



Московский авиационный институт  
(государственный технический университет)  
МАИ

---

Кафедра «Электроракетные двигатели, энергофизические и  
энергетические установки»  
(Кафедра 208)

**Методические указания**  
**к курсовому проектированию**  
**по дисциплине**  
**«Плазменные ускорители»**

Утверждены на заседании кафедры  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 200 г.  
Протокол № \_\_\_\_\_

Москва, 2008

## **Цель и задачи проектирования**

Курсовой проект выполняется в 7 семестре при изучении дисциплины «Плазменные ускорители». Его выполнение способствует закреплению студентом знаний, полученных в ходе лекционных, практических и лабораторных занятий. Задачей проекта является выбор схемы ускорителя для осуществления поставленной задачи, расчет основных характеристик и примерных геометрических размеров устройства, уточненный расчет магнитной системы ускорителя для определения точных геометрических размеров и параметров магнитной системы, выбор материалов для последующего конструирования. Полученные в ходе выполнения проекта данные, можно использовать для выполнения проекта по конструкции ускорителей в последующих семестрах.

## **Порядок работы над курсовым проектом**

### **Задание на курсовой проект**

В качестве задания студент получает описание задачи и некоторых исходных данных для проведения предварительной экспертизы и выбора типа ускорителя, наиболее полно удовлетворяющего поставленной задаче. Задание на курсовой проект выдается в начале семестра после прослушивания вводных лекций. Таким образом, посещая последующие занятия, студент может проводить выбор типа ускорителя, знакомясь с поступающей к нему информацией в ходе прослушивания курса.

### **Выбор типа ускорителя**

Данный этап работ подразумевает проведения сравнительного анализа исходных данных и материалов лекционного курса, а также анализ предложенной литературы, с целью грамотного выбора типа ускорителя наиболее полно обеспечивающего выполнение поставленной задачи. При этом необходимо полностью использовать всю информацию, указанную в задании. После завершения анализа студент обосновывает свой выбор при консультации с преподавателем и получает разрешение на выполнения второй части работы – расчет основных параметров и примерных геометрических размеров ускорителя.

### **Расчет основных параметров ускорителя**

На данном этапе производятся основные расчеты с использованием методических указаний и примеров, приведенных в пособиях [1-7]. В результате выполнения данного этапа студент выбирает основные геометрические размеры и получает данные об интегральных характеристиках ускорителя. Методикой расчетов является определение для выбранного характерного геометрического размера ускорителя следующих параметров: расхода рабочего тела, тока и напряжения разряда, ускоряющего и других потенциалов, средней энергии ионов, величины индукции магнитного поля. По результатам этих расчетов поводится проверочный расчет ресурса ускорителя и делается вывод об удовлетворении условиям поставленной в задании задачи. Результаты расчетов согласовываются с преподавателем в ходе консультаций. После утверждения результатов преподаватель назначает критерий оптимизации магнитной системы и студент может переходить к следующему этапу работы.

### **Уточненный расчет магнитной системы**

Уточненный расчет магнитной системы производится с использованием программного комплекса ELCUT©[8]. Программный комплекс ELCUT© позволяет решать двумерные краевые задачи математической физики, описываемые эллиптическими дифференциальными уравнениями в частных производных относительно скалярной или однокомпонентной векторной функции (потенциала), а также задачи расчета напряженно-деформированного состояния твердого тела (плоские напряжения, плоские деформации, осесимметричные нагрузки). К таким задачам и относится моделирование, магнитных, электростатических и тепловых полей, реализуемых в плазменных ускорителях. Данный

программный комплекс приспособлен для решения осесимметричных задач и имеет дружественный легко обучаемый интерфейс.

Целью расчета является окончательный выбор источника магнитодвижущей силы (марки постоянных магнитов, количество ампервитков электромагнита). Кроме этого выбираются геометрические размеры всех элементов магнитопровода и величина магнитных зазоров. Критерием выбора параметров расчета магнитной системы является обеспечение заданной величины индукции в районе анодов и градиента нарастания индукции магнитного поля (данные параметры для конкретного ускорителя согласуются с преподавателем на консультации).

При использовании программного комплекса ELCUT© студентом решается задача магнитостатики. Первым этапом работы с программой является построение упрощенной геометрической модели магнитной системы ускорителя по данным предыдущего этапа расчетов. После этого построенная модель магнитной системы разбивается на элементы и производится присвоение свойств ее отдельным фрагментам (магнитные свойства конструкционных материалов, ориентация и величина магнитодвижущей силы постоянных магнитов, характер намотки и число ампервитков катушек намагничивания). В качестве среды в магнитных зазорах используется воздух, поскольку его магнитные свойства близки свойствам вакуума. Задается граница проведения расчетов, на которой устанавливается значение магнитного потенциала равным нулю. Все эти операции производятся с использованием студенческой версии программного комплекса ELCUT©, свободно распространяющейся в Интернете (например, ее можно найти на сайте <http://www.elcut.ru>, или взять в дисплейном классе кафедры). Задание числа расчетных узлов, расчетной сетки и проведение расчетов осуществляется с использованием лицензионной профессиональной версии программного комплекса ELCUT©, локализованной в дисплейном классе кафедры. В ходе выполнения расчетов студент, изменяя геометрические размеры и параметры магнитной системы, добивается достижения предложенных преподавателем величин индукции в заданных точках расчетной области. В результате выполненных расчетов формируется комплекс из четырех файлов задачи (ELCUT Problem, ELCUT Model File, ELCUT Magnetostatics Data File, Файл "RES"), которые затем можно использовать в студенческой версии программного продукта для оформления графической части пояснительной записки (промежуточные результаты расчетов сохраняются в виде графических файлов).

В результате выполнения данного этапа работы формируется облик магнитной системы ускорителя с основными геометрическими размерами.

После завершения данной части студент может факультативно решить задачи электростатики и стационарного теплообмена для элементов конструкции и ускорителя в целом.

### **Пояснительная записка**

Пояснительная записка является основным отчетным документом по курсовому проекту. Она оформляется в соответствии с ГОСТ 7.32-2001 и должна содержать следующие разделы:

- 1. Титульный лист.**
- 2. Содержание.**
- 3. Исходные данные.**
- 4. Анализ поставленной задачи.** Данный раздел содержит описание поставленной задачи и обоснование выбора типа плазменного ускорителя для ее решения.
- 5. Краткое описание ускорителя.** Данный раздел содержит сведения о принципе действия, основных характеристиках и состоянии разработки выбранного типа ускорителя.
- 6. Расчет основных характеристик плазменного ускорителя.** В данном разделе приводятся: алгоритм и формулы для проведения расчетов (при описании

алгоритма должно приводиться обоснование выбора полуэмпирических коэффициентов расчетных соотношений), результаты расчета (обязательно представления всех расчетных формул с подстановкой используемых численных значений).

- 7. Результаты расчета магнитной системы ускорителя.** В данном разделе необходимо представить исходные данные для проведения расчетов и результаты расчетов в виде двухмерных цветных графиков и одномерных графиков вдоль выбранных направлений. Представленный материал должен продемонстрировать процесс подбора параметров магнитной системы и ее геометрических размеров.

#### **Список использованных источников информации.**

Графическая часть записки в виде рисунков, цветных графиков и схем располагается в тексте и поясняет излагаемый материал. Обязательным является представление итоговой конструктивной схемы ускорителя с указанием всех геометрических размеров основных элементов, ограничивающих рабочий объем, и элементов магнитной системы.

Пояснительная записка должна содержать не более 20-30 страниц машинописного текста (желательно оформление с использованием программных продуктов Microsoft Office©). Записка представляется в виде жесткой копии (допускается в черно-белом исполнении) и виде файла с расширением \*.doc. К файлу записки прилагаются файлы выполнения программы ELCUT (ELCUT Problem, ELCUT Model File, ELCUT Magnetostatics Data File, Файл "RES").

#### **Защита проекта**

К защите допускаются студенты, закончившие проект и получившие подпись консультанта на титульном листе.

Защита проекта происходит перед комиссией из двух преподавателей кафедры. Защита состоит из доклада студента о проделанной работе (3-5 мин.) и ответов на вопросы по проделанным расчетам и их результатам, а также по теории и основным характеристикам рассмотренного в проекте ускорителя. Оценка проекта складывается из трех частей: оценки выполненных расчетов и графического материала, качества доклада и правильности ответа на вопросы. При оценке проекта комиссия может учесть оценку консультанта проекта.

Отлично защищенные проекты представляются на конкурс лучших проектов.

#### **Список рекомендуемой литературы для выполнения проекта:**

1. Квасников Л.А., Латышев Л.А. и др. Теория и расчет энергосиловых установок космических летательных аппаратов. – М.: МАИ. – 2001.
2. Белан Н.В., Ким В.П., Оранский А.И., Тихонов В.Б. Стационарные плазменные двигатели. – Харьков: Харьк. авиац. институт, . – 1989.
3. Васильев В.К., Григорьян В.Г. Расчет основных параметров электроракетных двигателей/ Учебное пособие к курсовому и дипломному проектированию по курсу «Теория, расчет и проектирование двигательных установок» – М.: МАИ. –2005.
4. Григорьян В.Г. системы ускорения электростатических ДЛА. – М.:МАИ. – 1984.
5. Белан Н.В., Ким В.П., Севрук Д.Д. Методика инженерного расчета стационарных плазменных двигателей. – Харьков: Харьк. авиац. институт, . – 1980.
6. Хартов С.А. Расчет элементов двигательной установки со стационарным плазменным двигателем / Учебное пособие. – М.: МАИ, в печати.
7. Методические указания для практических занятий по курсу «Двигательные установки»/ под ред. Латышева Л.А. – М.: МАИ. – 1993.
8. ELCUT®. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. – Версия 5.4, руководство пользователя. – Санкт-Петербург: Производственный кооператив TOP, 2006. – 54

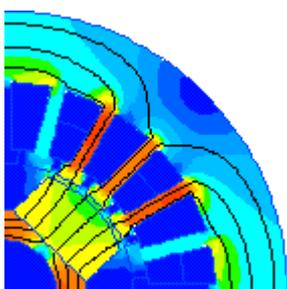
## **Пример выполнения части курсового проекта с использованием программы ELCUT**

### **Разработка магнитной системы стационарного плазменного двигателя с применением системы моделирования двумерных электромагнитных полей ELCUT**

#### **Задача разработки:**

Суть разработки состоит в том, чтобы рассчитать параметры магнитной системы (уточненное количество Ампер витков, размеры катушек, соединение катушек, геометрию магнитопровода, расположение магнитных полюсов), а также подбор оптимального соотношения Ампер-витков, расположения и режимов работы дополнительных катушек установленных за анодом, с помощью программы ELCUT.

#### **О программе ELCUT**



ELCUT™ это мощный современный комплекс программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов. Дружественный пользовательский интерфейс, простота описания даже самых сложных моделей, широкие аналитические возможности комплекса и высокая степень автоматизации всех операций позволяют разработчику полностью сосредоточиться на своей задаче.

С ELCUT можно начать работу практически сразу, не отвлекаясь на изучение математических основ вычислительных алгоритмов и особенностей их реализации. Редактор модели позволяет легко и быстро описать геометрию модели. Можно также импортировать фрагменты модели из AutoCAD или других систем проектирования. При построении сетки конечных элементов

можно использовать удобные средства управления ее густотой или полностью довериться автоматической системе.

Даже не надо выбирать размер ячеек сетки - специальная технология, включенная в редактор модели, позволяет автоматически создавать гладкую сетку. Источники и граничные условия полностью независимы от сетки, и могут быть изменены в любое время.

Интерактивный постпроцессор позволяет просмотреть результаты расчета в различных формах представления: линии поля, цветные карты, графики различных величин вдоль произвольных контуров и пр. Можно также вычислять различные интегральные величины на заданных линиях, поверхностях или объемах. Постпроцессор обеспечивает вывод таблиц и рисунков в файлы для дальнейшей обработки или качественной графической печати.

