Вступ.....	4
Лабораторна робота №1 Аналіз безвихрового плоскопаралельного поля за допомогою FEMM і розрахунок магнітної провідності.....	5
1.1 Загальні відомості.....	5
1.2 Порядок виконання роботи.....	6
1.3 Варіанти індивідуальних завдань.....	28
1.4 Контрольні питання.....	29
Лабораторна робота №2 Дослідження і розрахунок броньового електромагніта постійного струму за допомогою FEMM.....	30
2.1 Загальні відомості.....	30
2.2 Попередня підготовка.....	31
2.3 Побудова контурів моделі.....	34
2.4 Введення властивостей блоків і ланцюгових властивостей обмотки.....	37
2.5 Ідентифікація властивостей блоків.....	40
2.6 Введення граничних умов.....	43
2.7 Ідентифікація граничних умов.....	44
2.8 Побудова кінцево-елементної сітки і картин поля.....	45
2.9 Побудова кривої зміни індукції по ширині робочого зазору.....	48
2.10 Розрахунок основних параметрів.....	49
2.11 Варіанти індивідуальних завдань.....	57
2.12 Контрольні питання.....	61
Перелік джерел посилань.....	62
Частина 2	

ВСТУП

Серед скінчено-елементних програм розрахунку магнітних систем (МС) обрана програма FEMM. Під магнітною системою розуміють сукупність провідників зі струмом і/або постійних магнітів і елементів із магнітних матеріалів, призначену для створення заданого магнітного поля.

Програма **Finite Element Method Magnetics** (Магнітні розрахунки методом кінцевих елементів) (далі FEMM, або femm) дозволяє на персональному комп'ютері створити модель для розрахунку плоскопаралельного або плоскомеридіанного (осесиметричного) стаціонарного та квазістаціонарного магнітного і стаціонарного електростатичного полів, побудувати їх картини і визначити польові і ланцюгові параметри.

Завдання розрахунку магнітних полів можуть бути як лінійні, так і нелінійні; електростатичних полів - лише лінійні. Можливості розрахунку магнітних і електростатичних полів об'єднані в одній програмі починаючи з версії 4.0. До цього окремо існувала програма FEMM для розрахунку магнітних полів і програма BELA для розрахунку електростатичних. Далі будемо розглядати тільки магнітні розрахунки за допомогою програми FEMM 4.0.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

АНАЛІЗ БЕЗВИХРОВОГО ПЛОСКОПАРАЛЕЛЬНОГО ПОЛЯ ЗА ДОПОМОГОЮ FEMM І РОЗРАХУНОК МАГНІТНОЇ ПРОВІДНОСТІ

Мета роботи: побудувати модель плоскопараллельного поля між полюсом і площиною за допомогою програмного забезпечення FEMM, зробити розрахунок сумарної питомої провідності.

1.1 Загальні відомості

Робота з FEMM по створенню нової моделі починається шляхом запуску препроцесора, в якому вводяться геометричні розміри моделі і привласнюються властивості її окремим частинам - блокам. Препроцесор дозволяє зберегти модель під потрібним ім'ям в потрібній папці. Повне ім'я файлу може містити російські слова (в іменах папок і в корені імені файлу). Файлу з параметрами моделі автоматично присвоюється розширення. Файл з розширенням fem - найважливіший файл пакета програм FEMM. Дані моделі треба записати в цей файл під потрібним ім'ям хоча б один раз до переходу до вирішувача.

Таблиця 1.1 - Скорочення, прийняті в програмі FEMM

Скорочення	Розшифровка	Переклад
1	2	3
ABC	Asymptotic Boundary Conditions	Асимптотичні граничні умови
AutoCAD	Automatic Computer Aided Design	Автоматичне комп'ютерне проектування (комп'ютерна програма)
BC	Boundary Conditions	Граничні умови
BCG	BiConjugate Gradient	Подвійний пов'язаний градієнт (метод розрахунку)

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
BEM	Boundary Element Method	Метод граничних елементів
CAD	Computer Aided Design	Комп'ютерне проектування
CG	Conjugate Gradient	Сполучений градієнт (метод розрахунку)
DXF	Drawing Exchange Format	Формат обміну малюнками
FEMM, femm	Final Element Method Magnetics	Магнітні розрахунки методом кінцевих елементів (назва керівництва і всієї програми Д. Мікера)
PCG	Preconditioned Conjugate Gradient	Визначених сполучених градієнтів (метод розрахунку)
QMR	Quasi-Minimum Residual (approach)	Квазімінімальне залишкове (наближення)
SDI	Strategic Dual Image	Стратегія двох зображень
SSOR	Simmetric Successive Over-Relaxation	Симетричний послідовний зі свержзагасанням (метод розрахунку)

1.2 Порядок виконання роботи

1.2.1 Попередня підготовка

Перш ніж будувати модель в програмі FEMM, краще спочатку створити її на папері. Зобразимо модель в масштабі на міліметрівці із зазначенням координат її опорних точок. На рис. 1.1 останні позначені латинськими літерами, а їх координати показані в круглих дужках. Вони відповідають розмірам моделі в міліметрах.

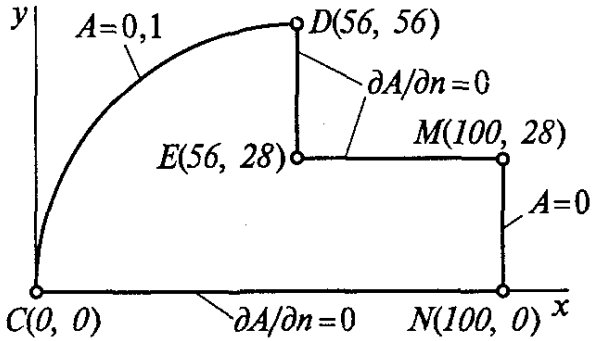


Рисунок 1.1 - Модель плоскопараллельного поля між полюсом і площиною, побудована на міліметрівці (сітка міліметрівки не показана)

Далі необхідно створити папку, наприклад, з ім'ям Безвіхреве_поле (всередині папки, в якій розміщуються робочі файли).

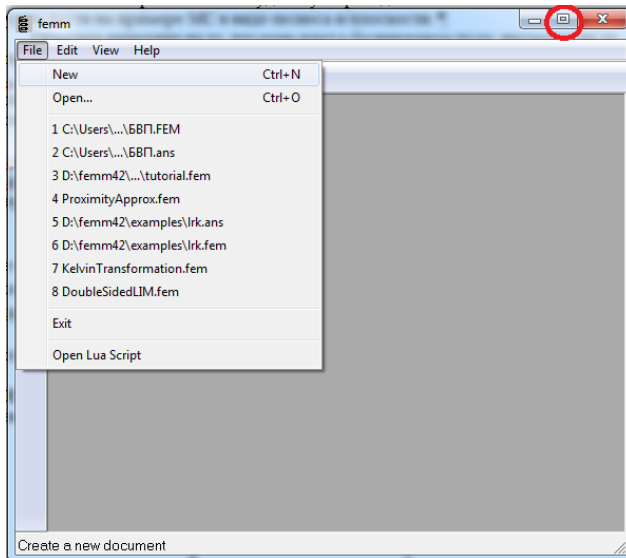


Рисунок 1.2 - Запуск програми FEMM

Запустити програму FEMM через Пуск → Програми → femm 4.2 → FEMM 4.2. (Рис.1.2)

Зробити так, щоб це вікно займало весь екран, наприклад клацанням кнопки другої праворуч у верхньому рядку цього вікна.

У вікні femm натиснути кнопку з піктограмою у вигляді чистого аркуша паперу з загнутим правим верхнім кутом. Виникне діалог **Create a new problem** (Створення нового завдання), в поле якого стоїть **Magnetic Problem** (Магнітні задачі). Натиснути **OK**.

Початок осей координат x і y плоскостеріального поля щодо моделі може перебувати в будь-якому місці; плоскомеріаданна модель повинна розташовуватися в області позитивних значень r (r - відстань точки плоскомеріаданної моделі від осі обертання), її вертикальна вісь симетрії позначається z .

Через **File** → **Save** привласнити майбутньому файлу даних моделі ім'я БВП_приклад (Рис. 1.3), записавши його в папку Безвихрове_поле (розширення fem можна не вводити).

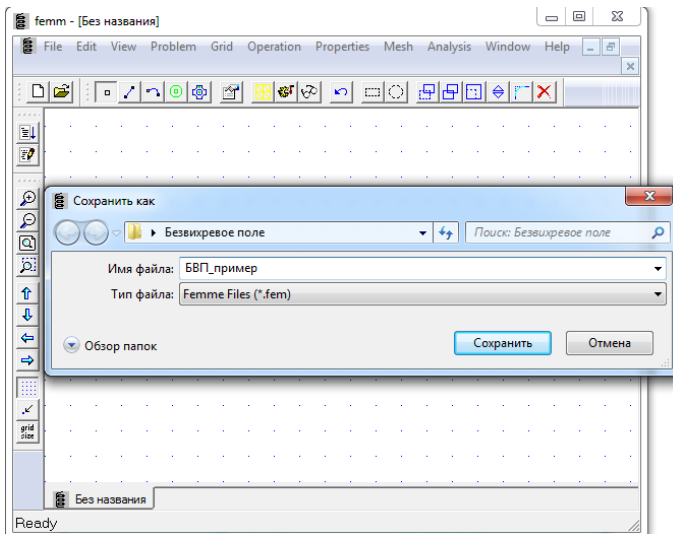


Рисунок 1.3 - Запис файлу БВП_приклад в програмі FEMM

Натиснути **Problem** Головного меню. Відкриється діалог **Problem Definition** (див. Рис. 1.4), в якому в полі **Frequency (Hz)** треба залишити 0 (нуль), в поле **Problem Type - Planar**, в поле **Length**

Units треба поставити **millimeters** (мм). В поле **Solver Precision** (Точність вирішувача) залишити стандартне значення, а в поле **Depth** (Глибина) встановити 1000. При цьому значенні глибини (1000 мм) магнітний потік буде визначатися на 1 м товщини системи, що спростить далі розрахунок питомої провідності в системі СІ. Натиснути **ОК** (Рис. 1.4).

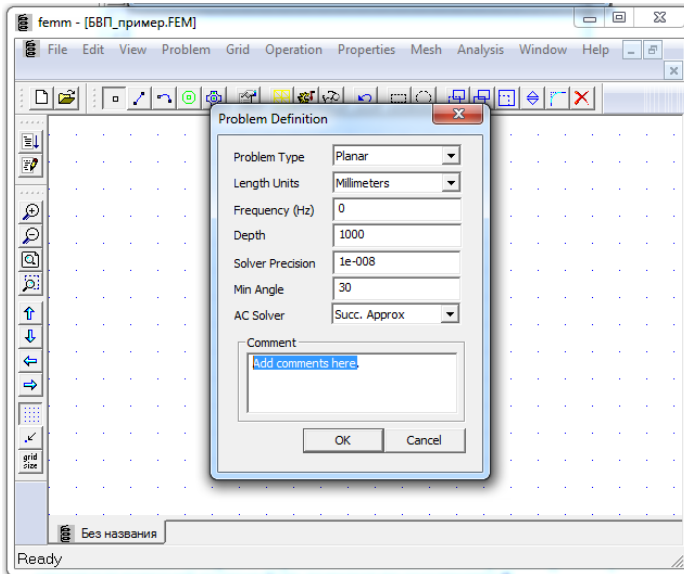


Рисунок 1.4 - Діалог Problem Definition

1.2.2 Побудова контурів моделі

Натиснути кнопку **Snap to Grid** (на ній зображена стрілка, що впирається в точку; див. Рис. 1.1, 2-а кнопка знизу в стовпці кнопок інструментів).

Натиснути кнопку з написом **grid size**. У діалозі **Grid Properties**, який після цього виникне на екрані, в поле **Grid size** ввести цифру 1, а в поле **Coordinates - Cartesian**. Натиснути на **ОК**.

За допомогою чотирьох кнопок, на яких зображені жирні блакитні стрілки вгору, вниз, ліворуч, праворуч, і кнопок «+» (плюс), «-» (мінус) домогтися того, щоб початок координат (точка 0,0) був в районі лівого нижнього кута вікна побудови моделі (стандартно, при

створенні нової моделі в порожньому вікні воно повинно знаходитися в цьому кутку), а по висоті і ширині модель вміщувалася б в цьому вікні повністю. Положення курсору миші, покажчик якої має вигляд жирної білої стрілки, облямованої тонкою чорною лінією, у введеної системі координат відбивається в лівому куті рядка стану ($x = 3.8600$, $y = 0.3100$ в нижньому рядку вікна **femm**).

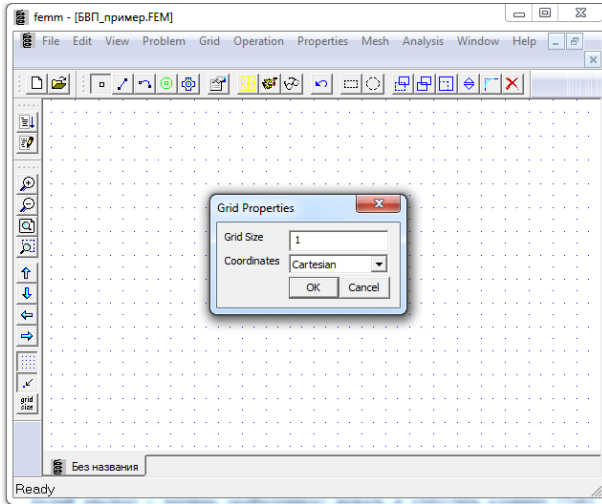


Рисунок 1.5 - Діалог Grid Properties

Натиснути, якщо вона не втоплена, кнопку, в центрі якої зображено маленький білий квадрат з чорною облямівкою. Цей режим (режим роботи з опорними точками) повинен бути включений стандартно.

Натиснути точки з координатами $(0, 0)$; $(56, 56)$; $(56, 28)$; $(100, 28)$; $(100, 0)$ в будь-якій послідовності. У місці клацання виникає білий квадратик з чорною облямівкою.

В якості альтернативи замість п.п. 1-4 можна використовувати введення координат кожної опорної точки з клавіатури. Для цього в режимі точки (натиснути, якщо вона не втоплена, кнопку, в центрі якої зображено маленький білий квадрат з чорною облямівкою) натиснути і відпустити клавішу [Tab]. Виникне діалог **Enter Point**, в якому треба заповнити поля **x-coord** і **y-coord** для першої (будь-якої) точки і натиснути **OK** (Рис. 1.6).

У вікні побудови **femm** в точці з введеними координатами виникне маленький квадрат з чорною облямівкою. Операцію повторити для всіх п'яти опорних точок моделі в будь-якій послідовності.

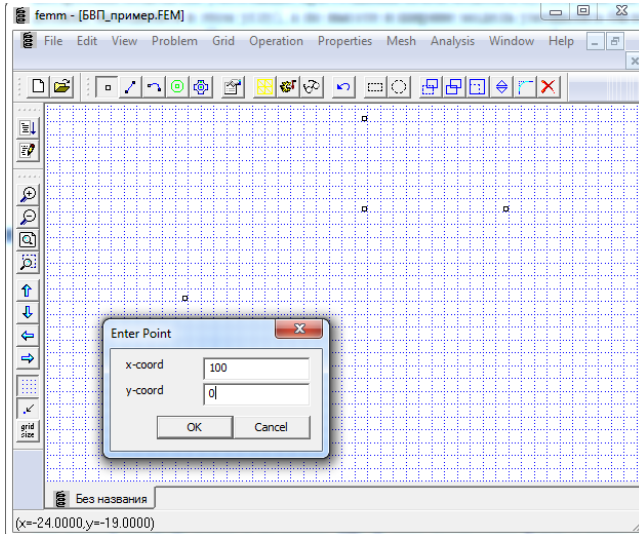


Рисунок 1.6 - Діалог Enter Point

Натиснути кнопку роботи з прямими (на ній зображена пряма між двома квадратами на кінцях).

Натиснути точку D (з координатами 56, 56 см. Рис. 1.7); колір облямівки її квадрата з чорного зміниться на червоний.

Натиснути точку E (56, 28) - між точками D і E виникне синя пряма, а колір облямівки квадрата точки D повернеться до чорного (Рис. 1.7).

Аналогічно побудувати прямі, що з'єднують точки E і M, M і N, N і C.

Натиснути кнопку, на якій зображена дуга окружності з квадратами на кінцях.

