

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт
в комп'ютерному класі з дисципліни ТОВ

зі застосуванням системи *ELCUT*
для моделювання електромагнітних процесів в
трансформаторах

для студентів спеціальностей 8.092203, 8.09206, 8.090801,
8.090603, 8.090701 денної форми навчання

2016

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт в комп'ютерному класі з дисципліни ТОЕ зі застосуванням системи *ELCUT* для моделювання електромагнітних процесів в трансформаторах для студентів спеціальностей 8.092203, 8.09206, 8.090801, 8.090603, 8.090701 денної форми навчання / Укладачі: С.М. Тиховод, Г.Н. Романіченко, О.Л. Пазюк – Запоріжжя: ЗНТУ, 2016,– 34 с.

Укладачі: С.М. Тиховод, доцент, доктор. техн. наук,
Г.М.Романіченко, старший викладач;
О.Л. Пазюк, завідувач лабораторією.

Рецензент: В.Ф.Безотосний, доцент, канд. техн. наук.

Відповідальний
за випуск Г.М.Романіченко, старший викладач.

ЗАТВЕРДЖЕНО
на засіданні кафедри
Теоретичної та загальної електротехніки
Протокол №8
від 20.06.2016.

Рекомендовано до видання
НМК Електротехнічного факультету
Протокол № 10
від 23.06.2016.

ЗМІСТ

Передмова	4
1 Призначення пакету <i>ELCUT</i>	5
1.1 Мета роботи	5
1.2 Загальні теоретичні відомості	5
2 Основні принципи роботи	7
2.1 Робота з меню	7
2.2 Робота з вікнами діалогу	8
2.3 Опис нової задачі	9
2.4 Створення моделі	12
3 Підготовка вихідних даних для моделювання електромагнітних процесів в трансформаторах	29
4 Рекомендована література	34

ПЕРЕДМОВА

Методичні вказівки містять у собі мету лабораторної роботи, короткі теоретичні поняття, перелік основних принципів роботи програмного пакету *ELCUT*, порядок роботи в наданому пакеті, порядок створення моделі протікання електромагнітних процесів під час роботи трансформатора, засоби інтерпретації результатів розрахунку.

Ці методичні вказівки призначені для кращої підготовки студентів з теоретичних основ електротехніки (*TOE*), раціонального використання часу, призначеного для самостійної роботи, поліпшенню впровадження комп'ютерів при виконанні й оформленні лабораторних робіт за допомогою комп'ютерного пакета *ELCUT*.

Завдання до лабораторної роботи задає викладач, що проводить заняття в комп'ютерному класі згідно із номером варіанту, що відповідає номеру студента в списку журналу академічної групи, складеному на початок семестру.

Лабораторну роботу необхідно оформити у вигляді комп'ютерного файлу із необхідними і достатніми текстовими поясненнями.

Після виконання й оформлення робота проходить рецензію у викладача, що веде практичні заняття з *TOE* та підлягає захисту перед комісією у термін, що встановлено учбовим планом.

1 ПРИЗНАЧЕННЯ ПАКЕТУ ELCUT

1.1 Мета роботи

Навчитися аналізувати електричні і магнітні поля, що утворюються під час роботи в електричному обладнанні, зокрема в трансформаторі, за допомогою комп'ютерного пакета *ELCUT*.

1.2 Загальні теоретичні відомості

ELCUT – це комплекс програм, який дозволяє вирішувати двовірні крайові задачі, що описуються рівняннями Пуассона щодо потенціалу. *ELCUT* дозволяє вирішувати плоскі (плоско паралельні) і вісі симетричні завдання за темами, в число яких входить магнітне поле постійних і змінних струмів.

За допомогою *ELCUT* користувач може описати задачу – її геометрію, властивості середовищ, джерела поля, граничні та інші умови, розв'язати цю задачу і проаналізувати рішення за допомогою графічних засобів. У плоско паралельній постановці зазвичай використовують Декартову систему координат $X-Y-Z$, причому передбачається, що геометрія розрахункових областей, властивості середовищ і параметри, що характеризують джерела поля, незмінні в напрямку осі Z . Внаслідок цього опис геометрії задачі, завдання властивостей, граничних умов і джерел, а також обробку результатів можна проводити в площині $X-Y$, яку називають *площиною моделі*. Прийнято, що вісь X спрямована зліва направо, а вісь Y – від низу до верху. Замість Декартової системи координат може бути використана і полярна система координат.

Редактор моделі дозволяє досить швидко створити модель досліджуваних об'єктів. Крім того, фрагменти моделі можна імпортувати із системи *AutoCAD* або інших систем проектування. Результати розрахунків можна переглядати в різних формах подання: лінії поля, кольорові карти, графіки різних величин уздовж довільних контурів та ін. Можна обчислювати різні інтегральні величини на заданих користувачем лініях, поверхнях або об'ємах. Постпроцесор забезпечує вивід таблиць і рисунків у файли для подальшої обробки або якісної графічного друку.

ELCUT дозволяє розв'язувати плоскі й вісесиметричні задачі з наступних тем:

- електростатика;
- електричне поле змінних струмів у неідеальному діелектрику;
- розтікання струмів у провідному середовищі;
- лінійна й нелінійна магнітостатика;
- магнітне поле змінних струмів (з урахуванням вихрових струмів);
- нестационарне магнітне поле;
- лінійна й нелінійна, стаціонарна й нестационарна теплопередача;
- лінійний аналіз напружено-деформованого стану;
- зв'язані завдання.

Вісі симетричні завдання вирішуються в циліндричній системі координат $Z-R-\Theta$, порядок проходження осей обраний по аналогії з плоскопаралельними завданнями. Фізичні властивості і джерела поля передбачаються незалежними від кутової координати. Робота з моделлю проводиться в площині $Z-R$. Вісь обертання Z спрямована зліва направо, вісь R – від низу до верху.

Для застосування пакету *ELCUT* його потрібно встановити на персональний комп'ютер. Пакет *ELCUT* в студентському варіанті поширюється безкоштовно. Його можна завантажити на сайті виробника: <http://www.tor.ru/elcut/>. В наданих методичних вказівках використана студентська версія *ELCUT* 6.1.

2 ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ РОБОТИ

2.1 Робота з меню

Після запуску програми *ELCUT* на екрані монітора з'являється вікно, у верхній частині якого розташовані *головне меню* і *кнопки* для прискорення роботи (рис.2.1). У правій частині вікна знаходиться *довідкова панель*. При бажанні її можна закрити, клацнувши по хрестичку розташованому в правому верхньому куті. Якщо ви вимкнули довідку, то повернути її назад можна за допомогою клавіш

Ctrl + F1, або натисканням кнопки  на панелі інструментів.

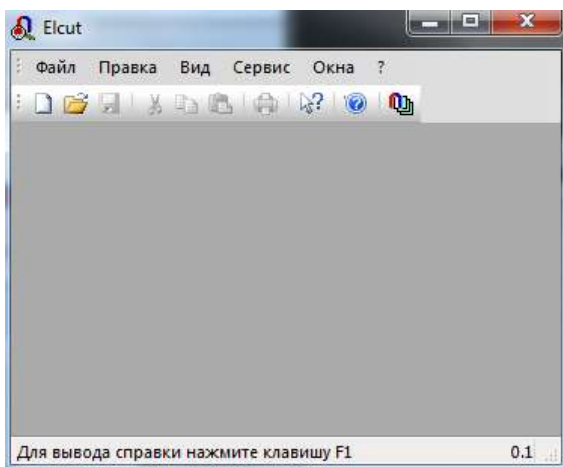


Рисунок.2.1 – Головне меню і кнопки програми ELCUT

Головне Меню містить підменю: **Файл, Правка, Вид, Сервіс, Вікна**

та . Кожне підменю має відповідні *пункти*. Вибір пункту меню здійснюється за допомогою миші або «гарячих» клавіш (Рис. 2.2).

Поєднання «гарячих» клавіш і їх призначення наводиться у вигляді підказки в Меню.