### **Последовательность выполнения при решении задачи**

Использование этой гибкой архитектуры позволит весьма быстро описать и решить задачу или серию задач. Типичная последовательность шагов при решении задачи представлена на блок-схеме:



## Создание новой, пустой задачи:

Начало работы с ELCUT происходит с выбора задачи. Начинать необходимо с «Задача ELCUT» рис. 1

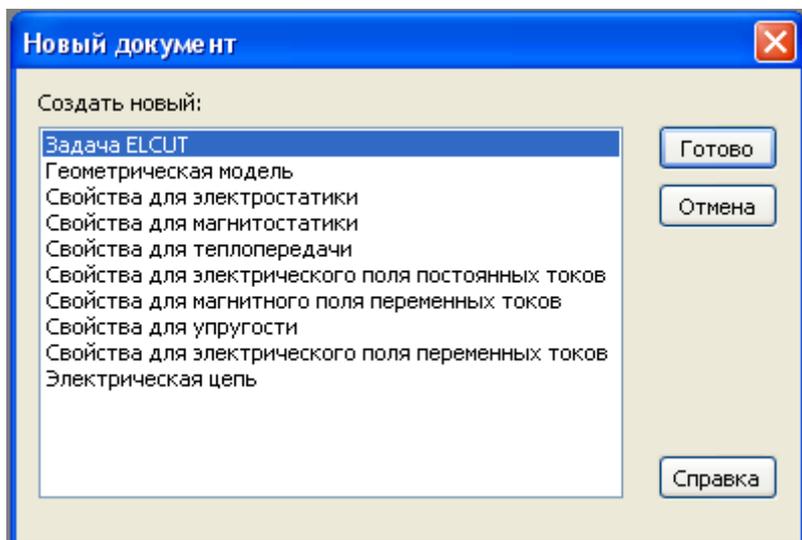


Рис.1

Дальше задается имя задачи и место в которой она будет сохранена рис.2

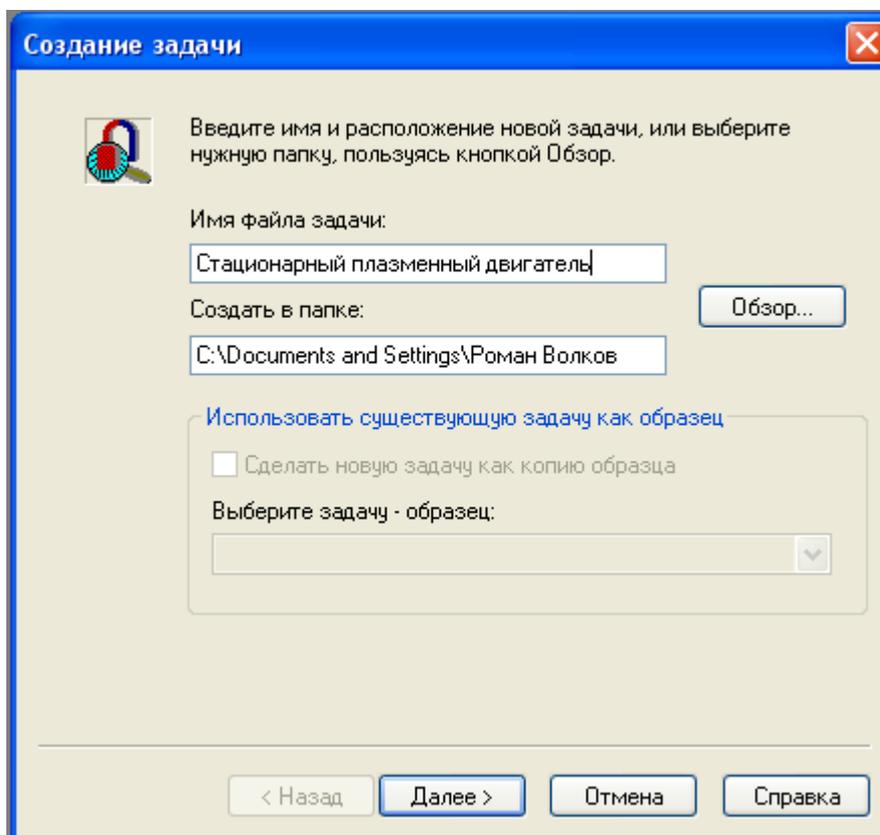


Рис.2

## **Ввод параметров задачи**

Следующий шаг это выбор параметров задачи. В поле «Тип задачи» выбирается «Магнитостатическое поле» рис.3.

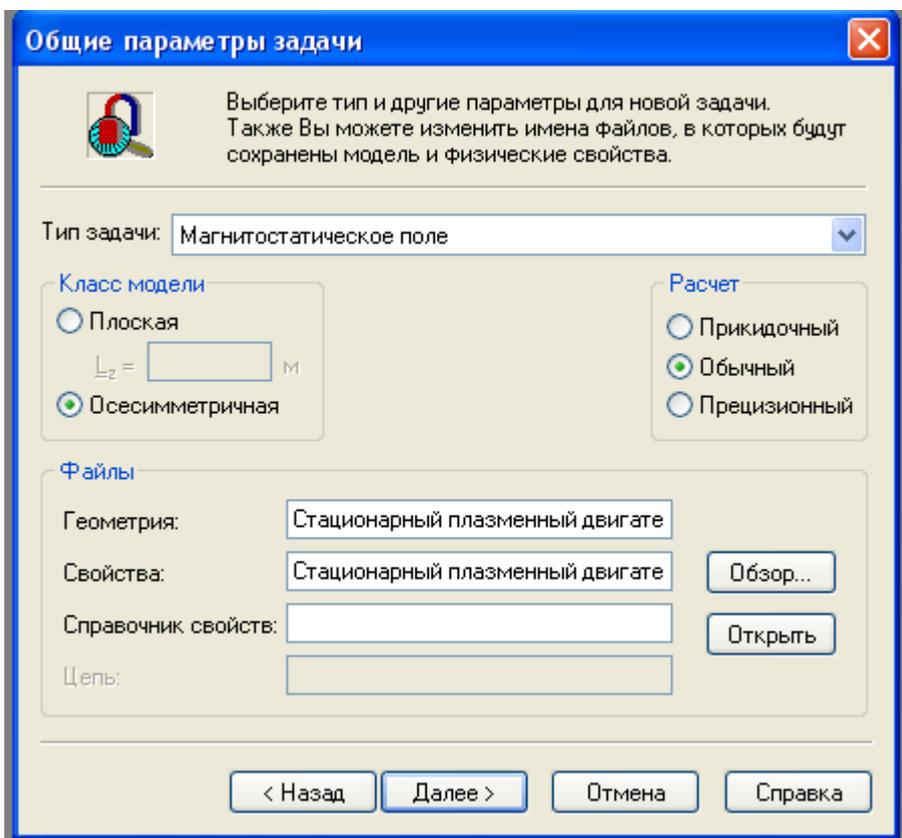


Рис.3

Стационарный плазменный двигатель (СПД), а точнее его магнитная система является осесимметричной и следовательно «Класс модели» тоже будет «Осесимметричным».

## Выбор единиц измерения длины

ELCUT позволяет использовать разные единицы измерения длины при создании геометрической модели и анализе результатов. Можно использовать миллиметры, сантиметры, метры, дюймы, футы и даже километры и мили. В данной дипломной работе за единицу измерения принимается миллиметр рис.4.

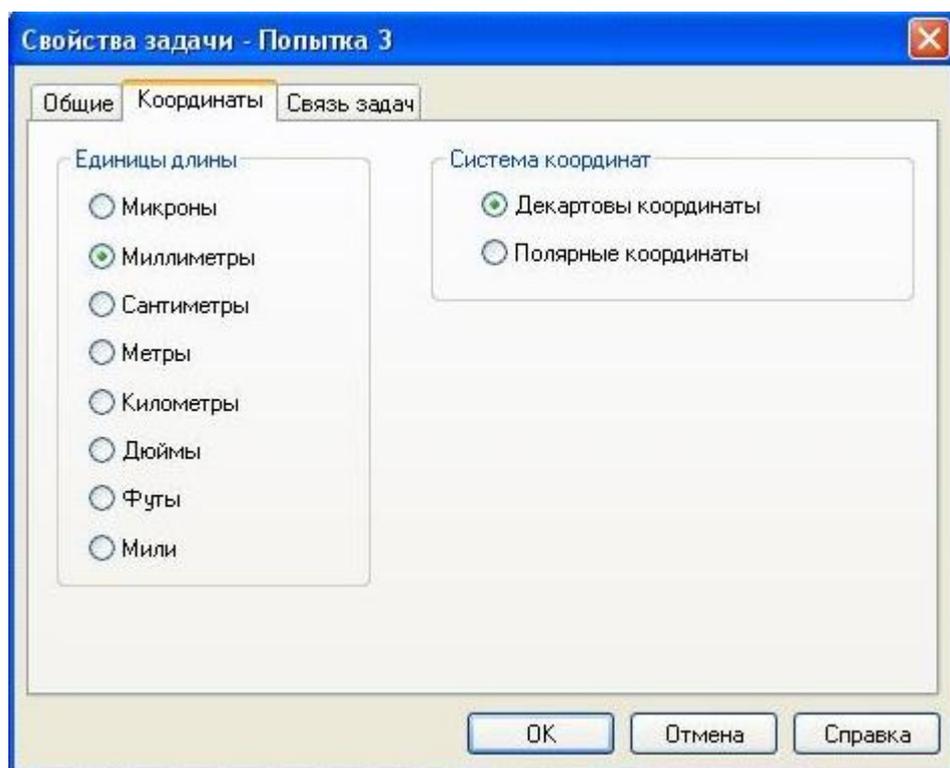


Рис.4

Выбор единиц измерения длины не оказывает влияния на единицы измерения других физических величин, для которых всегда используется система СИ. Так, плотность тока всегда измеряется в А/м<sup>2</sup> и никогда в А/мм<sup>2</sup>. Единственная расчетная физическая величина, которая измеряется в выбранных единицах длины - это вектор смещения в задачах теории упругости.

## **Задание геометрии задачи, меток объектов и построение сетки и ввод данных о материалах, нагрузка и граничных условий**

В этой главе описан процесс создания *геометрической модели*. Выражение *геометрическая модель* или просто *модель* используется при упоминании набора геометрических объектов, относящихся к некоторой проблеме. Модель не только содержит различные геометрические объекты, но и устанавливает связи между ними и свойствами материалов, источниками поля и граничными условиями.

### **Терминология**

Основными типами геометрических объектов модели являются *вершина*, *ребро* и *блок*. Каждая *вершина* представляет собой точку на плоскости. Координаты такой точки могут быть введены пользователем вручную или вычислены как координаты пересечения пары рёбер. С каждой вершиной можно связать *шаг дискретизации* и *метку*. Величина шага дискретизации задает примерное расстояние между соседними узлами сетки конечных элементов поблизости от данной вершины. Метка вершины используется для задания, к примеру, линейного источника поля или нагрузки. Каждое *ребро* представляет собой отрезок прямой или дугу окружности, соединяющие две вершины. Ребра модели не пересекают друг друга. Создаваемое новое ребро разбивается на части каждой лежащей на нем вершиной модели и каждой точкой пересечения с уже существующим ребром модели. В точках пересечений автоматически создаются новые вершины, которые в свою очередь делят на части уже существующие ребра. С каждым ребром может быть связана метка для, например, описания краевого условия. Каждый *блок* представляет собой связную подобласть плоскости модели, внешняя граница которой образована последовательностью рёбер. Внутри блоков могут находиться

дыры. Каждая из границ, отделяющих блок от внутренних дыр, образовывается либо последовательностью рёбер, либо одной изолированной вершиной. В каждом блоке, входящем в расчетную область, должна быть построена сетка конечных элементов. Кроме этого, поскольку в непомеченных блоках расчет поля не производится даже при наличии сетки конечных элементов, с блоком, входящим в расчетную область, должна быть обязательно связана *метка*. Сетку конечных элементов можно построить в любом наборе блоков модели. Ее плотность зависит от значений связанных с вершинами модели *шагов дискретизации*, которые можно либо рассчитать автоматически, либо задать для отдельных вершин вручную. Связанная с блоком метка, используется для, например, описания физических свойств среды или задания распределенных *источников поля*. Каждая *метка* представляет собой текстовую строку длиной до 16 символов. Метки позволяют ассоциировать геометрические объекты модели (блоки, ребра и вершины) с численными значениями физических свойств реальных объектов: свойств материалов, нагрузок и граничных условий. Метка не может начинаться с пробела, а пробелы в конце метки игнорируются. Заглавные и строчные буквы считаются различными. *Шаг дискретизации* задает примерное расстояние между соседними узлами сетки конечных элементов вблизи вершины геометрической модели. Задавая шаги дискретизации, можно управлять густотой сетки конечных элементов и, тем самым, точностью решения в тех или иных частях расчетной области.

## Создание геометрической модели

Создание модели, как правило, происходит в три этапа:

- Ввод геометрических объектов и манипулирование ими;
- Задание свойств сред, источников поля и граничных условий;
- Построение сетки конечных элементов во всех блоках, входящих в расчетную область.

### Создание геометрических объектов

При описании геометрии модели сначала создаются вершины и ребра, ограничивающие блоки с различными физическими свойствами. Для корректировки положения и формы объектов используются операции перемещения и копирования рис.5.

