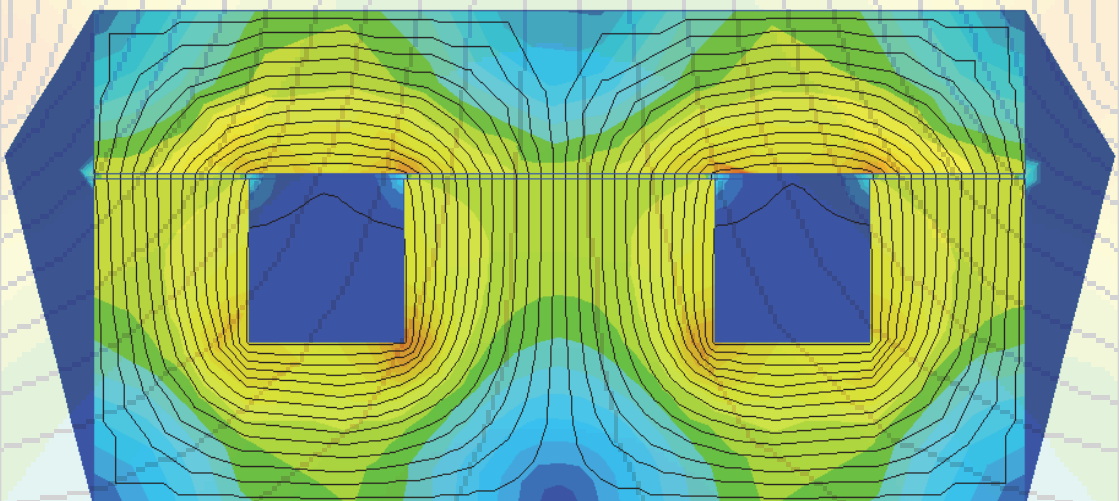
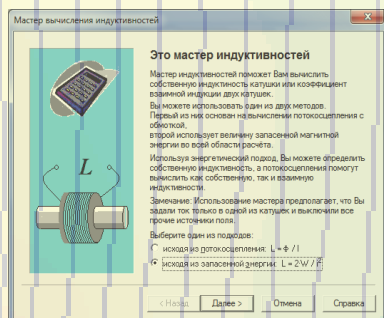




А.В. Прядилов, Р.И. Назаров

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ РАСЧЕТЫ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Практикум
по дисциплине «Магнитные элементы
электронной техники»



УДК 621.318.34
ББК 31

Рецензенты:

ведущий инженер-конструктор Службы вице-президента
по техническому развитию ОАО «АВТОВАЗ»,
д-р техн. наук *П.А. Николаев*;
канд. техн. наук, доцент Тольяттинского государственного
университета *Е.С. Глибин*.

Прядилов, А.В. Автоматизированные расчеты магнитных полей : практикум по дисциплине «Магнитные элементы электронной техники» / А.В. Прядилов, Р.И. Назаров. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015. – 1 опт. диск.

Практикум содержит описание использования программного пакета Elcut для расчета магнитных полей и задание на контрольную работу по курсу «Магнитные элементы электронной техники».

Предназначен для студентов направления подготовки бакалавров 210100.62 (11.03.04) «Электроника и микроэлектроника» всех форм обучения.

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер; Windows XP/Vista/7/8; ПIII 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; Adobe Reader.

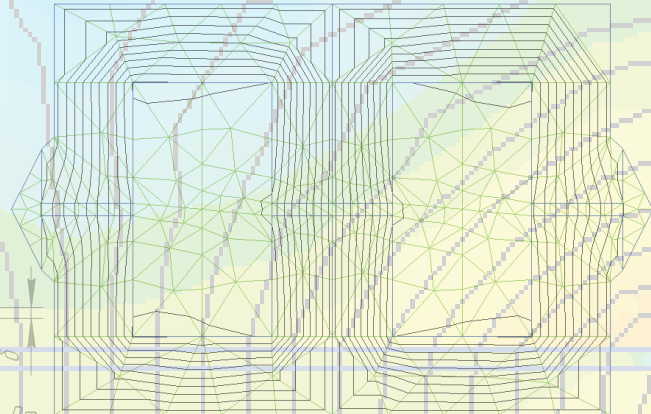
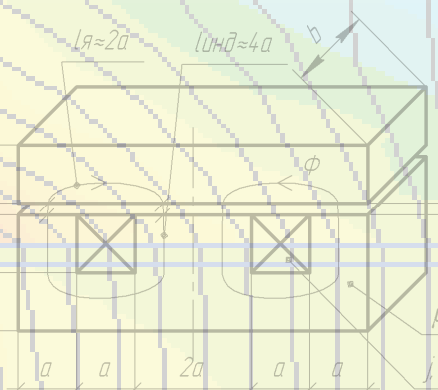


Рис. 38. Система с вертикальной и горизонтальной осями симметрии

Рис. 41. Геометрические размеры электромагнита

Это значит, что есть возможность считать только половину (на правую) конструкции (рис. 39). Для этого необходимо нарисовать только

Редактор *Г.В. Данилова*

Технический редактор *З.М. Малявина*

Компьютерная верстка: *И.И. Шишкина*

Художественное оформление,

компьютерное проектирование: *И.И. Шишкина*

Дата подписания к использованию 28.04.2015.

Объем издания 1,6 Мб

Комплектация издания: компакт-диск, первичная упаковка.

Заказ № 1-37-14.

Издательство Тольяттинского государственного университета
 445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14
 тел. 8(8482) 53-91-47, www.tltsu.ru

Содержание

Введение	5
1. Создание задачи	7
2. Создание модели	10
3. Присвоение меток	14
4. Решение задачи и визуальное представление результатов	21
5. Анализ результатов	25
6. Расчет симметричных систем	36
7. Вопросы для самоконтроля	40
8. Задание на контрольную работу	42
Приложение	49

Введение

Данный практикум посвящен расчетам магнитных полей в программном пакете Elcut. Пакет Elcut является отечественной разработкой. Он более прост в освоении и использовании, чем аналоги (например, пакет Ansys), но позволяет решать только плоские и осесимметричные задачи. С помощью ELCUT возможно оперативно:

- описать задачу – геометрию, свойства сред, источники поля, граничные условия;
- решить задачу с высокой точностью;
- проанализировать решение с помощью средств цветной графики;
- сохранить результаты в форме, пригодной для подготовки отчетов или для дальнейшего анализа.

Для освоения пакета Elcut рекомендуется выполнить все шаги и примеры, описанные в пунктах 1–6 практикума, ответить на вопросы для самоконтроля.

Цель практикума – обучить студентов способам автоматизированного расчета магнитных полей и анализа полученных результатов.

Задача практикума – обучить студентов расчету магнитных полей с помощью пакета Elcut и приближенному расчету с помощью упрощенных формул, а также критическому анализу полученных результатов.

В результате освоения практикума **студент должен:**

– **знать** основные понятия и законы теории электромагнетизма;

– **уметь:** осуществлять расчет магнитных полей в программном пакете Elcut (создавать задачу и ее геометрическую модель; задавать свойства областей и ребер; производить анализ полученных результатов и делать выводы об их адекватности), а также с помощью упрощенных соотношений теории электромагнетизма;

– *владеть навыками*: формульного расчета и математического моделирования электромагнитных систем; критического анализа полученных результатов.

Практикум способствует формированию следующих компетенций:

1) готовность учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности (ПК-3);

2) способность владеть методами решения задач анализа и расчета характеристик электрических цепей (ПК-4);

3) способность осуществлять сбор и анализ исходных данных для расчета и проектирования электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения (ПК-9);

4) готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения в соответствии с техническим заданием с использованием средств автоматизации проектирования (ПК-10);

5) способность разрабатывать проектную и техническую документацию, оформлять законченные проектно-конструкторские работы (ПК-11);

6) способность владеть современными методами расчета и проектирования электронных приборов и устройств, способность к восприятию, разработке и критической оценке новых способов их проектирования (ПК-33);

7) способность разрабатывать модели исследуемых процессов, материалов, элементов, приборов и устройств электронной техники (ПК-36).

1. СОЗДАНИЕ ЗАДАЧИ

Чтобы создать новое пустое описание задачи, выберите позицию **Создать** из меню **Файл** и затем укажите **Задача ELCUT** (рис. 1) в списке предлагаемых типов документов. Затем введите имя задачи и укажите путь к папке, в которой будут храниться файлы задачи (рис. 2). В состав задачи будут входить несколько файлов, поэтому рекомендуется создать для нее отдельную папку. Затем выберите параметры новой задачи (рис. 3): тип анализа, класс симметрии, точность решения, единицы измерения длины и др.

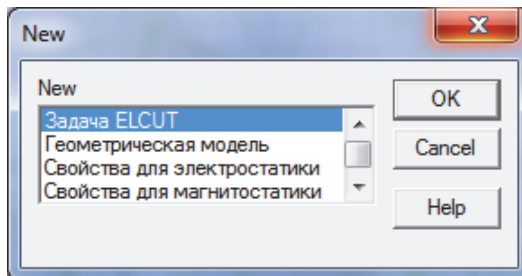


Рис. 1. Окно создания задач

Можно также создать новую задачу как копию одной из задач, открытых в данную минуту в ELCUT. В этом случае вновь создаваемая задача унаследует все свойства задачи-образца, а файлы модели и свойств будут скопированы, если это окажется необходимым.

Чтобы открыть существующий документ, выберите пункт **Открыть** из меню **Файл** или перетащите файл в окно ELCUT из Проводника Windows. Файл задачи имеет расширение *.pbm.