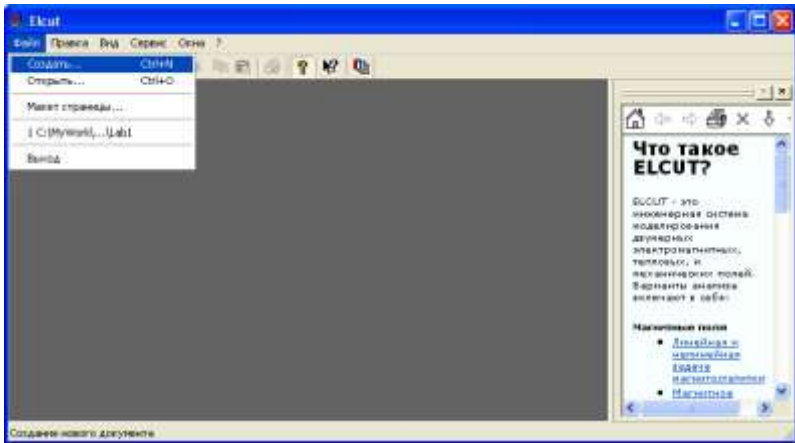


Рисунок 2.2 – Відкриття меню і робота з «гарячими» клавішами

2.2 Робота з вікнами діалогу

Якщо в кінці назви пункту меню є три крапки, то це означає, що за ним існує *вікно діалогу*, призначене для запиту додаткової інформації. Наприклад, після клацання миші по пунктах **Файл/Создать...** з'являється вікно (Рис 2.3), в якому слід вибрати відповідне поле. Деякі поля можуть бути в даний момент недоступні, тоді вони виділяються сірим кольором.

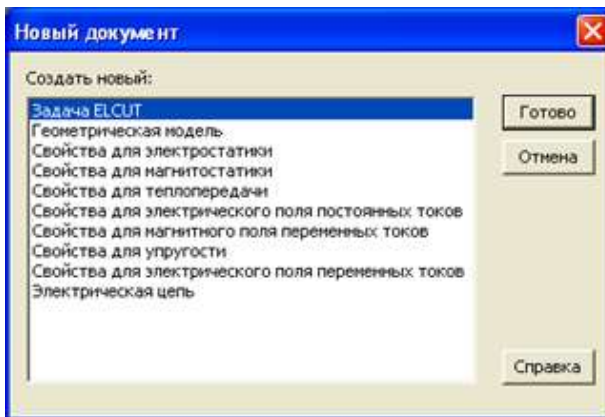


Рисунок 2.3 – Приклад вікна діалогу

2.3 Постановка нової задачі

Для того щоб розв'язати задачу в ELCUT, потрібно її описати в термінах, які зрозумілі для програми. Розглянемо цей процес на прикладі однофазного трансформатора (Рис.2.4).

Трансформатор містить дві обмотки: первинну, до якої підключається джерело, і вторинну, до якої підключається навантаження. Трансформатор є об'ємним пристроєм, але система *ELCUT* може виконувати моделювання *тільки плоских полів*, тобто полів, які незмінні уздовж осі Z. Хоча це є істотним обмеженням, але для придбання первинних навичок моделювання необхідно освоїти моделювання плоских полів.



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд однофазного трансформатора

Вид трансформатора в розрізі наведено на рис. 2.5. На ньому пояснені позначення елементів конструкції, і геометричні розміри:

- 1 – магнітопровід;
- 2 – первинна обмотка, до якої підключається джерело напруги;
- 3 – вторинна обмотка, до якої приєднується навантаження;
- 4 – ізоляція між обмотками (канал розсіювання);
- 5 – ізоляція поверх первинної обмотки.

Для самостійної роботи кожному зі студентів ці розміри задає викладач.

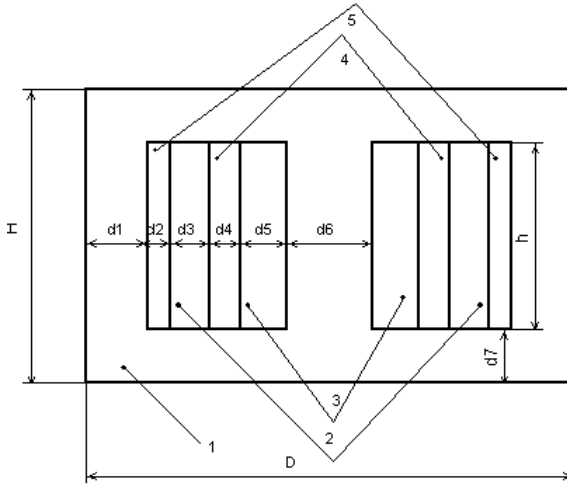


Рисунок 2.5 – Однофазний трансформатор в розрізі

Потрібно побудувати картину магнітного поля і розрахувати струми в обмотках в різних режимах. Потрібно також виконати інженерну інтерпретацію отриманих результатів.

Опис нового завдання починається з меню **Файл/ Создать задачу (Ctrl + N)**. В новому вікні, що з'явився (**Создание задачи**). В рядок **Имя файла задачи** слід ввести ім'я нового завдання (наприклад: Tr1_2D). Це вікно, крім того, дозволяє визначити місце зберігання файлу нового завдання. При необхідності зміна розташування нового завдання проводиться клацанням покажчика миші по кнопці **Обзор**. Після цього з'явиться нова форма **Создание новой задачи**, яке дозволяє визначити місце розташування файлу.

Рекомендується запам'ятати місце розташування завдання.

Після того як місце зберігання нового завдання визначено, клацніть покажчиком миші по кнопці **Сохранить і Далее** (Рис.2.6).

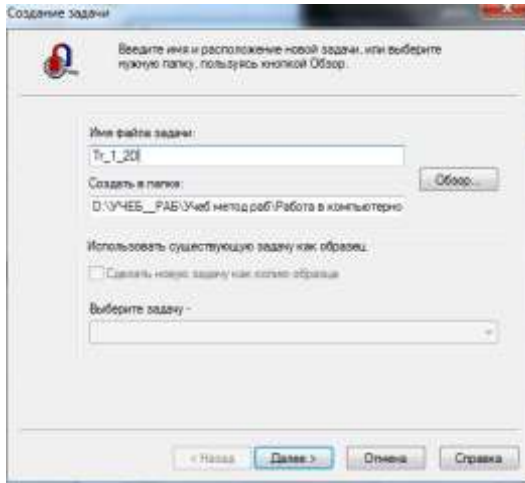


Рисунок 2.6 – Форма «Створення нового завдання»

У новому вікні **Создание задачи**, (Рис.2.7), яке з'явиться після створення завдання, в рядку тип завдання виберіть **Магнітне поле змінних струмів**, клас моделі – **Плоская**, розрахунок – **Обычный**. Вікно містить групи кнопок: **Единицы длины** і **Координаты**. Обираємо **Сантиметри** і **Декартові координати** (Рис. 2.7). Задамо розмір моделі по осі Z - товщину пакета магнітопроводу: $L_z = 20$ см.

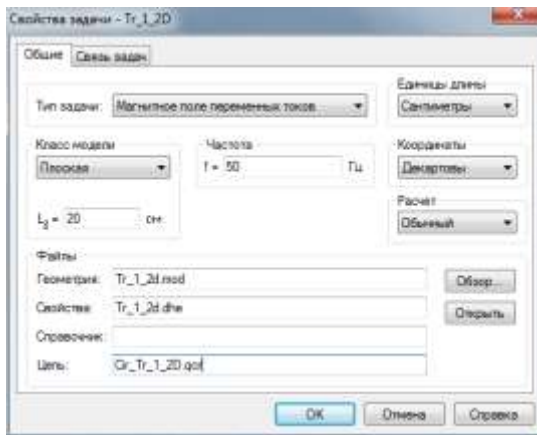


Рисунок 2.7 – Вікно опису завдання ELCUT

В системі *ELCUT* можна до польової задачі підключити електричний ланцюг. У вікні «Цепь» задамо ім'я ланцюга (наприклад, *Cir_Tr1_2D*), яку ми створимо пізніше. Клацання по кнопці **ОК** означає завершення діалогу.

З'являється вікно з «деревом» завдання. За замовчуванням воно розташовується в лівій частині головного вікна *ELCUT*. При необхідності його можна перемістити. Рекомендується відразу зберегти створений опис нового завдання. Для цього потрібно увійти в меню **Файл/Сохранить все файлы задачи**. *ELCUT* запише файл з розширенням **.rbm** в обране раніше місце на диску або іншому носії.