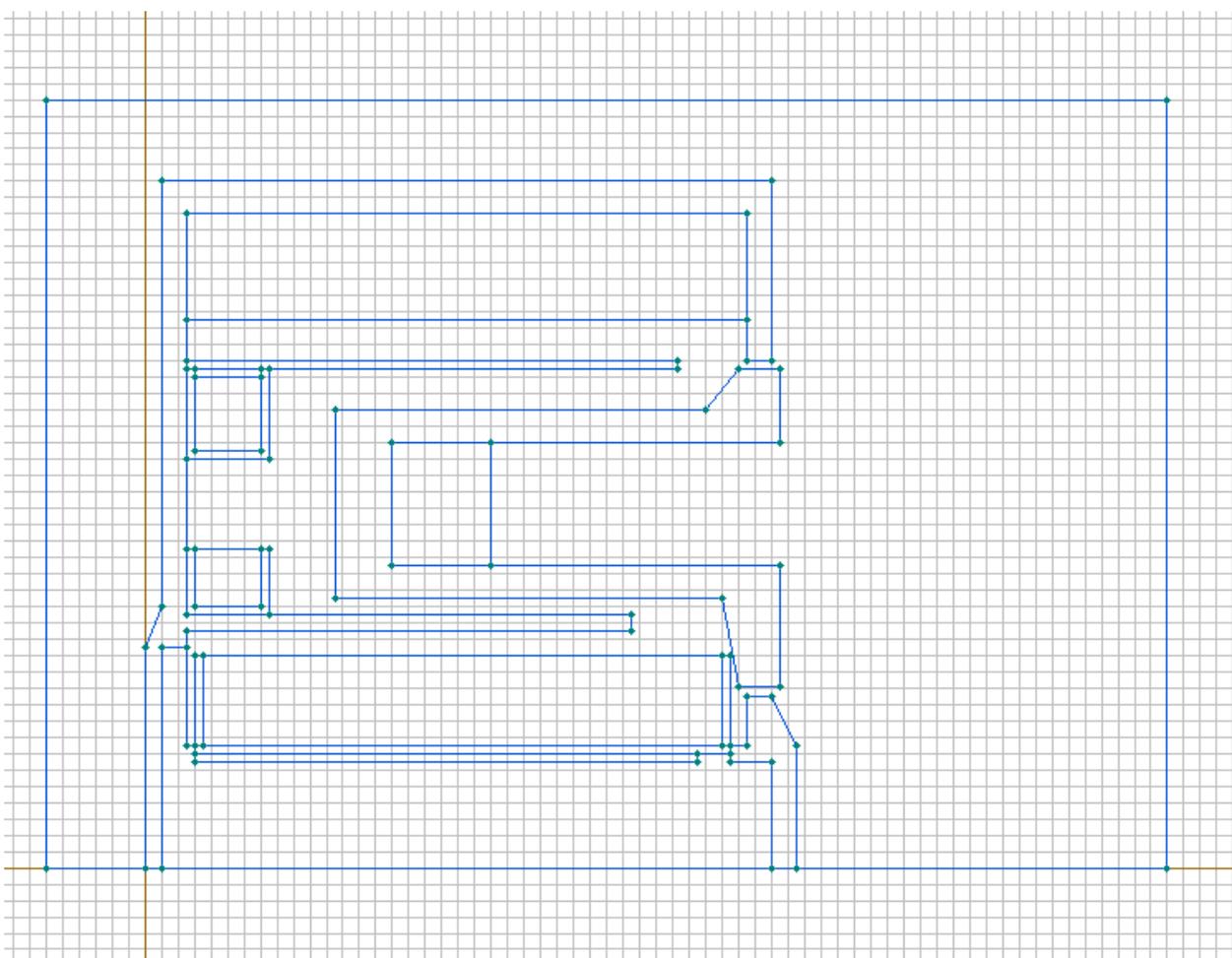


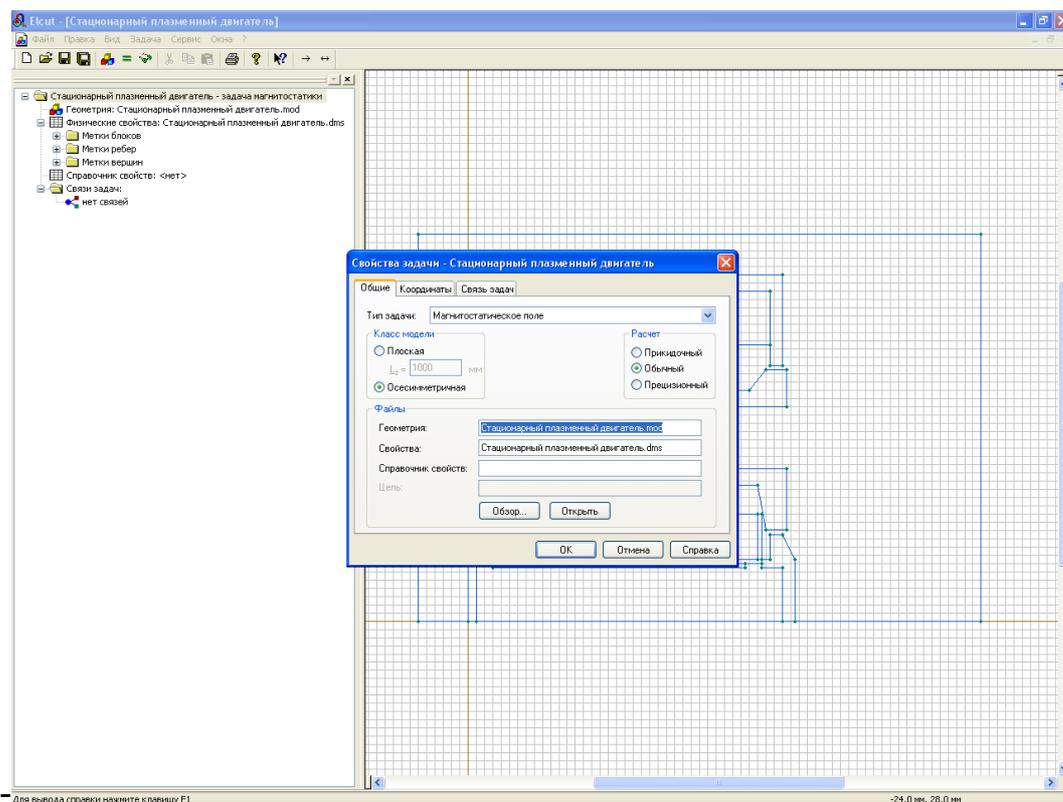
Рис.5

## Добавление справочника свойств

В ELCUT можно использовать уже разработанные заранее справочники свойств, в которых могут находиться свойства различных сталей, материалов, граничных условий и т.д.

Добавление справочника происходит следующим путем:

- Сначала нужно зайти в свойства задачи рис.6



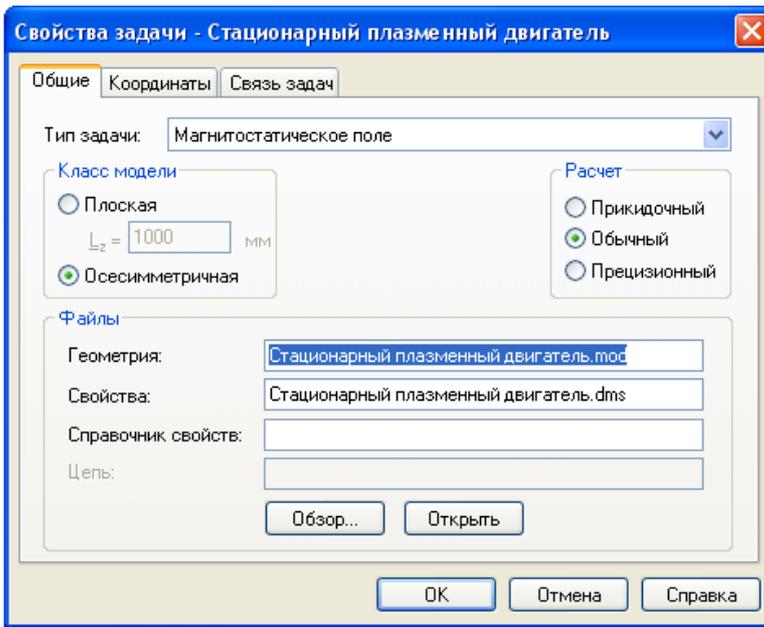
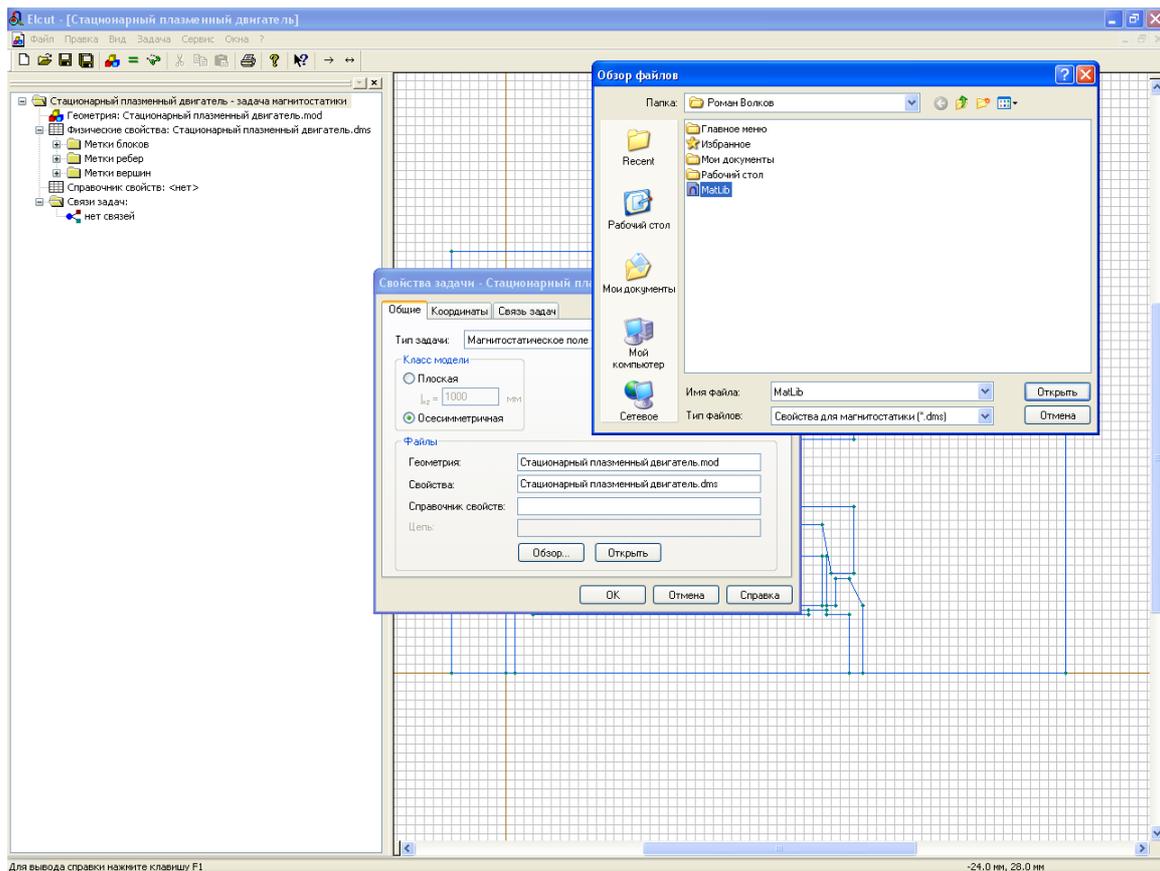


Рис.6

- Далее, путем нажатия кнопки обзор и выделения нужного справочника свойств, происходит добавление этого справочника к нашей задаче см. рис.7



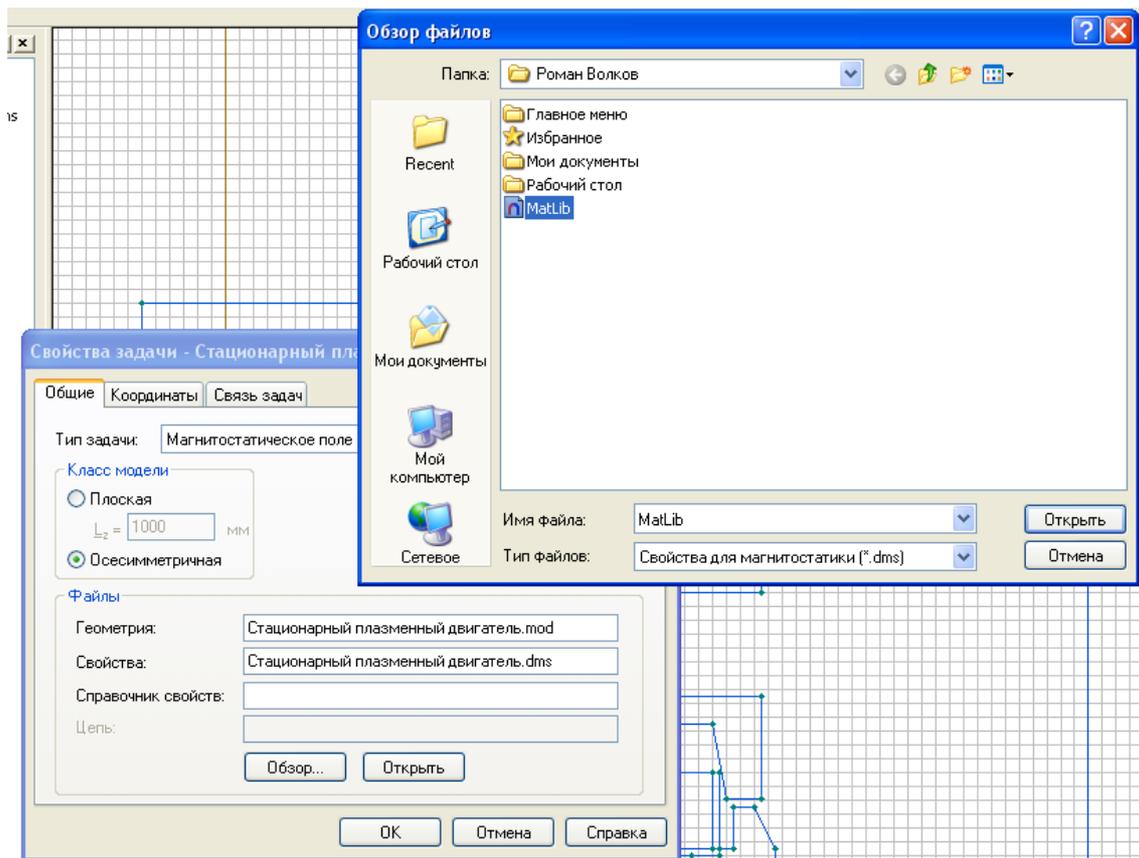


Рис.7

### Задание свойств сред, источников поля и граничных условий

Свойства сред, источники и граничные условия задаются путем привязывания меток, имеющих соответствующие свойства, к геометрическим объектам.

а) Задание граничных условий.

