



АРМ ЕМА

Руководство пользователя

АРМ ЕМА

Анализ электромагнитных полей

Версия 17

Руководство пользователя

Научно-технический центр «Автоматизированное Проектирование Машин»
141070, Россия, Московская область, г. Королёв, Октябрьский бульвар 14, оф. 6
тел.: +7 (495) 120-58-10.

Наш адрес в Интернете: <http://www.apm.ru>, e-mail: com@apm.ru

Авторские права © 1989 – 2019 Научно-технический центр «Автоматизированное проектирование машин». Все права защищены. Все программные продукты НТЦ «АПМ» являются зарегистрированными торговыми марками центра. Названия и марки, упомянутые в данном руководстве, являются зарегистрированными торговыми марками их законных владельцев.

Отпечатано в России.

Содержание

1.1	Анализ в низкочастотной и высокочастотной области	4
1.2	Типы анализа	5
2	Анализ в низкочастотной области	9
2.1	Электростатический расчет	9
2.1.1	<i>Построение расчетной модели</i>	9
2.1.2	<i>Задание нагрузок и граничных условий</i>	10
2.1.3	<i>Проведение расчета</i>	13
2.1.4	<i>Просмотр результатов</i>	15
2.2	Расчет поля постоянных токов	17
2.2.1	<i>Построение расчетной модели</i>	17
2.2.2	<i>Задание нагрузок и граничных условий</i>	18
2.2.3	<i>Проведение расчета</i>	19
2.2.4	<i>Просмотр результатов</i>	21
2.3	Магнитостатический расчет	22
2.3.1	<i>Построение расчетной модели</i>	22
2.3.2	<i>Задание нагрузок и граничных условий</i>	23
2.3.3	<i>Проведение расчета</i>	26
2.3.4	<i>Просмотр результатов</i>	27
2.4	Нестационарный электромагнитный расчет	29
2.4.2	<i>Задание нагрузок и граничных условий</i>	29
2.4.3	<i>Проведение расчета</i>	33
2.4.4	<i>Просмотр результатов</i>	35
3	Анализ в высокочастотной области	38
3.1	Высокочастотный модальный анализ	38
3.1.1	<i>Построение расчетной модели</i>	38
3.1.2	<i>Задание нагрузок и граничных условий</i>	38
3.1.3	<i>Проведение расчета</i>	39
3.1.4	<i>Просмотр результатов</i>	41
4	Краткие теоретические сведения	43
5	Обучающие примеры	50
5.1	Расчет конденсатора (электростатика)	50
5.2	Расчет магнитопровода (магнитостатика).	54
5.3	Расчет поля постоянных токов	61
5.4	Кольцевой проводник (Нестационарный электромагнитный расчет)	66
5.5	Расчет тефлонового резонатора (Высокочастотный модальный анализ)	73

1 Обзор возможностей модуля анализа электромагнитных полей

Средства анализа электромагнитных полей, реализованные в программе **АРМ ЕМА**, доступны либо могут использоваться для исследования различных проявлений электромагнетизма, как, например, самоиндукция, плотность магнитного потока, распределение силовых линий магнитного поля, потери электрической мощности и другие родственные явления. Эти средства эффективны при анализе таких устройств, как соленоиды (катушки индуктивности), магнитные пускатели, электродвигатели, источники постоянных магнитных полей, трансформаторы, электромагниты, и т.п. Программа **АРМ ЕМА** располагает возможностями для решения проблем микроволновой техники (расчет волноводов, резонаторов и антенн).

Доступны три типа электромагнитного анализа:

- трехмерные стационарные электромагнитные поля;
- трехмерные низкочастотные переменные электромагнитные поля;
- трехмерные высокочастотные электромагнитные поля.

Используемая в программе **АРМ ЕМА** конечно-элементная формулировка рассматриваемого вида анализа основана на уравнениях Максвелла для электромагнитных полей. Введением скалярного или векторного потенциала в эти уравнения и установлением определяющих соотношений пользователь может получить уравнения, которые удобны для конечно-элементного анализа.

1.1 Анализ в низкочастотной и высокочастотной области

Анализ электромагнитных полей может быть разделен в зависимости от скорости изменения векторов (индукции и напряженности) характеризующих состояние поля на низкочастотную (0~1000 Гц) и высокочастотную (~1 МГц~10 ГГц) области.

Практический интерес для расчетов в низкочастотной области представляют задачи, в том числе и стационарные (0 Гц), связанные с электротех-

ническими устройствами, такими как: электрические двигатели, электромагнитные актуаторы, трансформаторы и т.п.

При решении задач в высокочастотной области обычно исследуются волновые процессы распространения электромагнитных волн в пространстве или характеристики радиоэлектронных и СВЧ устройств таких как: антенны, резонаторы, волноводы, микрополосковые линии передач и т.п.

1.2 Типы анализа

В низкочастотной области электромагнитного поля можно выделить следующие типы возникающих задач, которые могут быть решены с помощью АРМ ЕМА:

- 1) Электростатика;
- 2) Электрокинетика;
- 3) Магнитостатика;
- 4) Переходные электромагнитные процессы;

Электростатическое расчет (Электростатика)

Средства программы АРМ ЕМА, используемые для анализа электрического поля, касаются двух областей электрических явлений: протекание постоянного тока (проводники), электростатика (диэлектрики). К типичным параметрам, представляющим интерес, относятся: плотность тока, напряженность электрического поля, распределение напряжений, тепловое действие тока, энергия и силы электрического поля, электростатическая емкость, сила тока и падение напряжения.

Могут решаться трехмерные задачи, возникающие при разработке различных устройств, таких как накопительные шины, линии электропередач, высоковольтные изоляторы, экранирующие кожухи, конденсаторы и т.п.

В качестве теоретической основы для анализа стационарного электрического поля в программе используется уравнение Лапласа. Основными неизвестными (узловыми степенями свободы), определяемыми в результате конечно-элементного решения, являются электрические потенциалы (напряже-

ния). По их значениям вычисляются остальные параметры.

Электростатическое расчет (Электростатика)

Анализ электростатических полей используется для расчета характеристик электрического поля и распределения потенциалов, обусловленных системой электрических зарядов или падением напряжений. Допускаются два вида нагрузок: разность потенциалов и плотность зарядов. Предполагается, что выполняется линейный анализ, т.е. параметры, характеризующие электрическое поле, линейно зависят от приложенного напряжения.

Решение состоит в получении величин электрических потенциалов в узлах, дает возможность найти напряженность электрического поля и плотность тока.

Расчет поля постоянных токов (Электрокинетика)

Программу АРМ ЕМА можно использовать для нахождения плотности тока и распределения электрических потенциалов (напряжения), возникающих в электрических цепях при протекании постоянного тока или за счет падения напряжения. В качестве входных параметров рассматриваются два вида нагрузок: ток и напряжение. Анализ предполагается линейным, т.е. величина электрического тока на отдельных участках цепи пропорциональна входному току.

Задача протекания постоянного электрического тока решается с использованием функции потенциала и сводится к вычислению электрических потенциалов (плотности тока или напряжений) в узлах модели.

Статические электромагнитные поля (Магнитостатика)

Анализ статического электромагнитного поля возможен для трехмерных задач в линейной постановке. Трехмерная задача магнитостатики является результатом минимизации функционала магнитной энергии, ассоциированного трехмерным вектором потенциала. Имеется возможность моделировать

проводники и постоянные магниты в виде источников.

Проводники моделируются конечными элементами или с помощью твердотельных примитивов в виде прямого или кругового стержня и витков катушки. Пользователь имеет возможность моделировать железные сердечники и немагнитные материалы (воздух).

Программа **АРМ ЕМА** предоставляет в распоряжение пользователя линейные магнитных веществ, включая значения магнитной проницаемости для изотропных и ортотропных материалов. При постпроцессорной обработке результатов имеется возможность получить картину вектором потенциала, плотность магнитного потока и напряженность магнитного поля.

Переменное нестационарное электромагнитное поле низкой частоты

Электромагнитный анализ можно выполнить для задач в трехмерной постановке. При анализе неустановившегося переходного процесса вычисляются векторы потенциала, индукция и напряженность магнитного поля, плотность потока и напряженность электромагнитного поля.

Для решения этих уравнений используется неявная схема интегрирования по времени Кранка-Никольсона. Схема интегрирования Кранка-Никольсона представляет собой дискретную процедуру, с помощью которой вектор потенциалов поля вычисляется в отдельных точках временного интервала.

Анализ для электромагнитного поля высокой частоты выполняется на основе полной системы уравнений Максвелла, т.е. с учетом распространения электромагнитных волн. Такой вид анализа требуется в тех случаях, когда длина волны сравнима с определяющими размерами устройства.

Важно понимать что для высокочастотного электромагнитного поля применяются «реберные» конечные элементы, дискретная связь у которых осуществляется не через узлы, а через ребра с которыми ассоциированы степени свободы – проекции вектора напряженности электрического поля на

ребро.

Для высокочастотного электромагнитного поля доступен модальный анализ.

Модальный анализ

Модальный анализ используется для определения собственных частот и форм колебаний для полых резонаторов. Анализ должен предшествовать любому динамическому расчету резонатора, так как знание основных мод и частот колебаний дает возможность адекватно характеризовать переходные процессы в системе.

Для решения задачи о собственных значениях используется метод Ланцоша. Модальный анализ можно использовать для определения резонансных свойств системы, в том числе с учетом диэлектрических и поверхностных потерь. При этом потери предполагаются малыми и не оказывающими влияния на собственные частоты системы.

2 Анализ в низкочастотной области

2.1 Электростатический расчет

При решении электростатической задачи считается, что все объекты стационарные (не изменяемые во времени), и нет тока в проводниках (то есть проводники находятся в состоянии электростатического равновесия). Все проводники, считаются идеальными и эквипотенциальными, следовательно, внутри проводников отсутствует электрическое поле – проводники не могут быть рассчитаны в данном виде расчета, расчет электростатической задачи проводится только для диэлектриков. Незвестная величина расчета – это электрический скалярный потенциал, через который затем вычисляется напряженность и индукция (смещение) электрического поля.

2.1.1 Построение расчетной модели

Для решения задач электростатики пользователю необходимо определить геометрию расчетной области, используя объемные конечные элементы первого порядка – четырехузловые (тетраэдры), шестиузловые (треугольные призмы) или восьмиузловые (гексаэдры). Для проведения расчета необходимо чтобы модель не содержала никаких других конечных элементов и была связанной, то есть была единым целым и не содержала отдельно отстоящих узлов.

Все материалы, которые задействованы в модели, должны иметь свойство – относительная (относительно электрической постоянной $\epsilon_0=8,854187817 \cdot 10^{-12}$ [Ф]/[м]) диэлектрическая проницаемость. В таблице 2.1 приведены доступные для пользователя способы задания данного свойства.

Таблица 2.1 – Относительная диэлектрическая проницаемость

Анизотропность	Единицы измерения	Способы задания	Доступные не зависящие переменные
Изотропный, Ортотропный	□	Постоянное значение, График, Таблица, Функция	Координата X Координата Y Координата Z

При задании ортотропного свойства следует учитывать, что направление осей ориентации совпадает с локальной системой координат объемного элемента для которого присвоен данный материал.

2.1.2 Задание нагрузок и граничных условий

Для моделирования задач электростатики пользователю доступны следующие виды нагрузок и граничных условий:

- 1) электрический заряд;
- 2) плотность электрического заряда;
- 3) электрический потенциал.

Сведения о данных объектах приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Электростатические нагрузки

Наименование	Тип	Единицы измерения	Объекты приложения	Способы задания	Доступные не зависящие переменные
Электрический заряд	Скалярный	[Кл]	Узлы	Постоянное значение, График, Таблица, Функция	Координата X Координата Y Координата Z
Плотность электрического заряда	Скалярный	[Кл]/[длина*] ³	Объемные элементы	Постоянное значение, График, Таблица, Функция	Координата X Координата Y Координата Z
Электрический потенциал	Скалярный	[В]	Узлы, Объемные элементы	Постоянное значение, График, Таблица, Функция	Координата X Координата Y Координата Z

*длина – определяется значением, выбранным в выпадающем списке *Длина* диалогового окна *Установки* на вкладке *Единицы*

Электрический заряд

Нагрузкой для задач электростатики является ***Электрический заряд***. При задании на группу узлов постоянного значения в каждый узел будет присвоено заданное значение. При задании на группу узлов переменного значения (график, таблица, функция) в каждый узел будет присвоено значение, определяемое координатами узла.

Если в одно ***Загружение*** входят несколько нагрузок этого типа, в которых содержится один и тот же узел, то в расчете будет учитываться для данного узла сумма значения из всех нагрузок этого типа данного ***Загружения***, в которые включен узел.

Плотность электрического заряда

Нагрузкой для задач электростатики является ***Электрический заряд***. При задании на группу объемных элементов постоянного значения в каждый узел всех выбранных объемных элементов будет присвоено некоторое* значение. При задании на группу объемных элементов переменного значения (график, таблица, функция) в каждый узел всех выбранных объемных элементов будет присвоено некоторое* значение, определяемое координатами узла.

Если в одно ***Загружение*** входят несколько нагрузок этого типа, в которых содержится один и тот же объемный элемент, то в расчете будет учитываться для данного объемный элемент сумма значения из всех нагрузок этого типа данного ***Загружения***, в которые включен объемный элемент.

*некоторое значение – определяемое как интегральный вес узла для заданной плотности.

Электрический потенциал

Граничным условием для задач электростатики является ***Электрический потенциал***. При задании на группу узлов постоянного значения в каж-

дый узел будет присвоено заданное значение. При задании на группу узлов переменного значения (график, таблица, функция) в каждый узел будет присвоено значение, определяемое координатами узла.

При задании на группу объемных элементов постоянного значения в каждый узел всех выбранных объемных элементов будет присвоено заданное значение. При задании на группу объемных элементов переменного значения (график, таблица, функция) в каждый узел всех выбранных объемных элементов будет присвоено значение, определяемое координатами узла.

Если в одно *Загружение* входят несколько нагрузок этого типа, в которых содержится один и тот же узел (объемный элемент), то в расчете будет учитываться для данного узла (объемного элемента) значения из последней созданной этого типа.

Все описанные типы нагрузок могут быть добавлены в документ путем выбора соответствующего пункта контекстного меню для узла *Электрические нагрузки* на панели *Объекты* (рисунок 2.1).

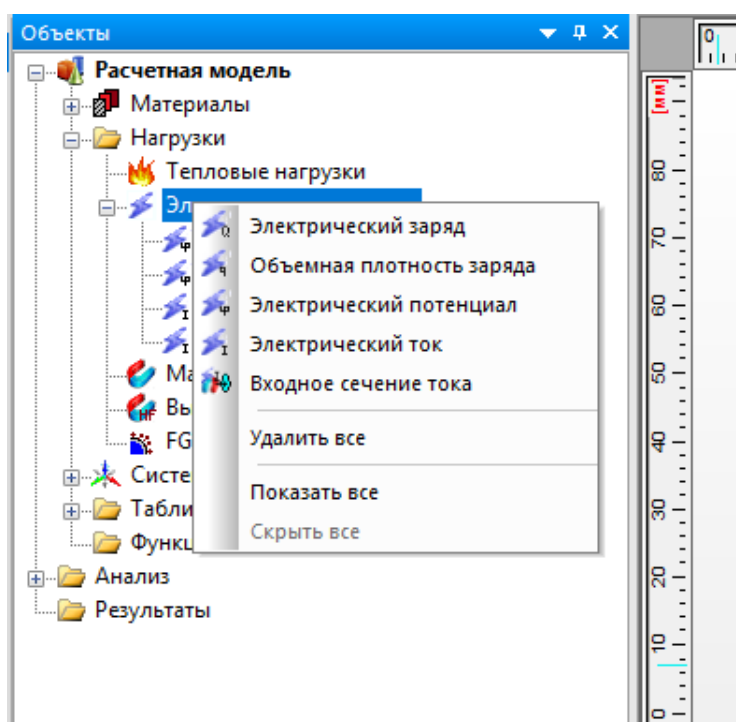


Рисунок 2.1 – Электростатические нагрузки

2.1.3 Проведение расчета

Для проведения *Электростатического расчета* необходимо в горизонтальном меню *Расчеты* выбрать пункт *Расчет...* после чего появится диалоговое окно *Расчет* (рисунок 2.2).

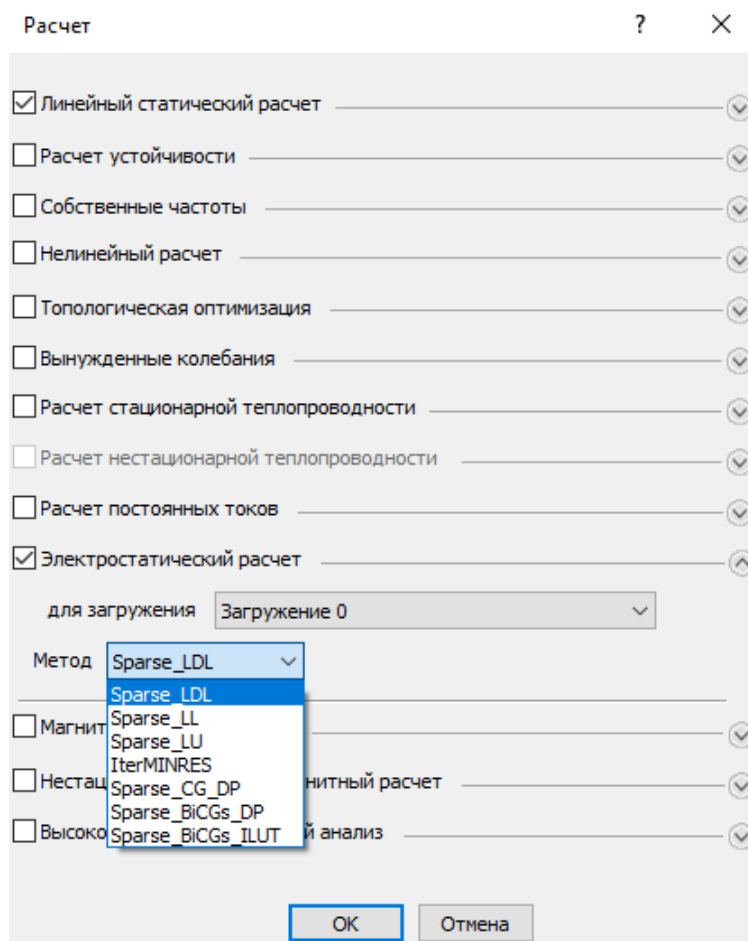


Рисунок 2.2 – Запуск электростатического расчета

В диалоговом окне *Расчет* пользователь должен отметить пункт *Электростатический расчет*, в выпадающем списке *для загрузки* выбрать *Загрузка*, для которого он хочет произвести расчет, в выпадающем списке *Метод* выбрать метод которым будет решать система линейных алгебраических уравнений для поставленной дискретной задачи. После нажатия кнопки *ОК* будет произведен *Электростатический расчет*.

В случае если пользователь в *Загрузении* для которого проводится расчет не задал ни одной нагрузки типа *Электрический потенциал*, в котором включен хотя бы один узел или объемный элемент, то полученное им

решение будет являться неоднозначным (с точностью до постоянного слагаемого). Кроме этого матрица системы линейных алгебраических уравнений для поставленной дискретной задачи, скорее всего будет плохо обусловленной, что может привести к невозможности решения задачи.

Выбор метода решения системы линейных алгебраических уравнений для поставленной дискретной задачи должен основываться на следующих положениях:

1) Метод `Sparse_LL` – предназначен для систем линейных алгебраических уравнений с симметричной положительно определенной матрицей, основанный на разложении Холецкого.

2) Метод `Sparse_LDL` – предназначен для систем линейных алгебраических уравнений с симметричной положительно неопределенной матрицей, основанный на LDL разложении.

3) Метод `Sparse_LU` – предназначен для систем линейных алгебраических уравнений с несимметричной матрицей, основанный на LU разложении.

4) Метод `IterMINRES` – итерационный метод, предназначенный для задач систем линейных алгебраических уравнений с симметричной положительно неопределенной матрицей, в частности с вырожденной.

5) Методы `Sparse_CG_DP`, `Sparse_BiCGs_DP`, `Sparse_BiCGs_ILUT` – итерационные методы, предъявляют меньшие требования к системе при большой размерности задачи. В некоторых случаях итерационные методы позволяют уменьшить время расчета.

В большинстве случаев все задачи электростатики сводятся к системам линейных алгебраических уравнений положительно определенной матрицей. Поэтому `Sparse_LL` обычно более предпочтителен, однако в ряде случаев (достаточно малые коэффициенты на главной диагонали матрицы, обусловленные некачественной конечно-элементной сеткой или свойствами материала), матрицей может быть положительно неопределенной. При этом метод `Sparse_LL` может не решить задачу (о чем пользователь получит сообщение),

тогда можно выбрать методы Sparse_LDL или Sparse_LU, которые могут решить проблему. Главная особенность методов Sparse_LL, Sparse_LDL и Sparse_LU состоит в том, что для их работы (выполнения разложения) необходимо определенное количество оперативной памяти, которое растет с размерностью решаемой задачи. Причем «жадность» к оперативной памяти методов нарастает в следующей последовательности (Sparse_LL→Sparse_LDL→Sparse_LU). Поэтому возможны такие случаи, когда для решаемой задачи не хватает оперативной памяти (о чем пользователь получит сообщение), в этом случае целесообразно выбрать метод IterMINRES, который намного менее требовательный к размеру оперативной памяти, но ввиду итерационной сущности является более медленным.

2.1.4 Просмотр результатов

Чтобы просмотреть результаты расчета необходимо в горизонтальном меню **Результаты** выбрать пункт **Карта результатов...** В появившемся диалоге необходимо выбрать **Тип расчета – Электростатический расчет** (рисунок 2.3).