2.4 Створення моделі

Створення моделі починається з опису геометрії конструкції, що збуджує магнітне поле. Для цього правою кнопкою миші потрібно клацнути по полю **Геометрия** в дереві завдання в меню, що розкрилося та вибрати **Открыть**. Оскільки файлу «*Tr_1_2D.mod*» ще немає, то з'явиться вікно з відповідною пропозицією, з яким потрібно погодитися. Після чого відкриється вікно роботи з моделлю (Рис. 2.8).

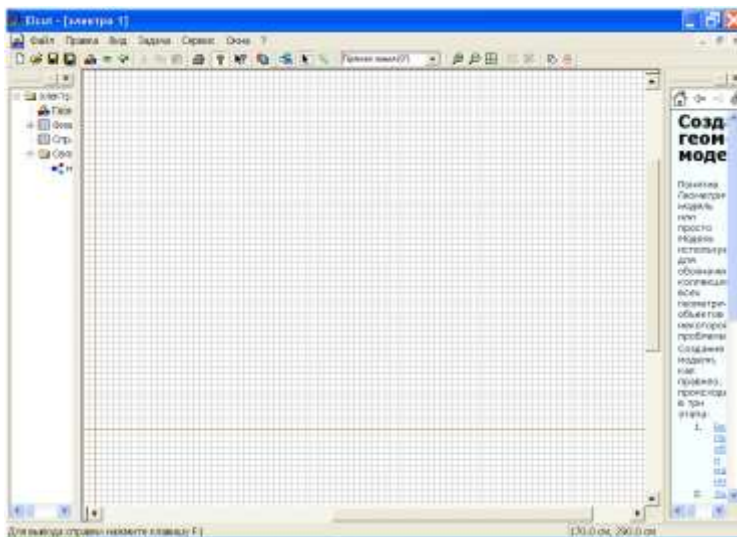


Рисунок 2.8 – Меню і вікно роботи з моделлю

Після того, як створено поле для геометричного представлення моделі, слід приступити до опису конструкції, що збудує магнітне поле.

Для цього, перш за все, потрібно визначити розміри розрахункової області. Пояснюємо, що мається на увазі. Як відомо, магнітне поле в трансформаторі локалізується в феромагнітному магнітопроводі і в області обмоток. Обмежений простір, для якого проводиться розрахунок поля, називається *розрахунковою областю*. Розрахункова область може бути виділена будь-якої геометричної фігурою: квадратом, прямокутником або колом (в залежності від геометрії завдання). Фігура будується з відрізків ліній. Ці лінії називаються *ребрами*. Кінцівки ребер називаються *вершинами*.

Ми використовуємо студентську версію *ELCUT*, яка відрізняється від професійної версії обмеженою кількістю вузлових точок розрахункової сітки $Nu \leq 255$. Тому щоб заощадити вузли скористаємося симетрією конструкції і в моделі розглянемо тільки верхню половину конструкції трансформатора.

Відповідно до умов даної задачі підготуємо робоче поле, щоб модель зайняла найбільшу частину цього поля. З цією метою виконайте наступні операції:

- Переконайтеся, що на панелі інструментів присутні кнопки

Крупнее , **Мельче** , **Показать все** ... Якщо цих кнопок з якихось причин немає, то увійдіть у меню **Задача/Геометрическая модель**, після чого кнопки з'являться;

– Натисніть кнопку  **Показать всё**. Щоб зменшити масштаб (зробити зображення більшим) натисніть кнопку **Крупнее** на панелі *інструментів*. Після чого слід натиснути ліву кнопку миші і, не відпускаючи, перетягнути покажчик миші так, щоб усередині рамки, яка виникла, містилася прямокутна область, необхідна для створення моделі. Після чого відпустіть кнопку. Можна вчинити інакше. Клацнути лівою кнопкою миші всередині вікна. Зображення збільшиться в 2 рази відносно точки, в якій був зроблено клацання. Клавіші: **CTRL** + еквівалентно клацанню в центрі вікна моделі. Клавіші: **CTRL** - діє в протилежному напрямку;

– Ребра моделі зручно розташовувати по лініях сітки. Щоб змінити розміри клітин сітки клацніть *правою* кнопкою миші всередині вікна і клацніть на кнопці **Сетка привязки**. Там в потрібних полях виберіть потрібний розмір клітин. Сітка прив'язки дозволяє розташувати елементи моделі з необхідною точністю. Однак не треба прагнути зробити її надмірно високою. У нашій задачі цілком прийнятна точність 1,0 см. Це означає, що розміри всіх об'єктів, а також відстань між ними буде кратною до 1,0 см;

– Нехай трансформатор має такі розміри: $D = 40$ см, $H = 30$ см. Перемістіть покажчик миші в точку (0,0), стежте за її координатами в *правому нижньому* кутку вікна. Не обов'язково потрапити точно в зазначену точку, досить клацнути мишею поблизу від точки лівіше і нижче від неї;

– Клацніть лівою кнопкою миші і перетягніть її в точку (50,20);

– Вікно моделі збереже необхідні розміри.

Відлік координат ведеться від точки, яка, за замовчуванням, має координати (0,0). Міняти її положення в даній задачі не має сенсу, тому вікна **Позиция начальной точки** залишимо без зміни. Клацання по кнопці **ОК**, завершить діалог.

Тепер потрібно приступити до опису розташування об'єктів, їх розмірів, і т.п. В системі *ELCUT* це називають: *опис геометрії моделі*. По-перше, потрібно вказати *кордони* моделі. Для цього використовують так звані *ребра*. Створимо ребра, що утворюють кордони моделі:

– Натисніть кнопку  на панелі інструментів, щоб перевести вікно моделі в режим вставки. Повернутися назад в режим виділення можна за допомогою кнопки .

– Щоб створити ребро «**ось симметрії**» клацніть кнопку  і за курсором буде слідувати червона крапка. Встановимо її в точці (0,0) і перетягнемо її в точку (40,0). Ребро з'явиться на екрані відразу, як тільки ви відпустите кнопку миші;

– Для створення ребра правої межі трансформатора повторіть крок 2 в точках (40,0), (40, 15). Для ребра верхньої межі повторіть крок 2 в точках (40,15), (0,15), а для ребра лівої межі в точках (0, 15), (0,0). Порядок створення ребер не має значення. Якщо точка, в яку Ви хочете клацнути, знаходиться за межами екрану, то використовуйте

смугу прокрутки. Кнопки **CTRL+Z** і **CTRL+Y** дозволяють скасувати і повернути результат попередньої дії. Якщо ви зробили помилку, тобто ввели непотрібні вершини і ребра, то їх можна видалити пізніше;

– Натисніть кнопку , щоб завершити режим вставки.

Зазначений спосіб побудови вершин хоча і простий, але інколи вимагає копіткої праці. Можливо, що для когось простішим буде інший спосіб. Додати вершини можна з меню **Правка/Добавить вершины**. Після того як з'явиться вікно, яке показано на Рисунок 2.9 (це вікно можна також викликати з контекстного меню).

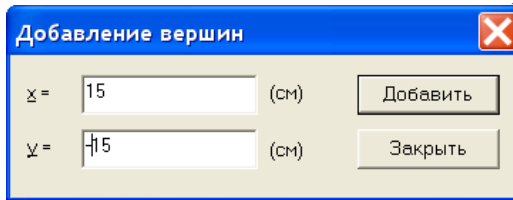


Рисунок2.9 – Вікно для додавання вершин

Далі потрібно ввести в нього відповідне місце вершини і натиснути кнопку **Добавить**. Після того, як всі вершини будуть введені, вікно слід закрити (натиснути кнопку **Заккрыть**). Ми отримаємо вікно з ребрами, що обмежили розрахункову область (Рис.2.10).