- Выделение граничных ребер рис.8

- Задание граничного условия (Магнитный потенциал равен нулю) рис.9

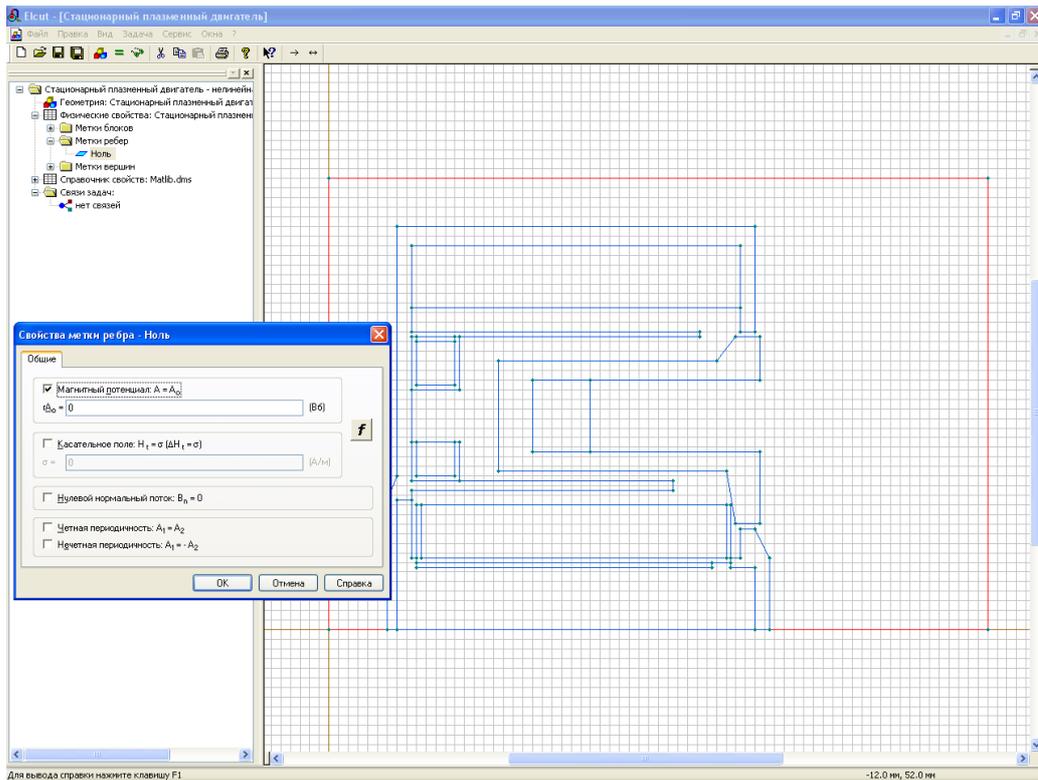


Рис.8

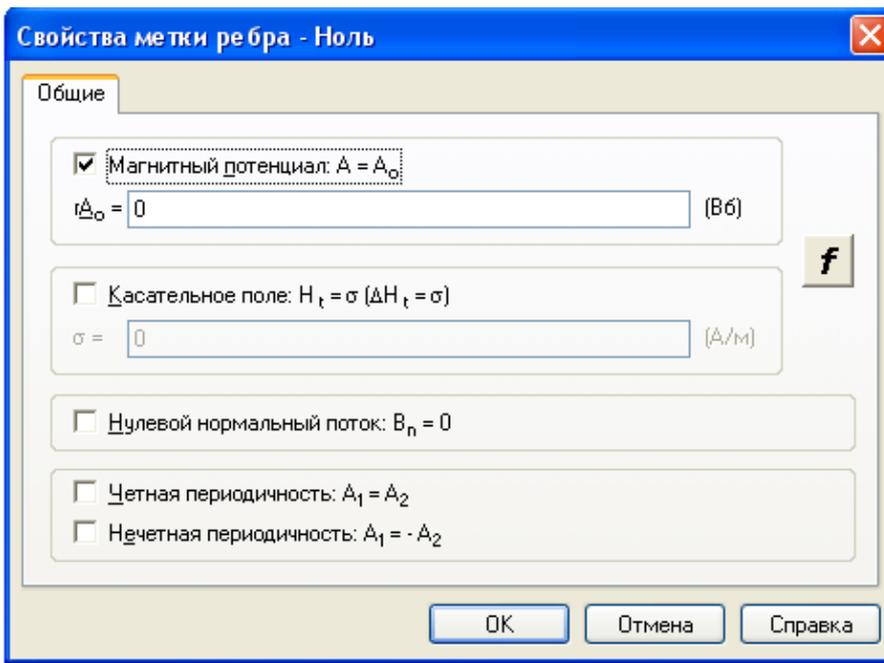


Рис.9

б) Изменение добавление свойств метки

- Выделение блока рис.10

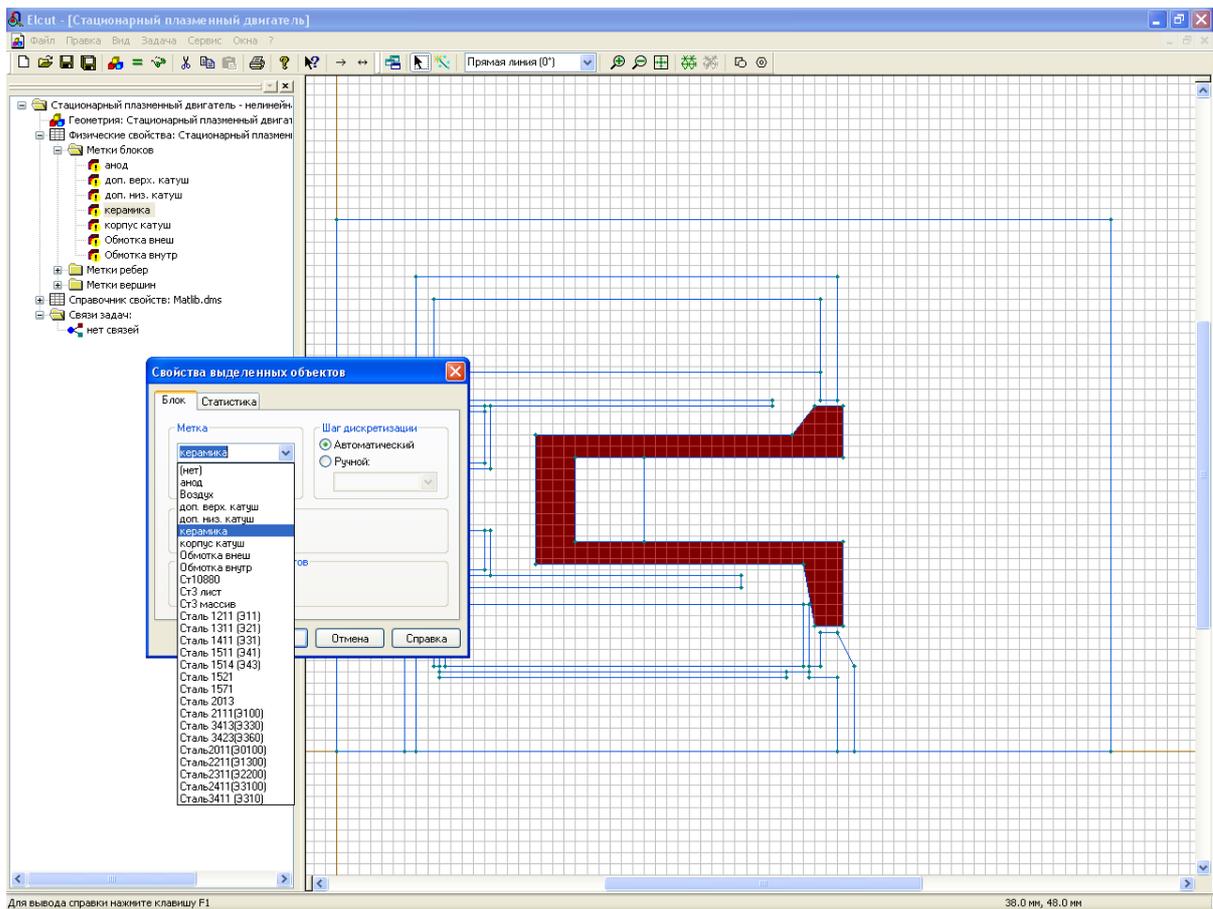


Рис.10

- Выбор названия метки из справочника свойств или создание новой путем ввода названия и потом последующего редактирования свойств рис.11.

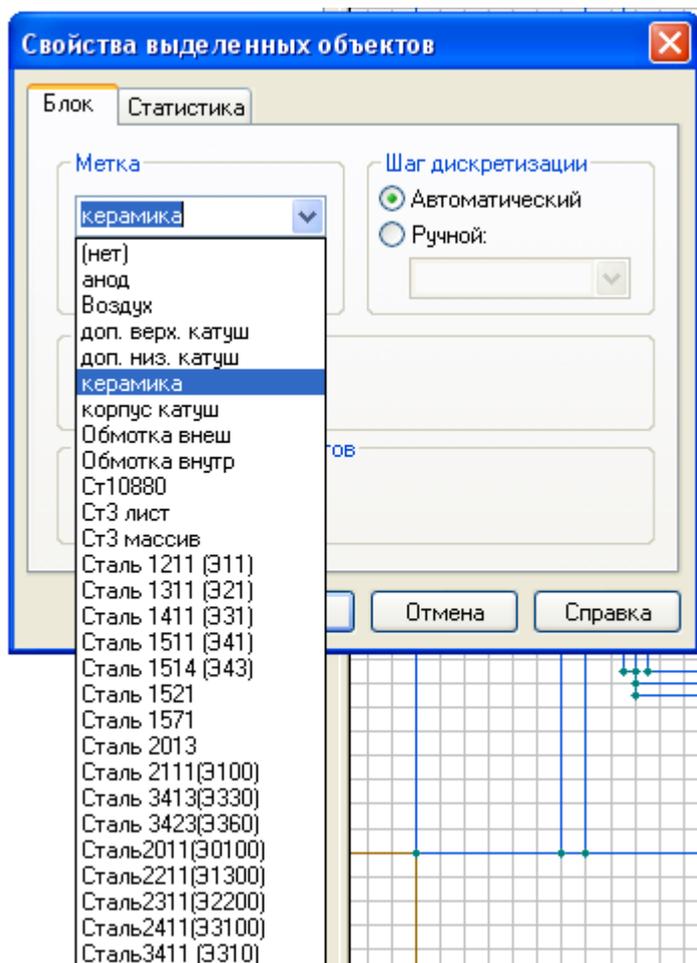


Рис.11

## Ввод свойств метки для магнитных катушек

В задаче магнитостатики в свойствах метки блока задаются две компоненты тензора магнитной проницаемости, полный ток или плотность тока, и коэрцитивная сила постоянного магнита и её направление рис.12

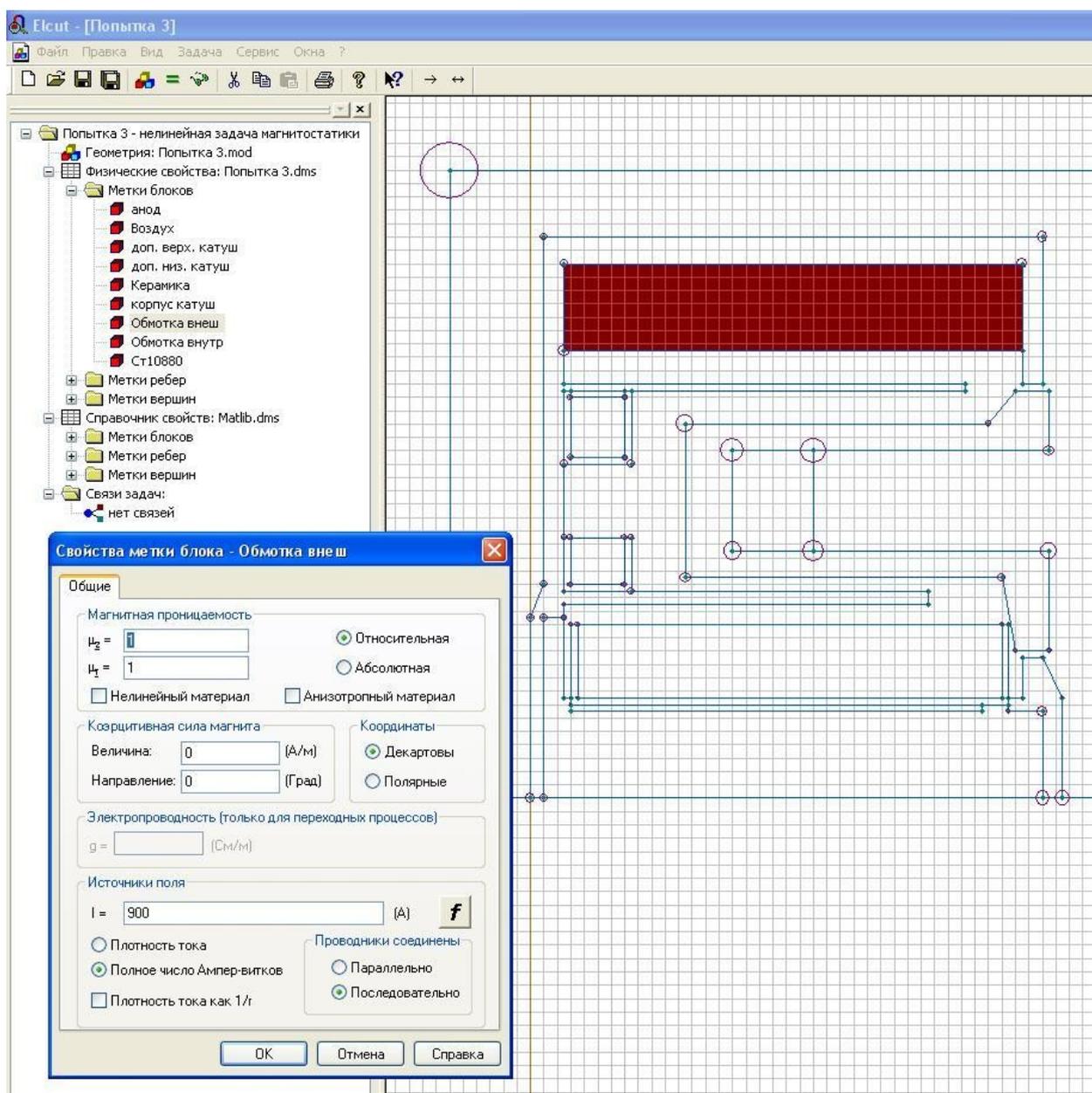


Рис.12

В данной работе параметры катушек задавались следующим образом:

- Центральная катушка ( Соединение - последовательно, число Ампер-витков равное 750).
- Внешние катушки 4 шт. Для возможности решения осесимметричной задачи 4 катушки заменяются одной кольцевой рис.13 (Соединение – последовательно, число Ампер-витков 900).
- Дополнительная верхняя катушка (Соединение – последовательно, число Ампер-витков 80).
- Дополнительная нижняя катушка (Соединение – последовательно, число Ампер-витков 90).