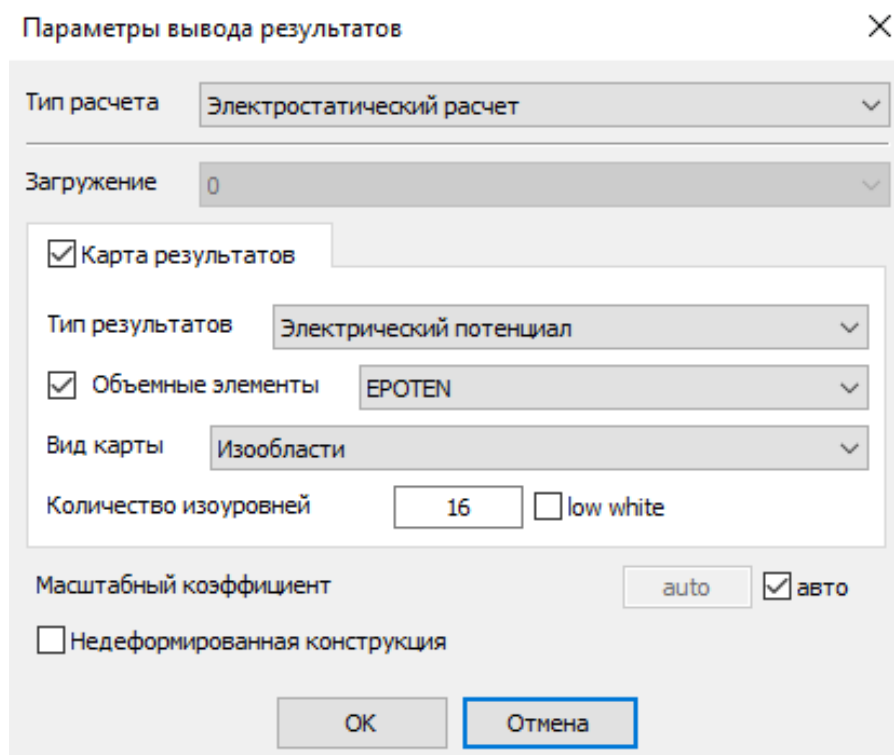


Рисунок 2.3 – Результаты электростатического расчета

Пользователю для просмотра доступно пять типов карт результатов:

- 1) Электрический потенциал [В] (контурная);
- 2) Напряженность электрического поля [В]/[длина*] (контурная);
- 3) Векторная напряженность электрического поля [В]/[длина*] (векторная);
- 4) Электрическая индукция [Кл]/[длина*]² (контурная);
- 5) Векторная электрическая индукция [Кл]/[длина*]² (векторная).

*длина – определяется значением, выбранным в выпадающем списке *Длина* диалогового окна *Установки* на вкладке *Единицы*

Подробнее о работе с картами результатов см. раздел «Результаты» в руководстве пользователя.

2.2 Расчет поля постоянных токов

При решении задачи расчета поля постоянных токов считается, что все объекты стационарные (не изменяемые во времени), токи в проводниках скомпенсированы (то есть сумма всех внешних токов равна нулю). Диэлектрики не могут быть рассчитаны в данном виде расчета, расчет поля постоянных токов только для проводников. Незвестная величина расчета – это электрический скалярный потенциал, через который затем вычисляется напряженность электрического поля и плотность электрического тока.

2.2.1 Построение расчетной модели

Для решения задач расчета поля постоянных токов пользователю необходимо определить геометрию расчетной области, используя объемные конечные элементы первого порядка – четырехузловые (тетраэдры), шестиузловые (треугольные призмы) или восьмиузловые (гексаэдры). Для проведения расчета необходимо чтобы модель не содержала никаких других конечных элементов и была связанной, то есть была единым целым и не содержала отдельно отстоящих узлов.

Все материалы, которые задействованы в модели, должны иметь свойство – удельная электрическая проводимость. В таблице 2.3 приведены доступные для пользователя способы задания данного свойства.

Таблица 2.3 – Удельная электрическая проводимость

Анизотропность	Единицы измерения	Способы задания	Доступные не зависящие переменные
Изотропный, Ортотропный	$1/([\text{Ом}] \cdot [\text{длина}^*])$	Постоянное значение, График, Таблица, Функция	Координата X Координата Y Координата Z

*длина – определяется значением, выбранным в выпадающем списке *Длина* диалогового окна *Установки* на вкладке *Единицы*

При задании ортотропного свойства следует учитывать, что направление

осей ориентации совпадает с локальной системой координат объемного элемента для которого присвоен данный материал.

2.2.2 Задание нагрузок и граничных условий

Для моделирования задач расчет поля постоянных токов пользователю доступны следующие виды нагрузок и граничных условий:

- 1) электрический ток;
- 2) электрический потенциал.

Сведения о данных объектах приведены в таблице 2.4

Таблица 2.4 – Нагрузки поля постоянного тока

Наименование	Тип	Единицы измерения	Объекты приложения	Способы задания	Доступные независимые переменные
Электрический ток	Скалярный	[Кл]	Узлы	Постоянное значение	-
Электрический потенциал	Скалярный	[В]	Узлы, Объемные элементы	Постоянное значение, График, Таблица, Функция	Координата X Координата Y Координата Z

Электрический ток

Нагрузкой для задач поля постоянных токов является *Электрический ток*. При задании на группу узлов постоянного значения в каждый узел будет присвоено заданное значение. Однако данная нагрузка является по сути точечной и рекомендуется ее задавать на один узел..

Если в одно *Загружение* входят несколько нагрузок этого типа, в которых содержится один и тот же узел, то в расчете будет учитываться для данного узла сумма значения из всех нагрузок этого типа данного *Загружения*, в которые включен узел.

Электрический потенциал

Граничным условием для задач поля постоянных токов является *Элек-*

трический потенциал. При задании на группу узлов постоянного значения в каждый узел будет присвоено заданное значение. При задании на группу узлов переменного значения (график, таблица, функция) в каждый узел будет присвоено значение, определяемое координатами узла.

При задании на группу объемных элементов постоянного значения в каждый узел всех выбранных объемных элементов будет присвоено заданное значение. При задании на группу объемных элементов переменного значения (график, таблица, функция) в каждый узел всех выбранных объемных элементов будет присвоено значение, определяемое координатами узла.

Если в одно **Загружение** входят несколько нагрузок этого типа, в которых содержится один и тот же узел (объемный элемент), то в расчете будет учитываться для данного узла (объемного элемента) значения из последней созданной этого типа.

Все описанные типы нагрузок могут быть добавлены в документ путем выбора соответствующего пункта контекстного меню для узла **Электрические нагрузки** на панели **Объекты** (рисунок 2.1).

2.2.3 Проведение расчета

Для проведения **Расчета постоянных токов** необходимо в горизонтальном меню **Расчеты** выбрать пункт **Расчет...** после чего появится диалоговое окно **Расчет**. (рисунок 2.4).

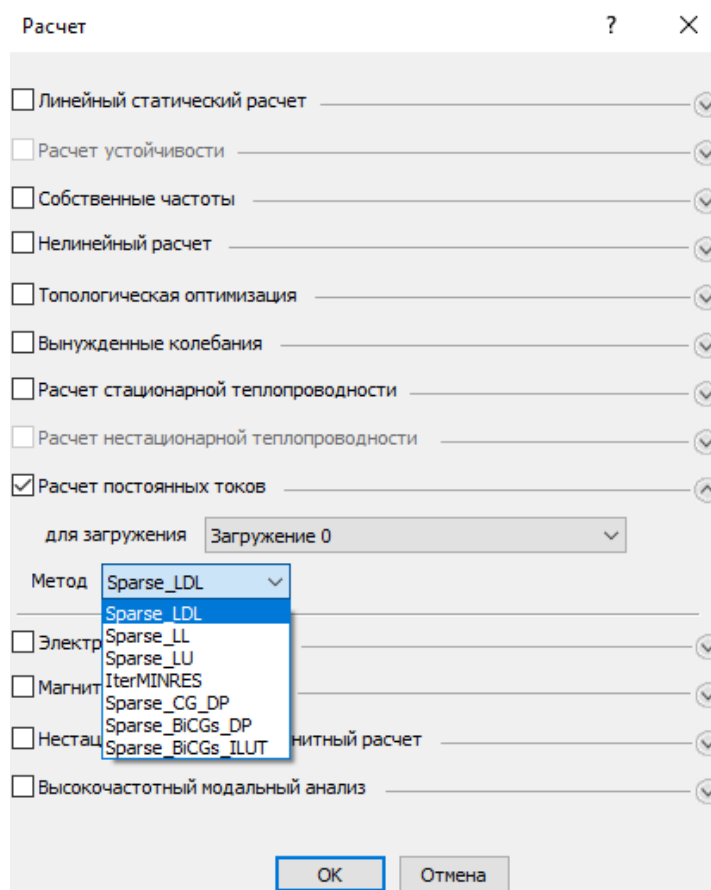


Рисунок 2.4 – Запуск расчета постоянных токов

В диалоговом окне *Расчет* пользователь должен отметить пункт *Расчет постоянных токов*, в выпадающем списке *для загрузки* выбрать *Загрузка 0*, для которого он хочет произвести расчет, в выпадающем списке *Метод* выбрать метод которым будет решать система линейных алгебраических уравнений для поставленной дискретной задачи. После нажатия кнопки *ОК* будет произведен *Расчет постоянных токов*.

В случае если пользователь в *Загрузке* для которого проводится расчет не задал ни одной нагрузки типа *Электрический потенциал*, в котором включен хотя бы один узел или объемный элемент, то полученное им решение будет являться неоднозначным (с точностью до постоянного слагаемого). Кроме этого матрица системы линейных алгебраических уравнений для поставленной дискретной задачи, скорее всего будет плохо обусловленной, что может привести к невозможности решения задачи.

О выборе метода решения системы линейных алгебраических уравнений

для поставленной дискретной задачи см п. 2.1.3.

2.2.4 Просмотр результатов

Чтобы просмотреть результаты расчета необходимо в горизонтальном меню **Результаты** выбрать пункт **Карта результатов...** В появившемся диалоге необходимо выбрать **Тип расчета – Расчет поля постоянных токов** (рисунок 2.5).

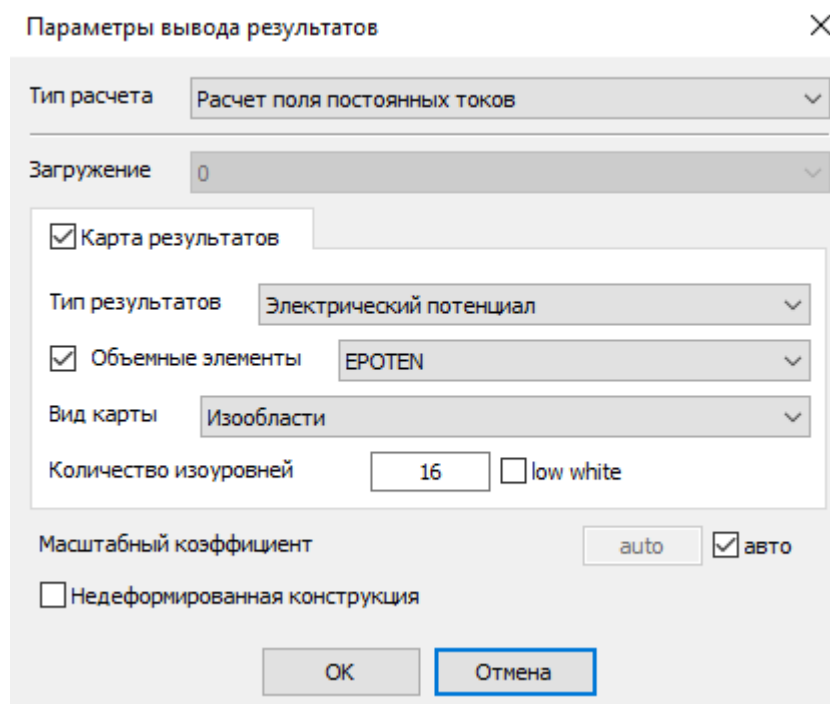


Рисунок 2.5 – Результаты расчета поля постоянных токов

Пользователю для просмотра доступно пять типов карт результатов:

- 1) Электрический потенциал [В] (контурная);
- 2) Напряженность электрического поля [В]/[длина*] (контурная);
- 3) Векторная напряженность электрического поля [В]/[длина*] (векторная);
- 4) Плотность тока [А]/[длина*]² (контурная);
- 5) Векторная плотность тока [А]/[длина*]² (векторная).

*длина – определяется значением, выбранным в выпадающем списке **Длина** диалогового окна **Установки** на вкладке **Единицы**

Подробнее о работе с картами результатов см. раздел «Результаты» в руководстве пользователя.

2.3 Магнитоэстатический расчет

При решении магнитоэстатической задачи считается, что все объекты стационарные (не изменяемые во времени). Неизвестная величина расчета – это магнитный векторный потенциал, через который затем вычисляется напряженность и индукция магнитного поля.

2.3.1 Построение расчетной модели

Для решения задач магнитоэстатики пользователю необходимо определить геометрию расчетной области, используя объемные конечные элементы первого порядка – четырехузловые (тетраэдры), шестиузловые (треугольные призмы) или восьмиузловые (гексаэдры). Для проведения расчета необходимо чтобы модель не содержала никаких других конечных элементов и была связанной, то есть была единым целым и не содержала отдельно отстоящих узлов.

Все материалы, которые задействованы в модели, должны иметь свойство – относительная (относительно магнитной постоянной $\mu_0=4\pi\cdot 10^{-7}$ [Гн]/[м]) магнитная проницаемость. В таблице 2.5 приведены доступные для пользователя способы задания данного свойства.

Таблица 2.5 – Относительная магнитная проницаемость

Анизотропность	Единицы измерения	Способы задания	Доступные не зависящие переменные
Изотропный, Ортотропный	□	Постоянное значение, График, Таблица, Функция	Координата X Координата Y Координата Z

При задании ортотропного свойства следует учитывать, что направление осей ориентации совпадает с локальной системой координат объемного элемента для которого присвоен данный материал.

2.3.2 Задание нагрузок и граничных условий

Для моделирования задач электростатики пользователю доступны следующие виды нагрузок и граничных условий:

- 1) плотность электрического тока;
- 2) вектор остаточной намагниченности;
- 3) векторный магнитный потенциал.

Сведения о данных объектах приведены в таблице 2.6

Таблица 2.6 – Магнитостатические нагрузки

Наименование	Тип	Единицы измерения	Объекты приложения	Способы задания	Доступные независимые переменные
Плотность электрического тока	Векторный	[А] / [длина*] ²	Объемные элементы	Постоянное значение, График, Таблица, Функция	Координата X Координата Y Координата Z
Вектор остаточной намагниченности	Векторный	[А]/[длина*]	Объемные элементы	Постоянное значение, График, Таблица, Функция	Координата X Координата Y Координата Z
Векторный магнитный потенциал	Векторный	[Вб] / [длина*]	Узлы, Объемные элементы	Постоянное значение, График, Таблица, Функция	Координата X Координата Y Координата Z

*длина – определяется значением, выбранным в выпадающем списке *Длина* диалогового окна *Установки* на вкладке *Единицы*

Плотность электрического тока

Нагрузкой для задач магнитостатики является ***Плотность электрического тока***, применяется для части расчетной модели, которая является проводником стоком. При задании на группу объемных элементов постоянного значения в каждый узел всех выбранных объемных элементов будет присвоено некоторое* значение. При задании на группу объемных элементов переменного значения (график, таблица, функция) в каждый узел всех выбранных объемных элементов будет присвоено некоторое* значение, определяемое

координатами узла.

Если в одно *Загружение* входят несколько нагрузок этого типа, в которых содержится один и тот же объемный элемент, то в расчете будет учитываться для данного объемный элемент сумма значения из всех нагрузок этого типа данного *Загружения*, в которые включен объемный элемент.

**некоторое значение – определяемое как интегральный вес узла для заданной плотности.*

Вектор остаточной намагниченности

Нагрузкой для задач магнитостатики является ***Вектор остаточной намагниченности***, применяется для части расчетной модели, которая является постоянным магнитом. При задании на группу объемных элементов постоянного значения в каждый узел всех выбранных объемных элементов будет присвоено некоторое* значение. При задании на группу объемных элементов переменного значения (график, таблица, функция) в каждый узел всех выбранных объемных элементов будет присвоено некоторое* значение, определяемое координатами узла.

Если в одно *Загружение* входят несколько нагрузок этого типа, в которых содержится один и тот же объемный элемент, то в расчете будет учитываться для данного объемный элемент сумма значения из всех нагрузок этого типа данного *Загружения*, в которые включен объемный элемент.

**некоторое значение – определяемое как интегральный вес узла для заданной плотности.*

Векторный магнитный потенциал

Граничным условием для задач магнитостатики является ***Векторный магнитный потенциал***, для данной векторной нагрузки пользователь, может задавать не все компоненты вектора. Не заданные компоненты будут рассчитаны в ходе магнитостатического расчета. При задании на группу узлов постоянного значения в каждый узел будет присвоено заданное значение. При задании на группу узлов переменного значения (график, таблица, функция) в каждый узел будет присвоено значение, определяемое координатами узла.

При задании на группу объемных элементов постоянного значения в каждый узел всех выбранных объемных элементов будет присвоено заданное значение. При задании на группу объемных элементов переменного значения (график, таблица, функция) в каждый узел всех выбранных объемных элементов будет присвоено значение, определяемое координатами узла.

Если в одно *Загружение* входят несколько нагрузок этого типа, в которых содержится один и тот же узел (объемный элемент), то в расчете будет учитываться для данного узла (объемного элемента) значения из последней созданной этого типа.

Для корректной постановки задачи касательные компоненты *Векторного магнитного потенциала* на внешних поверхностях модели должны быть заданы постоянным значением 0.

Все описанные типы нагрузок могут быть добавлены в документ путем выбора соответствующего пункта контекстного меню для узла *Магнитные нагрузки* на панели *Объекты* (рисунок 2.6).

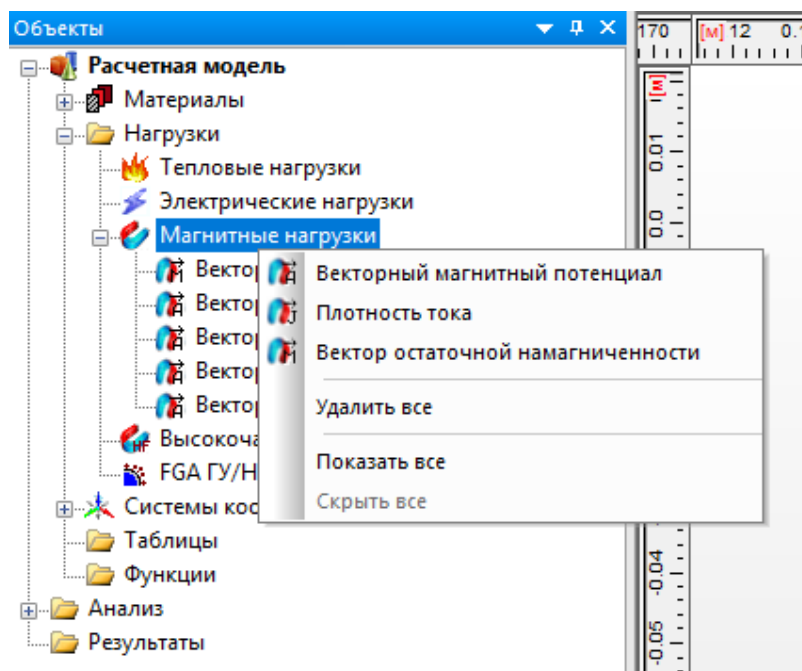


Рисунок 2.6 – Магнитостатические нагрузки

2.3.3 Проведение расчета

Для проведения *Магнитоэлектростатического расчета* необходимо в горизонтальном меню *Расчеты* выбрать пункт *Расчет...* после чего появится диалоговое окно *Расчет*. (рисунок 2.7).

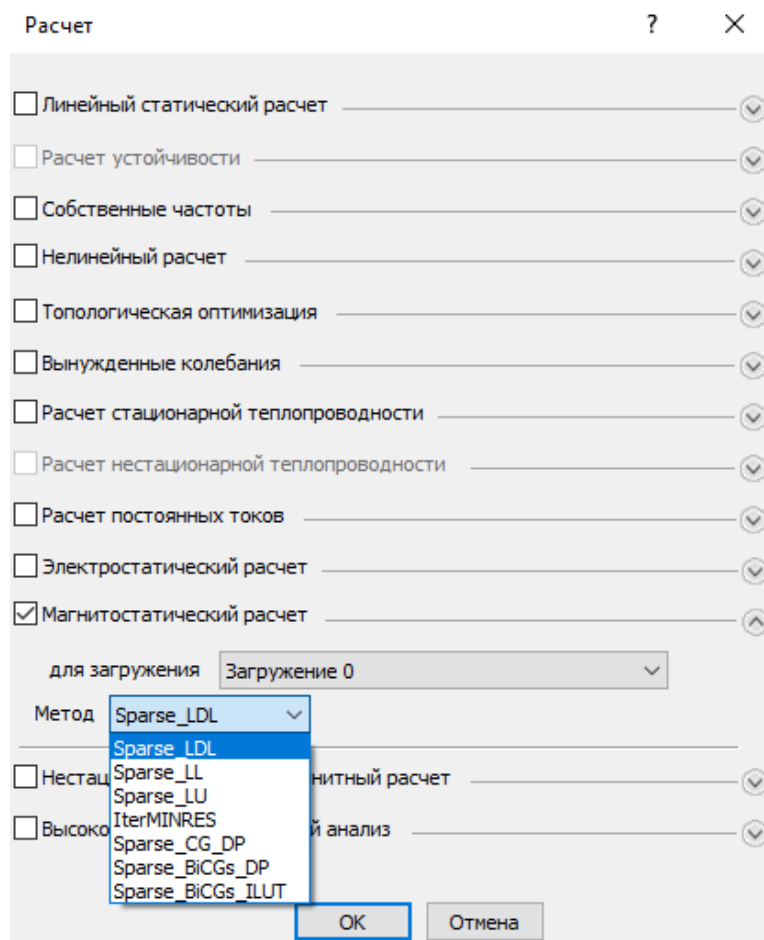


Рисунок 2.7 – Запуск магнитоэлектростатического расчета

В диалоговом окне *Расчет* пользователь должен отметить пункт *Магнитоэлектростатический расчет*, в выпадающем списке *для загрузки* выбрать *Загрузка*, для которого он хочет произвести расчет, в выпадающем списке *Метод* выбрать метод которым будет решать система линейных алгебраических уравнений для поставленной дискретной задачи. После нажатия кнопки *OK* будет произведен *Магнитоэлектростатический расчет*.

В случае если пользователь в *Загрузке* для которого проводится расчет не задал ни одной нагрузки типа *Векторный магнитный потенциал*, в котором включен хотя бы один узел или объемный элемент, то полученное

им решение будет являться неоднозначным (с точностью до постоянного слагаемого). Кроме этого матрица системы линейных алгебраических уравнений для поставленной дискретной задачи, скорее всего будет плохо обусловленной, что может привести к невозможности решения задачи.

О выборе метода решения системы линейных алгебраических уравнений для поставленной дискретной задачи см п. 2.1.3.

2.3.4 Просмотр результатов

Чтобы просмотреть результаты расчета необходимо в горизонтальном меню **Результаты** выбрать пункт **Карта результатов...** В появившемся диалоге необходимо выбрать *Тип расчета* – **Магнитоэстатический расчет** (рисунок 2.8).