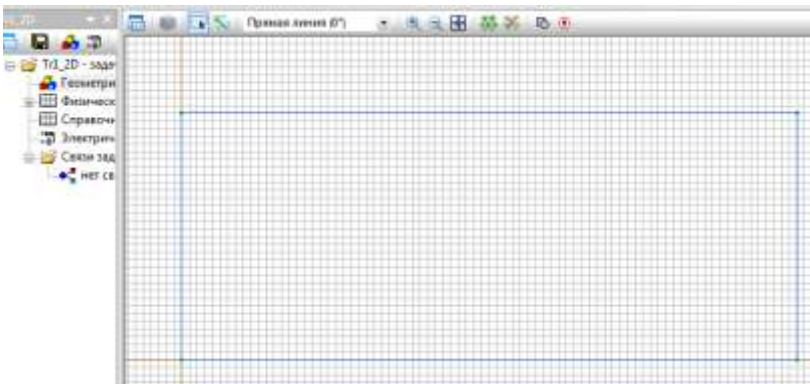


Рисунок 2.10 – Вікно з ребрами, що обмежують розрахункову область

Якщо Ви випадково створили зайві ребра або вершини, їх можна вилучити зараз. Для цього:

- Натисніть кнопку  ;
- Утримуючи клавішу **CTRL** виділіть клацанням миші об'єкти, які треба вилучити. Якщо Ви виділили непотрібний об'єкт, клацніть його мишею ще раз, щоб зняти виділення. Відпустіть клавішу **CTRL**;
- Натисніть **DEL** (або виберіть команду **Удалить выделенное** з меню **Правка** або контекстного меню). Об'єкти, які було призначено для вилучення, негайно зникнуть з екрану.

Побудуємо внутрішні контури магнітопроводу за аналогією з побудовою кордону моделі – отримаємо картину, як на Рис. 2.11.

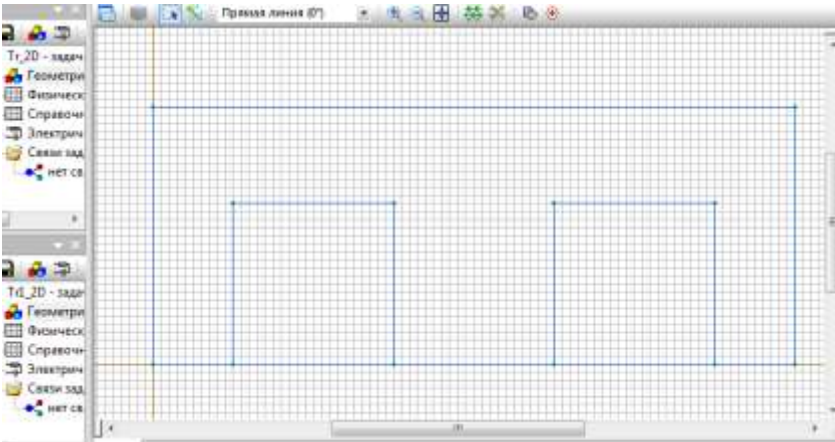


Рисунок 2.11 – Вікно з ребрами, що обмежують магнітопровід

Тепер залишилося побудувати модель обмоток. Обмоток в трансформаторі дві. Первинна обмотка високої напруги завжди розташовується поверх обмотки низької напруги. Обмотки можуть містити різну кількість витків, розташованих декількома прошарками. Для підвищення точності розрахунку бажано зобразити кожен виток. При цьому знадобилася б дуже дрібна сітка і значне число розрахункових вузлів. Пам'ятаємо, що ми використовуємо студентську версію *ELCUT*, яка має обмежену кількість вузлових точок розрахункової сітки ($Nu \leq 255$). Тому щоб заощадити вузли вважатимемо, що кожна обмотка складається з чотирьох шарів, а кожен шар містить по одному витку. Таке спрощення не призведе до

істотної помилку, якщо в подальшому перерахувати параметри джерела і навантаження.

Модель обмоток будується будь-яким із зазначених вище способів. У результаті повинно отримати модель, що зображена на Рис. 2.12. Модель містить магнітопровід, кожен шар обмоток і ізоляційні проміжки.

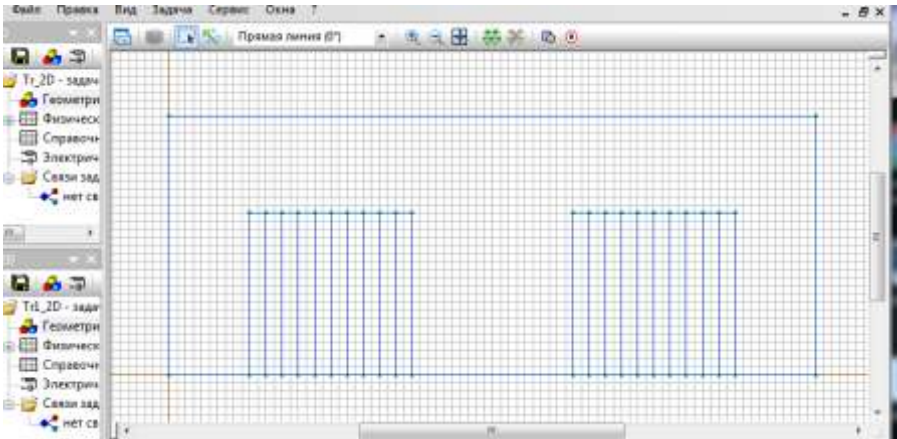


Рисунок 2.12 – Геометрична модель трансформатора

Геометрична модель повністю завершена. Зберігаємо її натисканням комбінації клавіш **Ctrl + S**, або через меню **Файл. ELCUT** збереже геометричну модель з розширенням ***.mod**.

Надалі нам буде зустрічатися поняття **Блок**. **Блок** – це під область геометричної моделі, можливо та, що має багато зв'язків. Блоки обмежені ребрами, які створюються в процесі опису моделі. В даному випадку блоками є область, що обмежує магнітопровід, області обмоток і області ізоляційних проміжків.

Після того як геометрія моделі визначена, слід надати імена геометричним об'єктам, тобто визначити **мітки** і привласнити їх елементам моделі. Мітки необхідні для того, щоб користувач міг звертатися до конкретного елементу моделі для опису властивостей його матеріалу, або опису джерел поля, а також граничних умов. Крім того, програма **ELCUT** використовує ці мітки при розв'язанні задачі.

Довжина мітки, тобто імені, обмежена 16 символами (латиницею або кирилицею).

У розглянутій задачі містяться три матеріали з різними властивостями: «сталь» – матеріал магнітопроводу; «ізоляція1» – ізоляція поверх первинної обмотки; «ізоляція2» – ізоляція між обмотками; «обмотка1» – первинна обмотка і «обмотка2» – вторинна обмотка. Оскільки деякі блоки розташовані симетрично зліва і праворуч від стрижня, то будемо вважати, що це різні блоки. Відповідно позначимо блоки «ізоляція1_л», «ізоляція2_л», «обмотка1_л» і «обмотка2_л» для лівих областей і «ізоляція1_п», «ізоляція2_п», «обмотка1_п» і «обмотка2_п» – це для правих областей. Для присвоєння міток блокам виконайте наступне:

- Клацніть мишею всередині області магнітопроводу (Рис 2.12). Блок стане виділеним заливкою червоного кольору (Рис 2.13).
- Двічі клацніть лівою кнопкою по виділеній області, відкриється вікно **Свойства выделенных объектов**.
- Після появи форми **Свойства выделенных объектов** (Рис.2.14), у вікно **Метка** помістіть ім'я мітки, в даному випадку «сталь».
- Натисканням кнопки **ОК** слід закінчити діалог.

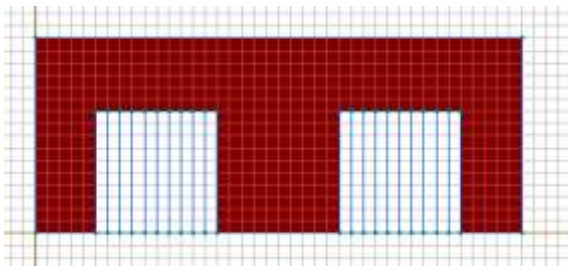


Рисунок 2.13 – Виділення блоку «Сталь»

Точно так само потрібно вчинити з блоками «ізоляція1_л», «ізоляція2_л», «ізоляція1_п», «ізоляція2_п».

Блоки кожної обмотки складаються з чотирьох під областей. Щоб виділити відразу всі під області блоку «обмотка1_л» необхідно, утримуючи клавішу **CTRL** підвести курсор лівіше і нижче блоку «обмотка1_л» клацнути лівою кнопкою миші і перевести курсор вище і правіше за цей блок. Весь блок виявиться виділеним (Рис. 2.15).