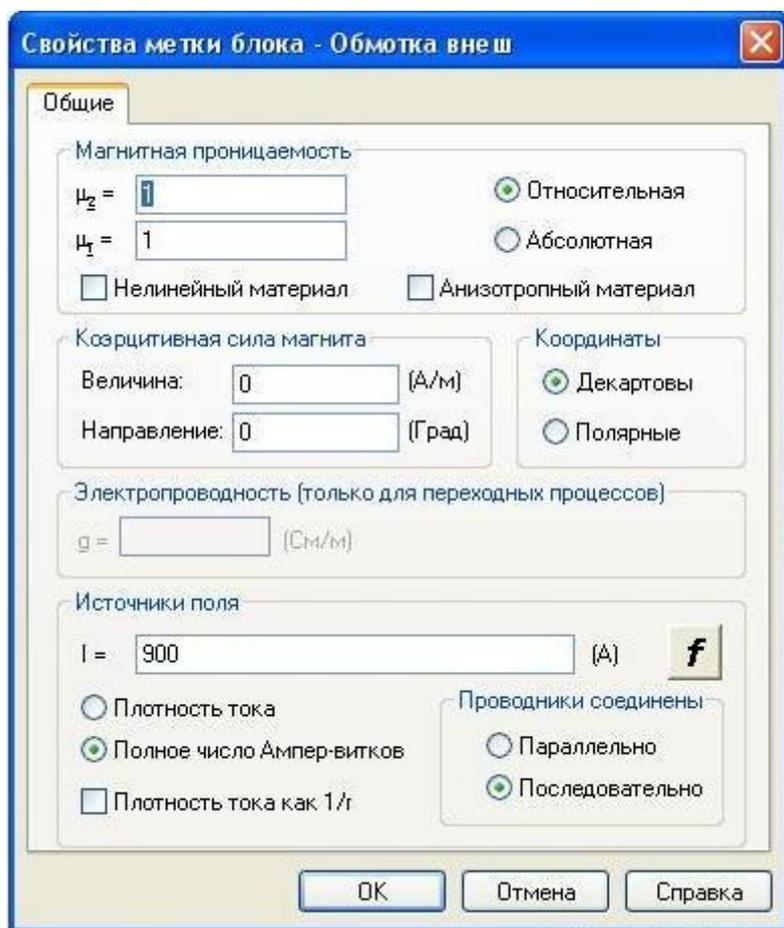


Рис.13

## Построение сетки конечных элементов

Сетку конечных элементов можно создавать автоматически. При этом, с учетом размеров геометрических объектов, будет построена гладкая сетка с плавным переходом от мелких элементов к более крупным. Для этого не требуется вводить какую-либо информацию нужно лишь кликнуть правой кнопкой мышки на геометрической модели и выбрать пункт «Построить сетку» рис.14 результат построения можно увидеть на рис.15.

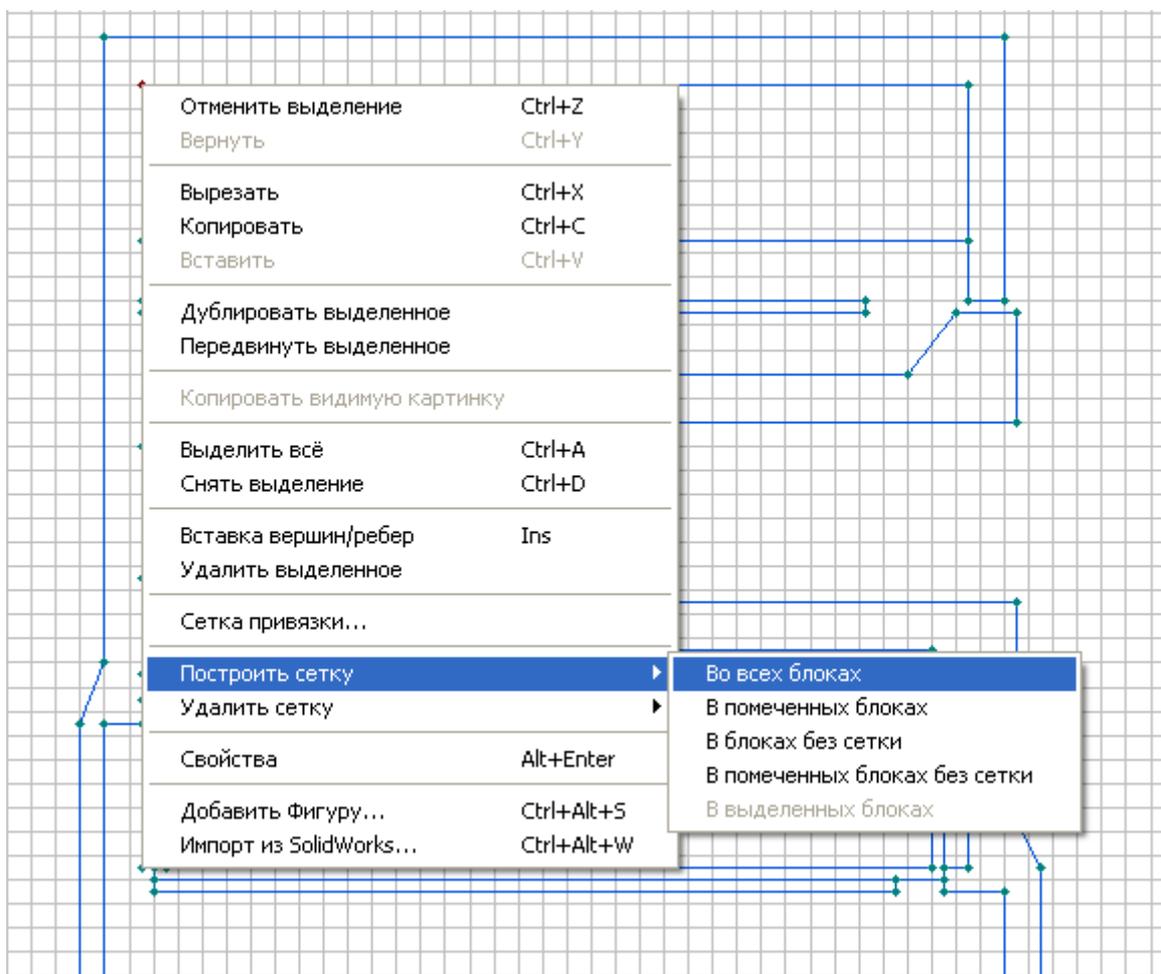


Рис.14

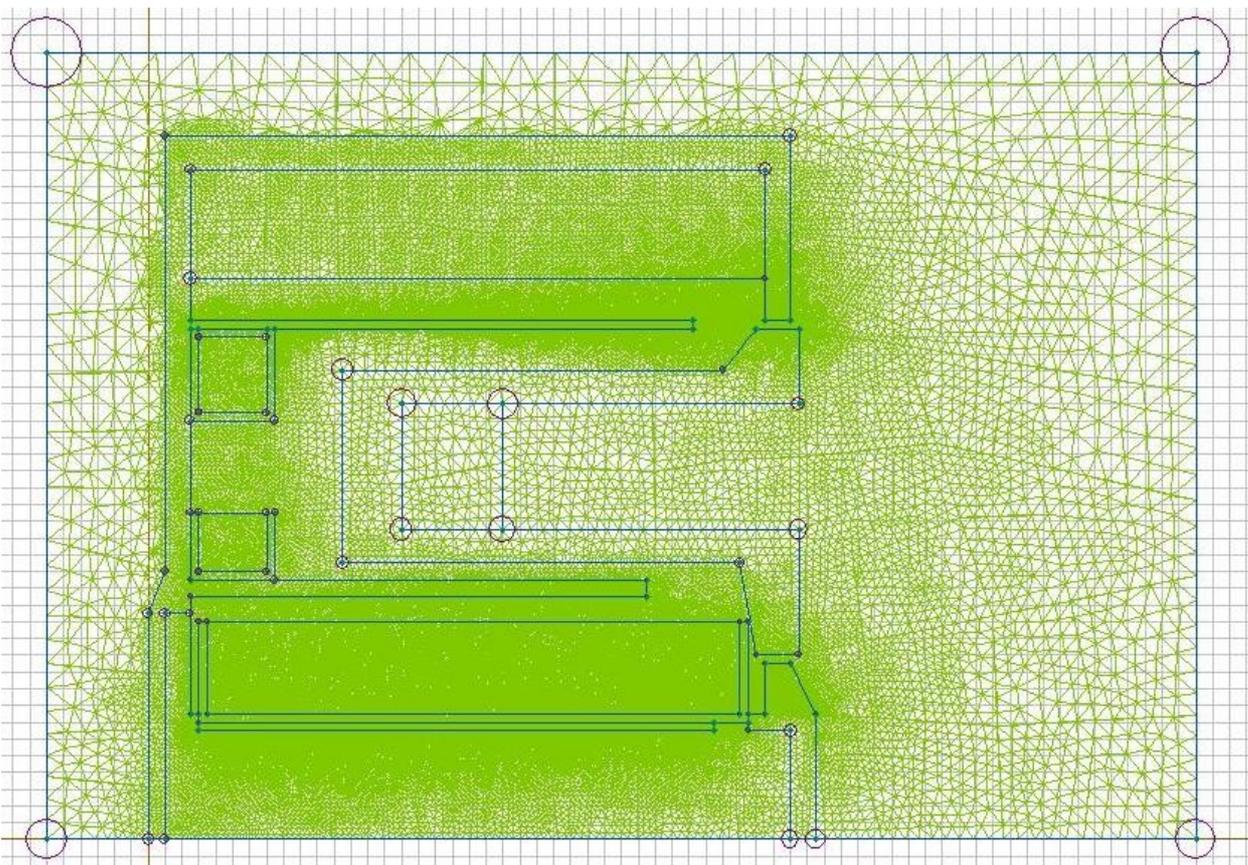


Рис.15

После завершения этих операций можно приступать к расчетам. Расчеты проводятся с использованием полной версии программы, установленной на компьютерах каф. 208. При этом все подготовительные работы, описанные выше, и анализ результатов расчетов можно проводить с использованием «студенческой версии» ELCUT.

## Решение задачи

Для того чтобы задача могла быть решена, должны быть выполнены некоторые условия:

- В документе описание задачи заданы тип задачи, класс модели, точность расчета и прочие свойства задачи.
- Документ геометрическая модель должен содержать законченную модель с построенной сеткой конечных элементов и метками.
- Свойства каждой метки, использованной в модели, должны быть определены в документе физические свойства данной задачи.
- Если задача использует результат решения другой, связанной задачи, в качестве исходных данных, то задача-источник должна быть решена.

Чтобы решить задачу, выберите позицию «Решить задачу» в меню «Задача» или в контекстном меню в окне описания задачи. Можно также пропустить это действие и прямо выбрать позицию «Анализ результатов» в меню «Задача» или контекстном меню. Если задача еще не была решена, или решение устарело по отношению к другим документам, процесс решения задачи будет запущен автоматически.

Если задача была однажды решена на грубой сетке конечных элементов, ELCUT может автоматически улучшить построенную сетку, основываясь на ранее полученных результатах решения задачи рис. 16. В литературе этот процесс иногда называется  $h$ -метод или  $h$ -refinement. Такая возможность практически исключает необходимость задавать шаг дискретизации вручную, позволяя автоматически измельчать сетку в областях с сильно неоднородным полем. Вычисление уточненного шага в узле сетки основывается на изменении плотности энергии в окрестности этого узла, которую общепринято считать надежной оценкой локальной погрешности решения. Хотя при этом и

невозможно гарантировать какую-либо конкретную точность, улучшенная сетка является оптимальной, обеспечивая наименьшую погрешность при заданном количестве узлов сетки. Даже при полностью автоматическом построении первоначальной сетки, одного шага адаптивного улучшения достаточно для большинства задач. Адаптивное улучшение сетки возможно для всех представленных в ELCUT типов задач, включая нелинейные и нестационарные задачи.