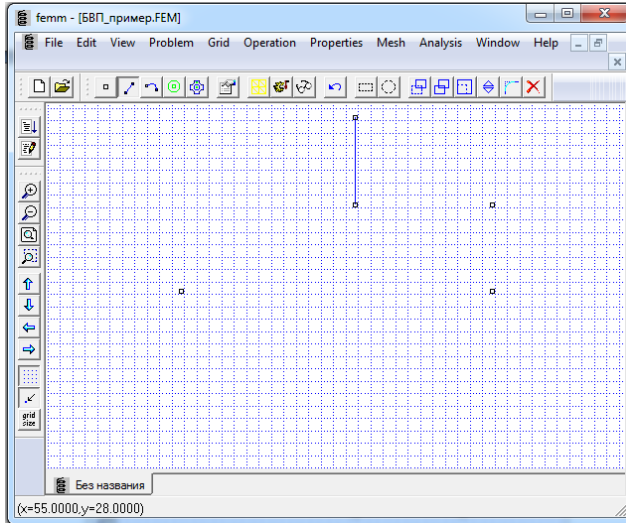


Рисунок 1.7 - Виконання п.6 розділу 1.2.2

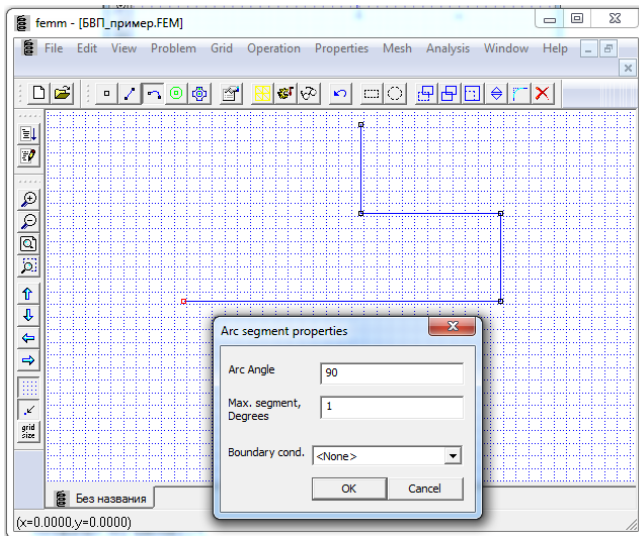


Рисунок 1.8 - Виконання п.9 розділу 1.2.2

Натиснути точку D (56, 56) - облямівка її квадратики змінить колір на червоний, натиснути точку C (0, 0) - облямівка її квадратики

теж змінить колір на червоний, а на екрані виникне діалог **Arc segment properties**. Залишити значення 90 в поле **Arc Angle**, 10 в **Max. Segment, Degrees** і **<None>** в **Boundary cond.** (Рис. 2.7), які з'являються там стандартно без змін; натиснути **ОК**. На екрані виникне дуга *CD*.

Створена модель показана на рис. 1.9.

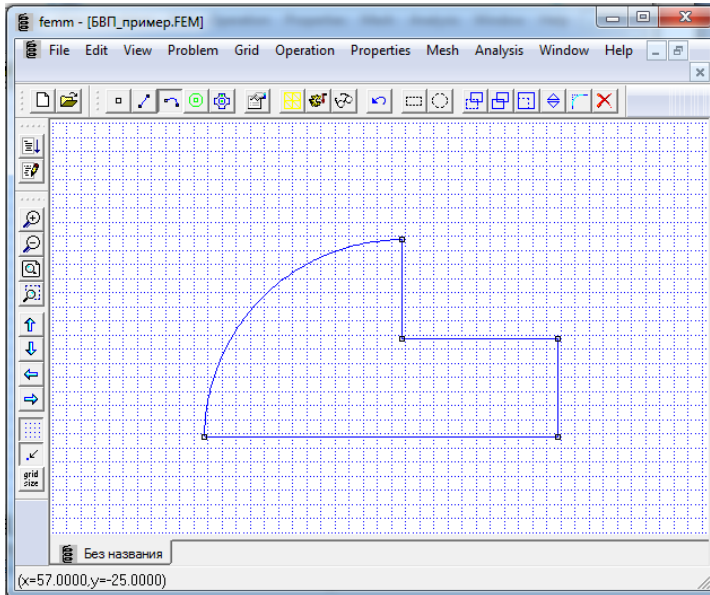


Рисунок 1.9 - Модель плоскопаралельного поля між полюсом і площиною, побудована в програмі FEMM.

Оскільки далі сітка прив'язки не буде потрібна, відключити її зображення на екрані натисканням кнопки з піктограмою у вигляді 16-ти точок (треба «віджати» цю кнопку).

1.2.3 Введення властивостей блоку

МС, що аналізується, містить тільки один блок з повітря. По ламаній DEM (див. Рис. 1.1) і прямій CN вона стикається з матеріалом, що має нескінченно велику магнітну проникність, а по прямій MN і дузі CD - з продовженням повітряного простору. Введення параметрів

уздовж границі MNCDEM, що враховує вплив простору, що оточує ділянку поля, яку ми розглядаємо, буде описане пізніше.

Натиснути рядок **Material Library** пункту **Properties** Головного меню - виникне однойменний діалог.

Наблизити стрілку покажчика миші до напису **Air** або значку зліва від неї, натиснути ліву кнопку миші і, не відпускаючи її, перетягнути напис із позначкою в праву половину діалогу, відпустити кнопку (насправді перетягується копія властивості, напис **Air** в лівій частині діалогу **Material Library** і самі властивості, що відповідають цій написи, в бібліотеці залишаються). До написи **Model Materials** приєднається матеріал під назвою **Air** з властивостями повітря (Рис. 1.10).

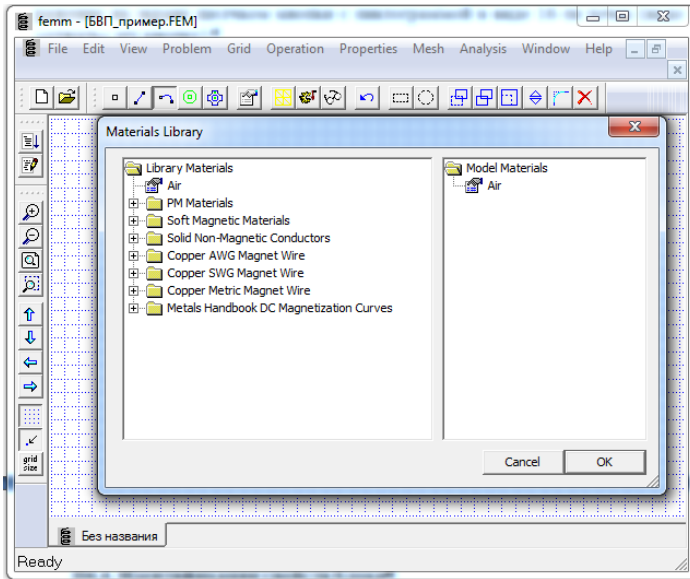


Рисунок 1.10 - Виконання п.2 розділу 1.2.3

1.2.4 Ідентифікація властивостей блоку

Натиснути кнопку **Operate on block labels** (Робота з мітками блоків) - на горизонтальній панелі інструментів вікна **femm** вона має вигляд зеленого квадратика в колі.

Натиснути будь-яку точку всередині контуру моделі - в місці натискання виникне білий квадратик із зеленим оздобленням і напис **<None>** (Без імені).

Натиснути правою кнопкою миші цей квадратик - облямівка змінить свій колір на червоний.

Натиснути і відпустити клавішу пробілу - на екрані виникне вікно діалогу **Properties for selected block** (див. рис. 1.11). В полі **Block type** цього діалогу треба встановити **Air** (шляхом прокрутки списку), якщо стоїть інше ім'я, а в поле **Mesh size length** ввести з клавіатури довжину, наприклад, 7 боку кінцевого елемента сітки, яку будуватиме програма. При такому значенні **Mesh size** на довжині зазору 28 мм має укладатися чотири кінцевих елемента. Натиснути **OK** (Рис. 1.11 а). Навколо квадрата з зеленим оздобленням виникне коло зеленого кольору, а замість **<None>** - напис **Air**. Діаметр цього кола приблизно дорівнює середній довжині сторони трикутних в ФЕММ кінцевих елементів сітки.

1.2.5 Введення граничних умов

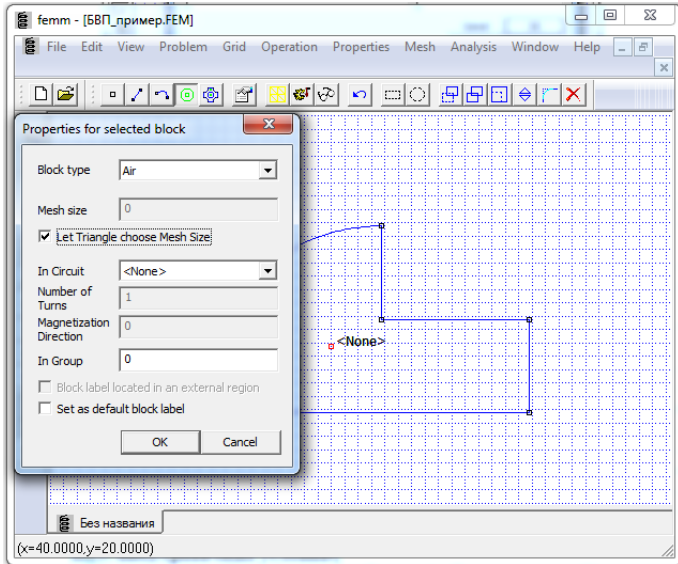
Натиснути рядок **Boundary** пункту **Properties** Головного меню. На екрані виникне діалог **Property Definition** (див. рис. 1.4). Натиснути кнопку **Add Property** цього діалогу.

У діалозі **Boundary Property**, що виник на екрані (див. рис.1.12) в поле **Name** ввести ім'я **A0.1**, в поле **BC Type - Prescribed A**, а в поле **A0** прямокутника **Prescribed A parameters** - 0.1. В інших полях залишити стандартно нулі. Натиснути **OK** (Рис. 1.12).

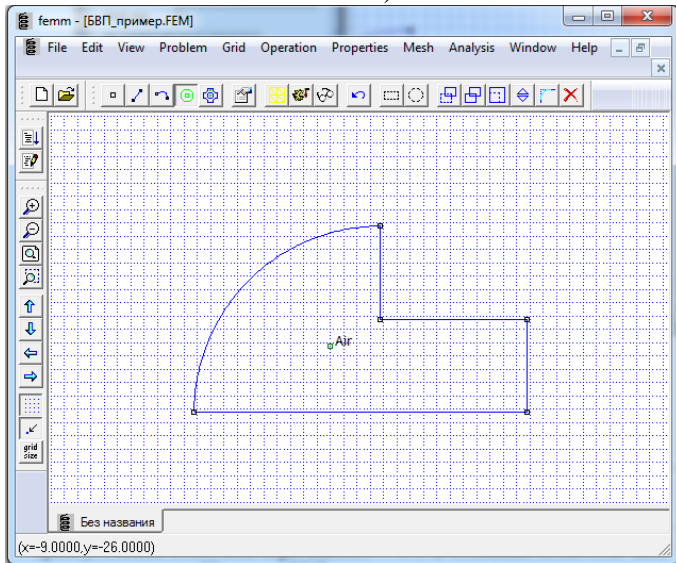
У діалозі **Property Definition** натиснути **Add Property**.

У відкритому після цього діалозі **Boundary Property** в полі **Name** ввести ім'я **A0**, в поле **BC Type - Prescribed A**. Простежити, щоб у всіх полях прямокутника **Prescribed A parameters** були нулі. Натиснути **OK**.

У діалозі **Property Definition** переконатися шляхом прокрутки списку поля **Property Name**, що введені імена **A0.1** і **A0** є в цьому списку. Натиснути **OK** (Рис. 1.13).



а)



б)

Рисунок 1.11 - Поетапне (а, б) виконання п.4 розділу 2.4

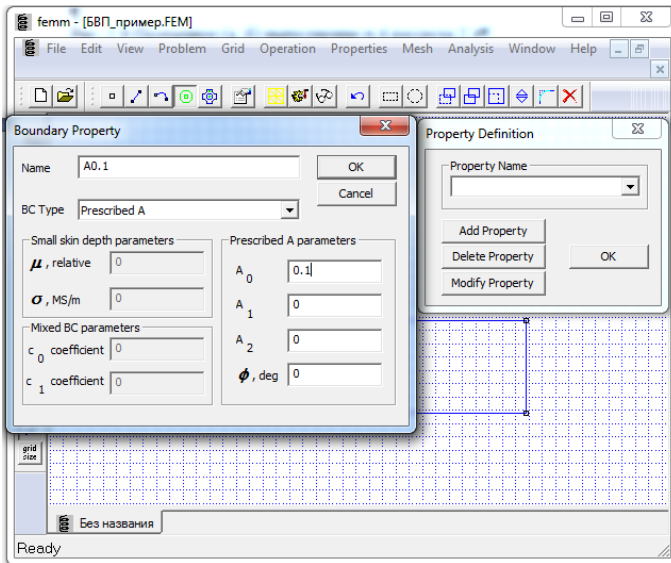


Рисунок 1.12 - Виконання п.2 розділу 1.2.5

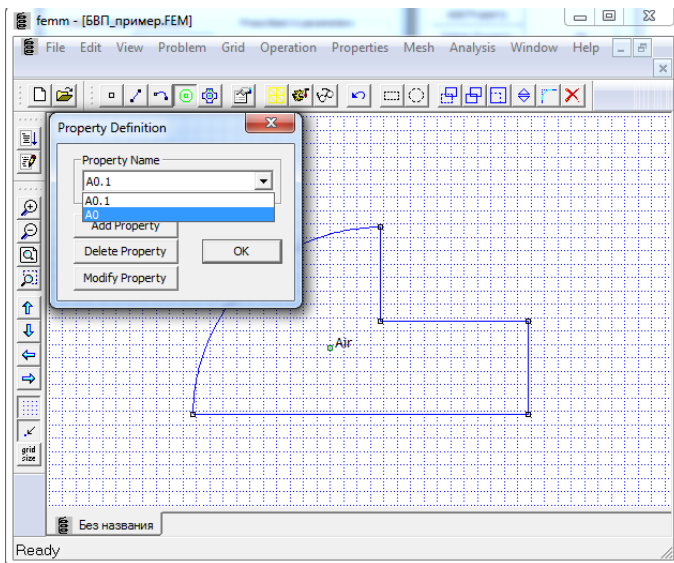


Рисунок 1.13 - Виконання п.5 розділу 1.2.5

1.2.6 Ідентифікація граничних умов

Натиснути кнопку побудови дуги кола (див. рис. 1.3, 5-а кнопка зліва в горизонтальному рядку інструментів).

Натиснути правою кнопкою миші дугу CD моделі. Вона стане червоною.

Натиснути і відпустити клавішу пробілу (або 8-у зліва кнопку горизонтального рядка інструментів рис. 1.3) - на екрані виникне діалог **Arc segment property**. В поле **Boundary cond** шляхом прокрутки списку введених граничних умов встановити **A0.1**. Натиснути **ОК**. Червона дуга CD стане синьою, і їй присвоїти значення модуля векторного потенціалу $A = 0,1$ (Рис. 1.14).

Натиснути кнопку **Operate on segments** (Робота з прямими) панелі інструментів.

Натиснути (правою кнопкою миші) відрізок *MN* (див. рис. 1.1) моделі. Він стане червоним.

