

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

А. А. Веремеев, С.В. Митрофанов, А.С. Сташкевич

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Учебное пособие

Рекомендовано ученым советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Оренбург
2019

УДК 621.311(075.8)

ББК 31.27 я73

В31

Рецензент – доцент, кандидат технических наук В.М. Нелюбов

- Веремеев, А.А.**
В31 Электромагнитная совместимость [Электронный ресурс]: учебное пособие / А.А. Веремеев, С.В Митрофанов, А.С. Сташкевич; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2019. – 130 с.
ISBN 978-5-7410-2414-0

В учебном пособии изложены основные сведения по электромагнитной совместимости, изложены принципы работы в программной среде ELCUT и приведены задания с примерами решений с помощью этого программного продукта.

Учебное пособие предназначено для обучающихся направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

УДК 621.311(075.8)

ББК 31.27 я73

©Веремеев А.А.,
Митрофанов С.В.,
Сташкевич А.С., 2019
© ОГУ, 2019

ISBN 978-5-7410-2414-0

Содержание

Введение.....	4
1 Инженерное моделирование в программной среде	7
ELCUT	7
1.1 Типы задач, решаемых в пакете ELCUT	7
1.2 Основные сведения об организации ELCUT.....	8
2 Индуктивность длинного соленоида.....	24
2.1 Теоретические сведения	24
2.2 Решение задачи в программной среде ELCUT	30
3 Проводящий цилиндр во вращающемся магнитном поле.....	40
3.1 Вращающееся магнитное поле	40
3.2 Решение задачи в программной среде ELCUT	50
4 Электромагнитное излучение импульсного	63
трансформатора.....	63
4.1 Основные сведения об импульсных трансформаторах.....	63
4.2 Решение задачи в программной среде ELCUT	69
5 Расчёт токов в трехфазной линии электропередачи,	73
работающей на несимметричную нагрузку.....	73
5.2 Решение задачи в программной среде ELCUT	83
6 Расчёт передаточной функции фильтра.....	100
6.1 Полосно-пропускающий фильтр	100
6.2 Решение задачи в программной среде ELCUT	107
7 Расчёт распределения магнитного поля катушек.....	115
Гельмгольца	115
7.1 Полосно-пропускающий фильтр	115
7.2 Решение задачи в программной среде ELCUT	120
Список использованных источников	128
.....	

Введение

Под электромагнитной совместимостью (ЭМС, EMC) технических средств (ТС) понимается обязательная в настоящее время способность их одновременного функционирования при условии воздействия преднамеренных электромагнитных помех в реальных условиях эксплуатации с сохранением при этом требуемого качества работы данных технических средств и отсутствием создания недопустимых помех этими средствами другим ТС.

Регулирование в этой области осуществляется посредством МЭК 61326-1:2012, который разработан подкомитетом 65А "Системные аспекты" технического комитета МЭК 65 "Системы управления и измерения в промышленных процессах".

Приборы и оборудование, которые задействованы в технологических процессах электроэнергетической промышленности, зачастую расположены в разных географических зонах и поэтому работают в широком диапазоне условий окружающей среды.

Ограничение нежелательной электромагнитной эмиссии обеспечивает отсутствие ненадлежащего влияния рассматриваемого оборудования на любое другое оборудование, установленное в непосредственной близости к нему. Нормы подробно рассмотрены в публикациях МЭК и Международного специального комитета по радиопомехам (СИСПР) и приведены из таких публикаций.

Однако оборудование должно функционировать без ухудшения характеристик в электромагнитной обстановке, типичной для предполагаемого места эксплуатации оборудования, в связи с чем можно выделить три различных типа электромагнитной среды и уровни устойчивости оборудования. Более подробная информация по вопросам, относящимся к электромагнитным обстановкам, приведена в МЭК 61000-2-5.

Сложные электрические и электронные системы требуют планирования ЭМС на всех стадиях их проектирования и установки с учетом электромагнитной среды, особых требований и серьезности неисправностей.

В связи с чем были установлены требования ЭМС, которые обычно применяют ко всему оборудованию, которое является объектом применения настоящего стандарта. Для определенных типов оборудования требования могут быть дополнены или изменены специальными требованиями, предусмотренными в одной или нескольких частях стандартов серии МЭК 61326-2, при рассмотрении которых необходимо учитывать технико-экономические аспекты работы рассматриваемого оборудования.

Второе издание МЭК 61326-1:2012 отменяет и заменяет первое издание, опубликованное в 2005 году.

Существенными изменениями по отношению к предыдущему изданию являются следующие:

- пересмотрены испытательные уровни помехоустойчивости и критерии качества функционирования;
- уточнены требования к портативному испытательному и измерительному оборудованию;
- уточнено описание электромагнитной обстановки.

Оборудование и отдельные устройства могут быть источниками электромагнитных помех в широкой полосе частот. Эти помехи могут распространяться по силовым и сигнальным линиям или непосредственно излучаться во внешнее пространство и влиять на функционирование другого оборудования или влиять на внешнюю электромагнитную среду.

Требования по ограничению электромагнитной эмиссии, установлены таким образом, чтобы помехи, создаваемые оборудованием или системами в случае их нормального функционирования, не превышали значений, которые могли бы препятствовать функционированию других систем в соответствии с их назначением.

Изготовитель обязан информировать потребителя, что при подключении оборудования к объекту испытаний возможно возникновение электромагнитной эмиссии, превышающей уровень, указанный в настоящем стандарте.

1 Инженерное моделирование в программной среде ELCUT

1.1 Типы задач, решаемых в пакете ELCUT

ELCUT– это совокупность программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач. В пакете ELCUT используется метод конечных элементов.

При помощи пакета ELCUT можно решать плоские и осесимметричные задачи нескольких типов (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Типы задач, решаемых в пакете ELCUT

Магнитный расчет	
Магнитные задачи	Магнитостатика
	Магнитное поле переменных синусоидальных токов
	Нестационарное магнитное поле
Электрический расчет	
Электрические задачи	Электростатика и электрическое поле постоянных токов
	Электрическое поле переменных синусоидальных токов
	Нестационарное электрическое поле
Тепловой и механический расчет	
Тепловые и механические задачи	Стационарная теплопередача
	Нестационарная теплопередача
	Анализ упругих деформаций

1.2 Основные сведения об организации ELCUT

ELCUT позволяет работать с различными типами документов, а именно: геометрические модели, задачи, библиотеки свойств материалов и другими. Документ определенного типа открывается в своем индивидуальном окне внутри главного окна пакета ELCUT. Синхронно можно открыть сколь угодно число любых окон. Совершая переход из одного окна в другое, пользователь осуществляет переключения между документами. В любой момент времени активным может быть только одно окно. Предоставляется возможность вносить изменение в содержание активного документа, воспользовавшись позициями меню. Содержание меню разное для документов различных типов.

Так же можно воспользоваться панелью инструментов и контекстным меню, которые можно вызвать, нажав правой кнопкой мыши на объект в окне.

В пакете ELCUT используются документы следующих типов:

Описание задачи отвечает любой физической задаче, которая решается с использованием пакета ELCUT. Данный документ включает в себя такие характеристики, как тип задачи (это может быть электростатика, магнитостатика, теплопередача и прочие), класс модели (либо плоская, либо осесимметричная), имена других документов, связанных с этой задачей.

Геометрическая модель включает в себя полное описание отражение геометрии задачи, метки частей модели и расчетную сетку конечных элементов. Для решения различных задач может быть использована общая модель, что полезно в процессе решения связанных задач.

Физические свойства, или данные, разные для различных типов задач (магнитное поле переменных токов, электрическое поле переменных токов в неидеальной диэлектрике и так далее). Такие документы включают в себя значения свойств материалов, граничных условий для определенных объек-

тов модели, а также источников поля. Данный документ может быть применен как библиотека материалов для разных задач.

Электрическая цепь включает в себя схему электрической цепи, а также параметры элементов данной цепи. Применить совместное решение задачи расчета магнитного поля с уравнениями присоединённой электрической цепи можно, например, для магнитного поля переменных токов. Для решения задачи, необходимо связать с ней имена двух или более документов, а именно модели и физических свойств. Для практичности задача может ссылаться сразу на два документа свойств. Первый документ представляет собой справочник свойств, содержит свойства многократно используемых материалов. Второй документ содержит специальные данные для конкретной задачи или совокупности задач. При решении какой-либо задачи программа ELCUT создает файл результатов. Данный файл будет направлен в папку, в которой находится файл данной задачи. Файл результатов имеет имя такое же, как и файл решаемой задачи и всегда имеет разрешение .res.

На рисунке 1.1 показана процедура решения задачи в виде блок-схемы.



Рисунок 1.1 – Последовательность решения задачи в пакете ELCUT

1.2.1 Структура задачи

Структура задачи представлена на (рисунке 1.2).

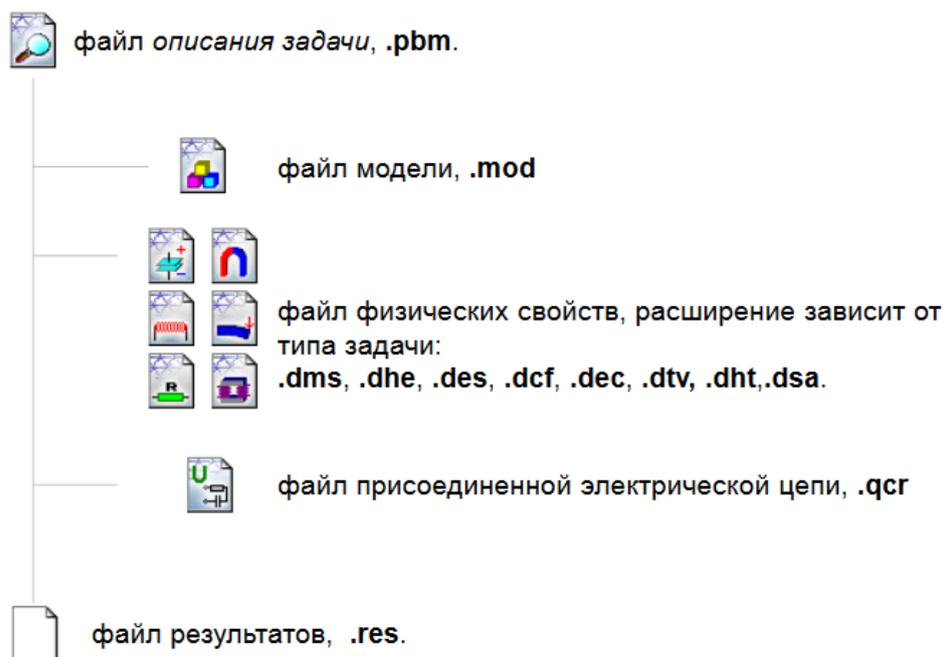


Рисунок 1.2 – Структура задачи

1.2.2 Создание задачи

Создать новую задачу можно несколькими способами:

1. В меню Файл выбрать первый пункт - Создать задачу.
2. Так же создать новую задачу можно нажатием клавиш Ctrl+N.

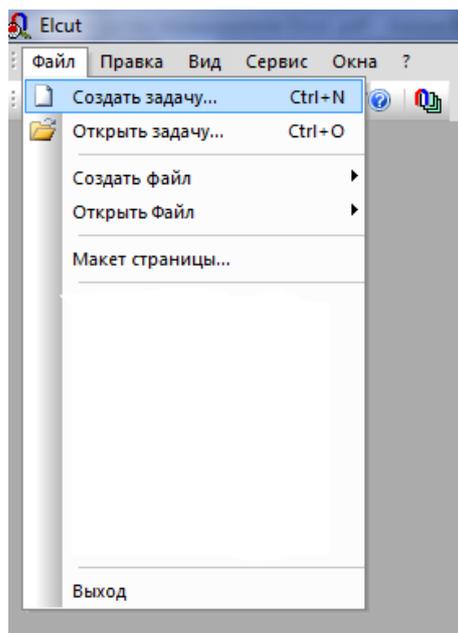


Рисунок 1.3 – Создание новой задачи

В появившемся окне необходимо выбрать тип документа, который хочет создать пользователь, например ELCUT и нажать на кнопку ОК (рисунок 1.4).

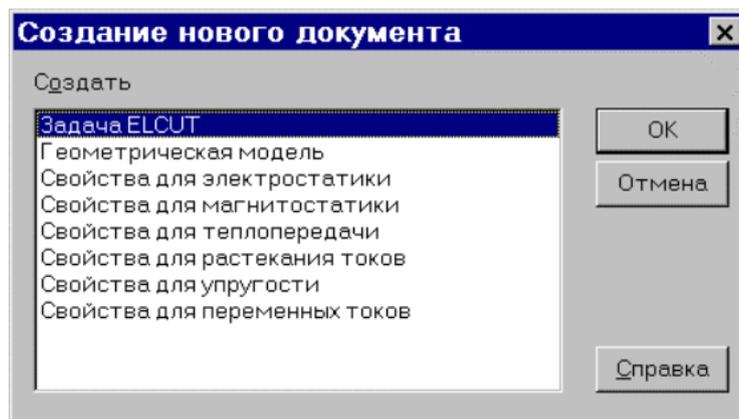


Рисунок 1.4 – Выбор типа документа

После выбора типа документа, необходимо ввести имя задачи (magnet) и выбрать ее расположение, выбрать нужную папку можно, используя кнопку Обзор, в завершении нажать кнопку Далее (рисунок 1.5).

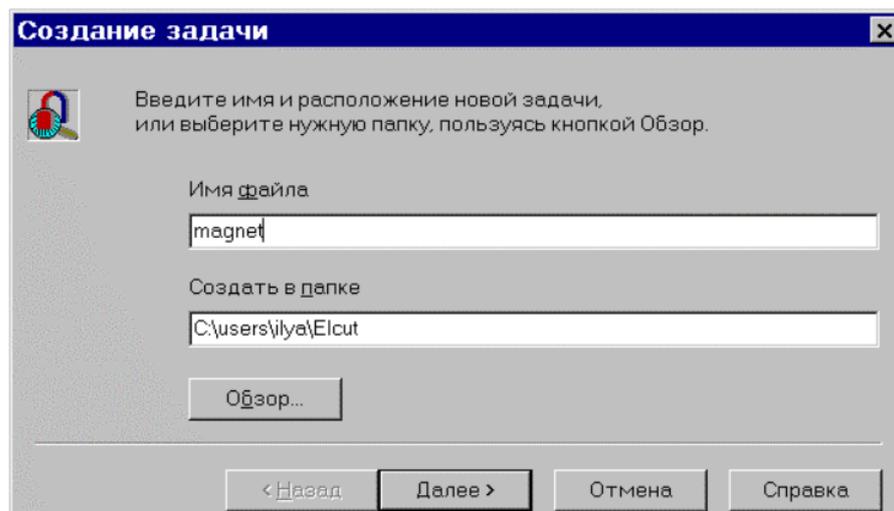


Рисунок 1.5 – Выбор имени и расположения файла

1.2.3 Выбор типа задачи и класса модели

В графе Тип необходимо указать Magnetostatics, в графе класс модели указать Плоская. Имена файлов Геометрия и Свойства рекомендуется оставить по умолчанию (рисунок 1.6).

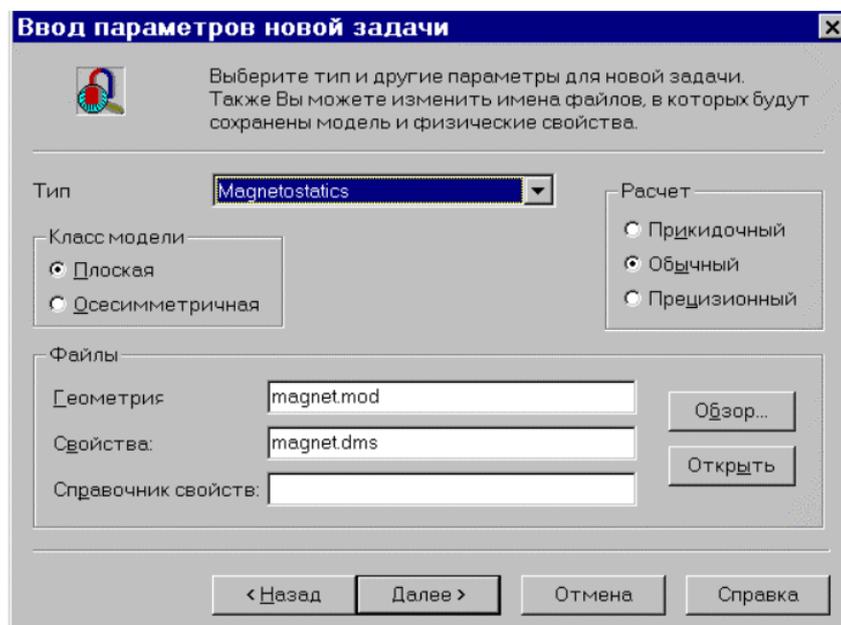


Рисунок 1.6 – Выбор типа задачи и класса модели

1.2.4 Выбор единиц длины и системы координат

В графе единицы длины укажем, например, миллиметры и выберем, декартовы координаты, по завершении необходимо нажать кнопку Готово (рисунок 1.7).

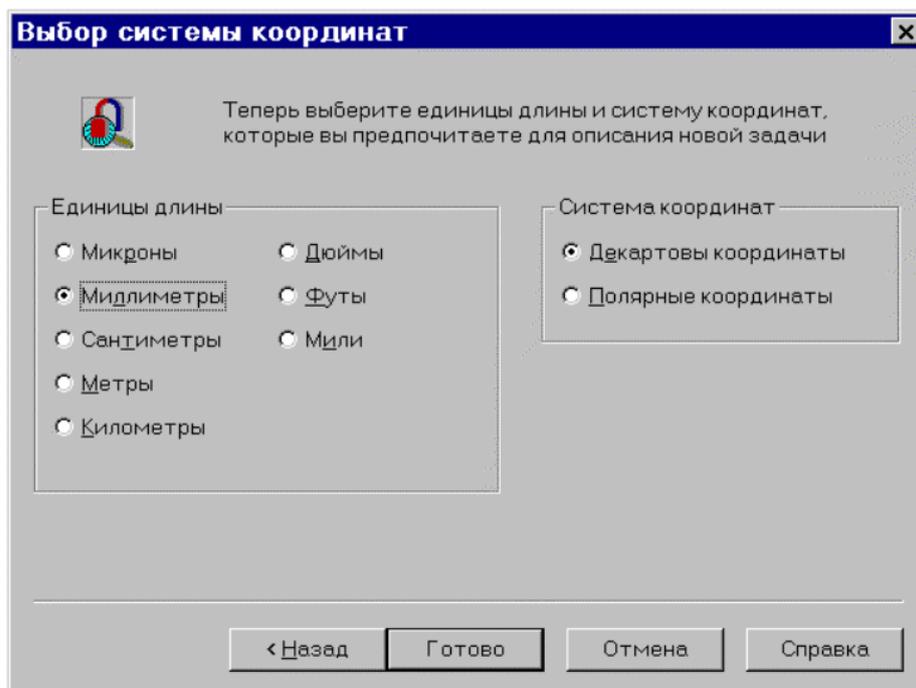


Рисунок 1.7 – Выбор единиц длины и системы координат

Созданную нами задачу ELCUT откроет в новом окне, задачу можно сохранить, используя из Меню Файл > Сохранить, также можно использовать комбинацию клавиш Ctrl+S (рисунок 1.8).

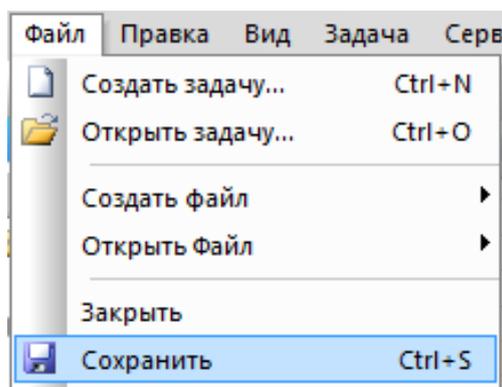


Рисунок 1.8 – Сохранение задачи

1.2.5 Создание геометрической модели

Для создания геометрической модели необходимо в меню Задача выбрать первый пункт Геометрическая модель (рисунок 1.9).

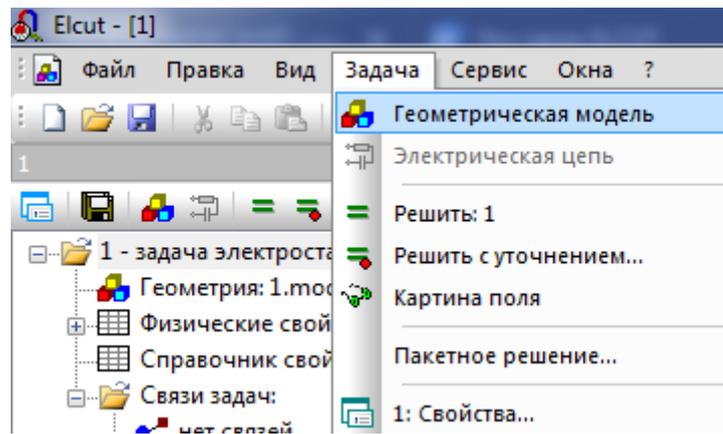


Рисунок 1.9 – Создание геометрической модели

Для упрощения работы можно воспользоваться Сеткой привязки. Сетку привязки можно вызвать из меню Правка или воспользоваться контекстным меню (рисунок 1.10).

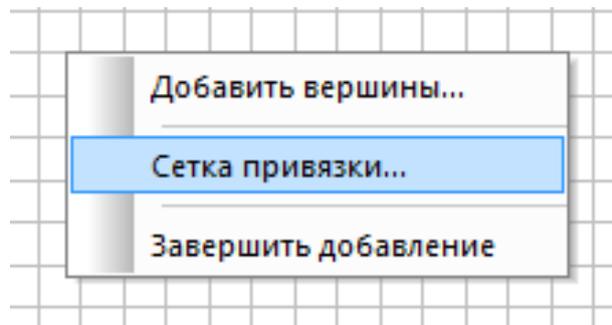


Рисунок 1.10 – Вызов сетки привязки через контекстное меню

В появившемся окне предоставляется возможность задать шаг сетки (например, 10 мм), а также выбрать позицию начальной точки, по умолчанию точка имеет координаты (0;0). Закончить процедуру настройки нажатием кнопки ОК (рисунок 1.11).

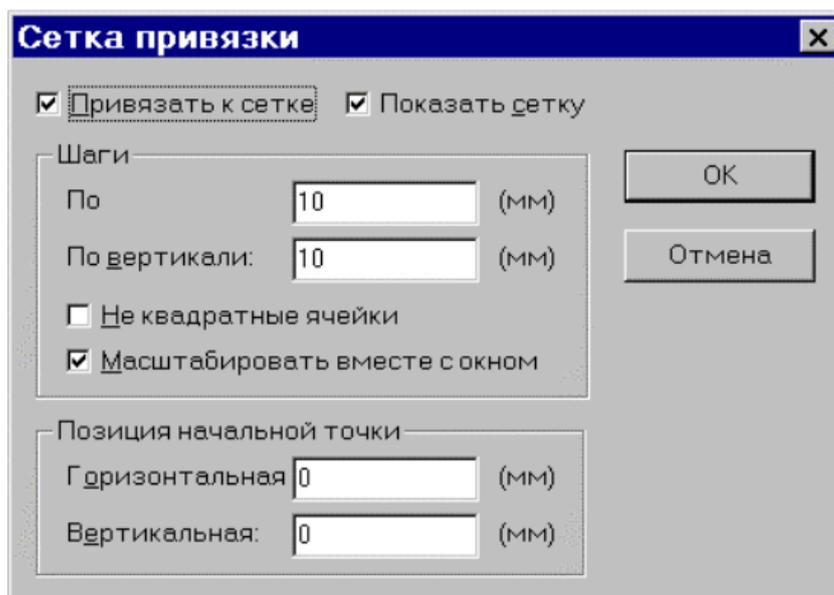


Рисунок 1.11 – Настройка сетки привязки

Теперь, таким образом в последующих работах создается необходимая геометрия.

1.2.6 Задание свойств материалов

В пакете ELCUT для задания свойств материалов для различных объектов, в первую очередь нужно присвоить метки геометрическим областям. После этого для созданных меток установить свойство того или иного материала. По такому же принципу происходит задание граничных условий.

Для задания метки необходимо щелкнуть дважды левой кнопкой мыши на интересующий объект, объект будет выделен и откроется окно Свойства выделенных объектов в графе метка указать имя Сталь, аналогично создаются и другие метки, по окончании действий необходимо нажать кнопку ОК (рисунок 1.12).

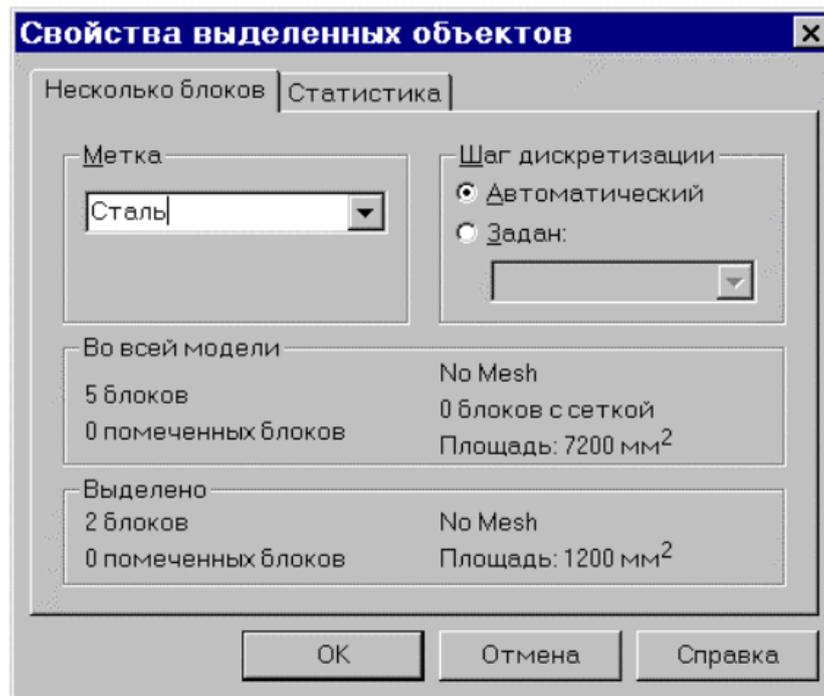


Рисунок 1.12 – Окно свойств выделенных объектов

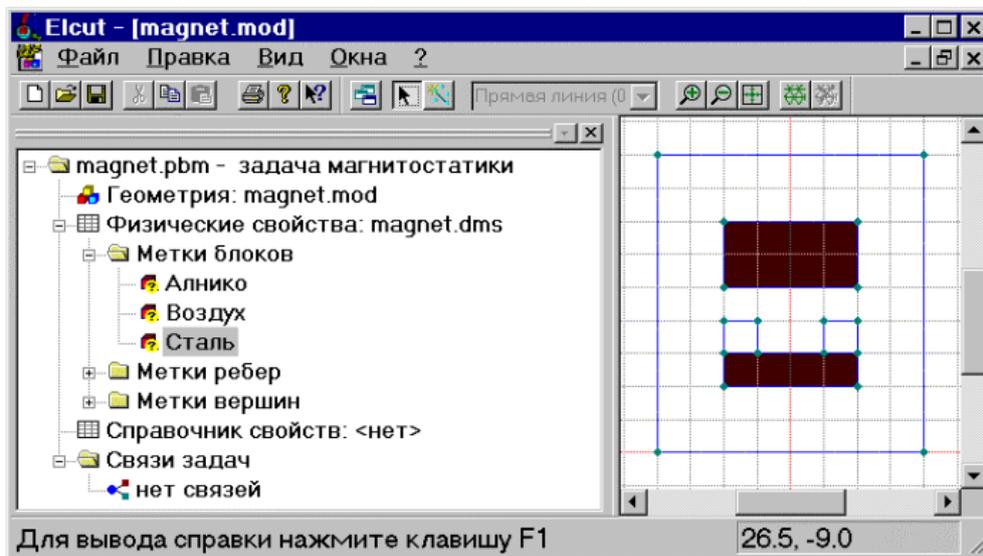


Рисунок 1.13 – Окно программы, присвоение меток блокам

Вопросительный знак в графе Метки блоков в окне задачи указывает на то, что метки созданы, но их свойства еще не были заданы.

Для задания физических свойств необходимо дважды щелкнуть по метке (рассмотрим на примере метки Воздух). Введем в первое поле для компонентов тензора магнитной проницаемости. Завершить редактирование нажатием кнопки ОК (рисунок 1.14).

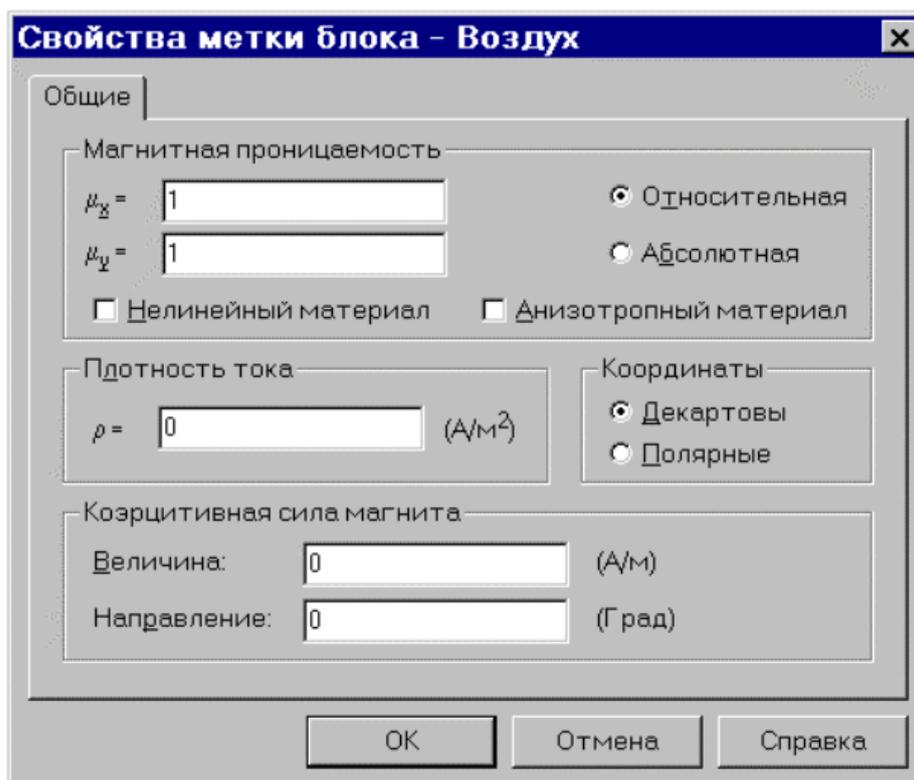


Рисунок 1.14 – Задание свойств метки блока Воздух

1.2.7 Решение задачи

Чтобы решить задачу нужно выбрать пункт Решить задачу из меню Правка. По окончании расчета в правой части главного экрана появится рассчитанная картина поля решаемой задачи (рисунок 1.15).

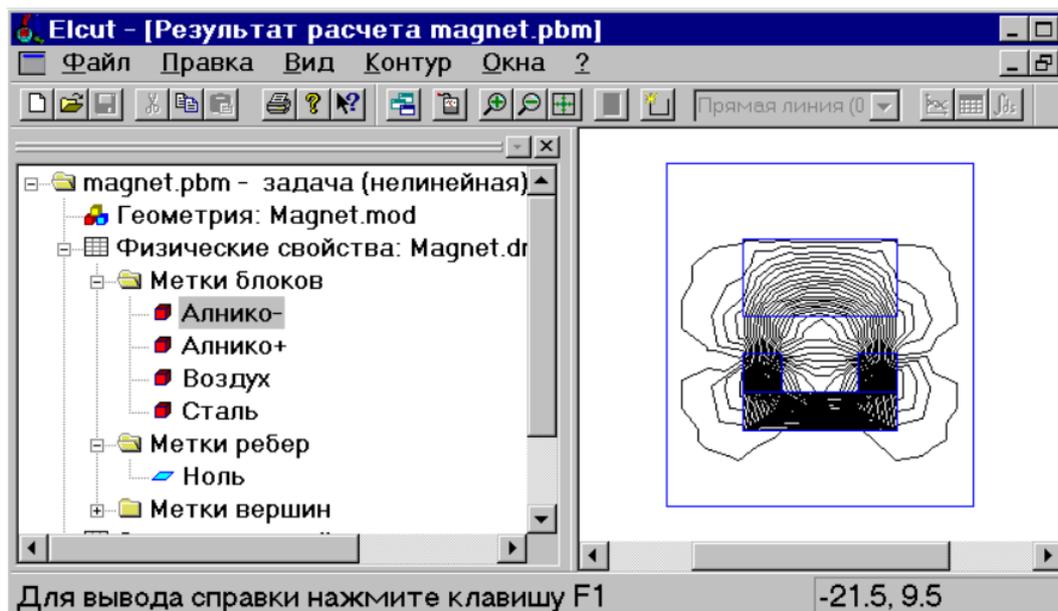


Рисунок 1.15 – Результаты расчета задачи

1.2.8 Просмотр результатов

Решение задач в пакете ELCUT может быть представлено:

- В виде картины поля,
- в виде локальных значений,
- в виде интегральных значений,
- в виде графиков,
- в виде таблиц.

1.2.9 Картина поля

В меню Вид > Картина поля в открывшемся окне можно менять масштаб прорисовки силовых линий, изменить переменную, по которой строится картина поля и др. Также можно задавать минимальное и максимальное значения переменной (рисунок 1.16).

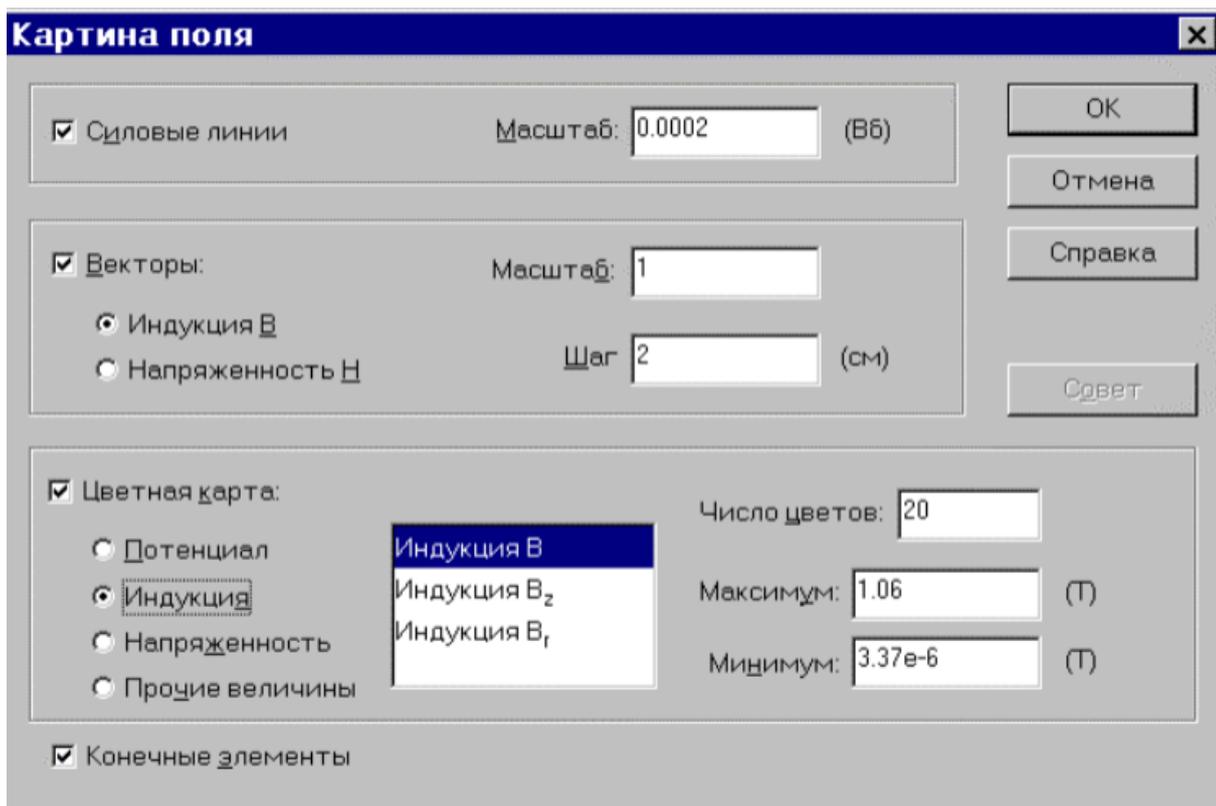


Рисунок 1.16 – Окно картины поля

1.2.10 Локальные значения поля

Для того, чтобы определить интересующие нас физические величины, характеризующие поле, в определенных точках, необходимо выбрать пункт меню Вид > Локальные значения. Откроется новое окно, в нем будут отображаться значения переменной в точке, выбранные на общей картине поля (рисунок 1.17).

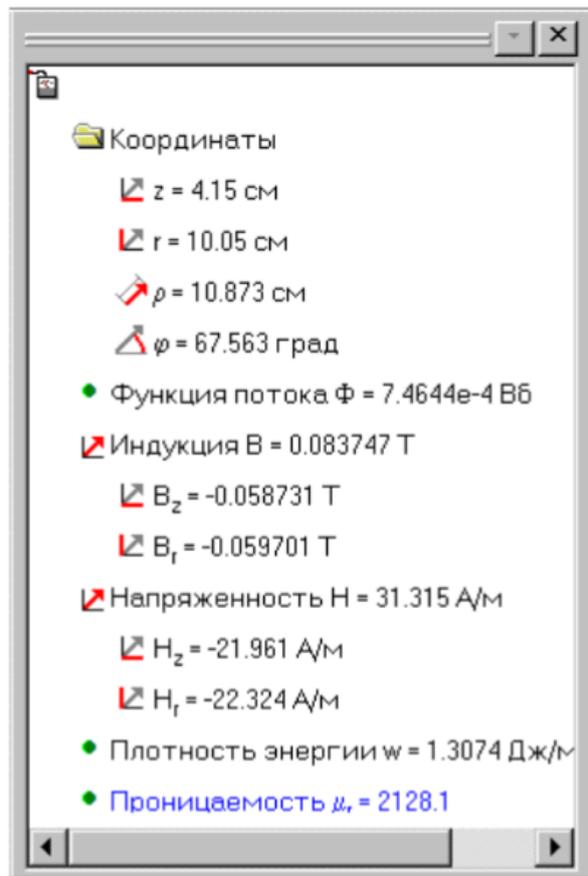


Рисунок 1.17 – Окно локальных значений

1.2.11 Интегральные значения поля

В первую очередь, для расчета интегральных значений, выполняется построение контура, по которому и будет осуществляться интегрирование.

Контур строится при помощи “мыши” с использованием меню Контур > Добавить. Замкнуть контур можно при помощи команды Контур > Замкнуть. Когда контур построен, необходимо вызвать меню Вид > Интегральные значения. При использовании данной команды появится новое окно, в котором и будут отражены рассчитанные интегральные характеристики (рисунок 1.18).

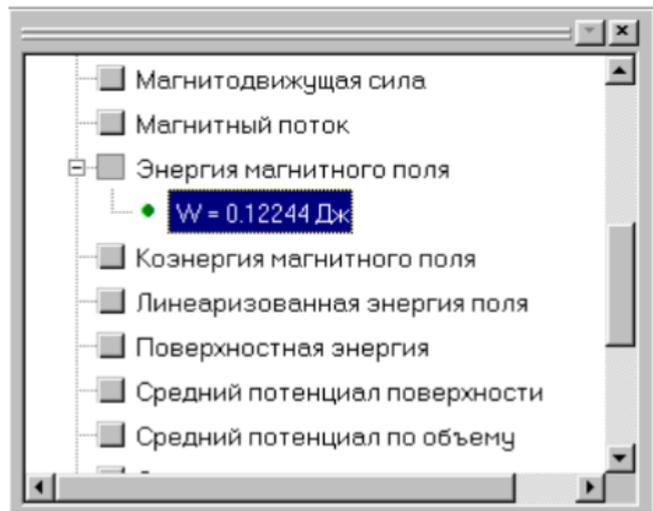


Рисунок 1.18 – Окно интегральных значений

1.2.12 Построение графиков

Для построения графика необходимо задать контур или отрезок линии, вызвать меню Вид > График и необходимый график будет выведен на экран (рисунок 1.19). Чтобы изменить переменную, отображаемую на графике, нужно вызвать меню График > Кривые на графике и выбрать необходимую переменную.