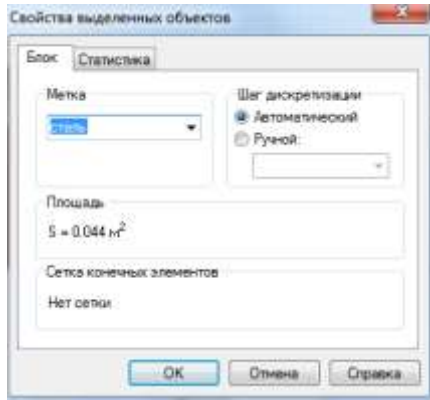


Рисунок 2.14 – Присвоення мітки блоку «сталь»

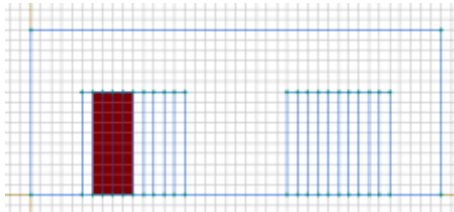


Рисунок 2.15– Виділення блоку «обмотка1_л»

Клацніть правою кнопкою по виділеній області, відкриється вікно, в якому натисніть на графі **Свойства**. Відкриється вікно **Свойства выделенных объектов**. В цю форму, у вікно **Метка** помістіть ім'я мітки, в даному випадку «обмотка1_л». Точно так само потрібно вчинити з блоками «обмотка1_п», «обмотка2_л», і «обмотка2_п».

Зверніть увагу, що у вікні опису завдання в розділі **Метки блоков** з'явилися створені мітки (Рис. 2.16). Поруч з ними знаходяться значки (знаки питання), що показують, що властивості мітки до кінця не визначені. Дійсно, ми поки не вказали фізичних властивостей блоків, що необхідно для чисельного розв'язку задачі.

Обов'язково перевірте відповідність міток всіх блоків геометричній моделі. Для цього по черзі клацайте в лівому вікні по мітках блоків і простежте, щоб відповідні блоки виділялися в потрібних областях геометричної моделі.

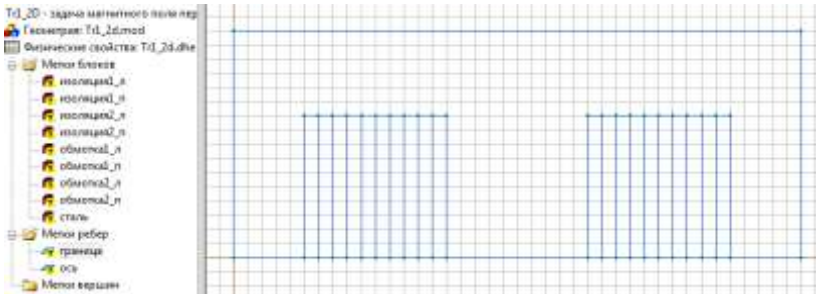


Рисунок 2.16 – Створення міток блоків

Крім міток блоків потрібно присвоїти мітки всім ребрам. Мітки ребер використовуються для завдання граничних умов на зовнішніх і внутрішніх кордонах області. У нашому випадку потрібно задати граничні умови для ребер «ось» і «граница».

Щоб прикріпити мітку ребру «ось» треба:

- утримуючи клавішу **CTRL** підвести курсор лівіше і нижче ребра «вісь» клацнути лівою кнопкою миші і перевести курсор вище і правіше за це ребро. Все ребро виявиться виділеним.
- Підвести курсор до виділеного ребра і натиснути правою кнопкою миші. У вікні **Свойства выделенных объектов** ввести мітку «ось» (рис. 2.17).

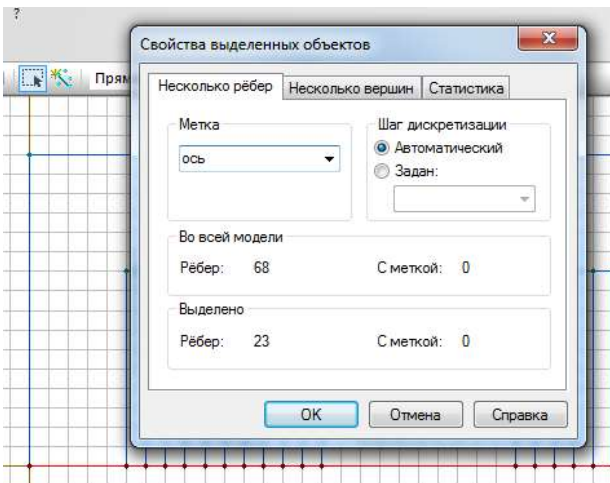


Рисунок 2.17 – Виділення ребра «ось» і завдання йому мітки

Щоб прикріпити мітку групі ребер «**граница**» треба:

- утримуючи клавішу **CTRL** по черзі клацнути лівою кнопкою миші по всіх ребрах кордону. Всі ребра виявляться виділеними.
- Підвести курсор до виділених ребрах і натиснути правою кнопкою миші. У вікні Властивості виділених об'єктів ввести мітку «**граница**».

Після того, як зазначені мітки будуть створені, до дерева завдання (Рис.2.18) додадуться мітки «**ось**» і «**граница**» із прапорцями у вигляді знака запитання, які дають зрозуміти, що опис міток ще не закінчене.

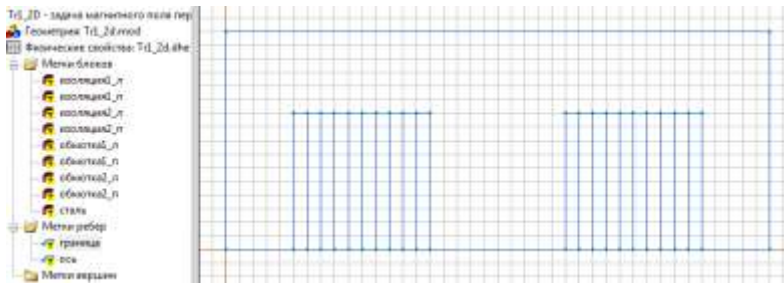


Рисунок 2.18 – Мітки моделі з незаданих властивостями

Перейдемо до визначення *фізичних властивостей* об'єктів моделі. Почнемо з об'єкта «сталь».

Для завдання фізичних властивостей магнітопроводу, двічі клацнемо у вікні опису завдання по мітці «сталь». У вікні **Свойства метки блока сталь** (Рис 2.19) введіть магнітну проникність сталі ($\mu_x=2000$). Для початку будемо вважати магнітну проникність постійною величиною (в подальшому можна буде використовувати криву намагнічування сталі, але час розрахунку значно збільшиться). Оскільки сталь це ізотропний матеріал, то його відносна магнітна проникність в різних напрямках є постійною величиною, що *ELCUT* відобразить автоматичним появою $\mu_y=2000$. Вихрові струми в сталі враховувати не будемо, тому електропровідність сталі задамо такою, що дорівнює нулю. Цю задачу зручно розв'язувати в Декартовій системі координат, тому залишимо розділ **Координати** без зміни.

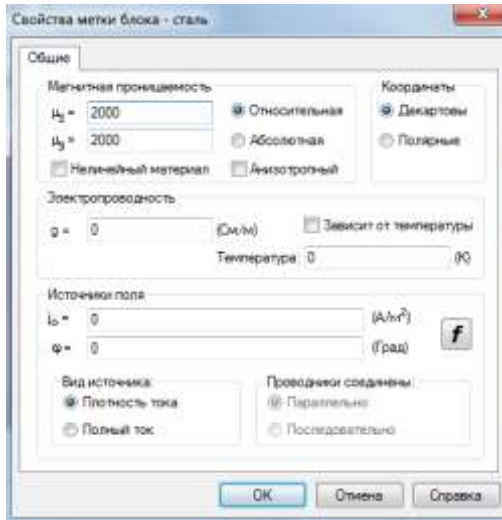


Рисунок 2.19 – Вікно для завдання фізичних властивостей об'єкта з міткою «сталь»

Те ж саме зробимо для блоків «ізоляція1_л», «ізоляція2_л», «ізоляція1_п», «ізоляція2_п», Різниця полягає лише в тому, що для них $\mu_a = 1$.

Зверніть увагу, що значки, які стоять поруч з іменами міток, у вікні опису завдання, змінилися. Це говорить про те, що фізичні властивості кожної мітки визначені.