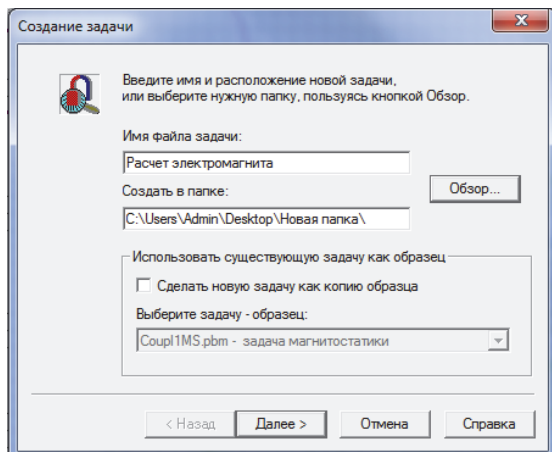


Рис. 2. Меню «Создание задачи»

В открывшемся окне выбираем тип задачи: Магнитостатика, Класс модели: Плоская, Расчет: Обычный. При выборе класса модели «Плоская» будет рассчитываться плоская конструкция, уходящая «вглубь экрана» на глубину 1 м. В версиях Elcut позднее 5.1 появилась возможность задания произвольной глубины конструкции.

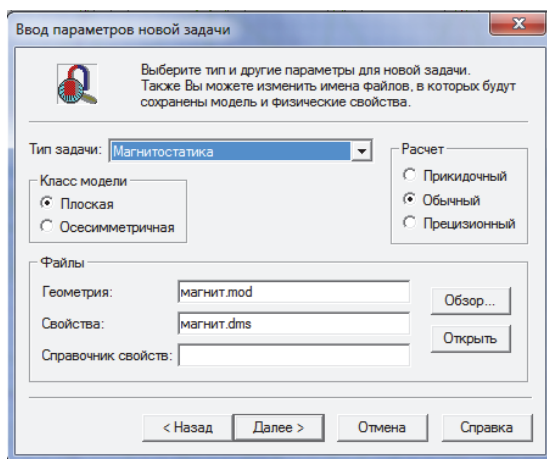


Рис. 3. Меню параметров задачи

В следующем окне выберите удобные для вас единицы длины (например, миллиметры). Система координат – декартова (рис. 4).

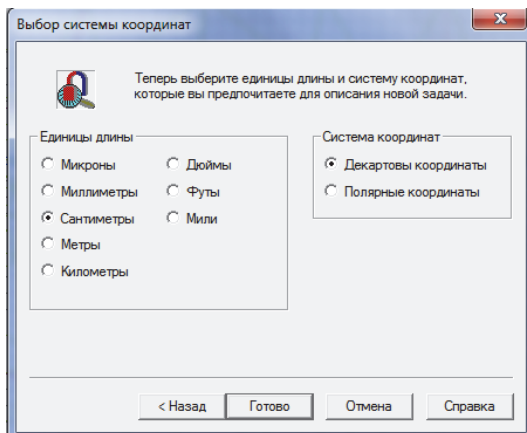


Рис. 4. Меню создания задачи.
Выбор системы координат

2. СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ

Приступим к заданию геометрии модели. В окне на левой части программы найдите поле **Геометрия**: [имя задачи], в нашем случае «Геометрия: Расчет электромагнита.mod», щелкните по нему правой кнопкой мыши и в открывшемся меню выберите **Открыть** (рис. 5).

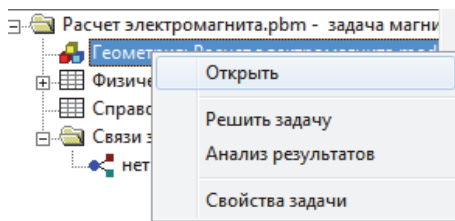


Рис. 5. Поле «Геометрия»

В открывшемся окне нажмите *OK* (рис. 6).

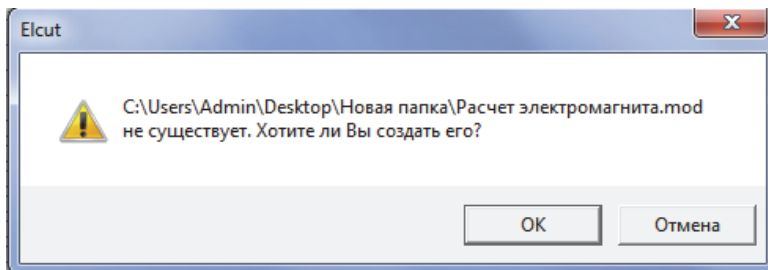


Рис. 6. Окно диалога

Далее приступим непосредственно к рисованию модели. Для упрощения этой задачи изменим параметры сетки привязки. Для этого щелкните правой кнопкой мыши по рабочему полю и в открывшемся меню выберите **Сетка привязки** (рис. 7).

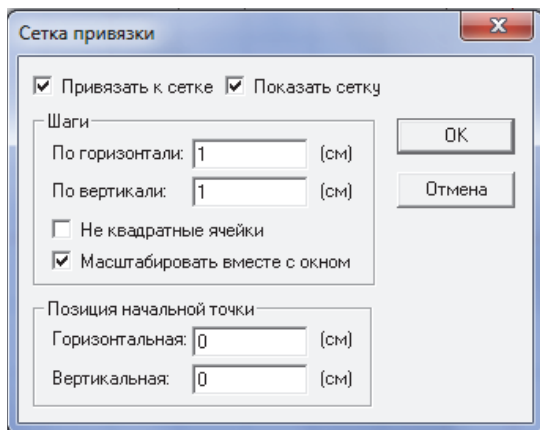



Рис. 7. Меню «Сетка привязки»

Установим удобный для нас шаг. Если мы хотим сохранять постоянным размер ячейки при изменении масштаба – нужно убрать галочку «Масштабировать вместе с окном».

Для примера создадим модель согласно параметрам 22-го варианта (табл. 1): $a = 28$, $b = 150$, $\delta = 1$.

С помощью инструмента  построим модель, выданную по заданию. Для этого необходимо нажать левой кнопкой мыши в рабочей области и, удерживая ее нажатой, вести на необходимое расстояние в необходимую сторону.

Для упрощения задачи можно воспользоваться функцией построения вершин (рис. 8). Добавим на рабочем поле вершины.

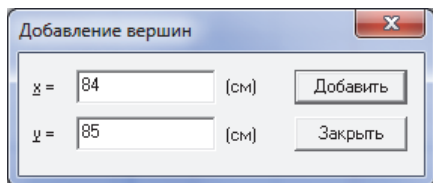


Рис. 8. Окно «Добавление вершин»

Правка – Добавить вершины. Для верхней части электромагнита согласно нашему варианту добавляем следующие точки: -84; 85, -84; 57, 84; 57, 84; 85. Полученные точки отмечены красным (рис. 9).

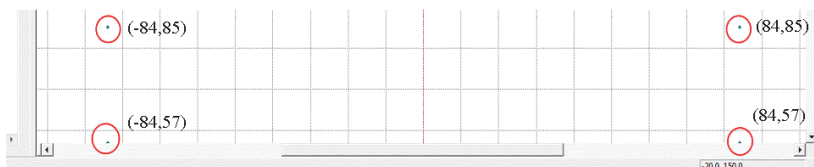



Рис. 9. Добавленные вершины на рабочей области

Соединим их с помощью инструмента , получив прямоугольник. Аналогичным образом достроим модель до представленной на рис. 10.

Крайние левая и правая линии не являются частью конструкции, а служат для ограничения области (воздуха), в которой будет производиться расчет магнитных полей. Ограниченную область не следует выбирать слишком большой (так как это приведет к бесполезному расчету магнитных полей в области, где их практически нет), но и не слишком маленькой (для корректного расчета полей, проходящих по воздуху). В случае отсутствия практического опыта расчета магнитных полей выбор размера воздушных областей рекомендуется производить по следующему итерационному алгоритму.

1. Конструкция рисуется с областью небольшой ширины.
2. Магнитное поле рассчитывается (см. последующие пункты).
3. Численно оценивается некая величина, характеризующая поле в рассматриваемых боковых областях (например, магнитный поток в них).
4. Размер областей увеличивается (например, в два раза), магнитное поле рассчитывается и вновь определяется значение магнитного потока в боковых областях.

5. Если полученное вновь значение магнитного потока не-
намного (менее чем на 10 %) больше полученного в предыду-
щий раз, то размер области можно считать достаточным. Если
вновь полученное значение значительно больше предыдуще-
го, то следует перейти к п. 4.

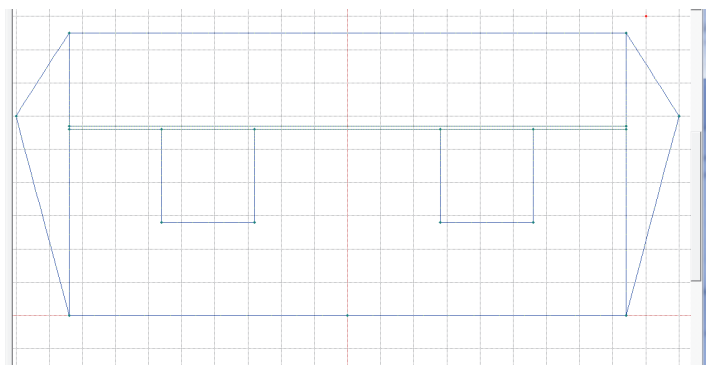


Рис. 10. Внешний вид готовой модели

Построение геометрической модели на этом завершено,
сохраните ее: **Файл-Сохранить**. ELCUT сохранит геометриче-
скую модель с расширением *.mod.

3. ПРИСВОЕНИЕ МЕТОК

Назначим свойства материалов, граничные условия, источники, используя метки.

Чтобы присвоить метку, щелкните по объекту правой кнопкой мыши и выберите в открывшемся меню – **Свойства** (рис. 11).