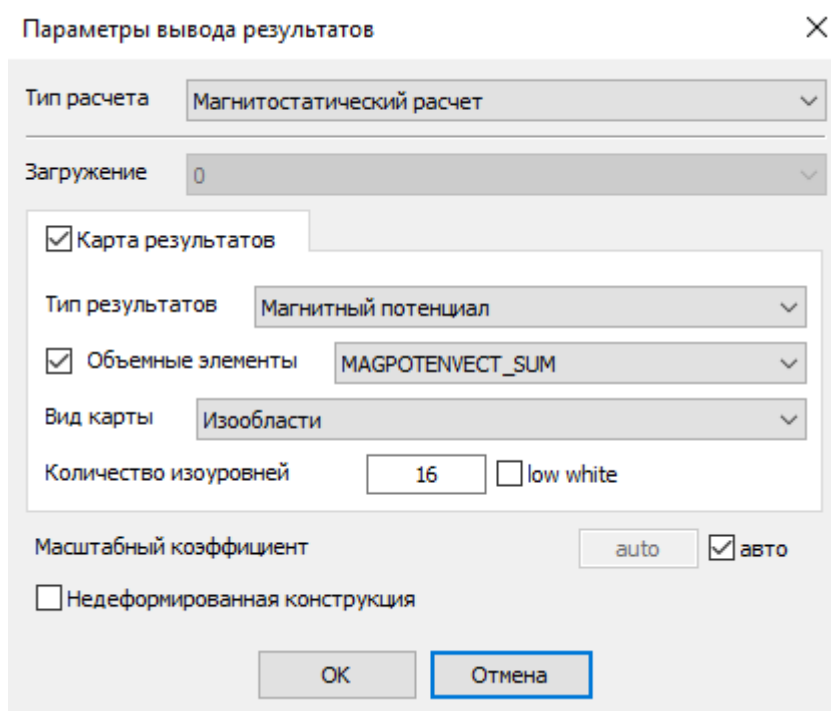


Рисунок 2.8 – Результаты электростатического расчета

Пользователю для просмотра доступно шесть типов карт результатов:

- 1) Магнитный потенциал [Вб]/ [длина*] (контурная);
- 2) Векторный магнитный потенциал [Вб]/ [длина*] (векторная);
- 3) Магнитная индукция [Тл] (контурная);
- 4) Векторная магнитная индукция [Тл] (векторная);

- 5) Напряженность магнитного поля $[A]/[длина^*]$ (контурная);
- 6) Векторная напряженность магнитного поля $[A]/[длина^*]$ (векторная).

*длина – определяется значением, выбранным в выпадающем списке *Длина* диалогового окна *Установки* на вкладке *Единицы*

Подробнее о работе с картами результатов см. раздел «Результаты» в руководстве пользователя «Работа с деревом проекта».

2.4 Нестационарный электромагнитный расчет

При решении нестационарных задач электромагнитного поля считается, что все объекты могут изменяться во времени. В модели могут присутствовать магнетики, проводники с заданной (известной) плотностью тока, проводники с неизвестной плотностью тока, постоянные магниты. Неизвестные величины расчета – это магнитный векторный потенциал и интеграл по времени электрического потенциала, через которые затем вычисляется напряженность и индукция магнитного поля, а также напряженность электрического поля и плотность электрического тока (для среды с ненулевой электрической проводимостью).

2.4.1 Построение расчетной модели

Для решения нестационарных задач электромагнитного поля пользователю необходимо определить геометрию расчетной области, используя объемные конечные элементы первого порядка – четырехузловые (тетраэдры), шестиузловые (треугольные призмы) или восьмиузловые (гексаэдры). Для проведения расчета необходимо чтобы модель не содержала никаких других конечных элементов и была связанной, то есть была единым целым и не содержала отдельно отстоящих узлов.

Все материалы, которые задействованы в модели, должны иметь два свойства: 1) относительная (относительно магнитной постоянной $\mu_0=4\pi\cdot 10^{-7}$ [Гн]/[м]) магнитная проницаемость (таблица 2.5); 2) удельная электрическая проводимость (таблица 2.3).

2.4.2 Задание нагрузок и граничных условий

Для моделирования нестационарных задач электромагнитного поля пользователю доступны следующие виды нагрузок и граничных условий:

- 1) интеграл по времени электрического потенциала;
- 2) входное сечение тока;
- 3) плотность электрического тока;

- 4) вектор остаточной намагниченности;
 5) векторный магнитный потенциал.

Сведения о данных объектах приведены в таблице 2.7

Таблица 2.7 – Электростатические нагрузки

Наименование	Тип	Единицы измерения	Объекты приложения	Способы задания	Доступные не зависящие переменные
Интеграл по времени электрического потенциала**	Скалярный	[В]·[с]	Узлы, Объемные элементы	Постоянное значение, График, Таблица, Функция	Координата X Координата Y Координата Z
Входное сечение тока	Скалярный	[А]	Узлы,	Постоянное значение, График, Таблица, Функция	Время
Плотность электрического тока	Векторный	[А]/[длина*] ²	Объемные элементы	Постоянное значение, График, Таблица, Функция	Координата X Координата Y Координата Z
Вектор остаточной намагниченности	Векторный	[А]/[длина*]	Объемные элементы	Постоянное значение, График, Таблица, Функция	Координата X Координата Y Координата Z
Векторный магнитный потенциал	Векторный	[Вб]/[длина*]	Узлы, Объемные элементы	Постоянное значение, График, Таблица, Функция	Координата X Координата Y Координата Z

*длина – определяется значением, выбранным в выпадающем списке *Длина* диалогового окна *Установки* на вкладке *Единицы*

**Интеграл по времени электрического потенциала – задается также как и электрический потенциал (является объектом того же типа), в интерфейсе программы размерность [В]

Интеграл по времени электрического потенциала

Граничным условием для нестационарных задач электромагнитного поля является ***Интеграл по времени электрического потенциала***. При задании на группу узлов постоянного значения в каждый узел будет присвоено

заданное значение. При задании на группу узлов переменного значения (график, таблица, функция) в каждый узел будет присвоено значение, определяемое координатами узла.

При задании на группу объемных элементов постоянного значения в каждый узел всех выбранных объемных элементов будет присвоено заданное значение. При задании на группу объемных элементов переменного значения (график, таблица, функция) в каждый узел всех выбранных объемных элементов будет присвоено значение, определяемое координатами узла.

Если в одно *Загружение* входят несколько нагрузок этого типа, в которых содержится один и тот же узел (объемный элемент), то в расчете будет учитываться для данного узла (объемного элемента) значения из последней созданной этого типа.

Для не токопроводящих областей модели данное граничное условие должно быть применено с постоянным значением 0.

Входное сечение тока

Нагрузкой для нестационарных задач электромагнитного поля является ***Входное сечение тока***, применяется для определения сечения проводника с неизвестной плотностью тока, на противоположном сечении необходимо задать на все узлы ***Интеграл по времени электрического потенциала*** с постоянным значением 0.

Плотность электрического тока

Нагрузкой для нестационарных задач электромагнитного поля является ***Плотность электрического тока***, применяется для части расчетной модели, которая является проводником стоком. При задании на группу объемных элементов постоянного значения в каждый узел всех выбранных объемных элементов будет присвоено некоторое* значение. При задании на группу объемных элементов переменного значения (график, таблица, функция) в каждый узел всех выбранных объемных элементов будет присвоено некото-

рое* значение, определяемое координатами узла.

Если в одно *Загружение* входят несколько нагрузок этого типа, в которых содержится один и тот же объемный элемент, то в расчете будет учитываться для данного объемный элемент сумма значения из всех нагрузок этого типа данного *Загружения*, в которые включен объемный элемент.

**некоторое значение – определяемое как интегральный вес узла для заданной плотности.*

Вектор остаточной намагниченности

Нагрузкой для нестационарных задач электромагнитного поля является ***Вектор остаточной намагниченности***, применяется для части расчетной модели, которая является постоянным магнитом. При задании на группу объемных элементов постоянного значения в каждый узел всех выбранных объемных элементов будет присвоено некоторое* значение. При задании на группу объемных элементов переменного значения (график, таблица, функция) в каждый узел всех выбранных объемных элементов будет присвоено некоторое* значение, определяемое координатами узла.

Если в одно *Загружение* входят несколько нагрузок этого типа, в которых содержится один и тот же объемный элемент, то в расчете будет учитываться для данного объемный элемент сумма значения из всех нагрузок этого типа данного *Загружения*, в которые включен объемный элемент.

**некоторое значение – определяемое как интегральный вес узла для заданной плотности.*

Векторный магнитный потенциал

Граничным условием для нестационарных задач электромагнитного поля является ***Векторный магнитный потенциал***, для данной векторной нагрузки пользователь, может задавать не все компоненты вектора. Не заданные компоненты будут рассчитаны входе магнитостатического расчета. При задании на группу узлов постоянного значения в каждый узел будет присвоено заданное значение. При задании на группу узлов переменного значения (график, таблица, функция) в каждый узел будет присвоено значение, определяемое координатами узла.

При задании на группу объемных элементов постоянного значения в каждый узел всех выбранных объемных элементов будет присвоено заданное значение. При задании на группу объемных элементов переменного значения (график, таблица, функция) в каждый узел всех выбранных объемных элементов будет присвоено значение, определяемое координатами узла.

Если в одно *Загружение* входят несколько нагрузок этого типа, в которых содержится один и тот же узел (объемный элемент), то в расчете будет учитываться для данного узла (объемного элемента) значения из последней созданной этого типа.

Для корректной постановки задачи касательные компоненты *Векторного магнитного потенциала* на внешних поверхностях модели должны быть заданы постоянным значением 0.

Все описанные типы нагрузок могут быть добавлены в документ путем выбора соответствующего пункта контекстного меню для узла *Электрические нагрузки* или для узла *Магнитные нагрузки* на панели *Объекты* или (рисунок 2.9).

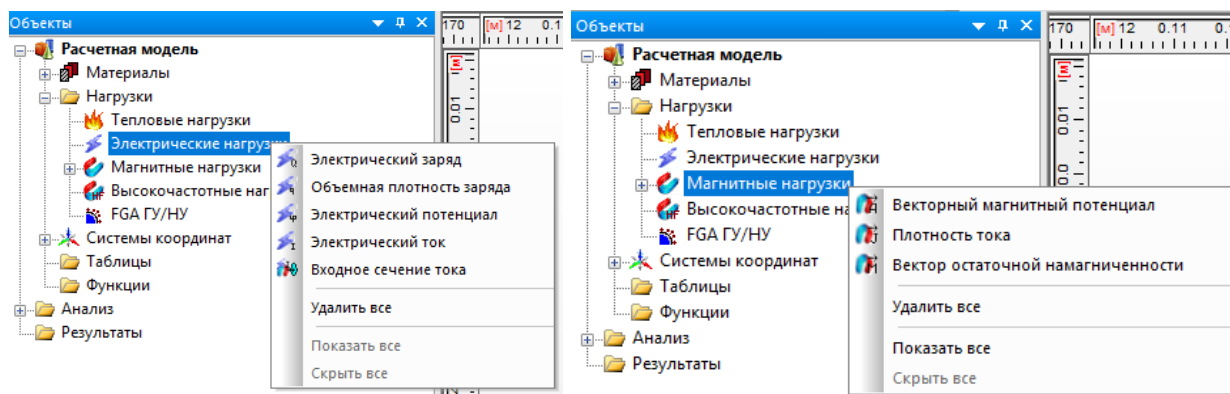


Рисунок 2.9 – Нагрузки для нестационарных задач электромагнитного поля

2.4.3 Проведение расчета

Для проведения *Нестационарного электромагнитного расчета* необходимо в горизонтальном меню *Расчеты* выбрать пункт *Расчет...* после чего появится диалоговое окно *Расчет*. (рисунок 2.10).

В диалоговом окне *Расчет* пользователь должен отметить пункт *Не-*

стационарный электромагнитный расчет, в выпадающем списке *для загрузки* выбрать *Загрузка*, для которого он хочет произвести расчет, в поле *Интервал: 0* ввести положительное значение, которое определяет время окончания моделирования. В поле *Моментов времени* пользователь должен ввести положительное целое значение, которое определяет сколько равномерных интервалов будет разбито время моделирования. В поле *Параметр схемы интегрирования Theta[0; 1]* пользователь должен ввести положительное значение в диапазоне [0; 1]. После нажатия кнопки **ОК** будет произведен *Нестационарный электромагнитный расчет*.

Расчет ? X

- Линейный статический расчет
- Расчет устойчивости
- Собственные частоты
- Нелинейный расчет
- Топологическая оптимизация
- Вынужденные колебания
- Расчет стационарной теплопроводности
- Расчет нестационарной теплопроводности
- Расчет постоянных токов
- Электростатический расчет
- Магнитостатический расчет
- Нестационарный электромагнитный расчет

для загрузки: Загрузка 0

Интервал : 0 [с] Моментов времени

Параметр схемы интегрирования Theta [0; 1]

Высокочастотный модальный анализ

ОК Отмена

Рисунок 2.10 – Запуск нестационарного электромагнитного расчета

Параметр схемы интегрирования теоретически [0; 1], определяет однослойный метод интегрирования уравнений по времени. Безусловно устойчи-

вые схемы для диапазона [0.5; 1], однако и для них при достаточно большом шаге возможны осцилляции решения. Ниже приведены конкретные методы интегрирования для некоторых значений параметра:

0 – метод Эйлера с прямым шагом по времени (с разностью вперед) (классическая схема численного интегрирования дифференциальных уравнений первого порядка);

1 – метод Эйлера с обратным шагом по времени (с разностью назад);

0,5 – метод Кранка-Николсона (с центральной разностью);

2/3 – метод Галеркина.

При наличии в модели постоянных магнитов и областей с заданной плотностью тока, на нескольких первых шагах интегрирования возможно получение осцилляций в решении это связано с тем, что задача решается с тривиальными начальными условиями, вследствие чего компоненты электромагнитного поля изменяются скачкообразно.

2.4.4 Просмотр результатов

Чтобы просмотреть результаты расчета необходимо в горизонтальном меню **Результаты** выбрать пункт **Карта результатов...** В появившемся диалоге необходимо выбрать **Тип расчета – Нестационарный электромагнитный расчет** (рисунок 2.11).

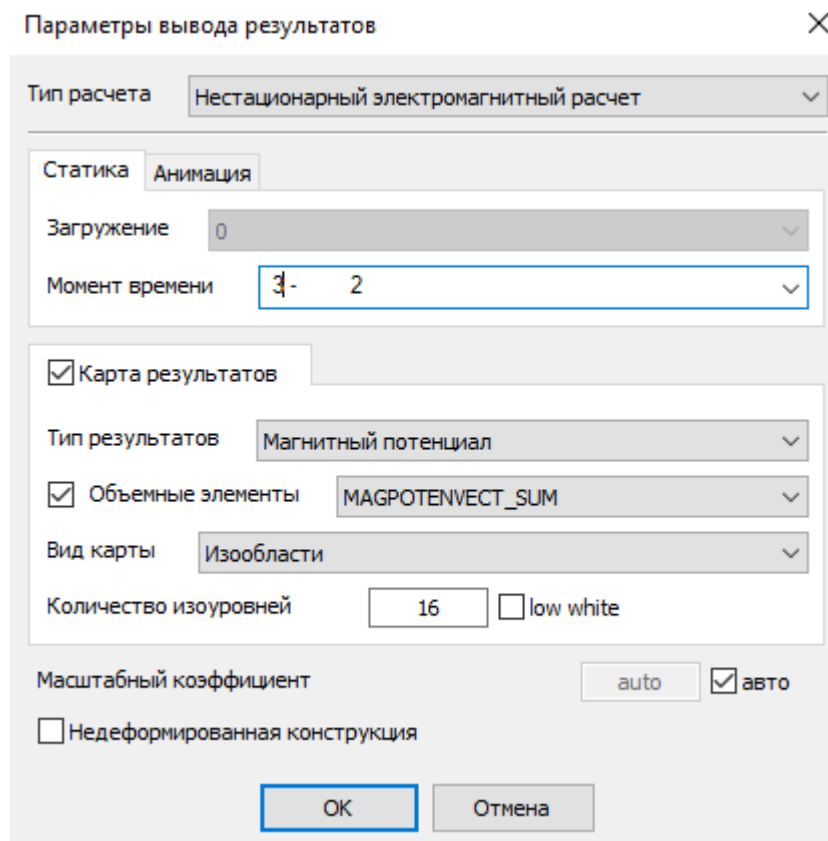


Рисунок 2.11 – Результаты нестационарного электромагнитного расчета

Пользователю для просмотра доступно одиннадцать типов карт результатов:

- 1) Электрический потенциал [В] (контурная);
- 2) Напряженность электрического поля [В]/[длина*] (контурная);
- 3) Векторная напряженность электрического поля [В]/[длина*] (векторная);
- 4) Плотность тока [А]/[длина*]² (контурная);
- 5) Векторная плотность тока [А]/[длина*]² (векторная).
- 6) Магнитный потенциал [Вб]/ [длина*] (контурная);
- 7) Векторный магнитный потенциал [Вб]/ [длина*] (векторная);
- 8) Магнитная индукция [Тл] (контурная);
- 9) Векторная магнитная индукция [Тл] (векторная);
- 10) Напряженность магнитного поля [А]/[длина*] (контурная);
- 11) Векторная напряженность магнитного поля [А]/[длина*] (векторная).

*длина – определяется значением, выбранным в выпадающем списке *Длина* диалогового окна *Установки* на вкладке *Единицы*

У пользователя есть возможность анимировать каждый тип карты результатов.

Подробнее о работе с картами результатов см. раздел «Результаты» в руководстве пользователя.

3 Анализ в высокочастотной области

3.1 Высокочастотный модальный анализ

Высокочастотный модальный анализ предназначен для расчета собственных частот (частот среза) и форм электромагнитных структур (волноводы, резонаторы), работающих на высоких частотах (~1 МГц~10 ГГц).

При решении данного типа задач считается что затухания волновых процессов нет. Незвестная величина расчета – это проекция вектора напряженности электрического поля на «ребра» сетки, через которую затем вычисляется напряженности электрического и магнитного поля.

3.1.1 Построение расчетной модели

Для решения задач расчета собственных частот электромагнитных структур пользователю необходимо определить геометрию расчетной области, используя объемные конечные элементы первого порядка – четырехузловые (тетраэдры), шестиузловые (треугольные призмы) или восьмиузловые (гексаэдры). Для проведения расчета необходимо чтобы модель не содержала никаких других конечных элементов и была связанной, то есть была единым целым и не содержала отдельно отстоящих узлов. При решении задачи объемные элементы преобразуются в «реберные»

Все материалы, которые задействованы в модели, должны иметь два свойства – 1) относительная (относительно электрической постоянной $\epsilon_0=8,854187817 \cdot 10^{-12}$ [Ф]/[м]) диэлектрическая проницаемость (таблица 2.1); 2) относительная (относительно магнитной постоянной $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ [Гн]/[м]) магнитная проницаемость (таблица 2.5).

3.1.2 Задание нагрузок и граничных условий

Для моделирования нестационарных задач расчета собственных частот электромагнитных структур пользователю доступно всего одно граничное условие *Идеальный электрический проводник*.

Идеальный электрический проводник

Данное граничное условие может быть задано на ребра модели и определяет равенство нулю проекции вектора напряженности электрического поля на это ребро. *Идеальный электрический проводник* должен быть задан на все внешние границы модели, за исключением плоскостей симметрии. Кроме этого в модели могут существовать «стенки» которые полностью отражают электромагнитную волну, на такие объекты также необходимо задавать данное граничное условие.

Описанное выше граничное условие может быть добавлены в документ путем выбора соответствующего пункта контекстного меню для узла **Высокочастотные нагрузки** на панели **Объекты** или (рисунок 3.1).

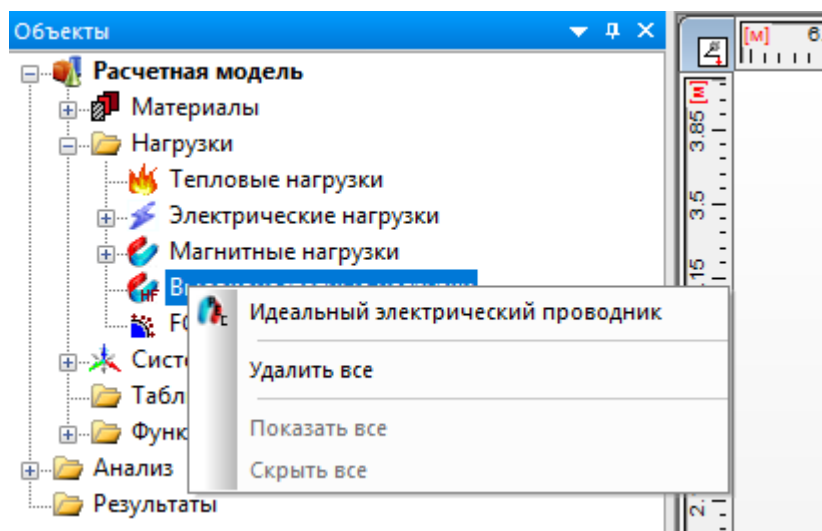


Рисунок 3.1 – Нагрузки для высокочастотного модального анализа

3.1.3 Проведение расчета

Для проведения **Высокочастотного модального анализа** необходимо в горизонтальном меню **Расчеты** выбрать пункт **Расчет...** после чего появится диалоговое окно **Расчет**. (рисунок 3.2).

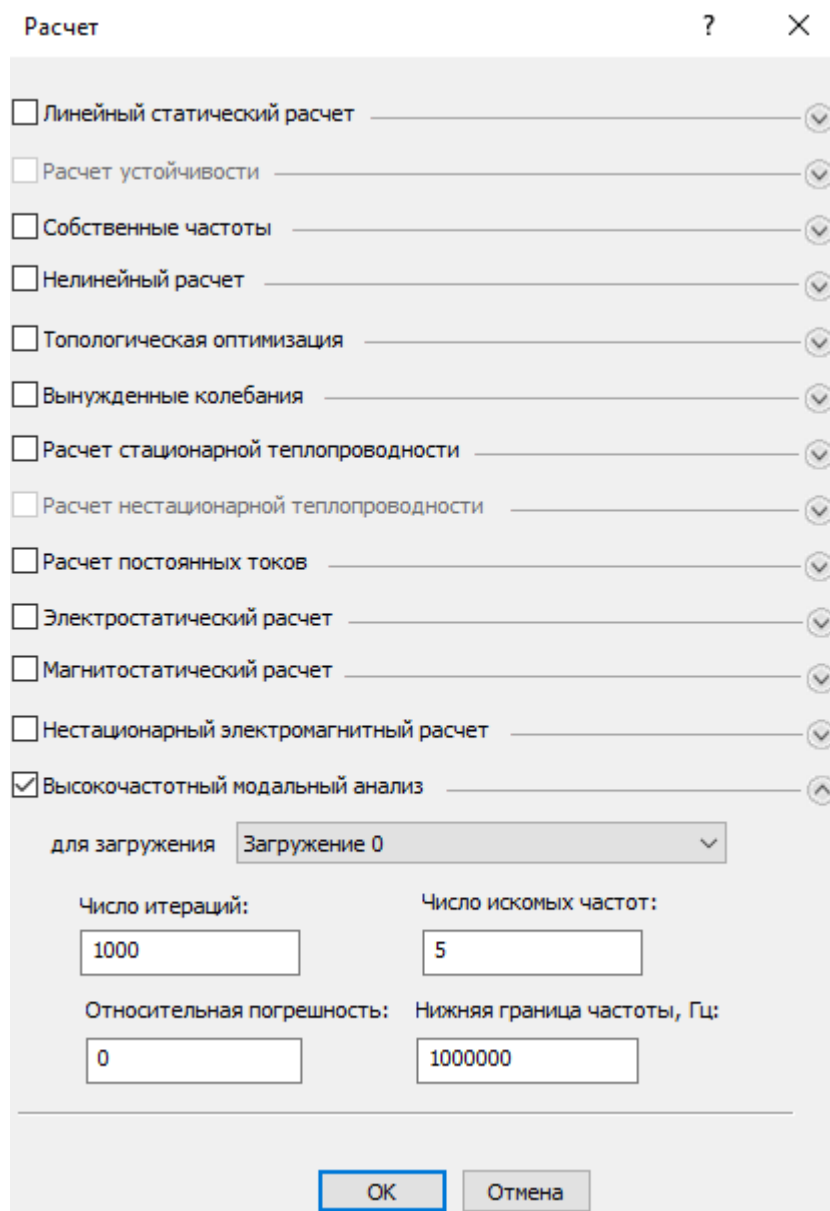


Рисунок 3.2 – Запуск высокочастотного модального анализа

В диалоговом окне *Расчет* пользователь должен отметить пункт *Высокочастотный модальный анализ*, в выпадающем списке *для загрузки* выбрать *Загрузка*, для которого он хочет произвести расчет, в поле *Число искомых частот* ввести положительное целое значение, которое определяет число наименьших собственных частот и соответствующих им форм которые будут найдены. В поле *Нижняя граница частоты, Гц* пользователь должен ввести положительное значение, которое определяет ту частоту в герцах, меньше значения которой собственные частоты искать не будут. В поле *Число итераций* пользователь должен ввести положительное целое значение

в диапазоне, которое определяет максимально возможное число итераций в методе Ланцоша. В поле **Относительная погрешность** пользователь должен ввести положительное значение меньше единицы в диапазоне, которое точность сходимости собственных векторов в методе Ланцоша. После нажатия кнопки **ОК** будет произведен **Высокочастотный модальный анализ**.