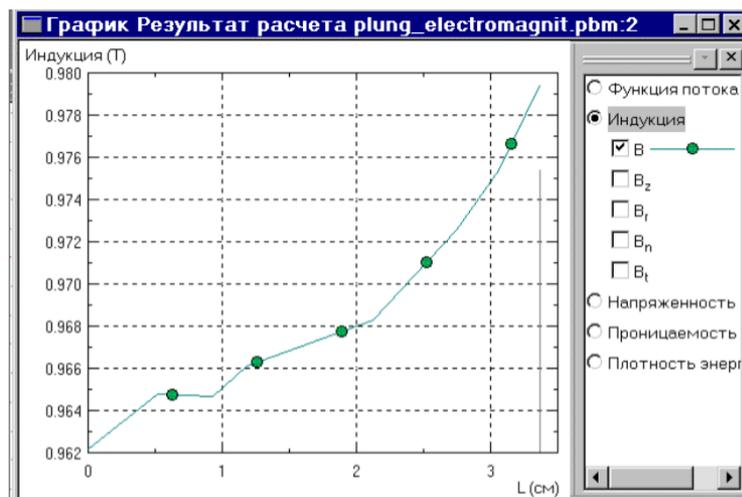


Рисунок 1.19 – Окно требуемого графика

1.2.13 Связанные задачи

ELCUT предоставляет возможность решения связанных задач, т.е. результаты расчета определенной задачи могут быть переданы и использованы для решения другой задачи.

Задача источник	Задача приемник:					
	Магнитостатика	Магнитное поле синусоидальных токов	Нестационарное магнитное поле	Стационарная теплопередача	Нестационарная теплопередача	Упругие деформации
Магнитостатика	+	+	+			+
Магнитное поле синусоидальных токов				+	+	+
Нестационарное магнитное поле			+	+	+	+
Электростатика						+
Электрическое поле постоянных токов				+	+	+
Электрическое поле переменных токов				+	+	+
Нестационарное электрическое поле						
Стационарная теплопередача		+			+	+
Нестационарная теплопередача		+			+	+
Упругие деформации						

Рисунок 1.20 – Связанные задачи

1.2.14 Справка по ELCUT

В случае возникновения трудностей или непонятных ситуаций, есть возможность вызова справки, где разъяснены основные моменты работы с программным средством. В ином случае обратитесь к преподавателю.

Для вызова справки необходимо нажать клавишу F1, после чего должно отобразиться окно, представленное на рисунке 1.21.

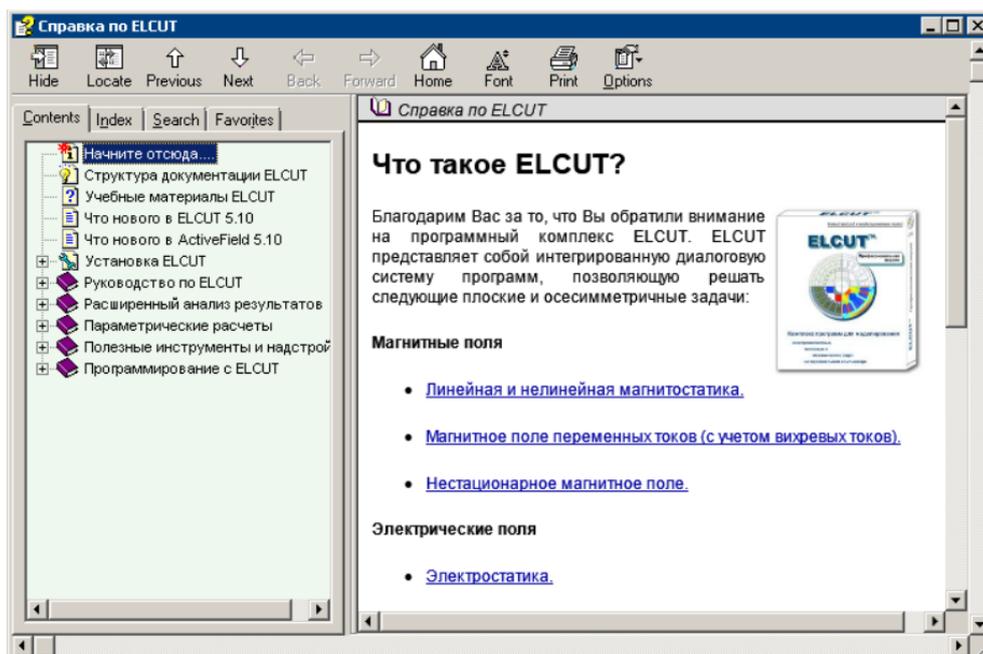


Рисунок 1.21 – Справка по ELCUT

2 Индуктивность длинного соленоида

2.1 Теоретические сведения

Явление электромагнитной индукции, открытое Фарадеем, заключается в том, что при изменении потока магнитной индукции в замкнутом проводящем контуре через поверхность, ограниченную этим контуром, возникает электрический ток. Этот ток называется индукционным током и связан с возникновением в контуре электродвижущей силы (ЭДС) индукции (\mathcal{E}_i). Причины, из-за которых появляется индукционный ток, могут быть самые разные: перемещение постоянного магнита относительно контура, перемещение другого контура с током относительно данного, изменение тока либо в другом контуре, либо в нем самом. Максвелл установил, что во всех случаях ЭДС электромагнитной индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока через площадь, ограниченную контуром.

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.1)$$

Знак минус в этой формуле соответствует правилу Ленца: индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать причине, его вызывающей.

Самоиндукция является частным случаем электромагнитной индукции, связанным с изменением магнитного потока, пронизывающего контур с током, создающим этот магнитный поток. Магнитный поток, в свою очередь, пропорционален силе тока, текущего в контуре, и определяется по формуле:

$$\Phi = L \cdot I, \quad (2.2)$$

где L – коэффициент пропорциональности, называемой индуктивностью контура.

Применяя к явлению самоиндукции основной закон электромагнитной индукции, можно получить выражение ЭДС самоиндукции (в случае $L = \text{Const}$).

$$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt} \quad (2.3)$$

То есть ЭДС самоиндукции пропорциональна скорости изменения силы тока в контуре.

Из формулы (2.2) видно, что индуктивность контура L - есть физическая величина, численно равная потоку магнитной индукции через площадь, ограниченную контуром, если по этому контуру течет ток, сила которого равна единице.

В системе единиц СИ единицей индуктивности служит генри (Гн). Из формулы (2.2) следует, что индуктивностью в 1 генри обладает такой проводник, который при токе в 1 ампер создает магнитный поток в 1 вебер, т. е.

$$1 \text{ генри} = 1 \text{ вебер} / 1 \text{ ампер} = 1 \frac{\text{Вб}}{\text{А}}$$

Индуктивность является характеристикой данного контура, определяющей его диэлектрический свойства в цепях переменного тока и зависящей от его формы и размеров, а также от магнитных свойств среды, в которой он находится.

Определение индуктивности очень сложно, но в некоторых простейших случаях ее можно рассчитать.

Рассмотрим для примера соленоид, длина которого много больше его диаметра. В этом случае магнитная индукция в соленоиде определяется по формуле:

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{N}{l} \cdot I, \quad (2.4)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равна $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

μ – магнитная проницаемость среды, заполняющей соленоид;

N – число витков соленоида;

I – сила тока.

Магнитный поток через N витков соленоида будет равен

$$\Phi = N \cdot B \cdot S = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2}{l} \cdot I, \quad (2.5)$$

где S – площадь сечения соленоида.

Сравнивая формулы (2.5) и (2.2) легко найти, что индуктивность соленоида составит:

$$L = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2}{l} \cdot S \quad (2.6)$$

Если длина соленоида сравнима с его диаметром, то в формулу (2.6) вводится поправочный множитель:

$$L = K \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2}{l} \cdot S, \quad (2.7)$$

где K – поправочный множитель, учитывающий конечные размеры соленоида.

Из формулы (2.7) также следует, что при изменении магнитной проницаемости среды μ , заполняющей соленоид, изменяется величина его индуктивности. В этом случае, когда средой, заполняющей соленоид, является ферромагнетик, индуктивность контура будет зависеть от интенсивности его намагничивания, т. е. от силы тока, создающего магнитное поле в соленоиде.

Поэтому при наличии ферромагнитного сердечника $L = f(I)$ следует усреднять L , полученные при разных точках.

Соленоиды, в широком смысле, — это катушки индуктивности (рисунок 2.1), которые намотаны проводником на цилиндрический каркас, они могут быть однослойными, или многослойными.

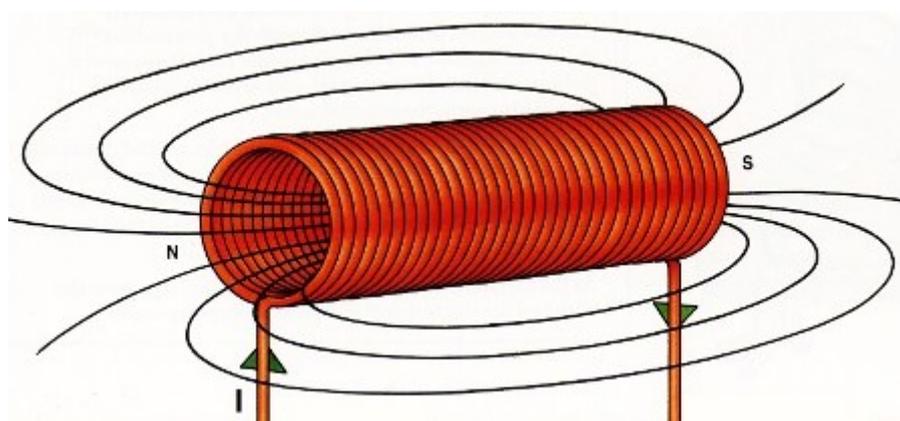


Рисунок 2.1 – Конструкция соленоида

Так как длина намотки соленоида достаточно превышает его диаметр, то при прохождении постоянного тока через такую обмотку, внутри нее, во внутренней полости, образуется практически однородное магнитное поле.

Если в конструкции соленоида магнитный материал отсутствует, то при протекании по проводнику постоянного тока, вдоль оси катушки формируется магнитное поле, индукция которого численно равна:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N}{l} = \mu_0 \cdot n \cdot I \quad (2.8)$$

где N – число витков в соленоиде;

l – длина намотки соленоида;

I – ток в соленоиде;

μ_0 — магнитная проницаемость вакуума.

На краях соленоида магнитная индукция вдвое меньше, чем внутри него, поскольку обе половины соленоида в месте их объединения приносят равный вклад в магнитное поле, создаваемое током соленоида. Это можно сказать о полубесконечном соленоиде или о достаточно длинной, по отношению к диаметру каркаса, катушке. Магнитная индукция по краям будет равна:

$$B_{KP} = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot n \cdot I \quad (2.9)$$

Так как соленоид — это есть катушка индуктивности, то, как и любая катушка, обладающая индуктивностью, соленоид может накапливать в магнитном поле энергию, которая численно равна работе, которую совершает источник для создания в обмотке тока, порождающего магнитное поле соленоида:

$$E = \frac{\psi \cdot I}{2} = \frac{L \cdot I^2}{2} \quad (2.10)$$

Изменение тока в обмотке приведет к возникновению ЭДС самоиндукции, и напряжение на краях провода обмотки соленоида будет равно:

$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt} \quad (2.11)$$

Индуктивность соленоида будет равна:

$$L = \mu_0 \cdot n^2 \cdot V = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{z^2}{l}, \quad (2.12)$$

где V – объем соленоида;

z – длина провода в обмотке соленоида;

n – число витков в единице длины соленоида;

l – длина соленоида;

μ_0 — магнитная проницаемость вакуума.

При пропускании через провод соленоида переменного тока, магнитное поле соленоида так же будет переменным. Сопротивление соленоида переменному току имеет комплексный характер, и включает в себя как активную, так и реактивную составляющие, определяемые индуктивностью и активным сопротивлением провода обмотки.

2.1.1 Практическое использование соленоидов

Соленоиды применяются во многих отраслях промышленности и во многих областях гражданской сферы деятельности. Часто поступательные электроприводы — это как раз пример работы соленоидов на постоянном то-

ке. Ножницы отрезания чеков в кассовых аппаратах, клапаны двигателей, тяговое реле стартера, клапаны гидравлических систем и т. д. На переменном токе соленоиды работают в качестве индукторов тигельных печей.

Обмотки соленоидов, как правило, изготавливают из медного, реже — из алюминиевого провода. В высокотехнологичных отраслях применяют обмотки из сверхпроводников. Сердечники могут быть железными, чугунными, ферритовыми или из иных сплавов, часто в форме пакета листов, а могут и вовсе отсутствовать.

В зависимости от назначения электрической машины, сердечник делается из того или иного материала. Устройства типа подъемных электромагнитов, сортирующие семена, очистители угля и т. д. Далее рассмотрим несколько примеров применения соленоидов.

2.2 Решение задачи в программной среде ELCUT

Цель работы: Найти индуктивность длинного соленоида.

Тип задачи: Осесимметричная задача магнитостатики.

Геометрия соленоида представлена на рисунке 2.2.

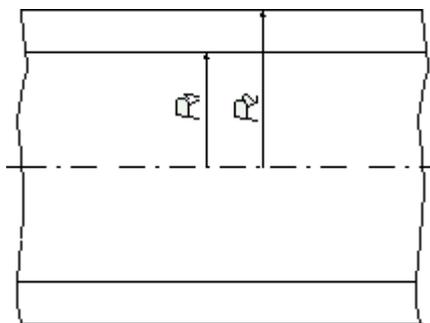


Рисунок 2.2 – Геометрия соленоида

Дано:

$R_1 = 30$ мм, $R_2 = 35$ мм, сила тока в проводнике $I = 1$ А, число витков $N = 100$, длина соленоида $l = 0.5$ м.

Для решения необходимо аналитически определить индуктивность соленоида, которая вычисляется по формуле:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot N^2 \cdot S}{l}, \quad (2.13)$$

где S – площадь поперечного сечения соленоида (м^2).

Решение данной задачи в ELCUT сводится к определению магнитного потока через контур, пересекающий соленоид, как показано на рисунке ниже. Непосредственно вычисление величины магнитного потока производится с помощью интегрального калькулятора. Далее, зная поток, можем определить искомую индуктивность соленоида:

$$L = \frac{N^2 \cdot \Phi}{I} \quad (2.14)$$

Аналитическая формула описывает идеальный соленоид, у которого отсутствуют краевые эффекты и обмотка представлена тонким токовым слоем. С помощью ELCUT можно смоделировать также и реальный соленоид, посчитав поле в окружающем воздухе.

Порядок выполнения работы:

- 1 Чтобы создать задачу нажмите кнопку Создать. Введите имя задачи и папку для хранения файла.
- 2 Выберите тип задачи Магнитостатика. Выберите класс модели Осесимметричная. Введите имена файла модели и файла свойств.
- 3 Выберите единицы длины (мм) и задайте систему координат (Декартовы координаты).

- 4 Задать время интегрирования. Задать шаг интегрирования.
- 5 Создание модели. Нажмите кнопку «Открыть модель». Настройте шаг сетки привязки, в меню Вид открыть Сетка привязки.
- 6 Перейдите в режим Вставки для создания модели. Постройте модель, используя прямые линии.

Готовая модель соленоида представлена на рисунке 2.3.

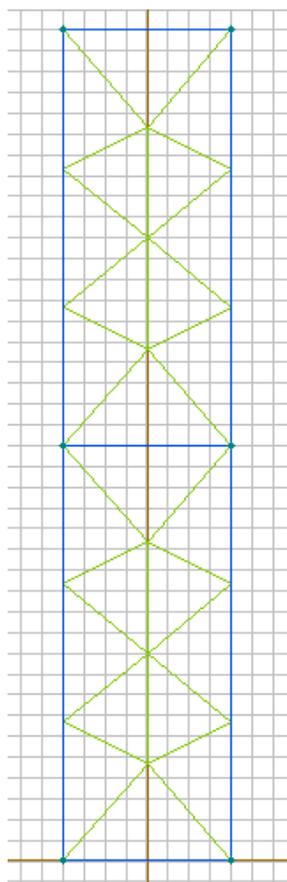


Рисунок 2.3 – Готовая модель соленоида

- 7 С помощью меток назначаются свойства материалов, граничные условия, источники. Чтобы присвоить метку объекту, его надо выделить. Перейдите в режим выделения. Выделите объект и в контекстном меню выберите Свойства. Введите имя метки (Обмотка, Воздух). Ребра обозначить как Граница и Осевые.

- 8 Щелкните дважды по метке, чтобы открыть окно ее свойств. Задаются свойства меток.

Свойства метки блока - воздух

Общие

Магнитная проницаемость

$\mu_x =$ Относительная
 $\mu_y =$ Абсолютная

Нелинейный материал Анизотропный материал

Коэрцитивная сила магнита

Величина: (А/м)
Направление: (Град)

Координаты

Декартовы
 Полярные

Электропроводность (только для переходных процессов)

$\gamma =$ (См/м) Зависит от температуры
Температура: (К)

Источники поля

$i =$ (А/м²) **f**

Плотность тока
 Полное число Ампер-витков

Проводники соединены

Параллельно
 Последовательно

ОК Отмена Справка

Рисунок 2.4 – Свойства воздуха

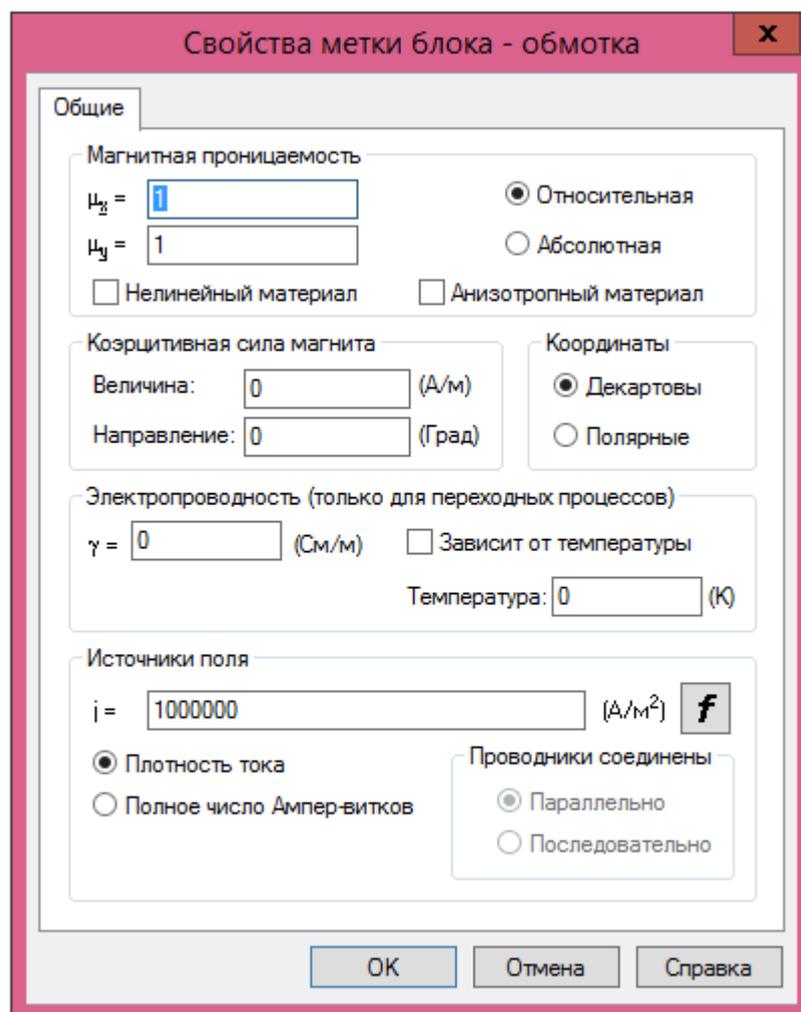


Рисунок 2.5 – Свойства обмотки

- 9 В свойствах границы задаем Нулевой нормальный поток.
- 10 Можно приступить к решению задачи. Чтобы запустить решатель, нажмите кнопку Решить.
- 11 С помощью контекстного меню открыть Свойства картины поля, выбрать Цветная карта.
- 12 Задаем Вектор индукции.
Полученный результат представлен на рисунке 2.6.

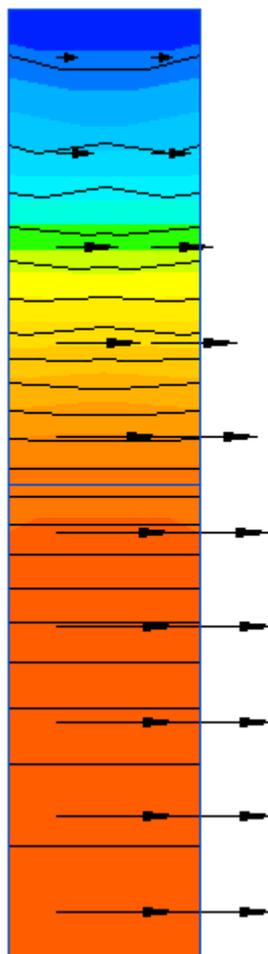


Рисунок 2.6 – Полученный результат

13 Для построения графика следует нажать кнопку Добавить к контуру, провести контур по границе соленоида. Затем открыть график индукции с помощью кнопки График.

Полученный график показан на рисунке 2.7.

14 Для продолжения решения данной задачи следует подключить Геометрию во вкладке связь задач. Так же следует сменить тип задачи на Упругие напряжения и деформации.

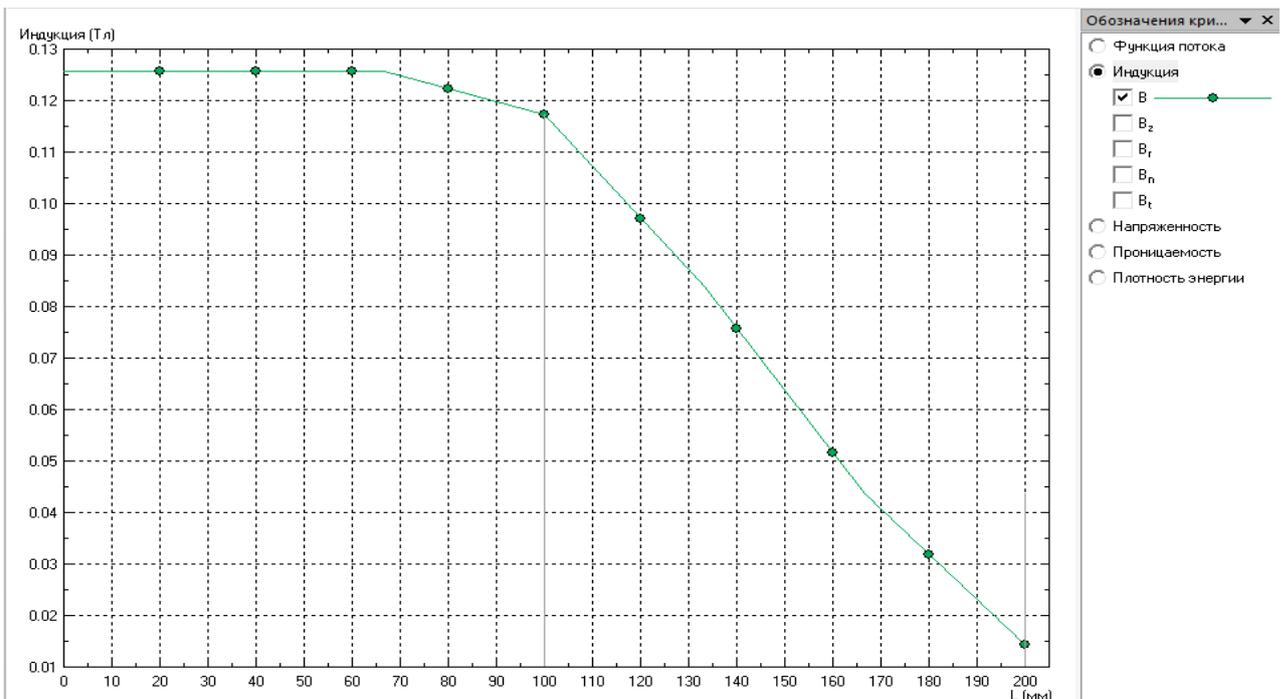


Рисунок 2.7 – Полученный график

15 Меняет метки блоков.

Свойства воздуха представлены на рисунке 2.8. Свойства обмотки представлены на рисунке 2.9. Свойства границы представлены на рисунке 2.10.

Свойства метки блока - воздух

Упругие константы | Нагрузки | Допустимые напряжения

Модуль Юнга
 $E_z =$ Нет $E_r =$ Нет $E_\theta =$ Нет (Н/м²)

Коэффициент Пуассона
 $\nu_{rz} =$ $\nu_{\theta z} =$ $\nu_{\theta r} =$

Модуль сдвига
 $G_{zr} =$ 0 (Н/м²) Анизотропный материал

Декартовы Полярные

Рисунок 2.8 – Свойства воздуха

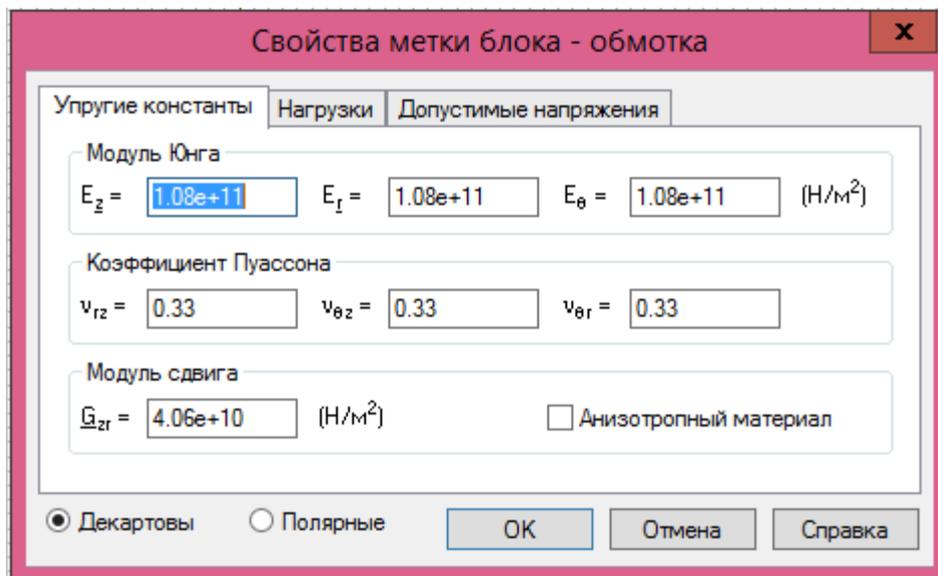


Рисунок 2.9 – Свойства обмотки

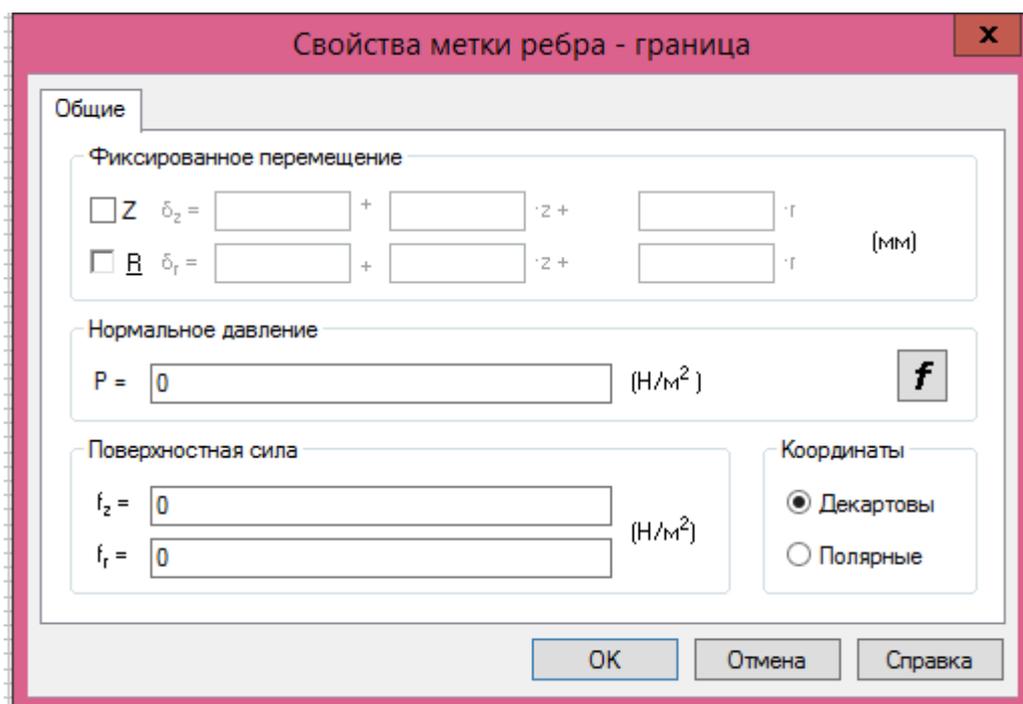


Рисунок 2.10 – Свойства границы

Свойства осевых представлены на рисунке 2.11.

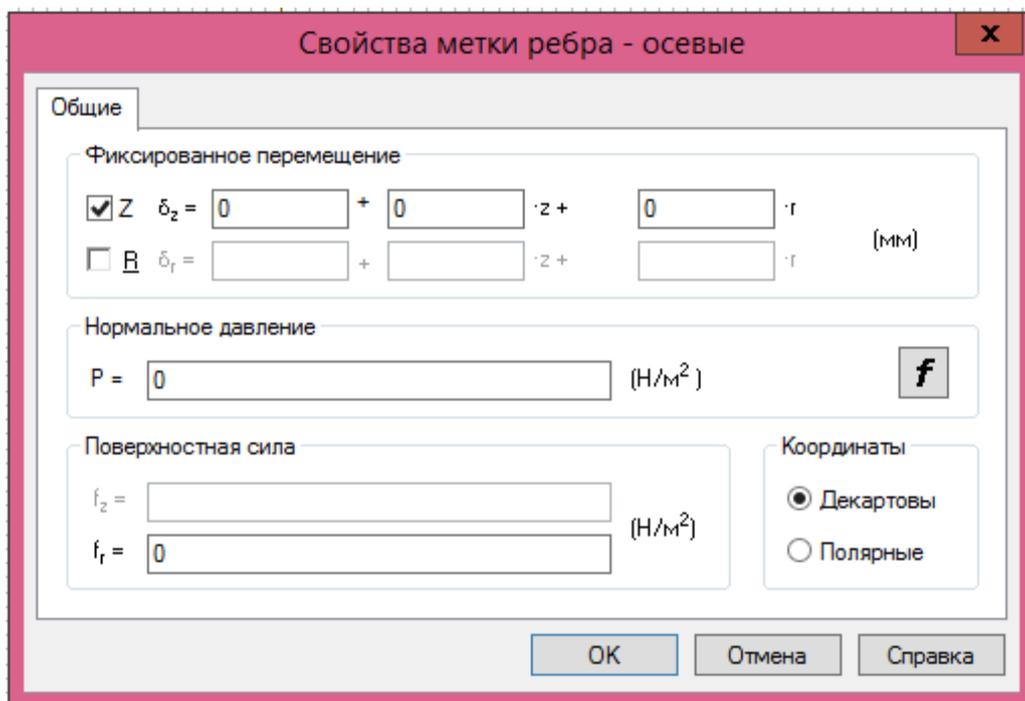


Рисунок 2.11 – Свойства осевых

16 Можно приступить к решению задачи. Чтобы запустить решение задачи, нажмите кнопку Решить.

17 Для построения графика следует нажать кнопку Добавить к контуру, провести контур по границе соленоида. Затем открыть график индукции с помощью кнопки График. Задача решена.

Результат:

Площадь поперечного сечения соленоида:

$$S = \pi \cdot \left(\frac{(R_1 + R_2)}{2} \right) \cdot 2 = 3.142 \cdot \left(\frac{0.03 + 0.035}{2} \right) \cdot 2 = 0.0332 \text{ м}^2$$

Индуктивность идеального соленоида:

$$L = 4 \cdot 10^{-7} \cdot 3.142 \cdot 1002 \cdot \frac{0.00332}{0.5} = 83.45 \text{ мкГн}$$

Магнитное поле идеального соленоида представлено на рисунке 2.12.

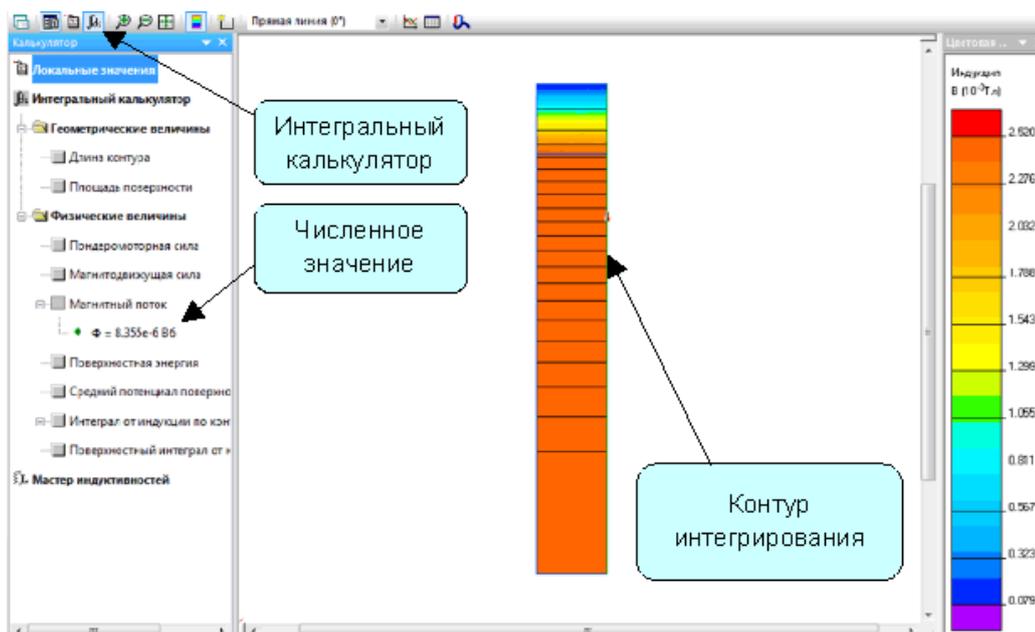


Рисунок 2.12 – Магнитное поле идеального соленоида

Магнитное поле реального соленоида представлено на рисунке 2.13.

Сравнение полученных результатов показано в таблице 2.1.

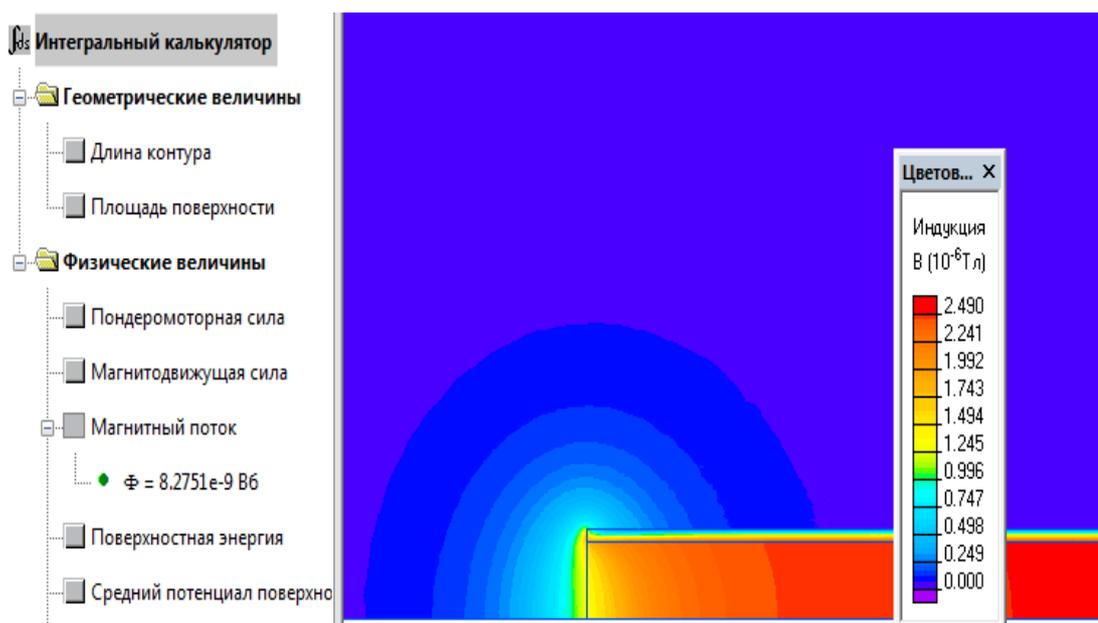


Рисунок 2.13 – Магнитное поле реального соленоида

Таблица 2.1 – Сравнение полученных результатов

	Индуктивность L
Идеальный соленоид, теория	83.45 мкГн
Идеальный соленоид, ELCUT	83.55 мкГн
Реальный соленоид, ELCUT	82.75 кГн

3 Проводящий цилиндр во вращающемся магнитном поле

3.1 Вращающееся магнитное поле

Как известно, магнитное поле представляет собой особую форму материи, возникающую одновременно с электрическим током в проводящих материалах. Оно также может возникать вокруг постоянных магнитов из-за наличия движения заряженных частиц на молекулярном уровне. Изображение магнитного поле в приведенных ситуациях представлено на рисунке 3.1.

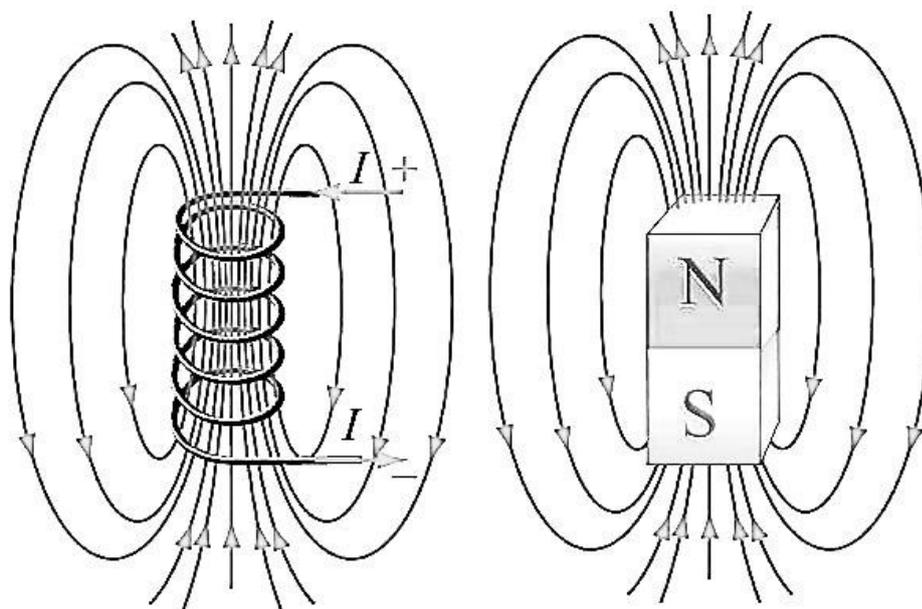


Рисунок 3.1 – Магнитное поле соленоида и постоянного магнита

Магнитное поле образуется лишь вокруг электрических зарядов, находящихся в движении. Это обуславливает тот факт, что магнитное и электрическое поле являются взаимосвязанными, и вместе образуют электромагнитное поле.

Свойства магнитного поля:

- 1 Образуется в результате движения электрических зарядов.
- 2 Силовой характеристикой любой точки поля является магнитная индукция B , единица измерения которого – Тесла, Тл.
- 3 Может взаимодействовать только с проводящими материалами и другими источниками магнитного поля.
- 4 Не может ощущаться естественными органами чувств человека.
- 5 По своей природе является электродинамическим, потому что существует лишь при движении заряженных частиц и оказывает влияние на движущиеся заряды.
- 6 Заряженные частицы движутся перпендикулярно линиям поля.

Магнитное поле бывает постоянным и переменным. Постоянное поле образуется при пропускании постоянного тока через проводящую среду, соответственно, переменное – при пропускании переменного тока. В электротехнике переменное магнитное поле получило гораздо более широкое применение, чем постоянное.