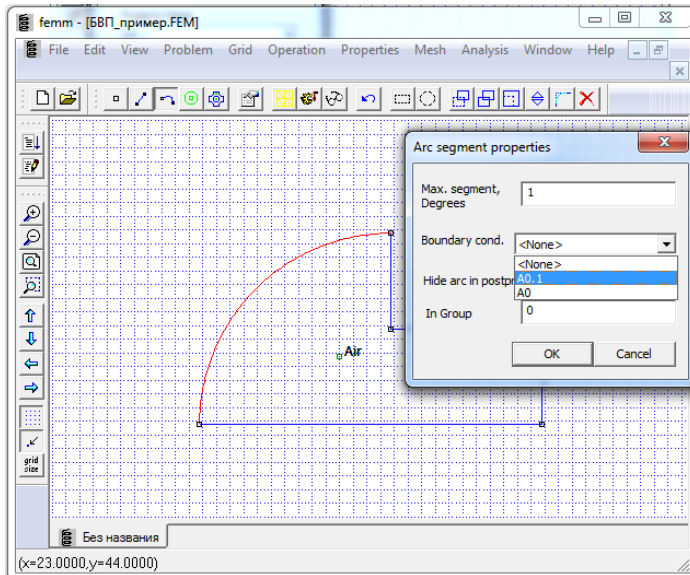


Рисунок 1.14 - Виконання п.3 розділу 1.2.6

Натиснути і відпустити клавішу пробілу - на екрані виникне діалог **Segment Property**. У його верхньому полі шляхом прокрутки списку імен ділянок границі встановити **AO**. Натиснути **ОК**. Червоний

відрізок MN стане синім і йому присвоїти значення модуля векторного потенціалу $A = 0$.

Оскільки до кордонів NC , DE , EM лінії магнітного потоку (тобто лінії однакових модулів векторного потенціалу) перпендикулярні, то на цих кордонах повинна виконуватися умова $\partial A / \partial n = 0$ (n - напрямком нормалі до границь). У програмі FEMM воно виконується автоматично на границях, умови на яких спеціально не оговорені. Таким чином, процес створення моделі можна вважати закінченим.

Записати створену модель під ім'ям, яке їй було присвоєно в підрозділі 1.2.1.

1.2.7 Побудова кінцево-елементної сітки і картин поля

Натиснути кнопку, на якій зображено зубчасте колесо з ручним приводом. На екрані з'явиться інформаційне вікно з даними про модель (наводиться кількість використаних кінцевих елементів, кількість вузлів сітки і ін.) З демонстрацією процесу на тимчасовій діаграмі. В панелі задач на час побудови сітки кінцевих елементів виникає прямокутник програми **triangle**, а на час розв'язання задачі розрахунку поля - прямокутник **fkern**, які після закінчення цих процесів автоматично видаляються. Сучасні комп'ютери розв'язують розглянуту задачу так швидко, що обіцяні вікна і прямокутники встигають тільки майнути на екрані.

Щоб побачити побудовану сітку кінцевих елементів, треба натиснути кнопку з зображенням квадрата, що складається з чотирьох квадратиків, кожен з яких діагонально розбитий на два трикутника (9-а зліва на горизонтальній рядку кнопок інструментів). На кольоровому екрані зображення на цій кнопці виконано жовтим кольором. Після натискання цієї кнопки на екрані виникає теж жовта сітка кінцевих елементів і вікно, в якому програма повідомляє користувачеві про те, скільки вузлів вона використовувала для її побудови (Рис. 1.15).

Щоб закрити це інформаційне вікно, натиснути його кнопку **ОК**. Сітка кінцевих елементів показана на рис. 1.15. Щоб прибрати з екрану сітку кінцевих елементів, треба натиснути рядок-перемикач **Show Mesh** пункту **Mesh** Головного меню вікна **femm** (зліва від цього рядка стоїть галочка, яку клацання рядка прибирає разом з сіткою).

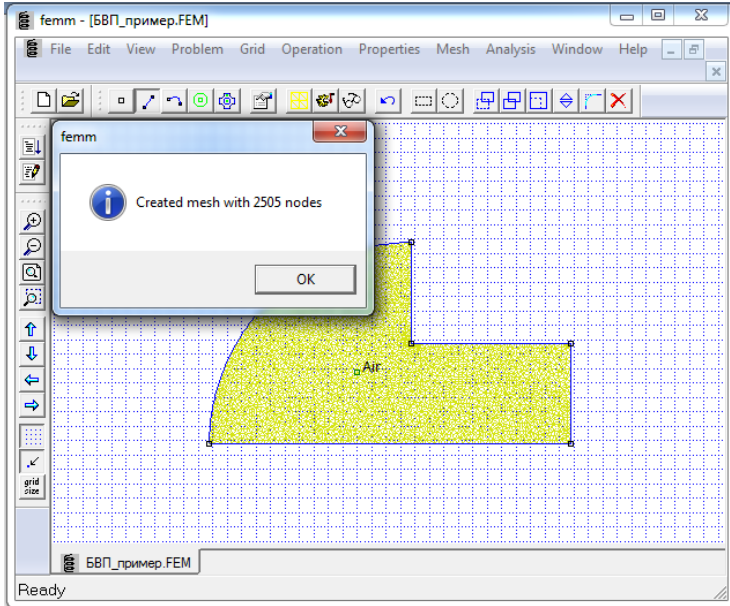


Рисунок 1.15 - Сітка і число вузлів кінцевих елементів в розрахунковій області.

Натиснути кнопку з піктограмою у вигляді окулярів. На екрані з'являється вікно програми **femm** при роботі її в постпроцесорі (див. Рис. 1.9) з картиною поля ліній магнітного потоку і вікно **FEMM Output** з числом використаних для аналізу вузлів, кінцевих елементів та іншою інформацією. У нашому випадку було використано всього 2505 вузлів і 4741 елемент (Рис. 1.16). Картина поля ліній потоку стандартно має 19 трубок. Для зручності подальшої роботи можна збільшити розміри вікна цієї програми до розмірів екрану.

Натиснути кольорову кнопку у вигляді прямокутника, розбитого косими лініями на чотири частини різного кольору (Рис. 1.11). На екрані виникне діалог **Dialog**, описаний в підрозділі 1.2.9. Щоб побачити зонну картину поля, натиснути перемикач зліва від напису **Show Density Plot** (стандартно він не включений), а потім кнопку **OK**: на екрані відкриється малюнок, на якому одночасно будуть показані картини поля, як ліній потоку, так і зонна (Рис. 1.17). Щоб прибрати лінії потоку, треба натиснути кнопку, керуючу їх зображенням (піктограма цієї кнопки має вигляд квадрата з шістьма чорними

смугами з нахилом 45°). Виникне діалог з такою ж назвою, як попередній (**Dialog**), але з дещо іншим вмістом (див. підрозд. 1.2.9). У ньому треба зняти галочку в перемикачі **Show flux lines** і натиснути **OK**.

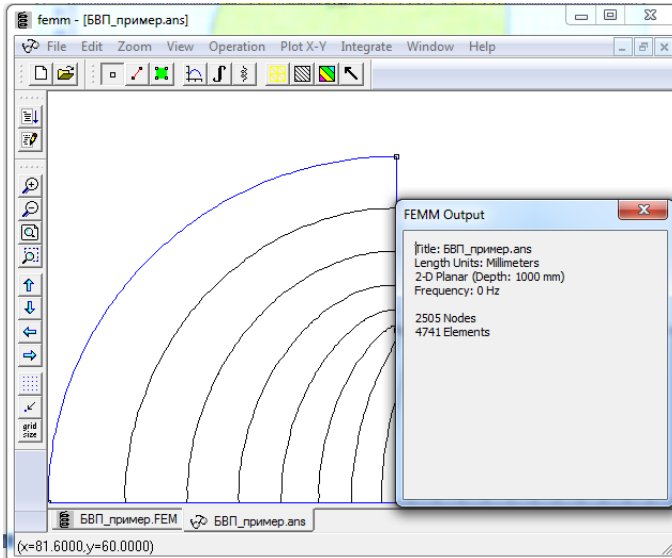


Рисунок 1.16 - Картина ліній потоку в розрахунковій області.

Якщо в діалозі **Dialog**, що керує побудовою зонного поля, натиснути перемикач **Grayscale** (Різна інтенсивність сірого кольору), то отримаємо поле, показане на рис. П4.6. У цьому полі чорнота зон збільшується зі зростанням магнітної індукції.

Натиснути кнопку з жирною чорною стрілкою (див. Рис. 1.3, найправіша кнопка горизонтального рядка інструментів). Виникне діалог **Vector Plot Options**, в поле **Vector Plot Type** якого встановити **V** і натиснути **OK**. У вікні **femm** буде побудовано поле векторів магнітної індукції, показане на рис. 1.18

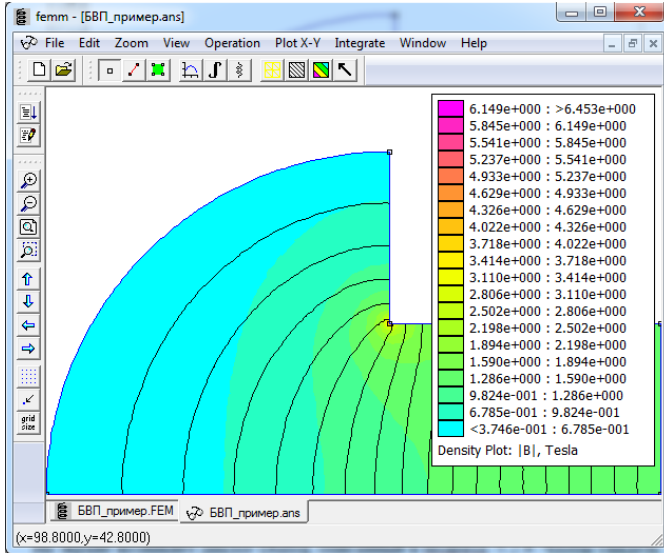


Рисунок 1.17 - Картина ліній потоку і зонна картина поля в FEMM 4.2

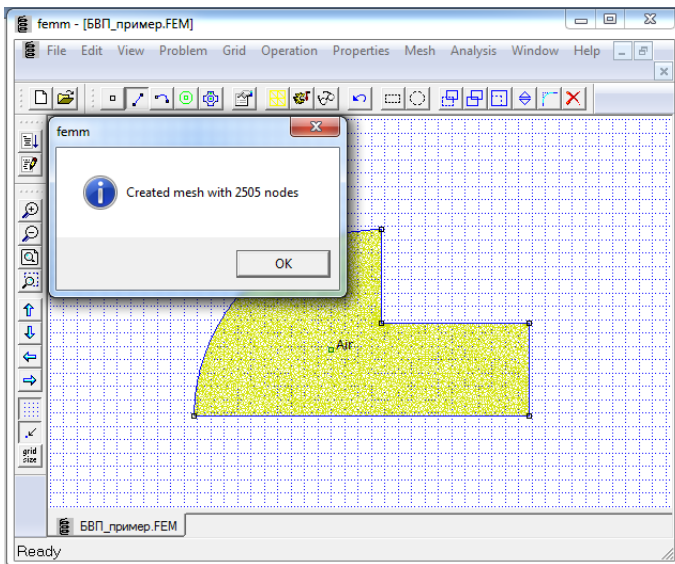


Рисунок 1.18 - Сітка і число вузлів кінцевих елементів в розрахунковій області.

Щоб закрити це інформаційне вікно, натиснути його кнопку **ОК**. Сітка кінцевих елементів показана на рис. 1.18. Щоб прибрати з екрану сітку кінцевих елементів, треба натиснути рядок-перемикач **Show Mesh** пункту **Mesh** Головного меню вікна **femmm** (зліва від цього рядка стоїть галочка, яку клацання рядка прибирає разом з сіткою).

Натиснути кнопку з піктограмою у вигляді окулярів. На екрані з'являється вікно програми **femmm** при роботі її в постпроцесорі (див. Рис. 1.11) з картиною поля ліній магнітного потоку і вікно **FEMM Output** з числом використаних для аналізу вузлів, кінцевих елементів та іншою інформацією. У нашому випадку було використано всього 2505 вузлів і 4741 елемент (Рис. 1.19). Картина поля ліній потоку стандартно має 19 трубок. Для зручності подальшої роботи можна збільшити розміри вікна цієї програми до розмірів екрану.

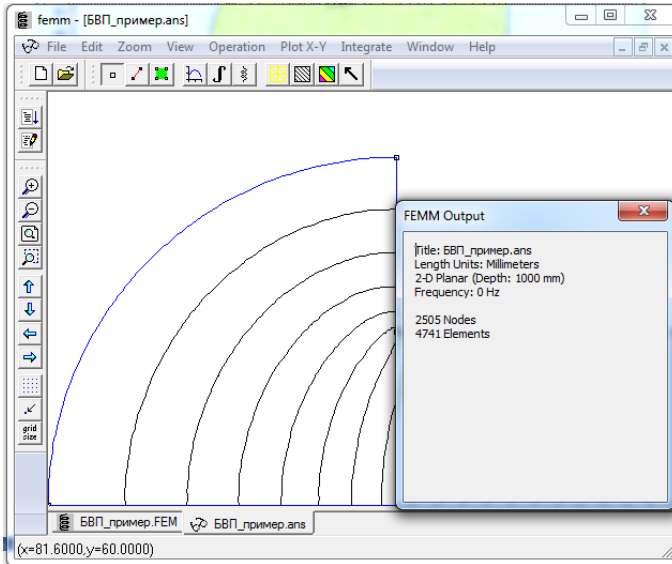


Рисунок 1.19 - Картина ліній потоку в розрахунковій області.

Натиснути кольорову кнопку у вигляді прямокутника, розбитого косими лініями на чотири частини різного кольору (Рис. 1.11). На екрані виникне діалог **Dialog**, описаний в підрозділі 1.2.9. Щоб побачити зонну картину поля, натиснути перемикач зліва від напису **Flux Density Plot** (стандартно він не включений), а потім кнопку **ОК**:

на екрані відкриється малюнок, на якому одночасно будуть показані картини поля, як ліній потоку, так і зонна (Рис. 1.17). Щоб прибрати лінії потоку, треба натиснути кнопку, керуючу їх зображенням (піктограма цієї кнопки має вигляд квадрата з шістьма чорними смугами з нахилом 45 °). Виникне діалог з такою ж назвою, як попередній (**Dialog**), але з дещо іншим вмістом (див. підрозд. 1.2.9). У ньому треба зняти галочку в перемикачі **Show flux lines** і натиснути **ОК**.

Якщо в діалозі **Dialog**, що керує побудовою зонного поля, натиснути перемикач **Grayscale** (Різна інтенсивність сірого кольору), то отримаємо поле, показане на рис. П4.6. У цьому полі чорнота зон збільшується зі зростанням магнітної індукції.

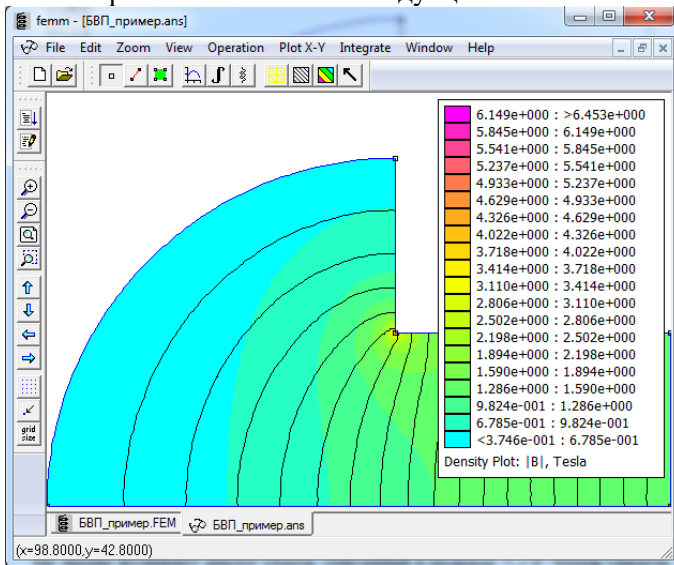


Рисунок 1.20 - Картина ліній потоку і зонна картина поля в FEMM 4.2

Натиснути кнопку з жирною чорною стрілкою (див. Рис. 1.1, найправіша кнопка горизонтального рядка інструментів). Виникне діалог **Vector Plot Options**, в поле **Vector Plot Type** якого встановити **V** і натиснути **ОК**. У вікні **femm** буде побудовано поле векторів магнітної індукції, показане на рис. 1.21

1.2.8 Побудова кривої зміни магнітної індукції

Натиснути кнопку побудова відрізків панелі інструментів пост-процесорного вікна **femm** (на ній зображена червона пряма з двома квадратами з чорною окантовкою на кінцях).

Натиснути точку *C* (див. рис. 1.1) моделі або поруч з нею - всередині її квадратика виникне ледве помітний червоний хрестик, потім точку *N*- пряма *CN* стане червоною.

Натиснути 6-у зліва кнопку горизонтальної панелі інструментів (див. Рис. 1.9, на цій кнопці зображено графік). На екрані виникне діалог **X-Y Plot of Field Values**, у верхньому полі якого стандартное напис $|B|$ (Magnitnde of flux density). Натиснути **OK**. На екрані з'являється вікно програми **femplot**.