Поля **Число итераций** и **Относительная погрешность** рекомендуется оставлять со значениями по умолчанию, 1000 и 0 соответственно. Если в процессе решения были найдены не все собственные частоты (о чем пользователь получит сообщение), то необходимо повторить расчет увеличив **Число итераций** или **Относительная погрешность**. Значение относительной погрешности не рекомендуется вводить более 10^{-6} .

3.1.4 Просмотр результатов

Чтобы просмотреть результаты расчета необходимо в горизонтальном меню **Результаты** выбрать пункт **Карта результатов...** В появившемся диалоге необходимо выбрать **Тип расчета** – **Нестационарный электромагнитный расчет** (рисунок 2.14).

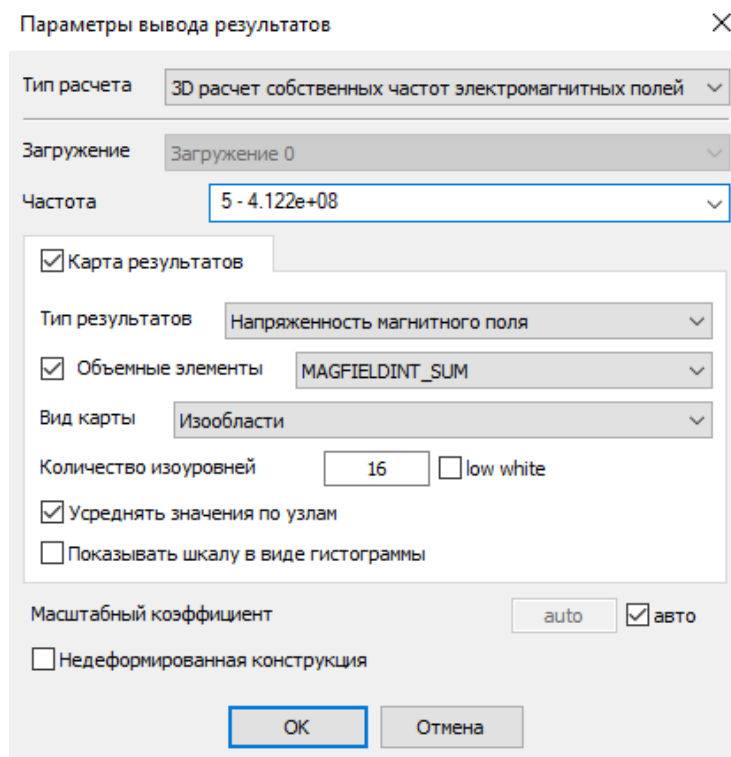


Рисунок 3.3 – Результаты высокочастотного модального анализа

Пользователю для просмотра доступно четыре типа карт результатов:

- 1) Напряженность электрического поля $[V]/[длина^*]$ (контурная);
- 2) Векторная напряженность электрического поля $[V]/[длина^*]$ (векторная);
- 3) Напряженность магнитного поля $[A]/[длина^*]$ (контурная);
- 4) Векторная напряженность магнитного поля $[A]/[длина^*]$ (векторная).

**длина* – определяется значением, выбранным в выпадающем списке *Длина* диалогового окна *Установки* на вкладке *Единицы*

Подробнее о работе с картами результатов см. раздел «Результаты» в руководстве пользователя «Работа с деревом проекта».

4 Краткие теоретические сведения

Уравнения Максвелла описывающее состояние электромагнитного поля могут быть записаны в дифференциальной форме в следующем виде:

$$\begin{cases} \nabla \times (\vec{H}) = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \\ \nabla \times (\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \\ \nabla \cdot (\vec{B}) = 0; \\ \nabla \cdot (\vec{D}) = \rho, \end{cases} \quad (4.1)$$

где t – время [с]; \vec{D} – вектор электрической индукции (смещения) [Кл]/[м²]; \vec{E} – вектор напряженности электрического поля [В]/[м]; \vec{B} – вектор магнитной индукции [Тл]; \vec{H} – вектор напряженности магнитного поля [А]/[м]; \vec{J} – вектор плотности электрического тока [А]/[м²]; ρ – объемная плотность электрического заряда; $\nabla \cdot ()$ – операция дивергенции; $\nabla \times ()$ – операция ротора.

Вектора описывающее состояния электромагнитного поля связаны следующими соотношениями:

$$\vec{D} = \varepsilon_a \vec{E}, \quad (4.2)$$

где $\varepsilon_a = \varepsilon \varepsilon_0$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды [Ф]/[м]; ε – относительная (относительно вакуума) диэлектрическая проницаемость среды []; ε_0 – диэлектрическая постоянная (абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума) $8,854187817 \cdot 10^{-12}$ [Ф]/[м].

Выражение (4.2) справедливо лишь в изотропной электрической среде, если среда ортотропна, то его нужно записать в виде:

$$\vec{D} = [\varepsilon] \vec{E}, \quad (4.3)$$

где $[\varepsilon]$ – матрица абсолютных диэлектрических проницаемостей среды:

$$[\varepsilon] = \varepsilon_0 \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}, \quad (4.4)$$

здесь ε_{xx} , ε_{yy} и ε_{zz} – относительные диэлектрические проницаемости среды в направлениях x , y и z соответственно.

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (4.5)$$

где $\mu_a = \mu \mu_0$ – абсолютная магнитная проницаемость среды [Гн]/[м]; μ – относительная (относительно вакуума) магнитная проницаемость среды []; μ_0 – магнитная постоянная (абсолютная магнитная проницаемость вакуума) $4\pi \cdot 10^{-7} \approx 1,25663706 \cdot 10^{-6}$ [Гн]/[м].

Выражение (4.5) справедливо лишь в изотропной магнитной среде, если среда ортотропна, то его нужно записать в виде:

$$\vec{B} = [\mu] \vec{H}, \quad (4.6)$$

где $[\mu]$ – матрица магнитных проницаемостей среды:

$$[\mu] = \mu_0 \begin{pmatrix} \mu_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{zz} \end{pmatrix}, \quad (4.7)$$

здесь μ_{xx} , μ_{yy} и μ_{zz} – относительные (относительно вакуума) магнитные проницаемости среды в направлениях x , y и z соответственно [].

В случае наличия постоянного магнита соотношение (4.6) принимает вид:

$$\vec{B} = [\mu] \vec{H} + \mu_0 \vec{M}_0, \quad (4.8)$$

где \vec{M}_0 – вектор собственной остаточной намагниченности постоянного магнита [А/м].

Очень часто бывает нужно выразить напряженность магнитного поля:

$$\vec{H} = [\nu] \vec{B} - \mu_0 [\nu] \vec{M}_0, \quad (4.9)$$

где $[\nu]$ – матрица магнитного сопротивления среды:

$$[\nu] = \frac{1}{\mu_0} \begin{pmatrix} \frac{1}{\mu_{xx}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\mu_{yy}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\mu_{zz}} \end{pmatrix}. \quad (4.10)$$

Из первого уравнения системы (4.1) после применения операции дивер-

генции вытекает уравнение неразрывности электромагнитного поля:

$$\nabla \cdot \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) = 0. \quad (4.11)$$

Также следует отметить что плотность электрического тока связана напряженностью электрического поля (закон Ома) и индукцией магнитного поля (закон Ампера):

$$\vec{J} = [\sigma] (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad (4.12)$$

где $[\sigma]$ – матрица удельных электрических проводимостей ортотропной среды $1/([\text{Ом}] \cdot [\text{М}])$:

$$[\sigma] = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{pmatrix}, \quad (4.13)$$

здесь σ_{xx} , σ_{yy} и σ_{zz} – удельные электрические проводимости среды в направлениях x , y и z соответственно $1/([\text{Ом}] \cdot [\text{М}])$; \vec{v} – скорость проводника в магнитном поле $[\text{М}]/[\text{с}]$.

Электростатика

В случае, если магнитное поле отсутствует, естественно отсутствуют и электрические токи, в среде может возникнуть электростатическое поле при наличии электрических зарядов. В этом случае уравнения Максвелла (4.1) примут вид:

$$\begin{cases} \vec{H} = 0; \\ \nabla \times (\vec{E}) = 0; \\ \vec{B} = 0; \\ \nabla \cdot (\vec{D}) = \rho. \end{cases} \quad (4.14)$$

Из второго уравнения (4.14) следует, что электрическое поле потенциально. Следовательно для него существует некоторый скалярный потенциал, определяемый следующим выражением:

$$\vec{E} = -\nabla(\varphi), \quad (4.15)$$

где φ – электрический потенциал [В]; $\nabla()$ – операция градиента.

Подставляя в четвертое уравнение (4.14) выражения (4.15) и (4.3) получаем следующее уравнение Пуассона для электростатического поля:

$$-\nabla \cdot ([\varepsilon] \nabla(\varphi)) = \rho. \quad (4.16)$$

После решения уравнения (4.16) вектора электрического поля восстанавливаются по выражениям (4.15) и (4.3).

Поле постоянных токов

В случае, если рассматриваются только проводники, в которых течет постоянный ток, то есть отсутствует изменение во времени как магнитного, так и электрического поля, уравнения Максвелла (4.1) примут вид:

$$\begin{cases} \nabla \times (\vec{H}) = \vec{J}; \\ \nabla \times (\vec{E}) = 0; \\ \nabla \cdot (\vec{B}) = 0; \\ \nabla \cdot (\vec{D}) = \rho; \end{cases} \quad (4.17)$$

Из второго уравнения (4.17) следует, что электрическое поле потенциально. Следовательно для него существует некоторый скалярный потенциал, который пусть также определяется из уравнения (4.15). Уравнение неразрывности (4.11) в этом случае очевидно принимает вид:

$$\nabla \cdot (\vec{J}) = 0. \quad (4.18)$$

Подставляя в уравнение (4.18) выражения (4.15) и (4.12), учитывая что подвижных проводников нет, получаем следующее уравнение Лапласа для расчета поля постоянных токов:

$$\nabla \cdot ([\sigma] \nabla(\varphi)) = 0. \quad (4.19)$$

После решения уравнения (4.19) вектор напряженности электрического поля восстанавливаются по выражению (4.15), а вектор плотности электрического тока по выражению, получаемому из (4.12) с учетом отсутствия подвижных проводников:

$$\vec{J} = [\sigma] \vec{E}. \quad (4.20)$$

Магнитостатика

Для расчета магнитного поля при отсутствии изменения во времени как магнитного, так и электрического поля воспользуемся системой (4.17), и ее третьего уравнения следует, что магнитное поле соленоидально. Следовательно для него существует некоторый векторный потенциал, определяемый следующим выражением:

$$\vec{B} = \nabla \times (\vec{A}), \quad (4.21)$$

где \vec{A} – векторный магнитный потенциал [Вб]/[м]

Для однозначности определения векторного магнитного потенциала введем калибровку Куллона:

$$\nabla \cdot (\vec{A}) = 0. \quad (4.22)$$

Подставляя в первое уравнение (4.17) выражения (4.21), (4.22) и (4.9), получаем следующее векторное уравнение для расчета магнитного поля:

$$\nabla \times ([v] \nabla \times (\vec{A})) - \nabla (v_e \nabla \cdot (\vec{A})) = \vec{J} + \nabla \times (\mu_0 [v] \vec{M}_0), \quad (4.23)$$

v_e – среднее магнитное сопротивление среды ($v_e = \frac{1}{3\mu_0} \left(\frac{1}{\mu_{xx}} + \frac{1}{\mu_{yy}} + \frac{1}{\mu_{zz}} \right)$)

После решения уравнения (4.23) вектора магнитного поля восстанавливаются по выражениям (4.21) и (4.9).

Нестационарное электромагнитное поле

Для описания нестационарного электромагнитного поля свяжем вектор напряженности электрического поля с электрическим и магнитным векторными потенциалами следующим образом:

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla(\phi). \quad (4.24)$$

Подставляя выражения (4.24), (4.21), (4.22), (4.12) (4.9) в первое уравнение системы (4.1) и (4.11) получим следующие уравнения, описывающее нестационарное электромагнитное поле:

для областей с неизвестным распределением плотности тока:

$$\begin{cases} \nabla \times ([\mathbf{v}] \nabla \times (\vec{A})) - \nabla (\mathbf{v}_e \nabla \cdot (\vec{A})) + [\sigma] \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + [\sigma] \nabla (\varphi) - \vec{v} \times ([\sigma] \nabla \times (\vec{A})) = 0; \\ \nabla \cdot \left([\sigma] \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - [\sigma] \nabla (\varphi) + \vec{v} \times ([\sigma] \nabla \times (\vec{A})) \right) = 0, \end{cases} \quad (4.25)$$

для остальных областей:

$$\nabla \times ([\mathbf{v}] \nabla \times (\vec{A})) - \nabla (\mathbf{v}_e \nabla \cdot (\vec{A})) = \vec{J} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mathbf{v}_0} [\mathbf{v}] \vec{M}_0 \right). \quad (4.26)$$

После решения уравнений (4.25) и (4.26) вектора магнитного поля восстанавливаются по выражениям (4.21) и (4.9), вектор напряженности электрического поля восстанавливаются по выражению (4.24), а вектор плотности электрического тока по выражению (4.12).

Следует отметить, что для удобства интегрирования по времени удобно ввести в рассмотрение интеграл электрического потенциала:

$$\varphi^* = \int \varphi dt, \quad (4.27)$$

тогда система уравнений (4.25) примет вид:

$$\begin{cases} \nabla \times ([\mathbf{v}] \nabla \times (\vec{A})) - \nabla (\mathbf{v}_e \nabla \cdot (\vec{A})) + [\sigma] \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + [\sigma] \nabla \left(\frac{\partial \varphi^*}{\partial t} \right) - \vec{v} \times ([\sigma] \nabla \times (\vec{A})) = 0; \\ \nabla \cdot \left([\sigma] \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - [\sigma] \nabla \left(\frac{\partial \varphi^*}{\partial t} \right) + \vec{v} \times ([\sigma] \nabla \times (\vec{A})) \right) = 0. \end{cases}$$

Электромагнитное поле высокой частоты

Для высокочастотных электродинамических процессов уравнения Максвелла можно свести к уравнению Гельмгольца (относительно комплексный вектор напряженности электрического поля \vec{E} [В]/[м]) вида:

$$\nabla \times ([\mu]_r^{-1} (\nabla \cdot (\vec{E}))) - k_0^2 [\varepsilon]_r \cdot \vec{E} = j \omega \mu_0 \vec{J}_s, \quad (4.28)$$

где $[\mu]_r$ – матрица относительных комплексных магнитных проницаемостей среды[]; « $^{-1}$ » – операция обращения матрицы; j – мнимая единица; ω – рабочая угловая частота[рад/с]; $[\varepsilon]_r$ – матрица относительных комплексных ди-

электрических проницаемостей среды $[\epsilon]$; k_0 – волновое число вакуума [рад]/[м]; \bar{J}_s – комплексный вектор плотности тока возбуждения [А]/[м²].

5 Обучающие примеры

5.1 Расчет конденсатора (электростатика)

Откройте файл ElStat1.frm.

Задание материалов в модели

1. Для материала Сталь добавьте свойство «Относительная диэлектрическая проницаемость» с постоянным значением 1.
2. Задайте этот материал на всю модель. Для того необходимо выделить всю модель при включенном слое «Модель» и в контекстном меню материала выбрать пункт «Задать выделенным».

Задание нагрузок в модели

1. Добавьте две нагрузки - «Электрический потенциал». Для этого в контекстном меню узла «Электрические нагрузки» выбрать соответствующий пункт меню.
2. Включите только слой «Потенциал 0» и для первой нагрузки укажите все узлы из этого слоя. Значение нагрузки оставьте по умолчанию (0 В) .
3. Для второй нагрузки включите только слой «Потенциал 5» и задайте на все узлы слоя электрический потенциал 5 В. (рисунок 5.1).

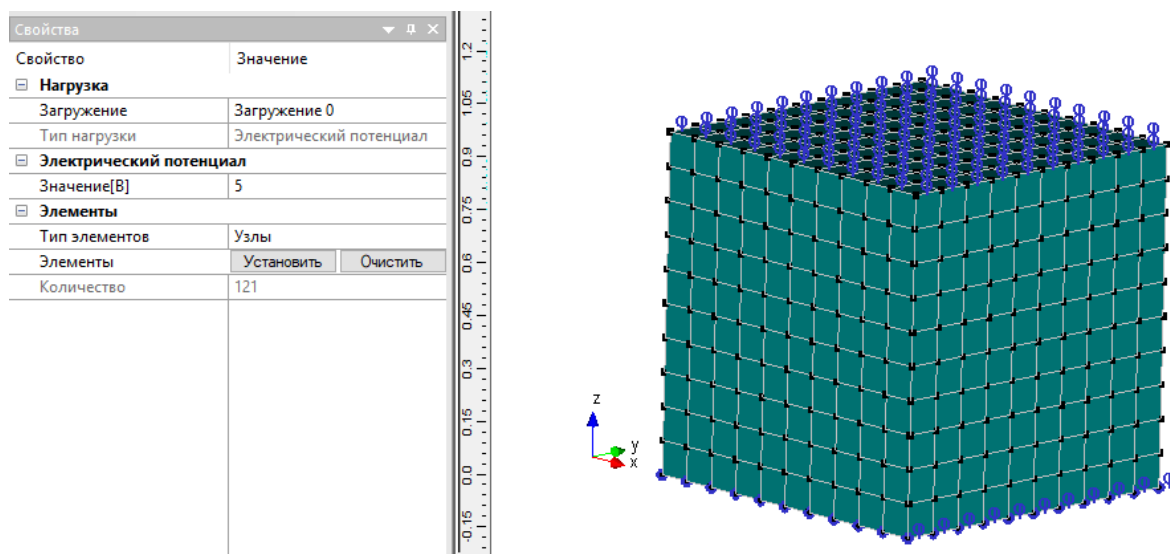


Рисунок 5.1 – Задание электрического потенциала

Расчет и просмотр результатов

1. Далее выполнить расчет выбрав пункт горизонтального меню *Расчеты/Расчет...* и указав электростатический расчет с параметрами по умолчанию. Результаты появятся горизонтальном меню *Результаты* в пункте *Карты результатов* (рисунок 5.2).

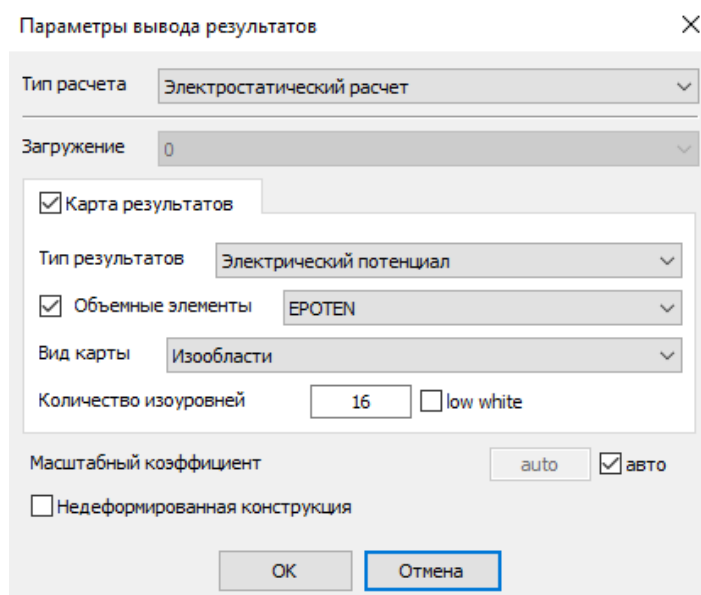


Рисунок 5.2 – Диалог с результатами электростатического расчета

Полученные результаты представлены на рисунках 5.3 – 5.7.