Для завдання фізичних властивостей первинної обмотки двічі клацнемо у вікні опису завдання по мітці «**обмотка1_л**». У вікні **Свойства метки блока обмотка1_л** введіть магнітну проникність ($\mu_a=1$), та еквівалентну електропровідність 40000000. При використанні приєднаної вітки джерела задаються у властивостях цих віток. Треба натиснути на кнопку, відповідну послідовному з'єднанню провідників. Точно так само потрібно вчинити з блоками «обмотка1_п», «обмотка2_л», і «обмотка2_п».

Залишилося задати фізичні властивості на ребрах.

Двічі клацнемо у вікні опису завдання по мітці «**ось**». У вікні **Свойства метки ребра ось** (Рис 2.20) поставте позначку у вікні **Касательное поле: $H_t = \sigma$** і введіть $\sigma = 0$. Це означає, що на осі симетрії вектор магнітної індукції, що спрямований по дотичній, буде відсутнім, а існує тільки вектор, що спрямований по нормалі.

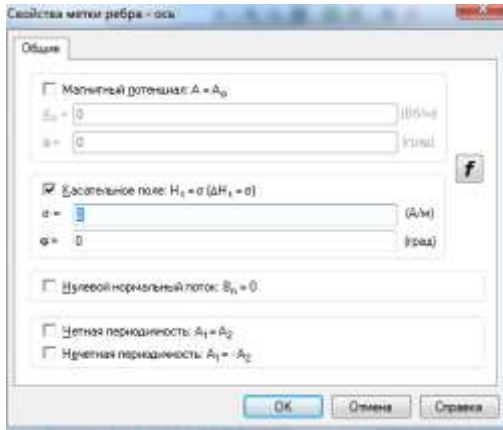


Рисунок 2.20 – Введення умови на осі симетрії

Двічі клацнемо у вікні опису завдання по мітці «граница». У вікні **Свойства метки ребра - граница** (Рис 2.21) поставте позначку у вікні **Нулевой нормальный поток: $B_n=0$** . Це означає, що поверхню магнітопроводу вектор магнітної індукції не перетинає, а спрямований він по дотичній до поверхні.

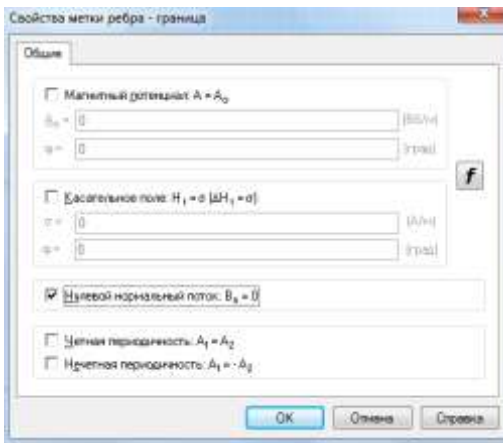


Рисунок 2.21 – Введення умови на границі магнітопроводу

Після цього діалог для даного завдання завершується (ОК).

Зверніть увагу на зміну прапорців міток ребер. Їх новий вигляд вказує на те, що мітки повністю визначені.

Після того як мітки створені потрібно приступити до створення *сітки*. Сітка утворюється вузлами. Лінії, що з'єднують вузли, поділяють всю область завдання на окремі ділянки. Для кожного осередку програма визначає параметри поля. Звичайно, чим більше кількість вузлів, тим вище точність розв'язання. У студентській версії *ELCUT* кількість вузлів сітки обмежена в 255. Отже для задач, які мають складну модель, треба обмежитись наближеним рішенням.

Для того, щоб створити сітку клацнемо правою кнопкою миші по моделі, і в контекстному меню **Построить сетку/во всех блоках**. В даному випадку побудова завершиться появою вікна, що вказує про перевищення кількості вузлів (Рис. 2.22).



Рисунок 2.22 – Повідомлення при створенні сітки

Крок вузлів програма створила автоматично. Виходом із ситуації є збільшення кроку вузлів. Щоб звести помилки до мінімуму поступимо таким чином: збільшимо крок вузлів там, де поле мало залежить від координат. Для цього клацнемо правою кнопкою по верхньому правому вузлу границі і клацнемо по пункту «Свойства». Відкриється вікно «Свойства выделенных объектов». У графі «Шаг дискретизации» клацнемо по кнопці «Задания» і поставимо значення 7 (Рис. 2.23).

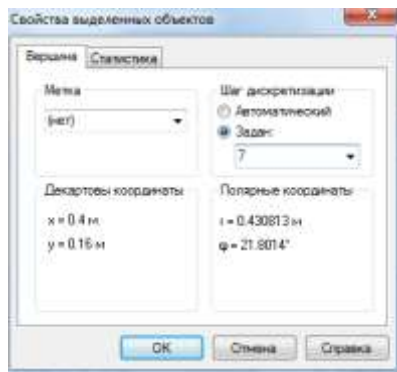


Рисунок 2.23. Вікно для зміни кроку вузлів

Точно так вчинимо з верхнім лівим вузлом границі. У цих точках поле змінюється незначно. Змінимо крок дискретизації і в інших вузлових точках.

У вузлах ребер з'являться окружності з радіусом, що дорівнює кроку дискретизації (Рис. 2.24). Тепер можна побудувати сітку в блоках відповідно до описаного раніше методом.

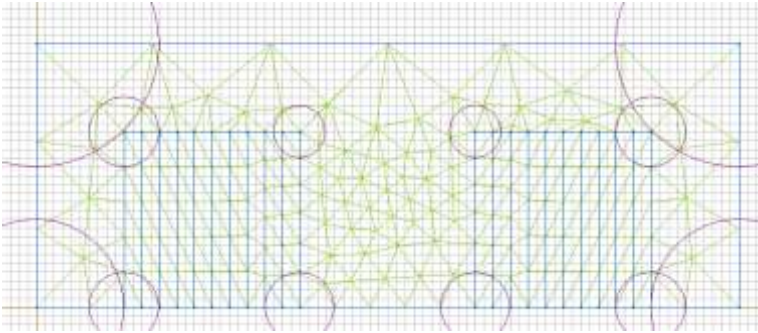


Рисунок 2.24- Створення сітки

Залишилося тільки створити електричний ланцюг, що містить джерело синусоїдальної ЕРС, навантаження і підключити їх до трансформатора. Двічі клацнемо у вікні опису завдання по мітці «Електричне коло». У вікні видається повідомлення, що файл опису кола не існує і пропонується його створити, з чим потрібно погодитися. Відкриється графічне вікно редактора електричного кола. Зверху цього вікна зображені елементи, які можна включати в коло. Клацнемо по зображенню джерела ЕРС, переведемо курсор в потрібну точку поля і клацнемо лівою кнопкою миші. В полі з'явиться обране джерело. Так само вставимо в схему кола резистор, що задає опір джерела і проводів, підключених до первинної обмотки. Тепер підключимо саму первинну обмотку. Клацнемо по значку , що означає «Вставити блок моделі», переведемо курсор в потрібне місце і клацнемо лівою кнопкою миші. В полі з'явиться блок моделі «Новая метка 1». Оскільки в моделі трансформатора первинна обмотка представлена двома блоками (– лівим і правим), аналогічно вставимо ще один блок. З'єднаємо всі елементи послідовно. Оскільки

струми в лівій і правій частинах обмотки протікають в різних напрямках блоки моделі обмотки з'єднуються зустрічно (Рис. 2.26).

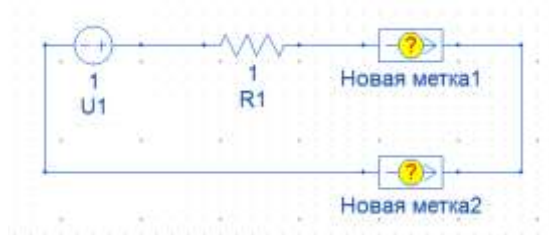


Рисунок 2.25 – Створення кола з підключеною первинної обмоткою

Задамо значення елементів кола. Кладнемо правою кнопкою по блоку «Новая метка 1» і у вікні кладнемо по графі «Свойства». У вікні меню «Блок» виберемо «обмотка1_л». Обраний блок змінить свою назву. Точно так же блоку «Нова мітка 2» задамо значення «обмотка1_п». Двічі клацнемо лівою кнопкою миші по джерелу U1 і у вікні, що з'являється, задамо напругу 100 В. Двічі клацнемо лівою кнопкою миші по резистору 1 і у вікні задамо опір 0,01 Ом. Аналогічно складемо схему вторинної обмотки. В результаті отримаємо електричну схему кола, яке зображено на рис. 2.26.