При пропускании по обмотке катушки синусоидального электрического тока вокруг неё образуется магнитное поле, вектор индукции которого меняет направление (пульсирует) вдоль катушки по синусоидальному закону. Мгновенное направление вектора индукции поля зависит от намотки катушки и мгновенного направления тока в ней и может быть определено по правилу буравчика. Так для случая, изображенного на рисунке 3.2, вектор индукции направлен по оси катушки вверх. Через полпериода, когда, при том же модуле, ток изменит свой знак на противоположный, вектор магнитной индукции, при той же абсолютной величине, поменяет свою ориентацию в

пространстве на 180 градусов. Таким образом, магнитное поле катушки с синусоидальным током называют пульсирующим.

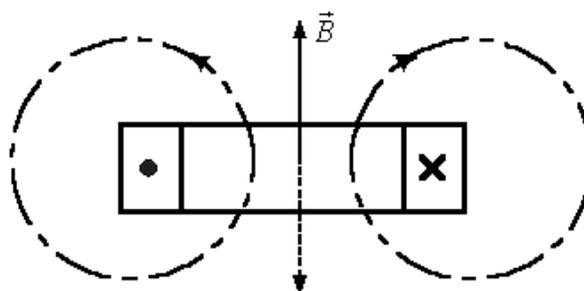


Рисунок 3.2 – Магнитное поле катушки с синусоидальным током

Пульсирующее магнитное поле нашло применение в электротехнике, особенно во вращающихся машинах. Дело в том, что при определенном расположении катушек обмотки статора и при пропускании по ним тока в зубцовой зоне машины будет наблюдаться так называемый эффект вращения магнитного поля.

С целью усиления и направления магнитного потока в электрической машине для него создается магнитная цепь, состоящая из магнитопроводов (сердечников) статора и ротора (рисунок 3.3).

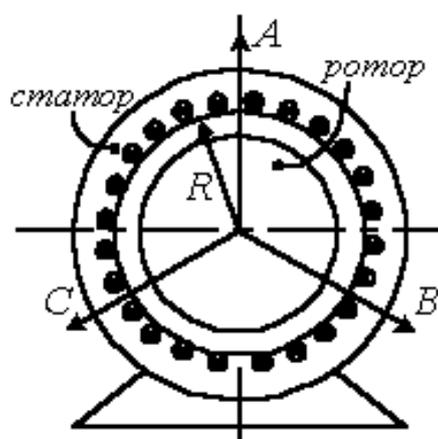


Рисунок 3.3 – Конструкция электрической машины переменного тока

На статоре расположены три катушки, магнитные оси которых сдвинуты по расточке магнитопровода на $2/3$ полюсного деления τ , которое можно определить по формуле:

$$\tau = \frac{2\pi R}{2p} = \frac{\pi R}{p}, \quad (3.1)$$

где R – радиус магнитопровода статора;

p – число пар полюсов двигателя (число эквивалентных вращающихся постоянных магнитов, создающих магнитное поле).

На рисунке 3.3 сплошными линиями отмечены положительные направления пульсирующих магнитных полей вдоль осей каждой из обмоток (А, В и С).

При подключении катушек к системе трехфазного напряжения, изменение мгновенных значений токов в каждой фазе будет происходить согласно графику, представленному на рисунке 3.4.

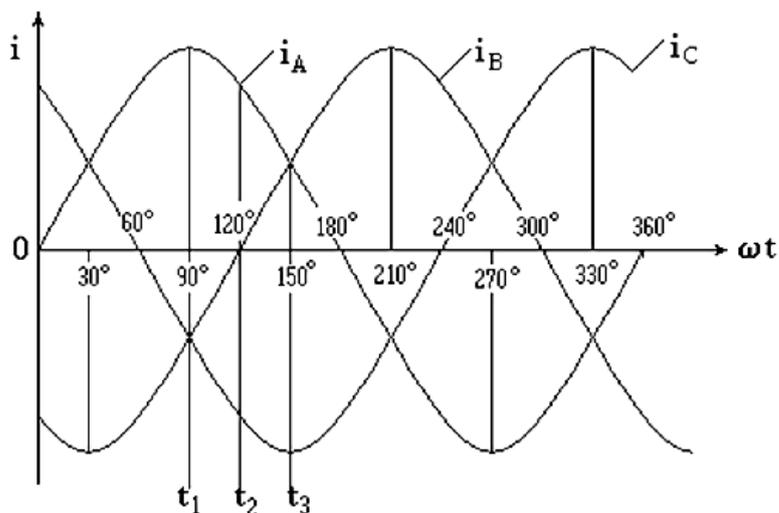


Рисунок 3.4 – График изменения токов в обмотке статора электродвигателя

На рисунке 3.5 изображено результирующее поле машины для моментов времени t_1, t_2, t_3 .

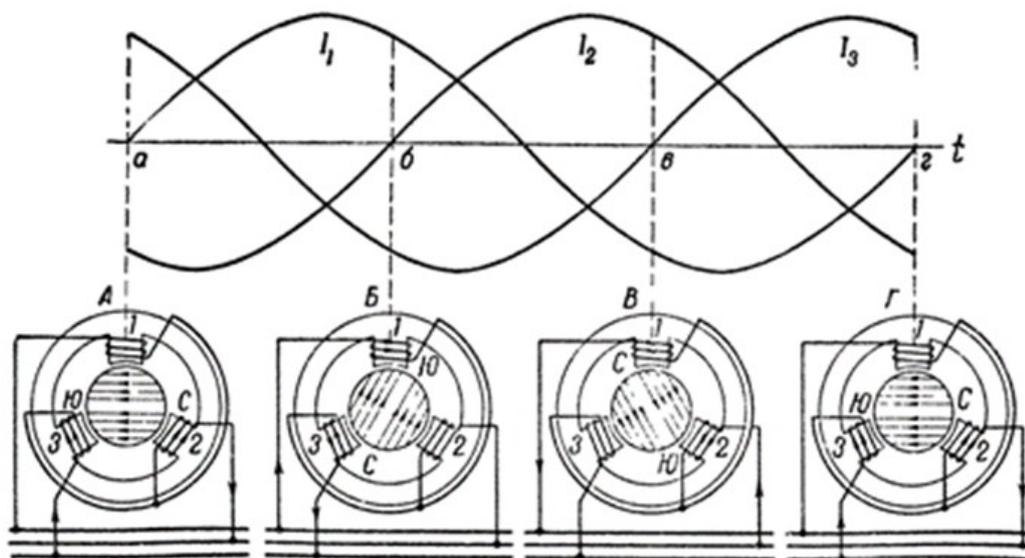


Рисунок 3.5 – Изменение магнитного поля электродвигателя во времени

На основе сказанного выше, можно заключить, что круговым вращающимся полем называется магнитное поле, вектор индукции которого вращается в пространстве с постоянной угловой скоростью, не изменяясь по модулю.

Чтобы создать вращающееся магнитное поле необходимо выполнить следующие условия:

1 Токи, питающие катушки, должны быть сдвинуты по фазе на некоторый угол (для двухфазной системы – на 90° , для трехфазной – на 120°).

2 Оси катушек должны быть сдвинуты в пространстве друг относительно друга соответственно смещению векторов токов.

Магнитная индукция в любой точке зубцовой зоны машины B_x постоянна, если $\pi x/\tau - \omega t = \text{const}$. Это означает, что если мысленно выбрать в воз-

душном зазоре некоторую точку и перемещать ее вдоль магнитопровода со скоростью:

$$v = \frac{w\tau}{\pi} = \frac{2\pi f\tau}{\pi} = 2\pi f \quad (3.2)$$

То тогда индукция для этой точки будет неизменной. Таким образом, с течением времени кривая распределения магнитной индукции, перемещается вдоль рашочки статора, не меняя своей формы. Следовательно, результирующее поле вращается с постоянной скоростью, которую принято определять в оборотах в минуту согласно выражению:

$$n_0 = \frac{2\pi\tau}{2p\tau} \cdot 60 = 60 \frac{f}{p} \quad (3.3)$$

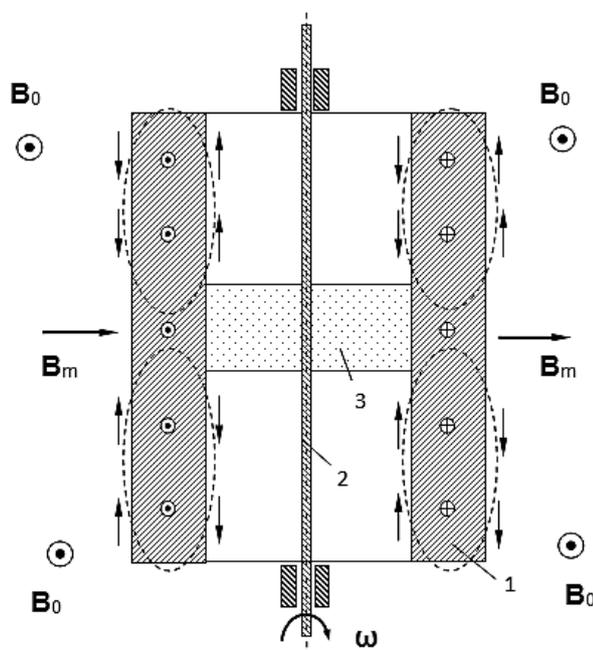
Выражение (3.3) является общим для всех типов синхронных и асинхронных двигателей. Можно заметить, что для синхронных двигателей частота вращения поля совпадает с частотой вращения ротора, в то время как для асинхронных, она несколько превышает скорость вращения ротора на величину скольжения.

Вращающееся магнитное поле можно создавать при помощи любой многофазной системы переменного тока, т. е. системы с числом фаз — две, три и т. д. Наибольшее распространение в промышленности получило вращающееся магнитное поле трехфазной обмотки машины переменного тока.

Выше был рассмотрен механизм образования вращающегося магнитного поля, теперь следует ответить на вопрос, о том, как будет влиять такое поле на полый проводящий цилиндр.

Известно, что постоянное поле возникает вокруг движущихся заряженных частиц, а также создается ферро- и ферромагнетиками, в которых макроскопический магнитный момент обусловлен внутриатомными токами. А может ли образоваться постоянное поле в немагнитном металлическом провод-

нике, через который не пропускают ток? Можно поставить простой эксперимент. Пусть имеется алюминиевый цилиндр, внешний диаметр которого - 200 мм, длина - 200 мм и толщина стенок - 20 мм. При вращении полого цилиндра во внешнем постоянном поле, в нем будет наблюдаться образование так называемого вторичного магнитного поля. При скорости вращения алюминиевого полого цилиндра 60 рад/с в постоянном магнитном поле индукцией $1,6 \cdot 10^{-4}$ Тл создается вторичное магнитное поле, перпендикулярное внешнему полю (рисунок 3.6). Появившееся вторичное магнитное поле характеризуется индукцией равно $\sim 10^{-4}$ Тл в центральной части цилиндра на расстоянии от 5 мм до 10 мм от его поверхности.



1 – полый немагнитный алюминиевый цилиндр; 2 – ось цилиндра; 3 – неметаллическая опора; B_0 – вектор индукции внешнего постоянного поля, ω – угловая скорость вращения, B_m – вектор индукции результирующего магнитного поля

Рисунок 3.6 – Сечение полого вращающегося цилиндра в магнитном поле

На рисунке 3.6 стрелками изображено направление магнитной индукции, наводящейся локальными токовыми диполями проводника. Небольшими окружностями с точками и с крестиками обозначено направление движения электронов при вращении цилиндра.

За явление наведения вторичного поля ответственна сила Лоренца, действующая на электроны вращающегося алюминиевого цилиндра. Она вызывает в материале цилиндра замкнутые пульсирующие токи, ответственные за возникновение вторичного магнитного поля. Генерируемое вторичное поле является мультипольным в сечении этого цилиндра, а общее вторичное магнитное поле всего цилиндра – дипольное. Мультипольная конфигурация генерируемого магнитного поля, наблюдаемая в поперечном сечении полого цилиндра, связана с его геометрической формой, определяющей пути протекания токов. В связи с такой структурой, наводимое магнитное поле убывает с расстоянием от проводника гораздо быстрее, чем поле обычного магнитного диполя.

В общем случае величину максимальной индукции и направление максимального магнитного момента, генерируемого при вращении металлического немагнитного проводника во внешнем магнитном поле, можно определить по выражению:

$$B_m = k_m(\sigma, d)[B_0 \times \omega] \quad (4)$$

где B_m – максимальное значение магнитной индукции, наводимой вращающимся цилиндром;

$k_m(\sigma, d)$ – коэффициент, зависящий от проводимости, формы и величины цилиндра;

B_0 – индукция внешнего постоянного магнитного поля;

ω – угловой скоростью вращения цилиндра.

Коэффициент $k_m(\sigma, d)$ пропорционален проводимости, толщине и радиусу цилиндра.

Величина генерируемого магнитного поля, разумеется, зависит от расстояния между вращающимся проводником и точкой измерения вторичной магнитной индукции. Рассечённый вдоль продольной оси полый алюминиевый цилиндр сохраняет при вращении во внешнем магнитном поле способность к созданию вторичного магнитного поля.

Однородный и сплошной металлический цилиндр при вращении во внешнем постоянном магнитном поле также генерирует вторичное магнитное поле, но несколько меньшей величины, чем полый цилиндр. Полый цилиндр со стенками, навитыми из алюминиевой фольги, генерирует вторичное магнитное поле, величина которого прямо пропорциональна числу слоев фольги, то есть толщине этого цилиндра.

Таким образом, практически любой вращающийся во внешнем магнитном поле металлический немагнитный проводник создает собственное вторичное магнитное поле, прямо пропорциональное внешнему постоянному магнитному полю и угловой скорости вращения. При этом сам вращающийся в магнитном поле (в том числе в магнитном поле Земли) проводник подобен униполярной электрической машине с короткозамкнутым ротором.

То, что эффект образования вторичного магнитного поля создается именно внешними, валентными электронами проводника следует из сильного влияния электронной проводимости материала проводника на величину эффекта. Цилиндр из более проводящего металла создает большее по величине вторичное магнитное поле, чем цилиндр из менее проводящего металла или металлического сплава при прочих равных условиях (внешнее магнитное поле, частота вращения, размеры). По современным научным представлениям, электрическая проводимость прямо пропорциональна средней длине свободного пробега электронов, которая в металлах может превышать межатомные расстояния в тысячи раз. При этом считается, что на длине свободного пробега электроны ведут себя как свободные частицы: они обладают инерцией, то есть стремятся сохранить состояние движения в каждый отдельный момент времени. Это подтверждают опыты Стюарта и Толмена с торможением

вращающихся катушек, а также инерционные свойства свободных электронов, образующиеся в электрическом токе самоиндукции. На электроны проводников могут оказывать влияние электромагнитные и гравитационные силы. Пример действия гравитационных сил – это работа униполярного индуктора, осуществляемая центробежной силой, действующей на внешние электроны вращающегося металлического проводника.

Эффект образования вторичного магнитного поля в проводнике, вращающемся в магнитном поле, – это пример действия силы Лоренца на внешние электроны проводника, которые начинают перемещаться от одного атома к другому. Расстояние, преодолеваемое электронами в непрерывном движении между атомами проводника, соответствует длине свободного пробега, как если бы эти электроны были свободными. Большая длина свободного пробега электронов в проводниках – эффект, который наблюдается в металлах и металлических сплавах, когда их удельное электрическое сопротивление не превышает $\sim 2 \times 10^{-6}$ Ом·м. При значительном удельном электрическом сопротивлении проводника «длина свободного пробега» электронов равна расстоянию между соседними атомами, и в таком случае исчезает явление самоиндукции, прекращается работа униполярного генератора и наведение внутреннего магнитного поля вращающимся проводником.

Когда внешнего поля нет, то и в этом случае вращающийся немагнитный проводник может генерировать свое магнитное поле. В этом случае на свободные электроны проводника должна действовать другая сила, например, центробежная, как в униполярном индукторе. Для этого нужно соединить центральный и периферийный участки быстро вращающегося проводника через токосъемные кольца. Другие силы инерции также способны привести электроны проводника в направленное движение и создать вокруг него магнитное поле. При торможении вращающихся проводников – это сила инерции вращательного движения (опыты Стюарта и Толмена), а при прямолинейном торможении – сила Ньютона.

Вторичное магнитное поле будет практически отсутствовать в тонком металлическом диске, если его ось совпадает с осью вращения, а вектор внешнего магнитного поля параллелен плоскости этого диска. При равномерном вращении такого наборного диска с изолированными элементами со скоростью до 200 оборотов в секунду величина вторичной магнитной индукции практически отсутствовала (с погрешностью $\sim 10^{-6}$ от магнитной индукции внешнего поля) при перпендикулярном расположении оси вращения по отношению к вектору внешнего магнитного поля. Это показывает, что никаких других механизмов возбуждения вторичного магнитного поля, кроме как описанных выше, нет. В этом опыте действие силы Лоренца исключалась устройством вращающегося диска. Вторичное магнитное поле также не возникает в разомкнутом (медном) соленоиде при его вращении вдоль продольной оси.

Проявляющаяся в этой простой динамической системе сложная структура магнитного поля может быть тем звеном, которое поможет понять причину образования макроскопического магнитного момента в магнетиках.

3.2 Решение задачи в программной среде ELCUT

Тип задачи: Плоскопараллельная задача расчета нестационарного магнитного поля. Геометрия модели представлена на рисунке 3.7.

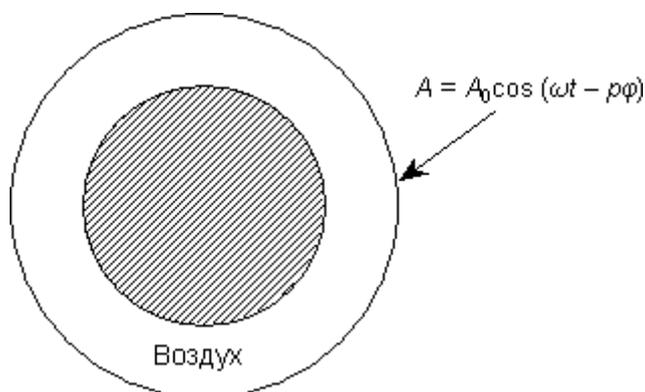


Рисунок 3.7 – Геометрия модели

Дано:

Относительная магнитная проницаемость воздуха и проводника $\mu = 1$;

Электропроводность проводника $\gamma = 6.3 \cdot 10^7$ См/м;

Величина индукции внешнего поля $B_0 = 1$ Тл;

Число полюсов $2p = 6$;

Частота тока $f = 50$ Гц.

Этапы моделирования:

- 1 Выбор типа задачи и файлов модели.
- 2 Задание геометрии модели.
- 3 Задание физических свойств.
- 4 Решение и анализ результатов.

1 Выбор типа задачи и файлов модели

Чтобы создать задачу, нажимаем кнопку «Создать» и выбираем «Задача EICut». Создание задачи показано на рисунке 3.8.

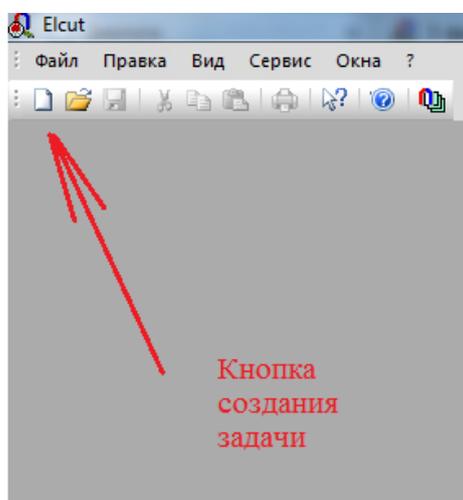


Рисунок 3.8 – Создание задачи

Вводим имя задачи и папки для хранения файлов. Присвоение имени показано на рисунке 3.9.

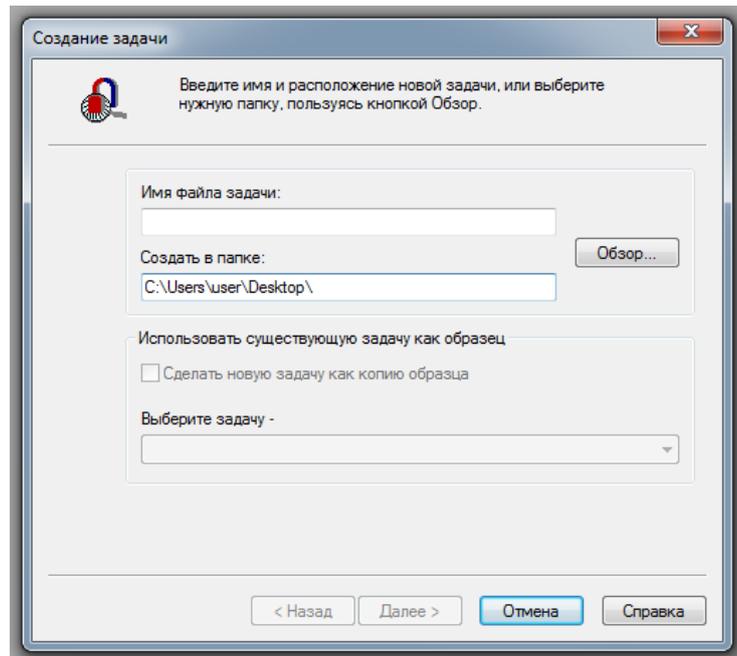


Рисунок 3.9 – Присвоение имени

Выбираем тип задачи «Магнитное нестационарное поле», класс модели - «Плоская», ед. длины - метры, координаты – полярные. Свойства задачи показаны на рисунке 3.10.

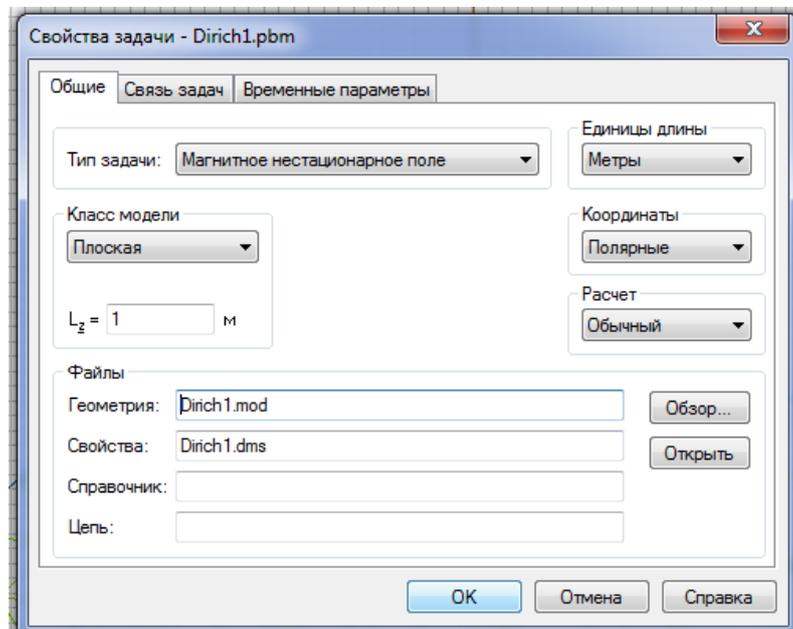


Рисунок 3.10 – Свойства задачи

2 Задание геометрии модели

На панели выбираем режим вставки новых объектов (рисунок 3.11) и создаем геометрию, как показано на рисунке 3.12 (Благодаря периодичности поля используем только половину модели).

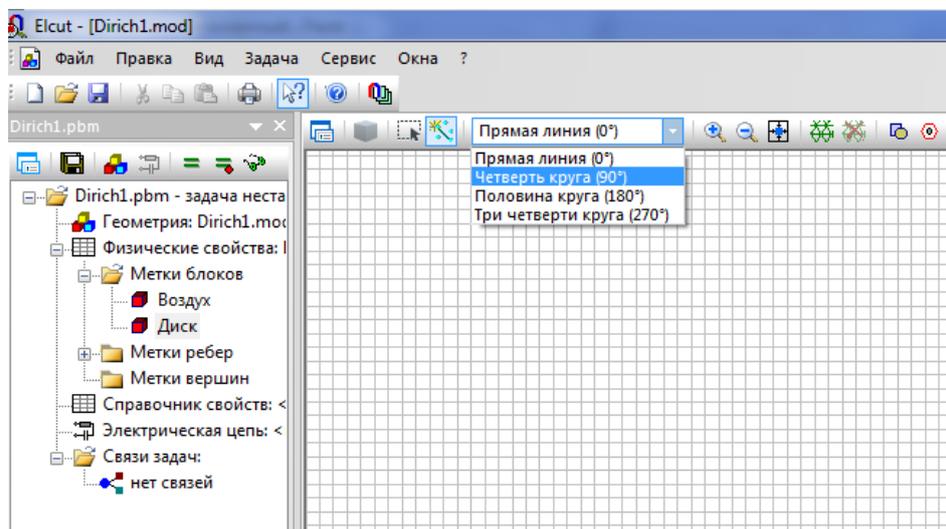


Рисунок 3.11 – Выбор режима вставки новых объектов

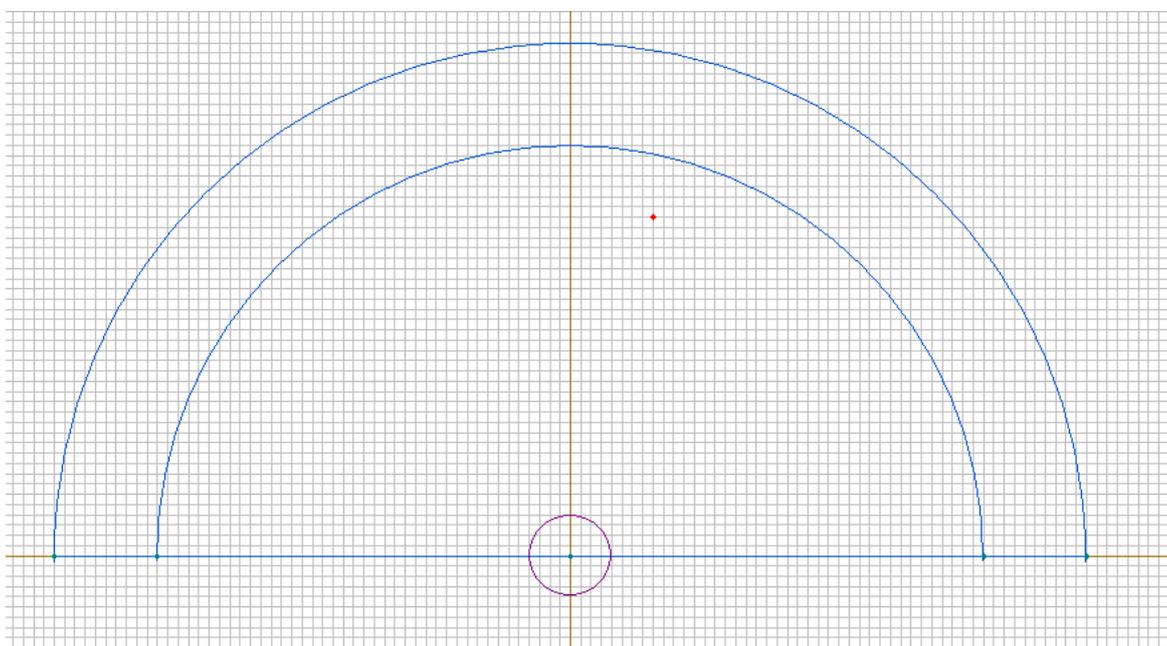


Рисунок 3.12 – Геометрия задачи

После создания модели, необходимо построить сетку конечных элементов, пример на рисунке 3.13.

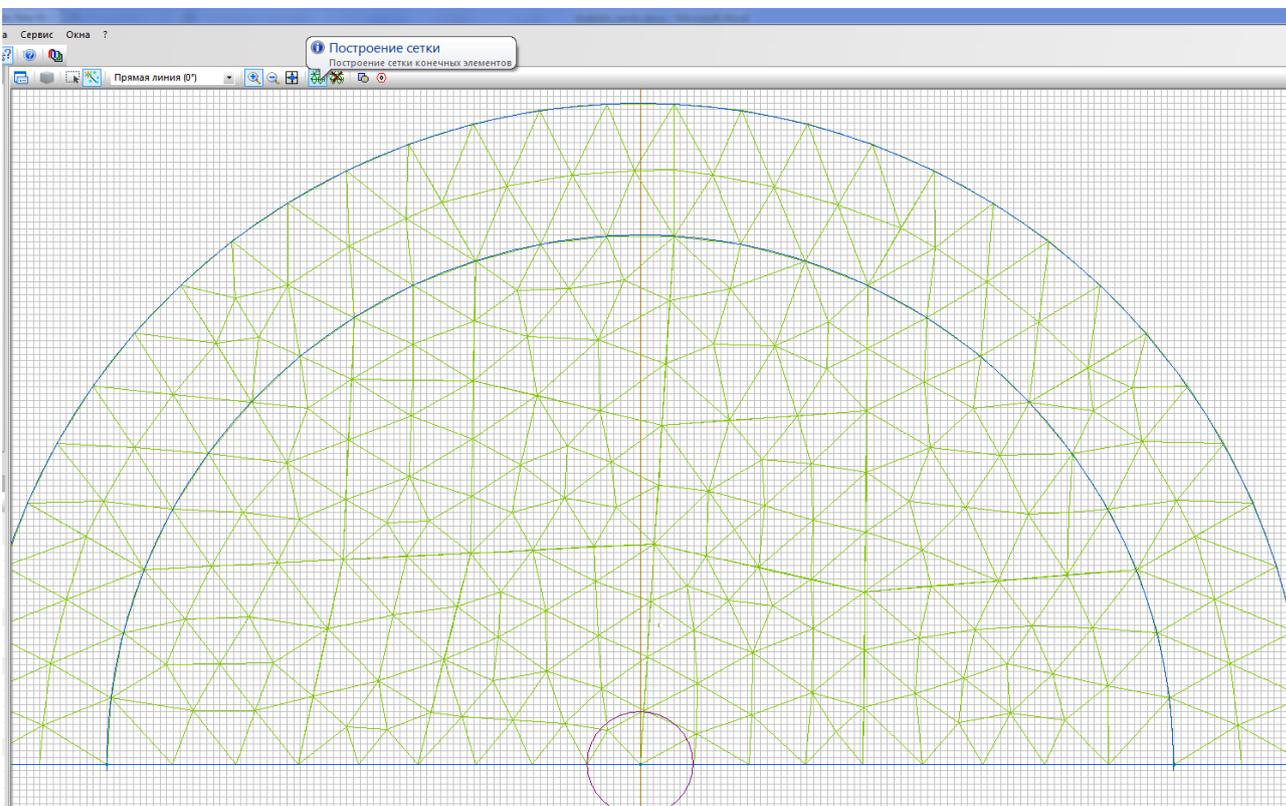


Рисунок 3.13 – Построение сетки конечных элементов

3 Задание физических свойств

Для того, чтобы присвоить свойства определенному материалу, сначала необходимо выделить его двойным кликом, и в появившемся окне задать метку объекта, для воздуха (рисунок 3.14), для диска (рисунок 3.15), для ребер (рисунок 3.16), периодичность (рисунок 3.17).

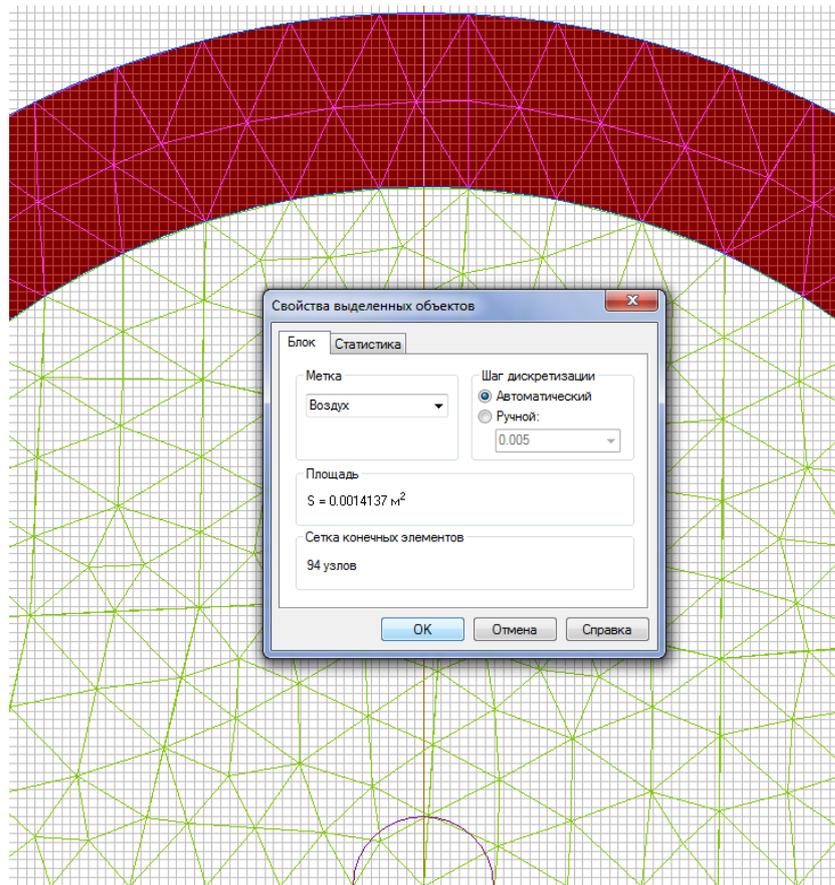


Рисунок 3.14 – Задание метки объекта (воздух)

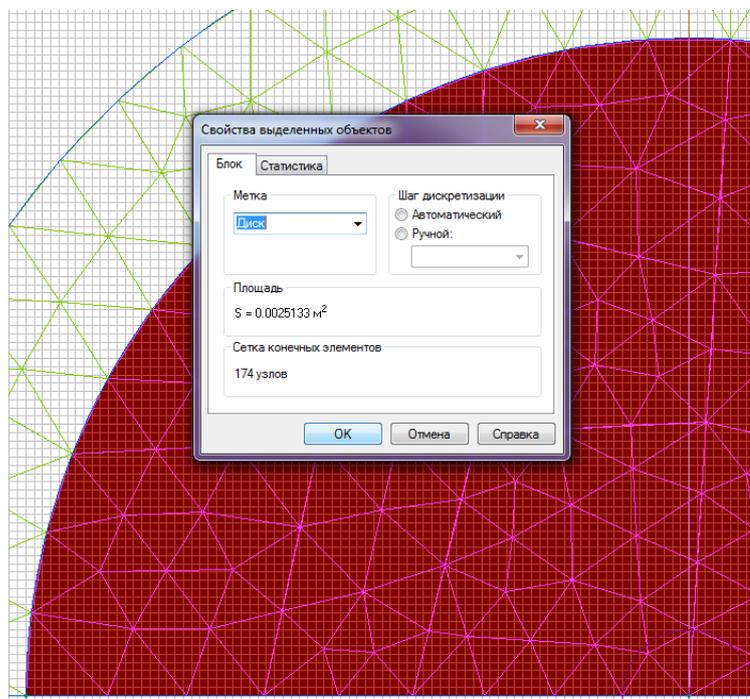


Рисунок 3.15 – Задание метки для диска

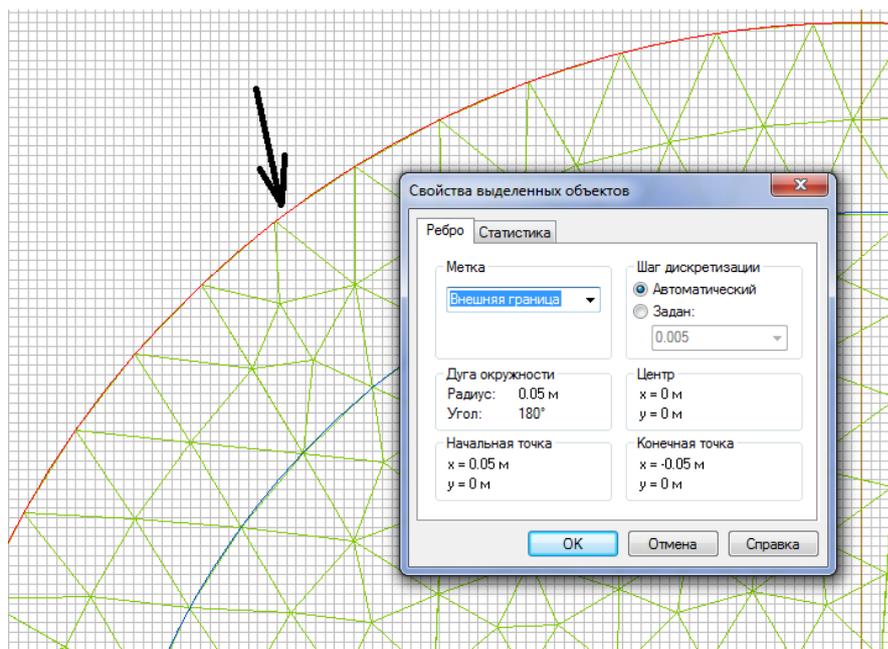


Рисунок 3.16 – Задание внешней границы

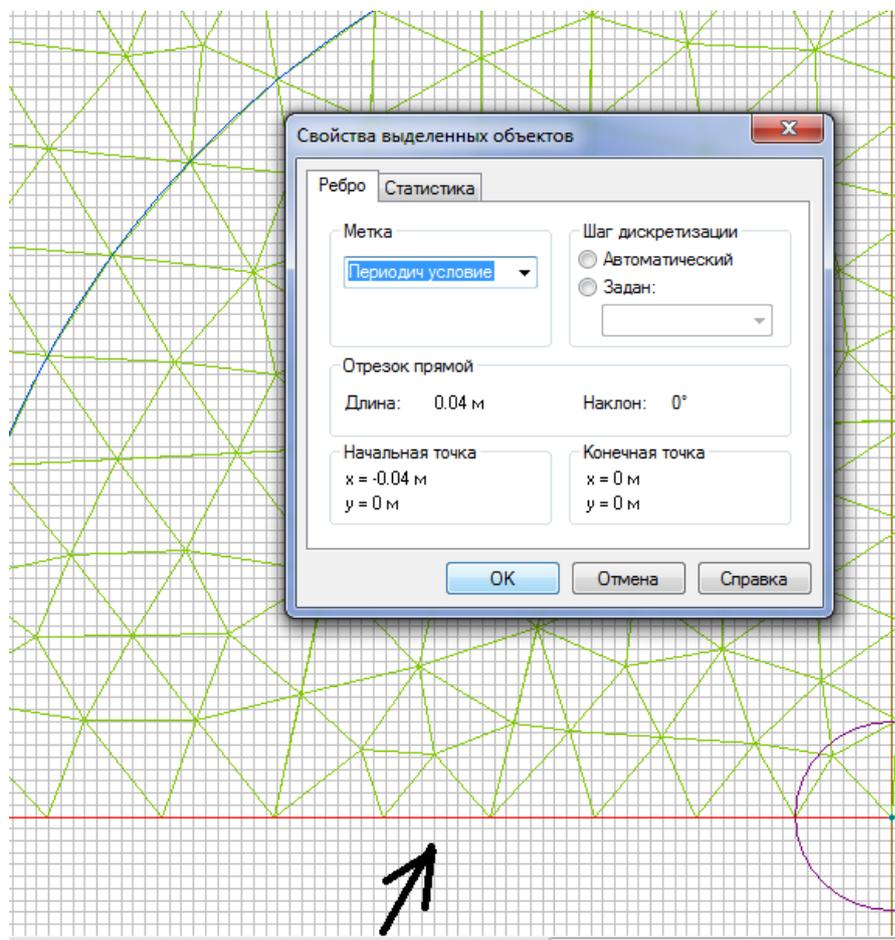


Рисунок 3.17 – Задание метки условий периодичности

Все заданные метки находятся слева на панели (рисунок 3.18).

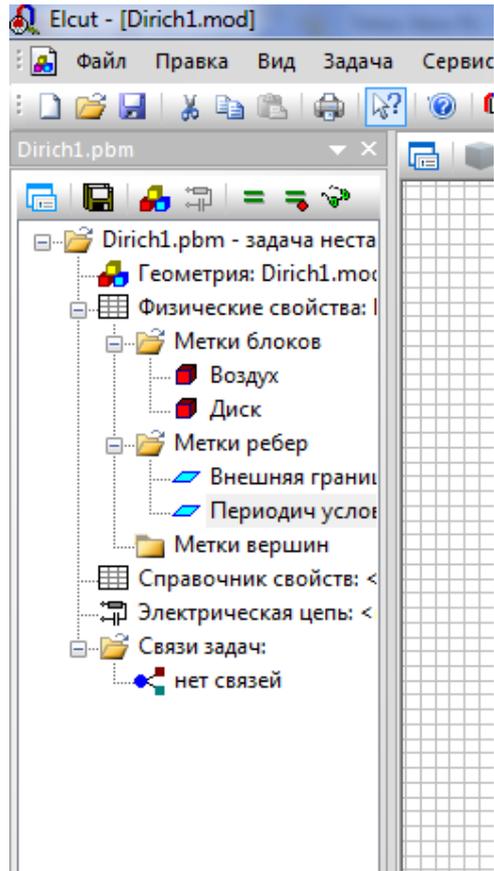


Рисунок 3.18 - Панель меток

Для того, чтобы задать параметры метки, необходимо щелкнуть на нее дважды и в появившемся окне задать нужные значения. Например, магнитная проницаемость воздуха равна 1, рисунок 3.19.