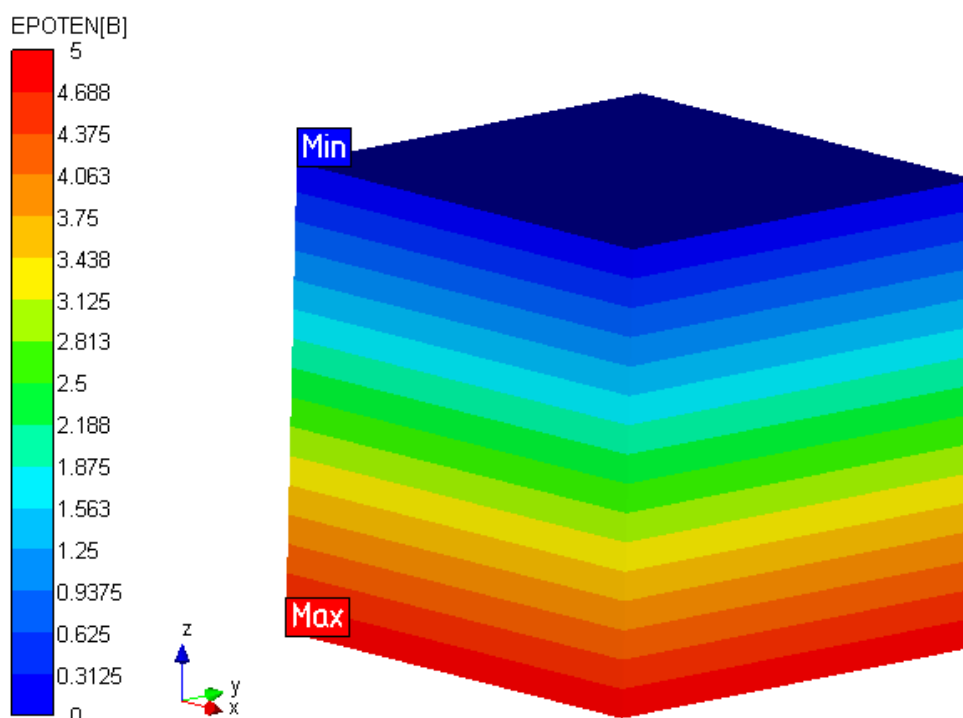


Рисунок 5.3 – Электрический потенциал

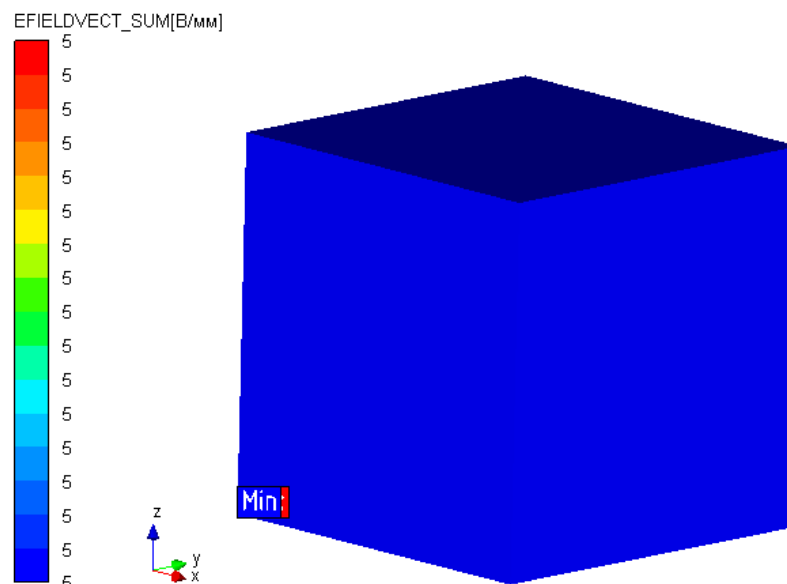


Рисунок 5.4 – Напряженность электрического поля

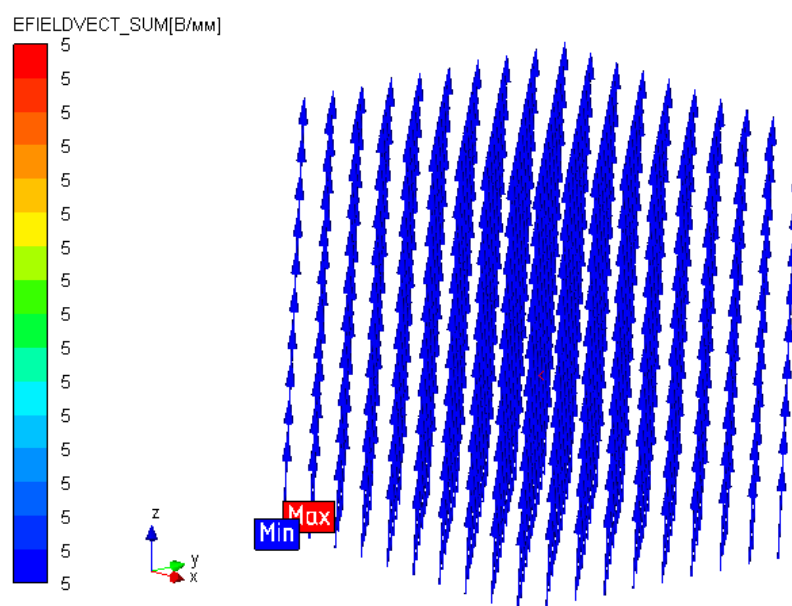


Рисунок 5.5 – Векторная напряженность электрического поля

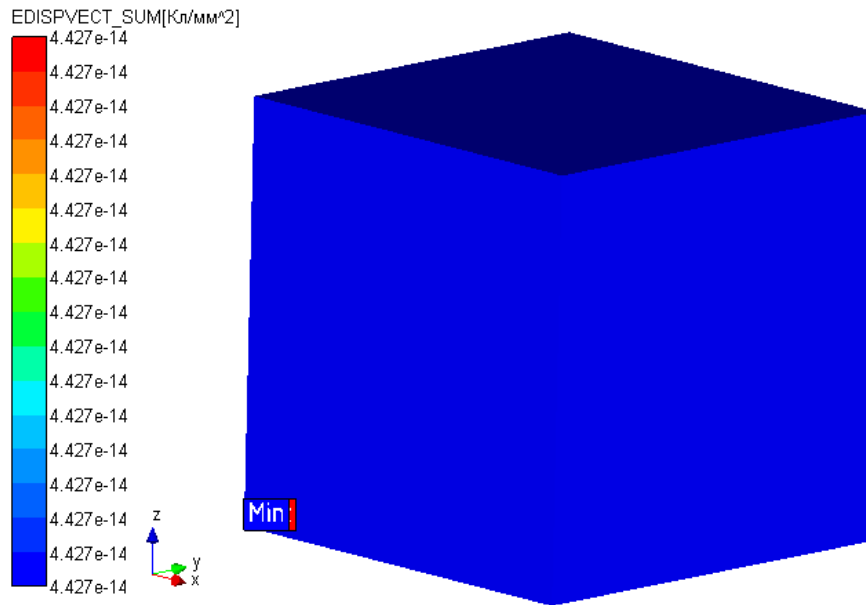


Рисунок 5.6 – Электрическая индукция

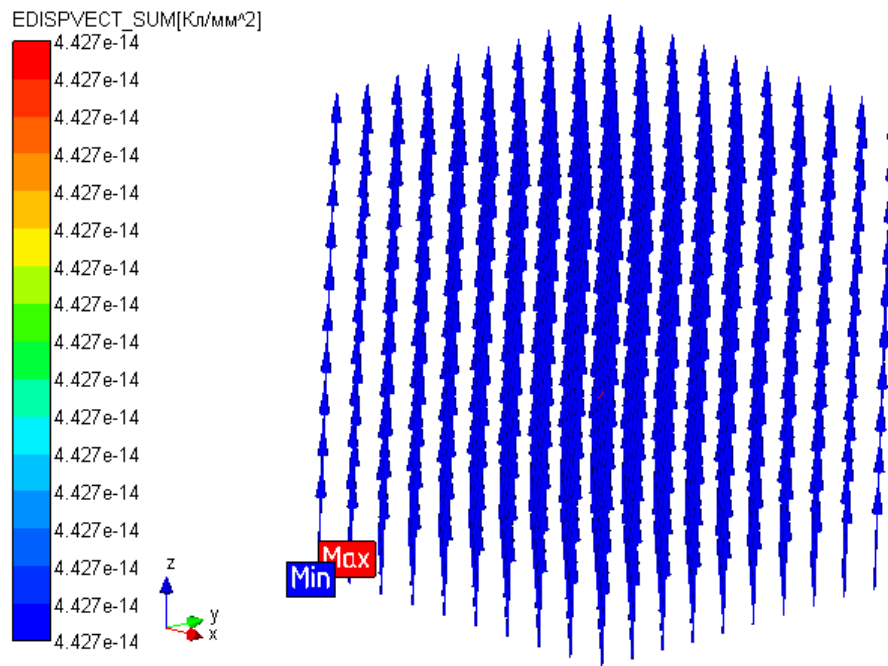


Рисунок 5.7 – Векторная электрическая индукция

5.2 Расчет магнитопровода (магнитостатика).

Откройте файл MagStat1.frm. В файле создана модель магнитного провода, состоящая из нескольких слоев.

Задание материалов в модели

1. Выключите все слои, кроме слоя «Сталь».
2. Выделить часть модели, лежащую в этом слое.
3. В дереве в контекстном меню материала сталь выбрать пункт «Задать выделенным»
4. Добавить материалу сталь свойство «Относительная магнитная проницаемость» с постоянным значением 2500.
5. Выключаем слой «Сталь» и включаем слой «Магнит».
6. Добавляем новый общий материал с именем «Магнит» и свойством «Относительная магнитная проницаемость» с постоянным значением 1.
7. Выделяем видимую часть модели и задаем ей созданный материал магнит.
8. Выключаем слой «Магнит» и включаем слой воздух.
9. Создаем третий материал - воздух, с параметрами как у предыдущего.
10. Задаем оставшейся части модели материала воздух.

Результат выполнения операций представлен на рисунке 5.8.

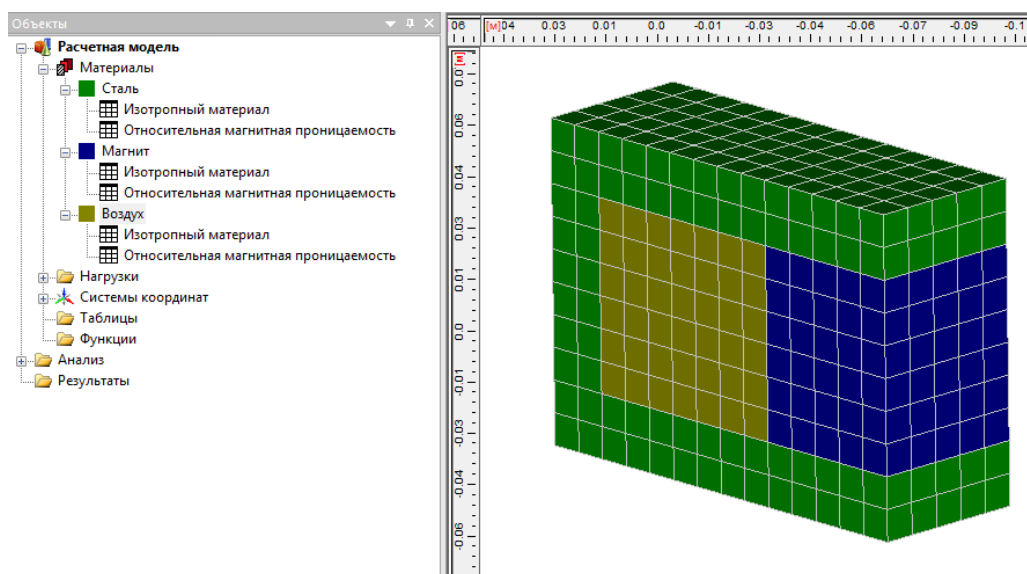


Рисунок 5.8 – Модель с заданными материалами

Задание нагрузок в модели

Все элементы, на которые необходимо задать нагрузки вынесены в отдельные слои.

1. Отключаем все слои кроме слоя «Магнит».
2. Добавляем нагрузку «Вектор остаточной намагниченности».
3. Выбираем тип элементов - «Объемные элементы».
4. Нажимаем кнопку «Установить» и выделяем все элементы слоя.
5. Нажимаем кнопку «Применить». Количество элементов, к которым приложена нагрузка должно быть равно 150.
6. Указываем значение нагрузки по направлению Z равное 50000 А/м, по направления X и Y оставляем нулевые значения.
7. Включаем все слои модели.

Результат представлен на рисунке 5.9.

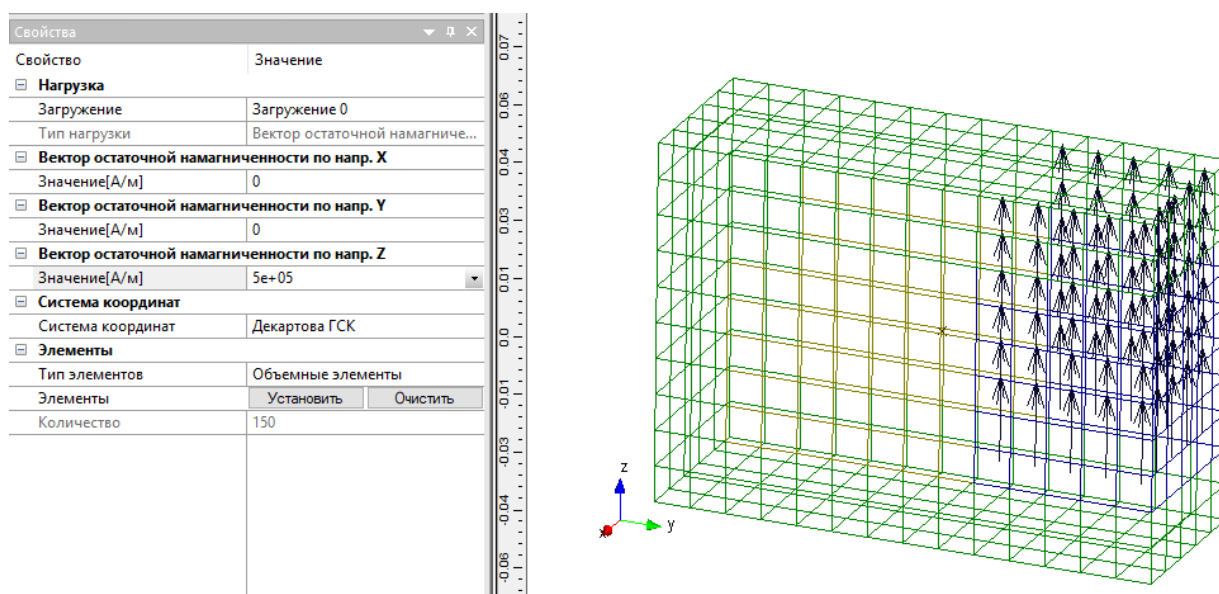


Рисунок 5.9 – Задание вектора остаточной намагниченности

8. Отключаем все слои и включаем слой «Нормаль по оси Z».
9. Добавляем нагрузку «Векторный магнитный потенциал».
10. Выбираем тип элементов - «Узлы» и применяем к узлам в этом слое.
11. Снимаем переключатель по направлению Z, остальные значения оставляем нулевые (рисунок 5.10)

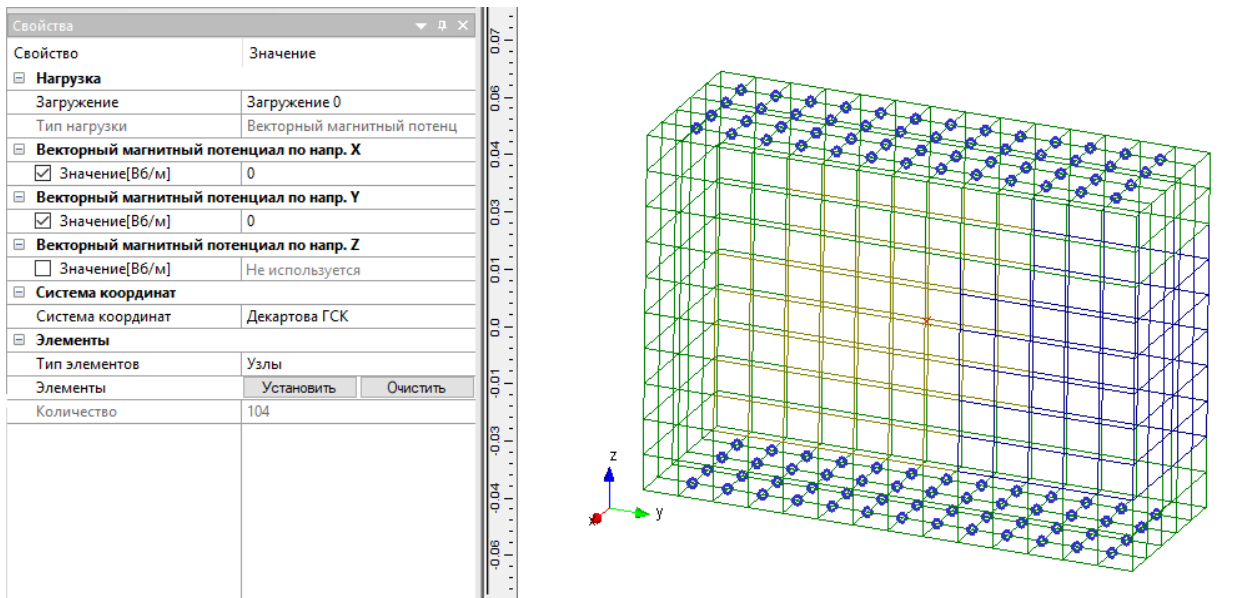


Рисунок 5.10 – Задание векторного магнитного потенциала

12. Аналогично задаем векторный магнитный потенциал на узлы в слоях «Нормаль к оси Y» и «Нормаль к оси X» выключая соответствующие компоненты вектора.

13. Последний векторный магнитный потенциал прикладывается на элементы слоя «Ребра». Значения нулевые по всем компонентам вектора. (рисунок 5.11).

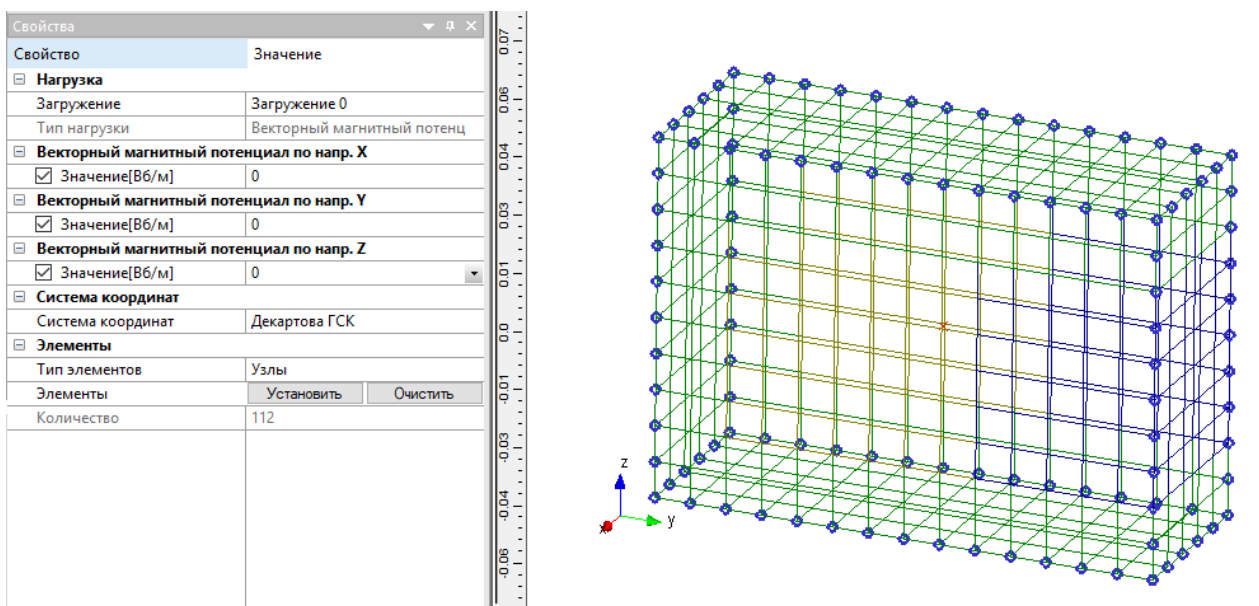


Рисунок 5.11 – Векторный магнитный потенциал на элементы слоя «Ребра»

Расчет и просмотр результатов

1. В пункте горизонтального меню *Расчеты/Расчет...* снять *Линейный статический расчет* и установить *Магнитоэстатический расчет*. Метод расчет *Sparse_LDL*. Нажать ОК.

2. После окончания расчета нужно выбрать пункт горизонтального меню *Результаты/Карта результатов...* В появившемся диалоге необходимо выбрать *Тип расчета* – *Магнитоэстатический расчет* (рисунок 5.12).

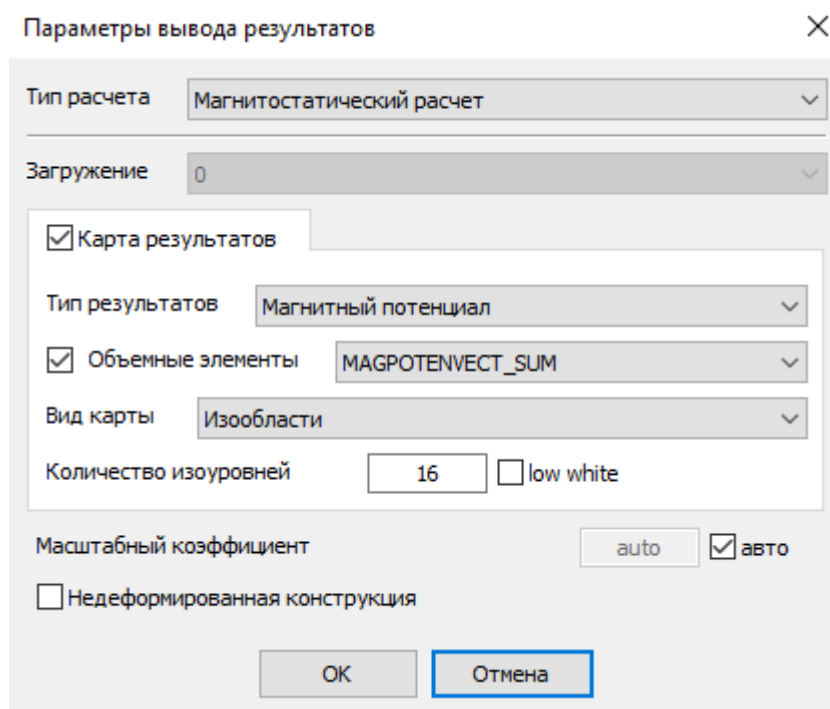


Рисунок 5.12 – Диалог с результатами магнитоэстатического расчета

3. Полученные результаты представлены на рисунках 5.13 – 5.18.

