

Задание №5. Поверхностный эффект и эффект близости в плоских шинах

Целью работы является исследование переменного электромагнитного поля в проводящей среде.

1. Сведения из теории

Переменное электромагнитное поле по мере проникновения в толщу проводящей среды быстро затухает. Это приводит к неравномерному распределению тока и магнитного потока. В установившемся режиме эти значения имеют максимальное значение у поверхности проводника, поэтому это явление носит название поверхностного эффекта (или скин-эффекта). В большинстве случаев поверхностный эффект является вредным явлением, так как он увеличивает электрическое сопротивление проводника переменному току и магнитное сопротивление переменному магнитному потоку (соответственно приводит к уменьшению индуктивности конструкции). Для инженерных расчетов скин-эффект можно считать резко выраженным, если минимальный характерный размер проводника (или системы проводников) R_{\min} значительно превышает глубину проникновения электромагнитного поля Δ . Для гармонических полей с круговой частотой ω :

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\gamma}}, \quad (1)$$

где γ и μ , соответственно, удельная проводимость и абсолютная магнитная проницаемость проводящей среды.

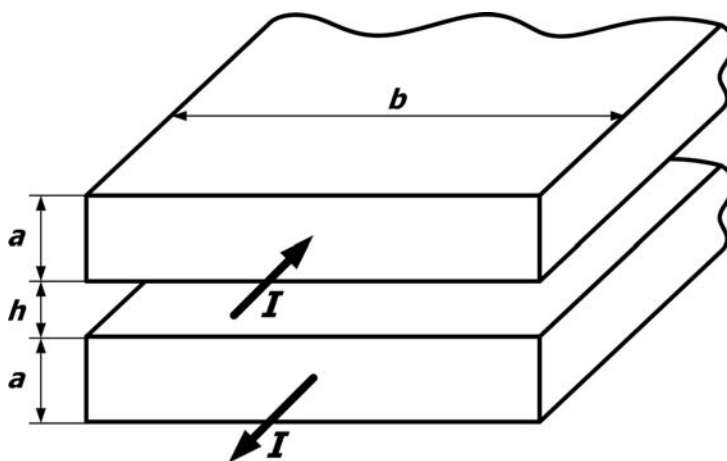


Рис.1. Плоские шины

На практике в качестве соединительных элементов часто используются плоские шины (рис.1) – две близко расположенные параллельные пластины, по которым в противоположных направлениях протекает ток. При таком расположении поле одной шины влияет на распределение поля в другой шине. Это явление называют эффектом близости. В результате комплексное сопротивление единицы длины двух плоских шин, расположенных в воздухе, равно комплексным сопротивлениям шин плюс индуктивное сопротивление, обусловленное магнитным потоком, проходящим в пространстве между шинами.

В случае тонких близко расположенных шин ($a \ll b$ и $h \ll b$) или, соответственно, при резко выраженном скин-эффекте индуктивность пары шин с противоположным направлением

тока будет минимальной. При известной длине шин l для ее расчета можно воспользоваться простой приближенной формулой:

$$L = \mu_0 \frac{h \cdot l}{b}, \quad (2)$$

дающей удовлетворительный результат при $(a + h)/b \leq 0.1$.

Программа работы:

1. Исследовать поверхностный эффект в плоской шине – получить распределение плотности тока по средним линиям сечения для заданных частот.
2. Проанализировать взаимное влияние шин (эффект близости) при противоположном и совпадающем направлении тока в шинах для заданных частот (на примере распределения плотности тока в среднем сечении шин).
3. Исследовать влияние частоты электромагнитного поля на индуктивность и активное сопротивление шин при противоположном протекании тока. Оценить, при какой частоте для расчета индуктивности можно воспользоваться формулой (2).

2. Расчетная модель задачи

При составлении расчетной модели задачи (рис.2) не учитывается симметрия проводников относительно средней плоскости сечения. Внешние границы расчетной модели расположены таким образом, чтобы имитировать бесконечное удаление. Условием полного затухания магнитного поля служит равный нулю векторный магнитный потенциал.