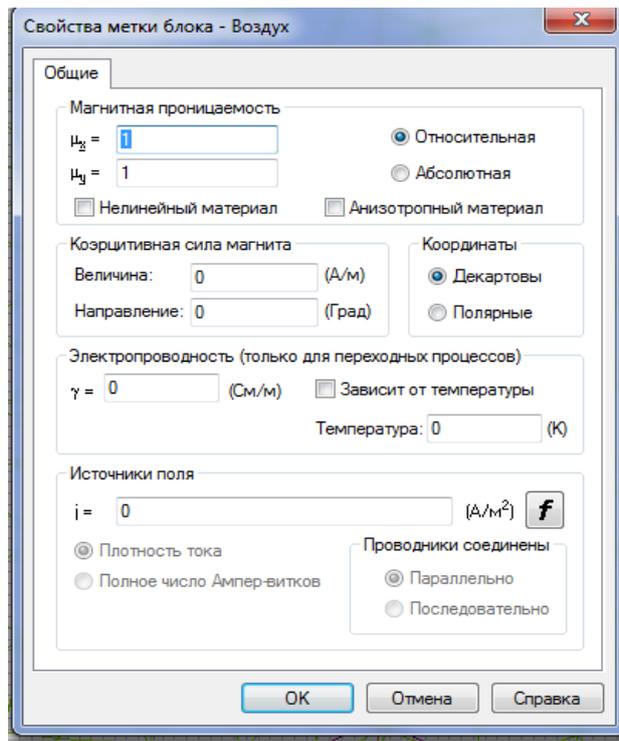


Рисунок 3.19 – Свойства метки Воздух

Проницаемость проводника равна так же 1, а электропроводность проводника $\gamma = 6.3 \cdot 10^7$ См/м, рисунок 3.20.

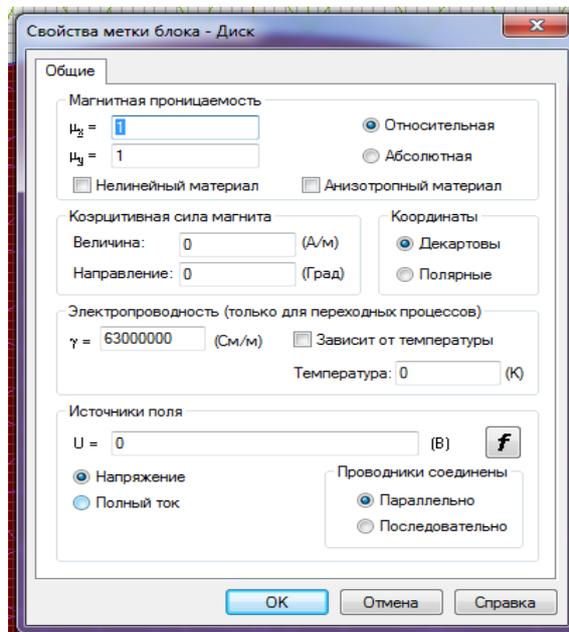


Рисунок 3.20 - Свойства метки Диск

Чтобы задать вращающееся магнитное поле на внешней границе области, $B_n = B_0 \sin(\omega t - p\varphi)$, приложим граничное условие Дирихле вида: $A = \cos(18000 \cdot t - 3 \cdot \text{atan2}(y/x)) / 60$. Коэффициент $A_0 = 1/60$ получается из выражения: $B_n = (1/r)(\partial A / \partial \varphi) = A_0 p \cdot \sin(\omega t - p\varphi) / r$ и $A_0 = B_0 \cdot r / p$ (рисунок 3.21).

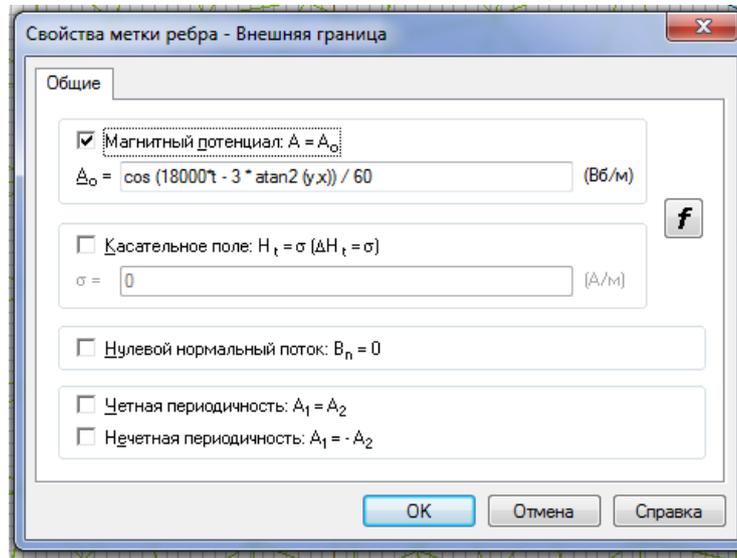


Рисунок 3.21 - Задание свойств на внешней границе

Благодаря периодичности поля используем только половину модели и задаем периодическое граничное условие $A_1 = -A_2$ на плоскости разреза (рисунок 3.22).

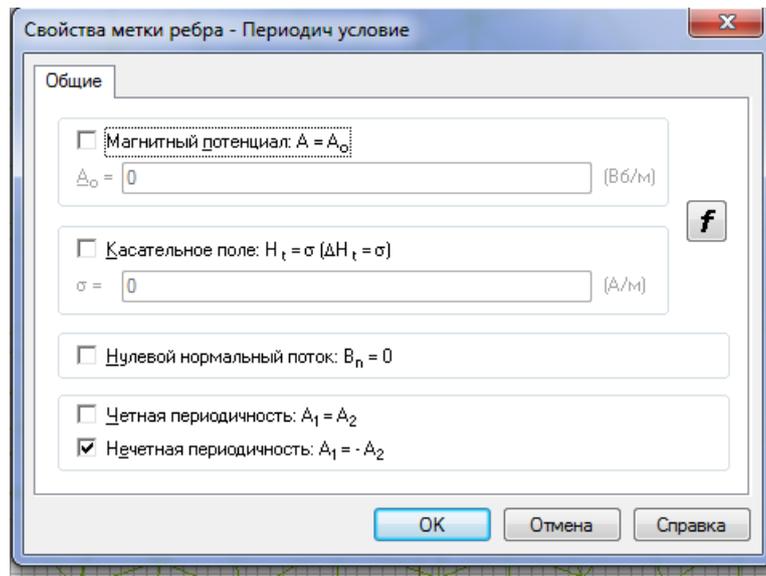


Рисунок 3.22 - Задание свойств периодичности

После задания всех свойств меток, задаем время интегрирования. Задача→Свойства задачи→ Временные параметры. Время интегрирования 0,5 с (рисунок 3.23).

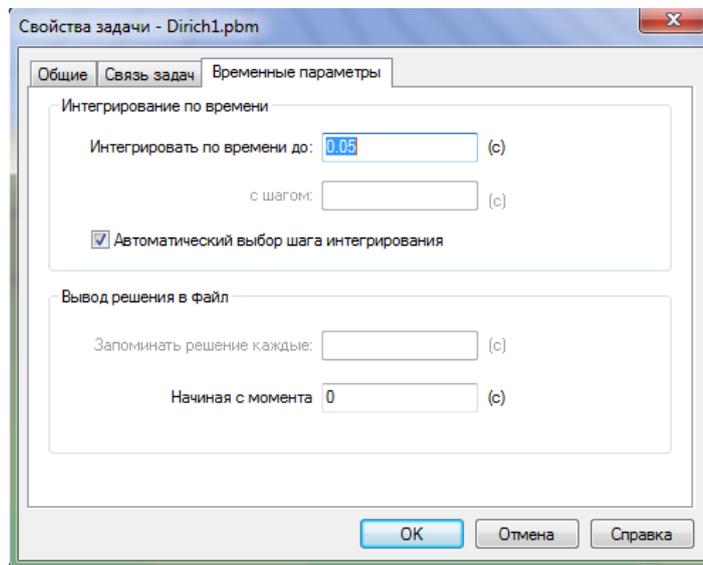


Рисунок 3.23 - Задание время интегрирования

4 Решение задачи

Теперь можно приступить к непосредственному решению задачи (рисунок 3.24).

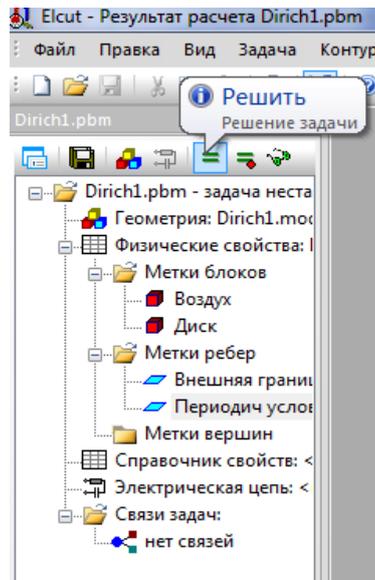


Рисунок 3.24 - Решение модели

Видим результат, как будет вращаться цилиндр в переменном магнитном поле. Для наглядности запускаем анимацию, как показано на рисунке 3.25.

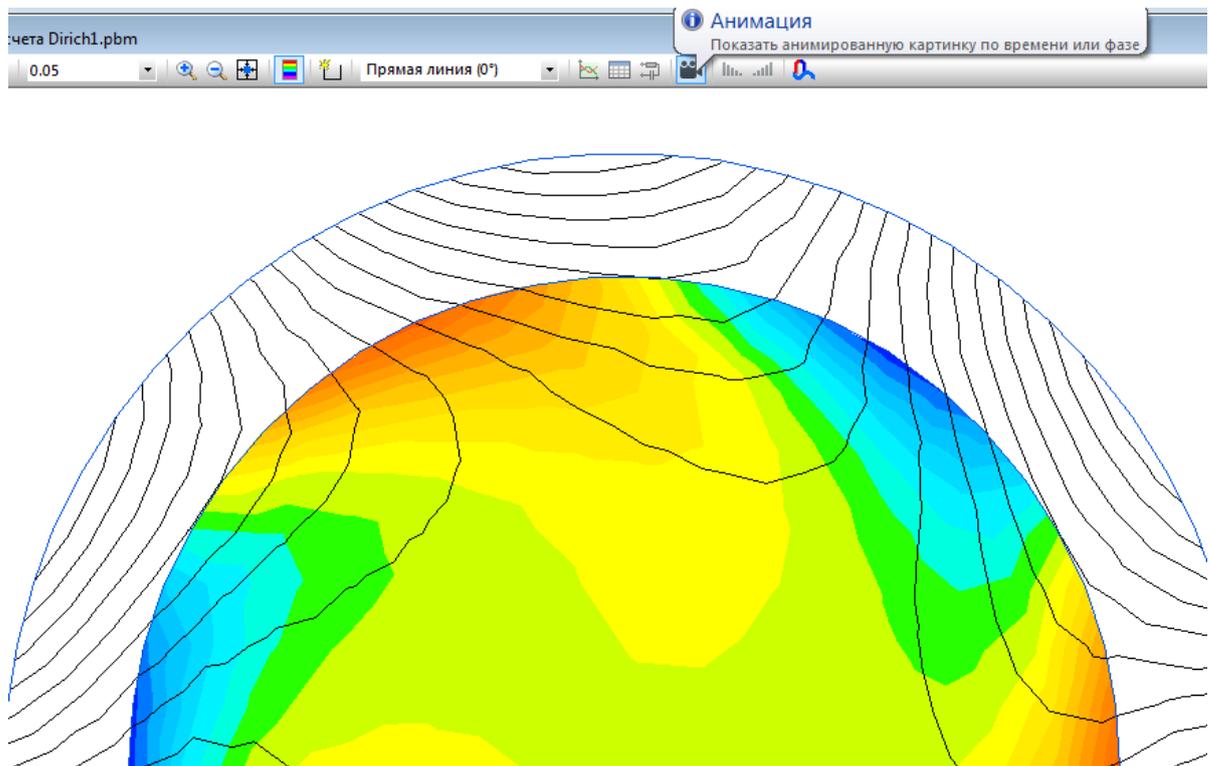


Рисунок 3.25 – Результат решения задачи

4 Электромагнитное излучение импульсного трансформатора

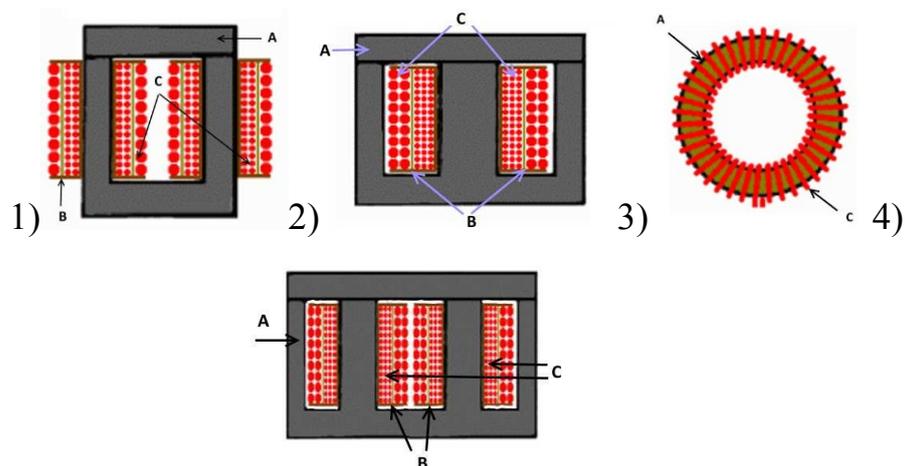
4.1 Основные сведения об импульсных трансформаторах

Импульсные трансформаторы (ИТ) служат для подачи импульсов с небольшими по величине искажениями и выступают в роли связующего элемента между генератором и потребителем импульсного напряжения. ИТ обладают широким спектром возможностей, таких как:

- 1) изменяют уровни и полярности формируемых импульсов тока или напряжения;
- 2) согласовывают сопротивления генерирующего и потребляющего устройства;
- 3) разделяют потенциалы приемника и источника импульсов;
- 4) создают обратную связь в схеме импульсного прибора;

Форма импульсов на выходе зависит от свойств и конструкции импульсных трансформаторов. ИТ подразделяют на четыре основных вида (рисунок 4.1) в зависимости от формы сердечника и размещения на нем катушек:

- 1) стержневой – обмотки охватывают магнитопровод;
- 2) броневой – обмотки охватываются магнитопроводом, и образуют своеобразную «броню»;
- 3) тороидальный – магнитопровод выполнен в виде фигуры тора;
- 4) бронестержневой – представляет собой среднюю конструкцию между броневым и стержневым видом.



А — магнитопроводный контур, выполненный из марок трансформаторной стали, изготовленной по технологии холодного или горячего металлопроката (за исключением сердечника тороидальной формы, он изготавливается из феррита);

В — катушка из изолирующего материала;

С — провода, создающие индуктивную связь

Рисунок 4.1 – Конструктивные исполнения импульсных трансформаторов

Так же, помимо конструктивных различий, ИТ имеют различную форму обмоток:

1) спиральные обмотки – намотка осуществляется широкой и тонкой фольгой или токопроводящей лентой, используются в ИТ с минимальной индуктивностью рассеяния;

2) конические обмотки – толщина изоляционного слоя между двумя обмотками прямо зависит от напряжения между витками первичной и вторичной обмоток, предназначены для уменьшения индуктивного рассеяния ИТ с малым увеличением емкости обмоток;

3) цилиндрические обмотки – обладают малой индуктивностью рассеяния и простой конструкцией.

Независимо от конструктивных особенностей, импульсные трансформаторы имеют общий принцип работы. Схема подключения идентична с обычными трансформаторами и представлена на рисунке 4.2.

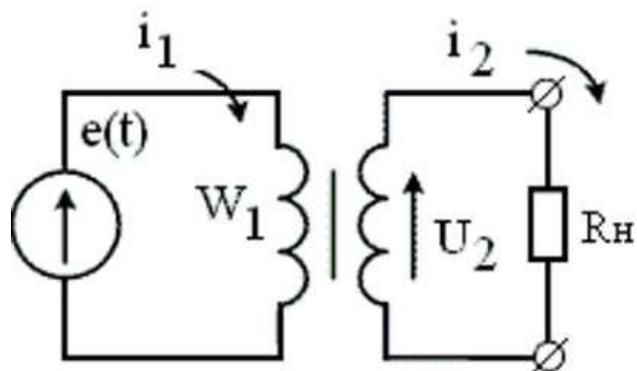


Рисунок 4.2 – Схема подключения импульсного трансформатора

Но совсем иначе выглядит временная диаграмма импульсного трансформатора, представленная на рисунке 4.3.

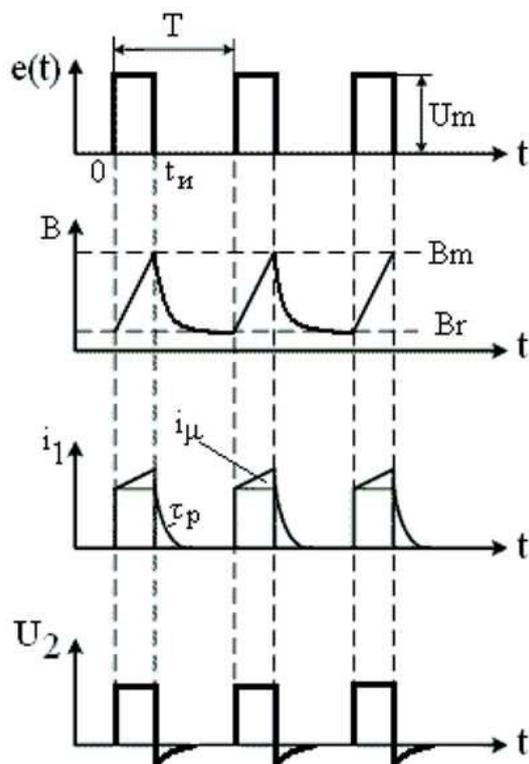


Рисунок 4.3 – Временная диаграмма импульсного трансформатора

Проанализируем диаграмму. На первичную обмотку поступают импульсные сигналы, имеющие прямоугольную форму $e_{(t)}$. Временной интервал между сигналами довольно короткий, что приводит к возрастанию индуктивности во время интервала t_u , далее наблюдается ее спад в интервале $(T-t_u)$.

Скорость перепадов индукции определяются через постоянное время по формуле:

$$\tau_p = L_0 / R_n. \quad (4.1)$$

Разность индуктивного перепада определяется следующим образом:

$$\Delta B = B_{\max} - B_r, \quad (4.2)$$

где B_{\max} – уровень максимального значения индукции;

B_r – остаточный уровень индукции.

Из временной диаграммы видно, что вторичная катушка имеет уровень напряжения U_2 , в котором присутствуют обратные выбросы – это влияние накопленной в магнитопроводе энергии, которая зависит от намагничивания (параметр i_u).

Импульсы тока, проходящего через первичную катушку, отличаются трапецеидальной формой, поскольку токи нагрузки и линейные (вызванные намагничиванием сердечника) совмещаются.

Уровень напряжения в диапазоне от 0 до t_u остается неизменным ($e_t = U_m$). Напряжение на вторичной катушке вычисляется по формуле:

$$U_m = \frac{d\psi}{dt} = W_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = S \cdot W_1 \cdot \frac{dB}{dt}, \quad (4.3)$$

где Ψ — параметр потокосцепления;

S – величина, характеризующая сечение сердечника.

Так как производная, описывающая изменение тока через первичную катушку, является неизменной, то и нарастание индукции в магнитопроводе

будет протекать линейно. Поэтому вместо производной используют разность показателей, сделанных через определенный интервал времени. Измененная формула имеет вид:

$$U_m = S \cdot W_1 \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t} \quad (4.4)$$

В этой формуле Δt будет определяться параметром t_u , т.е. длительностью протекания входного импульса напряжения.

Для определения площади импульса (основного параметра ИТ) необходимо обе части формулы умножить на t_u :

$$U_m \cdot t_u = S \cdot W_1 \cdot \Delta B \quad (4.5)$$

Второй параметр, описывающий работу ИТ, — перепад индукции, зависящий от сечения, магнитной проницаемости сердечника магнитопровода и числа витков на катушке:

$$L_0 = \frac{W_1^2 \cdot S \cdot \mu_a}{l_{cp}} \quad (4.6)$$

$$\mu_a = \frac{B_m - B_r}{H_m} = \frac{\Delta B}{H_m}, \quad (4.7)$$

где L_0 — перепад индукции;

μ_a — магнитная проницаемость сердечника;

W_1 — число витков первичной обмотки;

S — площадь сечения сердечника;

l_{cp} — длина (периметр) сердечника (магнитопровода);

B_r — величина остаточной индукции;

B_{max} — максимальная индукция;

H_m — максимальная напряженность магнитного поля.

Импульсный трансформатор, как и любой другой трансформатор, имеет потери энергии, складывающиеся из:

- 1) потери от гистерезиса;
- 2) магнитной вязкости;
- 3) некачественная изоляция;
- 4) вихревые токи.

Для улучшения характеристик ИТ потери нужно минимизировать. Для этого в магнитопроводе используют высоколегированные марки стали, что приводит к уменьшению потерь (при этом форма петли гистерезиса приближается к форме прямоугольника). Так же для уменьшения потерь вихревые токи искусственно разъединяют или используют магнитные системы с большой магнитной проницаемостью.

Рассмотрим подробно используемые материалы для импульсных трансформаторов, т.к. они значительно влияют на показатели качества и работу импульсного режима. Материал сердечника магнитопровода оценивается по значениям величин, которые определяют качество свойств:

- 1) удельное сопротивление применяемых материалов прибора;
- 2) индукция насыщения;
- 3) возможность применения самых тонких листов стали или лент;
- 4) коэрцитивная сила.

Электротехническая сталь

В ИТ используется электротехническая сталь марки от 3405 до 3425, которые имеют высокие значения индукции насыщения и низкие параметры коэрцитивной силы, а также наибольшее значение величины прямоугольности формы петли гистерезисного цикла. Такой материал в настоящее время приобрел большую популярность.

Пермаллой

Этот материал является прецизионным сплавом, обладающим магнитомягкими свойствами. Он чаще всего состоит из железа и никеля, с добавлением легирующих элементов.

Ферриты

Другим очень востребованным материалом для изготовления сердечника являются ферритовые материалы. Они имеют малую длительность трансформируемых импульсов. Такие магнитопроводы обладают повышенным удельным сопротивлением и не имеют потерь от вихревых токов. Они применяются для импульсных трансформаторов с интервалом импульсов, который измеряется несколькими наносекундами.

4.2 Решение задачи в программной среде ELCUT

Цель работы: Рассчитать распределение магнитного поля вокруг строчного трансформатора за время рабочего цикла.

Тип задачи: Осесимметричная задача расчета нестационарного магнитного поля.

Геометрия ИТ задачи представлена на рисунке 4.4.

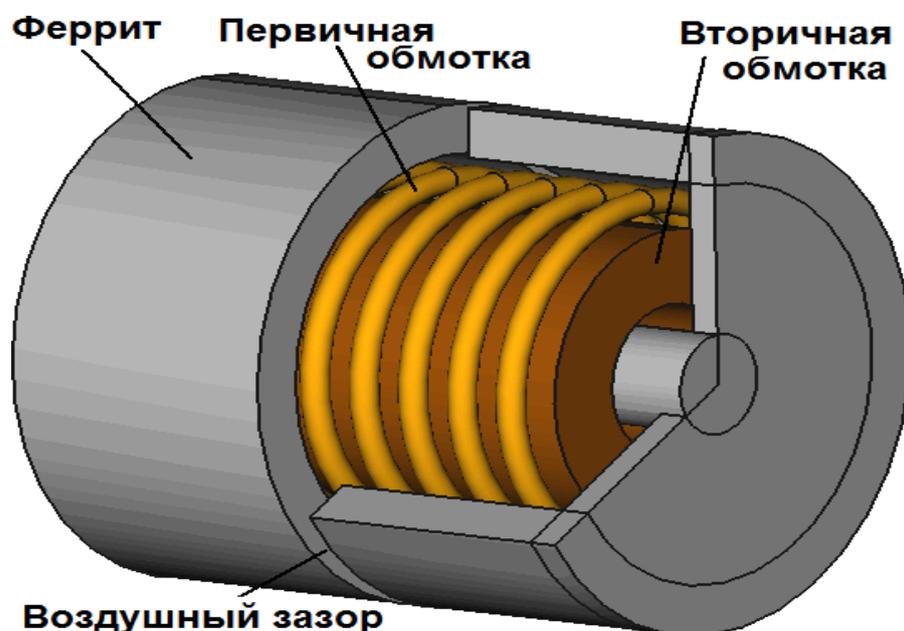


Рисунок 4.4 – Геометрия ИТ задачи

Импульсный (строчный) трансформатор является источником высокочастотного электромагнитного поля.

Дано:

Магнитная проницаемость феррита $\mu=1000$,

Частота $f=1$ кГц,

Трансформатор работает в повторно-кратковременном режиме, токи в обмотках известны. Они представлены на рисунке 4.5.

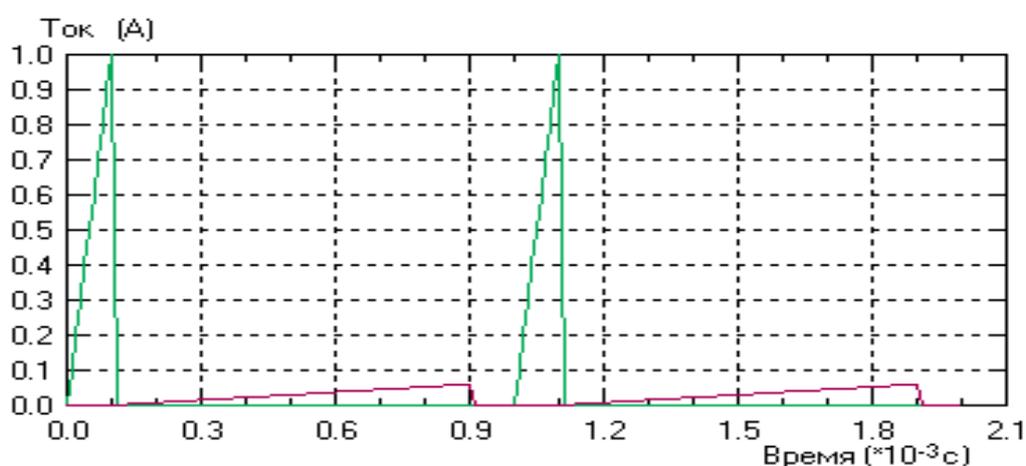


Рисунок 4.5 – Токи в обмотках ИТ

Решение:

Задача может быть поставлена и решена как задача нестационарного магнитного поля.

Порядок выполнения работы:

- 1 Чтобы создать задачу нажмите кнопку Создать. Введите имя задачи и папку для хранения файла.
- 2 Выберите тип задачи Магнитное нестационарное поле. Выберите класс модели Осесимметричная. Введите имена файла модели и файла свойств.
- 3 Выберите единицы длины (мм) и задайте систему координат (Декартовы координаты).

4 Задать время интегрирования (0,002 с). Задать шаг интегрирования (0,00001 с).

5 Создание модели. Нажмите кнопку Открыть модель. Настройте шаг сетки привязки, в меню Вид открыть Сетка привязки.

6 Перейдите в режим Вставки для создания модели. Постройте модель, используя прямые линии и дуги.

Готовая модель трансформатора представлена на рисунке 4.6.

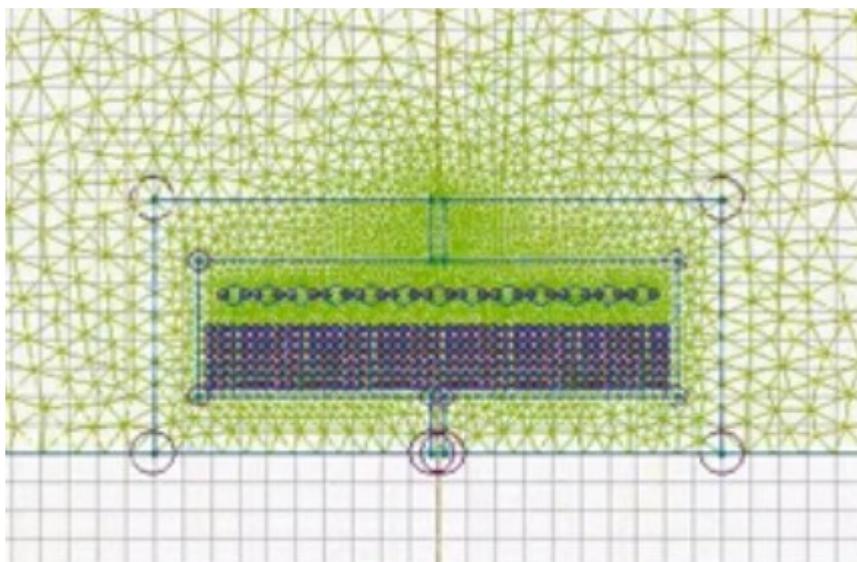


Рисунок 4.6 – Готовая модель трансформатора

7 С помощью меток назначаются свойства материалов, граничные условия, источники. Чтобы присвоить метку объекту, его надо выделить. Перейдите в режим выделения. Выделите объект и в контекстном меню выберите Свойства. Введите имя метки(Воздух, Ферритовый сердечник, Первичная обмотка, Вторичная обмотка, Внешняя граница).

8 Щелкните дважды по метке, чтобы открыть окно ее свойств. Магнитная проницаемость воздуха равна 1, ферритового сердечника равна 400, первичной обмотки равна 1, вторичной обмотки равна 1. Для обмоток

задаем электропроводность (57000000 См/м) и тип соединения витков (последовательно). Магнитный потенциал внешней границы равен 0.

9 В данной задаче присутствует электрическая цепь, для ее просмотра следует открыть Электрическую цепь.

10 Чтобы посмотреть на распределение поля, следует открыть Картины поля. Открываем Свойства картины поля, чтобы посмотреть цветную карту поля.

11 Зададим произвольный предел поля (в данном случае $0,1 \text{ мТл}$) и включаем Анимацию

12 Открыть в контекстном меню График по времени. На нем можно наблюдать пилообразные токи в первичной и вторичной цепях. Задача решена. Результат показан на рисунках 4.7 и 4.8.

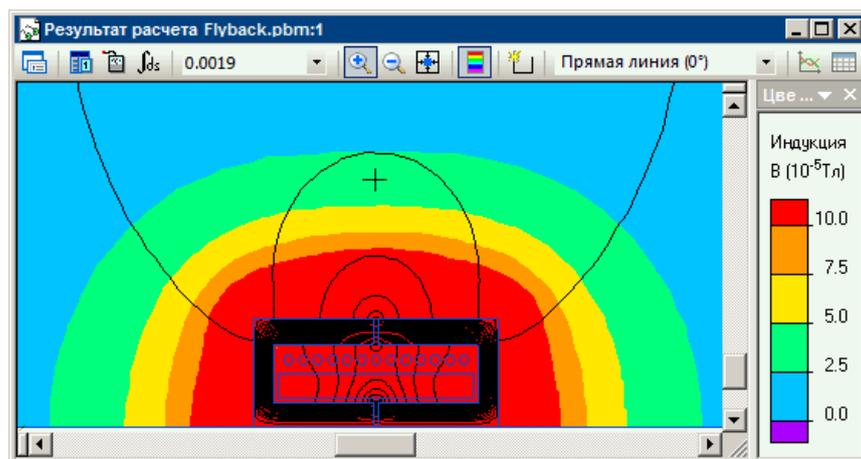


Рисунок 4.7 – Магнитное поле вокруг строчного трансформатора

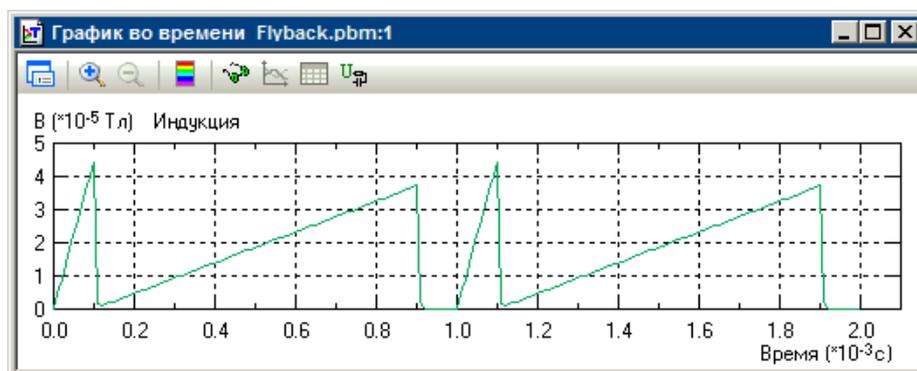


Рисунок 4.8 – Магнитная индукция на расстоянии 1 см от трансформатора

5 Расчёт токов в трехфазной линии электропередачи, работающей на несимметричную нагрузку

5.1 Трехфазная линия электропередачи

В простейшем случае линия электропередачи представляет собой проводники, протянутые на некоторое расстояние, по которым осуществляется передача электроэнергии. Возможность передачи электричества с помощью ЛЭП связана главным образом с большим напряжением, при котором потери при передаче значительно снижаются.

Конструкция воздушных ЛЭП представляет собой провода, расположенные на некотором расстоянии от земли на специальных опорах, или кабели, в которых проводящие жилы изолированы друг от друга и от внешней среды и защищены различными покровами и броней.

Почти во всем мире для передачи электрической энергии используется система трехфазного переменного тока с частотой 50 или 60 Гц. Однако, в некоторых случаях используются другие системы переменного и постоянного тока. Будем анализировать только трехфазные воздушные линии переменного тока высокого напряжения (до 1150 кВ), передающие электрическую энергию на большие расстояния (до нескольких тысяч километров).

Передача электроэнергии по ЛЭП переменного тока выгодна в связи с распространением электромагнитного поля в проводах и окружающем пространстве. Появление переменного электростатического поля приводит к возникновению токов смещения – зарядных токов (рисунок 5.1). Емкостные токи влияют на нагрузочный ток и определяют постепенное изменение тока вдоль ВЛ. Магнитное поле, обусловленное током ЛЭП, характеризуется напряженностью, которая не постоянна вдоль линии. Это приводит к генерированию ЭДС самоиндукции и взаимной индукции, которые неравны для различных участков линии. Неравенство этих ЭДС создает сложный закон из-

менения напряжения вдоль ВЛ, в свою очередь определяющий изменение токов смещения вдоль линии.

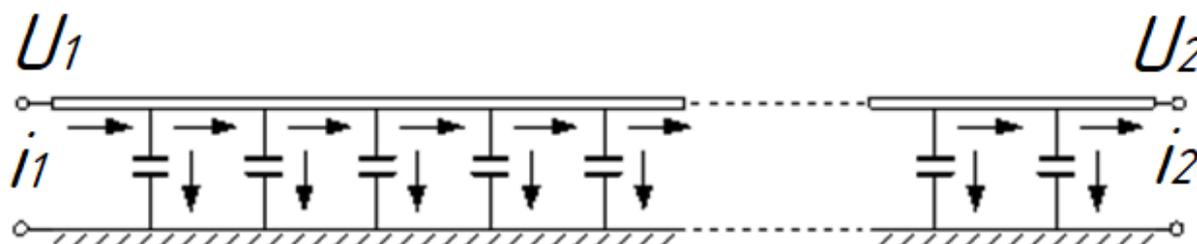


Рисунок 5.1 – Условное изображение распределения токов вдоль провода ЛЭП

В общем случае линию следует рассматривать как объект с распределенными вдоль одной пространственной координаты параметрами (вдоль ЛЭП). Параметры ЛЭП (активное сопротивление, индуктивность, активная проводимость и емкость на единицу длины линии) считают равномерно распределенными вдоль ее длины. Данное свойство линий называют однородностью.

Провода ВЛ выполняются таким образом, что в качестве проводящего материала используется алюминий или его сплав. В нашей стране чаще всего применяются сталеалюминиевые провода марки АС. Их удельное сопротивление постоянному току в среднем равно $r = 29,1 \text{ Ом мм}^2 / \text{км}$. Активное сопротивление переменному току больше сопротивления постоянному току в результате так называемого поверхностного эффекта, однако, для частоты 50 Гц - это различие невелико. Активное сопротивление в линии является параметром, определяющим процесс рассеивания энергии в виде отдачи тепла в окружающую среду.

Индуктивность ЛЭП создается явлениями самоиндукции и взаимной индукции фаз линии и определяется в зависимости от диаметра проводов фазы и расстояния между фазами. В практике расчетов электрических сетей используют индуктивное сопротивление фаз ЛЭП. Погонное индуктивное со-

противление ВЛ напряжением от 330 кВ до 1150 кВ x_0 в среднем равно 0,31 Ом / км.

В результате несовершенства изоляции ВЛ и явления коронирования в местах присоединения проводов к гирляндам изоляторов ВЛ имеют место потери электроэнергии от токов утечки по изоляторам ВЛ и короны. Значительное влияние на эти потери оказывают влажность и загрязнение окружающего воздуха. В зависимости от погоды потери от токов утечки и на корону могут варьироваться в десятки раз.

Моделирование потерь в изоляции ВЛ можно осуществить с помощью введения активной проводимости g_0 , величина которой определяется по экспериментальным данным, полученным в результате наблюдений и расчетов, существующих ВЛ. Для большинства ВЛ напряжением от 330 кВ до 1150 кВ погонная активная проводимость находится в пределах от 0,01 мкСм / км до 0,1 мкСм / км.

Емкостные проводимости между фазами и между проводами и землей, грозозащитными тросами и заземленными частями опоры определяются одним параметром – емкостной проводимостью фазы b_0 . Величина погонной емкостной проводимости ВЛ напряжением от 330 кВ до 1150 кВ в среднем равна 3,5 мкСм / км.

В цепи с распределенными параметрами интервал времени распространения электромагнитных волн вдоль линии сопоставим с интервалом времени, в течение которого токи и напряжения изменяются на некоторую величину от полного их изменения.

Свойствами ЛЭП можно считать:

- непрерывность переменных;
- одномерность в отношении пространства и многомерность в отношении переменных, характеризующих работы линии в разных точках линии;
- линейность или нелинейность (в зависимости от уравнений, описывающих режим работы линии) – при этом параметры линии считаются постоянными величинами.

- стационарность;
- статичность или динамичность (в зависимости от исследуемых процессов).

В отношении детерминированности и стохастичности имеются разные подходы к моделированию ЛЭП – параметры и переменные могут быть представлены также и случайными величинами.

Любая ЛЭП является элементом с распределенными параметрами, каждый участок которой характеризуется продольными активно-индуктивными элементами (L_ϕ и R_ϕ), междуфазными взаимными индуктивностями (M), поперечными активно-емкостными элементами (C_ϕ и G_ϕ) и междуфазными емкостными элементами $C_{\phi-\phi}$ (рисунок 5.2).

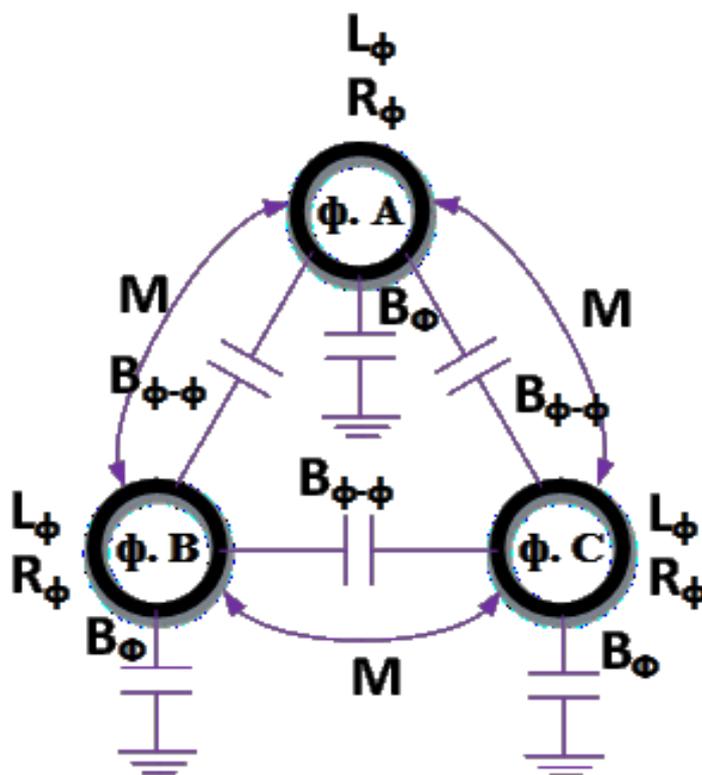


Рисунок 5.2 – Разрез линии электропередачи с отображением продольных и поперечных элементов

В случае если пространственной протяженностью объекта можно пренебречь, то анализ процессов в таких объектах выполняется с помощью классических моделей со сосредоточенными параметрами. Эти элементы электрической сети можно описать обыкновенными дифференциальными уравнениями, в которых независимой переменной является время процесса.