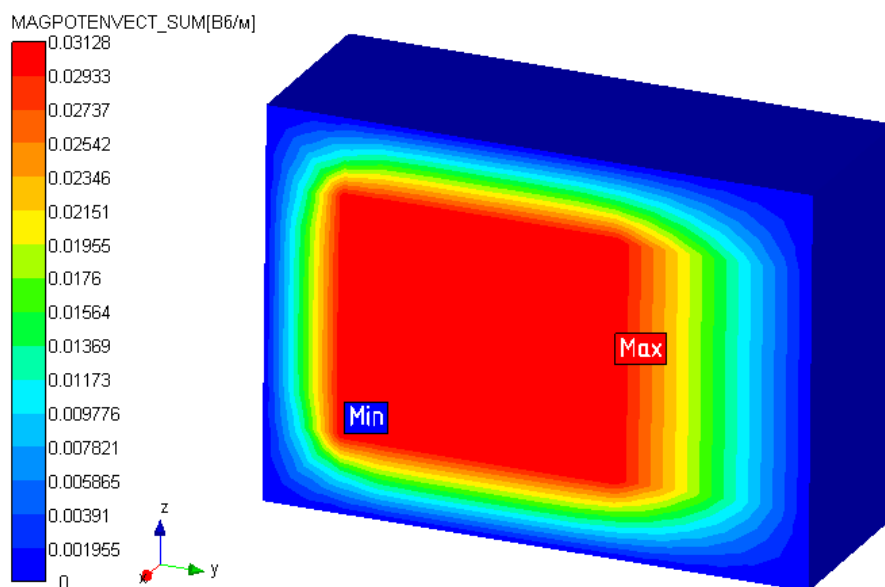


Рисунок 5.13 – Магнитный потенциал

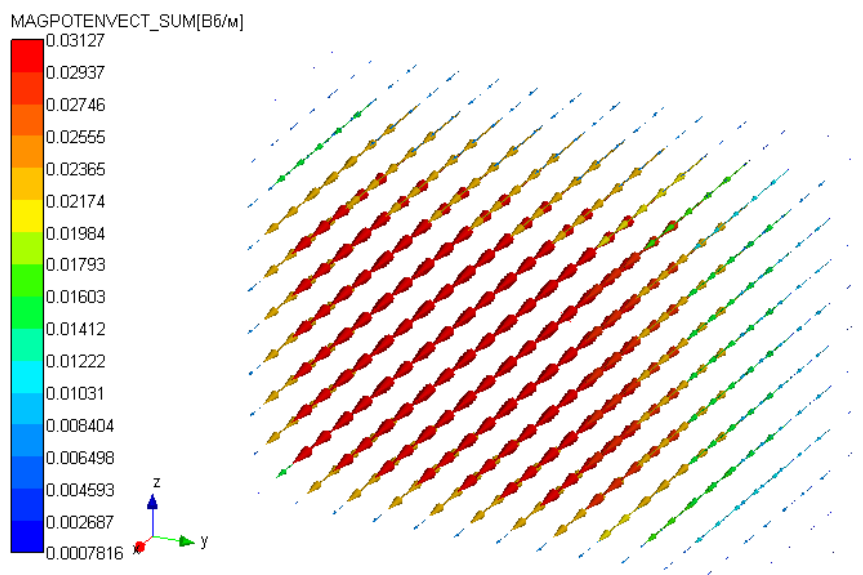


Рисунок 5.14 – Векторный магнитный потенциал

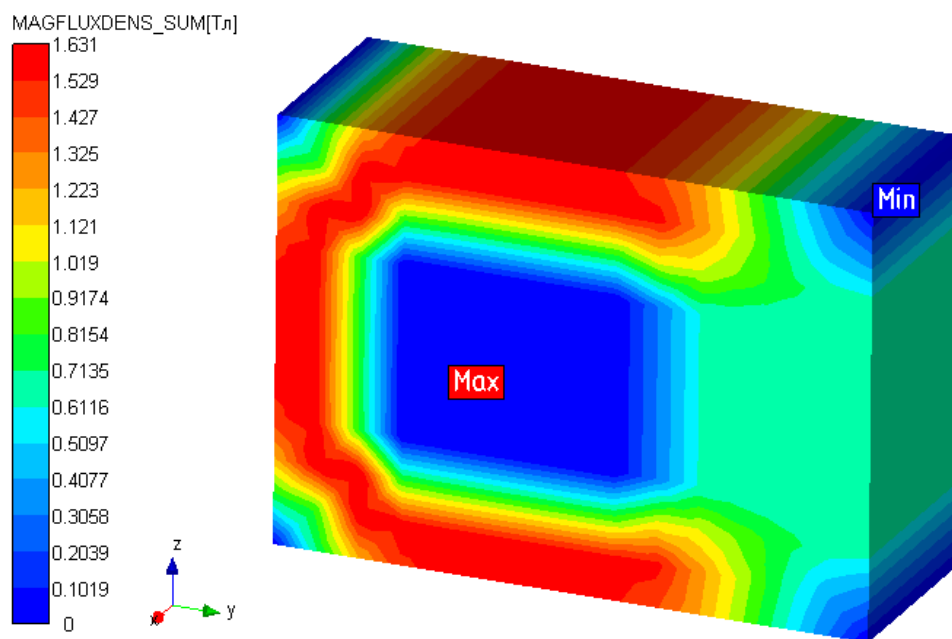


Рисунок 5.15 – Магнитная индукция

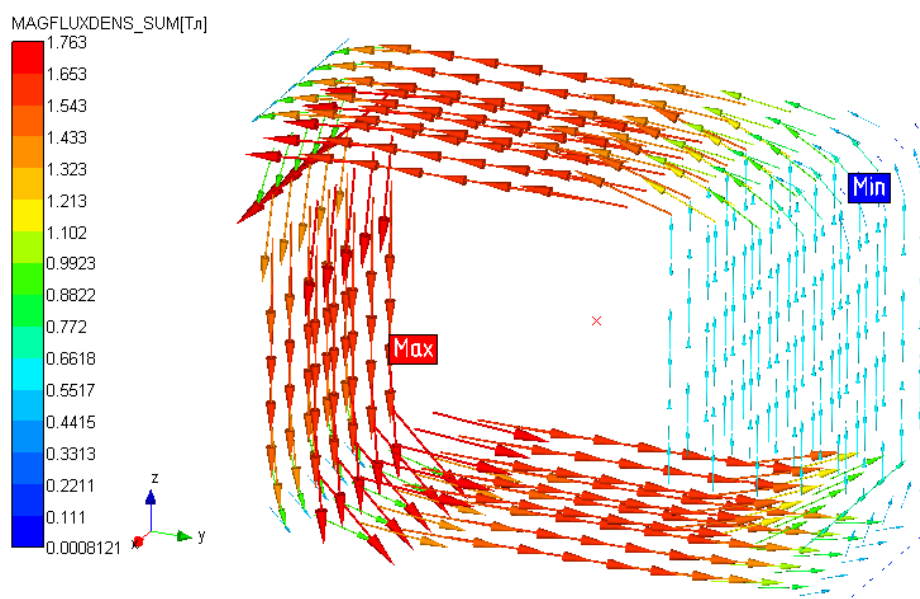


Рисунок 5.16 – Векторная магнитная индукция

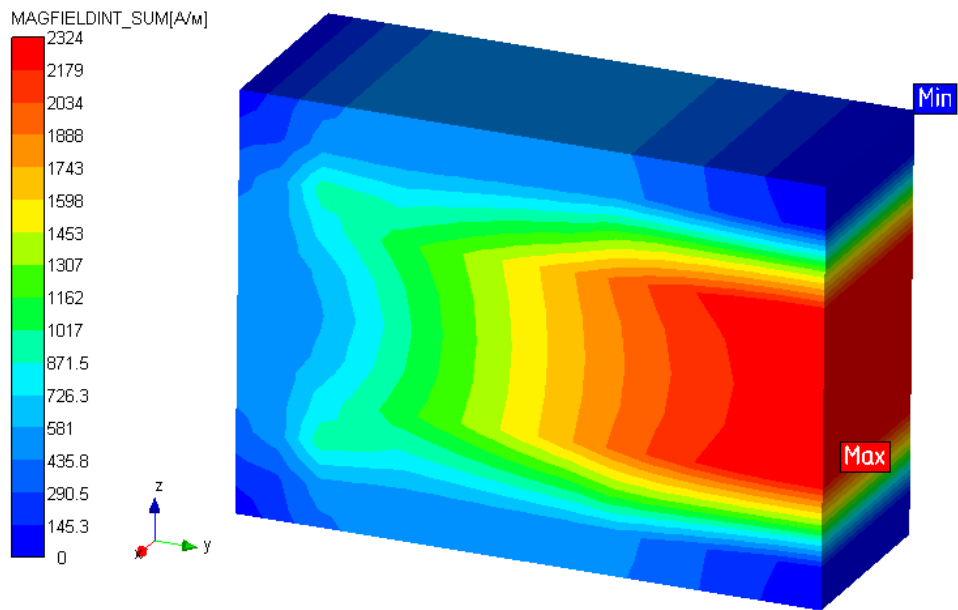


Рисунок 5.17 – Напряженность магнитного поля

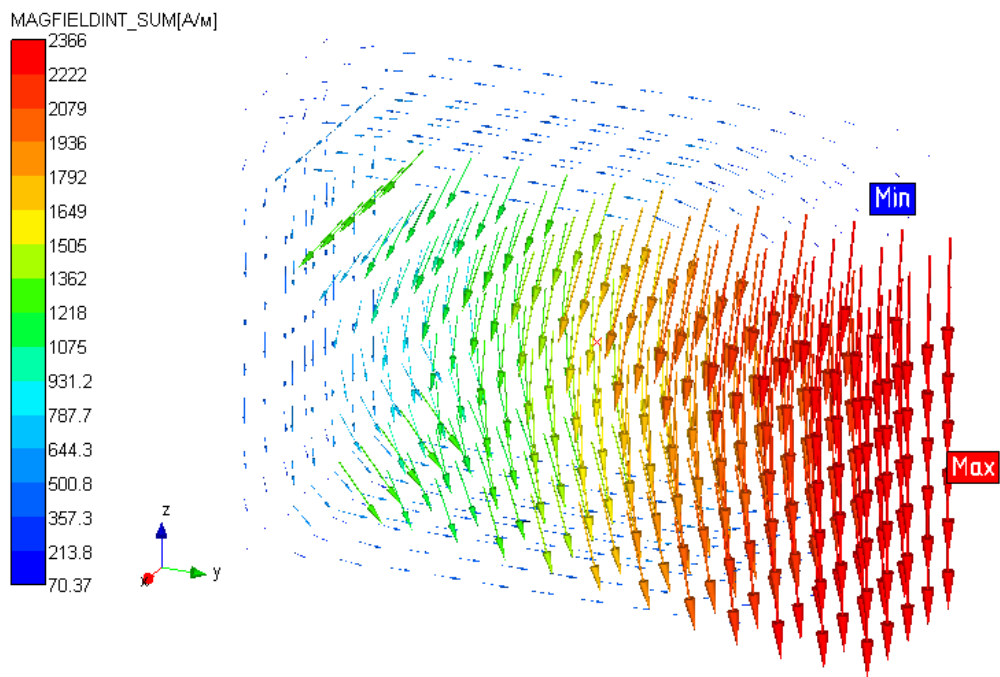


Рисунок 5.18 – Векторная напряженность магнитного поля

5.3 Расчет поля постоянных токов

Откройте файл CurCond1.frm

Задание материалов в модели

1. Создайте для материала сталь свойство «Удельная электрическая проводимость» с постоянным значением $0,025 \text{ 1}/(\text{Ом}\cdot\text{мм})$. (рисунок 5.20)

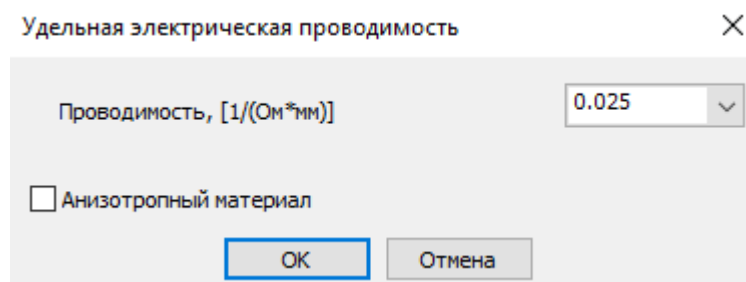


Рисунок 5.19 – Задание удельной электрической проводимости материала

2. Задайте данный материал всей модели, используя пункт «Задать всем» контекстное меню узла «Сталь».

Задание нагрузок в модели

1. Выключить все слои, кроме слоя «Потенциал 5».
2. Создать электрическую нагрузку «Электрический потенциал» с постоянным значением 5В , выделить все узлы в видимом слое и приложить к ним созданную нагрузку.
3. Аналогичные действия проделать со слоем «Потенциал 0». Значение нагрузки оставить по умолчанию. Результат действий представлен на рисунке 5.20.

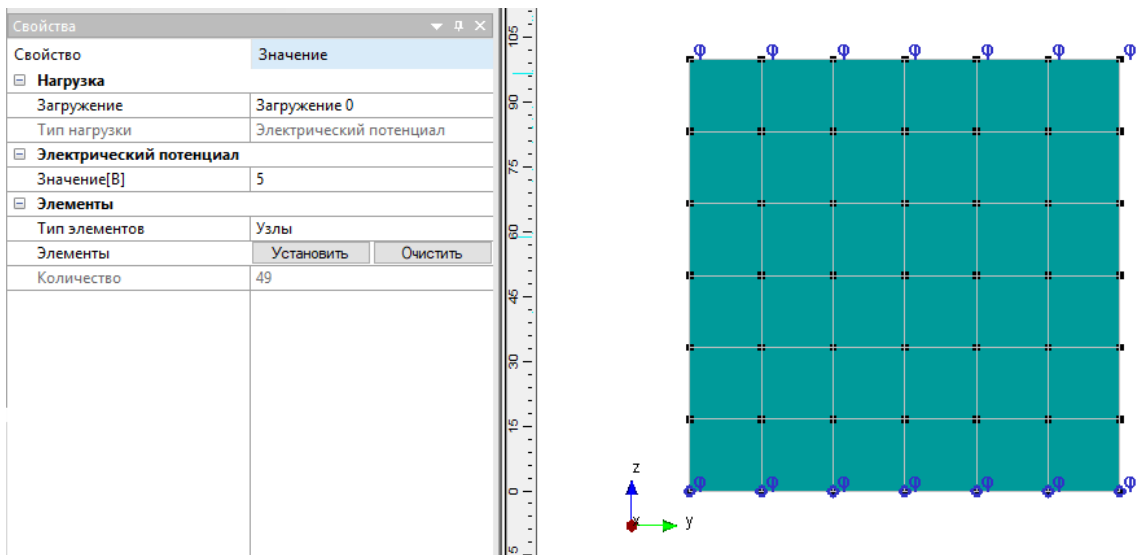


Рисунок 5.20 – Задание электрического потенциала на узлы модели

4. Создать еще две нагрузки «Электрический ток» и приложить к узлам в слоях «Входной ток» и «Выходной ток». Значение входящего тока 1А, а выходящего -1А. (рисунок 5.21).

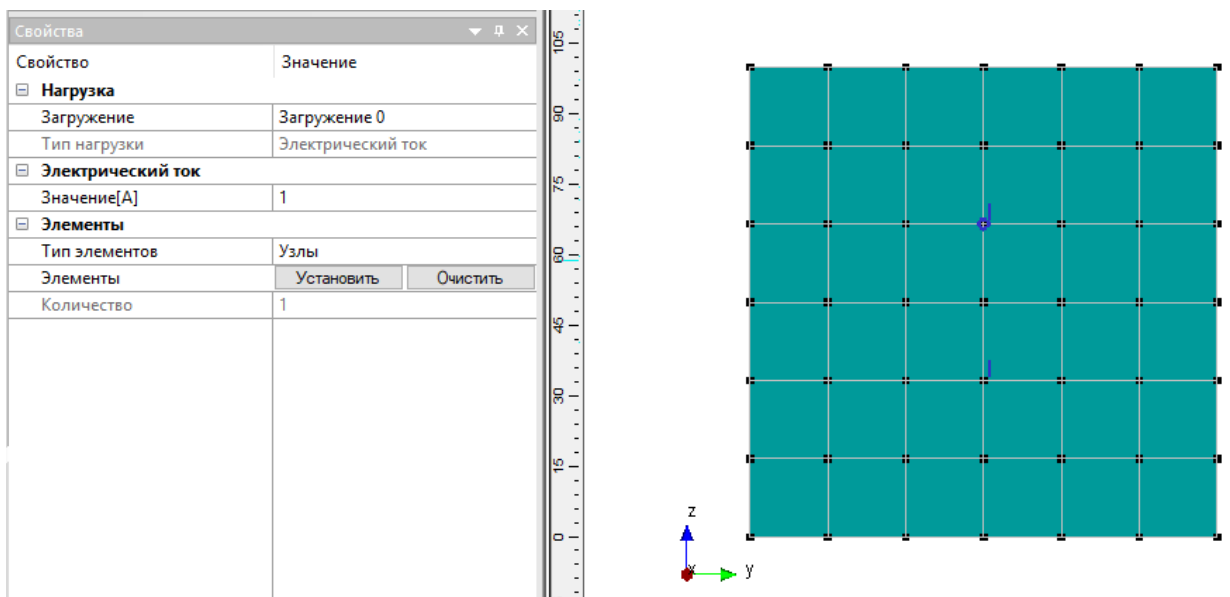


Рисунок 5.21 – Задание электрического тока на узлы модели

Расчет и просмотр результатов

1. В пункте горизонтального меню *Расчеты/Расчет...* снять *Линейный статический расчет* и установить *Расчет поля постоянных токов*. Метод расчет Sparse_LDL. Нажать ОК.

2. После окончания расчета нужно выбрать пункт горизонтального меню

Результаты/Карта результатов... В появившемся диалоге необходимо выбрать Тип расчета – Расчет поля постоянных токов (рисунок 5.12).

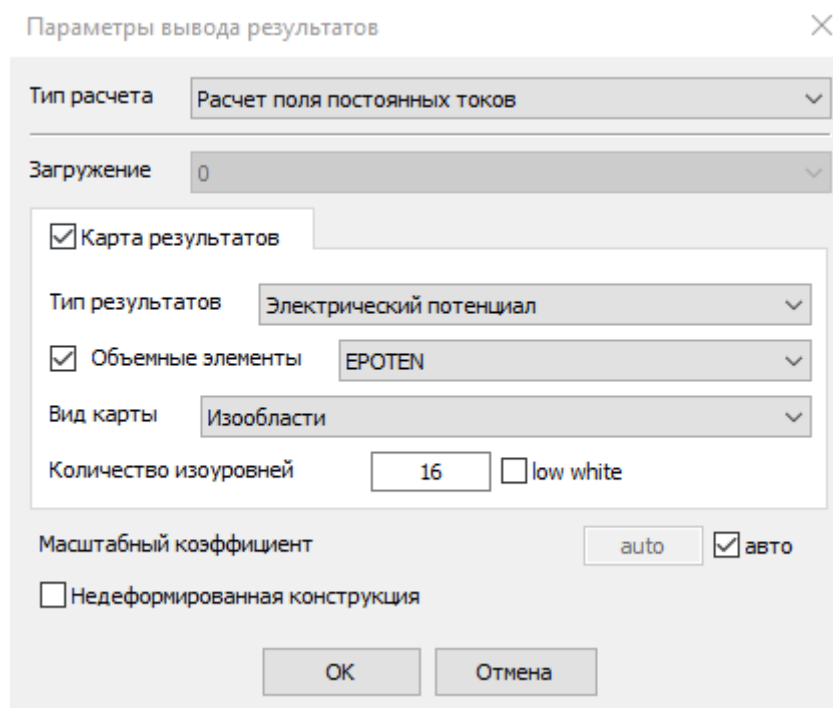


Рисунок 5.22 – Диалог с результатами расчета поля постоянных токов

3. Полученные результаты представлены на рисунках 5.23 – 5.27.