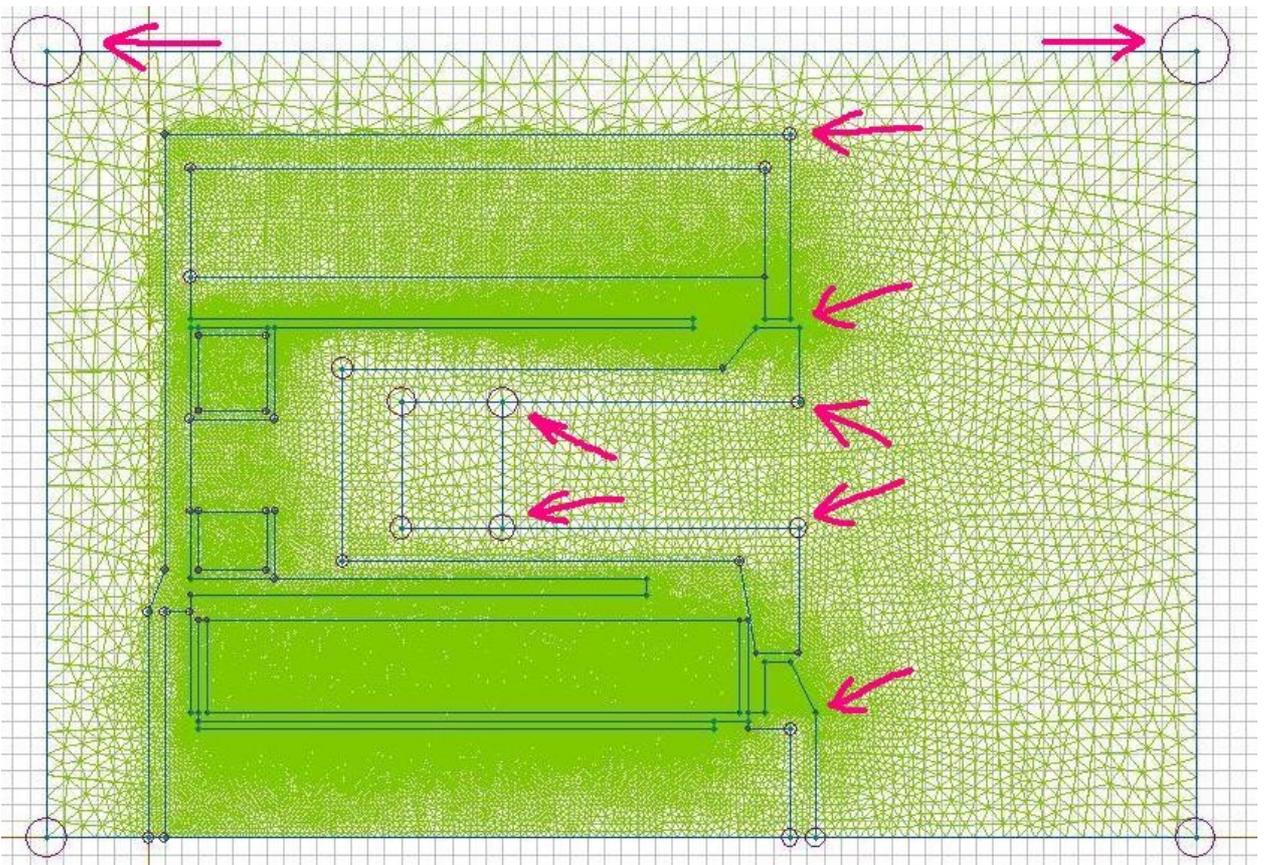


Рис.16

## Отображение полученных результатов

По умолчанию отображение результатов расчета осуществляется в виде конфигурации магнитных силовых линий (рис. 17)

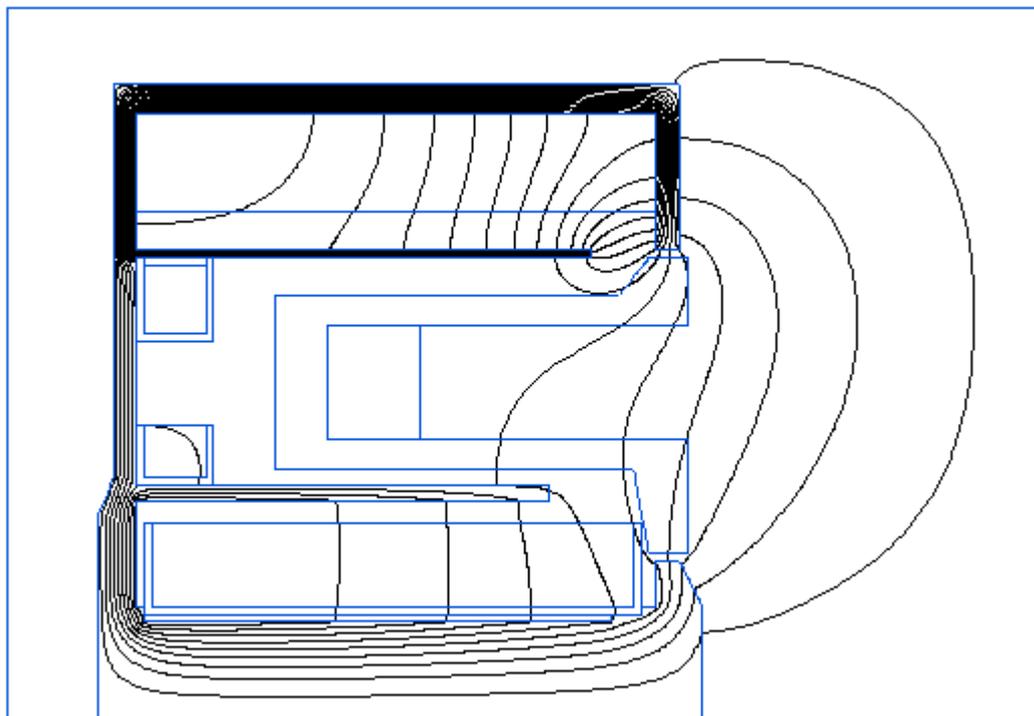
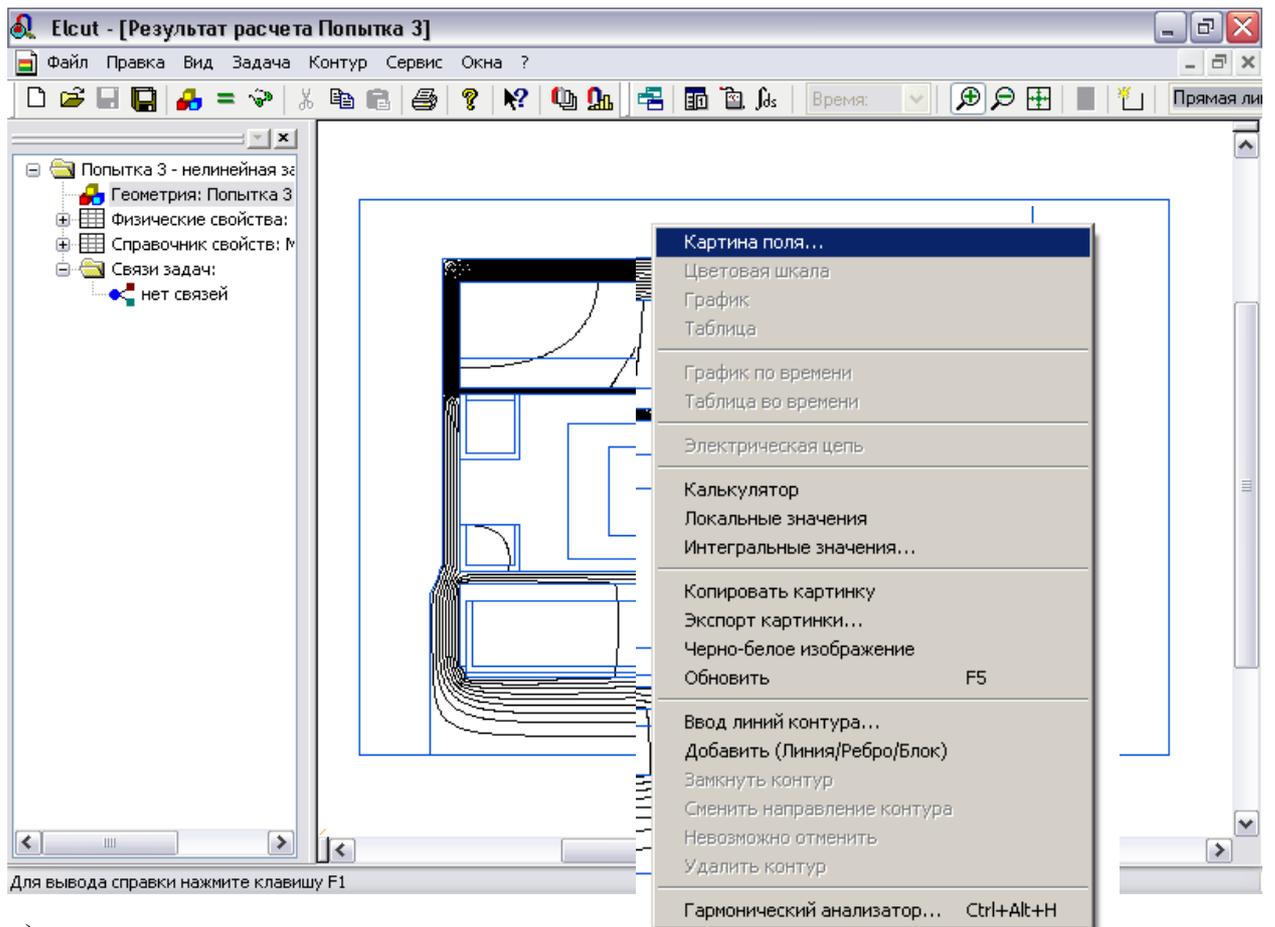
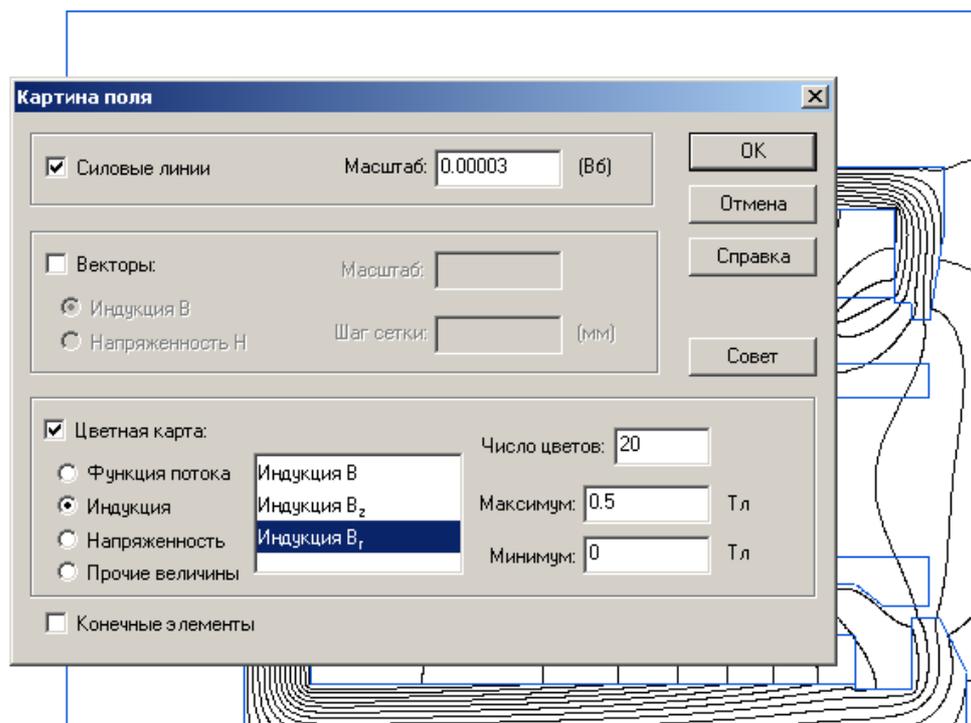


Рис.17

Для уточнения количественных значений и перехода к цветовой палитре необходимо установить курсор в поле отображенной картинке и с помощью правой кнопки мыши вызвать контекстное меню и выбрать в нем «Картину поля» (см. рис.18 а и б). В выпадающем окне отметить флажком «Цветовая карта», выбрать значение радиальной составляющей индукции магнитного поля «Индукция  $B_r$ » и установить верхнее значение отображения 0,05 Тл (нижнее значение необходимо установить равным нулю). После нажатия клавиши «ОК» получится картина, представленная на рис.19. Для количественного отображения результата можно вызвать цветовую шкалу, нажав соответствующую иконку на панели анализа результатов.



а)



б)