ЛЭП протяженностью менее 300 км может быть представлена в виде П-образной схемы замещения (рисунок 5.3), состоящей из сосредоточенных элементов электрической сети. Параметры такой схемы замещения определяются произведением погонных параметров линии на ее длину. Стоит отметить, что при необходимости осуществления расчета многочастотных переходных процессов создается цепочечная схема замещения линии электропередачи из П-образных схем замещения.

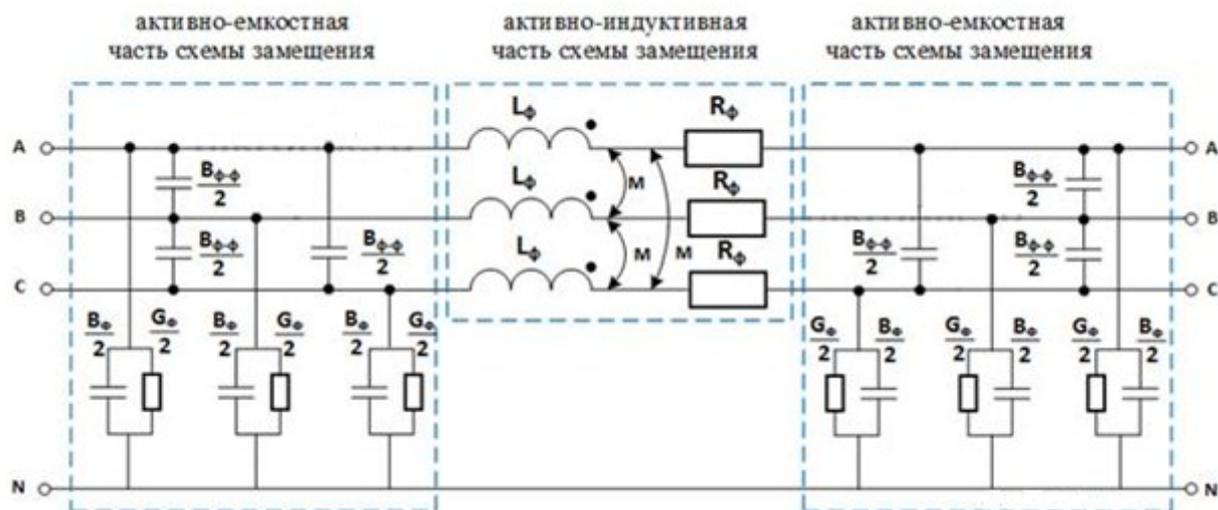


Рисунок 5.3 – П-образная схема замещения трехфазной ЛЭП

Как можно заметить схема замещения в фазной системе координат состоит из двух отдельных частей: первая часть отражает взаимодействие только магнитных полей (активно-индуктивная часть схемы замещения), а вторая часть расчетной схемы отражает электростатическое поле (активно-емкостная часть схемы замещения).

Рассмотрим более подробно активно-индуктивную часть схемы замещения ЛЭП (рисунок 5.4).

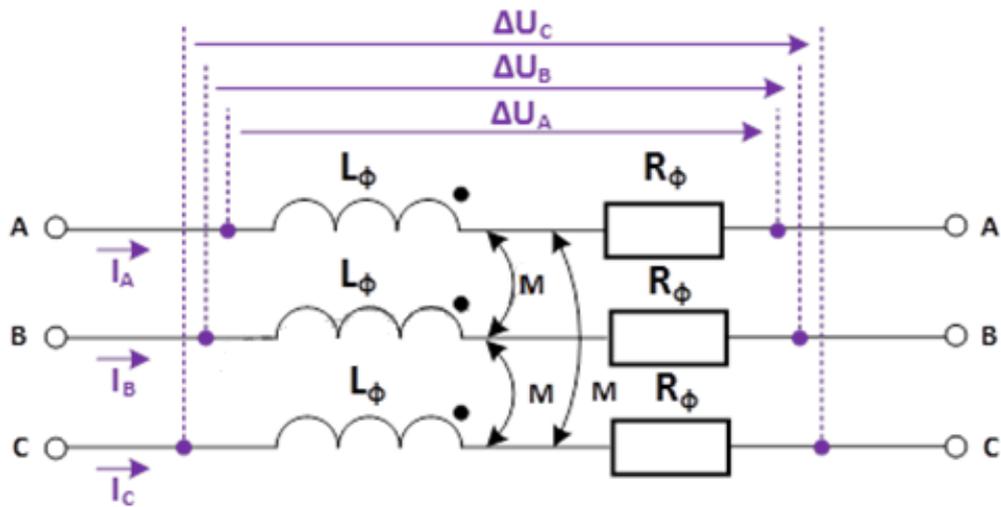


Рисунок 5.4 – Активно-индуктивная часть схемы замещения трехфазной ЛЭП

Составим систему уравнений, характеризующую процессы, происходящие в рассматриваемой части схемы замещения транспонированной линии электропередачи (первой участок полной схемы замещения):

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_A = \dot{Z}_A \cdot \dot{I}_A + \dot{Z}_{AB} \cdot \dot{I}_B + \dot{Z}_{AC} \cdot \dot{I}_C \\ \Delta \dot{U}_B = \dot{Z}_B \cdot \dot{I}_B + \dot{Z}_{BA} \cdot \dot{I}_A + \dot{Z}_{BC} \cdot \dot{I}_C \\ \Delta \dot{U}_C = \dot{Z}_C \cdot \dot{I}_C + \dot{Z}_{CA} \cdot \dot{I}_A + \dot{Z}_{CB} \cdot \dot{I}_B \end{cases} \quad (5.1)$$

где $\dot{Z}_A, \dot{Z}_B, \dot{Z}_C$ - собственные комплексные сопротивления ЛЭП;

$\dot{Z}_{AB}, \dot{Z}_{AC}, \dot{Z}_{CB}$ - взаимные комплексные сопротивления ЛЭП.

Рассмотрим более подробно активно-емкостную часть схемы замещения трехфазной ЛЭП (рисунок 5.5).

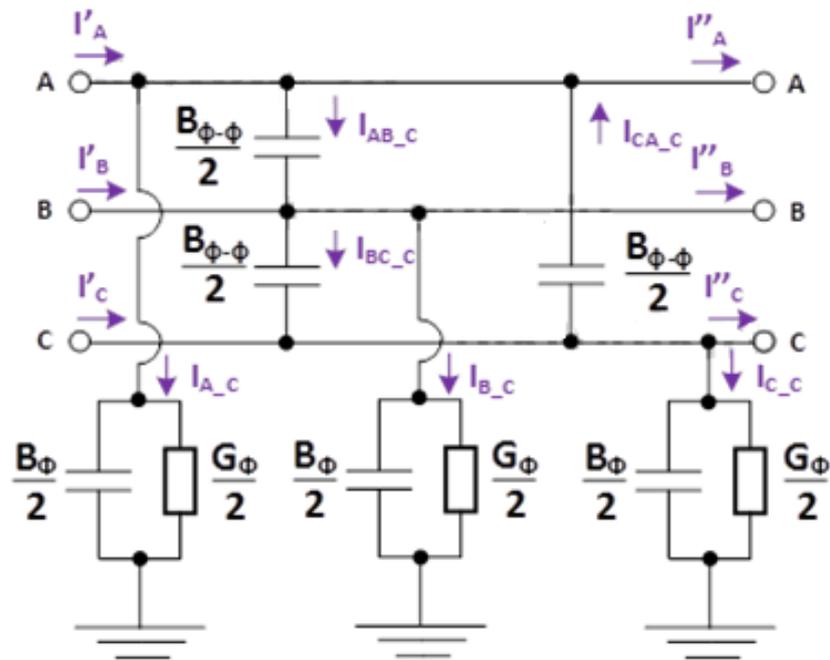


Рисунок 5.5 – Активно-емкостная часть схемы замещения трехфазной ЛЭП

Составим систему уравнений, характеризующую процессы, происходящие в рассматриваемой схеме замещения транспонированной линии электропередачи (второй участок полной схемы замещения):

По второму закону Кирхгофа составим систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B \\ \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C \\ \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A \end{cases} \quad (5.2)$$

По первому закону Кирхгофа составим систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot{I}_{A_C} - \dot{I}_{CA_C} + \dot{I}_{AB_C} = \dot{I}'_A - \dot{I}''_A \\ \dot{I}_{B_C} - \dot{I}_{AB_C} + \dot{I}_{BC_C} = \dot{I}'_B - \dot{I}''_B \\ \dot{I}_{C_C} - \dot{I}_{BC_C} + \dot{I}_{CA_C} = \dot{I}'_C - \dot{I}''_C \end{cases} \quad (5.3)$$

В результате система уравнений, характеризующая процессы, происходящие в рассматриваемой части схемы замещения транспонированной линии электропередачи, записывается в виде:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A \cdot \frac{Y_A}{2} - (\dot{U}_C - \dot{U}_A) \cdot \frac{Y_{AB}}{2} + (\dot{U}_A - \dot{U}_B) \cdot \frac{Y_{AC}}{2} &= \dot{I}'_A - \dot{I}''_A \\ \dot{U}_B \cdot \frac{Y_B}{2} - (\dot{U}_A - \dot{U}_B) \cdot \frac{Y_{BA}}{2} + (\dot{U}_B - \dot{U}_C) \cdot \frac{Y_{BC}}{2} &= \dot{I}'_B - \dot{I}''_B \\ \dot{U}_C \cdot \frac{Y_C}{2} - (\dot{U}_B - \dot{U}_C) \cdot \frac{Y_{CA}}{2} + (\dot{U}_C - \dot{U}_A) \cdot \frac{Y_{CB}}{2} &= \dot{I}'_C - \dot{I}''_C \end{aligned} \quad (5.4)$$

где Y_A, Y_B, Y_C - собственные комплексные проводимости линии электропередачи на землю;

Y_{AB}, Y_{AC}, Y_{CB} - взаимные комплексные проводимости линии электропередачи.

Анализируемые системы уравнений содержат сопротивления и емкостные проводимости, которые в общем случае отличаются друг от друга:

$$Z_A \neq Z_B \neq Z_C \text{ и } Z_{AB} \neq Z_{AC} \neq Z_{CB}$$

$$Y_A \neq Y_B \neq Y_C \text{ и } Y_{AB} \neq Y_{AC} \neq Y_{CB}$$

Для приравнивания продольных и поперечных сопротивлений и проводимостей выполняют так называемую транспозицию проводов ВЛ. Под транспозицией понимается циклическая смена фаз по отношению друг к другу на разных участках линии: провод каждой фазы располагается одну треть длины линии на одном, вторую - на другом и третью - на третьем месте. Такое перемещение проводов называют полным циклом транспозиции. Шаг транспозиции по условию влияний на линии связи не нормируется. При этом транспозиция должна осуществляться так, чтобы суммарные длины участков ВЛ с различным чередованием фаз были примерно равны (рисунок 5.6).

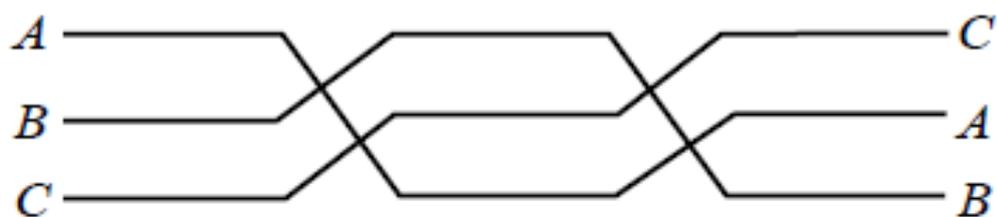


Рисунок 5.6 – Полный цикл транспозиции на ВЛ

Проанализируем воздушную линию электропередачи с полным циклом транспозицией фаз. В рамках данной задачи провода воздушной линии расположены в одной плоскости параллельно земле. Данная конструкция ЛЭП предполагает, что собственные сопротивления и проводимости фаз одинаковые, а взаимные сопротивления и проводимости – различны.

Покажем выравнивание параметров ЛЭП на базе активно-индуктивной части схемы замещения (рисунок 5.7).

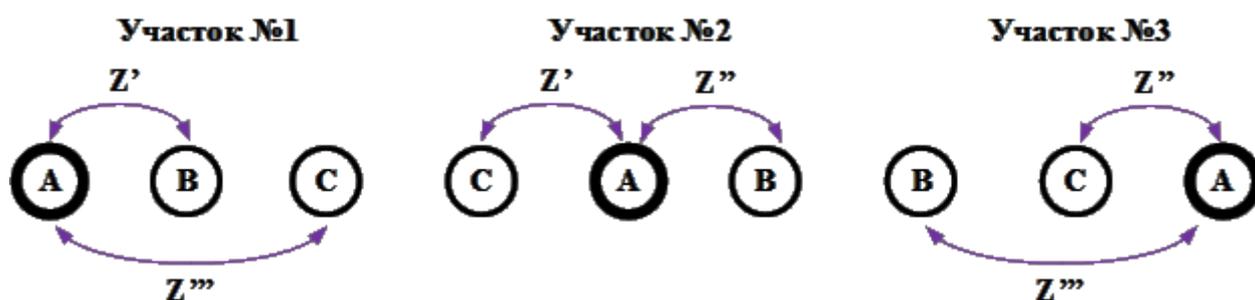


Рисунок 5.7 – Взаимные индуктивности фазы А при полном цикле транспозиции фаз воздушной линии

Падение напряжение фазы А на активно-индуктивном участке схемы замещения будет выражаться, как:

$$\begin{aligned}
\Delta \dot{U}_A &= \dot{Z}_A \cdot \dot{I}_A \cdot l + \left(\dot{Z}' \cdot \frac{l}{3} \cdot \dot{I}_B + \dot{Z}''' \cdot \frac{l}{3} \cdot \dot{I}_C \right) + = \\
&= + \left(\dot{Z}'' \cdot \frac{l}{3} \cdot \dot{I}_B + \dot{Z}' \cdot \frac{l}{3} \cdot \dot{I}_C \right) + \left(\dot{Z}''' \cdot \frac{l}{3} \cdot \dot{I}_B + \dot{Z}'' \cdot \frac{l}{3} \cdot \dot{I}_C \right) \\
&= \\
&= \dot{Z}_A \cdot l \cdot \dot{I}_A + \frac{\dot{Z}' + \dot{Z}'' + \dot{Z}'''}{3} \cdot l \cdot \dot{I}_B + \frac{\dot{Z}' + \dot{Z}'' + \dot{Z}'''}{3} \cdot l \cdot \dot{I}_C \\
&= \dot{Z}_A \cdot l \cdot \dot{I}_A + \dot{Z}_M \cdot l \cdot \dot{I}_B + \dot{Z}_M \cdot l \cdot \dot{I}_C
\end{aligned} \tag{5.5}$$

Подобный результат можно получить для других фаз активно-индуктивной части схемы замещения, а также для активно-емкостной части.

Таким образом, полный цикл транспозиции на ВЛ усредняет и выравнивает параметры линии: собственные сопротивления фаз, взаимные сопротивления между фазами, собственные проводимости фаз на линии и проводимости между фазами линии.

В результате для транспонированной линии электропередачи можно записать следующие системы уравнений:

1 Для активно-индуктивной части схемы замещения:

$$\begin{cases}
\Delta \dot{U}_A = \dot{Z}_L \cdot \dot{I}_A + \dot{Z}_M \cdot \dot{I}_B + \dot{Z}_M \cdot \dot{I}_C \\
\Delta \dot{U}_B = \dot{Z}_M \cdot \dot{I}_A + \dot{Z}_L \cdot \dot{I}_B + \dot{Z}_M \cdot \dot{I}_C \\
\Delta \dot{U}_C = \dot{Z}_M \cdot \dot{I}_A + \dot{Z}_M \cdot \dot{I}_B + \dot{Z}_L \cdot \dot{I}_C
\end{cases} \tag{5.6}$$

где \dot{Z}_L - собственное комплексное сопротивление линии электропередачи;

\dot{Z}_M - взаимное комплексное сопротивление линии электропередачи.

2 Для активно-емкостной части схемы замещения:

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_A \cdot \frac{Y_\phi}{2} - (\dot{U}_C - \dot{U}_A) \cdot \frac{Y_{\phi-\phi}}{2} + (\dot{U}_A - \dot{U}_B) \cdot \frac{Y_{\phi-\phi}}{2} &= \dot{I}'_A - \dot{I}''_A \\
 \dot{U}_B \cdot \frac{Y_\phi}{2} - (\dot{U}_A - \dot{U}_B) \cdot \frac{Y_{\phi-\phi}}{2} + (\dot{U}_B - \dot{U}_C) \cdot \frac{Y_{\phi-\phi}}{2} &= \dot{I}'_B - \dot{I}''_B \\
 \dot{U}_C \cdot \frac{Y_\phi}{2} - (\dot{U}_B - \dot{U}_C) \cdot \frac{Y_{\phi-\phi}}{2} + (\dot{U}_C - \dot{U}_A) \cdot \frac{Y_{\phi-\phi}}{2} &= \dot{I}'_C - \dot{I}''_C
 \end{aligned}
 \tag{5.7}$$

где Y_ϕ - собственная емкостная проводимость линии электропередачи на землю;

$Y_{\phi-\phi}$ - взаимная емкостная проводимость линии электропередачи.

5.2 Решение задачи в программной среде ELCUT

Тип задачи: Плоская задача магнитного поля переменных токов.

Геометрия и электрическая цепь поставленной задачи представлена на рисунке 5.8.

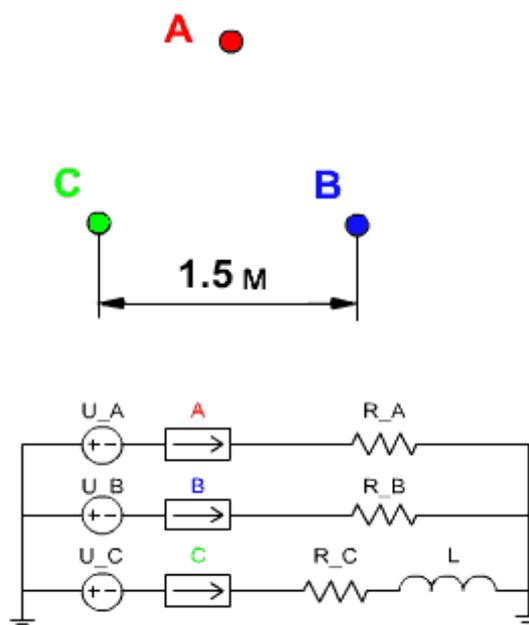


Рисунок 5.8 - Геометрия и электрическая цепь поставленной задачи

Дано:

Длина линии $l = 4$ км;

Диаметр провода $d = 1$ мм;

Электропроводность меди $g = 58 \cdot 10^6$ См/м;

Напряжение $U = 400$ В;

Сопротивление $R_A = 2$ Ом;

Сопротивление $R_B = 2.5$ Ом;

Сопротивление $R_C = 1$ Ом;

Индуктивность $L = 0.002$ Гн;

Сопротивление заземления = 8 Ом.

Задача:

Рассчитать токи в трехфазной линии электропередачи, работающей на несимметричную нагрузку.

Решение:

1 Чтобы создать задачу, нажимаем кнопку «Создать» и выбираем «Задача ElCut» (рисунок 5.9).

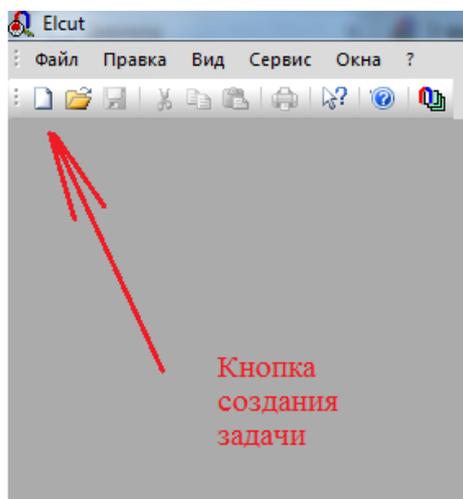


Рисунок 5.9 – Создание задачи

Вводим имя задачи и папки для хранения файлов (рисунок 5.10).

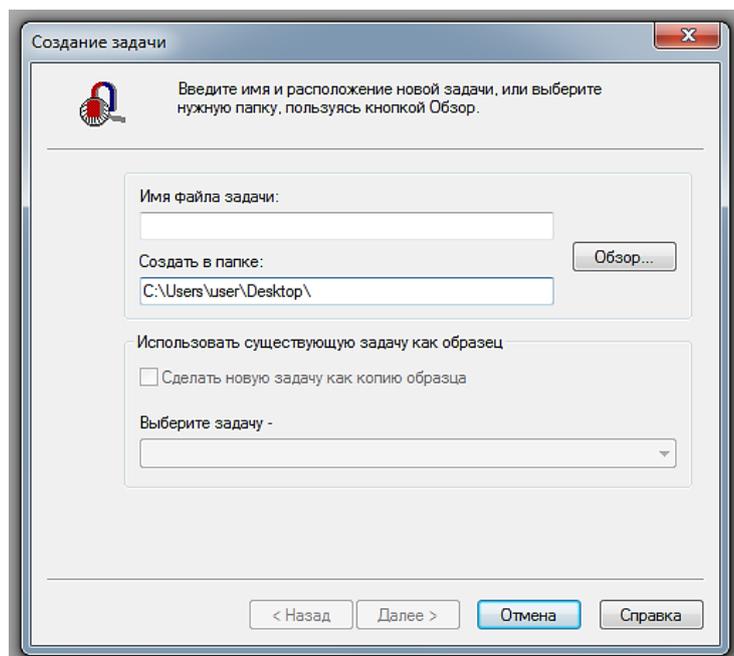


Рисунок 5.10 – Создание задачи

2 Выберите тип задачи - Магнитное поле переменных токов. Выберите класс модели - плоская. Укажите протяженность. Введите имена файла модели и файла свойств «Линия электропередач». Выберите единицы длины (см) и задайте систему координат (Декартовы координаты) (рисунок 5.11).

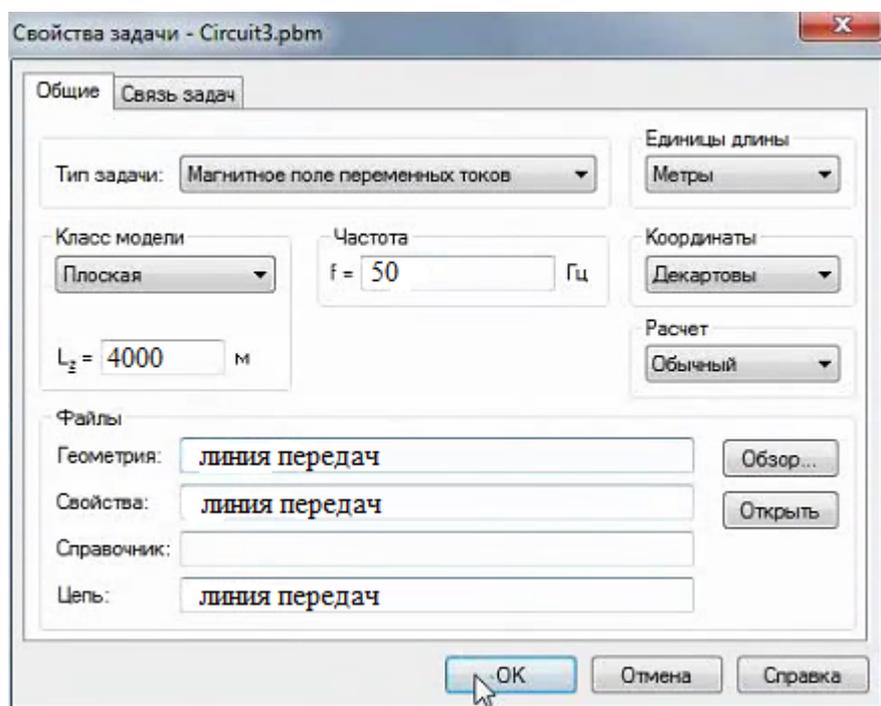


Рисунок 5.11 – Свойства задачи

3 Создание модели. Задание геометрии модели. Нажмите кнопку «открыть модель».

4 Необходимо настроить сетку привязки. Для этого Вид-> Сетка привязки. В данной задаче удобна сетка с шагом 1 см.

5 Перейдите в режим вставки для рисования модели. Постройте модель, используя прямые линии и дуги. Верхний проводник расположен в 65 см над центром (рисунок 5.12).

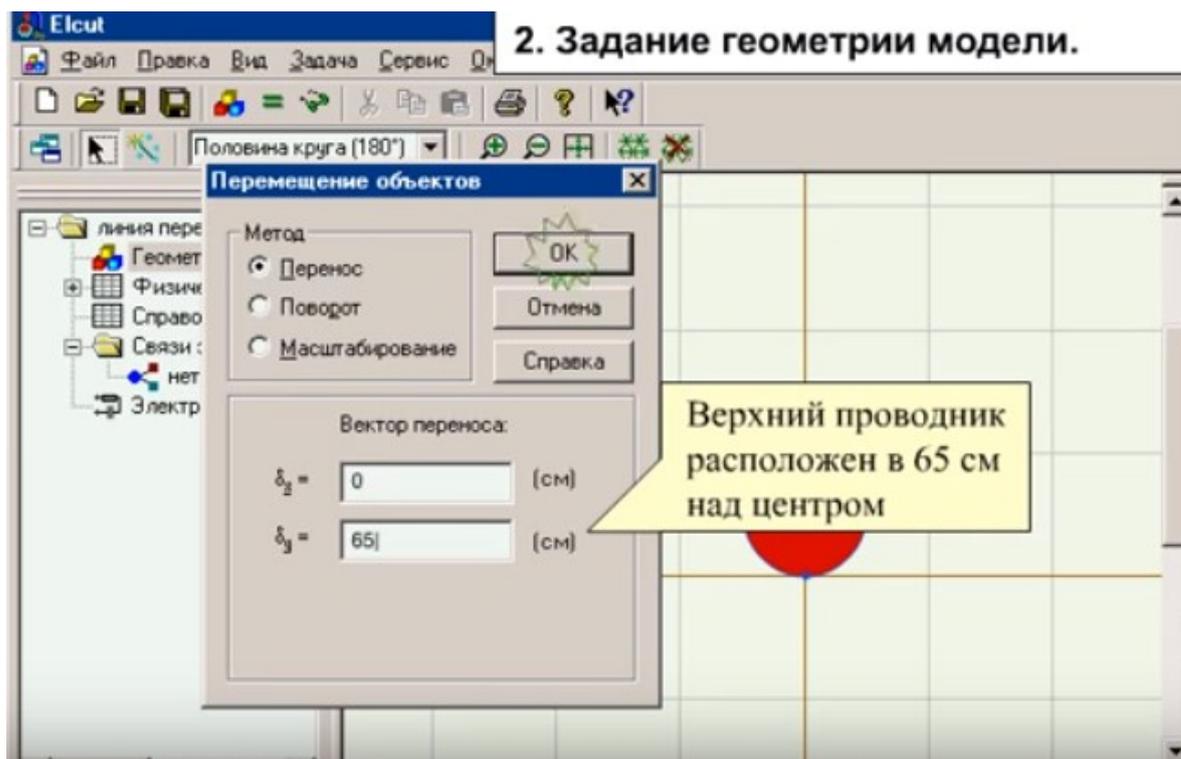


Рисунок 5.12 – Задание геометрии модели

6 Другие проводники получаем копированием. Проводники расположены на 120 градусах относительно друг друга (рисунок 5.13). Нажмите «показ модели целиком». Область расчета должна быть ограничена (рисунок 5.14).

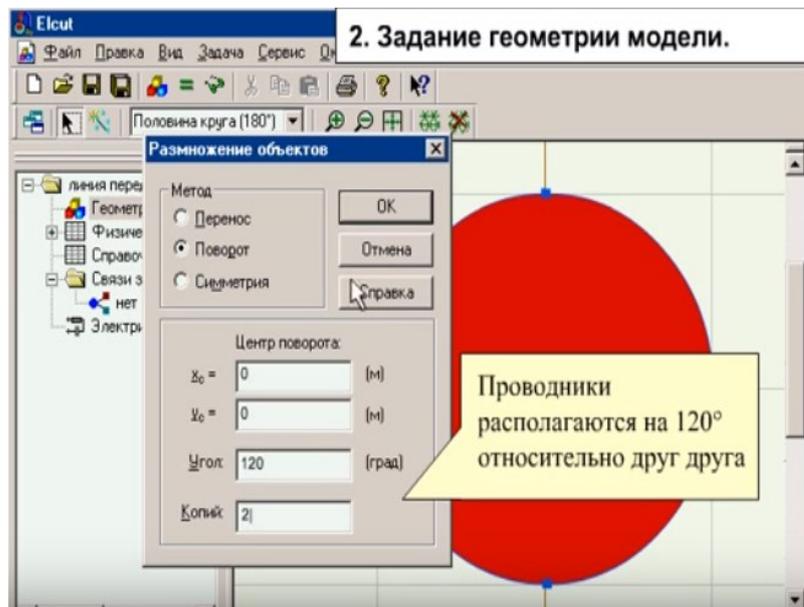


Рисунок 5.13 – Задание геометрии модели

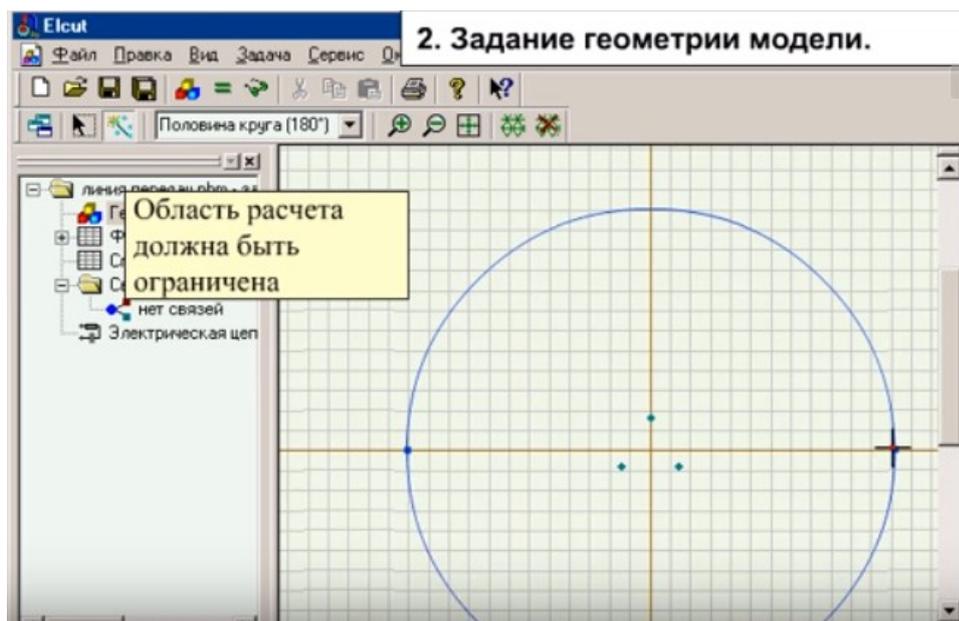


Рисунок 5.14 – Задание геометрии модели

7 Построение сетки конечных элементов. Назначение свойств. Чтобы присвоить метку, щелкните над объектом правой клавишей мыши и выберите «Свойства», введите имя метки «Воздух», «Фаза А», «Фаза В», «Фаза С», «Граница» (рисунки 5.15 и 5.16).

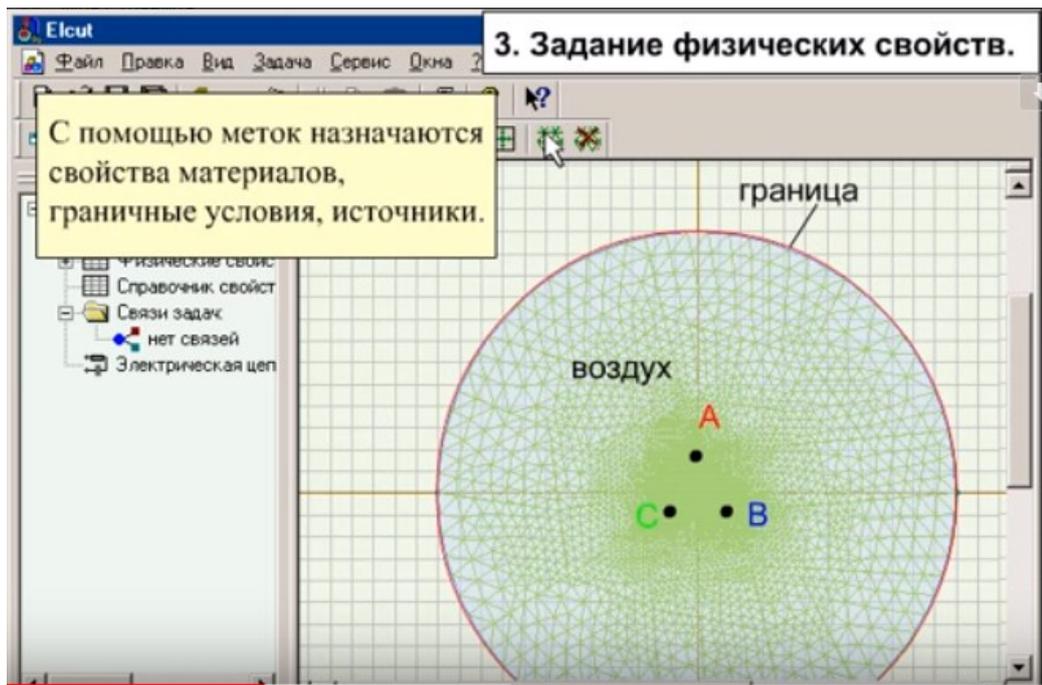


Рисунок 5.15 – Задание физических свойств

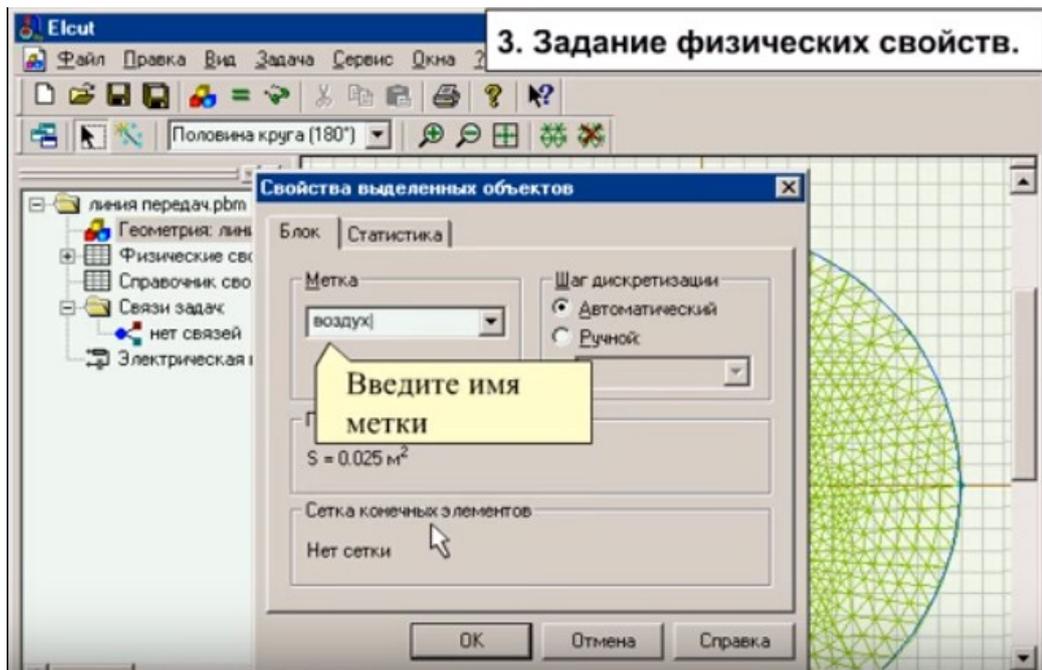


Рисунок 5.16 – Задание физических свойств

8 Все метки разделены на 3 группы Метки ребер, Метки вершин, Метки блоков. Щелкните дважды по метке, чтобы открыть окно редактирования ее свойств. Укажите магнитную проницаемость всех объектов и электропроводность проводника (рисунки 5.17 – 5.20).