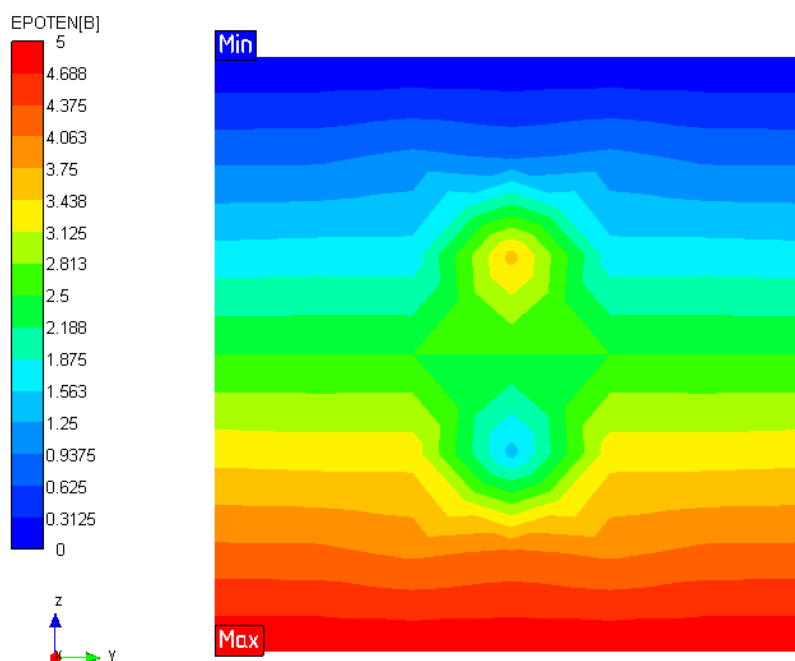


Рисунок 5.23 – Электрический потенциал

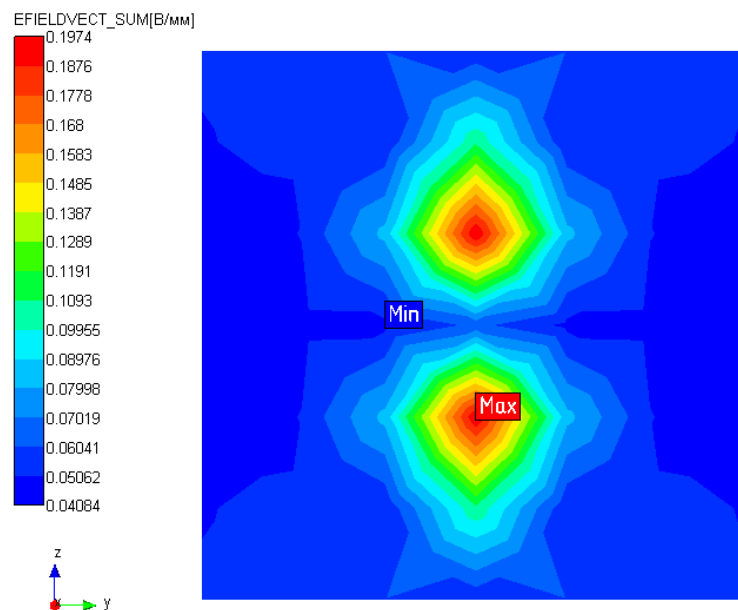


Рисунок 5.24 – Напряженность электрического поля

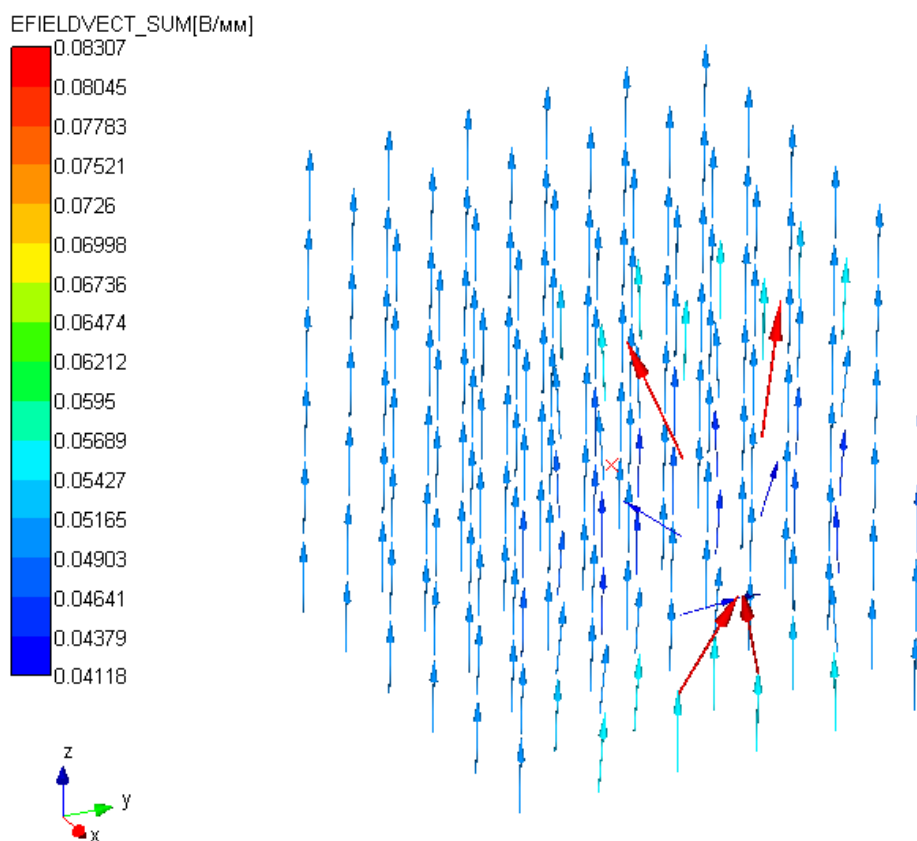


Рисунок 5.25 – Векторная напряженность электрического поля

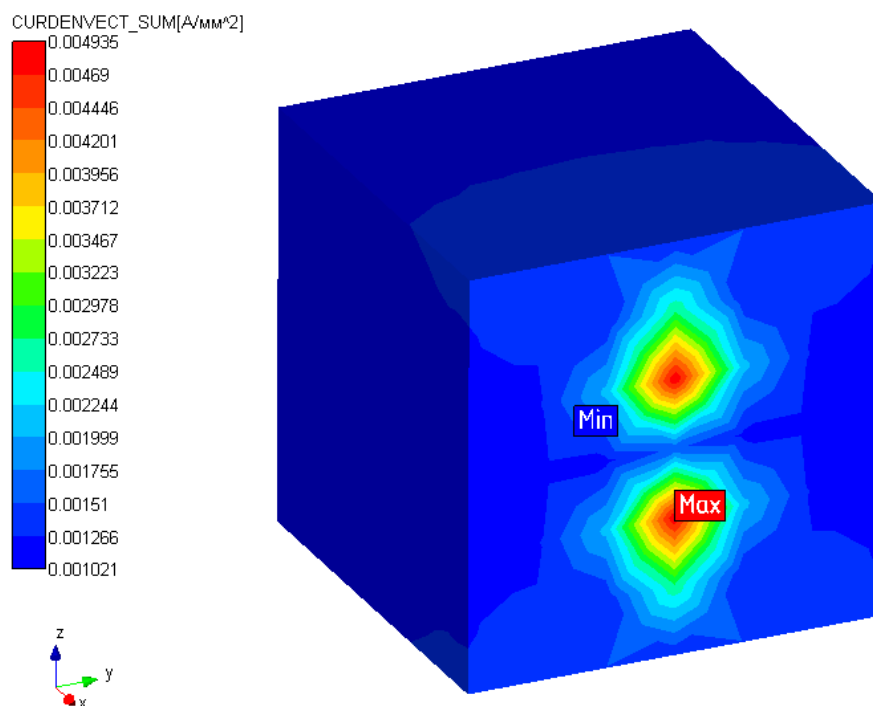


Рисунок 5.26 – Плотность тока

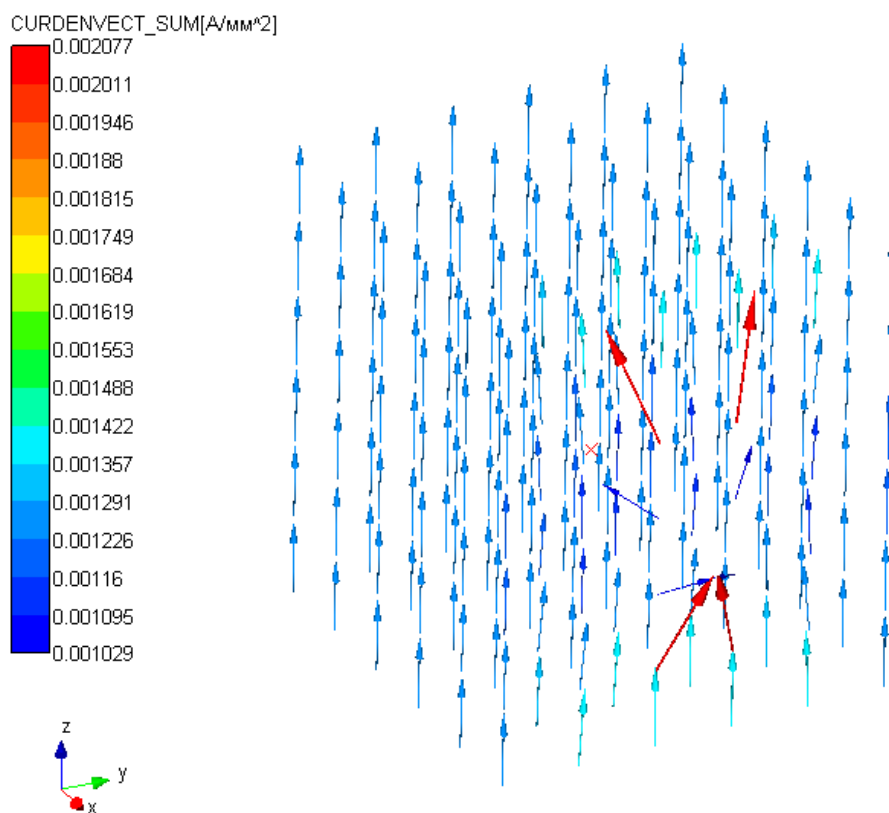


Рисунок 5.27 – Векторная плотность тока

5.4 Кольцевой проводник (Нестационарный электромагнитный расчет)

Откройте файл HalfTorus1.frm.

Задание материалов в модели

1. Для материала «Сталь» задайте два свойства: относительная магнитная проницаемость, с постоянным значением 1, и удельная электрическая проводимость, с постоянным значением 0.25 1/Ом*м. (рисунок 5.28)

2. Задайте материал для всей модели.

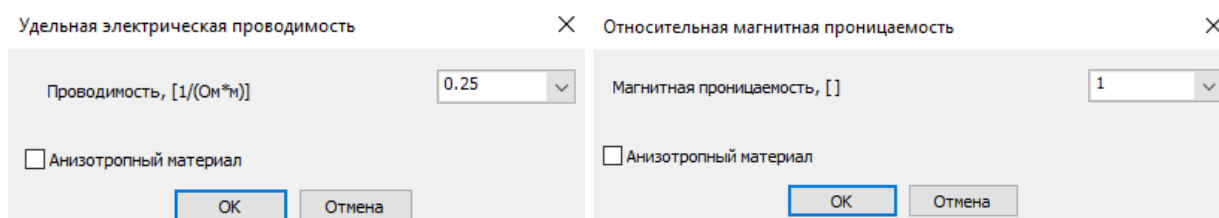


Рисунок 5.28 – Задание электромагнитных свойств материала.

Задание нагрузок в модели

1. Создайте электрическую нагрузку «Входное сечение тока» с функциональной зависимостью вида $\sin(2*\pi()*\text{время})$ (рисунок 5.29), и приложите ее ко всем узлам одного из торцов модели. (рисунок 5.30). При задании функции убедитесь, что угол измеряется в радианах.

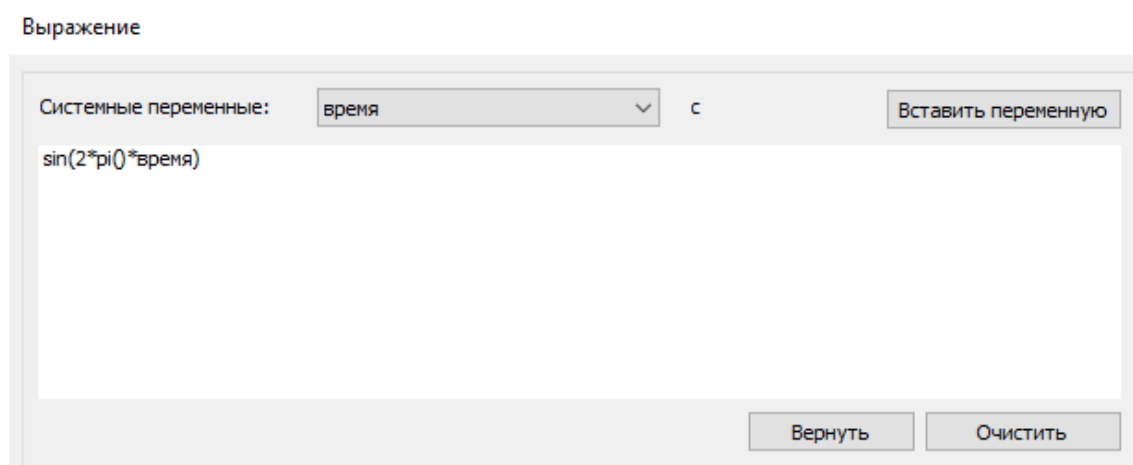


Рисунок 5.29 – Задание функциональной зависимости для нагрузки «Входное сечение тока»

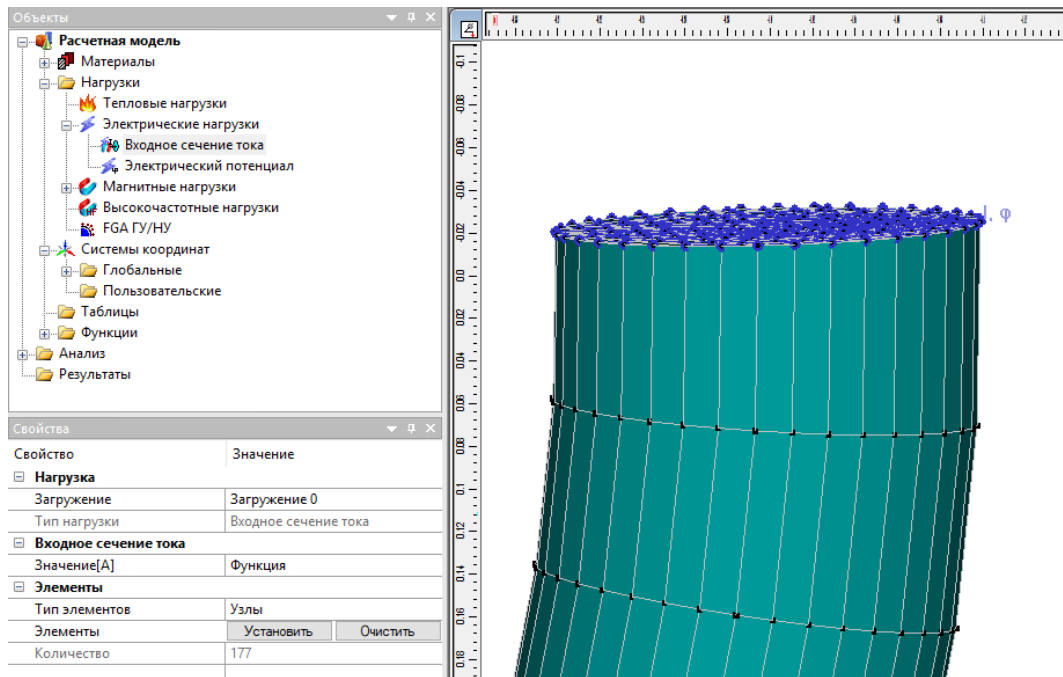


Рисунок 5.30 – Задание входного сечения тока на узлы торца модели

2. На все узлы противоположного торца модели задайте электрический потенциал 0В.
3. Оставьте включенным только слой «Внешние узлы» и задайте на все узлы этого слоя нагрузку «Векторный магнитный потенциал» с нулевыми значениями по всем составляющим вектора. (рисунок 5.31)

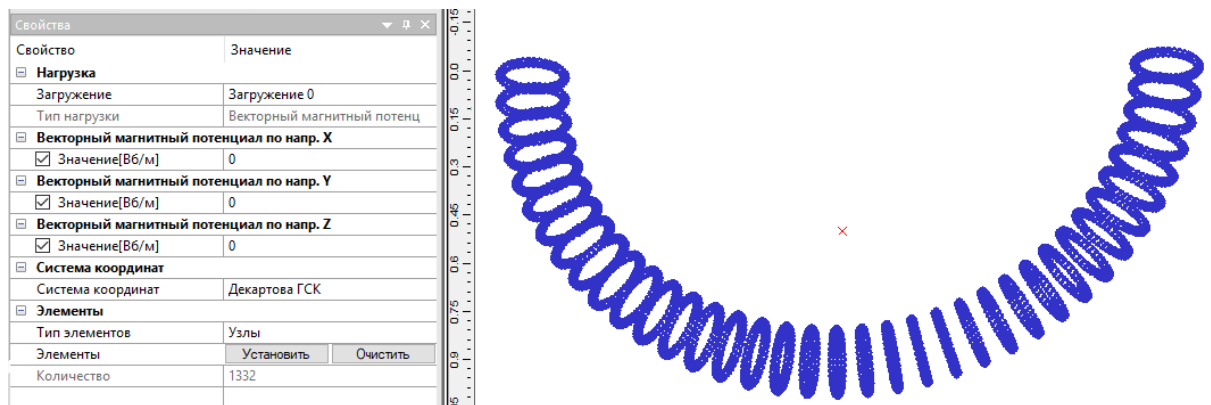


Рисунок 5.31 – Векторный магнитный потенциал, приложенный на внешние узлы модели

4. Выключите слой «Внешние узлы» и включите «Слой 0».
5. Создайте еще одну нагрузку «Векторный магнитный потенциал» с нулевыми значениями по направлениям X и Z, а направление Y не используется

(для этого надо выключить соответствующий переключатель).

6. Задайте эту нагрузку на узлы обоих торцов модели (рисунок 5.32).

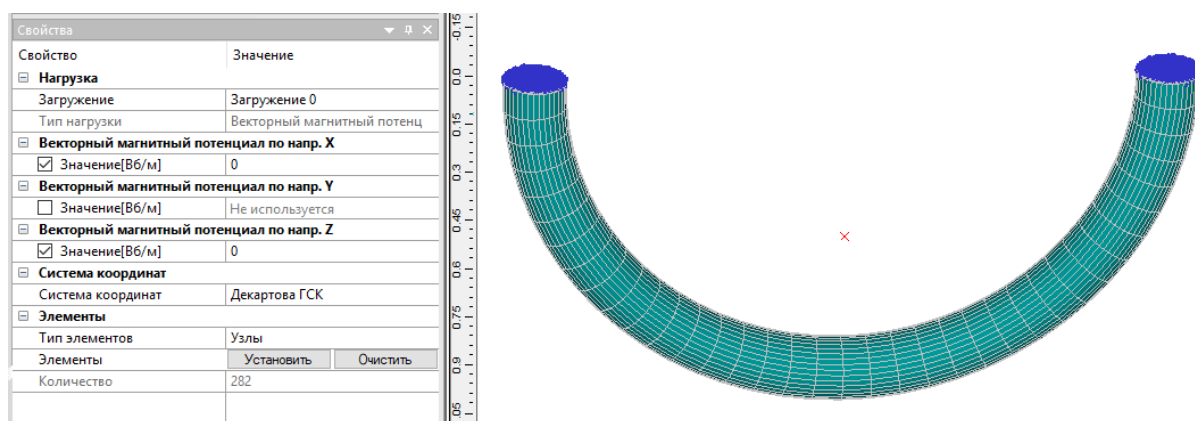


Рисунок 5.32 – Векторный магнитный потенциал на узлы торцов модели.

Расчет и просмотр результатов

1. В пункте горизонтального меню *Расчеты/Расчет...* снять *Линейный статический расчет* и установить *Нестационарный электромагнитный расчет*. Метод расчет Sparse_LDL. Нажать ОК.

2. После окончания расчета нужно выбрать пункт горизонтального меню *Результаты/Карта результатов...* В появившемся диалоге необходимо выбрать *Тип расчета* – *Нестационарный электромагнитный расчет* (рисунок 5.33).

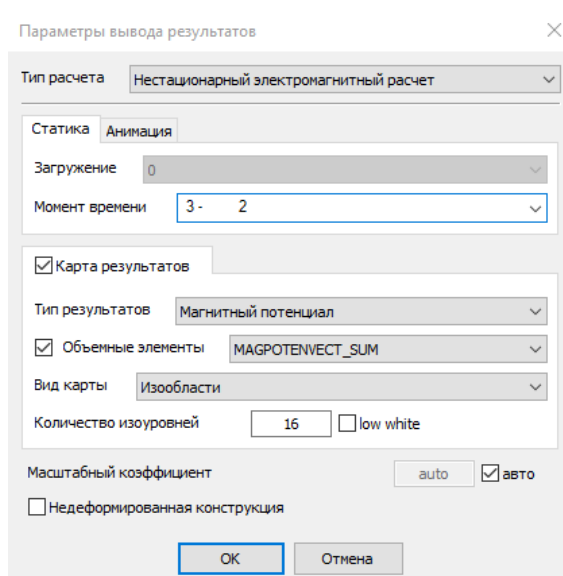


Рисунок 5.33 – Диалог с результатами нестационарного электромагнитного расчета

3. Подробнее результаты представлены на рисунка 5.34 – 5.44. Для наглядности результаты приведены для последнего момента времени. Векторные результаты представлены частью модели для большей наглядности.