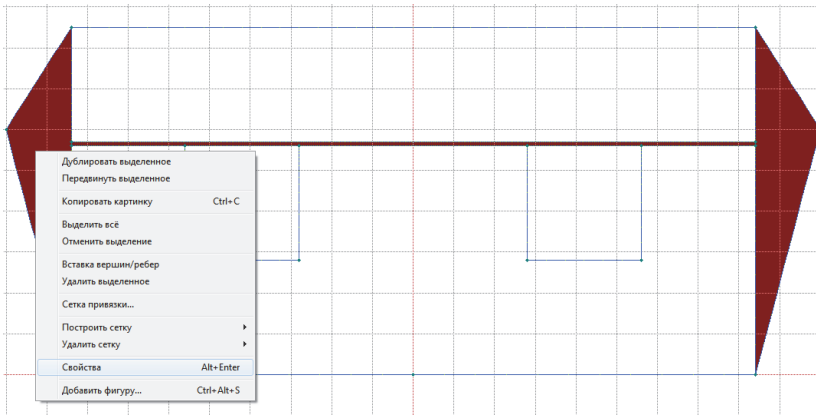


Рис. 11. Присвоение метки области

Присвойте метки всем объектам. Например, воздух, обмотка, индуктор, якорь. Необходимо также присвоить метки ребрам для задания граничных условий на внешних и внутренних границах области. Выделите граничные ребра, образующие внешний контур задачи, кликните по ребру правой кнопкой мыши и выберите в открывшемся меню пункт **Свойства** (рис. 12). Для внешнего контура необходимо задать в свойствах нулевое значение магнитного потенциала ($A = 0$). Тогда программа будет рассчитывать систему, отталкиваясь от этого контура и считая, что вне его поле отсутствует.

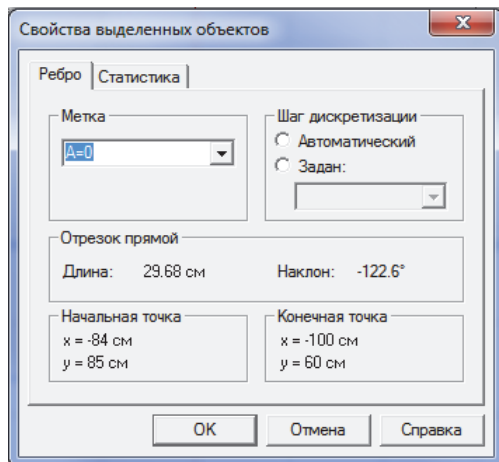


Рис. 12. Присвоение метки ребрам

Все метки перечислены в поле **Физические свойства** и разделены на три группы: Блоки, Ребра и Вершины (рис. 13). Все созданные метки добавляются в соответствующее дерево задач. Желтый значок с вопросительным знаком означает, что описание данной метки не завершено либо не производилось.

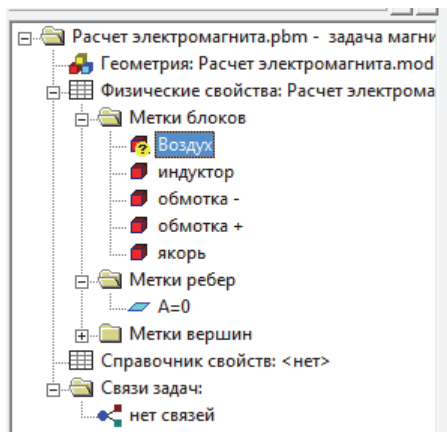


Рис. 13. Присвоение меток

Для редактирования свойств метки щелкните дважды по ней либо кликните правой кнопкой мыши и выберите **Свойства** в открывшемся меню (рис. 14).

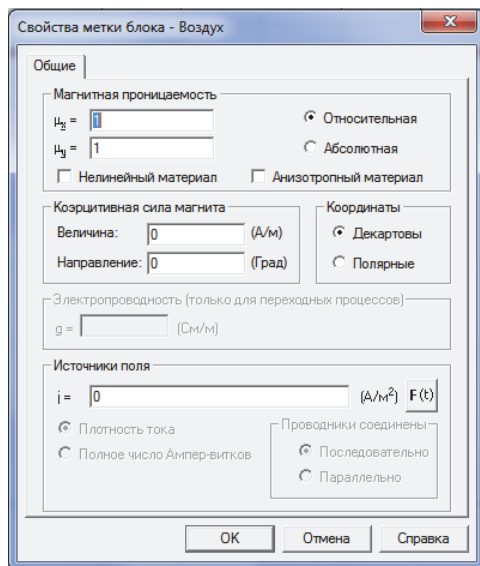


Рис. 14. Меню «Свойства метки»

Задание свойств меток блоков

Для блока «Воздух» необходимо установить значение магнитной проницаемости $\mu = 1$ и нажать **OK**.

Для **магнитопроводов** с линейными магнитными свойствами задаем значение магнитной проницаемости μ . Для нелинейных магнитопроводов поставить галочку «нелинейный материал» и ввести заданную кривую намагничивания.

Для **обмоток** установить значение магнитной проницаемости $\mu = 1$, а в графу «Источники поля» ввести значение известной плотности тока ($J \times Kz$) либо полного числа ампер-витков (намагничивающей силы F). По одной из обмоток ток течет

на нас, по другой – от нас. Поэтому для одной из них (например, правой) необходимо установить положительное значение тока, для другой (левой) – такое же по модулю, но отрицательное.

Задание свойств меток ребер

В свойствах ребра с нулевым магнитным потенциалом ($A = 0$) необходимо поставить галочку «Нулевой магнитный потенциал $A = 0$ ».

Задание свойств меток вершин

Данная возможность программы не используется при выполнении контрольной работы.

Построение сетки конечных элементов

Завершив описание меток, приступим к созданию сетки. Линии, соединяющие узлы, делят всю область задачи на отдельные участки (треугольники), поле в которых программа будет считать по одинаковым формулам. Для каждой ячейки программа определяет параметры поля. Чем на большее число ячеек разбита расчетная область – тем точнее будет решение. Наиболее мелкие ячейки стоит использовать в местах сильного градиента (изменения) поля (например, на полюсах). В студенческой версии ELCUT количество узлов сетки ограничено для вас числом 255. При превышении лимита узлов сетки необходимо воспользоваться изменением шага дискретизации, что позволит рассчитать модель.

Для задания шага дискретизации выделите ребра или узлы (например, верхнее и нижнее ребро), кликните правой кнопкой мыши и в выпавшем меню выберите пункт **Свойства** (рис. 15). В открывшемся окне выберите в разделе **Шаг дискретизации** пункт **Задан** и установите его равным, например, 15 (рис. 16).

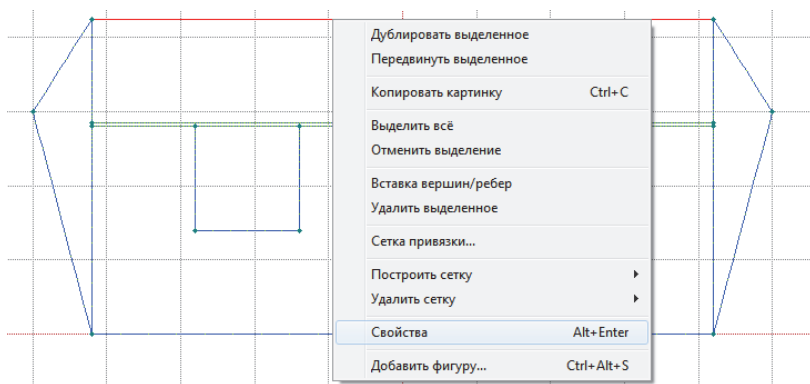


Рис. 15. Выбор свойств ребра

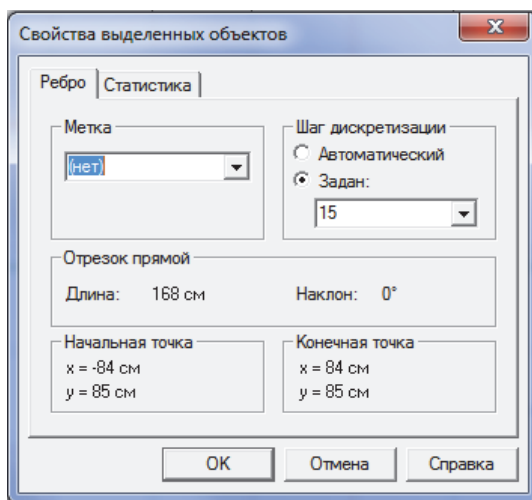


Рис. 16. Меню свойств ребра

В области воздушного зазора сделаем шаг дискретизации поменьше для более точного расчета, например 4. Результат представлен на рис. 17.

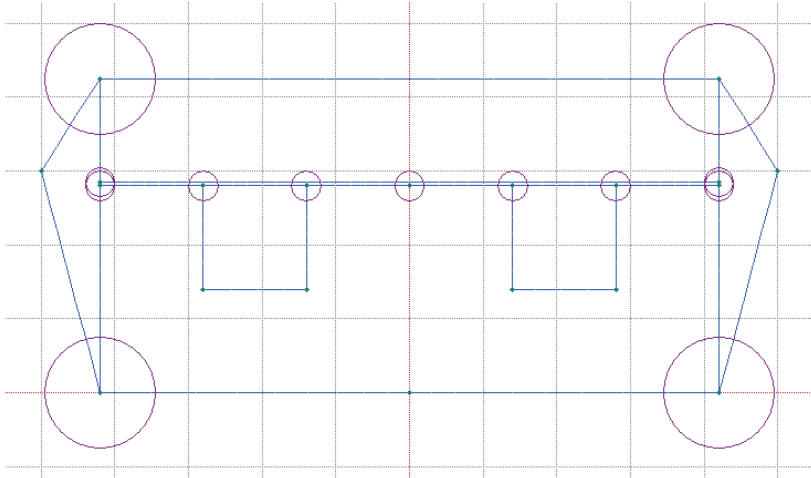



Рис. 17. Вид модели после применения шага дискретизации

Радиус окружности показывает размер ячейки области дискретизации рядом с выбранным узлом. Чтобы более точно посчитать поле вблизи полюсов, аналогично зададим меньшие значения шагов дискретизации для ребер, ограничивающих немагнитный (воздушный) зазор (см. меньшие окружности в зазоре δ на рис. 17).