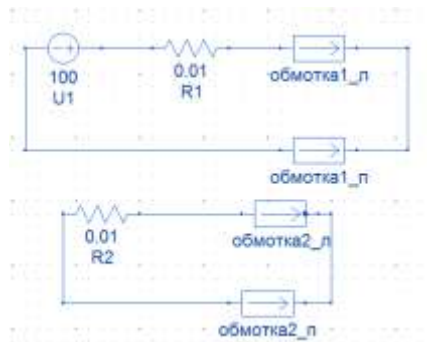


Рисунок 2.26 – Електричне коло, що підключено до трансформатора

Тепер все готово до чисельного розв'язку задачі. Для того, щоб приступити до розв'язання задачі, слід натиснути кнопку , яку розташовано на панелі інструментів. Після цього з'явиться повідомлення про необхідність збереження файлів, з яким потрібно погодитися, і проводиться рішення задачі.

Пропонується подивитися на результат. Після дворазового клацання по кнопці «Да» з'явиться картина поля, точніше безліч екіпотенціальних ліній (Рис. 2.27).

На цьому розв'язок задачі не закінчується. Починається процес *аналізу результатів розв'язку*.

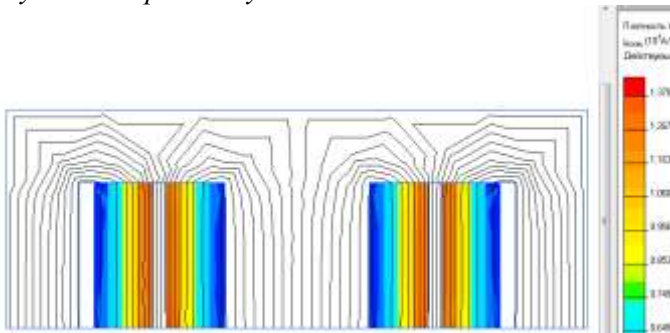


Рисунок 2.27 – Результати розв'язку завдання у вигляді екіпотенціальних ліній

Результат розв'язку задачі можна відобразити не тільки у вигляді безлічі екіпотенціальних ліній, але і у вигляді силових ліній магнітної індукції і напруженості. Для цього слід увійти в меню **Вид/Свойства картины поля**. У вікні встановити потрібні прапорці відповідно до бажаного вигляду результатів (наприклад, як на Рис. 2.28).

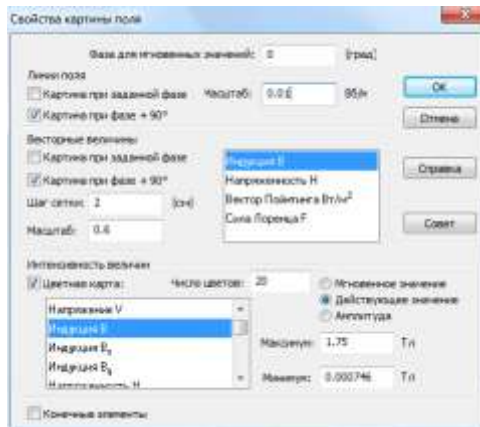


Рисунок 2.28 – Вибір способів графічного відображення параметрів магнітного поля

Завершення діалогу (кнопка **ОК**) призведе до появи відповідного графічного відображення магнітного поля (Рис. 2.29).

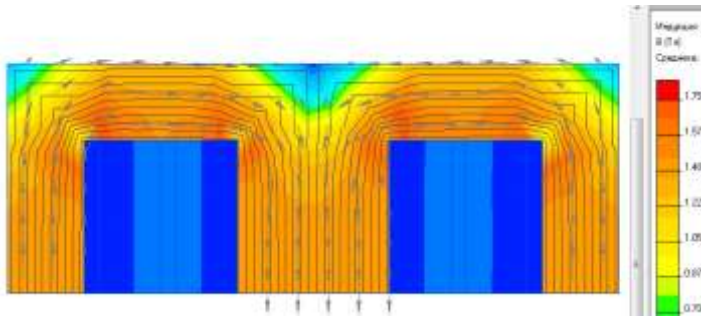


Рисунок 2.29 – Відображення ліній магнітної індукції і векторів в робочому режимі.

Зверніть увагу, що кольори різних областей різні. Це говорить про те, що значення магнітної індукції в цих областях змінюються.

Довжини векторів по поверхні рисунка також відрізняються. Таким чином *ELCUT* інформує про величину магнітної індукції поля.

Змінимо режим роботи трансформатора. Зробимо клік по значку «Електричне коло» в дереві завдання і в 100 разів зменшимо опір навантаження у вторинній обмотці. Це буде режим, близький до короткого замикання. Щоб цей режим не був аварійним, зменшимо в 10 разів напругу джерела і заново запускаємо процес розв'язку. В результаті отримаємо нову картину поля, яку показано на рис. 2.30.

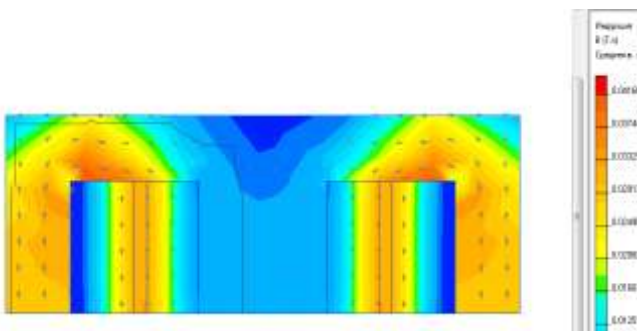


Рисунок 2.30 – Відображення ліній магнітної індукції і векторів в режимі короткого замикання трансформатора

Як бачимо, в режимі короткого замикання лінії магнітної індукції в значній мірі замикаються не по магнітопроводу, а по «каналі розсіювання», тобто по ізоляційному проміжку між обмотками.

Щоб отримати значення струмів в елементах електричного кола клацніть по піктограмі . На екрані з'явиться електричне коло. При наведенні курсору на елемент кола з'являються значення параметрів цього елемента (рис. 2.31).

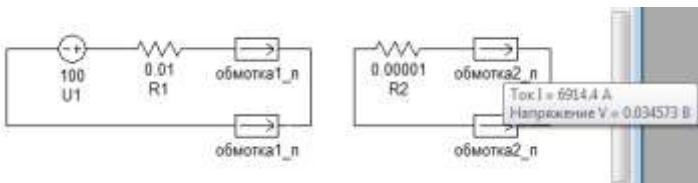


Рисунок 2.31 – Відображення параметрів електричного кола

3. ПІДГОТОВКА ВИХІДНИХ ДАНИХ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

Проектування трансформатора починають зі завдання його основних параметрів. Основними параметрами є: потужність трансформатора S , частота мережі f , номінальна напруга первинної і вторинної обмоток U_{1n} , U_{2n} , максимальна магнітна індукція B_m при напруженості H_m , струм холостого ходу, як відсоток від номінального струму $I_{xx}\%$.

Геометричні параметри задаються відповідно до Рис. 2.5.

Розрахуємо необхідну товщину пакета магнітопроводу L_z , необхідну кількість витків обмоток W_1 , W_2 .

Оскільки в моделі використано задана кількість витків $W_{1p} = 4$, $W_{2p} = 4$, що не відповідає реальній кількості витків, то необхідно перерахувати значення опорів і ЕРС в моделі, щоб розподіл магнітного поля залишився незмінним, а також незмінними залишилися енергетичні параметри.

Нехай трансформатор має номінальну потужність $S = 10000 \text{ ВА}$, частоту мережі $f = 50 \text{ Гц}$.

Номінальна напруга первинної обмотки $U_{1n} = 3464 \text{ В}$.

Номінальна напруга вторинної обмотки $U_{2n} = 220 \text{ В}$.

Струм холостого ходу, як відсоток від номінального струму $I_{xx} \% = 5$.

Матеріал магнітопроводу – сталь гарячекатана, яка має лінійну ділянку характеристики намагнічування до магнітної індукції $B_m = 1,2 \text{ Тл}$, при напруженості $H_m = 400 \text{ А/м}$.

Опір генератора і проводів $R_1 = 0,1 \text{ Ом}$.