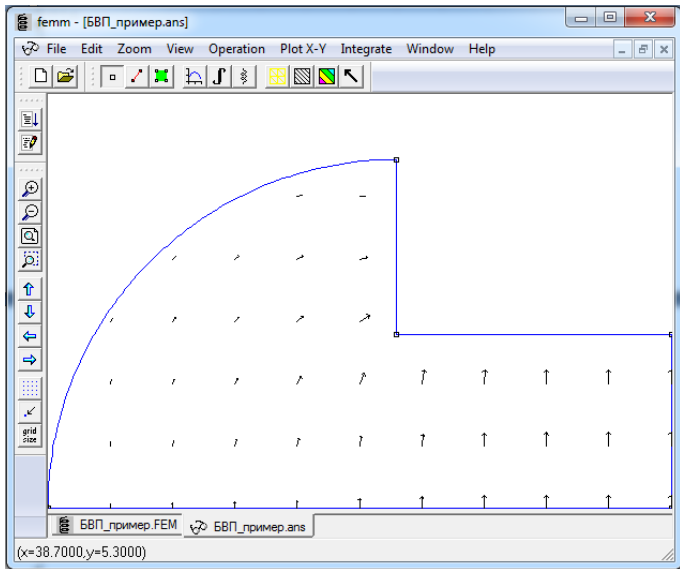


Рисунок 1.21 - Картина поля векторів магнітної індукції в FEMM 4.2

Крива зміни модуля індукції на горизонтальній осі *CN* симетрії системи є одночасно і кривою зміни вертикальної складової B_y індукції, так як в точках *CN* горизонтальна складова $B_x = 0$. Крива, зображена на рис. 1.22, побудована для абсолютних значень індукції, відповідних повному потоку моделі, який в свою чергу відповідає

введеній різниці модулів векторних потенціалів ліній CD ($A = 0,1$) і MN ($A = 0$). Оскільки для цієї моделі дійсний потік не відомий, криву на рис. 1.22 можна розглядати як криву відносної зміни індукції по ширині зазору.

Криву на рис. 1.22 можна записати в файл через меню **File** → **Save** і вивести на принтер через меню **File** → **Print ...** програми **femplot**. Закрити вікно цієї програми, наприклад, натиснувши кнопку зі знаком множення в її правому верхньому куті.

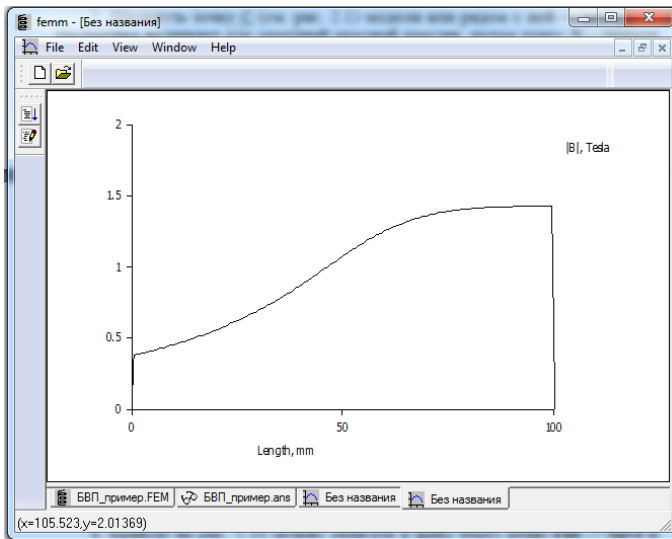


Рисунок 1.22 - Розподіл модуля магнітної індукції вздовж лінії CN в FEMM 4.2

1.2.9 Розрахунок сумарної питомої провідності

Натиснути кнопку панелі інструментів постпроцесорного вікна **femm** (див. Рис. 1.9), на якій зображений інтеграл. На екрані виникне діалог **Line Integrals**.

Натиснути кнопку із зображенням трикутника праворуч від єдиного поля цього діалогу, а в випадаючому списку - рядок **В.п**, потім - **ОК** цього діалогу (якщо в поле розглянутого діалогу стоїть **В.п**, то треба відразу натиснути **ОК**). На екрані виникне вікно, зображене на рис. 1.23, яке дає значення повного магнітного потоку Φ : (Normal flux = 0.1 Webers) в Вб на 1 м товщини

плоскопаралельного поля. Нагадаємо, що глибину (товщину) розглянутого поля в 1 м ми ввели в п. 5 підрозд. 1.2.1, коли в діалозі **Problem Definition** (див. Рис. 1.2) встановили 1000 в його поле **Depth**. Записати значення потоку Φ_1 і натиснути **OK** вікна на рис. 1.23.

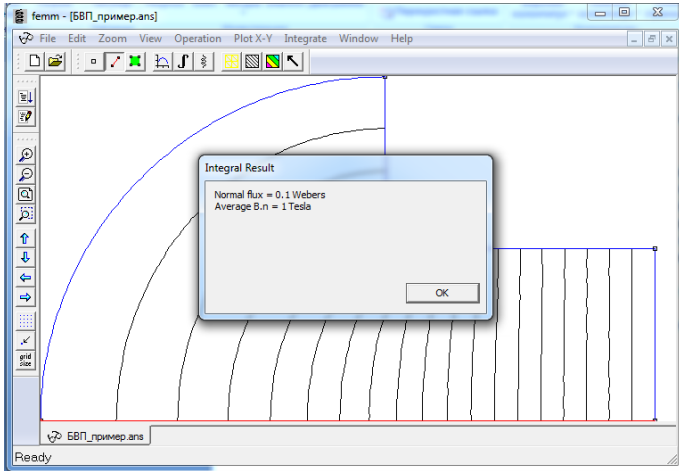


Рисунок 1.23 - Розрахунок значення магнітного потоку по площадці шириною CN в FEMM 4.2

Натиснути і відпустити клавішу [Esc] - колір лінії CN стане синім (з неї знімається виділення).

Натиснути точку N (див. Рис. П4.1) моделі, а потім точку M - виділиться (стане червоною) лінія NM .

Натиснути кнопку із зображенням інтеграла.

У списку вікна **Line Integrals** вибрати рядок **H.t**. На екрані з'явиться інформаційне вікно (рис. 1.24), в якому програма FEMM дає значення магнітної напруги $U_{M\delta}$ на довжині робочого зазору (MMF drop along contour = 31942.6 Amp-turns) в амперах при заданій нами різниці модуля векторного магнітного потенціалу в $0,1 \text{ Вб} / \text{м}$.

Шукану сумарну питому провідність можна обчислити за формулою

$$\lambda_1 = \Phi_1 / (U_{M\delta} \mu_0 b) = 2,459.$$

У цю формулу товщину b шару плоскопаралельного поля треба підставляти в метрах ($b = 1 \text{ м}$).

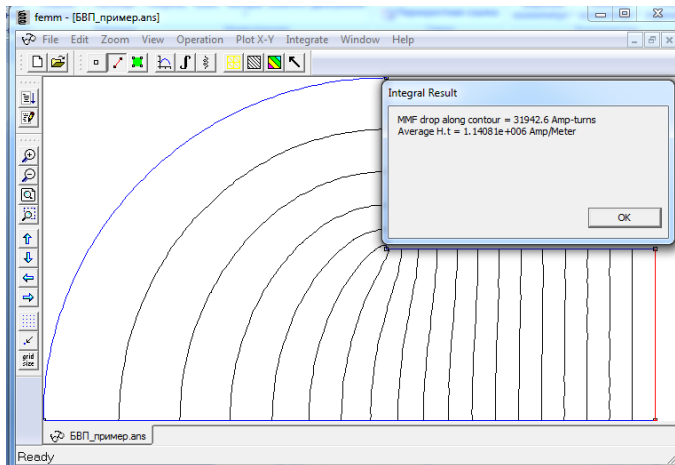


Рисунок 1.24 - Розрахунок значення магнітної напруги U_{M6} на довжині робочого зазору CN в FEMM 4.2

1.3 Варіанти індивідуальних завдань

Варіант 1.

Змінити значення модуля векторного потенціалу для дуги CD на $A=0,3$ та перерахувати питому провідність.

Варіант 2.

Побудувати графік $|B|$ для відрізка CE . Вивести для цієї прямої значення потоку та магнітної напруги.

Варіант 3.

Побудувати криву CD з кутом окружності 45° . Вказати значення модуля магнітного потенціалу для дуги CD $0,2$. Перерахувати значення питомої провідності.

Варіант 4.

Накреслити прямі EM та CN довгими на 20 мм. Вказати значення модуля векторного потенціалу для границі MN $0,02$. Перерахувати значення провідності.

Варіант 5.

Оновити координати точок $E(56,34)$ та $M(100,34)$ та перерахувати значення потоку, магнітної напруги та питомої провідності.

Варіант 6.

Змінити значення модуля векторного потенціалу для дуги CD на $A=0,2$ та перерахувати значення потоку, магнітної напруги та питомої провідності.

Варіант 7.

Змінити матеріал блоку на магнітний матеріал (наприклад Alnico 5 чи інший). Побудувати картину поля, вивести значення потоку, магнітної напруги та питомої провідності.

Варіант 8.

Побудувати криву CD з кутом окружності 110° . Вказати значення модуля магнітного потенціалу для дуги CD $0,25$. Перерахувати значення питомої провідності.

Варіант 9.

Накреслити прямі EM та CN довгими на 40 мм. Вказати значення модуля векторного потенціалу для границі MN $0,05$. Перерахувати значення провідності.

Варіант 10.

Змінити матеріал блоку на M-50. Побудувати картину поля, вивести значення потоку, магнітної напруги та питомої провідності.

1.4 Контрольні питання

1. Можливості програми FEMM.
2. Яка послідовність дій при створенні нової моделі?
3. Як вводяться контури в програмі FEMM?
4. Як вводяться властивості блоків в програмі FEMM?
5. Як вводяться граничні умови в програмі FEMM?
6. Опишіть побудову сітки кінцевих елементів і розрахунок моделі в програмі FEMM.
7. Які типи картин поля можна побудувати в програмі FEMM?
8. Як будуються графіки, робляться розрахунки та виводяться на екран розрахункові дані?
9. Як розрахувати питому провідність вихрового магнітного поля, яке отримано за допомогою FEMM?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗРАХУНОК БРОНЬОВОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗА ДОПОМОГОЮ FEMM

Мета роботи: побудувати модель броньового електромагніта постійного струму, побудувати криву зміни індукції по ширині робочого зазору, зробити розрахунок основних та ланцюгових параметрів.

2.1 Загальні відомості

Електромагніт, розглянутий в цьому розділі, наводиться на рисунку 2.1

Вважаємо заданими: довжина δ_1 робочого немагнітного зазору (4 мм); струм обмотки $I = 0,6$ А, число витків обмотки $w = 2000$ і діаметр $d = 0,8$ мм дроту обмотки; всі геометричні розміри; основну криву намагнічування матеріалу магнітопроводу (сталь 10895).

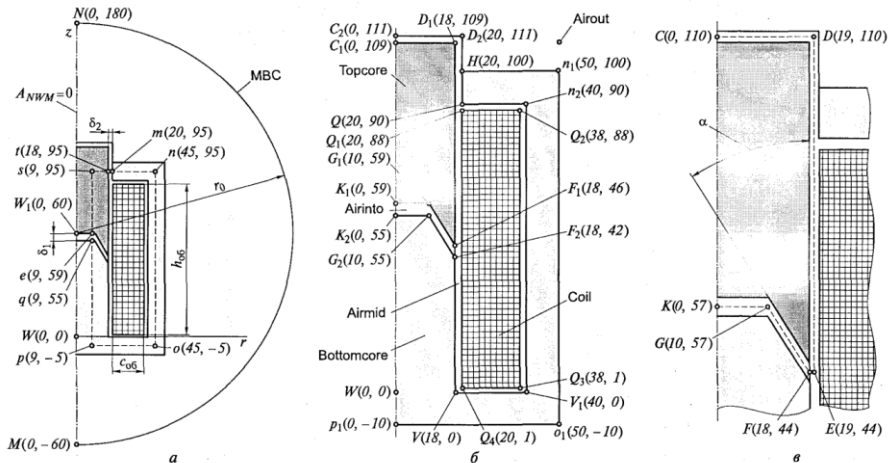


Рисунок 2.1 - Модель електромагніту постійного струму (а); основна частина в більшому масштабі (б) і її блок Торсоре (якір) з контуром інтегрування (в). Сітку не відображено

Розраховуються: польові параметри магнітної системи, ланцюгові властивості обмотки, тягові характеристики електромагніта і залежності статичної індуктивності його обмотки від довжини зазору. Аналізуються деякі параметри магнітного ланцюга і поля.

2.2 Попередня підготовка

За заданими розмірами розрахувати значення координат опорних точок, якщо центр осей координат розмістити в точці W (рис. 2.1, а). Для моделі, яка буде розрахована, вони зведені в табл. 2.1.

Зобразити модель в масштабі на міліметрівці (див. Рис. 2.1). Координати опорних точок показані двома цифрами через кому - в круглих дужках, відразу за позначенням точки латинською літерою. Модель складається з шести областей (блоків) з англійськими іменами (див. Рис. 2.1, б), які будуть присвоєні цим блокам пізніше (блоки - це, як правило, ті, що мають різні властивості підобласті моделі, які відокремлені один від одного лініями-межами). Поперечний переріз якоря (блок *Topcore*) на рис. 2.1 - темно-сірий; поперечний переріз решти магнітопроводу (*Bottomcore*) - світло-сірий; поперечний переріз обмотки (блок *Coil*) показан перекресноним штрихуванням. Відзначимо кілька особливостей.

Відкрита зовнішня межа тут моделюється граничними умовами змішаного типу, які вводяться на дузі півкола з радіусом r_0 .

Немагнітний простір, що оточує магнітопровід, розбитий на чотири частини: зовнішній повітряний (*Airout*), проміжний повітряний (*Airmid*), поперечний переріз обмотки (*Coil*) і простір робочого зазору (*Airinto*).

Розподіл всього немагнітного простору на чотири частини викликано прагненням зменшити пам'ять необхідну для розрахунку поля: в блоці *Airout*, де поле відносно слабке, можна взяти найбільшу довжину сторони кінцевих елементів (обрана 2 мм); в блоці *Airmid*, ширина якого дорівнює 1 мм (між нижньою частиною обмотки і магнітопроводом) і 2 мм у всіх інших місцях, а також в блоці *Coil*, для досить точного розрахунку можна взяти довжину сторони кінцевого елемента 0,5 мм; в робочому немагнітному зазорі (*Airinto*), довжина якого становить 4 мм, довжину сторони немагнітного елемента слід вибирати в залежності від довжини зазору так, щоб контур

інтегрування, яким необхідно оточити якір електромагніту для розрахунку сили за допомогою тензора Максвелла, відстояв від поверхні якоря не менше, ніж на два шару кінцевих елементів. Для зазору $\delta_1 = 4$ мм цей контур показаний штриховою лінією на рис. 2.1, в.

Таблиця 2.1 - Координати опорних точок моделі броньового електромагніту (див. рис. 2.1, а і б)

Координата, мм	Опорна точка								
	C1	D1	F1	G1	K1	K2	G2	F2	V
<i>r</i>	0	18	18	10	0	0	10	18	18
<i>Z</i>	109	109	46	59	59	55	55	42	0
Координата, мм	Опорна точка								
	V1	n2	Q	H	n1	o1	P1	W	Q1
<i>r</i>	40	40	20	20	50	50	0	0	20
<i>Z</i>	0	90	90	100	100	-10	-10	0	88
Координата, мм	Опорна точка								
	Q2	Q3	Q4	C2	D2	N	M	W1	
<i>r</i>	38	38	20	0	20	0	0	0	
<i>Z</i>	88	1	1	111	111	180	-60	60	

При $\delta_1 = 4$ мм можна не ділити внутрішній немагнітний простір на **Airmid** і **Airinto**, бо властивості цих блоків при таких зазорах можна взяти однаковими. Однак при менших зазорах цей поділ стає необхідним - в **Airinto** для правильного розрахунку електромагнітної сили сітка кінцевих елементів повинна бути більш дрібною, ніж в **Airmid**. Для спрощення створення моделей при інших зазорах розподіл внутрішнього повітряного простору на блоки **Airmid** і **Airinto** збережено і для варіанту з зазором $\delta_1 = 4$ мм.