Окружности, появившиеся в вершинах, имеют радиус, равный шагу дискретизации. Теперь построим сетку с помощью инструмента  (рис. 18).

Если произошло превышение допустимого количества узлов (255), необходимо увеличить шаги дискретизации. Когда сетка построена, можно посмотреть получившееся количество узлов, кликнув на модели правой кнопкой мышки и выбрав «свойства». Если число узлов меньше 200, следует уменьшить шаги дискретизации для получения более точного решения.

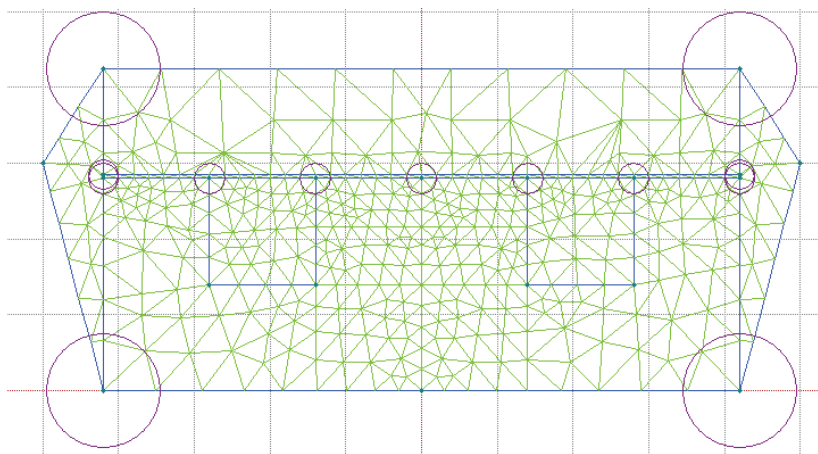



Рис. 18. Создание сетки

4. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ И ВИЗУАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Перейдем к заключительному этапу – решению задачи. Для этого используем инструмент , расположенный на панели инструментов. После нажатия на него появится сообщение «Сохранить изменения в [имя файла].mod?», рис. 19.

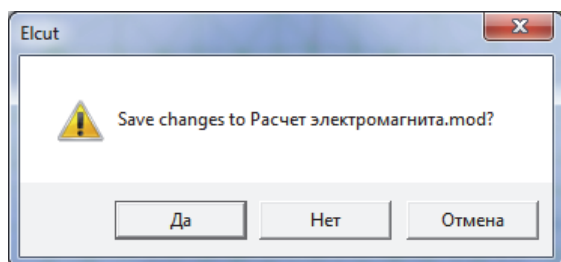


Рис. 19. Окно диалога

Нажмите «Да». Далее появится сообщение (рис. 20), нажмите «Да».

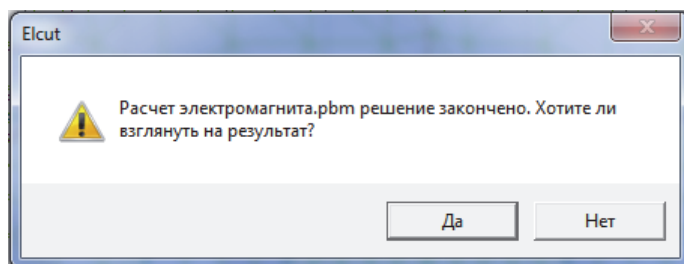
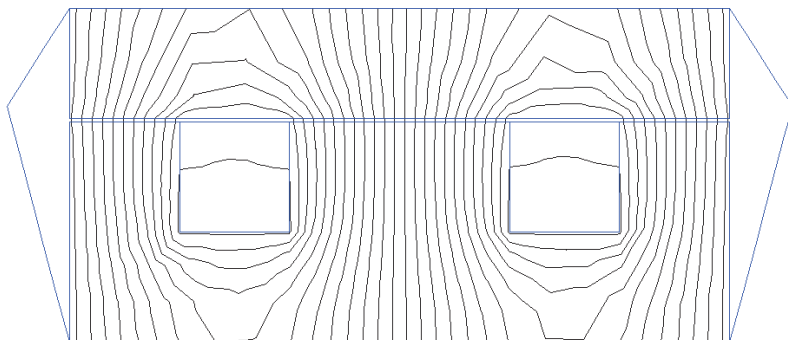


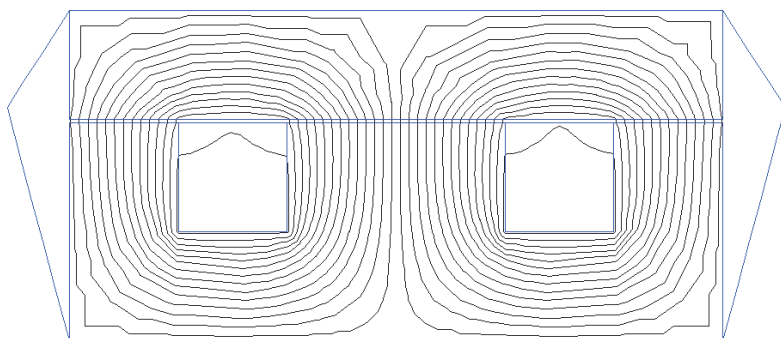
Рис. 20. Окно диалога

После этого вам будет представлен результат измерений (рис. 21).

Если вы пользуетесь студенческой версией программы и вручную изменяли шаг дискретизации, то стоит попытаться улучшить качество расчетов. В местах, где поле равномерно, можно увеличить шаг дискретизации. Это даст возможность уменьшить шаг в областях концентрации полей или где поле получилось «ломаным».




a – картина поля НЕВЕРНАЯ
(У кого получилось так – тот забыл задать границу $A = 0$)



b – картина поля верная

Рис. 21. Решение задачи в виде эквипотенциальных линий

При необходимости решение задачи можно отразить в ином представлении, например с указанием векторов магнитной индукции. Воспользуемся пунктом **Вид – Картина поля** (или правый клик на рабочем листе – картина поля) (рис. 22). Стоящая по умолчанию галочка **Силовые линии** включает отображение силовых линий магнитного поля. Значение **Масштаб 0,00005 Вб** в приведенном примере означает, что между любыми двумя силовыми линиями протекает магнитный поток 50 мкВб. Полезным может оказаться посмотреть на картину с цветовым представлением индукции поля **В** (поставить галочку «цветовая карта» и выбрать пункт «индукция В» (рис. 23). Рекомендуется открыть цветовую шкалу индукции (с помощью кнопки  в панели инструментов правый клик на рабочем листе – цветовая шкала), чтобы визуально оценить величины индукции в различных точках (рис. 24).

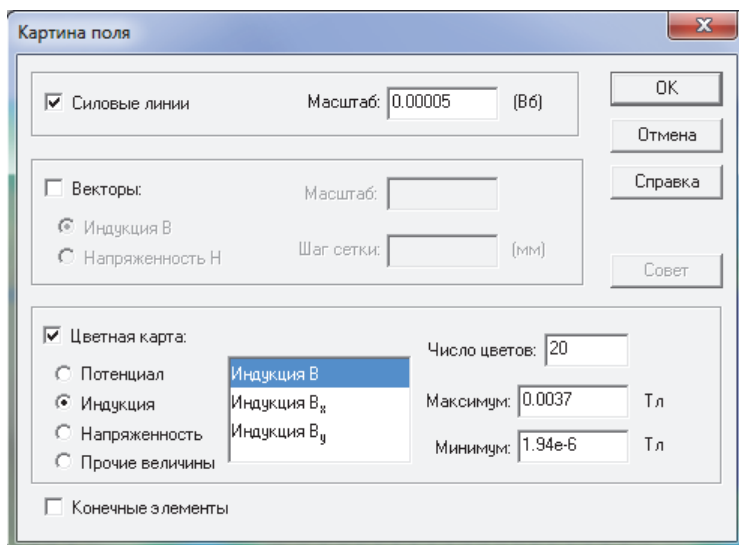


Рис. 22. Меню «Картина поля»

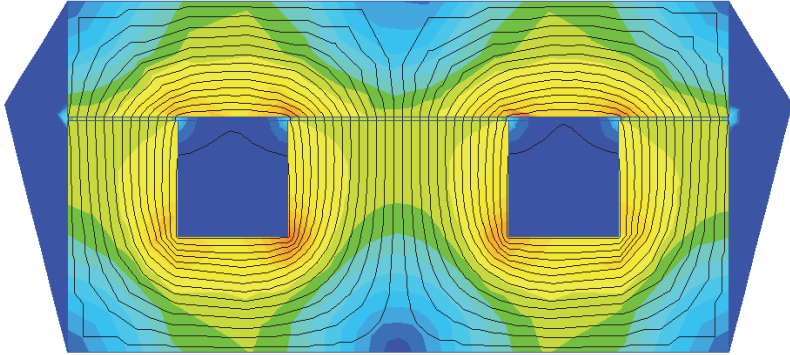


Рис. 23. Картина поля

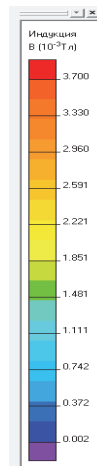


Рис. 24. Цветовая шкала

Для экспорта изображений конструкции или поля в графический формат воспользуйтесь пунктом файл – экспорт картинки. В версии Elcut 5.1 доступен экспорт только в *.emf. В последующих версиях рекомендуется экспортировать в формат *.png.


5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим возможности численного анализа полученной картины поля. Нажатием на кнопки в панели **калькулятор**, **локальные значения** или **интегральный калькулятор** открывается одна и та же панель, дающая доступ к численным характеристикам поля.