Коефіцієнт трансформації:

$$n = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} = 15,746 . \quad (3.1)$$

Кількість витків первинної обмотки обчислимо, знаючи струм холостого ходу і довжину середньої магнітної силової лінії. Згідно з другим законом Кірхгофа для магнітних кіл:

$$H \cdot l_c = I_{1xx} \cdot W_1 . \quad (3.2)$$

Ширина вікна трансформатора дорівнює:

$$l_{win} = d_2 + d_3 + d_4 + d_5 = 0,1 \text{ м}. \quad (3.3)$$

Довжин середньої магнітної силової лінії:

$$l_c = (H_c - d_7) \cdot 2l_{win} + d_6 + d_1 = 0,85 \text{ м}. \quad (3.4)$$

Тоді кількість витків первинної обмотки:

$$W_1 = \frac{H \cdot l_c}{I_{1xx}} = 1665 . \quad (3.5)$$

Кількість витків вторинної обмотки:

$$W_2 = \frac{W_1}{n} = 105 . \quad (3.6)$$

Площу поперечного перерізу стрижня розрахуємо, виходячи з таких міркувань. Напруга на первинній обмотці, яку індукуює основний магнітний потік дорівнює

$$U_1 = \omega \Phi W_1 = \omega B \Pi_c W_1 , \quad (3.7)$$

де Π_c - площа поперечного перерізу стрижня.

Звідси:

Розраховуємо необхідну товщину пакета L_z

Зробимо перерахунок параметрів кола, які є необхідними для моделювання. Для цього роздивимось схему електричного кола, що зображене на Рис.2.25. Згідно із другим законом Кірхгофа

$$R_1 I_1 + W_1 U_{w1} = U_1 \quad , \quad (3.10)$$

$$R_2 I_2 + W_2 U_{w2} = 0 \quad , \quad (3.11)$$

де $W_1 U_{w1}$ – напруга на первинній обмотці;

$W_2 U_{w2}$ – напруга на вторинній обмотці трансформатора.

Задаємо нові числа витків трансформатора W_{1p} , W_{2p} за умови, що МДС не змінюється. Для цього задаємо нові значення струмів в обмотках: I_{1p} , I_{2p} . Умови збереження МДС відомі:

$$W_1 I_1 = W_{1p} I_{1p} \quad , \quad (3.12)$$

$$W_2 I_2 = W_{2p} I_{2p} \quad . \quad (3.13)$$

Із рівняння (3.12) отримаємо:

$$I_1 = \frac{W_{1p}}{W_1} I_{1p} \quad . \quad (3.14)$$

Із рівняння (3.13) отримаємо:

$$I_2 = \frac{W_{2p}}{W_2} I_{2p} \quad . \quad (3.15)$$

Позначимо:

$$k_{w1} = \frac{W_1}{W_{1p}} \quad ; \quad k_{w2} = \frac{W_2}{W_{2p}} \quad . \quad (3.16)$$

Підставляємо співвідношення (3.14) у рівняння (3.10), отримаємо:

$$R_{1p} I_{1p} + W_{1p} U_{w1p} = U_{1p} \quad , \quad (3.17)$$

$$\text{де } R_{1p} = \frac{R_1}{(k_{w1})^2}; \quad U_{w1p} = \frac{U_{w1}}{k_{w1}} \quad ; \quad U_{1p} = \frac{U_1}{k_{w1}} \quad . \quad (3.18)$$

Аналогічно для рівняння (3.11) отримаємо:

$$R_{2p} I_{2p} + W_{2p} U_{w2p} = 0 \quad , \quad (3.19)$$

$$\text{де } R_{2p} = \frac{R_2}{(k_{w2})^2}; \quad U_{w2p} = \frac{U_{w2}}{k_{w2}} \quad . \quad (3.20)$$

Виконуємо моделювання для нових даних трансформатора. Для цього змінюємо товщину пакета магнітопроводу, магнітну проникність сталі і параметри електричного кола, яке підключено до трансформатора.

Відкриємо вікно описання задачі *ELCUT* (Рис.2.7) і змінюємо значення товщини пакета $L_z = 7.8 \text{ см}$. Знаходимо магнітну проникність сталі по формулі:

$$\mu = \frac{B_m}{\mu_0 \cdot H_m} = 2387 \quad .$$

Для завдання нових фізичних властивостей магнітопроводу, двічі клацнемо у вікні опису завдання по мітці «**сталь**». У вікні **Свойства метки блока сталь** (Рис 2.19) вводимо нове значення магнітної проникності сталі ($\mu_x = 2387$).

Відкриємо вікно «Электрическая цепь» (Рис.2.26). Змінюємо значення параметрів електричного кола у відповідності до (3.18) і (3.20). Беремо також до уваги, що ми моделюємо тільки половину трансформатора. Тому всі електричні параметри слід поділити навпіл. Отримаємо: $R_1 = R_{1p}/2 = 2.88\text{e-}7 \text{ Ом}$;

$$R_2 = R_{2p}/2 = 3.512\text{e-}3 \text{ Ом};$$

$$U_1 = U_{1p}/2 = 5.885 \text{ В}.$$

Виконаємо заново розрахунок (кнопка  на панелі інструментів.). Отримаємо картину розподілу магнітної індукції, яку представлено на Рис.3.1, і картину розподілу щільності струму (Рис.3.2).

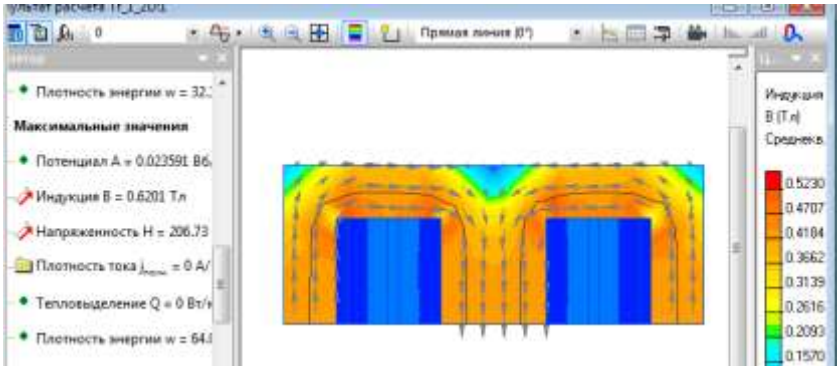


Рисунок 3.1 – Картина магнітного поля

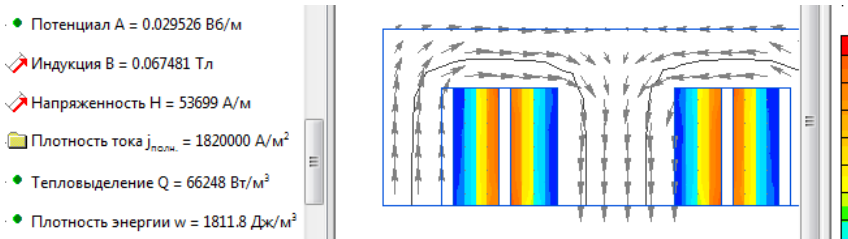


Рисунок 3.1 – Картина магнітного поля

Максимальна щільність струму дорівнює 1.82 A/мм^2 , що є допустимою для трансформаторів із сухою ізоляцією.

Щоб отримати реальні значення струмів необхідно значення струмів, які отримали під час моделювання, перерахувати за формулами (3.14) і (3.15).

В наданих методичних вказівках розібрано приклад тільки моделювання магнітного поля в осердді і струму в обмотках і електричних колах, які підключено до обмоток. При проектуванні трансформаторів необхідно виконати ще і моделювання електричних полів з метою правильного вибору ізоляції. Для розрахунку системи охолодження треба виконати моделювання теплових полів. Всі ці моделювання також можна виконати за допомогою системи *ELCUT*.

Відео урок, що присвячено моделюванню електромагнітних процесів в трансформаторах, приведено на сайті [2].

4 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

4.1 ELCUT. Моделирование двухмерных полей методом конечных элементов. Версия 6.1. Руководство пользователя http://www.tor.ru/elcut/free_doc_r.htm.

4.2 Помощь студентам-электрикам. Научные разработки, программы. Программы для расчета переходного процесса в однофазном трансформаторе.– [Электронный ресурс].– режим доступа: <http://www.electricity.zp.ua/>.