У моделі броньового електромагніту враховується нелінійність магнітопроводу. Останній весь виготовлений з одного матеріалу (сталь 10895), але через те що він немагнітними проміжками розбитий на дві частини, довелося ввести для нього два блоки (Topcore і Bottomcore).

На рис. 2.1, а штриховою лінією показаний контур інтегрування, уздовж якого пізніше будуть визначатися магнітні напруги на ділянках магнітопроводу і зазорах - складові МРС обмотки. Оскільки поверхні магнітопроводу, в тому числі поверхні тих його частин, які

звернені до робочого δ_1 і неробочого δ_2 повітряних зазорів, не є еквіпотенціальними (на відміну від ланцюгових методів розрахунку, в яких зазвичай вони такими приймаються), можна говорити про те, що магнітна напруга, виміряна, наприклад, по шляху *est* (рис. 2.1, а), дає лише деяке орієнтовне (усереднене) уявлення про напругу $U_{m,m1}$ на якорі. Те саме можна сказати і про магнітні напруги на інших ділянках магнітного кола, що входять в контур *mnpqest*.

Підсумувавши складові МРС обмотки, що припадають на магнітопровід ($U_{m,m1}$ на довжині *est* і $U_{m,m2}$ на довжині *mnpq*), можна оцінити ступінь насичення магнітопроводу за допомогою коефіцієнта

$$k_s = U_{m,m} / F_{об}, \quad (2.1)$$

де $U_{mm} = U_{mm1} + U_{mm2}$;

$F_{об}$ - МРС обмотки.

Можна взяти інший замкнутий контур інтегрування, що охоплює розглянутий або розташований всередині розглянутого (тільки не слід поєднувати ці контури з границею магнітопровід-повітря і з вертикальною віссю симетрії, так як в цьому випадку істотно зросте похибка).

Розрахунки уздовж інших контурів дадуть інші значення $U_{m,m}$ і k_s , але відмінності будуть, як правило, невеликими. Важливо тільки, щоб всі магнітні напруги були визначені вздовж частин одного замкнутого контуру обходу, тому при призначенні цих частин необхідно стежити за тим, щоб координати початкової і кінцевої точок у будь-якій частині замкнутого контуру обходу повторювалися в двох сусідніх його частинах.

Створити папку, наприклад, з ім'ям Броневий_електромагніт.

Запустити програму FEMM через **Пуск** → **Програми** → **femm 4.2** → **FEMM 4.2**. У вікні **femm** натиснути кнопку з піктограмою у вигляді чистого аркуша паперу з загнутим правим верхнім кутком. Виникне діалог **Create a new problem** (Створення нового завдання), в поле якого стандартно стоїть **Magnetic Problem** (Магнітні задачі). Натиснути **ОК** - вікно **femm** стане таким, як на рис. 1.1. Зробити так, щоб це вікно займало весь екран, наприклад клацанням на кнопці, другий праворуч у верхньому рядку вікна **femm**.

Через **File** → **Save** привласнити майбутньому файлу даних ім'я **V3M4_i06.fem** (абревіатура броньового електромагніту при зазорі 4 мм і струмі 0,6 А), записавши його в папку Броневий_електромагніт, створену в п. 2 підрозділу 2.2.

Натиснути **Problem** Головного меню. Відкриється діалог **Problem Definition** (див. Рис. 1.2), в якому в полі **Frequency (Hz)** треба залишити 0 (нуль), в поле **Problem Type** - встановити **Axisymmetric**, в поле **Length Units** (Одиниці довжини) - **millimeters** (в обидва останніх - шляхом прокрутки списків). Натиснути **OK**.

За формулою (1.1) розрахувати коефіцієнт c_0 , який буде використаний при введенні границі змішаного (Mixed) типу:

$$c_0 = n / (\mu_0 \cdot r_0) = 1 / (4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,12) = 6631456 \quad (2.2)$$

Радіус r_0 півкола, що є зовнішньою границею моделі, прийнятий рівним 120 мм = 0,12 м.

Якщо немає необхідності в розрахунку параметрів електричного кола обмотки, то сторонній струм до поперечному перерізу обмотки можна прикласти через середню по поперечному перерізі обмотки щільність струму. Її можна розрахувати за формулою

$$J = I \cdot \omega / (c_{об} \cdot h_{об}) = 0,6 \cdot 2000 / (18 \cdot 87) = 0,76628 \text{ A/мм}^2 \quad (2.3)$$

$$= 0,76628 \text{ MA/м}^2,$$

де $I \cdot \omega$ - МРС обмотки; $c_{об}$ і $h_{об}$ - ширина і висота її поперечного перерізу (див. позначення на рис. 2.1, *a* і координати на рис. 2.1, *b*). Далі мається на увазі розрахунок з присвоєнням ланцюгових властивостей обмотці.

2.3 Побудова контурів моделі

Натиснути кнопку **Snap to Grid** (на ній зображена стрілка, що впирається в точку).

Натиснути кнопку з написом **grid size**. В поле **Grid Size** діалогу **Grid Properties**, який з'явиться на екрані після цього, ввести цифру 1, а в поле **Coordinates - Cartesian**. Натиснути **OK**.

Натиснути, якщо вона не втоплена, кнопку, в центрі якої зображено маленький білий квадрат з чорною облямівкою.

За допомогою чотирьох кнопок, на яких зображені жирні стрілки вгору, вниз, ліворуч, праворуч, і кнопок + (плюс), - (мінус) домогтися того, щоб по висоті і ширині в цьому вікні вміщувалася хоча б нижня частина моделі (спочатку без півкола, що її охоплює).

Положення курсору миші, покажчик якої має вигляд жирної білої стрілки, облямованої тонкою чорною лінією, у введений системі координат відбивається в лівому куті рядка стану (нижньому рядку вікна **femm**).

Натиснути точки з координатами (0, 0); (0, - 10); (18, 0); (20, 1); (38, 1); (40, 0); (50, - 10) нижній частині моделі (в будь-якій послідовності) (рис. 2.1, б). У місці натискання виникає білий квадратик з чорною облямівкою. Натиснути кнопку - інструмент із зображенням стрілки вгору: введені точки опустяться вниз, а на екрані з'явиться можливість ввести точки з координатами (18, 42); (18, 46); (10, 55); (0, 55); (0, 59) і (10, 59) в районі робочого немагнітного зазору. Їх можна ввести і без натискання кнопки із зображенням стрілки вгору або, навпаки, для їх введення доведеться два рази натиснути кнопку зі згаданою стрілкою - це буде залежати від обраного масштабу. Знову натиснути (можливо не один раз) кнопку - інструмент із зображенням стрілки вгору: введені точки опустяться вниз, можливо, за межі екрану. На останньому треба ввести точки з координатами (20, 88); (20, 90); (38, 88); (40, 90); (50, 100); (20, 100); (18, 109); (20, 111); (0, 109) і (0, 111) в районі верхньої частини моделі. Видалити помилково введену точку найпростіше за допомогою **Edit** → **Undo**.

В якості альтернативи замість п.п. 1 - 4 поточного підрозділу можна ввести координати кожної опорної точки з клавіатури. Для цього в режимі точки (натиснути, якщо вона не втоплена, кнопку, в центрі якої зображено маленький білий квадрат з чорною облямівкою) натиснути і відпустити клавішу [Tab]. Виникне діалог **Enter Point**, в якому треба заповнити поля **r-coord** і **z-coord** для першої (будь-який) точки і натиснути **OK**. У вікні побудови **femm** в точці з введеними координатами виникне маленький квадрат з чорною облямівкою. Операцію повторити для всіх 26 опорних точок моделі в будь-якій послідовності.

Натиснути кнопку із зображенням прямої між двома квадратами на кінцях.

Натиснути точку C_2 (див. рис. 2.1, б); колір облямівки її квадрата з чорного зміниться на червоний. Натиснути точку D_2 (20, 111) - між точками C_2 і D_2 виникне синя пряма, а колір облямівки квадрата точки C_2 повернеться до чорного.

Натиснути точку D_2 ; колір облямівки її квадратики з чорного зміниться на червоний. Натиснути точку H - між точками D_2 і H виникне синя пряма, а колір облямівки квадратики точки D_2 повернеться до чорного.

Аналогічно побудувати прямі, що з'єднують такі точки моделі: H і n_1 ; H і Q ; C_1 і D_1 ; D_1 і F_1 ; F_1 і G_1 ; F_1 і F_2 ; G_1 і K_1 ; K_1 і C_1 ; C_1 і C_2 ; K_1 і K_2 ; K_2 і W ; W і p_1 ; p_1 і o_1 ; o_1 і n_1 ; Q і n_2 ; n_2 і V_1 ; V_1 і V ; V і F_2 ; F_2 і G_2 ; G_2 і K_2 ; всі кутові точки поперечного перерізу обмотки: Q_1 і Q_2 ; Q_2 і Q_3 ; Q_3 і Q_4 ; Q_4 і Q_1 (див. Рис. 2.1, б). Прямими з'єднуються всі точки, розташовані на вертикальній осі симетрії системи. Для зручності побудови вертикальних ліній магнітопроводу і обмотки зменшити масштаб зображення (за допомогою кнопки - інструменту з зображенням знака «-»).

Для побудови інших зовнішніх границь моделі ще раз зменшити масштаб зображення (за допомогою кнопки - інструменту з зображенням знака «-»).

Натиснути кнопку, в центрі якої зображено маленький білий квадрат з чорною облямівкою. За допомогою кнопок + (плюс), - (мінус) домогтися того, щоб по висоті і ширині на екрані вміщувалася вся модель (з півколом).

Натиснути кнопку з написом **grid size**. В поле **Grid Size** діалогу **Grid Properties** ввести цифру 10. Натиснути **OK**.

Натиснути точки M і N з координатами $(0, -60)$ і $(0, 180)$ відповідно.

Знову натиснути кнопку із зображенням прямої між двома квадратами на кінцях.

Натиснути точку N з координатами $(0, 180)$ (див. рис. 2.1, а); колір облямівки її квадратики з чорного зміниться на червоний. Натиснути точку C_2 з координатами $(0, 111)$ (див. рис. 2.1, б) - між точками C_2 і N виникне синя пряма, а колір облямівки квадратики точки повернеться до чорного. Аналогічним чином з'єднати прямою точки M і p_1 у нижній частині моделі.

Натиснути кнопку, на якій зображена дуга окружності з квадратами на кінцях.

Натиснути точку M $(0, -60)$ - облямівка її квадратики змінить колір на червоний, натиснути точку N $(0, 180)$ - облямівка її квадратики теж змінить колір на червоний, а на екрані виникне діалог **Arc segment properties**. Залишити значення 10 в поле **Max. Segment**,

Degrees і **<None>** в поле **Boundary cond**, які є там стандартно без змін, а значення поля **Arc Angle** змінити на 180; натиснути **OK**. На екрані виникне дуга MN.

Оскільки далі сітка прив'язки не буде потрібна, відключити її зображення на екрані натисканням кнопки з піктограмою у вигляді 16-ти точок (треба «віджати» цю кнопку).

Зрозуміло, описаний порядок створення моделі не є єдино можливим. Межі всіх блоків, зображених на рис. 2.1, повинні в вікні **femm** мати вигляд замкнених ліній, що утворюють шість площадок. Ці лінії відокремлюють блоки як один від одного, так і від зовнішнього простору.

2.4 Введення властивостей блоків і ланцюгових властивостей обмотки

Натиснути рядок **Materials** пункту **Properties** Головного меню - виникне діалог **Property Definition**, показаний на рис. 1.4.

Натиснути кнопку **Add Property** цього діалогу - з'явиться діалог **Block Property**. В поле **Name** цього діалогу ввести **Airout** (повітря зовні). В інших полях залишити типові значення, показані на рис. 1.5. Натиснути **OK**.

В поле **Property Name**, що виникає на екрані діалогу **Property Definition**, показаного на рис. 1.4, встановити **Airout** (шляхом прокрутки списку), якщо це ім'я вже не стоїть в цьому полі. Натиснути **OK**.

Виконати п.п. 1-3 для блоків **Airmid** і **Airinto**, позначених на рис. 2.1, б. Властивості блоків, які необхідно ввести в поля діалогу **Block Property** зведені в табл. 2.2. Для блоків **Airmid** і **Airinto** вони будуть відрізнятися від діалогу для **Airout** тільки ім'ям блоку.

Аналогічно до попереднього ввести властивості блоку **Coil**. В поле **Name** діалогу на рис. 1.5 для цього блоку треба ввести **Coil**.

Якби ми не мали наміру привласнювати йому ланцюгові властивості, то в ліве поле **J**, MA/m^2 слід ввести 0.76628 (див. формулу 2.3); в поле **c**, MS/m - 0 (нуль), а в полі **Special Attributes: Lamination & Wire Type - Not laminated or stranded**. Тоді обмотка не була б деталізована (її опір умовно вважався б рівним нулю).

Оскільки поперечному перерізу обмотки трохи пізніше будуть присвоєні ланцюгові властивості, то в двох полях щільності струму **J**,

MA/m^2 залишити нулі (або ввести нулі, якщо там стоять інші цифри); в поле σ , MS/m ввести значення 57.143 (питома електропровідність мідного дроту при температурі $20^\circ C$); в поле **Special Attributes: Lamination & Wire Type** шляхом прокрутки списку встановити рядок **Magnet wire**; в поле **Strand dia, mm** ввести 0.8.

У цьому випадку програма FEMM розраховує активний опір і потужність, що виділяється в обмотці при питомому опорі $\rho_{20} = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (при цьому питома електропровідність $\sigma = 1/\rho_{20} = 57,143 \text{ МСм} / \text{м}$).

В інших полях діалогу **Block Property** залишити стандартні значення, показані на рис. 2.2.

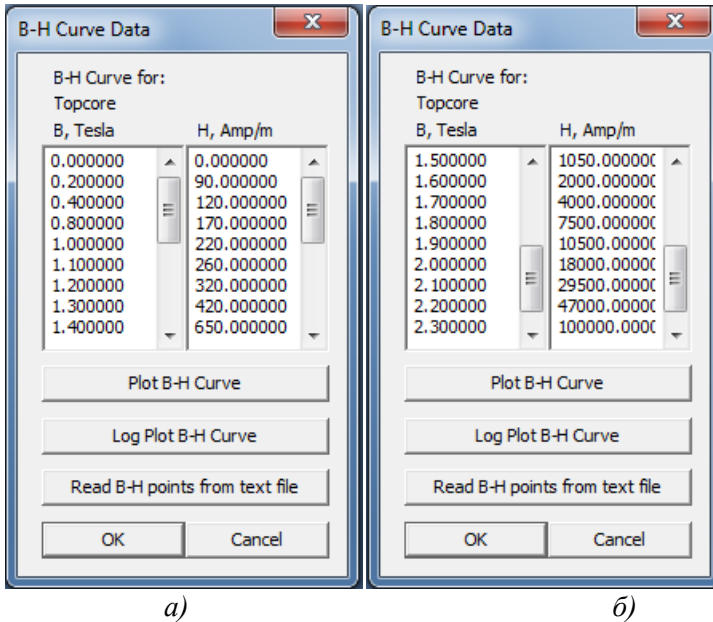


Рисунок 2.2 - Координати точок кривої намагнічування використаної для магнітопроводу зі сталі 10895, показані в діалогах введення цих координат в програмі FEMM (а, б)

При введенні властивостей блоку **Topcore** в поле **B-H Curve** діалогу **Block Property** шляхом прокрутки списку вказати **Nonlinear B-H Curve**. Щоб ввести координати точок кривої намагнічування,

натиснути кнопку **Edit B-H Curve**. Виникне діалог **B-H Curve Data**. Далі можна йти двома шляхами: за першим способом треба в поля цього діалогу ввести значення індукції B в Тл і напруженості магнітного поля H в А/м з клавіатури. На рис. 2.2, а і б показані два таких діалогу після введення координат точок.