В случае расчета плоской модели интегральные значения отображаются для конструкции, имеющей глубину, заданную в свойствах модели. В версии Elcut 5.1 глубина модели была жестко задана в 1 м и возможности задания произвольной глубины не было. Поэтому необходимо было *домножить на реальную глубину конструкции* (в метрах) следующие значения, полученные для однометровой конструкции:

- *магнитного потока и потокосцепления;*
- *пондеромоторной силы и вращающего момента;*
- *энергий магнитного поля.*

5.1. Измерение локальных значений

Выберите инструмент **Локальные значения**  и кликните в точку модели, например в области сердечника (рис. 25). Откроется панель с локальными значениями, в которой будут отображены значения индукции B , намагничивающей силы H , магнитной проницаемости μ и других показателей для выбранной точки. Для векторных величин будут отображены их модули и проекции на координатные оси.

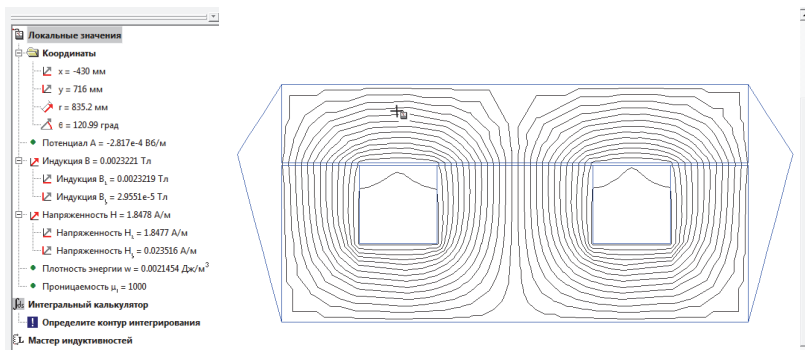



Рис. 25. Измерение магнитной индукции

5.2. Измерение интегральных значений по контуру

Рассмотрим эту возможность на примере **измерения магнитного потока**.

Для измерения магнитного потока необходимо задать линию-контур, которую он пересекает. Выберите на панели кнопку «добавить к контуру» . Далее либо задайте произвольную линию (проведите линию-контур поперек полюса так, чтобы она пересекала линии магнитного поля (рис. 26), либо постройте контур по существующим ребрам модели (кликавая на них).

Откройте панель **Интегральный калькулятор**, кликнув на одноименную кнопку. В поле интегральный калькулятор выберите пункт **Физические величины** → **Магнитный поток**, здесь будет указана рассчитанная величина магнитного потока, пересекающего заданный контур.

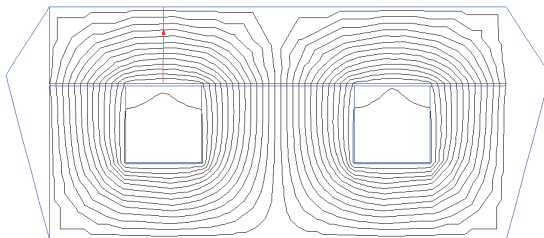
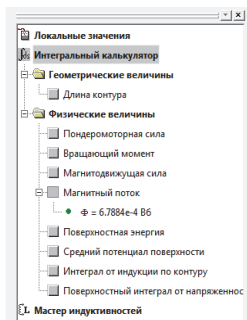


Рис. 26. Измерение магнитного потока

Для удаления контура кликните правой кнопкой мыши на рабочем поле и выберите «удалить контур».

Также можно посмотреть график распределения индукции вдоль заданного контура. Например, проведем линию поперек линий магнитного поля в зазоре (рис. 27). Выбрав график



на панели инструментов, увидим график индукции вдоль контура (рис. 28).

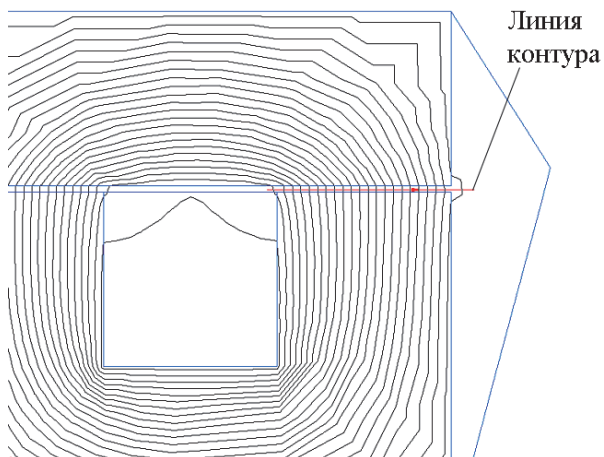


Рис. 27. Измерение индукции с помощью графика

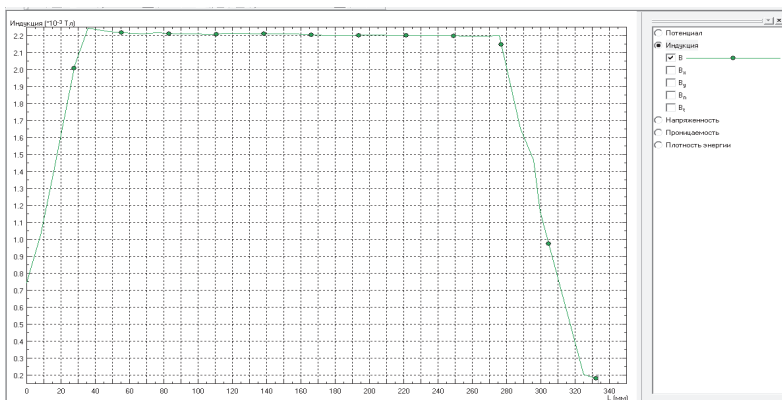



Рис. 28. График изменения индукции вдоль проведенного контура

Проведя контур (контур может состоять из нескольких отрезков) вдоль силовых линий поля в пункте **интегральный калькулятор**, можно посмотреть магнитодвижущую силу, падающую на длине контура.

Например, вычислим магнитодвижущую силу, падающую на контуре вокруг обмотки. Инструментом **добавить к контуру**  проведите контур вокруг одной из обмоток, стараясь вести линии вдоль линий поля посередине магнитопровода (это увеличит точность результата) (рис. 29). Чтобы построить замкнутый контур, его последнюю линию удобно провести командой **правый клик – замкнуть контур**. Если выделять контур по часовой стрелке, то он отображается незакрашенным, а если против – закрасненным. Это повлияет только на знак намагничивающей силы. Выберите в панели **интегральный калькулятор** в пункте **Физические величины** подпункт **Магнитодвижущая сила**. Согласно закону полного тока она должна оказаться равной сумме токов, охваченных контуром (т. е. магнитодвижущей силе $F = Iw$ обмотки). Сравнив полученное значение с ожидаемым, можно сделать косвенный вывод о точности полученных результатов.

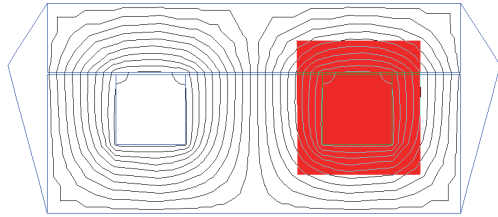
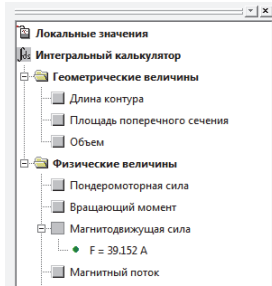




Рис. 29. Вычисление магнитодвижущей силы

5.3. Измерение интегральных значений по объему

Для измерения интегральных значений по объему необходимо выделить этот объем. Выберите инструмент **добавить к контуру** . Далее либо постройте замкнутый контур, ограничивающий объем, либо выберите готовые геометрические блоки конструкции, кликая на них.

Для примера произведем замер **электромагнитной силы**, притягивающей якорь к индуктору. В пакете Elcut электромагнитная сила имеет название *пондеромоторной* силы. Выберите инструмент  и выделите с его помощью якорь, кликнув по нему (рис. 30).

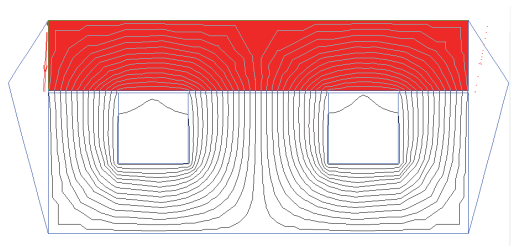
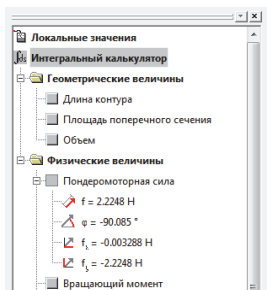


Рис. 30. Измерение электромагнитной силы

В пункте «Физические величины» в подпункте «Пондеромоторная сила» вы увидите результат вычислений (модуль вектора силы, ее направление и проекции на оси). Повторите то же, выделив индуктор + обмотки (через обмотки с током проходит небольшой поток рассеяния, а значит, и на них тоже действует сила). Используйте среднее значение между полученными значениями. Аналогичный результат можно получить выделением замкнутого контура, проходящего по воздуху и охватывающего якорь (рис. 31).

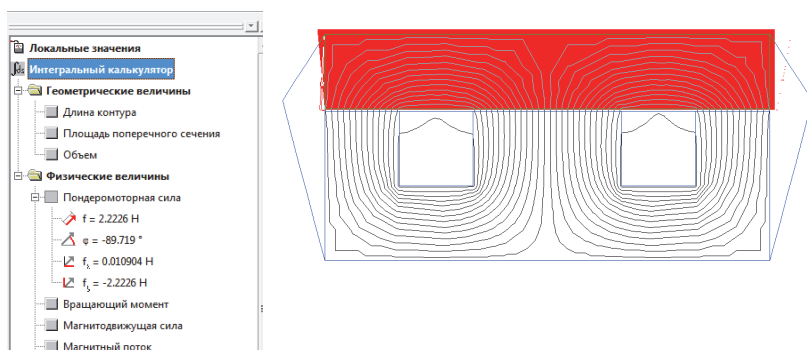


Рис. 31. Выделение контура «по воздуху»

Необходимо соблюдать осторожность при образовании контура и не задевать линией электромагнита во избежание некорректных результатов. Как видно, результаты получаются практически одинаковыми.