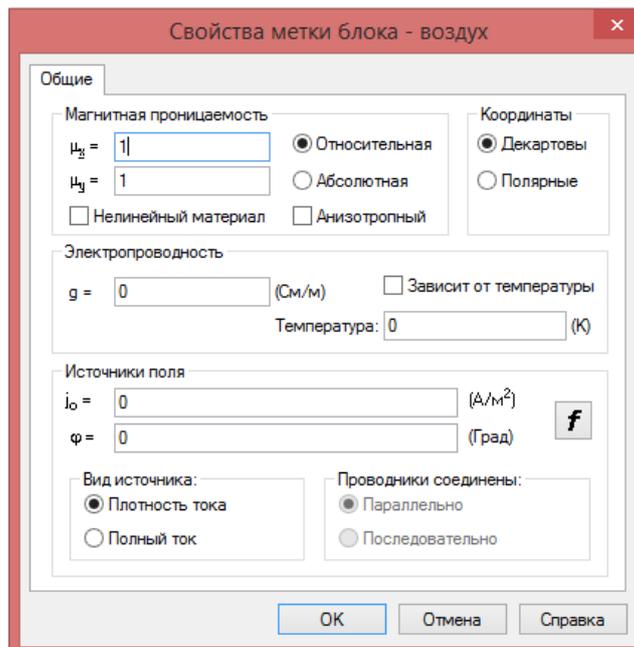


Рисунок 5.17 – Свойства метки блока - воздух

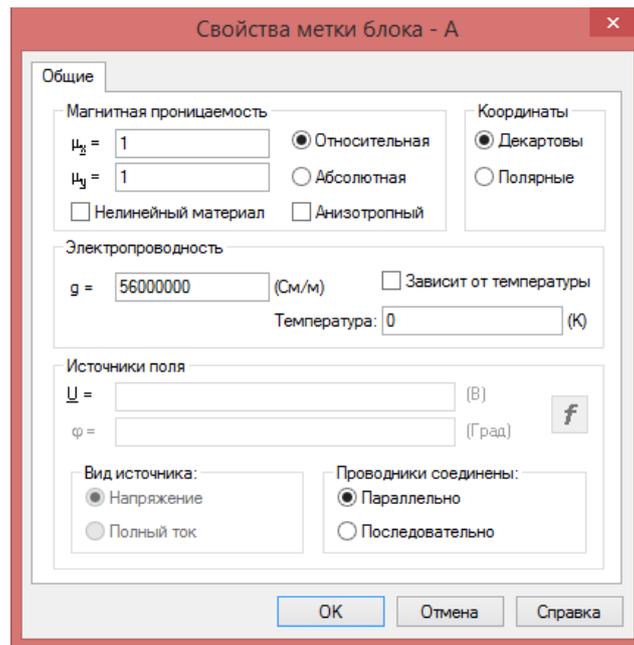


Рисунок 5.18 – Свойства метки блока - А

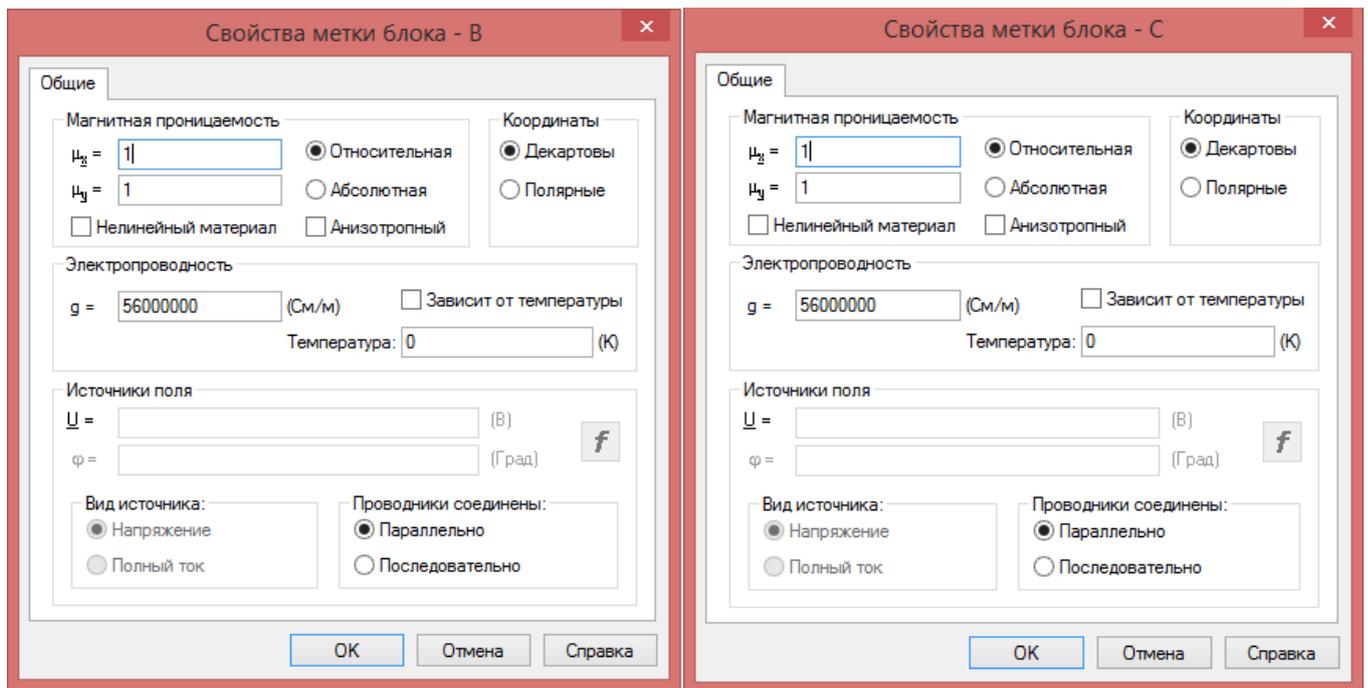


Рисунок 5.19 – Свойства меток блоков В и С

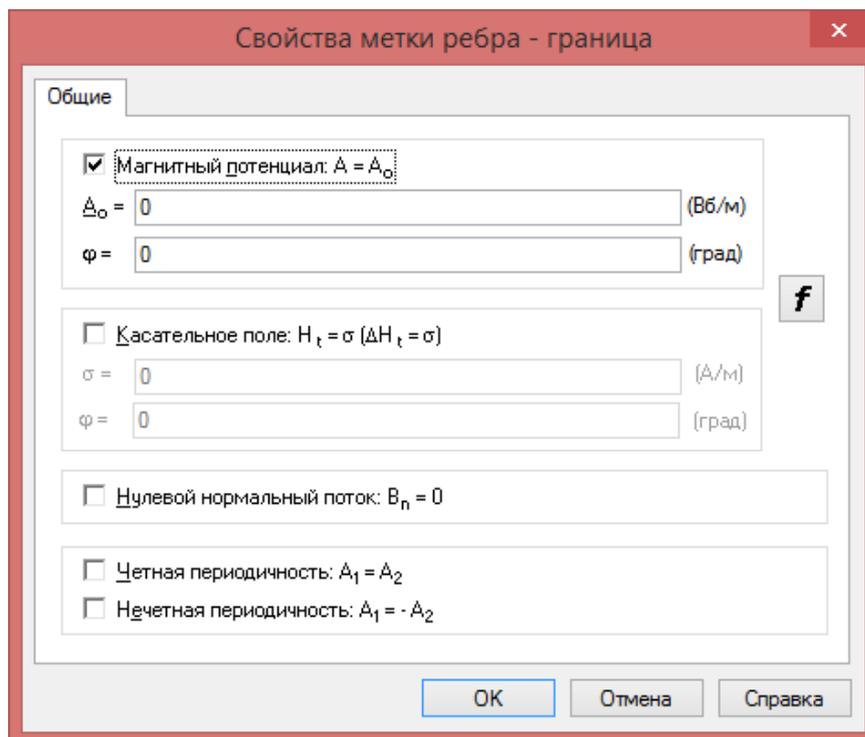


Рисунок 5.20 – Задание свойств метки ребра - граница

9 Закончив с описанием меток, приступаем к редактированию цепи. Для этого добавьте элементы и соедините их проводами (рисунок 5.21).

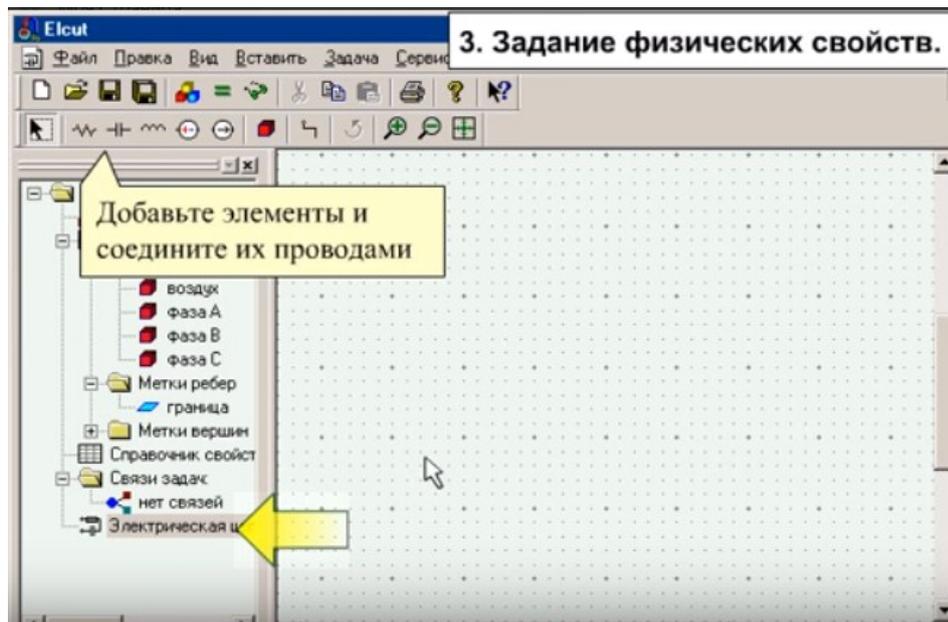


Рисунок 5.21 – Задание физических свойств

10 Постройте цепь, используя стандартные элементы. Введите амплитуду и фазу напряжения (рисунок 5.22). Перейдите в режим «Выделения» и задайте свойства элементов (рисунки 5.23 - 5.25).

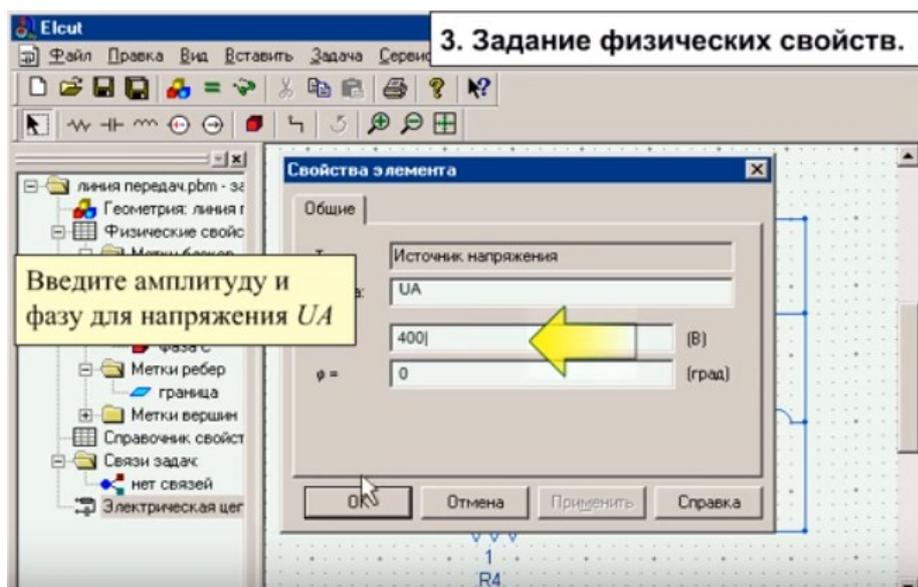


Рисунок 5.22 – Задание физических свойств для источника UA

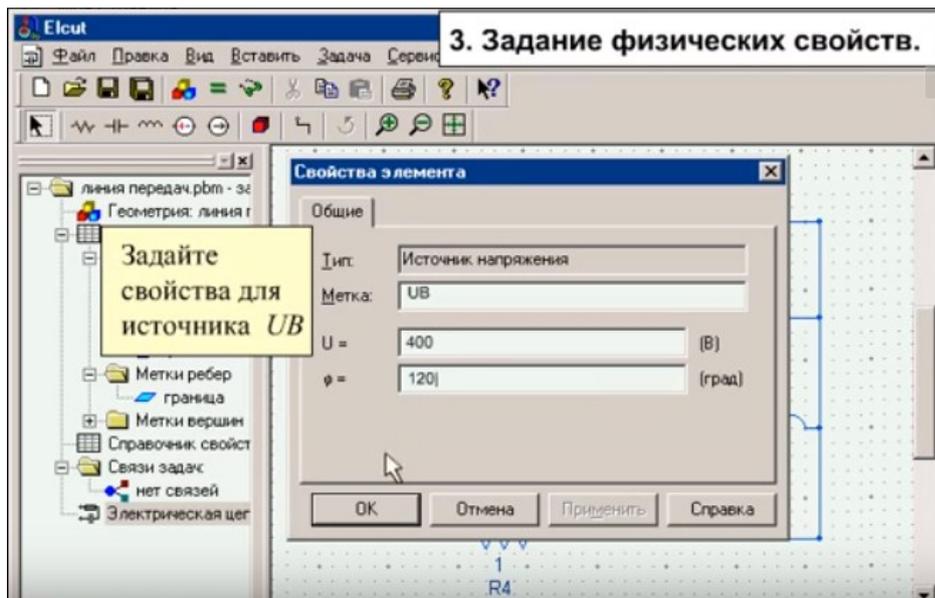


Рисунок 5.23 – Задание физических свойств для источника UA

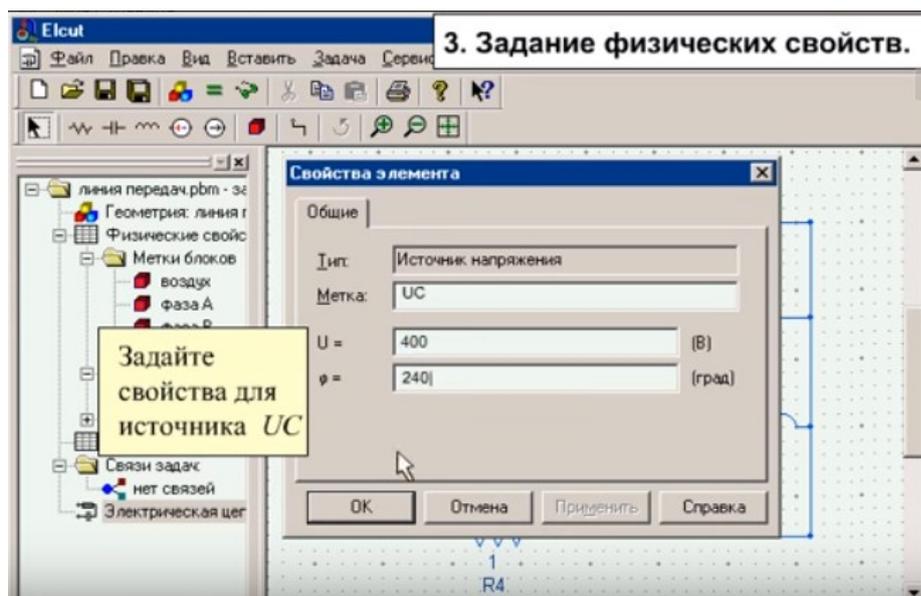


Рисунок 5.24 – Задание физических свойств для источника UA

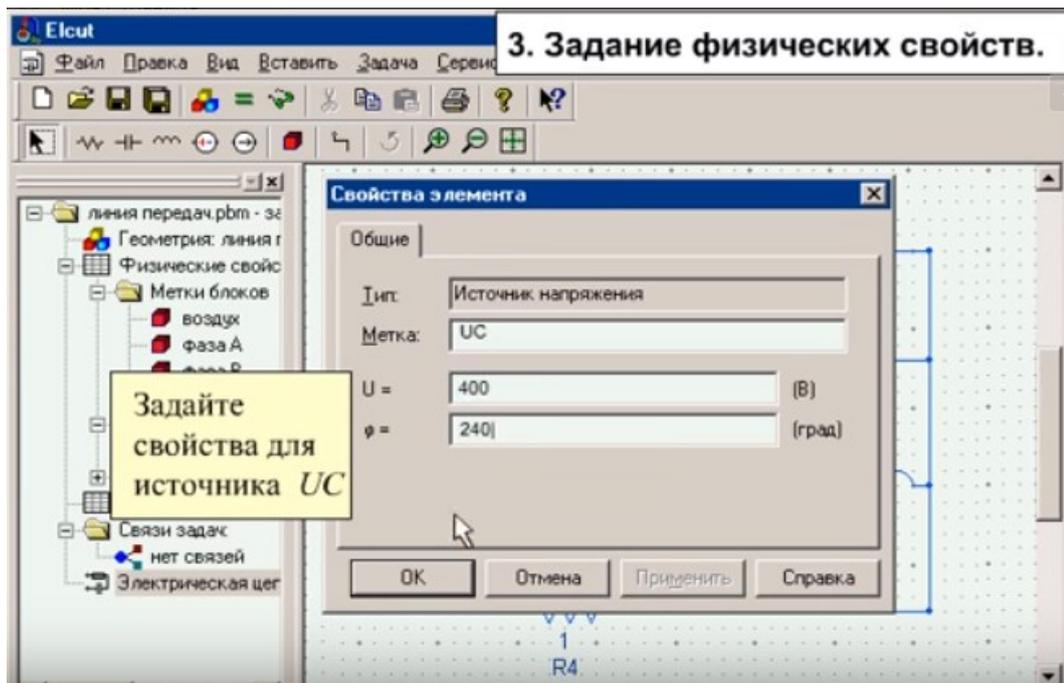


Рисунок 5.25 – Задание свойств для источника UC

11 Задайте свойства для нагрузок (рисунки 5.26 – 5.28).

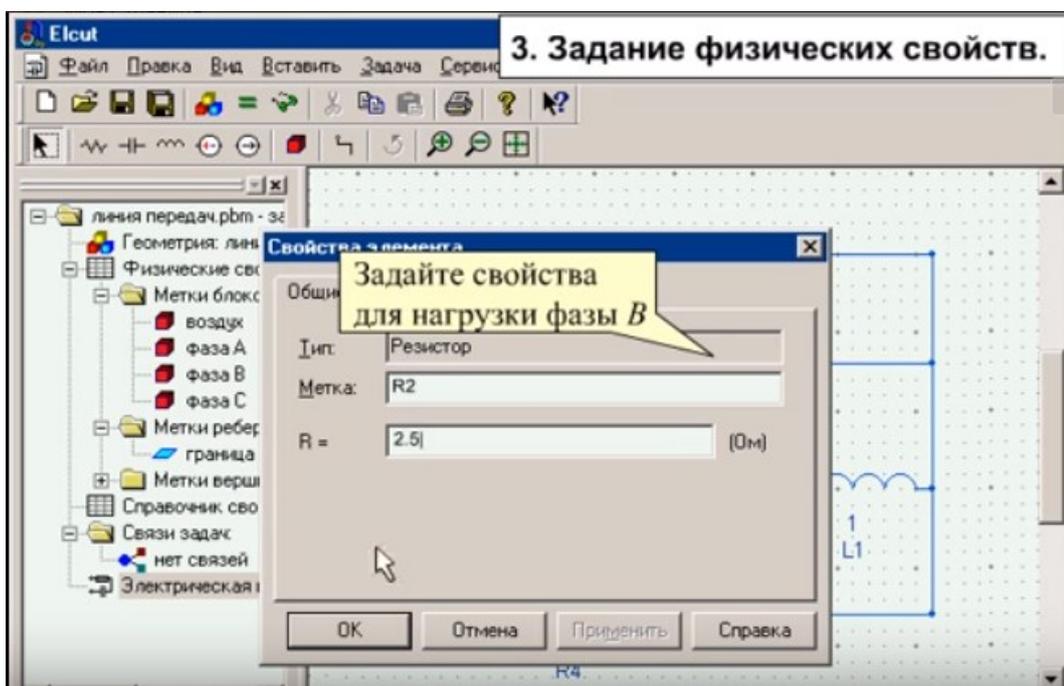


Рисунок 5.26 – Задание свойств для нагрузки фазы B

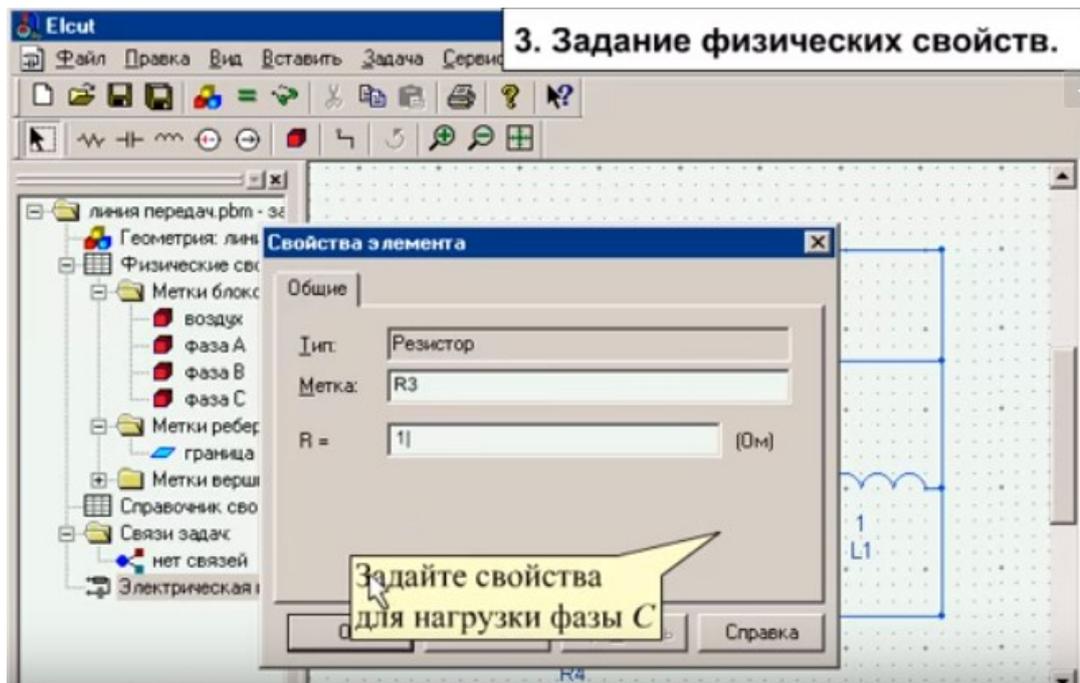


Рисунок 5.27 – Задание свойств для нагрузки фазы C

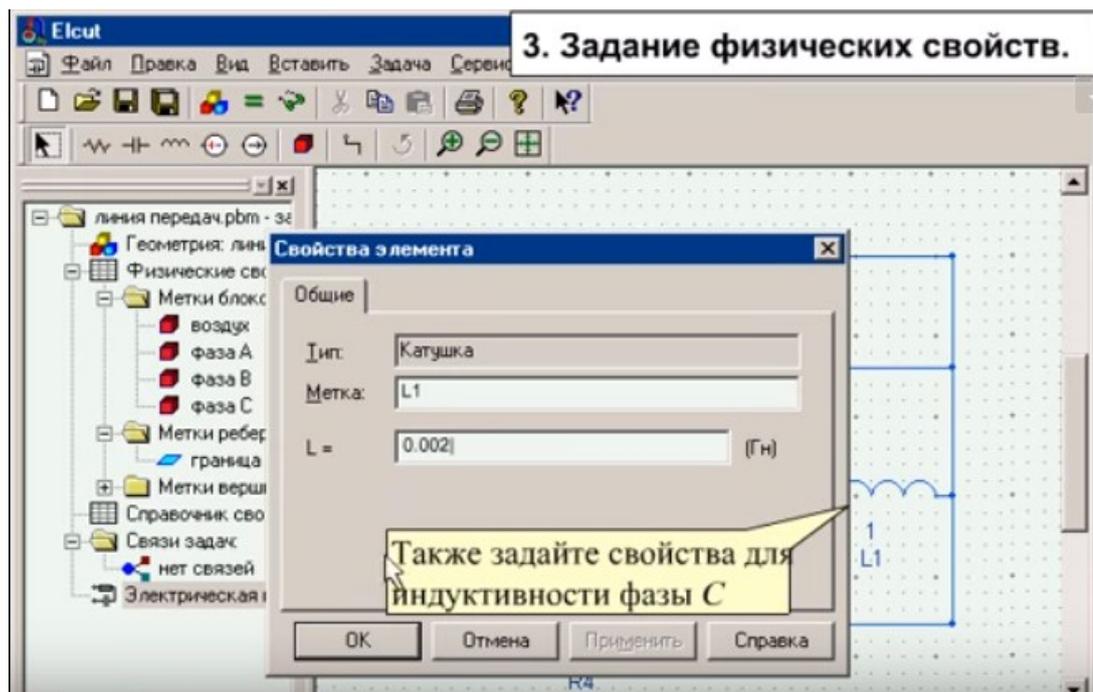


Рисунок 5.28 – Задание свойств для индуктивности фазы C

12 Выберите соответствующие метки для блоков Elcut (рисунки 5.29 – 5.32).

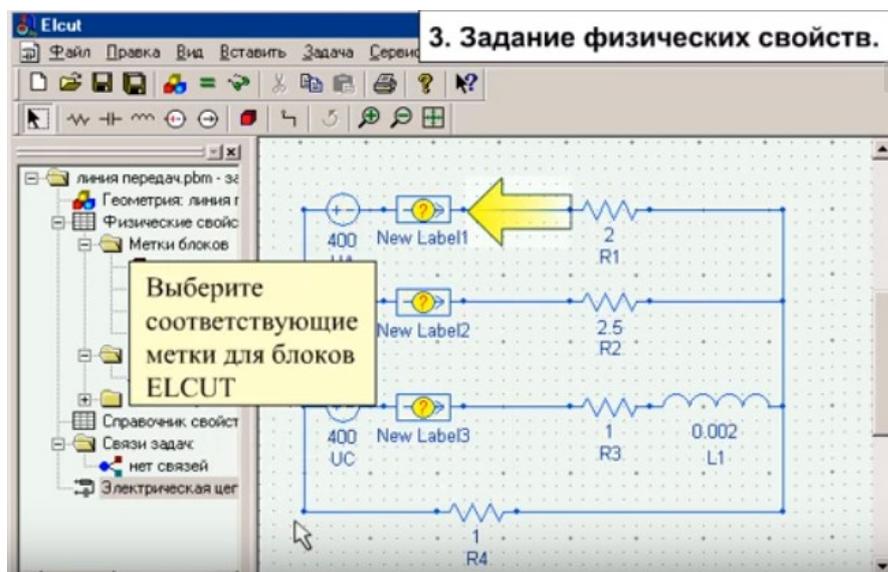


Рисунок 5.29 – Присвоение метки для блоков

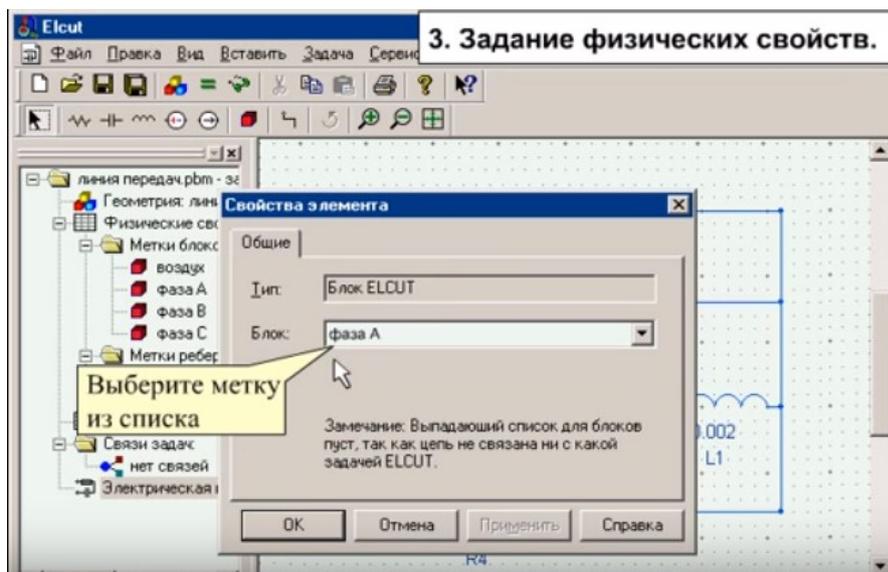


Рисунок 5.30 – Присвоение метки для фазы А

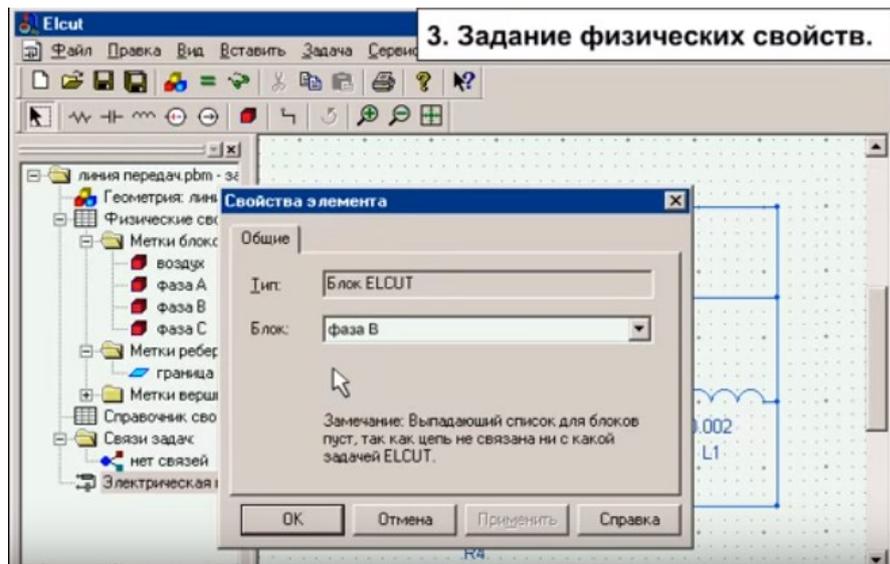


Рисунок 5.31 – Присвоение метки для фазы В

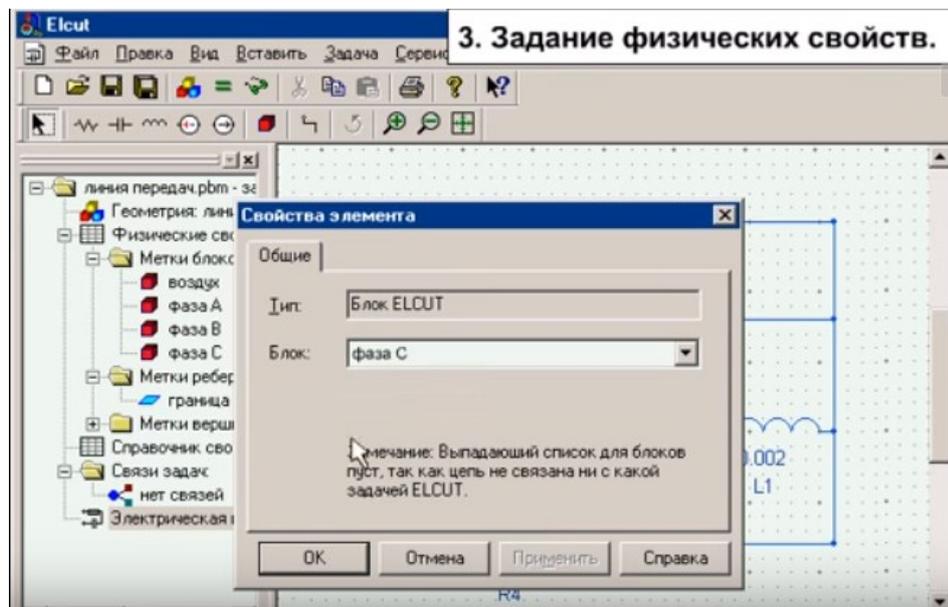


Рисунок 5.32 – Присвоение метки для фазы С

13 Укажите величину сопротивления заземления (рисунок 5.33).

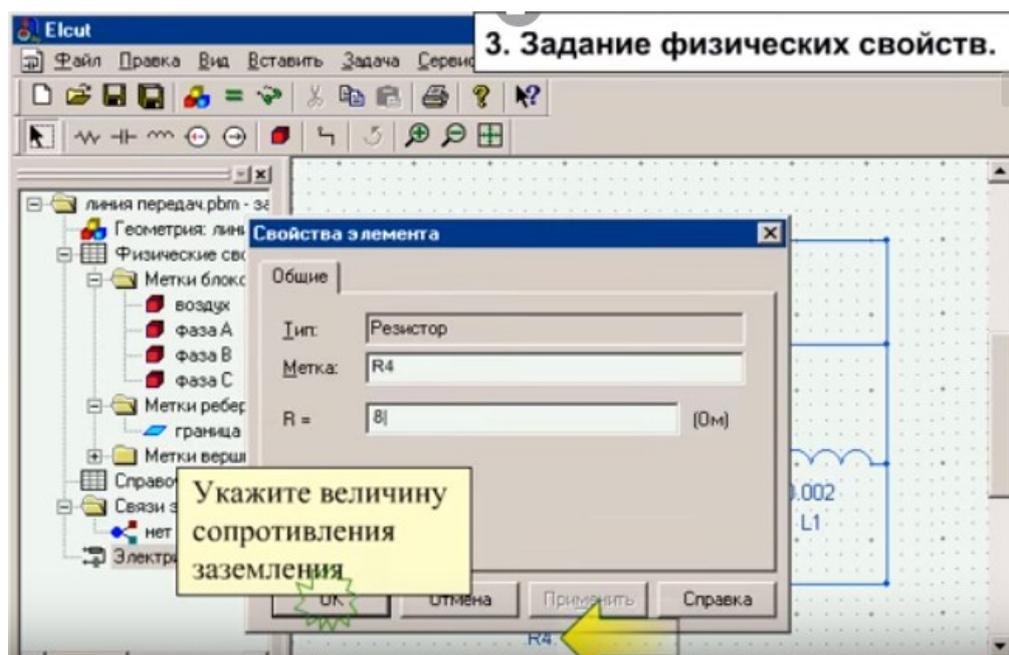


Рисунок 5.33 – Ввод величины сопротивления заземления

14 Закончив с описанием модели можно приступить к решению задачи. Для этого нажмите на кнопку «Решить» (рисунок 5.34).

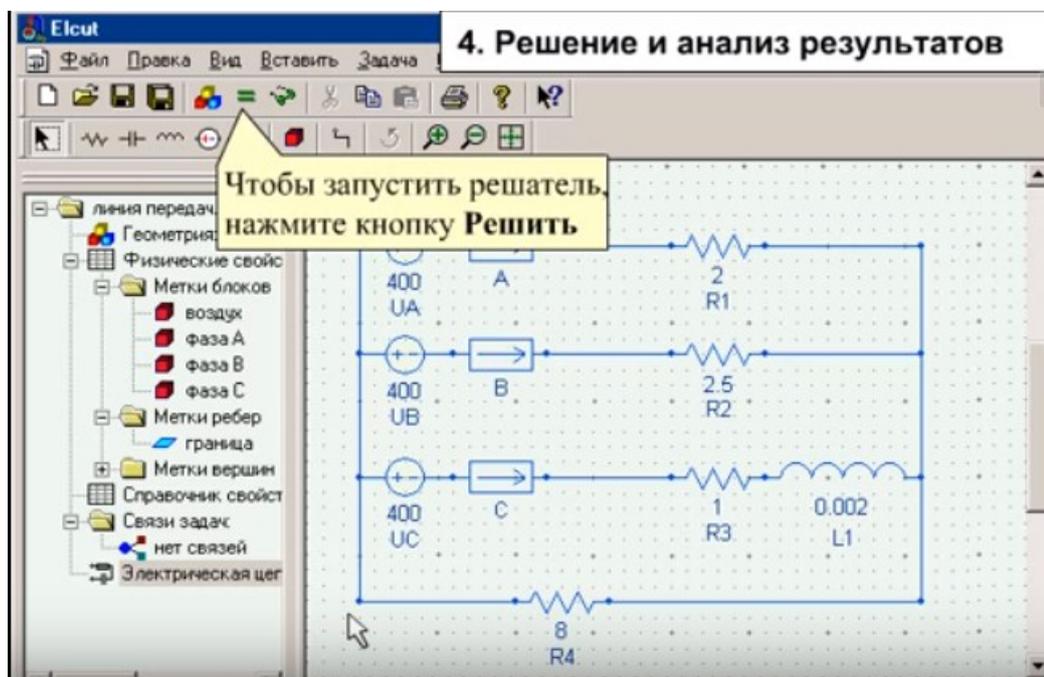


Рисунок 5.34 – Запуск решения задачи

15 На экране высветится решение данной задачи. Для просмотра вычисленных токов включите окно цепи (рисунок 5.35).

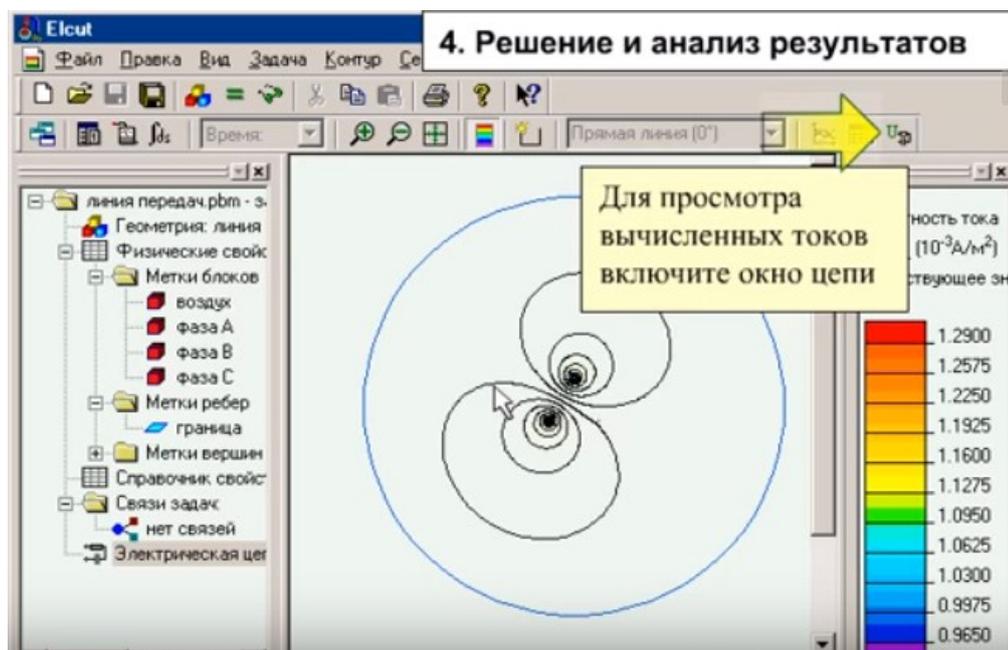


Рисунок 5.35 – Запуск просмотра вычисленных токов

16 Щелкните элемент в списке, чтобы посмотреть токи и напряжения (рисунок 5.36).

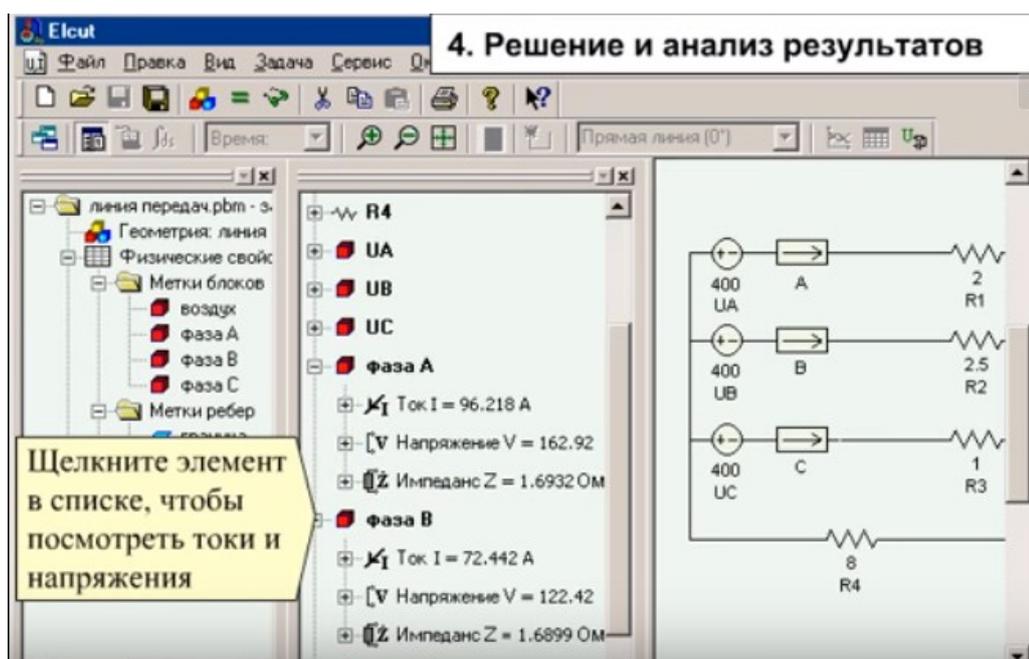


Рисунок 5.36 – Запуск просмотра вычисленных токов и напряжений

17 Задача решена. Токи найдены (рисунок 5.37).

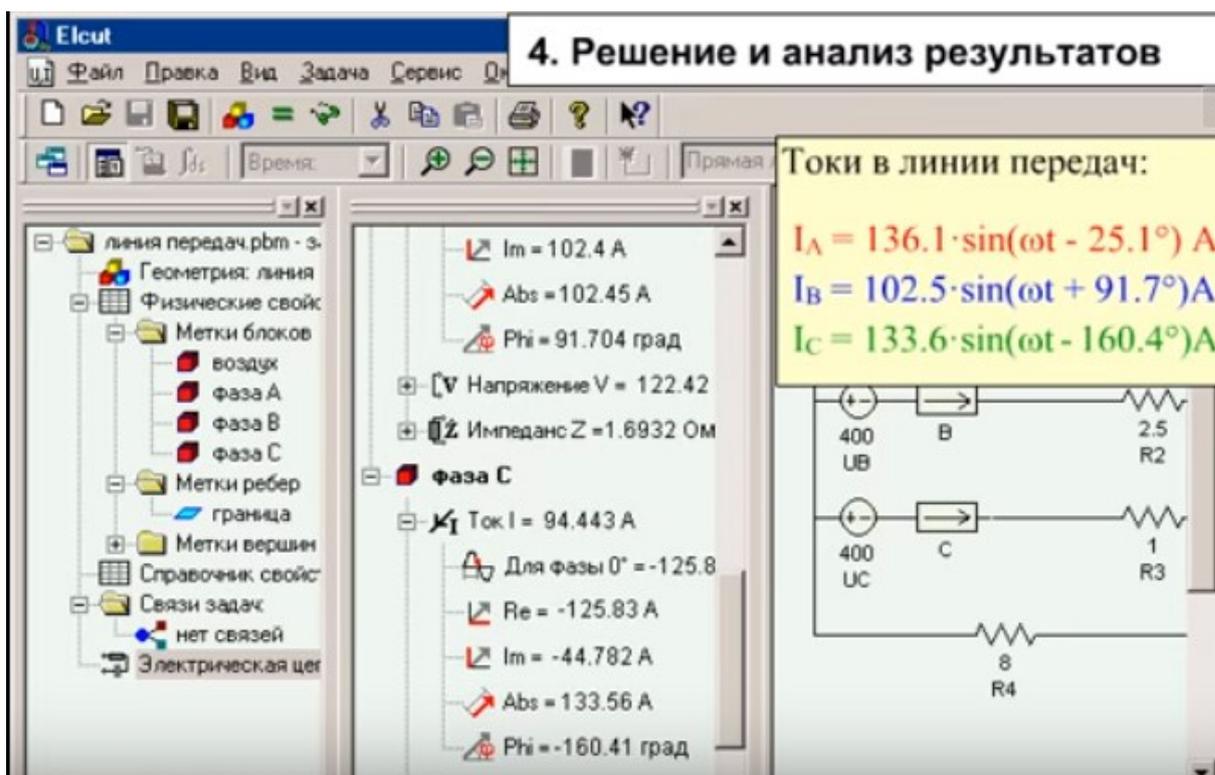


Рисунок 5.37 – Результаты вычислений

6 Расчёт передаточной функции фильтра

6.1 Полосно-пропускающий фильтр

Полосно-пропускающий фильтр – фильтр, предназначенный для пропускания частот, располагающихся в определенной полосе частот.