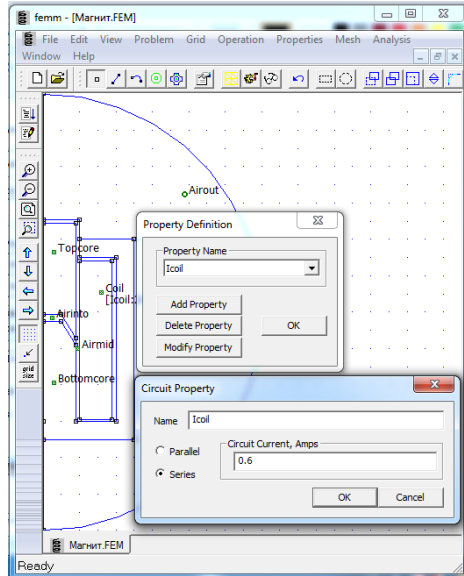


Рисунок 2.3 - Введення ланцюгових властивостей обмотки

При наявності двоколонкового текстового файлу з координатами точок кривої намагнічування можна користуватися іншим способом їх введення: натиснути кнопку **Read B-H points from text file** (Прочитати точки кривої B-H з текстового файлу) діалогу **B-H Curve Data**, вказати адресу і ім'я файлу даних з координатами точок в діалозі **Відкриття файлу**, який з'явиться на екрані, і натиснути кнопку **Відкрити** останнього діалогу. Виникне діалог **B-H data file formatting**. У ньому треба вказати одиниці, в яких у файлі даних записані індукція (**B Units**) і напруженість магнітного поля (**H Units**), а також порядок стовпців, в яких вони записані (якщо значення індукції знаходяться в лівій колонці, а напруженостей магнітного поля

в правому , то точка всередині прямокутника **Ordering** (Порядок) повинна стояти в верхньому рядку.

Натиснути **OK** спочатку діалогу **B-H data file formatting**, потім **OK** діалогу **B-H Curve Data**, потім **OK** діалогу **Block Property**.

Введення властивостей блоку **Bottomcore** відрізняється від описаного для **Topcore** тільки значенням в полі **Name** діалогу **Block Property**.

Після закінчення введення властивостей блоків натиснути **OK** діалогу **Property Definition**.

Щоб ввести ланцюгові властивості, натиснути **Properties** → **Circuits** Головного меню. Виникне діалог **Property Definition** (див. Рис. 2.3). Натискання його кнопки **Add Property** виводить на екран діалог **Circuit Property** (див. рис. 2.3). У його полі **Name** ввести ім'я ланцюга **Icoil**, в ліве поле **Circuit Current, Amps** ввести 0.6, в правому полі залишити 0, виділити перемикач **Series**, як на рис. 2.3, і натиснути **OK**.

2.5 Ідентифікація властивостей блоків

Натиснути кнопку **Operate on block labels** (Робота з мітками блоків) - на панелі інструментів вікна **femm** вона має вигляд зеленого квадратика в колі.

Натиснути будь-яку точку всередині площадки моделі, обмеженою справа півколом, а зліва - вертикальною віссю симетрії, зовнішньою поверхнею магнітопроводу і ламаної C_2D_2H . На рис. 2.1, b значок блоку і його назва **Airout** показані трохи вище правого верхнього кута ярма магнітопроводу - точки p_1 . Щоб модель, яку створюємо, без проблем можна було використовувати при інших положеннях якоря, точка натискання повинна знаходитися не ближче 5 мм від лінії C_2D_2 , якщо вона обрана над нею. У місці натискання з'явиться білий квадратик із зеленим облямуванням.

Натиснути правою кнопкою миші цей квадратик - облямівка змінить свій колір на червоний.

Натиснути і відпустити клавішу пробілу або натиснути кнопку панелі інструментів із зображенням пензля руки людини (див. Рис. 1.1) - на екрані відкриється вікно діалогу **Properties for selected block** (див. рис. 1.11), в поле **Block type** якого треба встановити **Airout** (шляхом прокрутки списку), якщо стоїть інше ім'я, а в поле **Mesh size**

ввести з клавіатури довжину сторони кінцевого елемента сітки, яку будуватиме програма (2 по табл. 2.2). Натиснути **OK**. Навколо квадратика з зеленим обляміванням виникне коло зеленого кольору, а поруч з нею - ім'я **Airout**. Діаметр цього кола приблизно дорівнює середній довжині сторони трикутних в FEMM кінцевих елементів сітки.

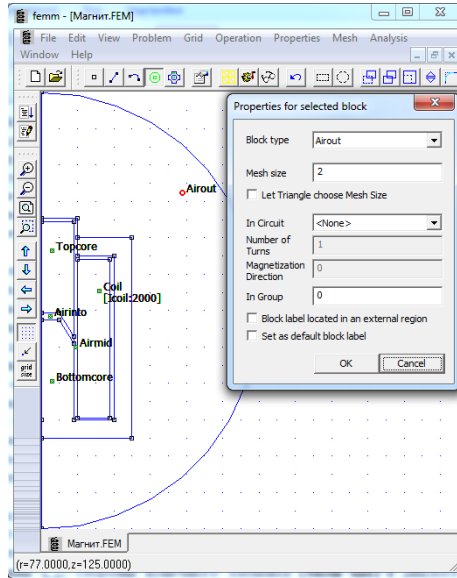


Рисунок 2.4 - Ідентифікація блоку Airout

Виконати п.п. 1 - 4 для кожного з блоків моделі.

Місце для міток блоків треба вибирати так, щоб не довелося переміщати ці мітки. При розташуванні міток блоків, показаному на рис. 2.1, б, тільки розташування мітки Airinto слід уточнити (на рис. 2.1, б воно зроблено в центрі робочого зазору для наочності). Для введення цієї мітки за допомогою кнопки із зображенням лупи поверх квадрата з контуром зі штрихів виділити робочий зазор так, щоб він займав все поле побудови. Це можна зробити також за допомогою інших кнопок масштабування. Далі натиснути кнопку з написом **grid size**. У діалозі в поле **Grid Size** встановити 0.1. Потім натиснути кнопку з 16-ю точками і кнопку із зображенням стрілки, що упирається в точку (якщо вони не втоплені). Включення сітки

прив'язки і прив'язка до цієї сітці точок полегшують введення мітки блоку в точно призначене для неї місце.

При вже включеному режимі роботи з блоками натиснути точку з координатами $r = 3$ (можна в діапазоні 1 - 9) і $z = 55,1$. У цьому випадку навіть при $\delta_1 = 0,2$ мм ця мітка виявиться всередині робочого зазору.

Значення довжини $l_{к.еб1}$ сторони кінцевого елемента (**Mesh size**) в діалозі **Properties for selected block** (див. рис. 1.11) слід вибирати відповідно до табл. 2.2. Найбільш точно поле повинно бути побудовано в діапазоні між кінчними частинами кінців полюса і стопа.

Таблиця 2.2 - Властивості блоків моделі броньового електромагніту при $\delta_1 = 4$ мм і $I = 0,6$ А

Параметр блоку	Значення параметрів блока					
	Ім'я	Airout	Airmid	Airinto	Coil	Topcore
Матеріал	Повітря	Повітря	Повітря	Обмотка	Сталь 10895	Сталь 10895
Л або Нл	Л	Л	Л	Л	Нл	Нл
$l_{к.е},$ мм	2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$\sigma,$ МСм/м	0	0	0	57.143	0	0

Примітки: 1. Л і Нл - лінійний і нелінійний магнітні матеріали.

2. $l_{к.е}$ - довжина сторони кінцевого елемента (вводиться в поле **Mesh size** діалогу **Properties for selected block** на рис. 1.11).

3. Десятковий знак - крапка.

Щоб отримати задовільну точність розрахунку сили по тензору Максвелла, число кінцевих елементів в районі лінії FG (рис. 2.1, в) по найкоротшій відстані між кінчними феромагнітними поверхнями повинна бути не менше чотирьох. Це відповідає формулі

$$Mesh\ size \leq \delta_1 \cdot \sin \alpha / 4 = 4 \cdot 0,5 / 4 = 0,5\ мм, \quad (2.4)$$

де довжина δ_1 немагнітного зазору між торцевими частинами якоря і кут α нахилу конусної частини поверхонь полюсів до вертикалі позначені на рис. 2.1, a і b .

При ідентифікації блоку **Coil** в поле **In Circuit** діалогу **Properties for selected block** треба шляхом прокрутки списку встановити ім'я (coil, ввести в поле **Numbers of Turn** (Число витків)

цифру 2000 (задане число витків) і натиснути **ОК**. На моделі біля мітки блоку поперечного перерізу обмотки з'явиться напис **Coil**, а під нею - **[Coil: 2000]**.

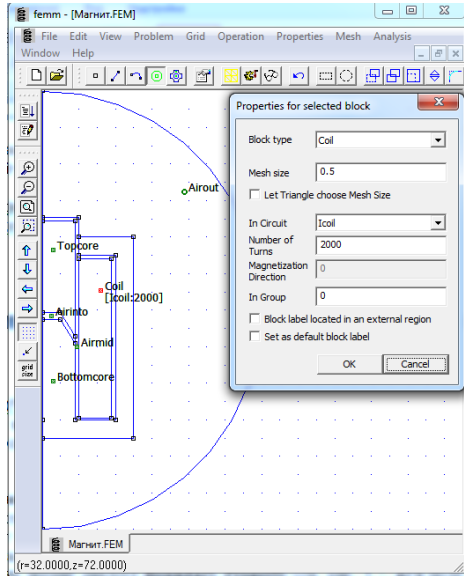


Рисунок 2.5 - Ідентифікація блоку Coil

2.6 Введення граничних умов

Натиснути рядок **Boundaries** пункту **Properties** Головного меню. На екрані виникне діалог **Property Definition** (див. рис. 2.6). Натиснути кнопку **Add Property** цього діалогу.

У діалозі **Boundary Property**, що виник на екрані (див. рис. 3.6), в поле **Name** ввести ім'я **MBC**, в поле **BC Type** вибрати за допомогою прокрутки списку назву **Mixed**, в поле **c₀ coefficient** ввести цифру 6 634 819, розраховану за формулою (2.2). В інших полях залишити стандартні значення. Натиснути **ОК**, а потім **ОК** діалогу **Property Definition**. Умова $A = 0$ на кордоні **NWM** (див. рис. 2.1, a , $A_{NWM} = 0$) вводити не потрібно, так як в осесиметричних системах воно забезпечується автоматично.

2.7 Ідентифікація граничних умов

Натиснути кнопку **Дуга кола** панелі інструментів (див. рис. 1.1, 5-а кнопка зліва в 3-му рядку вікна **femm**).

Натиснути правою кнопкою миші дугу *MN* (див. рис. 2.1, *a*) моделі. Вона стане червоною.

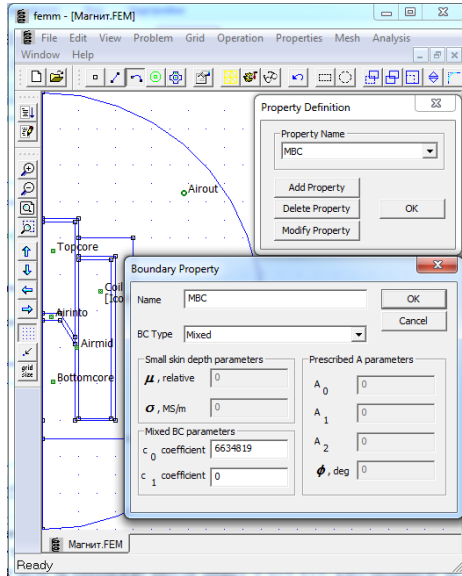


Рисунок 2.6 - Введення граничних умов

Натиснути і відпустити клавішу пробілу або натиснути кнопку панелі інструментів із зображенням пензля руки людини (див. рис. 2.7) - на екрані виникне діалог **Arc segment properties**. В поле **Boundary cond** шляхом прокрутки списку введених граничних умов встановити **MBC**; значення **10** в поле **Max. segment, Degrees** можна залишити. Натиснути **ОК**. Червона дуга *MN* стане синьою, і їй присвоюється гранична умова з ім'ям **MBC**.

2.8 Побудова кінцево-елементної сітки і картин поля

Натиснути кнопку, на якій зображено зубчасте колесо з ручним приводом. На екрані виникає інформаційне вікно з даними про модель (наводиться число використаних кінцевих елементів, число вузлів сітки і інше) з демонстрацією процесу на тимчасовій діаграмі. У рядку повідомлень на час побудови сітки кінцевих елементів з'являється прямокутник програми triangle, а на час вирішення задачі розрахунку поля - прямокутник f kern, які після закінчення цих процесів автоматично видаляються.

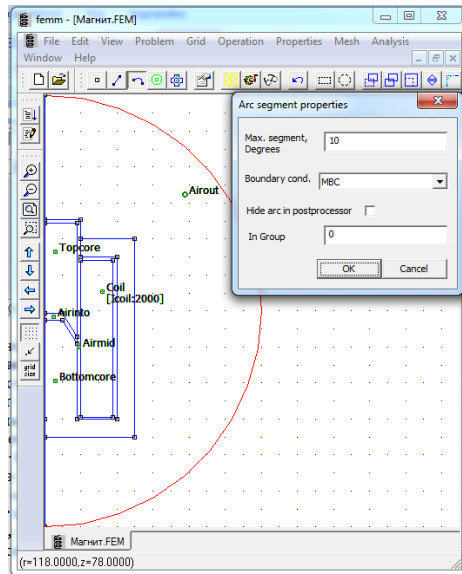


Рисунок 2.7 - Ідентифікація граничних умов

Щоб побачити побудовану сітку кінцевих елементів, треба натиснути кнопку з зображенням квадрата, що складається з чотирьох квадратиків, кожен з яких діагонально розбитий на два трикутника. На кольоровому екрані зображення на цій кнопці виконано жовтим кольором. Після натискання цієї кнопки на екрані з'являється жовта сітка кінцевих елементів і вікно, в якому програма повідомляє користувачеві про те, скільки вузлів вона використовувала для її побудови (в нашому випадку 30 533 (Рис. 2.8)).

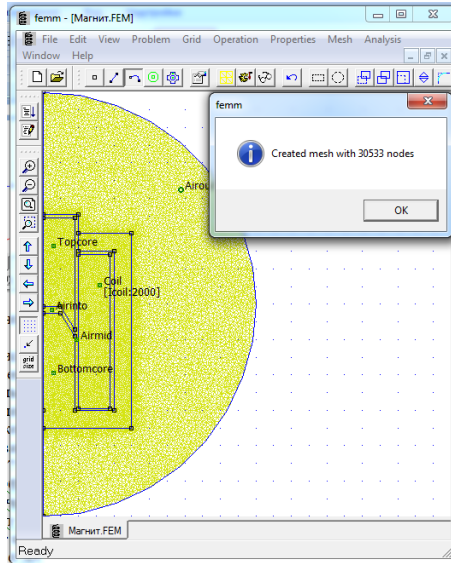
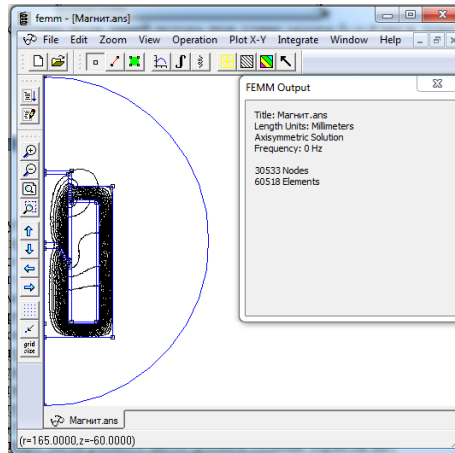


Рисунок 2.8 - Сітка граничних елементів

Рисунок 2.9 - Картина поля ліній потоку при довжині зазору $\delta_1 = 4$ мм і струмі $I = 0,6$ А

Щоб закрити це інформаційне вікно, натиснути його кнопку **ОК**. Щоб прибрати з екрану сітку кінцевих елементів, треба натиснути рядок-перемикач **Show Mesh** пункту **Mesh** Головного меню

вікна **femm** (див. рис. 1.1) (зліва від цього рядка стоїть галочка, яку натискання на рядку прибирає разом з сіткою)

Натиснути кнопку із зображенням очок (вона розташована праворуч від кнопки з піктограмою у вигляді зубчастого колеса з ручним приводом). На екрані з'являється вікно **femm** програми при роботі в постпроцесорі (див. рис. 1.12) з картиною поля ліній магнітного потоку (рис. 2.9) і невеликим вікном FEMM Output з числом використаних для аналізу вузлів (Nodes), кінцевих елементів (Elements) та іншою інформацією. Картина поля ліній потоку стандартно має 19 трубок. Для зручності подальшої роботи можна збільшити розміри вікна цієї програми до розмірів екрану і розміри моделі до максимально можливих, якщо вона повинна бути зображена цілком (останнє - за допомогою натискання кнопки у вигляді білого квадратного аркуша паперу з загнутим правим верхнім кутом і лупою поверх нього).