Помимо пондеромоторной (электромагнитной) силы для выделенной области (объема) можно посмотреть значения средней индукции по объему, среднему квадрату индукции, энергии магнитного поля и т. д.

В качестве первого примера найдем значение индукции в якоре. Построим замкнутый контур внутри магнитопровода (рис. 32). В пункте **Физические величины** посмотрим результат

расчета **средней индукции по объему**. Следует обратить внимание, что индукция – это векторная величина. Если бы мы (на рис. 32) выделили весь якорь (поле в котором в разных точках направлено в разные стороны), то ввиду симметричности картины мы бы получили нулевое значение средней индукции.

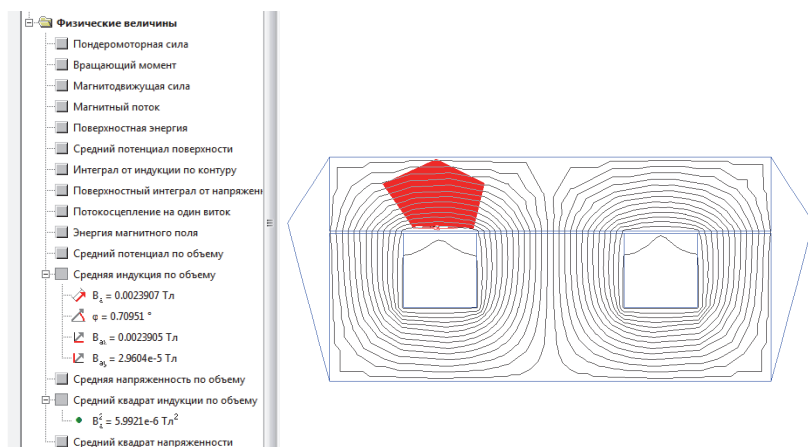



Рис. 32. Измерение средних значений индукции в объеме

В качестве второго примера найдем энергию магнитного поля, запасенную в воздушном зазоре. Выделите воздушную область в системе, кликнув на ней инструментом **добавить к контуру**  (рис. 33). Результат увидим в пункте «Энергия магнитного поля» подпункта «Физические величины».

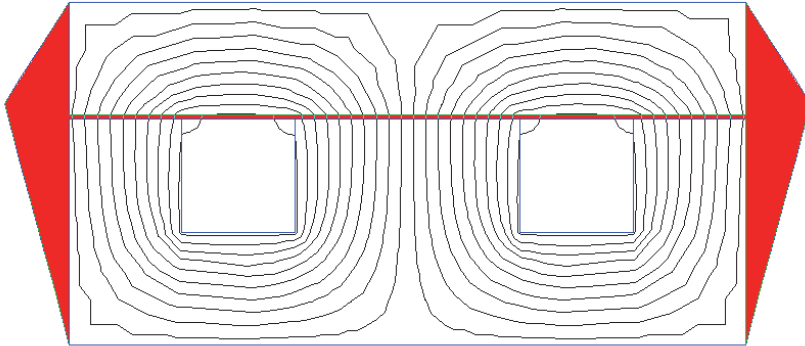


Рис. 33. Измерение энергии в зазоре

5.4. Вычисление индуктивности

Для вычисления индуктивности служит инструмент **Мастер индуктивностей**, расположенный ниже списка интегрального калькулятора.

Выберите **Вид->Мастер индуктивностей** (рис. 34). В открывшемся окне необходимо выбрать один из двух подходов к определению индуктивности. С одной стороны, понятие индуктивности L можно трактовать как коэффициент пропорциональности между потоком Φ и током I ($L = \Phi/I$), с другой – индуктивность характеризует энергию W , запасенную в системе ($L = 2W/I^2$). Для идеального случая (сосредоточенной обмотки и линейной системы) результаты расчетов по этим двум способам совпадают. Однако в реальных системах необходимо выбирать один из способов. Использование потоков позволяет определять взаимоиנדуктивности (в системах с несколькими обмотками). Для остальных случаев лучше использовать энергетический подход, позволяющий рассчитывать энергию в системе.

Выберите подход **Исходя из запасенной энергии** (рис. 35) и нажмите **Далее**. В следующем диалоге нажмите кнопку **Вычислить** – будет посчитана энергия всей системы. Далее выберите любую обмотку и установите число витков обмотки (например, согласно вашему варианту) (рис. 36).

Результат будет показан в следующем диалоге Мастера индуктивностей (рис. 37). После завершения вычислений в поле калькулятора появится пункт **Исходя из энергии**, результат вычислений будет записан в подпункте Индуктивность.

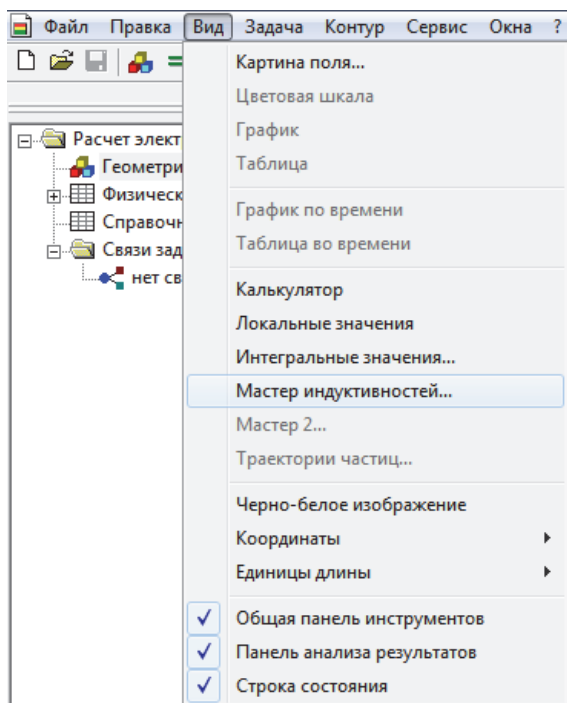


Рис. 34. Запуск Мастера индуктивностей

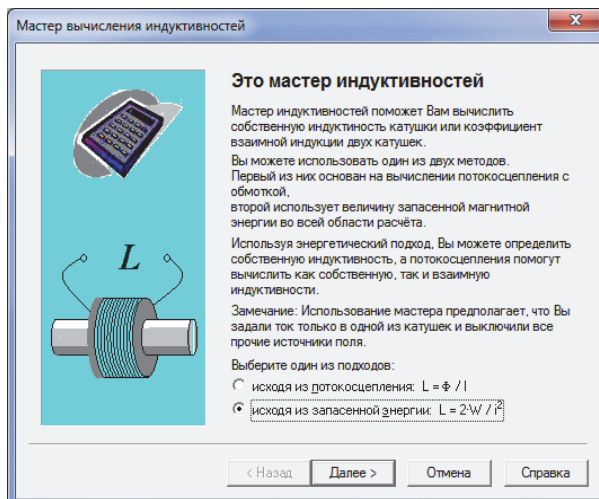


Рис. 35. Выбор подхода к вычислению

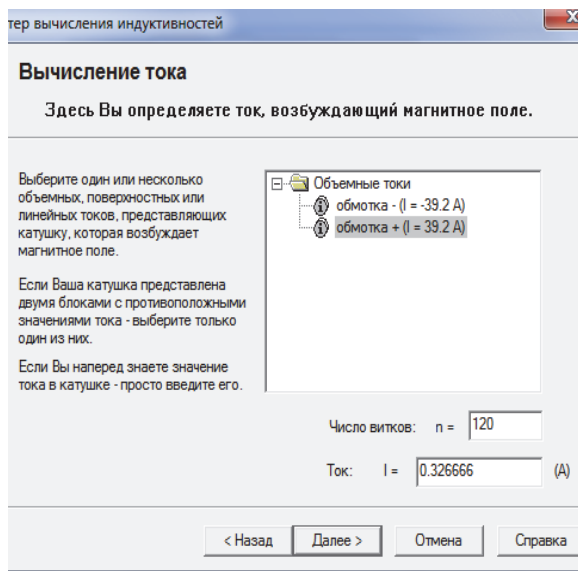


Рис. 36. Задание тока

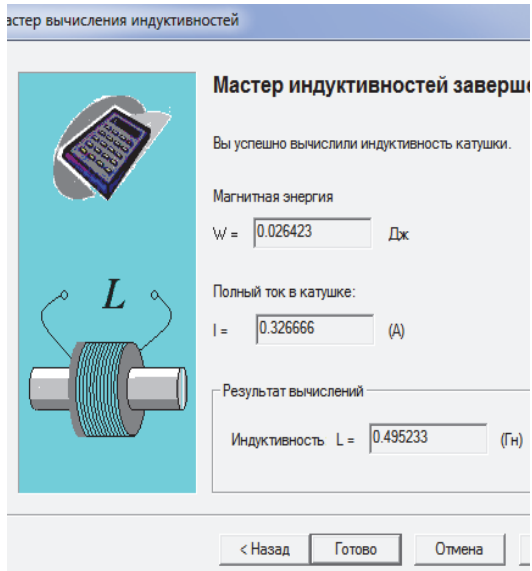


Рис. 37. Результаты расчета

6. РАСЧЕТ СИММЕТРИЧНЫХ СИСТЕМ

Студенческая версия программы имеет ограничение в 255 узлов сетки. Как показали эксперименты, если поле плоского электромагнита (т. е. с равномерными полями) посчитать с большим числом узлов, то расчетные значения сил увеличатся на 10 % и более. А в конструкциях, где основная сила создается на неравномерных полях, силы, полученные с малым числом узлов, могут отличаться от реальных в 5 раз!