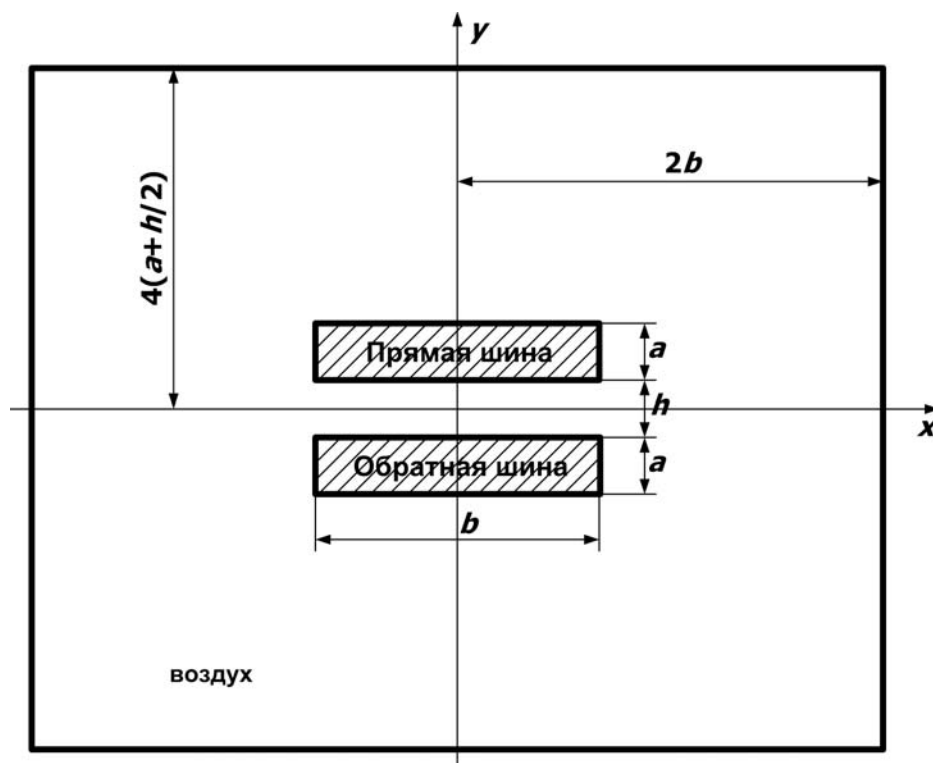


Рис.2. Геометрическая модель задачи

3. Этапы решения задачи

1. Создание новой, пустой задачи ELCUT и ввод параметров задачи
2. Создание геометрической модели (рисунка расчетной области) и меток объектов
3. Описание физических свойств материалов и ввод граничных условий
4. Построение сетки конечных элементов
5. Решение задачи;
6. Обработка результатов решения

4. Инструкция к выполнению работы

1. При создании новой задачи ELCUT («Файл» → «Создать» → «Задача ELCUT») в соответствующих диалоговых окнах указать: имя задачи – **task5**; тип задачи – **магнитное поле переменных токов**; указать требуемое значение частоты; класс модели – **плоская**; единицы длины – **миллиметры**; система координат – **декартова**.
2. Построение модели:

Двойной клик мыши по разделу «Геометрия» в «Окне задачи» откроет окно геометрического редактора – появится координатная сетка, на которой красным цветом нанесены координатные оси (горизонтальная – **Ox**, вертикальная – **Oy**). Шаг сетки может быть задан равным 1-2 мм.