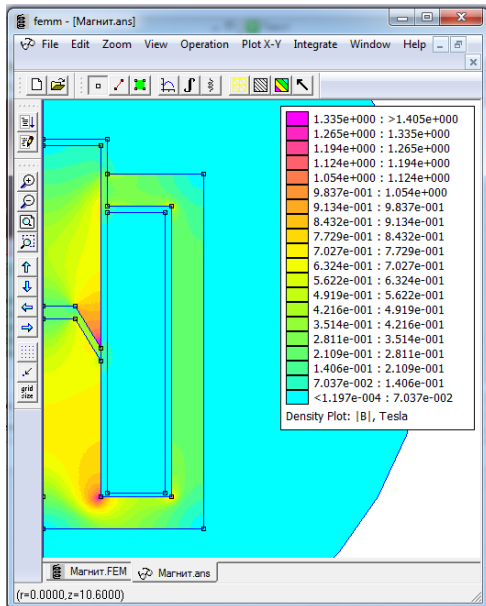


Рисунок 2.10 - Зонна картина поля при довжині зазору $\delta_1 = 4$ мм і струмі $I = 0,6$ А

Натиснути кольорову кнопку у вигляді прямокутника, розбитого косими лініями на чотири частини різного кольору. На екрані виникне

діалог **Density Plot** для введення параметрів зонної картини поля. Щоб побачити її, натиснути перемикач у вигляді білого квадрата зліва від надпису **Show flux density** (стандартно він не включений), а потім на кнопці **OK**: на екрані виникне малюнок, на якому одночасно будуть показані як картина поля ліній потоку, так і зонна. Щоб прибрати лінії потоку, треба натиснути на кнопці, яка управляє їх зображенням (піктограма цієї кнопки має вигляд квадрата з шістьма чорними смугами з нахилом 45°). Виникне діалог **Dialog** для введення числа трубок картини поля ліній магнітного, в якому треба зняти галочку в перемикачі **Show flux lines** і натиснути **OK**. Після цього на екрані з'явиться поле (рис. 2.10).

Всі подальші розрахунки і побудови проводяться в програмі FEMM при роботі її в постпроцесорі, що далі спеціально не буде обумовлюватися.

2.9 Побудова кривої зміни індукції по ширині робочого зазору

Для зручності виділення контурів інтегрування натиснути кнопку панелі інструментів із зображенням 16-и точок (якщо ця кнопка була втоплена і сітка прив'язки не висвітлюється на екрані). Якщо після включення сітки прив'язки її крок буде потрібно змінити, натиснути кнопку з написом **grid size**.

Натиснути правою кнопкою миші кнопку панелі інструментів, на якій зображена червона пряма з квадратами з контурних чорних ліній на кінцях. Після цієї операції включається режим роботи з відрізками (його кнопка на панелі інструментів повинна бути втоплена). Натиснути точку $K(0,57)$ (див. рис. 2.1, в) моделі - в цій точці з'явиться червоний хрестик, потім - точку $G(10,57)$ (виникне червона лінія KG) і, нарешті, крапку $F(18, 44)$ - до прямої KG додасться ще червоний відрізок GF .

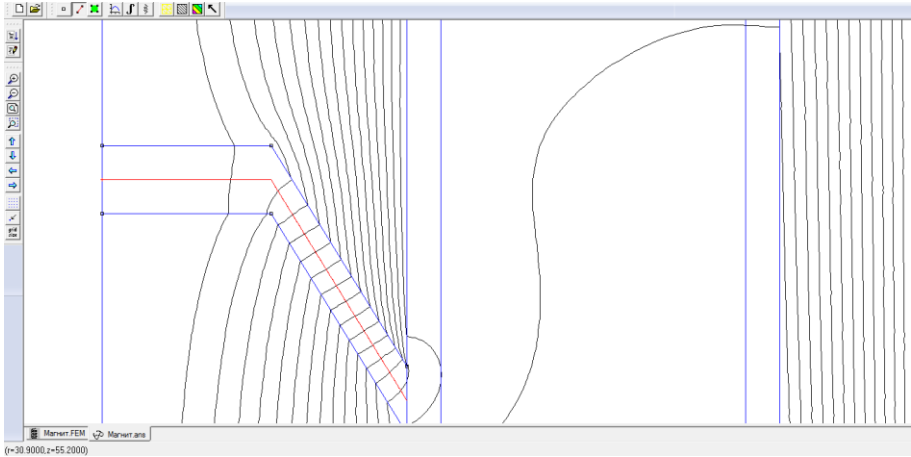


Рисунок 2.11 - Виконання п.2 підрозділу 3.8

Натиснути кнопку панелі інструментів із зображенням графіка. На екрані виникне діалог **X-Y Plot of Field Values**. У верхньому полі цього діалогу стандартно стоїть **IBI** (Magnitude of flux density). Натиснути **ОК** цього діалогу. На екрані виникне вікно програми femmplot з кривою зміни модуля індукції вздовж введеного контуру (рис. 2.12). Після вивчення цієї кривої або виведення її на друк закрити вікно femmplot.

2.10 Розрахунок основних параметрів

2.10.1 Режим параметрів контуру

У постпроцесорному вікні програми femm натиснути кнопку панелі інструментів, на якій зображений знак інтеграла. На екрані виникне діалог **Line Integrals**. Шляхом прокручування списку цього діалогу в його єдиному полі встановити **V.n** (Normal flux density) і натиснути **ОК**. В інформаційному вікні, яке з'явиться після цього, можна знайти значення потоку $\Phi_{\text{ср}}$, нормального до виділеної ламаної **KGF** (Normal flux) і середнє значення $V_{\text{ср}}$ нормальної до **KGF** магнітної індукції (Average V.n.) (рис. 2.13). Натиснути **ОК** цього вікна. Натиснути і відпустити клавішу [Esc], щоб зняти виділення з **KGF**.

Виділити відрізок KG і описаним чином визначити середнє значення B_{KG} індукції, нормальної до відрізка KG . Натиснути **OK** інформаційного вікна, натиснути і відпустити клавішу [Esc].

Аналогічним чином визначити середні індукції B_{GF} і B_{WV} .

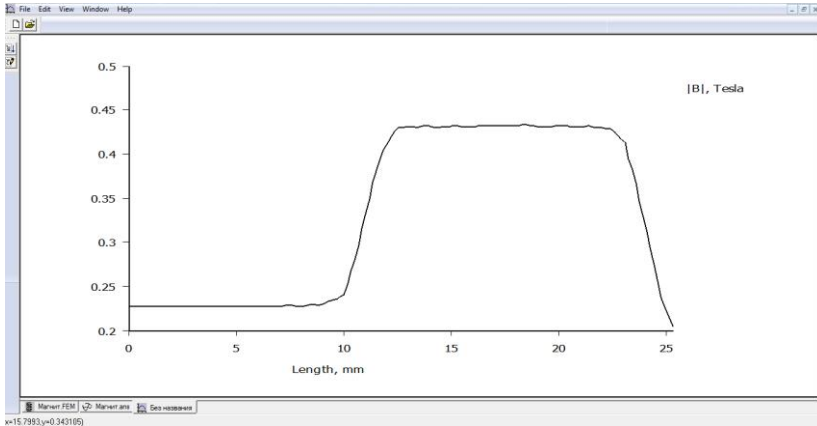


Рисунок 2.12 - Крива зміни індукції по ширині робочого зазору (уздовж контуру KGF , позначеного на рис. 3.1, ϵ)

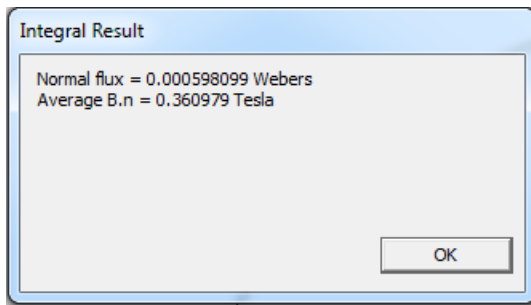


Рисунок 2.13 - Значення потоку $\Phi_{\text{дср}}$, нормального до виділеної ламаної KGF (Normal flux) і середнє значення $B_{\text{дср}}$ нормальної до KGF магнітної індукції (Average B.n.).

Натиснути правою кнопкою миші точку q (9,55) (див. рис. 2.1, a) торця стопа, потім точку e (9,59) торця якоря. Виникне червоний відрізок qe .

Натиснути кнопку панелі інструментів із зображенням знака інтеграла, в діалозі **Line Integrals** вибрати рядок **H.t** і натиснути **OK**. На екрані виникне інформаційне вікно (рис. 2.14) із значенням магнітної напруги (MMF drop along contour) уздовж обраного контуру qe .

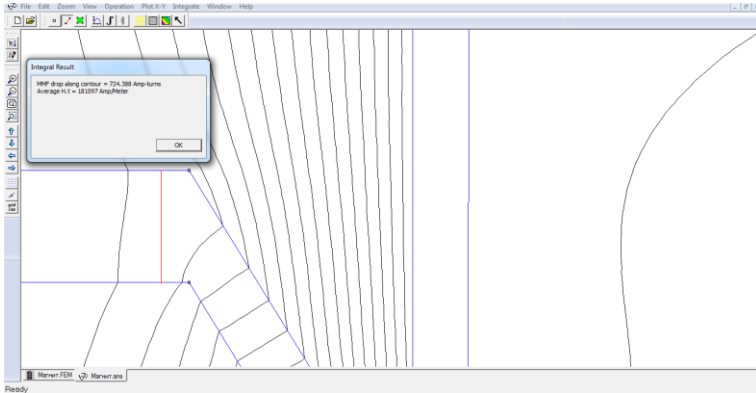


Рисунок 2.14 - Вікно, яке виводиться на екран, якщо після виділення відрізка qe (див. Рис. 2.1, a) в діалозі **Line Integrals** вибрати рядок **H.t**

Це - напруга $U_{\delta 01}$ на робочому немагнітному зазорі. Натиснути на **OK** інформаційного вікна; натиснути і відпустити клавішу [Esc].

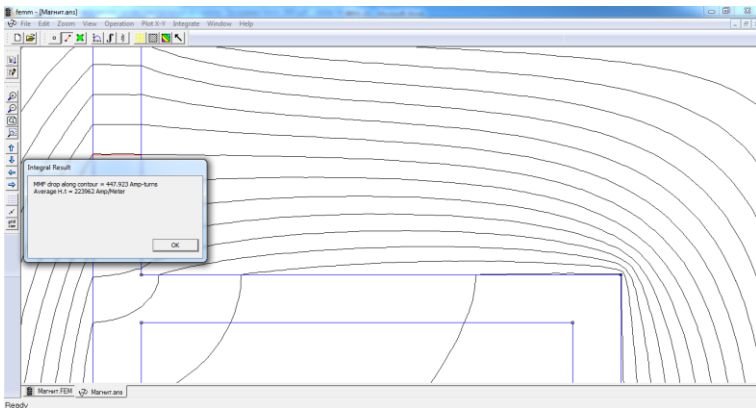


Рисунок 2.15 - Вікно, яке виводиться на екран, якщо після виділення відрізка tm (див. рис. 2.1, a) в діалозі **Line Integrals** вибрати рядок **H.t**.

Натиснути правою кнопкою миші точку t (18,95) (див. рис. 3.1, а), розташовану на бічній поверхні якоря проти середини верхнього фланця; потім точку m (20,95). Виділиться відрізок tm . Визначити магнітну напругу $U_{m\delta 2}$ на довжині цього неробочого зазору δ_2 способом, описаним при розрахунку $U_{m\delta 1}$ (рис. 3.15). Натиснути і відпустити клавішу [Esc].

Аналогічним чином для відрізка est (e (9,59), s (9,95), t (18,95)) на довжині якоря (рис. 2.16).

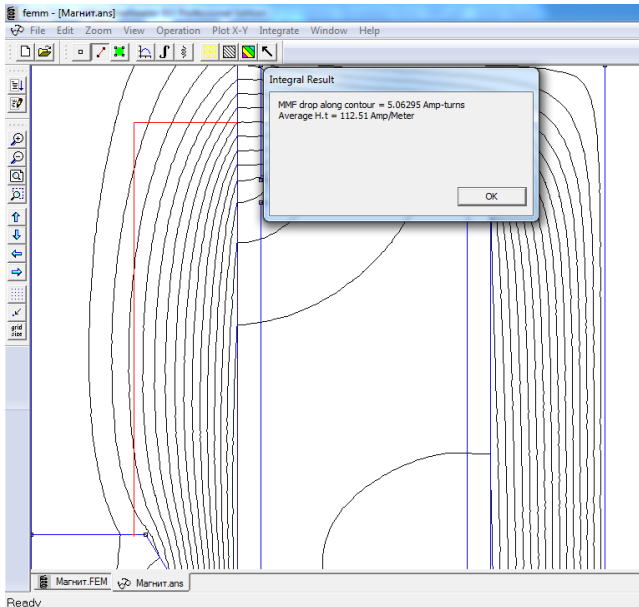


Рисунок 2.16 - Вікно, яке виводиться на екран, якщо після виділення відрізка est (див. Рис. 3.1, а) в діалозі **Line Integrals** вибрати рядок **H.t**.

А для відрізка $mnpq$ (m (20,95), n (45,95), o (45, -5), p (9, -5), q (9,55)) - на довжині іншої частини магнітопроводу, визначити магнітні напруги $U_{m,m1} = U_{mest}$ (рис. 2.16) і $U_{m,m2} = U_{mnpq}$ (рис. 2.17) відповідно. В кінці розрахунку кожної магнітної напруги не забути натиснути і відпустити клавішу [Esc].

Виділити, рухаючись за годинниковою стрілкою, всі відрізки контуру інтегрування $CDEFGK$ (C (0,110), D (19,110), E (19,44), F (18,44), G (10,57), K (0,57)) (див. рис. 2.1, в); в виділення відрізків KC

можна не включати); в діалозі **Line Integrals** вибрати рядок **Force from Stress Tensor**. В інформаційному вікні програма FEMM виведе розраховане з використанням тензора Максвелла значення електромагнітної сили P_{EM} ; діючої на якір по осі z (Force in z-direction = -59.0479N). Негативний результат означає, що сила діє проти позитивного напрямку осі z.

2.10.2 Режим параметрів блоку

Натиснути кнопку панелі інструментів, що має вигляд зеленого квадрата з чотирма маленькими квадратами по кутах.

Натиснути всередині поперечного перерізу обмотки (блок Coil) - вся її площа забарвиться в зелений колір.

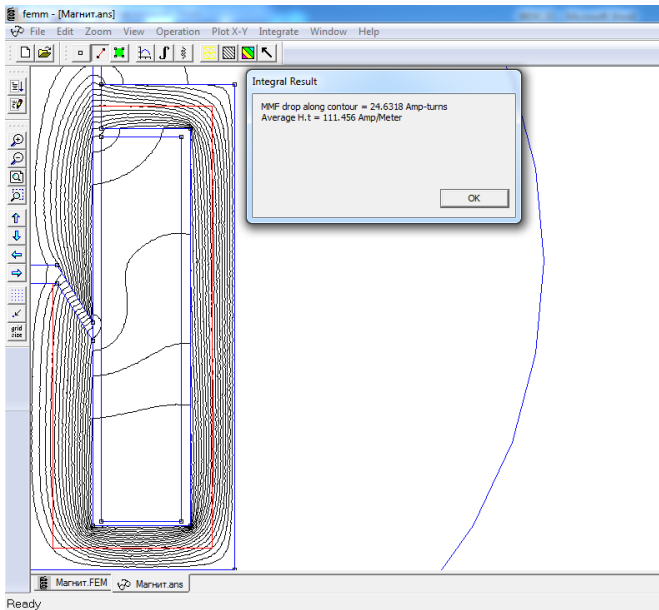


Рисунок 2.17 - Вікно, яке виводиться на екран, якщо після виділення відрізка *mnopq* (див. рис. 2.1, а) в діалозі **Line Integrals** вибрати рядок **H.t**.

Натиснути кнопку із зображенням інтеграла - на екрані виникне діалог **Block Integrals**, в поле якого шляхом прокрутки списку вивести **A.J**. Натиснути **OK**. На екрані виникне інформаційне вікно, а, зі

значенням $0,84081 \text{ Гн} \cdot \text{А}^2$ (Рис. 2.19). Індуктивність обмотки розраховується за формулою (1.3) $L = \text{А} \cdot \text{J} / I^2 = 2.3356 \text{ Гн}$.