Полосовой фильтр усиливает определенную область частот, от частоты нижнего среза ($f_{нс}$) до частоты верхнего среза ($f_{вс}$). Цепь обратной связи включает в себя элементы фильтров низких и высоких частот (рисунок 6.1).

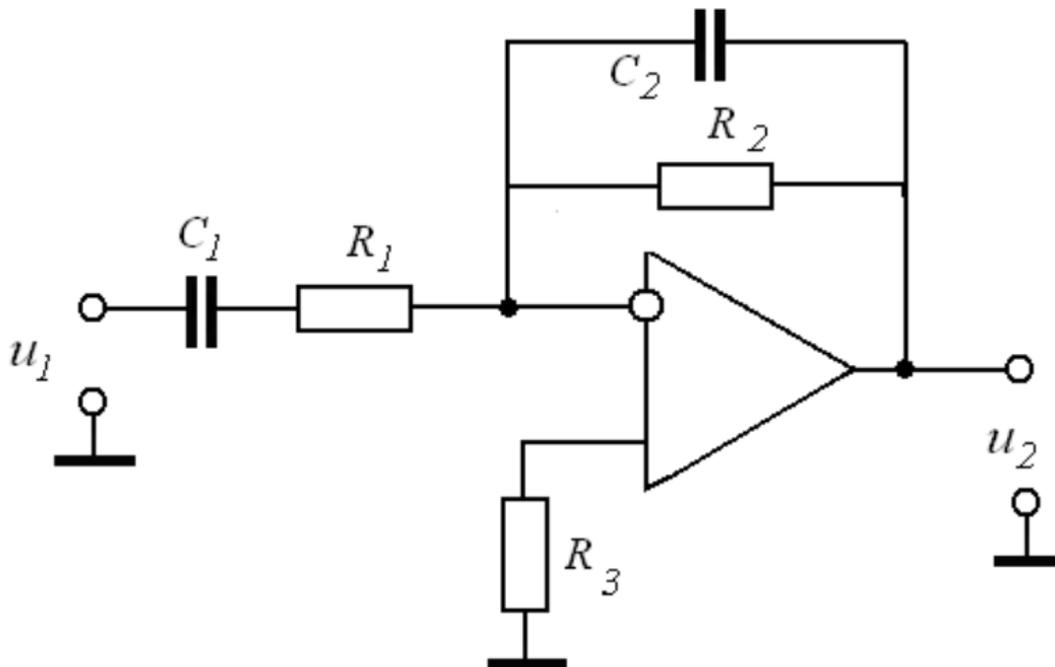


Рисунок 6.1 – Полосовой фильтр

Зависимость коэффициента усиления от частоты можно определить из выражений:

$$K_{oc} = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{R_2 \parallel \frac{1}{j\omega C_2}}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1 R_1}} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + j\omega C_2 R_2} \cdot \frac{1}{1 + (j\omega C_1 R_1)^{-1}} \quad (6.1)$$

$$|K_{oc}| = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_2)^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_1)^2}} \quad (6.2)$$

где $\tau_1 = C_1 R_1$;

$\tau_2 = C_2 R_2$;

τ_1, τ_2 – постоянные времени в областях низких и высоких частот.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) представлена на рисунке 6.2.

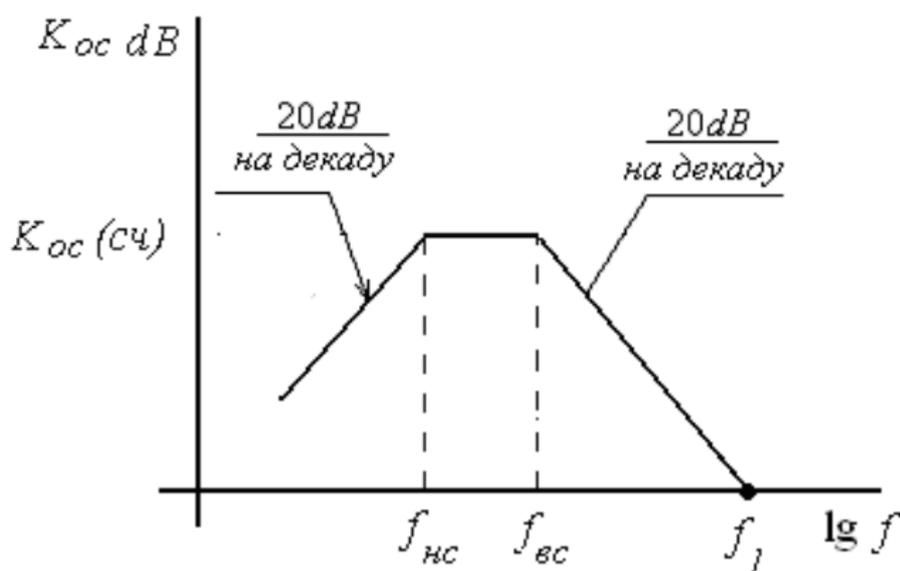


Рисунок 6.2 – АЧХ полосового фильтра

Частоты среза можно определить по выражениям:

$$f_{вс} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}; \quad (6.3)$$

$$f_{нс} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}. \quad (6.4)$$

Фильтр низких частот второго порядка обладает выраженной крутизной спада АЧХ, которая равна 40дВ на декаду (рисунок 6.3).

Крутизну спада 20 дВ создает пассивный фильтр ВЧ ($R_1 C_1$) и еще 20 дВ - активный фильтр ВЧ.

Зависимость коэффициента усиления от частоты можно получить по выражениям:

$$|K_{oc}| = \frac{R_2}{R_1 + R_3} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_1)^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_2)^2}} \quad (6.5)$$

где $\tau_1 = C_1 R_1 \parallel R_3$;

$\tau_2 = C_2 R_2$.

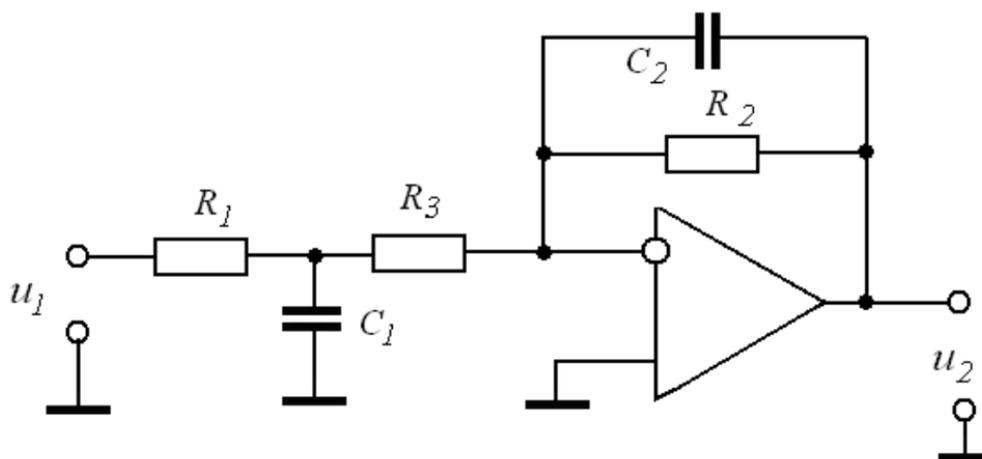


Рисунок 6.3 - Фильтр НЧ второго порядка

АЧХ представлена на рисунке 6.4.

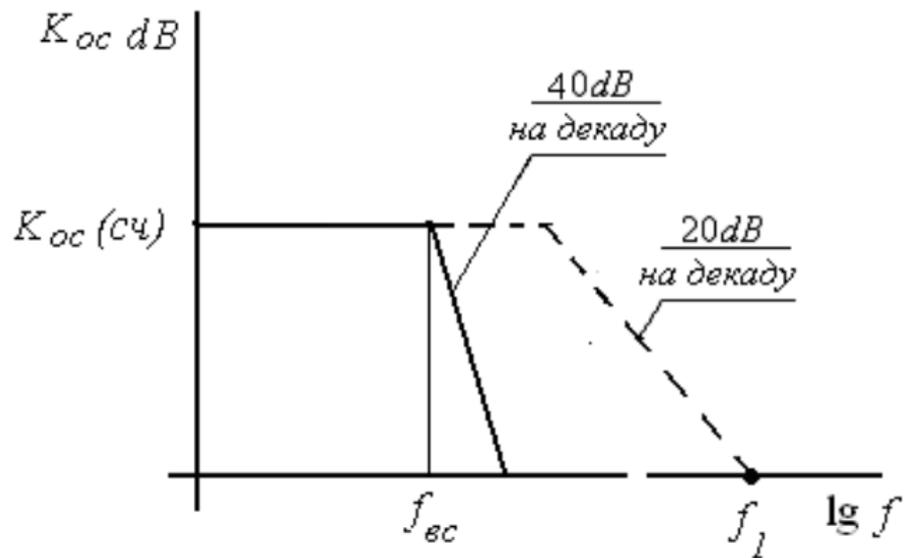


Рисунок 6.4 – АЧХ фильтра НЧ второго порядка

Пунктиром показана АЧХ, полученная при отсутствии конденсаторов C_1 и C_2 .

Узкополосный фильтр предназначен для усиления сигнала одной частоты, на других частотах происходит резкий спад коэффициента усиления. Цепь обратной представляет собой 2Т-образный мост (рисунок 6.5).

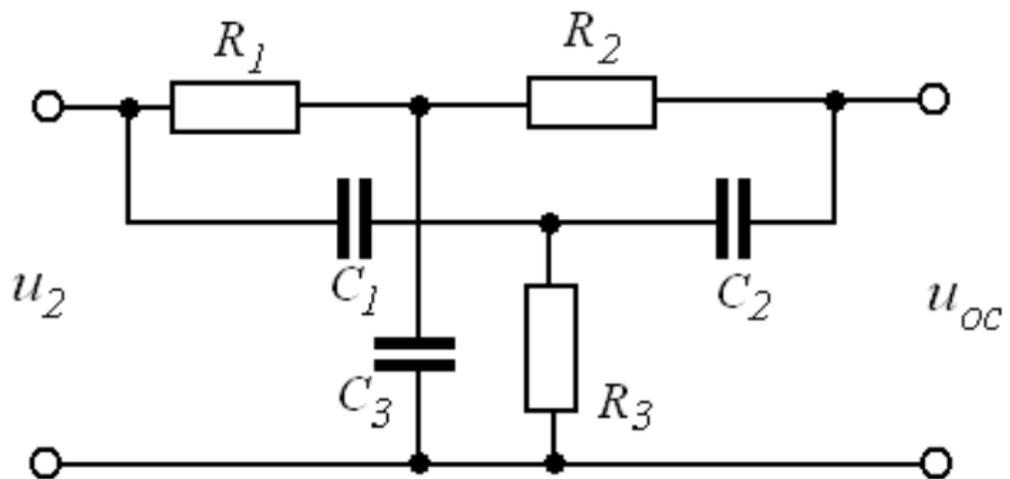


Рисунок 6.5 – 2Т-образный мост

Широкое распространение обрел симметричный мост, у которого:

$$C_1 = C_2 = C;$$

$$R_1 = R_2 = R;$$

$$C_3 = 2C;$$

$$R_3 = \frac{R}{2}.$$

АЧ и фазовая характеристики симметричного моста $|K_M| = F(f)$, $\varphi = F(f)$, представлены на рисунке 6.6.

Мост является пассивным режекторным фильтром. Мост уравновешен, при частоте:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (6.6)$$

где f_0 – частота режекции.

Следовательно, модуль коэффициента передачи данного моста $|K_M = 0|$.

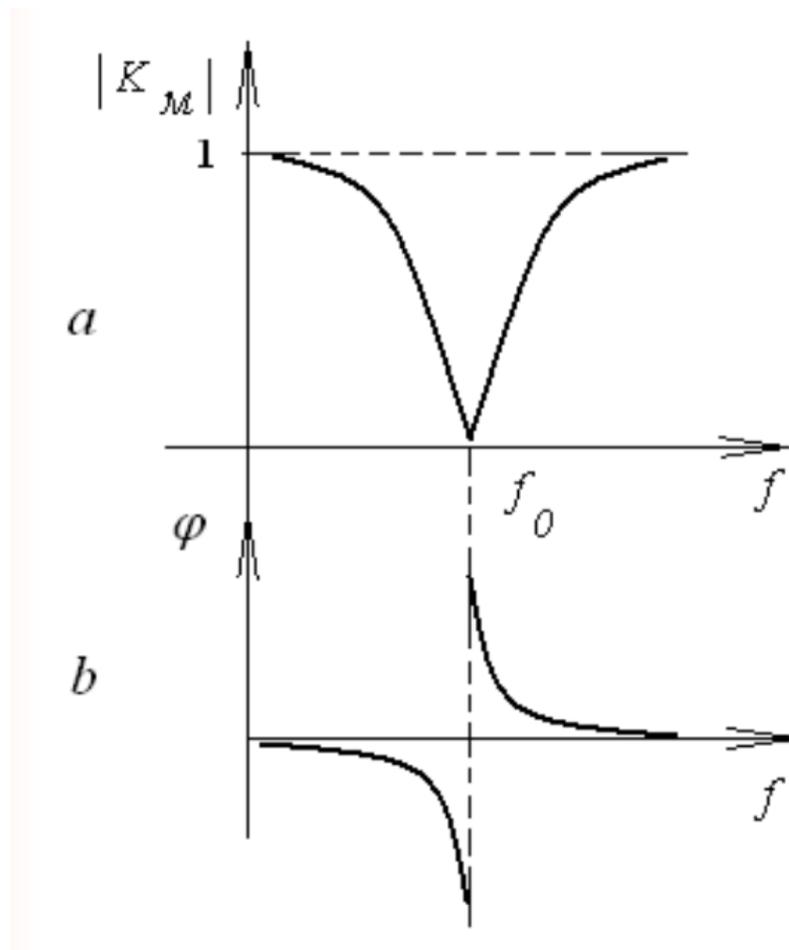


Рисунок 6.6 - АЧ – а, фазовая –b характеристики 2Т моста

При подключении моста в цепь обратной связи, получится схема узкополосного избирательного усилителя (рисунок 6.7).

Из его АЧХ (рисунок 6.8) можно увидеть, что на частоте f_0 мост уравновешен, коэффициент усиления K_{oc} можно определить как отношение резисторов $\frac{R_2}{R_1}$. При отклонении частоты входного сигнала от f_0 появляется отрицательная обратная связь и происходит снижение K_{oc} .

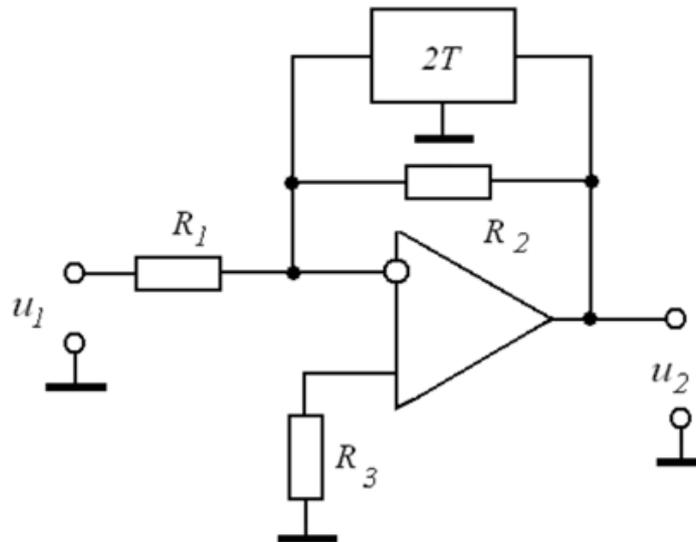


Рисунок 6.7 - Узкополосный избирательный усилитель

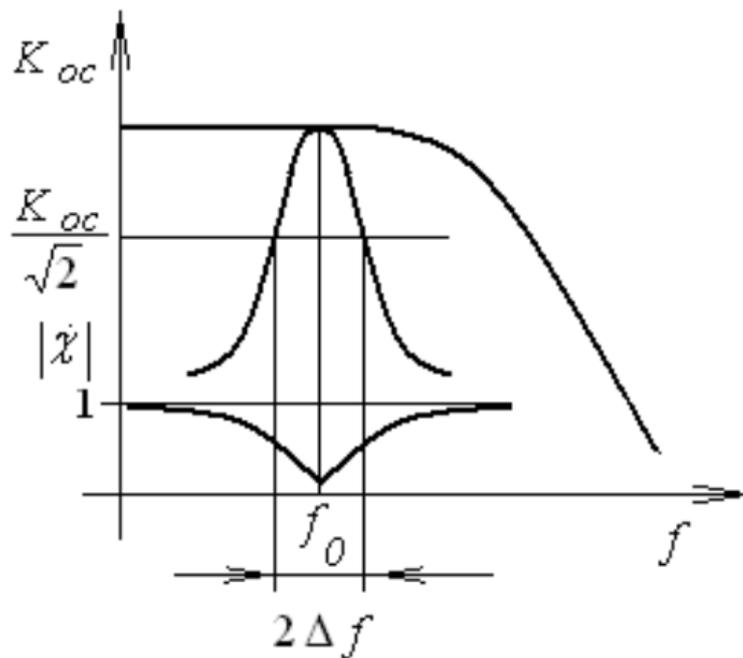


Рисунок 6.8 – АЧХ узкополосного усилителя

При помощи эквивалентной добротности оценивается способность избирательного усилителя выделять сигнал определенной частоты.

$$Q_{\text{эк}} = \frac{f_0}{2\Delta f} = Q_M \cdot K_{oc} = 0,25K_{oc}. \quad (6.7)$$

где Q_M – добротность моста, для симметричного моста принимается равной 0.25.

6.2 Решение задачи в программной среде ELCUT

Тип задачи: плоская задача магнитного поля переменных токов.

Электрическая схема представлена на рисунке 6.9.

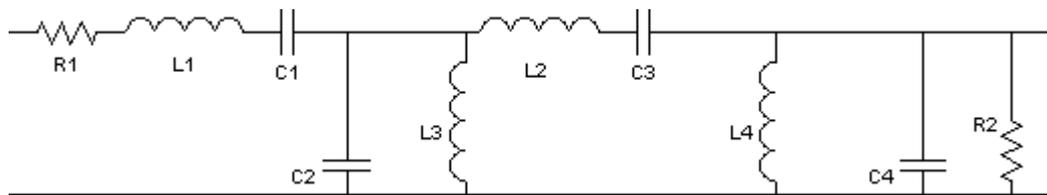


Рисунок 6.9 – Электрическая схема

Дано:

$$R1 = 150 \text{ Ом};$$

$$R2 = 150 \text{ Ом};$$

$$C1 = 840 \text{ пФ};$$

$$C2 = 0.1637 \text{ мкФ};$$

$$C3 = 852 \text{ пФ};$$

$$C4 = 0.0558 \text{ мкФ};$$

$$L1 = 12.11 \text{ мГн};$$

$$L2 = 11.91 \text{ мГн};$$

$$L3 = 182.3 \text{ мкГн};$$

Задача: необходимо рассчитать передаточную функцию фильтра.

Решение:

Чтобы создать задачу, нажимаем кнопку «Создать» и выбираем «Задача EICut» (рисунок 6.10).

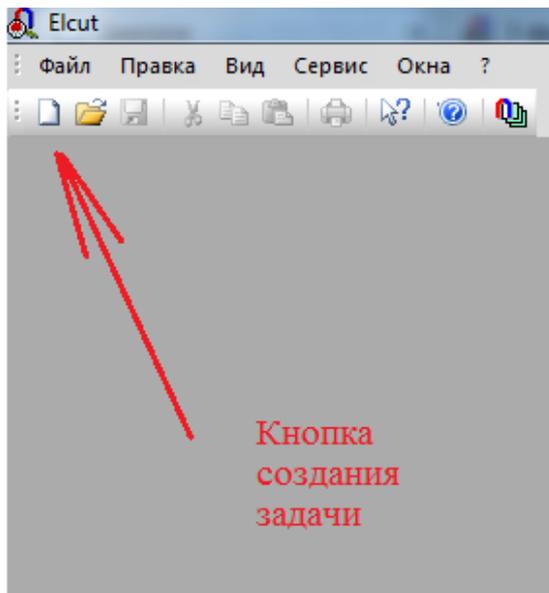


Рисунок 6.10 – Создание задачи

Вводим имя задачи и папки для хранения файлов (рисунок 6.11).

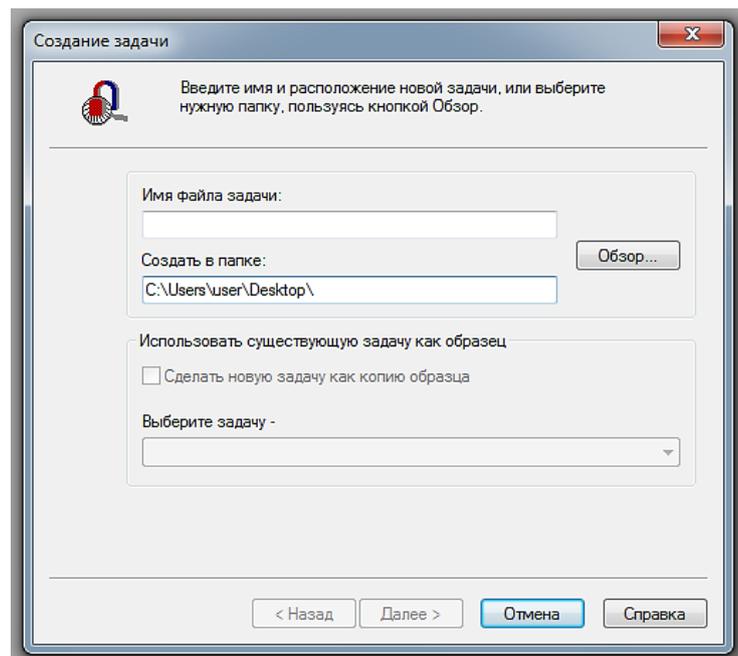


Рисунок 6.11 – Создание задачи

Выбираем тип задачи «Плоская задача магнитного поля переменных токов», класс модели - «Плоская», ед. длины – метры (рисунки 6.12 и 6.13).

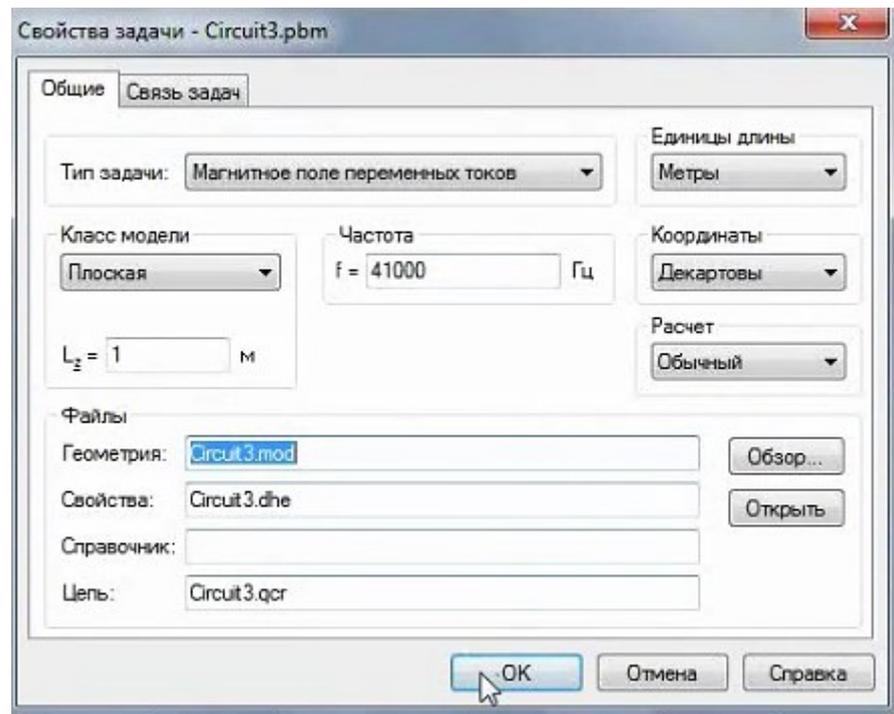


Рисунок 6.12 – Свойства задачи

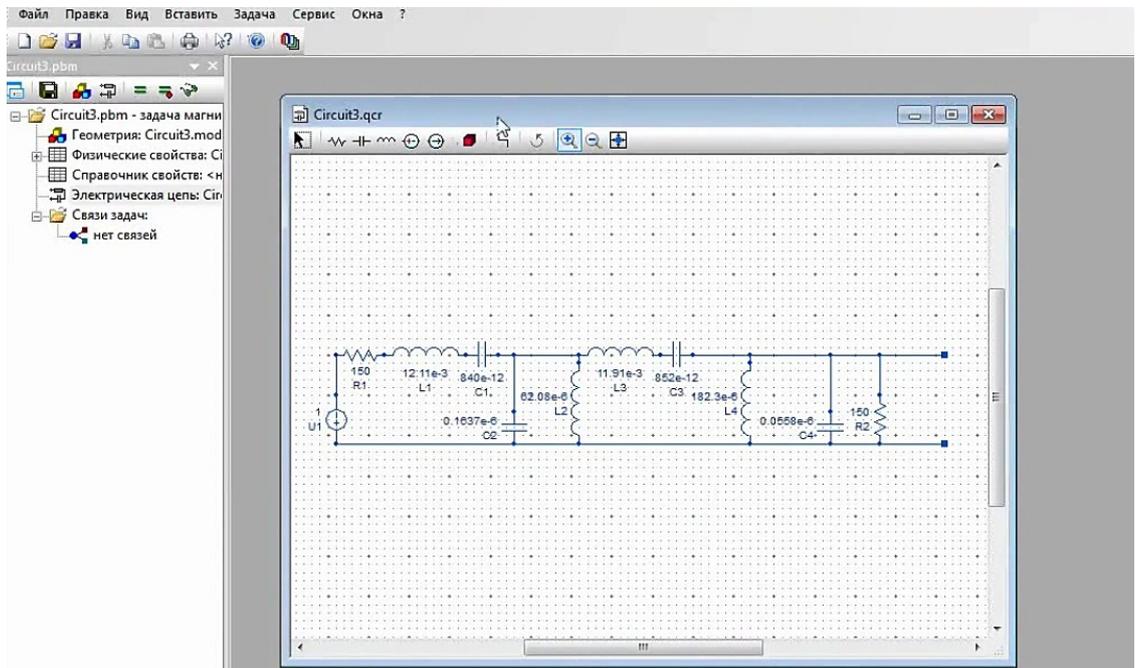


Рисунок 6.13 – Электрическая цепь

Набор задач создается автоматически с помощью инструмента LabelMover (рисунок 6.14), входящего в состав пакета ELCUT. Входное

напряжение имеет амплитуду 1 В. Таким образом, выходное напряжение численно равно передаточному коэффициенту фильтра. Выходное напряжение измеряется на высокоомном сопротивлении.

Сначала исследовался широкий частотный диапазон (от 0 Гц до 1 МГц с шагом 50 кГц). Затем более подробно изучалась полоса пропускания (диапазон от 40 кГц до 60 кГц с шагом 1 кГц).

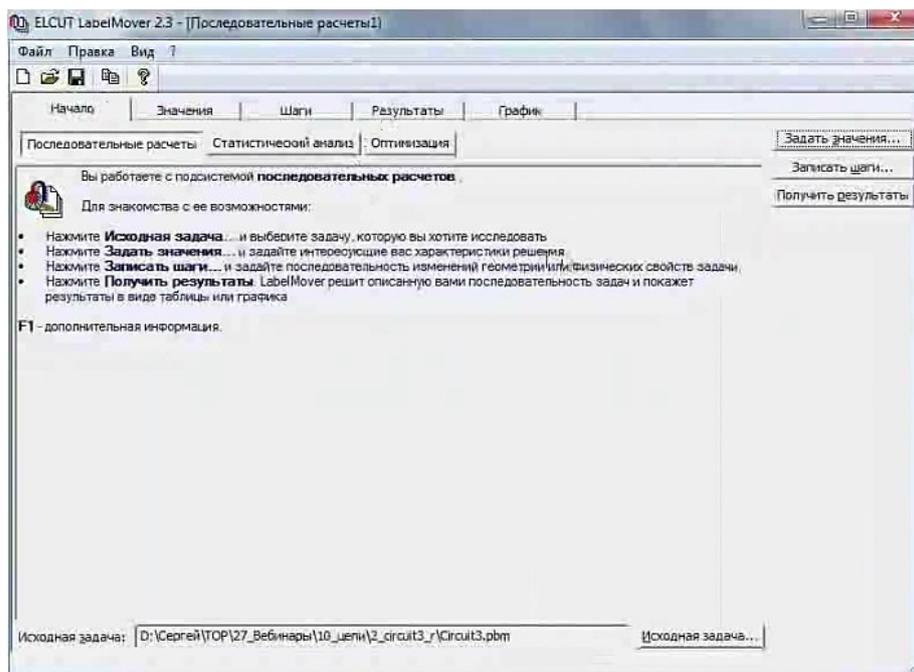


Рисунок 6.14 – Запуск утилиты LabelMover

Далее необходимо задать параметры, в соответствии с алгоритмом, представленном на рисунке 6.14, позволяющие автоматизировать расчеты в анализируемой электрической цепи (рисунок 6.15).

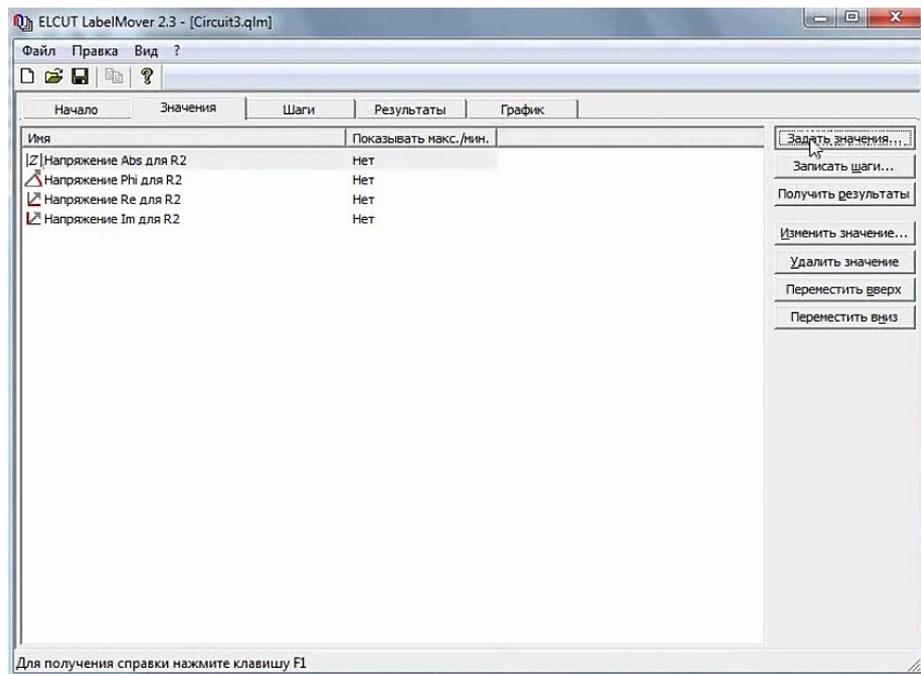


Рисунок 6.15 – Задание значений для элементов электрической схемы

Необходимо задать значения, которые будут выводиться на каждом шаге решения задачи. Будет вводиться 4 величины (рисунок 6.16), которые можно задавать практически в неограниченном количестве. В поле «добавление значений» выбирается элемент цепи, например, сопротивление R2, и выбирается величина, которую необходимо вывести (ток, напряжение).

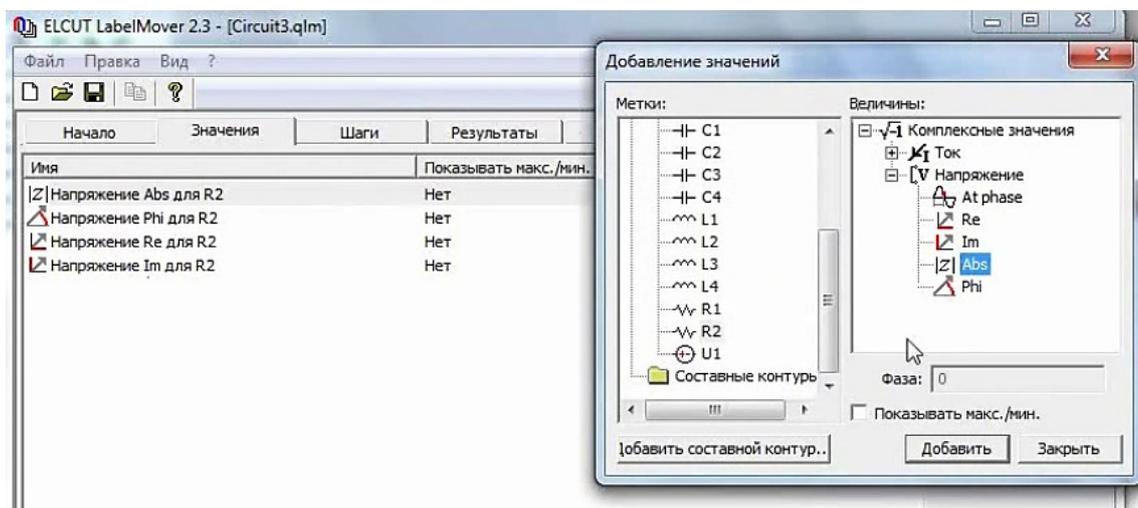


Рисунок 6.16 – Добавление новых значений для параметров схемы

Далее нужно перейти на вкладку «шаги» (рисунок 6.17).

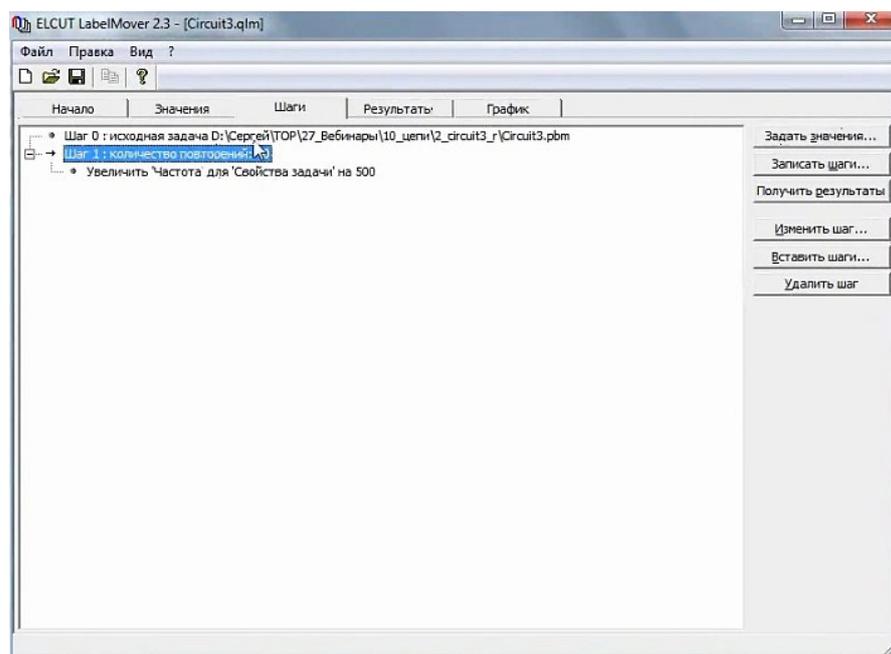


Рисунок 6.17 – Настройка шагов

В рамках решения рассматриваемой задачи будет выполнено 40 итераций (рисунок 6.18).

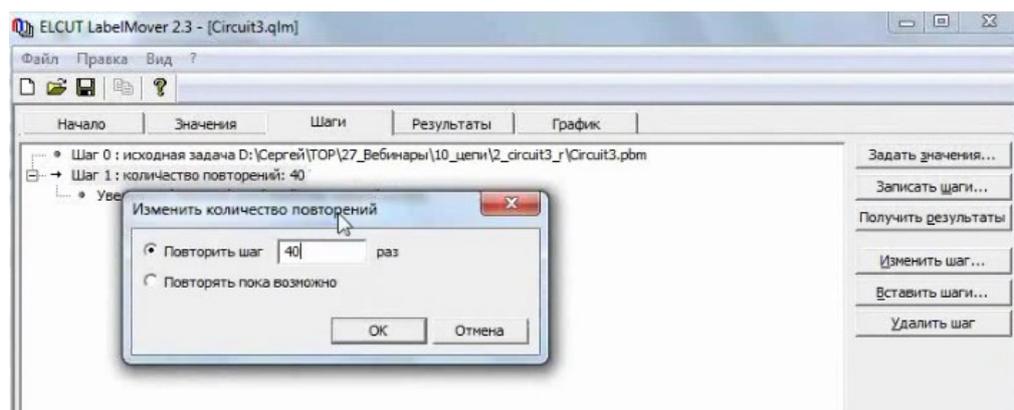


Рисунок 6.18 – Задание числа итераций

На каждой итерации будет проведена следующая операция. Будет всякий раз увеличиваться частота источника на 500 Гц (рисунок 6.19). Для этого

во вкладке «общие свойства» выбирается «частота», затем выбирается метод, с помощью которого будет изменяться данное свойство, и задается величина увеличения частота на каждом шаге – 500 Гц.

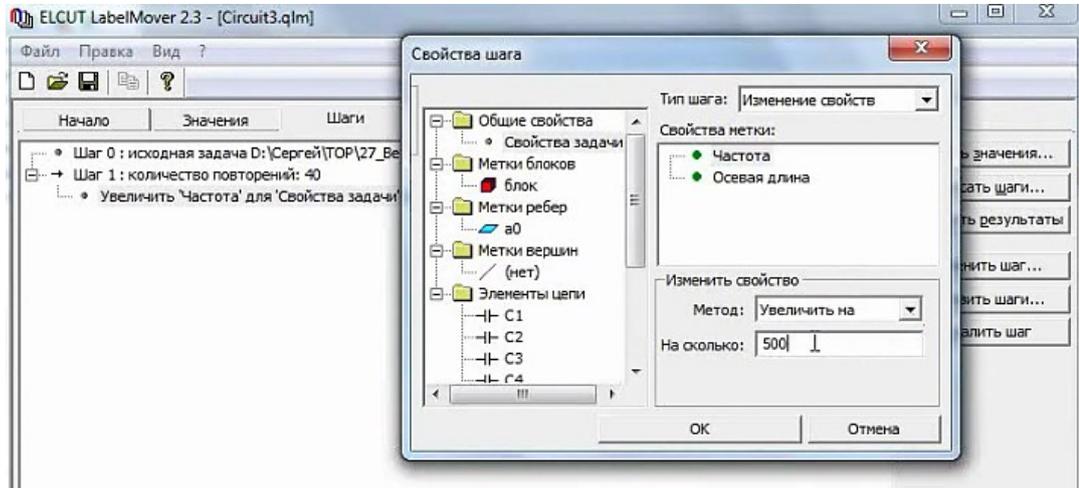


Рисунок 6.19 – Задание свойств шага

На вкладке «результаты» можно посмотреть проведенные вычисления, представленные в табличной форме (рисунок 6.20).

На вкладке «График» результаты можно посмотреть в графическом виде (рисунок 6.21). Здесь можно изменять величины, отложенные по осям x и y, в зависимости от того, какой график нужно получить.