Для дополнительного увеличения точности расчетов можно воспользоваться особенностями решаемой задачи. Например, для систем, имеющих ось симметрии, можно осуществлять расчет только одной их половины. Это даст возможность быстрее задать модель, отобразить ее в укрупненном масштабе, а также повысить плотность сетки (что увеличит точность расчетов).

Конструкция (рис. 38) имеет вертикальную ось симметрии, которую не пересекают линии магнитного поля.

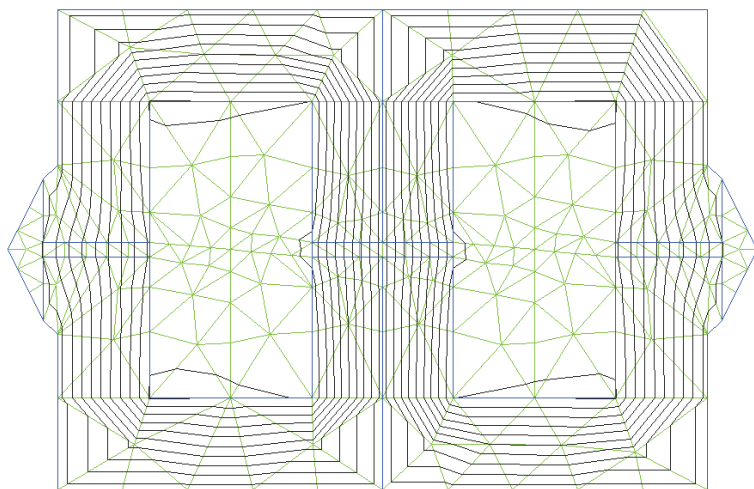


Рис. 38. Система с вертикальной и горизонтальной осями симметрии

Это значит, что есть возможность считать только половину (например, правую) конструкции (рис. 39). Для этого необходимо нарисовать только правую половину конструкции, задав ее левой границе (оси симметрии) свойства $A = 0$ (нулевого магнитного потенциала).

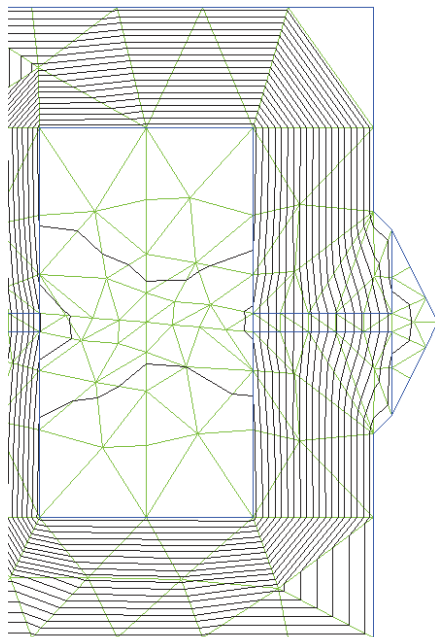
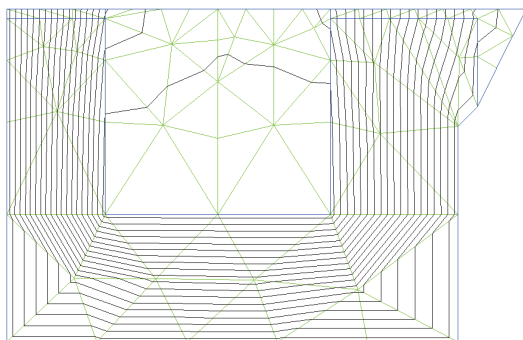


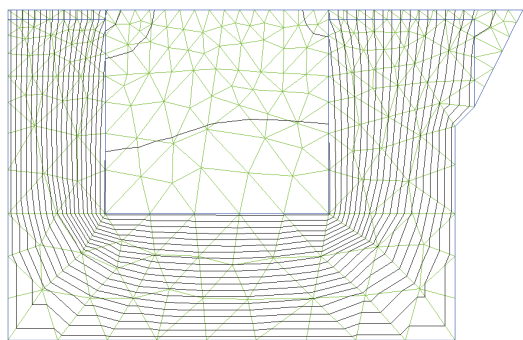
Рис. 39. Правая половина рассчитываемой конструкции

Если конструкция содержит горизонтальную ось симметрии, пересекаемую магнитным полем в перпендикулярном направлении (рис. 38), то это также дает возможность в 2 раза уменьшить расчетную область, задав этой оси симметрии свойство нулевой тангенциальной составляющей напряженности $H_t = 0$ (рис. 40, *a*). Для этого создадим метку ребер с именем « $H_t = 0$ » и присвоим ее линиям оси.

В свойстве метки « $Ht = 0$ » поставим галочку в поле тангенциальной составляющей напряженности $H\tau$ и впишем нулевое численное значение. Магнитодвижущую силу обмотки необходимо уменьшить в 2 раза (так как моделируется только половина обмотки).



a – с малым числом узлов сетки



b – с увеличенным числом узлов сетки

Рис. 40. Правая нижняя четвертинка конструкции

В случае малого опыта расчета магнитных систем рекомендуется сначала просчитать конструкцию целиком (рис. 38), затем ее части (рис. 39, 40) и далее сравнить результаты

расчетов (значения электромагнитных сил, потоков, индукций и энергий). Разумеется, если мы считаем часть конструкции, то и результаты мы получим для этой части. Например, для конструкции по рис. 40, *a*: индукции оставляем без изменений; электромагнитную силу умножаем на 2; энергию магнитного поля умножаем на 4. После подтверждения правильности расчетов рекомендуется уменьшить сетку (увеличить число узлов) для получения более точных результатов и плавных полей (рис. 40, *a*, *б*).

7. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Как создать задачу для расчета магнитных полей? В чем разница между осесимметричной и плоской конструкциями? Какие файлы создаются в папке с проектом и каково их назначение?
2. Как нарисовать геометрию модели? Как ограничить расчетную область?
3. Как задать свойства всем областям модели? Как задать нелинейность (учесть насыщение) магнитного материала?
4. Как задать граничные условия для расчета?
5. Как построить сетку конечных элементов? Для чего она вообще нужна? Как следует строить сетку для повышения точности расчетов при использовании студенческой версии программы?
6. Как визуально оценить правильность решения задачи?
7. Как включить и настроить отображение картины поля? Что означают силовые линии поля, присутствующие на этой картине?
8. Какие значения можно получить для отдельной точки (инструментом локальные значения)?
9. Как определить величину магнитного потока, протекающего через интересующее нас сечение?
10. Как найти величину магнитодвижущей силы, падающей на отдельном участке? На замкнутом контуре во круг обмотки? Как определить, сколько магнитодвижущей силы падает на магнитопроводе и сколько на немагнитном зазоре?
11. Как определить величину механической силы, развиваемой электромагнитом? Куда она приложена и в каком направлении действует?
12. Как определить величину индукции в отдельной точке или в области? Как построить график изменения индукции вдоль контура?

13. Как определить величину энергии, запасаемой во всей магнитной системе и ее отдельных областях (магнитопроводах, воздушном немагнитном зазоре)?
14. Как рассчитать величину индуктивности системы? Какими способами это можно делать и в чем разница между ними?
15. Как можно увеличить точность расчетов или уменьшить расчетную область при расчете симметричных систем (имеющих одну или несколько плоскостей симметрии)? Как осуществлять пересчет измеряемых величин с сокращенной на полную конструкцию? Как в этом случае нужно задавать граничные условия? Как убедиться в правомерности таких расчетов?

8. ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ

Контрольная работа по магнитным элементам электронной техники «РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПОСТОЯННОГО ТОКА»

8.1. Исходные данные

В соответствии с бланком задания (прил.) каждому студенту индивидуально (в соответствии с его вариантом по табл. 1) даются величины, характеризующие плоский электромагнит (рис. 41).

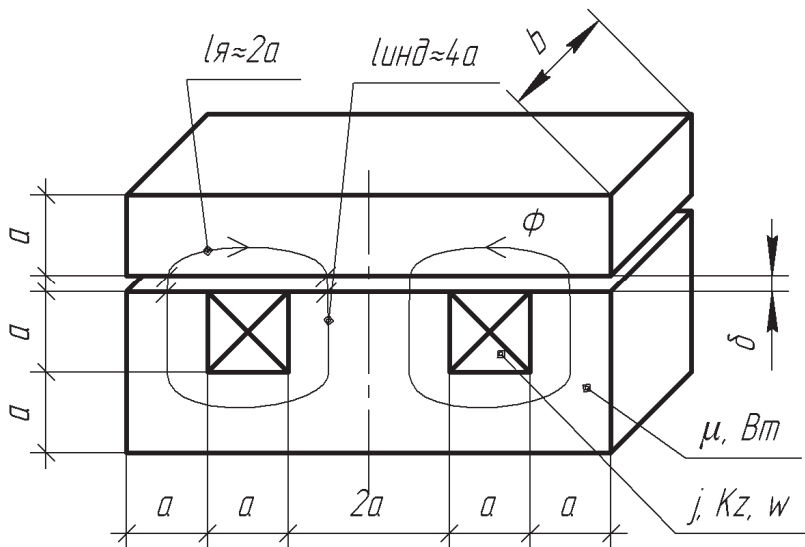


Рис. 41. Геометрические размеры электромагнита

Геометрические размеры: a (мм), b (мм), δ (мм).

Параметры обмотки: плотность тока J (А/мм²), коэффициент заполнения окна K_z , число витков w .

Параметры магнитопровода: магнитная проницаемость μ , индукция насыщения $B_{нас}$ (Тл), кривая намагничивания $B(H)$ (табл. 2).