 - 2.1. Прорисовка расчетной области:

Перейти в режим «Вставка объектов» и используя инструмент «Прямая линия» изобразить расчетную модель заданных размеров.
 - 2.2. Ввод меток объектов:

Перейти в режим «Выделение объектов» и присвоить имена *блокам* и *ребрам*. Рассматриваемая модель содержит три блока (прямая и обратная шины, а также окружающий их воздух).
3. Описание физических свойств материалов:

Двойной клик мыши по имени блока в «Окне задачи» вызывает диалоговое окно для ввода свойств. Характеристиками блока в данной задаче являются магнитная проницаемость ($\mu = 1$ во всех блоках – материалы немагнитные), электропроводность (в воздухе принять нулевой, а шины считать медными с проводимостью $g = 5.8 \cdot 10^7$ См/м) и полный ток в шинах. В прямой шине амплитуду принять $I_0 = 10$ А, фазу $\varphi = 0^\circ$.
При исследовании поверхностного эффекта в прямой шине обратную шину описать как воздух. При исследовании эффекта близости при совпадении направлении токов в шинах в обратной шине задать $I_0 = 10$ А, $\varphi = 0^\circ$, при противоположных направлениях – $I_0 = 10$ А, $\varphi = 180^\circ$.
4. Задание граничных условий
Двойной клик мыши по метке ребра в «Окне задачи» вызывает диалоговое окно для ввода свойств, описанных в разделе «Граничные условия».
5. Построение сетки конечных элементов
При решении данной задачи предпочтительнее использовать неравномерную сетку. Вблизи удаленных границ размер элементов сетки может быть задан 5-6 мм. В областях сильного поля, т.е. вблизи поверхности шин шаг дискретизации следует определить 0.5 мм.
Чтобы задать значение шага дискретизации следует:
 - Двойным кликом мыши выделить ребро и выбрать команду «Свойства» в контекстном меню;
 - Установить переключатель «Шаг дискретизации» в положение «ручной» и ввести нужное число.

Для построения сетки воспользоваться файловым меню («Правка» → «Построить сетку» → «Во всех блоках») или соответствующей кнопкой на панели инструментов.

6. Решение задачи: «Задача» → «Решить задачу»

После окончания расчета будет выведена рассчитанная картина поля задачи (силовые линии напряженности магнитного поля) и цветная карта плотности тока в шинах. Картина поля с выключенной цветовой картой распечатать для одного значения частоты в каждом из трех случаев.

7. Анализ результатов:

7.1. Построение зависимости плотности тока в среднем сечении прямой шины по оси oy :

7.1.1. «Контур» → «Ввод линии» и указать координаты начальной точки $x = 0, y = h/2$ и конечной точки $x = 0, y = a + h/2$.

7.1.2. «Вид» → «График» и из предложенного набора величин выбрать «Плотность тока»

7.1.3. График распечатать («Файл» → «Печать») или скопировать в созданный дос – файл результатов для последующей печати

7.2. Построение зависимости плотности тока в среднем сечении прямой шины по оси ox :

7.2.1. «Контур» → «Ввод линии» и указать координаты начальной точки $x = -b/2, y = h/2 + a/2$ и конечной точки $x = b/2, y = h/2 + a/2$.

7.2.2. «Вид» → «График» и из предложенного набора величин выбрать «Плотность тока»

7.2.3. График распечатать («Файл» → «Печать») или скопировать в созданный дос – файл результатов для последующей печати

7.3. Вычисление индуктивности и активного сопротивления шин:

7.3.1. «Вид» → «Мастер импеданса». В предложенном списке выделить оба проводника (использовать мышку совместно с клавишей **Ctrl**)

7.4. Закрывать окно «Анализ результатов».

8. Изменение частоты питающего тока: «Задача» → «Свойства задачи» в появившемся окне указать требуемое значение.

5. Задание для моделирования

№	a , мм	h , мм	b , мм
1	10	6	120
2	6	6	120
3	10	10	120
4	20	8	120
5	20	10	120
6	20	20	120
7	6	4	100
8	10	6	100
9	10	10	100
10	20	20	100

Диапазон частот для анализа индуктивности и активного сопротивления шин: 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 20000 Гц.

Для построения графиков рекомендуемая частота 500 Гц.