Рис. 18

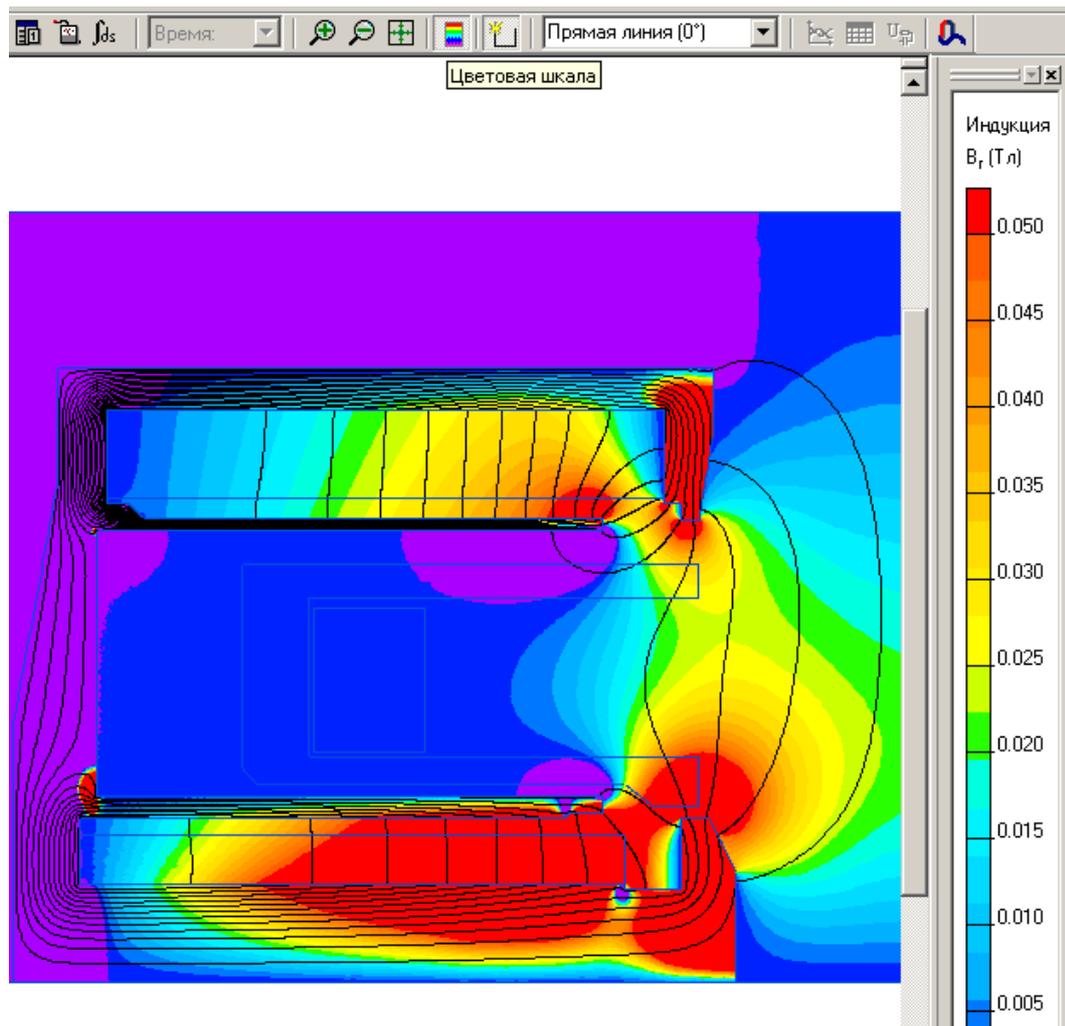
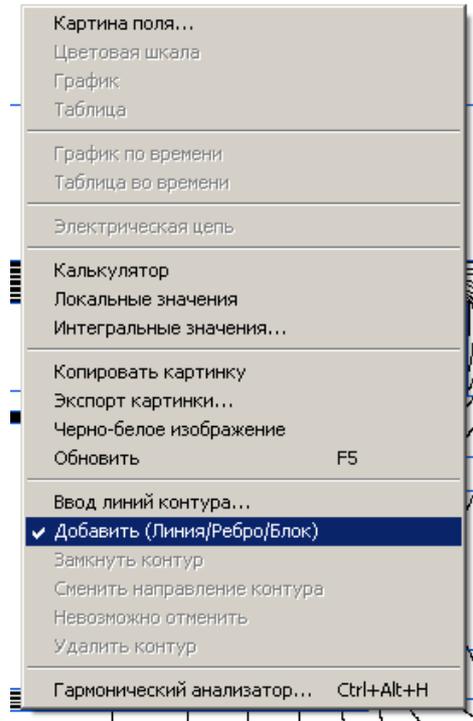
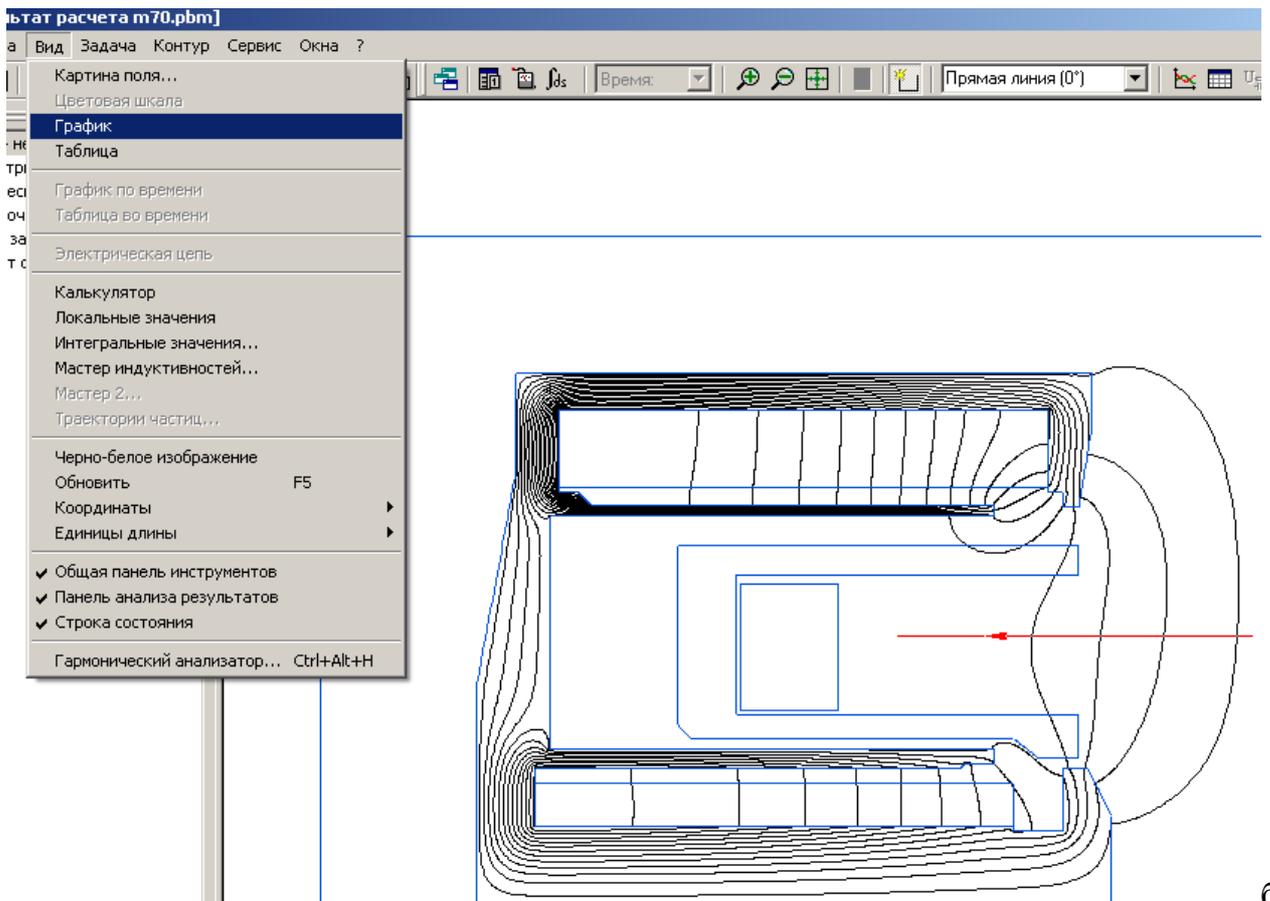


Рис.19

Другим способом получения количественных результатов расчета является построение графика распределения параметра вдоль выбранной линии. Для осуществления этого необходимо установить курсор в поле отображенной картинки и с помощью правой кнопки мыши вызвать контекстное меню и выбрать в нем «Добавить линию/Ребро/Блок» (рис.20а). После установки флажка возле данной опции, удерживая левую клавишу мыши провести на поле картинки линию (рис.20б). Стрелка на линии укажет направление роста значений на шкале абсцисс. После этого указав в меню «Вид» «График» на экране монитора отобразится график распределения параметра вдоль выбранной линии (см. рис.21).



а)



б)

Рис.20

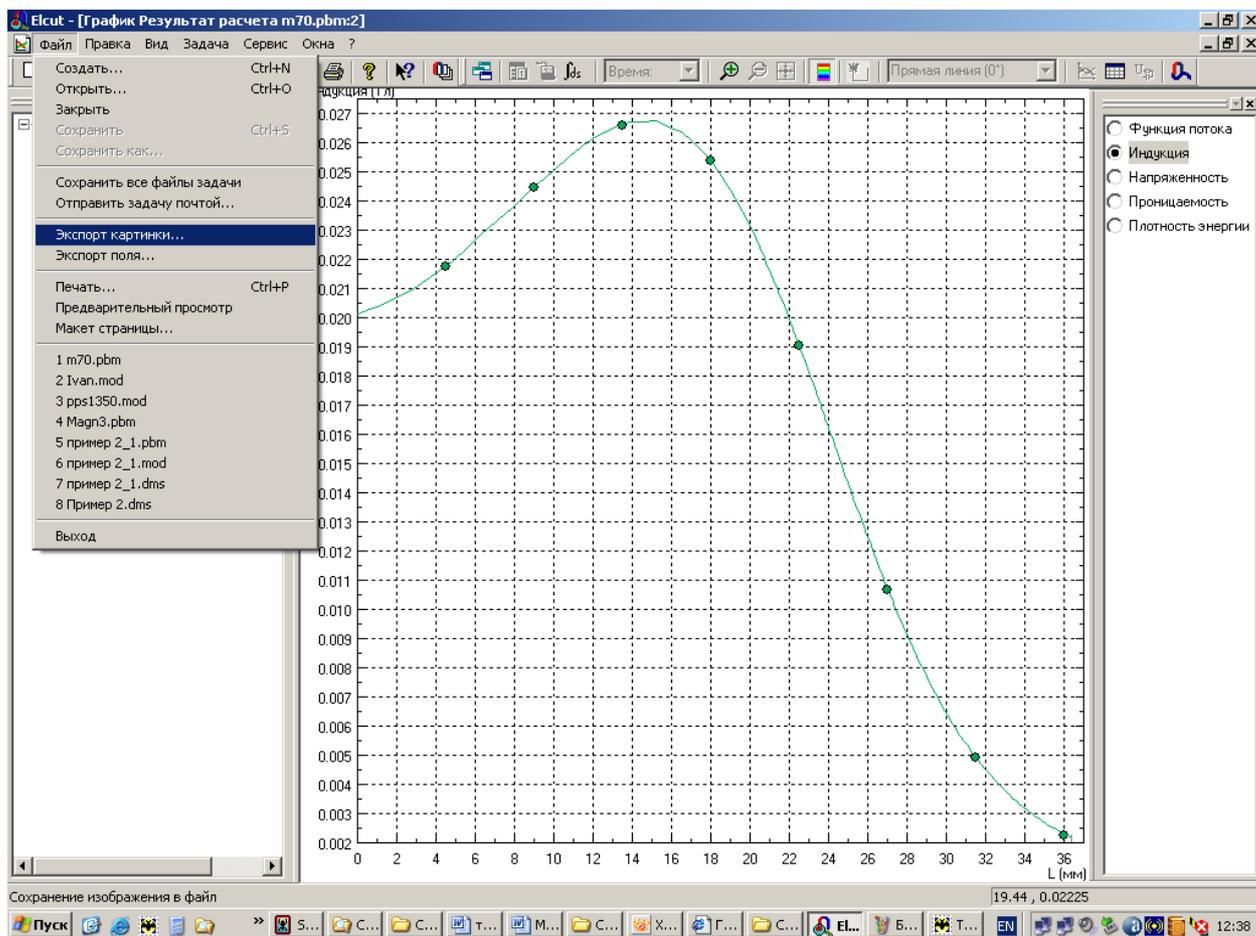


Рис.21

Для сохранения полученных результатов в виде картинок в программе предусмотрена опция «Экспорт картинки» в меню «Файл».

## Анализ результатов

Итак во время работы была проведена оптимизация параметров магнитной системы и ниже представлены результаты этой работы.

Конечная картина магнитного поля, в которой удалось добиться равномерного распределения поля в области анода представлена на рис. 22. На последующих рисунках представлен процесс оптимизации при установке дополнительных катушек и подбора геометрии магнитопровода, полюсных наконечников и количества дополнительных катушек.