Шаг	Напряже...	Напряже...	Напряже...	Напряже...
0	0.0025664	-52.874	0.001549	-0.0020462
1	0.0032547	-55.589	0.0018393	-0.0026852
1_2	0.0041764	-58.539	0.0021797	-0.0035624
1_3	0.0054322	-61.761	0.0025702	-0.0047857
1_4	0.0071785	-65.304	0.0029992	-0.0065219
1_5	0.0095666	-69.233	0.0034275	-0.0090385
1_6	0.013319	-73.642	0.003751	-0.01278
1_7	0.018882	-78.679	0.0037068	-0.018515
1_8	0.027774	-84.585	0.003221	-0.02765
1_9	0.042929	-91.811	-0.0013569	-0.042907
1_10	0.071195	-101.32	-0.013973	-0.06981
1_11	0.1312	-115.6	-0.056688	-0.11832
1_12	0.27794	-142.82	-0.22146	-0.16795
1_13	0.49293	159.44	-0.46154	0.1731
1_14	0.44135	108.67	-0.14132	0.41811
1_15	0.4001	80.765	0.064214	0.39492
1_16	0.42063	56.898	0.22972	0.35236
1_17	0.47366	28.848	0.11499	0.22853
1_18	0.49932	-4.9027	0.49749	-0.042674
1_19	0.46004	-37.188	0.3665	-0.27806
1_20	0.41235	-63.001	0.18719	-0.36741
1_21	0.40242	-85.632	0.030651	-0.40125
1_22	0.44862	-113.25	-0.17745	-0.41312
1_23	0.48897	-161.49	-0.46366	-0.13526
1_24	0.29529	145.83	-0.24431	0.16585
1_25	0.15053	119.22	-0.073494	0.13137
1_26	0.086118	105.05	-0.022357	0.083165
1_27	0.054316	95.745	-0.0054367	0.054049
1_28	0.036662	88.81	0.00076157	0.036654
1_29	0.025982	83.243	0.0030568	0.025801
1_30	0.019102	78.57	0.0037854	0.018723

Рисунок 6.20 – Результаты вычислений

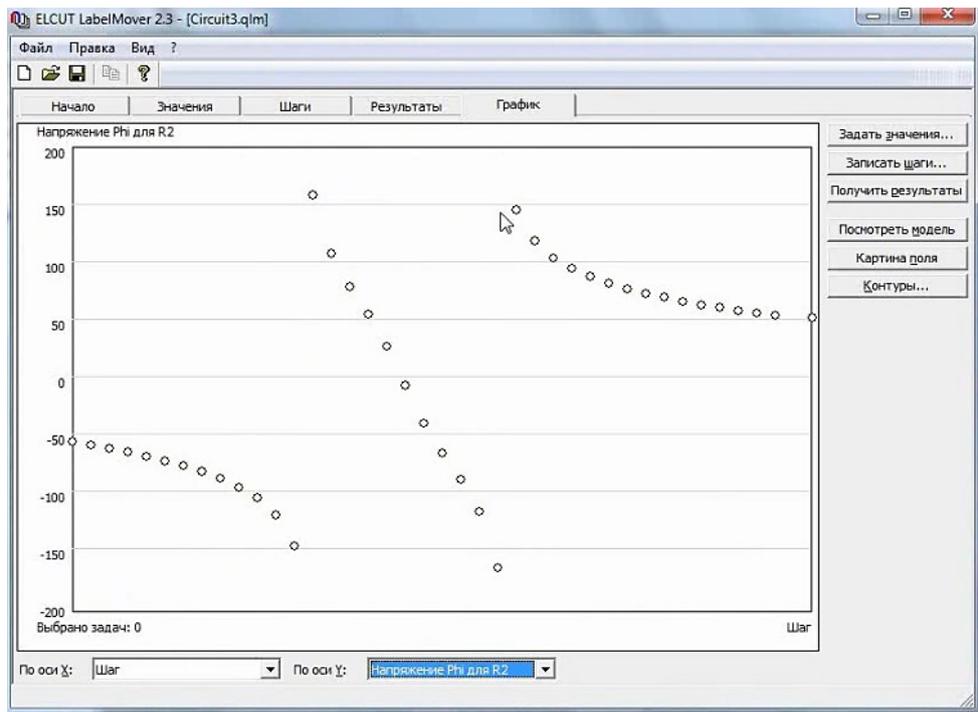


Рисунок 6.21 – Графическое представление результатов

7 Расчёт распределения магнитного поля катушек Гельмгольца

7.1 Полосно-пропускающий фильтр

Катушки Гельмгольца представляют собой два одинаковых кольцевых витка, соединенных между собой последовательно и расположенных на расстоянии радиуса витка друг от друга.

Обычно катушки Гельмгольца состоят из двух катушек, на которых намотано некоторое количество витков, причем толщина катушки должна быть много меньше ее радиуса. В реальных системах толщина катушек может быть сравнима с их радиусом.

Таким образом, катушки Гельмгольца – две соосно расположенных одинаковых катушки, расстояние между центрами которых приблизительно равно их среднему радиусу.

Катушки Гельмгольца используются для получения практически однородного магнитного поля в центре системы, что может быть использовано для измерительных целей, для калибровки датчиков магнитной индукции.

Выведем формулу магнитной индукции катушек Гельмгольца. Для этого рассмотрим магнитное поле, создаваемое током, протекающим по тонкому проводу, имеющему форму окружности радиуса R (рисунок 7.1).

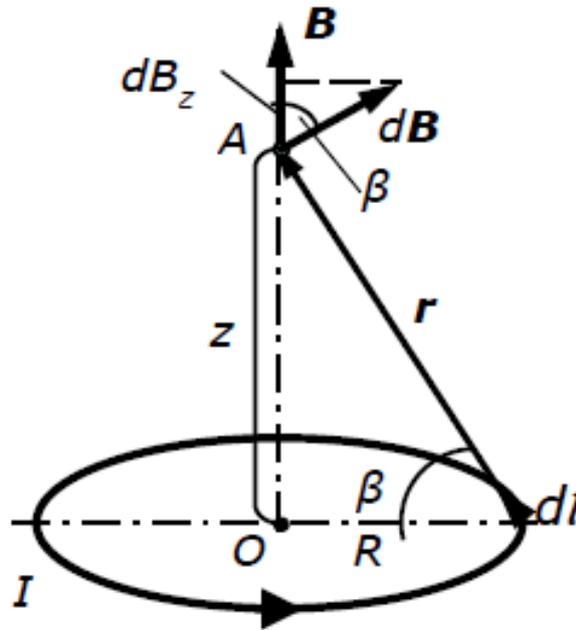


Рисунок 7.1 – Поле кругового тока

Найдем магнитную индукцию B на оси кругового тока на расстоянии z от центра контура. Согласно закону Био – Савара – Лапласа:

$$dB = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot dl}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (7.1)$$

Результирующий вектор B в точке A будет направлен по оси z вверх. Для нахождения модуля вектора необходимо сложить проекции векторов dB на ось z :

$$dB_z = dB \cdot \cos(\beta) = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot dl \cdot R}{4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot r} \quad (7.2)$$

Проинтегрируем выражение по всему контуру, учитывая, что $r = (z^2 + R^2)^{1/2}$, получим величину магнитной индукции на оси кругового тока:

$$B = B_z = \frac{\mu_0 \cdot I}{2} \cdot \frac{R^2}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad (7.3)$$

Теперь рассмотрим систему из двух кольцевых проводников одинакового радиуса R , соосно расположенных на оси z на расстоянии a друг от друга (начало координат находится в центре одного из колец) (рисунок 7.2).

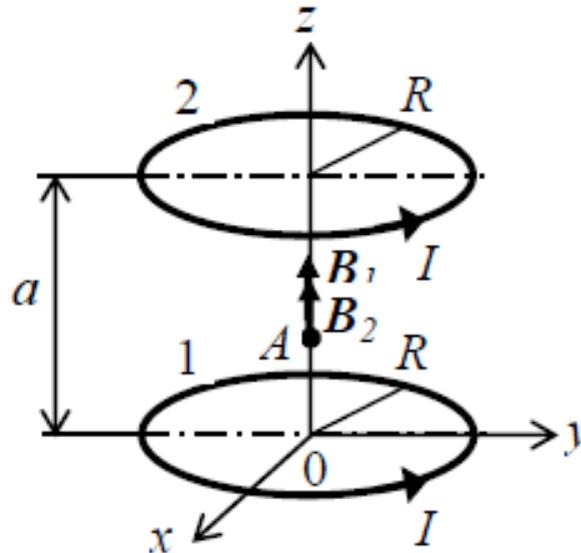


Рисунок 7.2 – Поля кольцевых проводников

Токи в каждом кольце одинаково направлены и равны по величине, следовательно, индукция магнитного поля в точке A на расстоянии z от первого кольца равна сумме магнитных индукций полей, создаваемых токами первого и второго колец:

$$B_{1z} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2} \cdot \frac{R^2}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad (7.4)$$

$$B_{2z} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2} \cdot \frac{R^2}{[(z - a)^2 + R^2]^{3/2}} \quad (7.5)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot R^2}{2} \cdot \left\{ \frac{1}{(z^2 + R^2)^{3/2}} + \frac{1}{[(z - a)^2 + R^2]^{3/2}} \right\}, \quad (7.6)$$

где I – сила тока в каждом кольце,

R – радиус кольца.

Определим неоднородность поля B_z , найдя первую и вторую производные:

$$\frac{\partial B_z}{\partial z} = \frac{3 \cdot \mu_0 \cdot I \cdot R^2}{2} \cdot \left\{ \frac{-z}{(z^2 + R^2)^{5/2}} + \frac{-(z - a)}{[(z - a)^2 + R^2]^{5/2}} \right\} \quad (7.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2} = \frac{3 \cdot \mu_0 \cdot I \cdot R^2}{2} \cdot \left\{ \frac{5 \cdot z^2}{(z^2 + R^2)^{7/2}} - \frac{1}{(z^2 + R^2)^{5/2}} + \frac{5 \cdot (z - a)^2}{[(z - a)^2 + R^2]^{7/2}} \right. \\ \left. - \frac{1}{[(z - a)^2 + R^2]^{5/2}} \right\} \quad (7.8) \end{aligned}$$

В точке $z=a/2$ первая производная обращается в нуль, вторая производная тоже обращается в нуль при условии $a=R$.

Полученные результаты позволяют утверждать, что для получения наилучшей однородности поля, расстояние между кольцами должно равняться их радиусу (рисунок 7.3).

Данный результат получен для двух тонких колец с током. На практике такую систему колец использовать нельзя, так как величина тока, необходимая для получения даже небольших полей будет слишком велика. Поэтому для получения однородных полей используют катушки с большим числом витков, которые называют катушками Гельмгольца (рисунок 7.4).

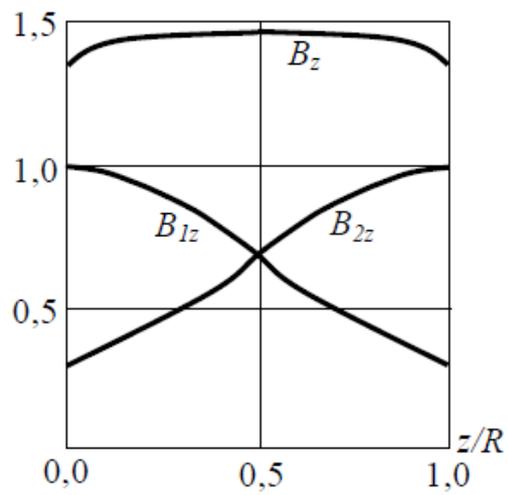


Рисунок 7.3 – Графический результат сложения магнитных полей

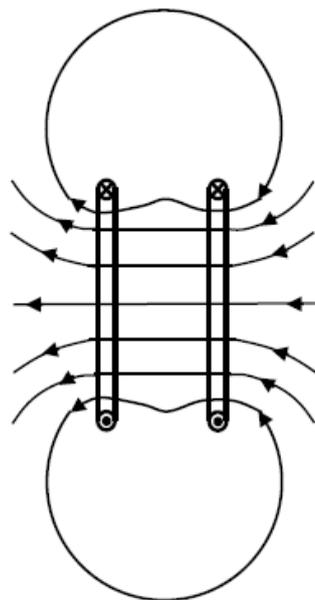


Рисунок 7.4 – Силовые линии от колец Гельмгольца

7.2 Решение задачи в программной среде ELCUT

Цель работы: Рассчитать распределение магнитного поля катушек Гельмгольца. Найти область однородного магнитного поля. Сравнить полученные результаты с аналитическими.

Тип задачи: Осесимметричная задача магнитостатики.

Геометрия задачи представлена на рисунке 7.5.

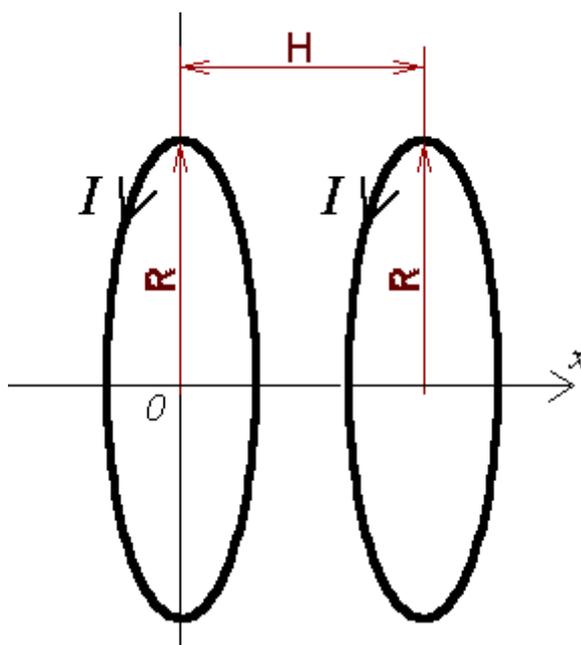


Рисунок 7.5 – Геометрия задачи

Дано:

$$H = R = 1\text{ м,}$$

$$\text{Ток } I = 1\text{ А.}$$

Каждая катушка состоит из одного витка с током I . Окружающая среда - воздух.

Решение:

Аналитически поле катушек Гельмгольца на оси может быть определено как:

$$B(x) = 2 \cdot B_1(x) = 2 \cdot \frac{\mu \cdot n \cdot I \cdot R^2}{2 \cdot (R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (7.9)$$

Поле посередине между катушками может быть определено как:

$$B(x = R/2) = 2 \cdot \frac{\mu \cdot n \cdot I \cdot R^2}{2 \cdot \left(R^2 + \left(\frac{R}{2}\right)^2\right)^{3/2}} = 0.83^{3/2} \cdot \frac{\mu \cdot n \cdot I}{R} \quad (7.10)$$

Задача в ELCUT может быть поставлена и решена как задача магнитостатики.

Порядок выполнения работы:

- 1) Чтобы создать задачу нажмите кнопку Создать. Введите имя задачи и папку для хранения файла.
- 2) Выберите тип задачи Магнитостатическое поле. Выберите класс модели - Осесимметричная. Введите имена файла модели и файла свойств.
- 3) Выберите единицы длины (м) и задайте систему координат (Декартовы координаты) (рисунок 7.6).

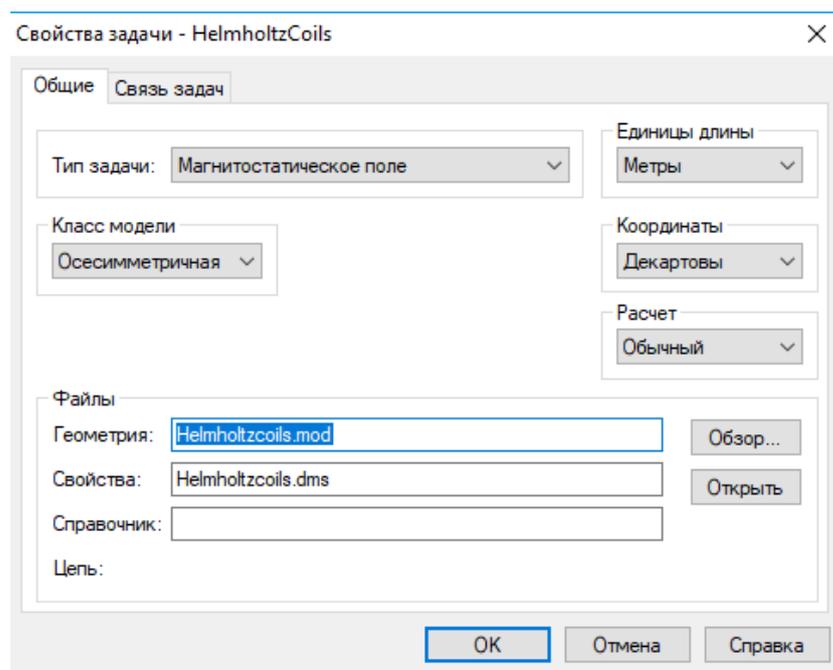


Рисунок 7.6 – Свойства задачи

4) Создание модели. Нажмите кнопку - Открыть модель. Настройте шаг сетки привязки, в меню Вид открыть Сетка привязки.

5) Перейдите в режим Вставки для создания модели. Постройте модель, используя прямые линии, окружности и вершины (две катушки представляются тонким проводом в виде вершин) (рисунок 7.7).

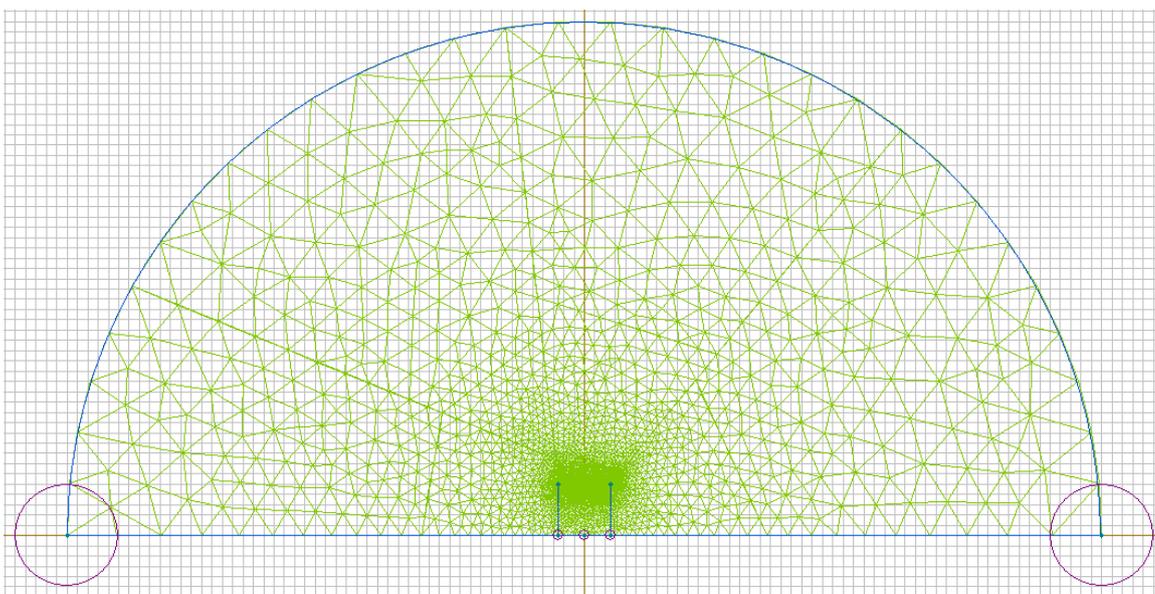


Рисунок 7.7 – Готовая модель катушки Гельмгольца

6) С помощью меток назначаются свойства материалов, граничные условия, источники. Чтобы присвоить метку объекту, его надо выделить. Перейдите в режим выделения. Выделите объект и в контекстном меню выберите Свойства. Введите имя метки (Обмотка, Катушка_1, Катушка_2), границу обозначить как ($A=0$).

7) Щелкните дважды по метке, чтобы открыть окно ее свойств. Задаются свойства меток (рисунки 7.8 – 7.10).

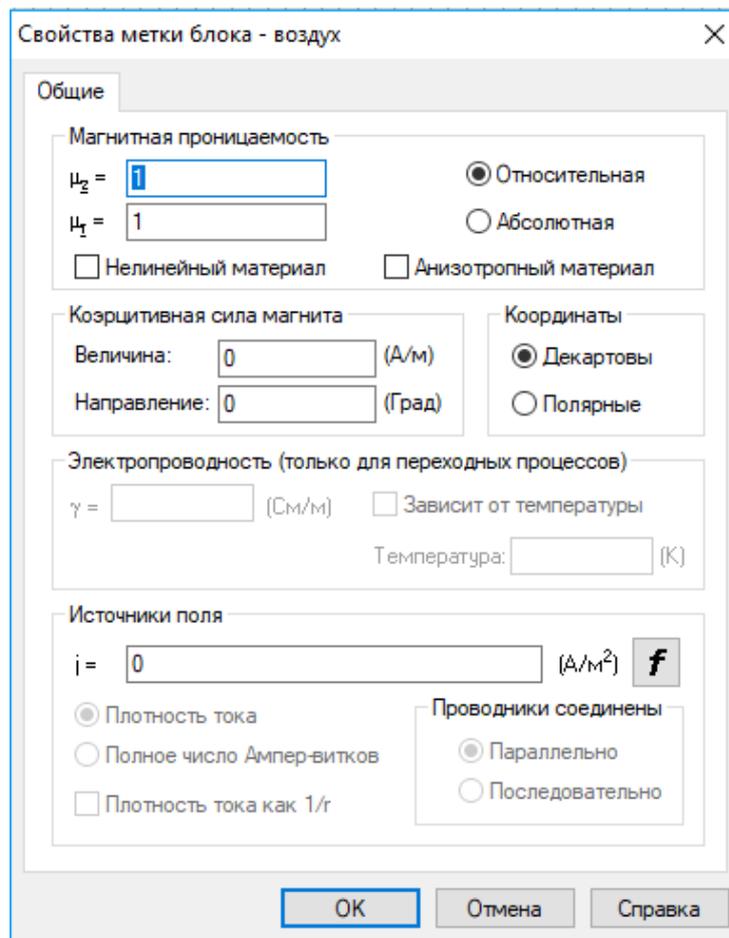


Рисунок 7.8 – Свойства воздуха

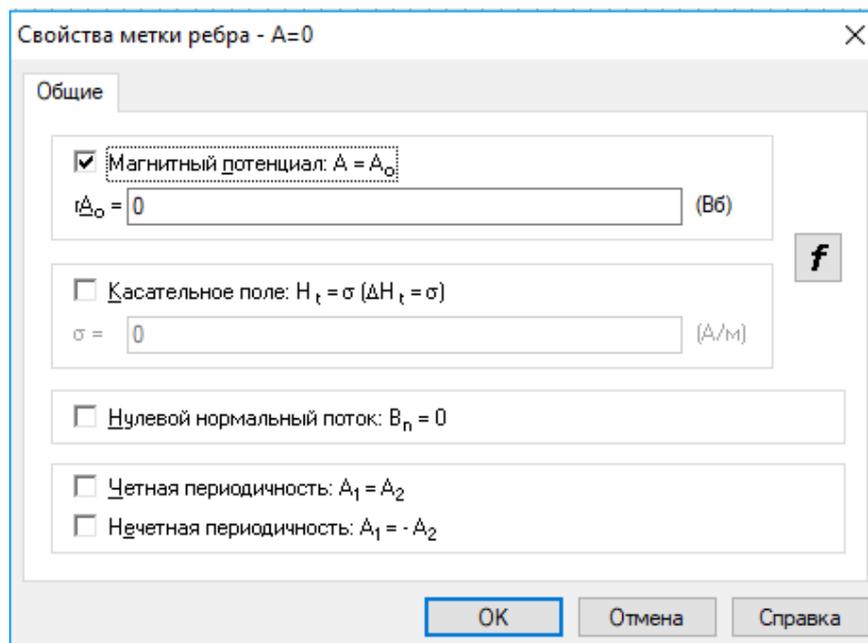


Рисунок 7.9 – Свойства границы $A=0$

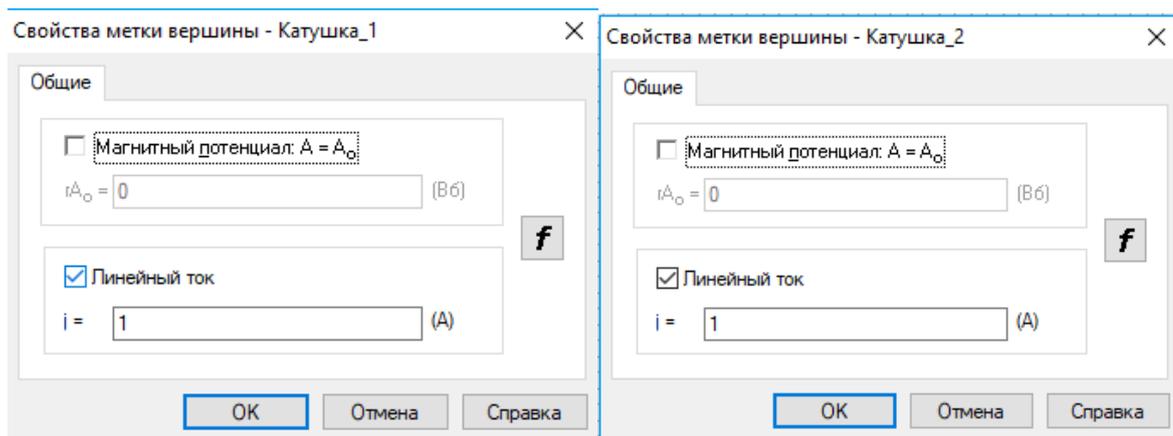


Рисунок 7.10 – Свойства катушек

8) Можно приступить к решению задачи. Чтобы запустить решение задачи, нажмите кнопку Решить (рисунок 7.11).

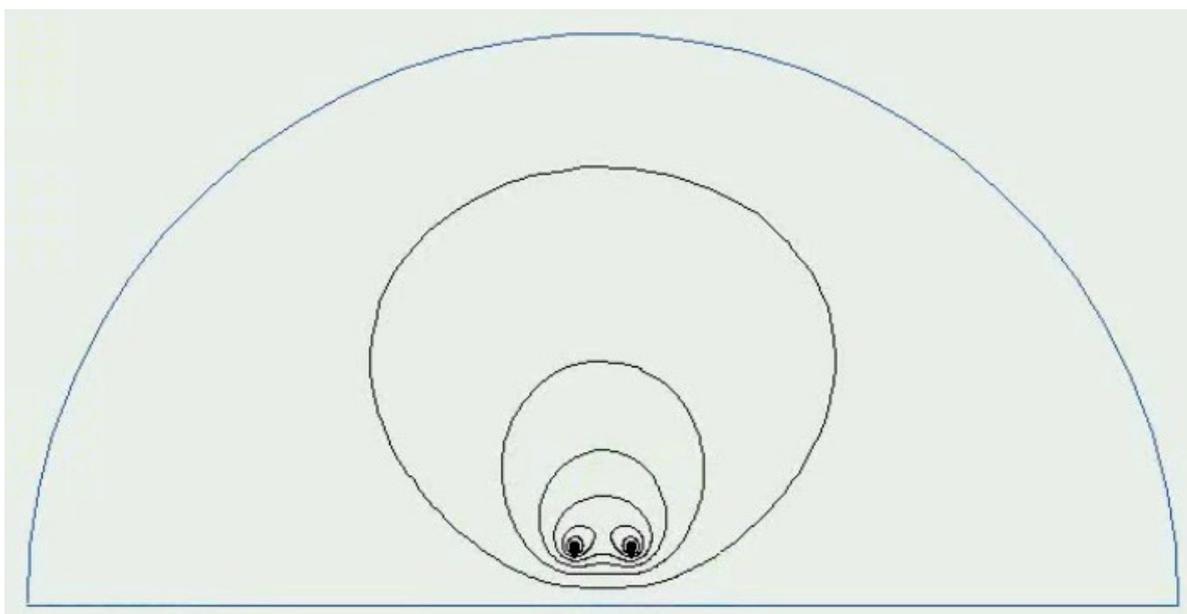


Рисунок 7.11 – Картина поля

9) Для построения графика следует нажать кнопку Добавить к контуру, провести контур по оси катушек (рисунок 7.12). Затем открыть график индукции с помощью кнопки График (рисунки 7.13 – 7.15).

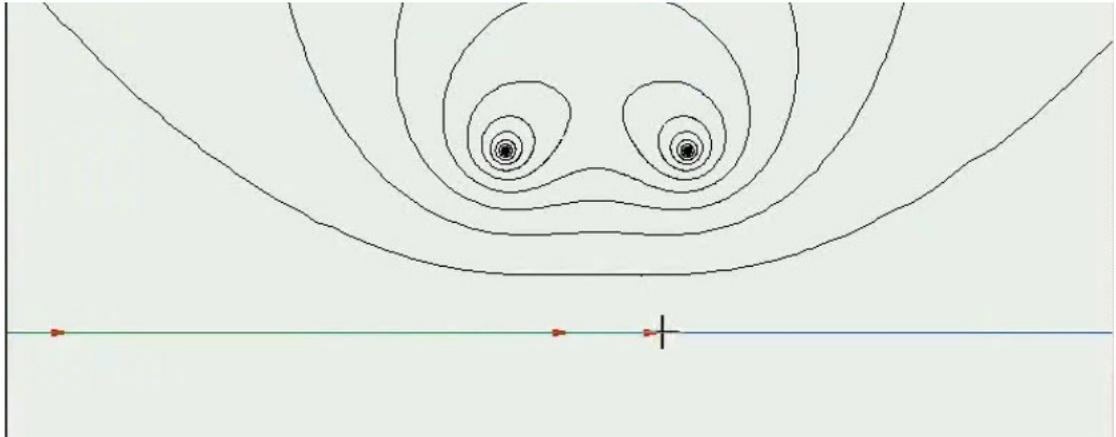


Рисунок 7.12 – Построенный контур

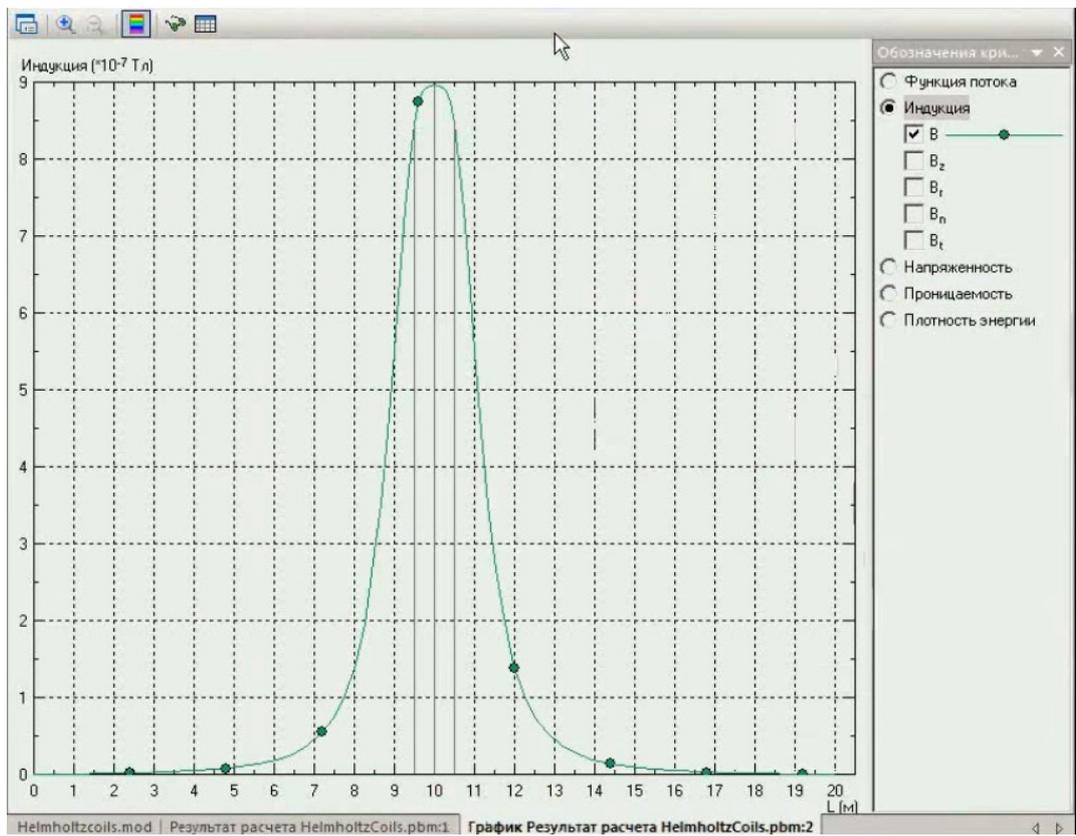


Рисунок 7.13 – Полученный график

Результат:

Для заданных параметров ($I = 1$ А, $R = 1$ м, $n = 1$ виток) получаем:

$$B(x = R/2) = 0.83^{3/2} \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}{1} = 8.98 \cdot 10^{-7} \text{ (Тл)}$$

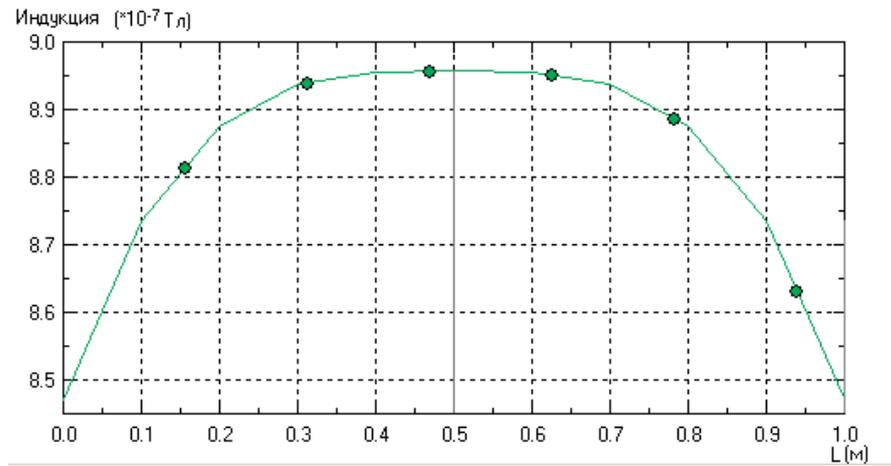


Рисунок 7.14 – График распределения магнитного поля катушек Гельмгольца

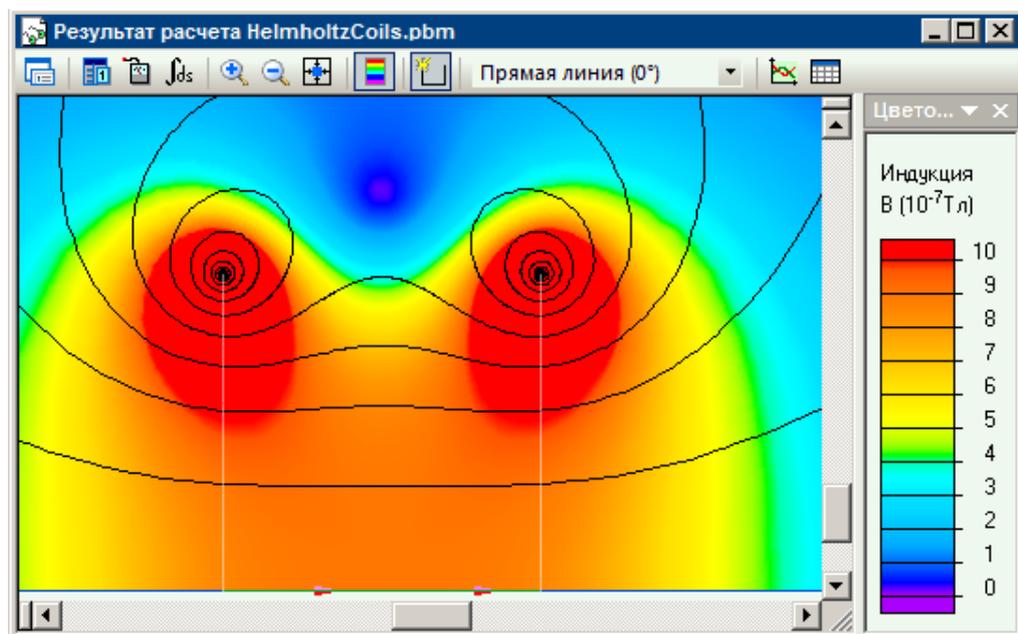


Рисунок 7.15 – Распределение магнитного поля катушек Гельмгольца

Таким образом, результат, полученный в ELCUT, можно считать достаточно близким к аналитическому.

Список использованных источников

1 Бочаров, Ю.Н. Техника высоких напряжений : учебное пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – Санкт-Петербург : Издательство Политехнического университета, 2013. – 265 с. : схем., ил., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=363032> (дата обращения: 11.12.2019). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-7422-3998-7. – Текст : электронный.

2 Титков, В.В. Физические основы техники высоких напряжений, сильных магнитных полей и токов : учебное пособие / В.В. Титков ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – Санкт-Петербург : Издательство Политехнического университета, 2011. – 185 с. : схем., ил., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=362996> (дата обращения: 11.12.2019). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-7422-3487-6. – Текст : электронный.

3 Овсянников, А.Г. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : учебник / А.Г. Овсянников, Р.К. Борисов. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2011. – 194 с. : табл., граф., схем., ил. – (Учебники НГТУ). – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=436029> (дата обращения: 11.12.2019). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-7782-1678-5. – Текст : электронный.

4 Бравичев, С. Электрические цепи : учебное пособие / С. Бравичев, Г. Дегтярев, В. Трубникова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Государственное образовательное учреждение высшего профес-

сионального образования «Оренбургский государственный университет». – Оренбург : ИПК ГОУ ОГУ, 2011. – 136 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=259158> (дата обращения: 11.12.2019). – Текст : электронный.

5 Веремеев, А. А. Техника высоких напряжений [Электронный ресурс] : учебное пособие для обучающихся по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника / А. А. Веремеев, С. В. Митрофанов, А. С. Сташкевич; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Оренбург. гос. ун-т", Каф. электро- и теплоэнергетики. - Электрон. текстовые дан. (1 файл: 5.04 Мб). - Оренбург : ОГУ, 2018. - 124 с. - Загл. с тит. экрана. - Adobe Acrobat Reader 6.0 - ISBN 978-5-7410-2160-6.

6 Щеглов, Н.В. Современные виды изоляции : учебное пособие / Н.В. Щеглов. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2011. – Ч. 3. Вакуумная изоляция. – 94 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=228922> (дата обращения: 11.12.2019). – ISBN 978-5-7782-1549-8. – Текст : электронный.

7 .Перенапряжения и молниезащита: водный транспорт : учебное пособие / Н.Н. Лизалек, О.А. Князева, К.С. Мочалин и др. ; под ред. С.В. Горелова, В.П. Горелова. – Изд. 5-е. – Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2015. – 360 с. : ил., схем., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=364598> (дата обращения: 11.12.2019). – Библиогр.: с. 290-291. – ISBN 978-5-4475-5858-1. – DOI 10.23681/364598. – Текст : электронный.

8 Котова, Е.Н. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах : учебно-методическое пособие / Е.Н. Котова, Т.Ю. Паниковская ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2014. – 217 с. : ил., табл., схем. – Режим доступа: по подписке. –

URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=275810> (дата обращения: 11.12.2019). – ISBN 978-5-7996-1254-2. – Текст : электронный.

9 Пудовкин, А.П. Электромагнитная совместимость и помехозащищённость РЭС : учебное пособие / А.П. Пудовкин, Ю.Н. Панасюк, Т.И. Чернышова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет». – Тамбов : Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – 92 с. : ил., табл., схем. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=277937> (дата обращения: 11.12.2019). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-8265-1194-7. – Текст : электронный.

10 Единое окно доступа к образовательным ресурсам.ресурсам / Энергетика [Электронный ресурс] – курс лекций для бакалавров направления "Электроэнергетика" подготовлен на кафедре техники и электрофизики высоких напряжений электротехнического института Томского политехнического университета. Пособие включает два раздела: Разряды в газах и Высоковольтная изоляция. – [Режим доступа]: <http://window.edu.ru/resource/113/57113>.

11 Единое окно доступа к образовательным ресурсам / Энергетика [Электронный ресурс] – сайт для самостоятельного изучения специализированного материала – [Режим доступа]: http://window.edu.ru/catalog/resources?p_rubr=2.2.75.27.

12 Устройства СВЧ и антенны : учебник / под ред. А.А. Филонова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Сибирский федеральный университет. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2014. – 492 с. : табл., схем. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=364513> (дата обращения: 11.12.2019). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-7638-3107-8. – Текст : электронный.