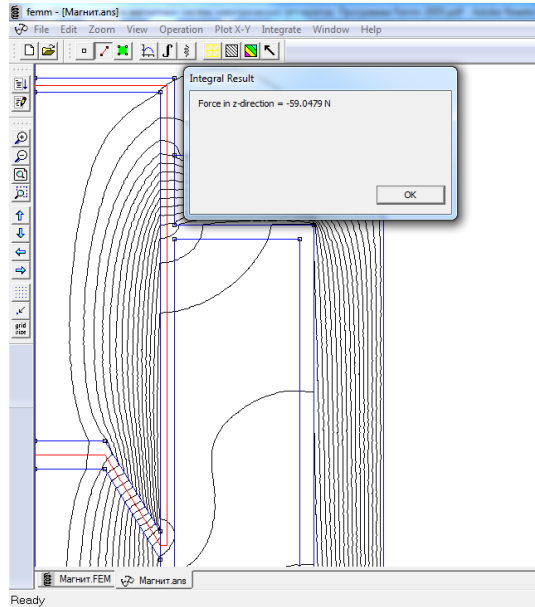


Рисунок 2.18 - Вікно, яке виводиться на екран, якщо після виділення відрізка *CDEFGK* (див. рис. 3.1, в) в діалозі **Line Integrals** вибрати рядок **Force from Stress Tensor**.

Натиснути **OK** інформаційного вікна. Знову натиснути кнопку із зображенням інтеграла. В поле діалогу **Block Integrals** вивести **Lorentz force ($\mathbf{J} \times \mathbf{B}$)**. В інформаційному вікні можна прочитати значення складових $P_{лr} = 0$ і $P_{лz} = -2.55361 \text{ N}$ сили, що діє на обмотку електромагніта (сили Лоренца).

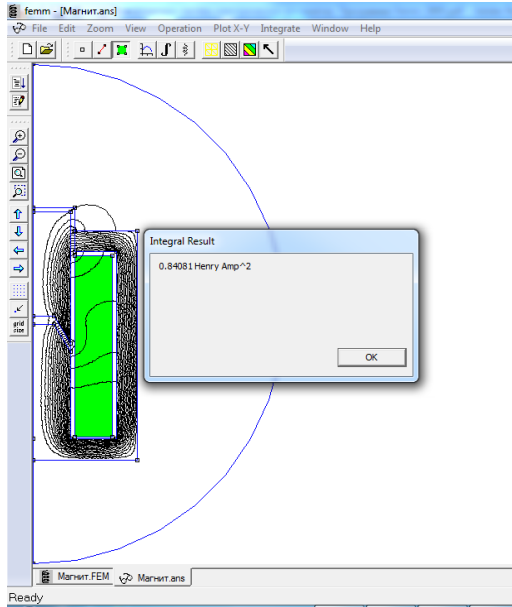


Рисунок 2.19 - Вікно, яке виводиться на екран, якщо після виділення блоку Coil (див. рис. 2.1) в діалозі **Block Integrals** вибрати рядок **A.J.**

Натиснути всередині поперечного перерізу якоря (блок Topcore) - воно стане зеленим. Натиснути кнопку із зображенням інтеграла, у виниклому на екрані діалозі **Block Integrals** виділити рядок **Force via Weighted Stress Tensor** (Сила за середньозваженим тензором натягом) і натиснути **OK**. На екрані з'явиться інформаційне вікно **Integral Result**, в якому будуть наведені значення r - і z -компонентів сили, що діє на якір. Легко перекоонатися, що z -а складова цієї сили (z -component: - 59.0815N) відрізняється від сили, знайденої за допомогою лінійного інтеграла по контуру *CDEFGK* (див. рис. 3.1, *в*) (Force in z -direction = - 59.0479N), менш, ніж на 0,1%.

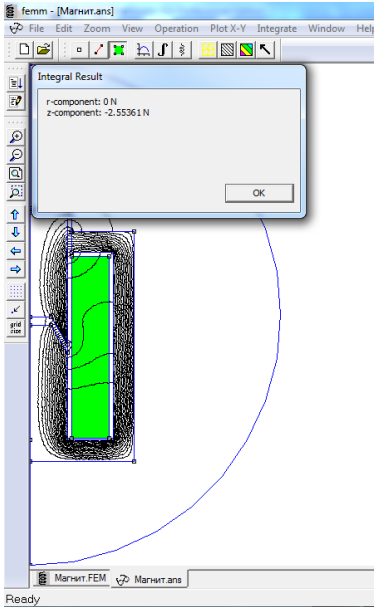


Рисунок 2.20 - Вікно, яке виводиться на екран, якщо після виділення блоку Coil (див. рис. 2.1) в діалозі **Block Integrals** вибрати рядок **Lorentz force (J×B)**

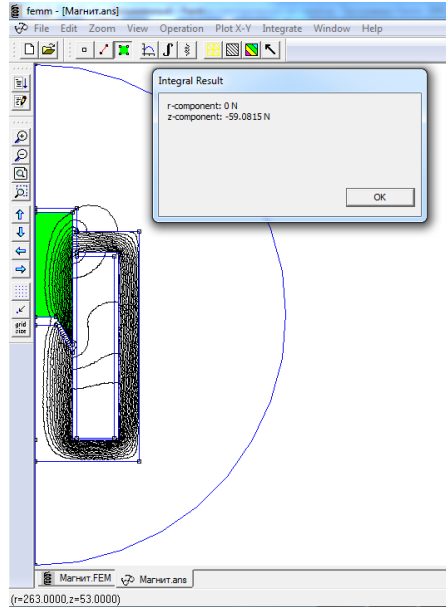


Рисунок 2.21 - Вікно, яке виводиться на екран, якщо після виділення блоку Coil (див. рис. 3.1) в діалозі **Block Integrals** вибрати рядок **Lorentz force (J×B)**

2.10.3 Розрахунок ланцюгових параметрів

Натиснути кнопку із зображенням декількох витків обмотки. На екрані виникне інформаційне вікно типу, показано на рис. 2.20, в якому будуть наведені такі результати ланцюгових розрахунків:

- струм $I = 0,6$ А;
- електрична напруга $U = 7,61248$ В;
- потокозчеплення $\psi = 1,40136$ Вб;
- індуктивність $L = 2,3356$ Гн;
- електричний опір $R = 12,6875$ Ом;
- потужність $P = 4,56749$ Вт.

Порівняння значення індуктивності, отриманого за допомогою ланцюгового розрахунку зі значенням, обчисленим по (2.4) з використанням **А.І**, показує їх повну ідентичність.

Закрити програму FEMM.

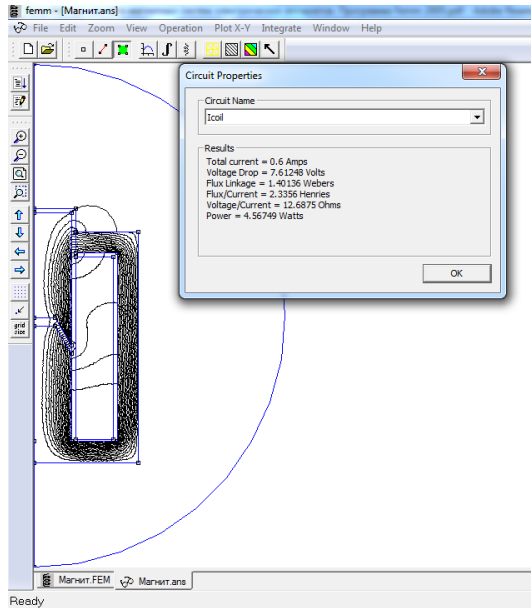


Рисунок 2.22 - Вікно, яке виводиться на екран при розрахунку ланцюгових параметрів.

2.11 Варіанти індивідуальних завдань

Варіант1, 6.

Задати за допомогою таблиці у окремому файлі властивості для матеріалу якоря, використати будь-які 10 значень. За матеріал якоря приймаємо сталь з властивостями, які наведені на рисунку 2.23.

Як користуватися таблицею: Обираємо по лівому стовпцю значення 1.4 по верхньому рядку 0.05, на їх перетині буде значення напруженості поля для індукції 1,45. Тобто для побудови точки кривої намагнічування будемо задавати $B=1,45$ Тл; $H=763$ А/м.

Розрахувати ланцюгові параметри.

В, Тл	$\Delta B, \text{Тл}$									
	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
$H \cdot 10^3, \text{А/м}$										
1.3	5.09	5.21	5.33	5.46	5.58	5.72	5.85	6.00	6.18	6.35
1.4	6.56	6.75	6.95	7.17	7.40	7.63	7.89	8.15	8.43	8.70
1.5	9.05	9.34	9.65	10.0	10.4	10.9	11.3	11.9	12.4	12.9
1.6	13.7	14.4	15.2	15.9	16.6	17.2	18.2	19.1	20.1	21.0
1.7	21.8	23.1	24.1	25.5	26.1	27.2	28.4	29.8	31.3	32.9
1.8	34.6	36.3	38.0	39.7	41.4	43.0	44.9	46.7	48.5	50.4
2.0	104	111	118	125	133	141	149	158	167	176

Рисунок 2.23 – Дані для варіанту №1, 6

Варіант 2, 7.

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	$H, \text{А/м}$									
0,2	44	45	47	48	49	50	51	52	54	55
0,3	56	57	58	59	60	61	63	64	65	66
0,4	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
0,5	77	78	79	80	81	83	84	86	87	89
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107
0,7	109	111	113	115	117	119	122	124	127	130
0,8	133	135	138	141	144	147	150	154	158	162
0,9	166	170	174	179	184	189	194	199	205	211
1,0	217	223	230	237	241	252	260	269	278	288
1,1	298	309	320	332	345	359	374	390	407	425
1,2	444	465	487	510	535	562	590	620	652	686
1,3	722	760	800	850	900	960	1030	1110	1200	1300
1,4	1410	1530	1660	1810	1970	2140	2320	2510	2710	2920
1,5	3140	3370	3610	3870	4140	4420	4710	5010	5320	5640

Рисунок 2.24 – Дані для варіанту №2, 7

Задати за допомогою таблиці у окремому файлі властивості для матеріалу якоря. За матеріал якоря приймаємо сталь із параметрами, які наведено на рис. 2.24. Обираємо будь-які 10 значень із таблиці.

Як користуватися таблицею: Обираємо по лівому стовпцю значення 1.4 по верхньому рядку 0.05, на їх перетині буде значення напруженості поля для індукції 1,45. Тобто для побудови точки кривої намагнічування будемо задавати $B=1,45 \text{ Тл}$; $H=2140 \text{ А/м}$.

Розрахувати ланцюгові параметри.

Варіант 3, 8.

Задати за допомогою таблиці у окремому файлі властивості для матеріалу якоря. Обираємо будь-які 10 значень із таблиці. За матеріал якоря приймаємо сталь з значеннями кривої намагнічування, які наведені на рис. 2.25.

$B, \text{Тл}$	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	$H, \text{А/м}$									
1,0	414	424	435	446	458	470	483	496	510	524
1,1	538	553	569	586	604	623	643	664	685	707
1,2	730	754	780	810	840	870	900	940	980	1030
1,3	1080	1140	1200	1270	1340	1410	1490	1590	1600	1720
1,4	1940	2060	2200	2340	2500	2700	2920	3140	3370	3600
1,5	3850	4060	4290	4520	4760	5000	5300	5650	6000	6350
1,6	6700	7100	7600	8100	8650	9300	10000	10700	11400	12200
1,7	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000	21000	22000
1,8	23000	24000	25000	26000	27000	28000	29000	30000	31200	32500
1,9	34000	35500	37000	38500	40500	42500	45000	51000	57000	63000
2,0	70000	77000	84500	92000	100000	108000	116000	124000	138000	140000
2,1	148000	156000	164000	172000	180000	188000	196000	204000	212000	220000
2,2	228000	236000	244000	252000	260000	268000	276000	284000	292000	300000

Рисунок 2.25 – Дані для варіанту №3, 8

Як користуватися таблицею: Обираємо по лівому стовпцю значення 1.4 по верхньому рядку 0.05, на їх перетині буде значення напруженості поля для індукції 1,45. Тобто для побудови точки кривої намагнічування будемо задавати $B=1,45 \text{ Тл}$; $H=2700 \text{ А/м}$.

Розрахувати ланцюгові параметри.

Варіант 4, 9.

Задати за допомогою таблиці у окремому файлі властивості для матеріалу якоря. Обираємо будь-які 10 значень із таблиці. За матеріал якоря приймаємо сталь марки 1311 з наступними властивостями:

<i>B</i> , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H</i> , А/м									
0,4	140	143	146	149	152	153	158	161	164	167
0,5	171	175	179	183	187	191	195	199	203	207
0,6	211	216	221	226	231	236	241	246	251	256
0,7	261	266	271	276	281	287	293	299	306	312
0,8	318	324	330	337	344	352	360	369	378	387
0,9	397	407	417	427	437	447	458	469	480	491
1,0	502	514	527	541	555	570	585	600	615	631
1,1	647	664	682	701	720	739	859	779	800	821
1,2	843	866	891	918	946	976	1010	1040	1070	1100
1,3	1140	1180	1220	1260	1300	1340	1380	1430	1480	1530
1,4	1580	1640	1710	1780	1860	1950	2050	2150	2260	2380
1,5	2500	2640	2790	2950	3110	3280	3460	3660	3880	4120
1,6	4370	4630	4910	5220	5530	5880	6230	6600	6980	7370
1,7	7780	8200	8630	9070	9630	10100	10600	11100	11600	12200

Рисунок 2.26 – Дані для варіанту №4, 9

Як користуватися таблицею: Обираємо по лівому стовпцю значення 1.4 по верхньому рядку 0.05, на їх перетині буде значення напруженості поля для індукції 1,45. Тобто для побудови точки кривої намагнічування будемо задавати $B=1,45$ Тл; $H=1860$ А/м.

Розрахувати ланцюгові параметри.

Варіант 5, 10.

Задати за допомогою таблиці у окремому файлі властивості для матеріалу якоря. За матеріал якоря приймаємо сталь з властивостями, які наведено на рис. 2.27.

Обираємо будь-які 10 значень із таблиці.

Як користуватися таблицею: Обираємо по лівому стовпцю значення 1.4 по верхньому рядку 0.05, на їх перетині буде значення напруженості поля для індукції 1,45. Тобто для побудови точки кривої намагнічування будемо задавати $B=1,45$ Тл; $H=1000$ А/м.

Розрахувати ланцюгові параметри.

B, Тл	$\Delta B, \text{Тл}$									
	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	$H \cdot 10^2, \text{А/м}$									
1.2	5.93	6.02	6.13	6.26	6.38	6.51	6.63	6.77	6.95	7.10
1.3	7.24	7.38	7.55	7.70	7.90	8.04	8.20	8.40	8.57	8.79
1.4	8.97	9.17	9.36	9.55	9.77	10.0	10.2	10.4	10.6	10.9
1.5	11.2	11.5	11.7	12.1	12.4	12.7	13.1	13.3	13.7	14.1
1.6	14.5	14.9	15.3	15.6	16.1	16.5	16.9	17.5	17.9	18.4
1.7	19.0	19.4	20.0	20.7	21.4	22.2	23.0	23.8	25.0	26.0
1.8	27.0	28.0	29.2	30.5	32.2	33.3	34.9	36.1	37.1	40.0
1.9	41.6	43.5	46.0	48.0	50.3	53.3	54.3	57.9	61.3	64.2
2.0	67.5	71.7	74.0	77.9	81.5	85.2	90.0	94.0	97.5	102
2.1	106	110	115	121	126	130	135	141	147	154
2.2	159	165	173	180	185	191	196	203	211	220
2.3	231	243	255	268	281	295	309	324	339	364

Рисунок 2.27 – Дані для варіанту №5, 10

Розрахувати ланцюгові параметри.

2.12 Контрольні питання

1. Опишіть введення ланцюгових властивостей в програмі FEMM.
2. Опишіть ідентифікацію властивостей блоків і ланцюгів в програмі FEMM.
3. Як будуються картини поля в програмі FEMM?

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Електромагнітні поля, параметри та процеси в електротехнічних пристроях : підручник / В. І. Мілих. 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.