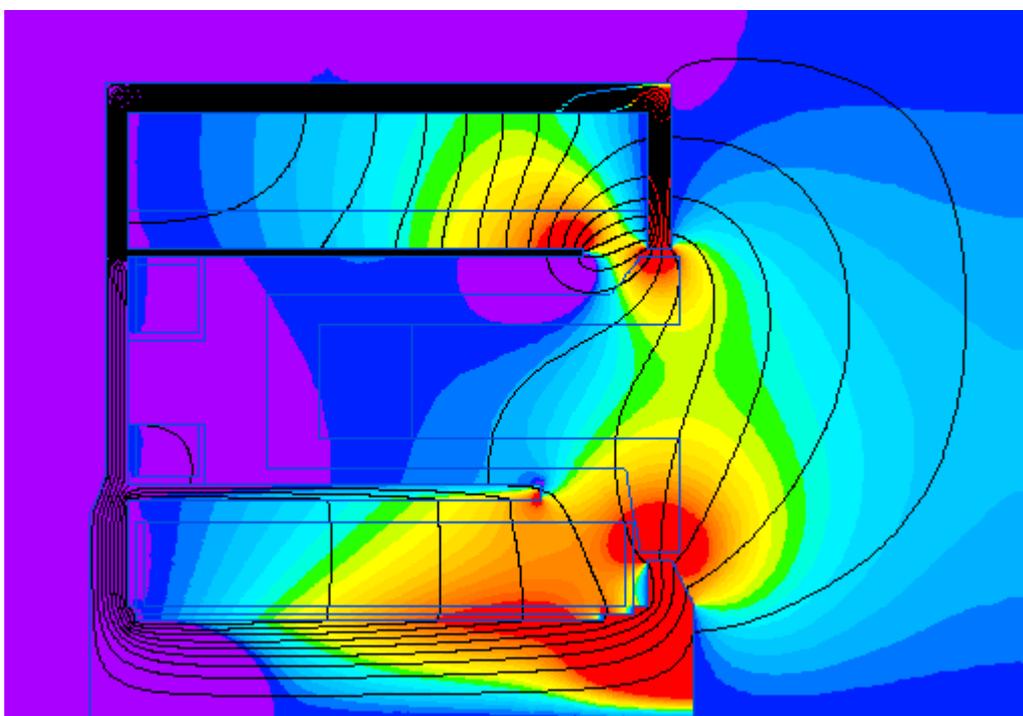


Рис.22

Без верхней дополнительной катушки рис.23

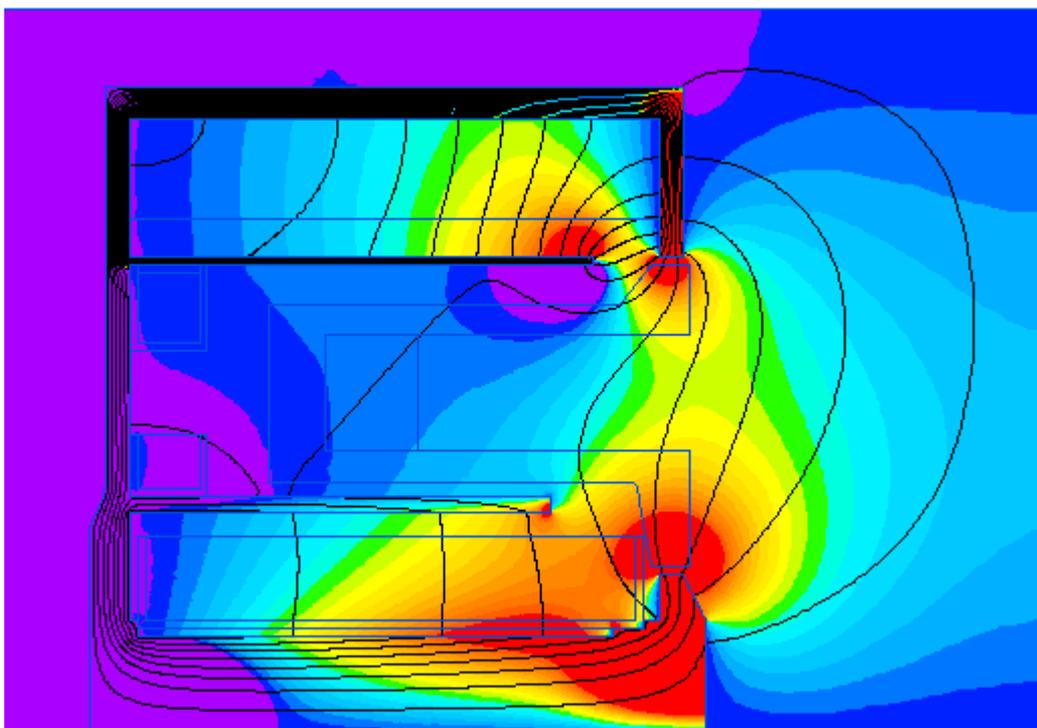


Рис.23

Без нижней дополнительной катушки рис.24

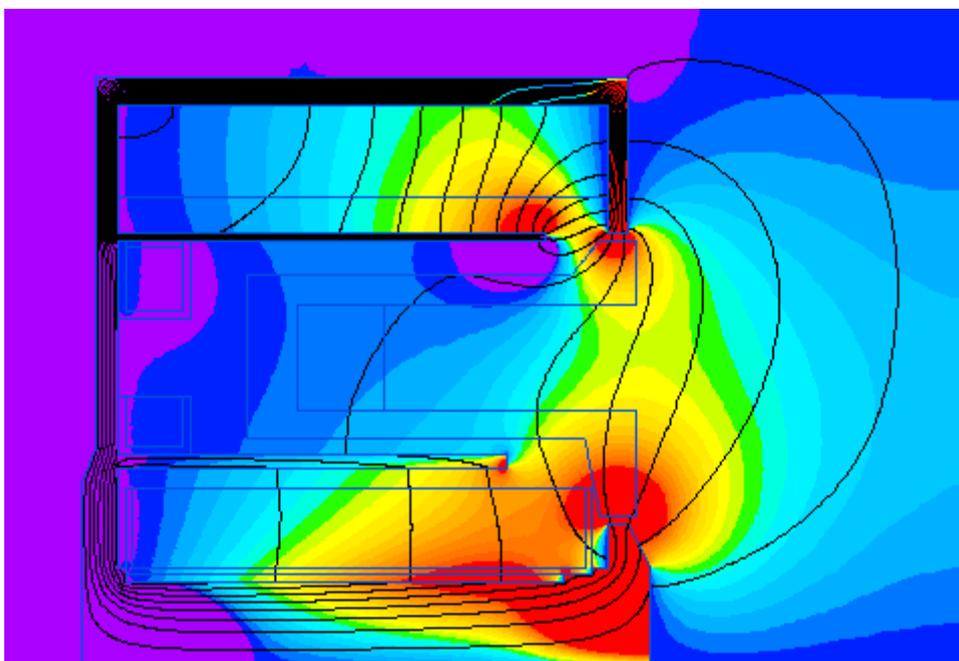


Рис.24

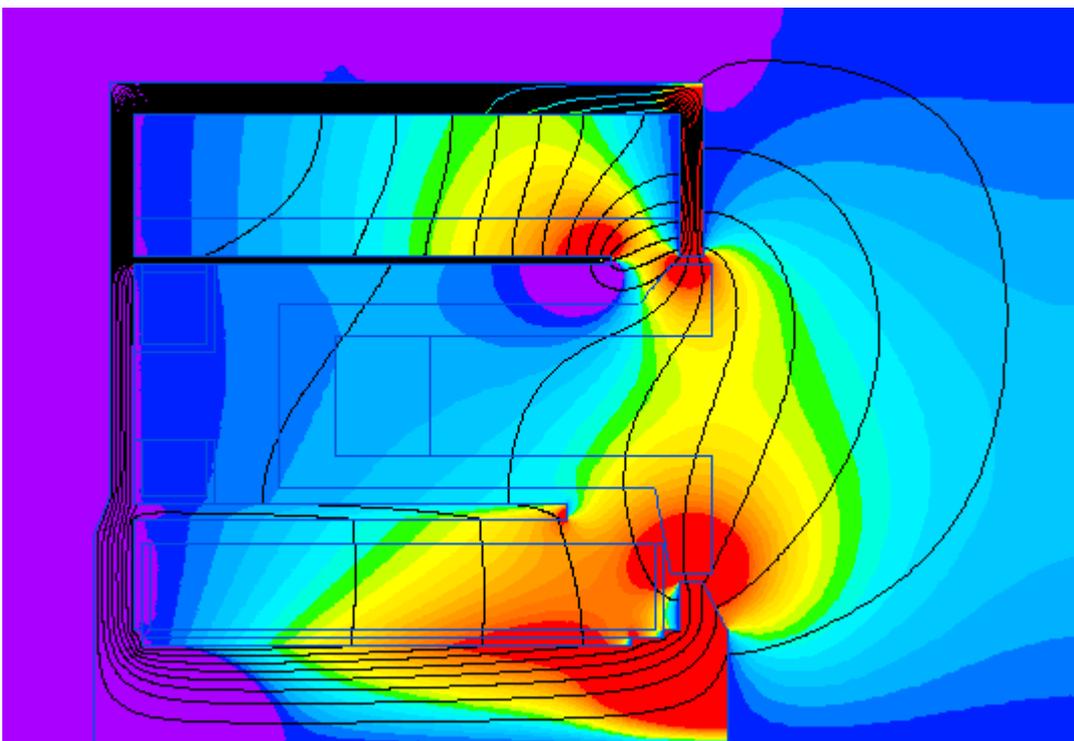


Рис.25

На рис.22-25 видно, что с выключением дополнительных катушек поле в районе анода становится неравномерным.

С укорочением верхнего магнитного экрана рис.26 поле не заполняет ускорительный канал, а значит будет происходить срыв потока электронов. Что в свою очередь плохо скажется на КПД двигателя.

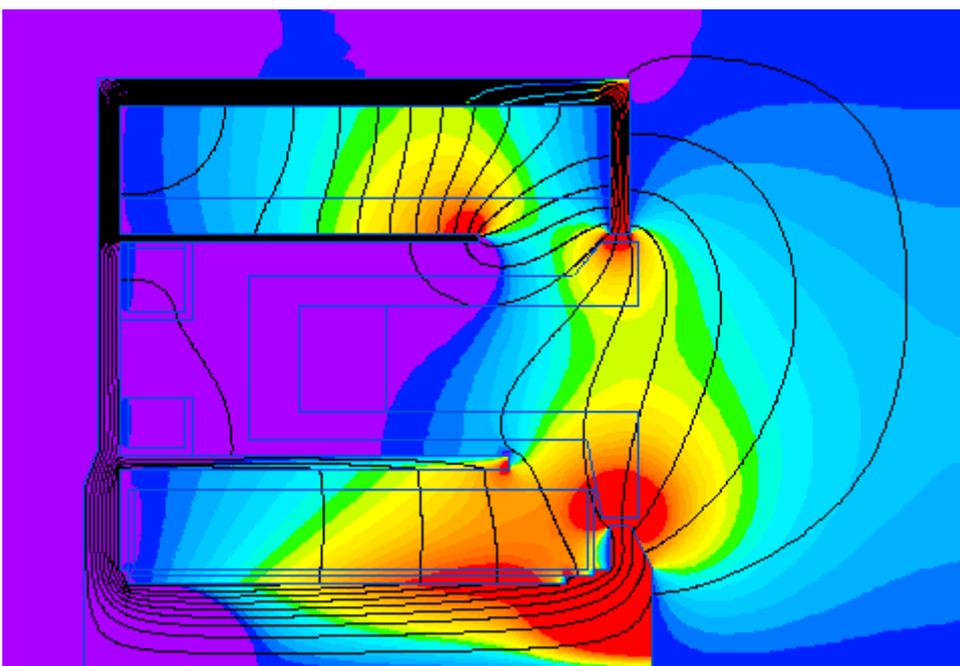


Рис.26

С укорочением нижнего магнитного экрана рис.27 также не получается достичь равномерного распределения поля.

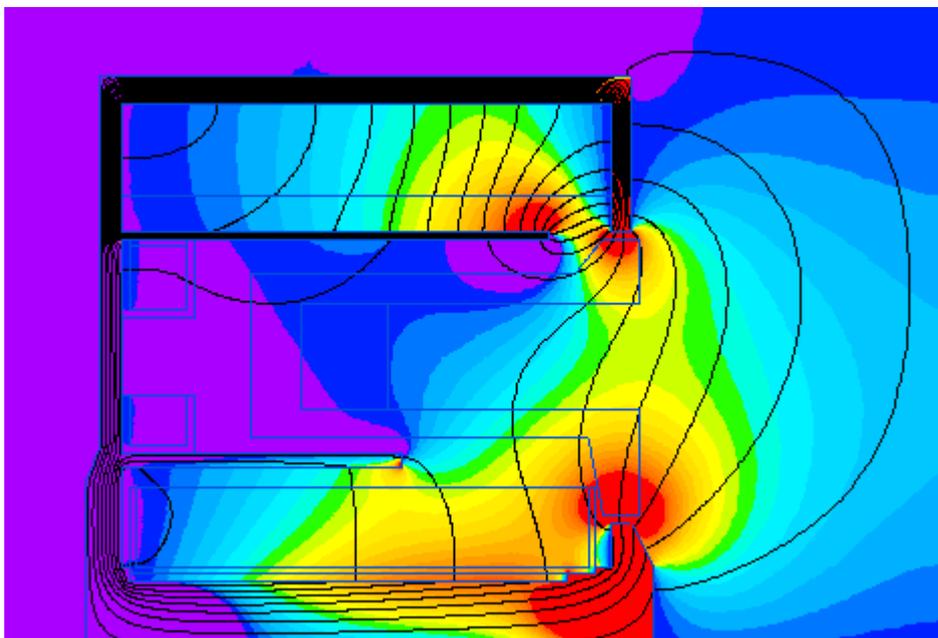


Рис.27

С уменьшением верхнего магнитного полюса рис.28 радиальная составляющая магнитной индукции на срезе ускорительного канала становится недостаточной для заданных параметров работы двигателя.

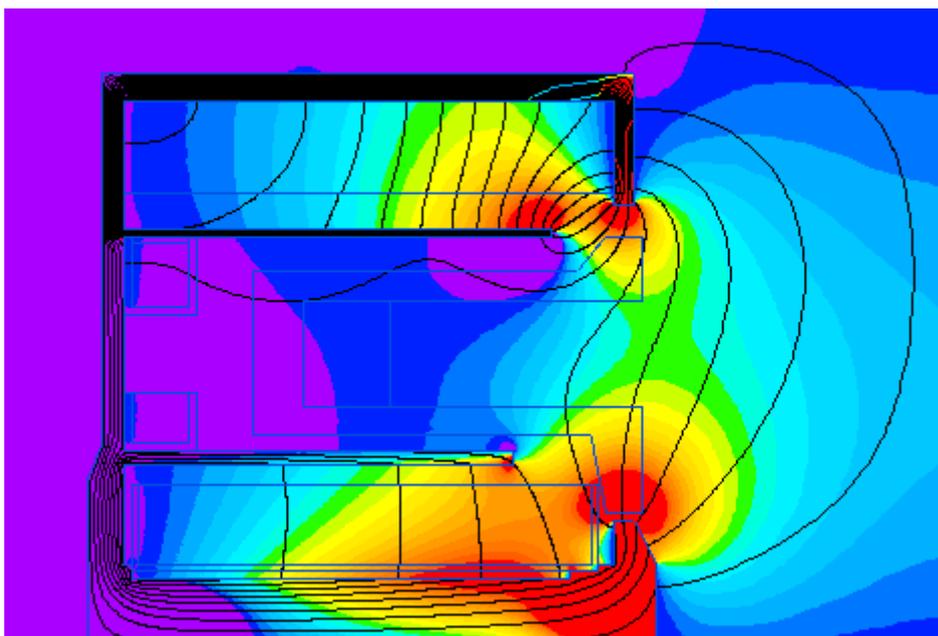


Рис.28

## Вывод:

В результате работы с пакетом ELCUT была оптимизирована новая магнитная система для СПД с двумя дополнительными катушками, позволяющими достигать равномерного распределения магнитного поля в области анода.