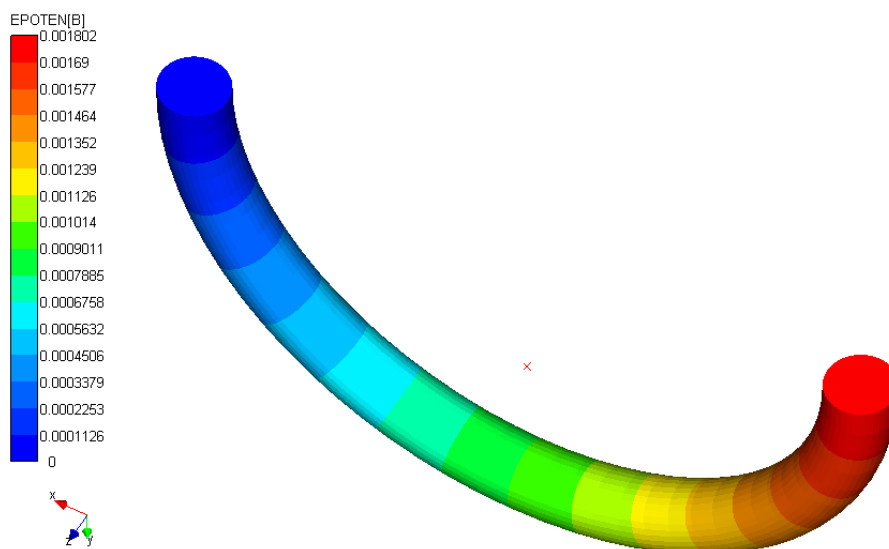


Рисунок 5.34 – Электрический потенциал

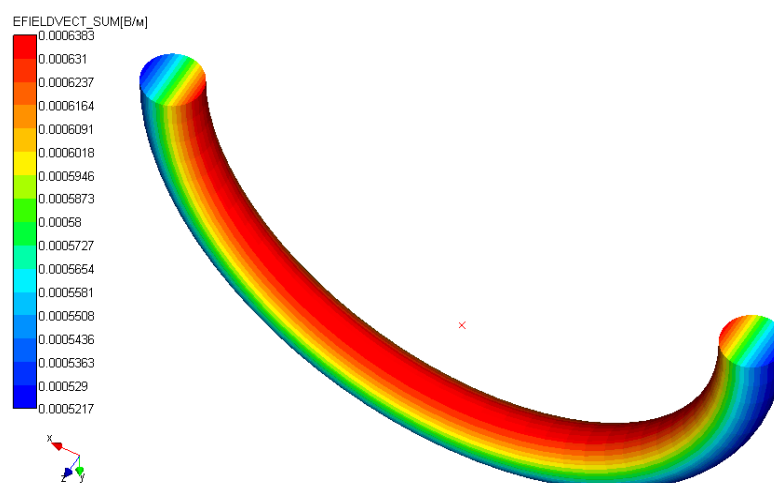


Рисунок 5.35 – Напряженность электрического поля

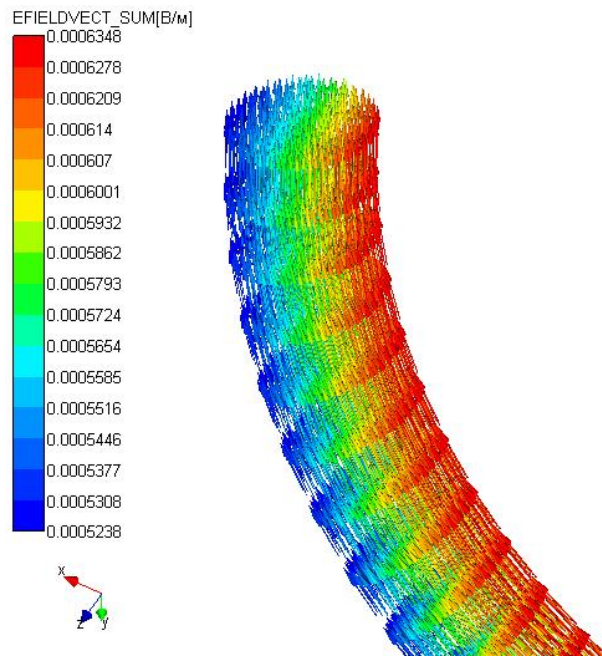


Рисунок 5.36 – Векторная напряженность электрического поля

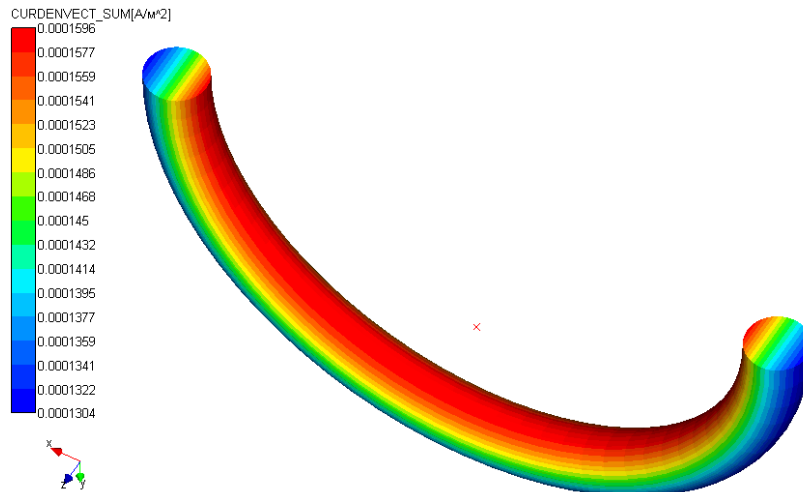


Рисунок 5.37 – Плотность тока

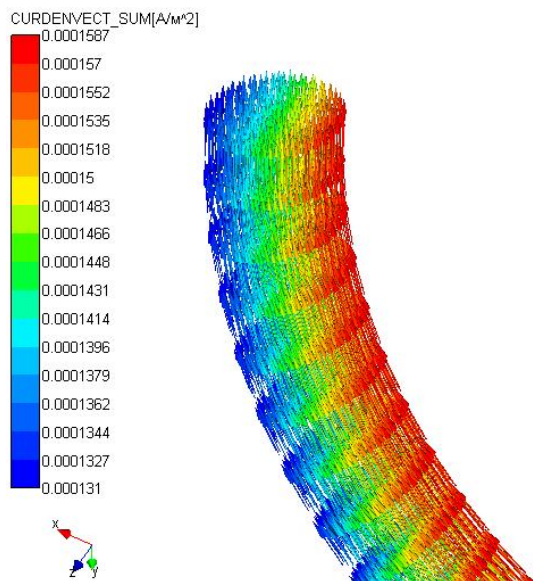


Рисунок 5.38 – Векторная плотность ток

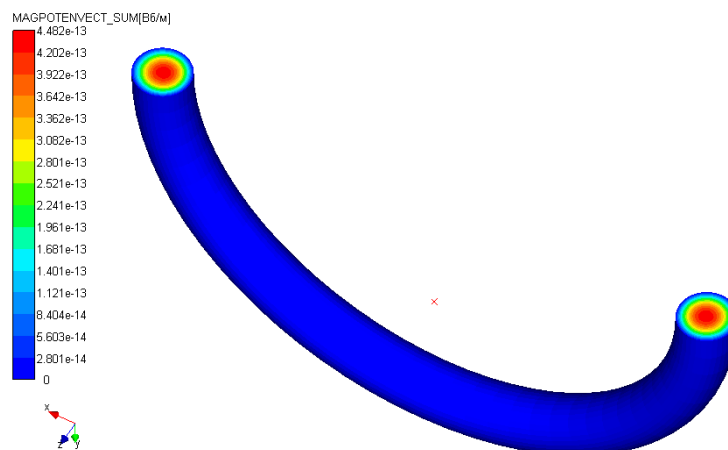


Рисунок 5.39 – Магнитный потенциал

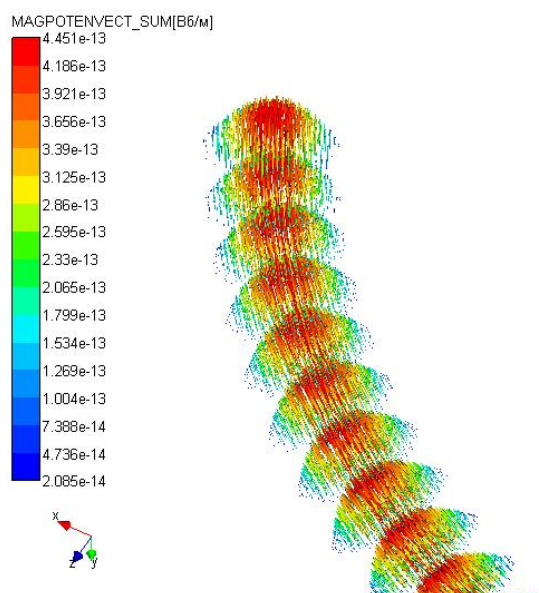


Рисунок 5.40 – Векторный магнитный потенциал

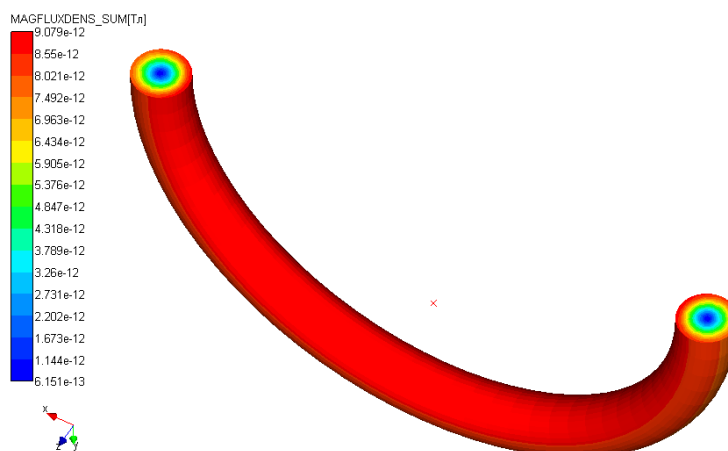


Рисунок 5.41 – Магнитная индукция

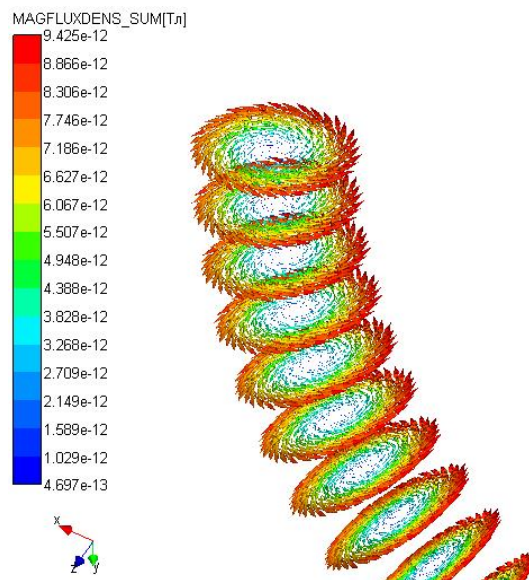


Рисунок 5.42 – Векторная магнитная индукция

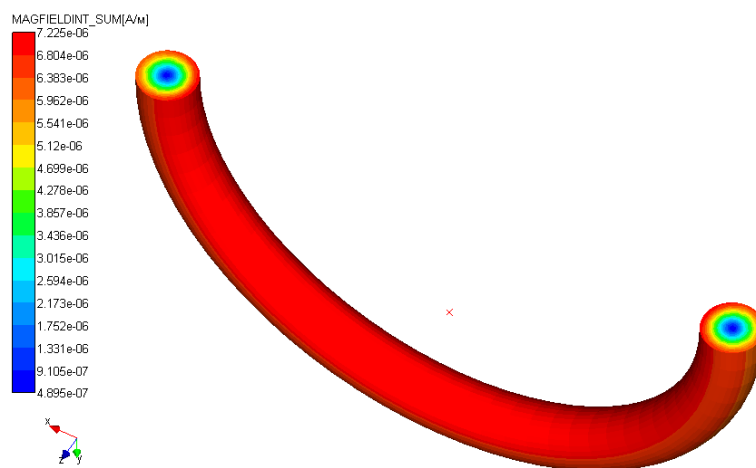


Рисунок 5.43 – Напряженность магнитного поля

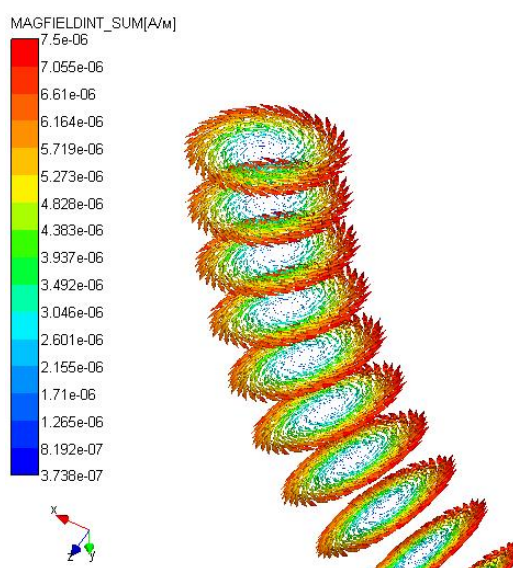


Рисунок 5.44 – Векторная напряженность магнитного поля

5.5 Расчет тефлонового резонатора (Высокочастотный модальный анализ)

Откройте файл 3DHF1.frm

Задание материалов в модели

1. Для материала «Сталь», помимо изотропного свойства, добавьте еще два свойства: относительная диэлектрическая проницаемость с постоянным значением 2,05 и относительная магнитная проницаемость с постоянным значениям равным 1 (рисунок 5.45).

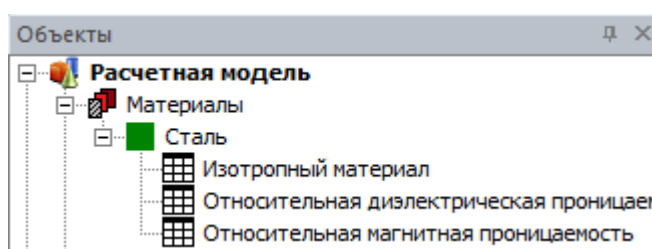


Рисунок 5.45 – Задание электромагнитных свойств материала

2. Задайте данный материал для всей модели: пункт контекстного меню материала «Задать всем».

Задание нагрузок в модели

1. Создайте нагрузку «Идеальный электрический проводник». Для этого в контекстном меню узла «Высокочастотные нагрузки» выберите соответствующий пункт меню.

2. Выберите тип элементов ребра (рисунок 5.46) на панели «Свойства» и выделите всю модель. Для этого типа нагрузки будут выделены все внешние ребра модели.

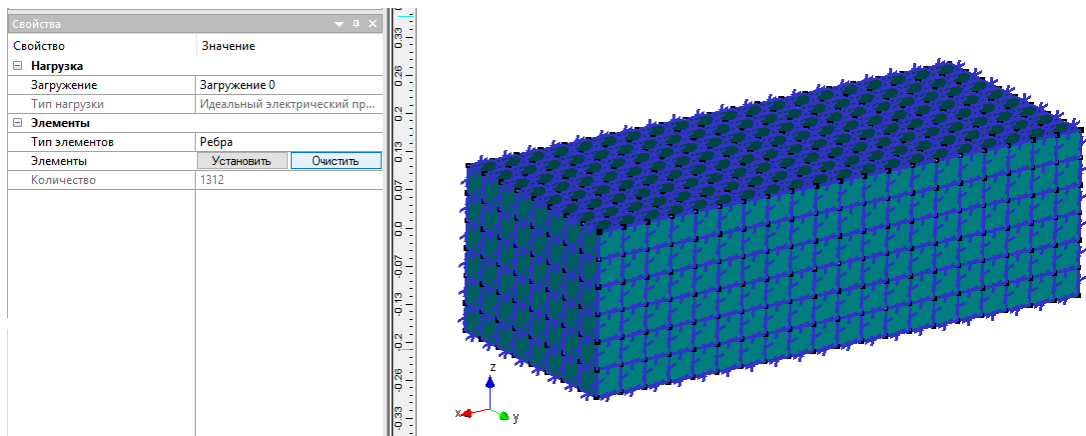


Рисунок 5.46 – Задание нагрузки «Идеальный электрический проводник» на внешние ребра модели

Расчет и просмотр результатов

1. В пункте горизонтального меню *Расчеты/Расчет...* снять *Линейный статический расчет* и установить *Нестационарный электромагнитный расчет*. Метод расчета Sparse_LDL. Нажать ОК.

2. После окончания расчета нужно выбрать пункт горизонтального меню *Результаты/Карта результатов...* В появившемся диалоге необходимо выбрать *Тип расчета* – *Нестационарный электромагнитный расчет* (рисунок 5.47).

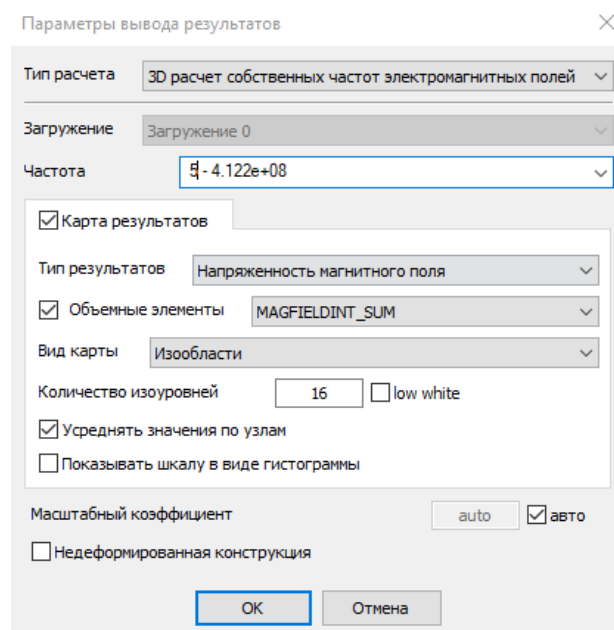


Рисунок 5.47 – Диалог с результатами высокочастотного модального анализа

2. Подробнее результаты представлены на рисунках 5.48-55.

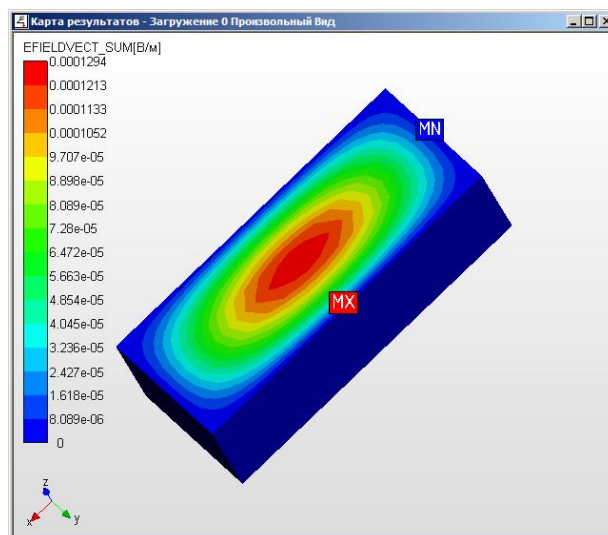


Рисунок 5.48 – Напряженность электрического поля на частоте $2,83497e+08$ Гц

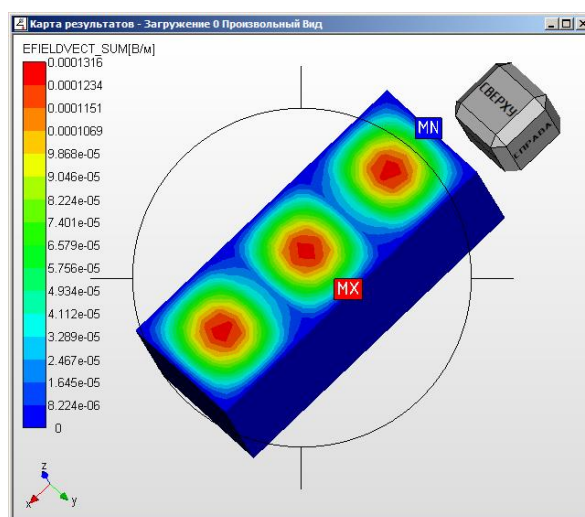


Рисунок 5.49 – Напряженность электрического поля на частоте $4,12153e+08$ Гц

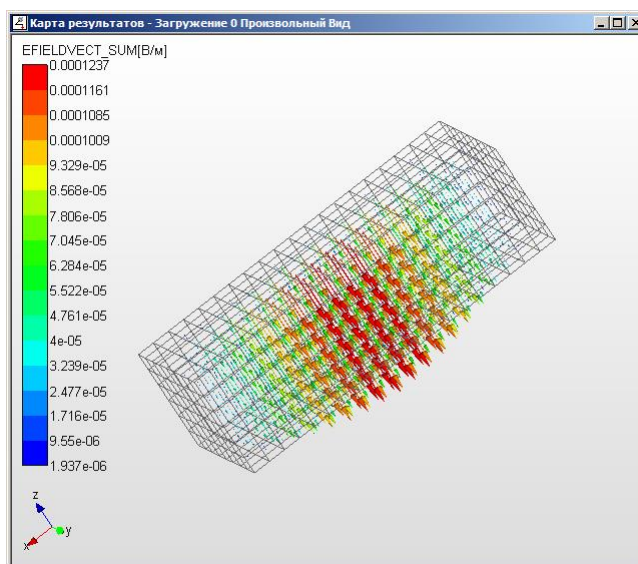


Рисунок 5.50 – Векторная напряженность электрического поля на частоте $2,83497\text{e}+08\text{Гц}$

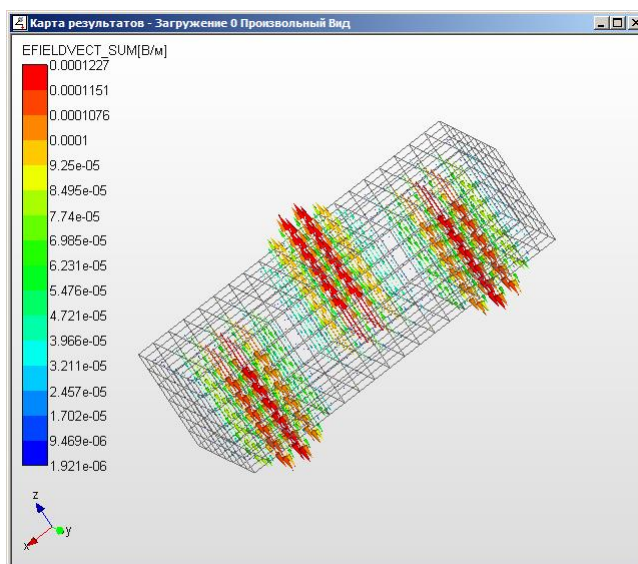


Рисунок 5.51 – Векторная напряженность электрического поля на частоте $4,12153\text{e}+08\text{Гц}$

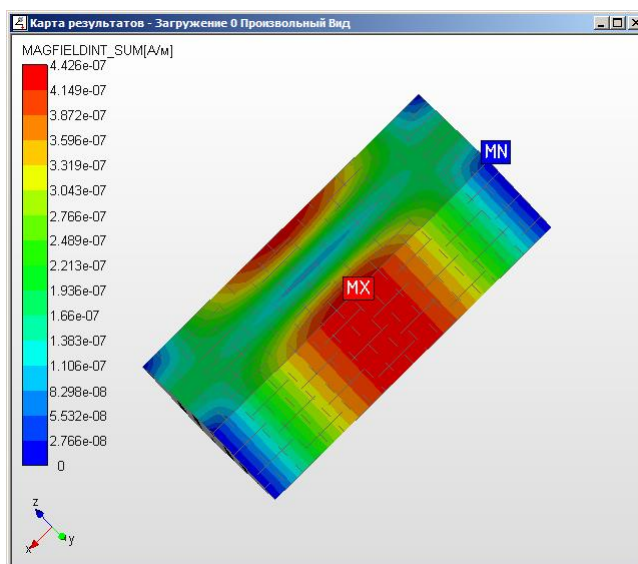


Рисунок 5.52 – Напряженность магнитного поля на частоте $2,83497e+08$ Гц

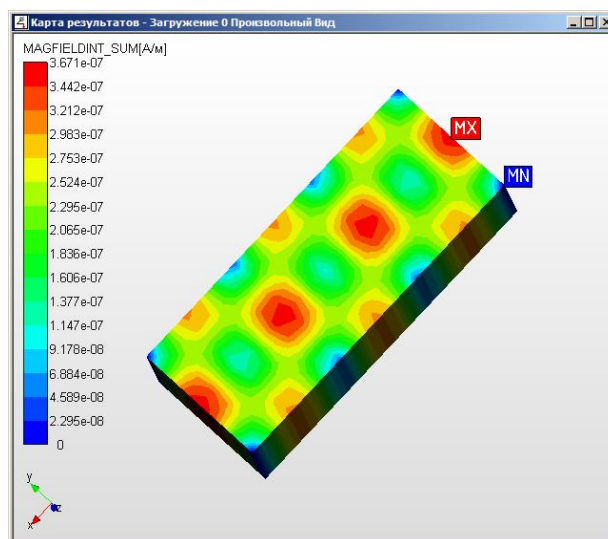


Рисунок 5.53 – Напряженность магнитного поля на частоте $4,12153e+08$ Гц

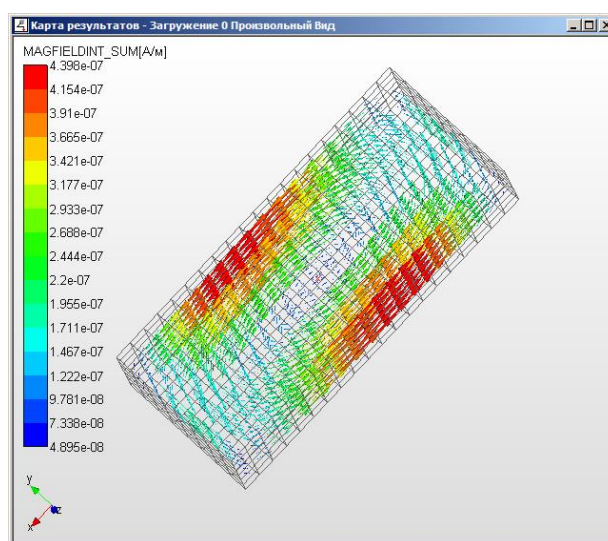


Рисунок 5.54 – Векторная напряженность магнитного поля на частоте $2,83497e+08$ Гц

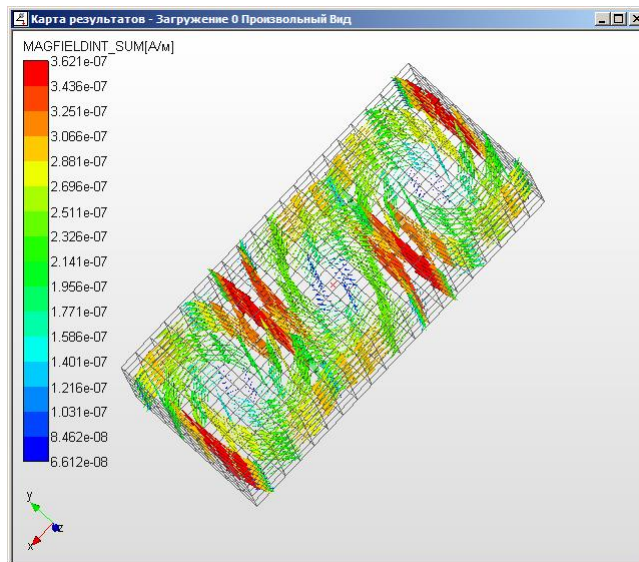


Рисунок 5.55 – Векторная напряженность магнитного поля на частоте $4,12153 \times 10^8$ Гц