Примечание. Выдаваемые в задании величины имеют размерности, указанные в скобках. Однако расчеты по формулам, приводимым на консультации, рекомендуется производить в системе СИ.

8.2. Задание

8.2.1. Пользуясь упрощенными формулами, рассчитать величины:

- 1) магнитную проводимость G
- 2) диаметр провода обмотки d
- 3) силу тока I
- 4) намагничивающую силу F
- 5) магнитный поток Φ
- 6) индукцию B
- 7) электромагнитную силу P
- 8) индуктивность L
- 9) энергии, запасаемые в системе A и в воздушном зазоре A' .

Выполнить проверку по закону полного тока.

Построить семейство графиков зависимости силы от плотности тока при различных значениях зазора. $P(J)$ при $J = 0 \dots J_{заданное}$; $\delta = 0,5\delta_{зад}$, $\delta = \delta_{зад}$, $\delta = 2\delta_{зад}$.

8.2.2*. Осуществив математическое моделирование электромагнита (например, с использованием программного пакета Elcut), рассчитать величины. При выполнении пункта 2 величина μ (заданная в задании) нигде не учитывается (вместо нее используется кривая намагничивания $B(H)$).

1. Магнитный поток Φ
 2. Индукции в немагнитном зазоре $B\delta$, якове $Bя$ и спинке индуктора $Bи$
 3. Электромагнитная сила P
 4. Индуктивность L
 5. Энергии, запасаемые в системе A и в воздушном зазоре A'
- Построить семейство графиков зависимости силы P и индукции в зазоре B от тока I — $P(I)$ и $B(I)$. Ток I должен меняться в пределах от нуля до значения, обеспечивающего насыщение магнитопровода.

8.2.3*. Сравнить результаты, полученные в п. 8.2.2, с результатами п. 8.2.1.

Выполнить сравнение результатов, полученных при расчетах по упрощенным формулам и в результате математического моделирования (сравнить амплитудные значения рассчитанных величин; графики зависимостей $P(I)$). Сделать выводы о достоверности полученных данных. Результаты сравнения оформить в виде выводов.

**Примечание.* Для студентов заочной формы обучения выполнение п. 8.2.2 и 8.2.3 не обязательно.

8.3. Таблицы индивидуальных вариантов

Таблица 1

Исходные данные к контрольной работе

№ варианта	a , мм	b , мм	δ , мм	J , А/мм ²	Kz	w	μ	$V_{нас}$, Тл	Магнитный материал	Проверка I , А	Проверка P , кН
1	20	50	0,5	5	0,4	10	1000	2	2212	80	1,28
2	15	100	0,3	5	0,4	15	1000	2	2212×0,95	30	1,6
3	25	100	0,7	4	0,4	20	2000	2	2212×0,7	50	2,89
4	25	150	1	5	0,5	30	2000	2	2211×0,95	52,1	5,35
5	15	50	0,5	6	0,4	10	150	1,5	КММ	54	0,24
6	10	100	0,5	7	0,4	20	1500	2	2212	16	0,18
7	12	200	0,5	6	0,3	25	1500	2	2212×0,95	13,8	0,37
8	20	200	0,5	6	0,3	30	1500	2	2212×0,7	24	4,47
9	25	200	0,8	5	0,4	50	1000	2	2211×0,95	25	6,4
10	25	100	1	5	0,4	60	100	1,5	КММ	20,8	0,81
11	30	300	1	4	0,4	50	1000	2	2212	28,8	9,87
12	25	300	0,5	4	0,4	90	1000	2	2212×0,95	11,1	14,2
13	25	200	0,6	4	0,4	70	1000	2	2212×0,7	14,3	6,89
14	25	200	1	4	0,4	100	1000	2	2211×0,95	10	2,71
15	20	150	1	6	0,3	150	150	1,5	КММ	4,8	0,50
16	10	100	0,4	6	0,4	20	1000	2	2212	12	0,19
17	17	100	0,4	6	0,4	40	1000	2	2212×0,95	17,3	2,52
18	18	100	0,4	4	0,4	30	1000	2	2212×0,7	17,3	1,47
19	22	150	0,4	5	0,3	20	1000	2	2211×0,95	36,3	5,0
20	22	150	0,7	5	0,3	70	100	1,5	КММ	10,4	0,59
21	22	150	1	5	0,3	40	1000	2	2212	18,1	0,96
22	28	150	1	5	0,3	120	1000	2	2212×0,95	9,8	3,1
23	28	200	1,2	5	0,3	50	1000	2	2212×0,7	23,5	2,9

Таблица 2

Кривые намагничивания магнитных материалов

Сталь 2212		Сталь 2212×0,95		Сталь 2212×0,7		Сталь 2211×0,95		КММ	
<i>B</i> , Тл	<i>H</i> , А/м	<i>B</i> , Тл	<i>H</i> , А/м	<i>B</i> , Тл	<i>H</i> , А/м	<i>B</i> , Тл	<i>H</i> , А/м	<i>B</i> , Тл	<i>H</i> , А/м
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,35	50	0,332	50	0,245	50	0,38	55	0,4	2500
1	400	0,95	400	0,49	100	0,57	86	0,58	5000
1,43	1000	1,358	1000	0,95	700	0,76	140	0,8	8700
1,6	2500	1,52	2500	1,176	5000	0,95	240	0,95	14000
1,68	5000	1,596	5000	1,24	10000	1,14	450	1,05	20000
1,77	10000	1,681	10000	1,33	30000	1,33	900	1,13	25000
1,9	30000	1,805	30000	1,54	90000	1,52	3400	1,2	30000
2,2	90000	2,09	90000	1,82	220000	1,71	12000	1,3	40000
2,6	220000	2,47	220000	2,1	430000	1,805	19400	1,4	60000
3	500000	2,85	500000			1,9	38800	1,5	100000
						1,995	65500	1,6	170000
						2,09	120000		
						2,185	180000		
						2,28	250000		
						2,365	315000		

8.4. Рекомендации по выполнению работы

При выполнении п. 8.2.1 для построения графиков зависимостей $P(J)$ рекомендуется заполнить табл. 3.

Таблица 3

*Электромагнитные силы P ,
рассчитанные по упрощенным формулам, Н*

Плотность тока J , А/мм ²	Ток I , А	Величина немагнитного зазора δ , мм		
		$\delta = 0,5\delta_{\text{зад}} =$	$\delta = \delta_{\text{зад}} =$	$\delta = 2\delta_{\text{зад}} =$
$J' = 0$				
$J' = 0,2J =$				
$J' = 0,4J =$				
$J' = 0,6J =$				
$J' = 0,8J =$				
$J' = J =$				

При выполнении п. 8.2.2 для построения графиков зависимостей $P(J)$ рекомендуется заполнить табл. 4.

Таблица 4

Результаты математического моделирования

Ток I , А	Плотность тока J , А/мм ²	Индукция в зазоре B , Тл	Электромагнитная сила P , Н

При выполнении п. 8.2.3 для сравнения результатов расчетов заполнить табл. 5.

Таблица 5

Сравнение результатов расчетов по упрощенным формулам (MathCad) с результатами математического моделирования (Elcut) для исходного режима

Сравниваемая величина	MathCad	Elcut	Elcut/MathCad	Отклонение, %
<i>Взаз, Гл</i>				
<i>P, кН</i>				
<i>Ф, мВб</i>				
<i>L, мГн</i>				
<i>Аполн, Дж</i>				
<i>Аазора, Дж</i>				
Среднее значение отклонения				

Приложение

Тольяттинский государственный университет Институт энергетики и электротехники

Кафедра: «Промышленная электроника» (ПЭ)

Дисциплина: «Магнитные элементы электронной техники» (МЭЭТ)

Задание на контрольную работу

Студент: _____ Группа: _____

Тема работы «Расчет и моделирование плоского электромагнита постоянного тока».

Задание. Рассчитать по упрощенным формулам и промоделировать в специализированном программном пакете плоский электромагнит постоянного тока в соответствии с исходными данными.

№ варианта	a , мм	b , мм	δ , мм	J , А/мм ²	Kz	w	μ	$V_{нас}$, Тл	Магнитный материал	Проверка I , А	Проверка P , кВт

Содержание расчетно-пояснительной записки

Титульный лист

Задание на контрольную работу

Аннотация

Содержание

Введение

1. Расчет по упрощенным формулам

2*. Математическое моделирование в специализированном программном пакете

3*. Сравнение полученных результатов

Заключение

Литература

* *Примечание.* Для студентов заочной формы обучения выполнение п. 2 и 3 не обязательно.

Календарный план выполнения курсовой работы

№ этапа работы	Содержание этапов работы	Планный срок выполнения этапа	Планируемый объем выполнения курсовой, %	Фактический объем выполнения курсовой, %	Отметка о выполнении
1	Расчет заданного варианта по упрощенным формулам		15		
2	Построение семейства графиков зависимости силы от плотности тока при различных значениях зазора		30		
3	Математическое моделирование в специализированном программном пакете		60		
4	Построение семейства графиков зависимости силы и индукции в зазоре от тока		70		
5	Сравнение полученных результатов		80		
6	Разработка остальных разделов. Оформление ПЗ. Сдача курсовой на проверку		100		
7	Исправление замечаний. Защита курсовой работы				

Примечания

1. Защита работы обычно включает проверку пояснительной записки и расчетов; пояснение их содержания, пояснение используемых приемов расчетов и моделирования.

2. Студент, защитивший работу позже срока защиты законченного проекта, получает оценку на 1 балл ниже. Студент, пойманный на сдаче работы, совпадающей со сданными ранее, получает оценку на 1 балл ниже.

Дата выдачи задания _____ Срок защиты работы _____

Руководитель _____ *А.В. Прядилов.*

Студент _____
(подпись) (И.О. Фамилия)