

ELCUT

Новый подход к
моделированию полей



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

ELCUT:

программа конечно-элементного моделирования
низкочастотных электромагнитных полей:

опыт разработки, исследований и преподавания

1

П.А. БУТЫРИН,

ЧЛЕН-КОРР. РАН, Д.Т.Н, ПРОФ., ЗАВ. КАФ. ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ МЭИ

Н.В. КОРОВКИН,

Д.Т.Н, ПРОФ., ЗАВ. КАФ. ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

С.Д. ДУБИЦКИЙ,

ДИРЕКТОР ООО «ТОР»

План

2

1

ELCUT – как все начиналось

2

Состав и возможности программы

3

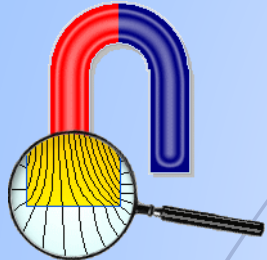
Некоторые решенные задачи

4

ELCUT в преподавании теоретической электротехники

ELCUT инженерный инструмент моделирования электромагнитных и температурных полей

Отечественный программный продукт мирового уровня.



Anno 1988

Истоки

Электросила, Политехнический институт

- Компания основана в 1988 г.
Продажи первой версии начались в 1990 г. (MS DOS)
- Первые европейские и американские продажи: 1993

Становление

Анализ в частотной и временной области

- **Электрическое поле:** статическое (2D, 3D), гармоническое, импульсное
- **Магнитное поле:** статическое, гармоническое, импульсное
- **Температурное поле:** установившееся (2D, 3D), нестационарное
- **Упругие напряжения и деформации:** статический 2D анализ

Зрелость

Программный интерфейс (API), 3D анализ

- Опубликованный **обширный API** открывает возможность создания утилит и специализированных приложений.
- **Собственные утилиты:** параметрический анализ, анализ допусков и погрешностей, оптимизация

Пользователи ELCUT

4

Индустрия

Электроэнергетика :

- Электросила
- ЗЭТО (Великие Луки)
- СВЭЛ (Екатеринбург)
- РосЭнергоТранс (Е-бург)
- УралЭлектроТяжмаш
- Севкабель (Петербург)
- ССТ (Мытищи)
- з-д Элеконд (Сарапул)

Обогащение и сепарация:

- Продэкология (Ровно)
- Рудгормаш (Воронеж)
- Механобр (СПб)

Напыление в магн. поле:

- Изовак (Минск)
- Сидрабе (Рига)

Строительное проектир.

Магнитные технологии

Исследования

Физика:

- ОИЯИ Дубна
- ВНИИЭФ Саров
- ФИАН Москва
- Ин-т Сильноточной электроники РАН (Томск)

Электротехника:

- ВНИИКП (Москва)
- ЦНИИ Электроприбор
- НИИЭФА им. Ефремова
- Ин-т Электроэнергетики РАН
- НТЦ Высоковольтной аппаратуры (Саров)
- ВИТ (Запорожье)

Материаловедение:

- ЦНИИ Прометей
- Магнетон (Владимир)
- ЦНИИТМАШ (Москва)

Образование

Москва:

- МЭИ
- МАИ
- МИЭМ (ВШЭ)
- Архитектурно-строительный ун-т

Санкт-Петербург:

- Политехнический ун-т
- СПб ГУАП
- Ун-т путей сообщения
- ИТМО
- ЛЭТИ

Урал и Сибирь:

- Томский Политехн. ун-т
- Томский гос. Ун-т
- Новосиб. ГТУ
- Новосиб. Сибстрин
- Уральский федер. ун-т
- Сибирский федер. ун-т

Обзор ELCUT: постановки задач

5

Электрическое поле

Электростатика

- Емкость
- Электрическая прочность

Постоянный ток

- Сопротивление
- Омические потери

$$U=U_0\cos(\omega t+\varphi_0)$$

- Активный, реактивный ток
- Омические потери
- Реактивная мощность

$$U=f(t)$$

- Нелинейные диэлектрические среды

Магнитное поле

Магнитостатика

- Индуктивность
- Насыщение ферромагнетиков

$$I=I_0\cos(\omega t+\varphi_0)$$

- Эффект вытеснения, эффект близости
- Индуктивность при повышенной частоте
- Потери в проводниках и в магнетиках

$$I=f(t)$$

- Магнитное поле при импульсном и несинусоидальном возбуждении

Температурное поле; механическая прочность

Установившаяся температура

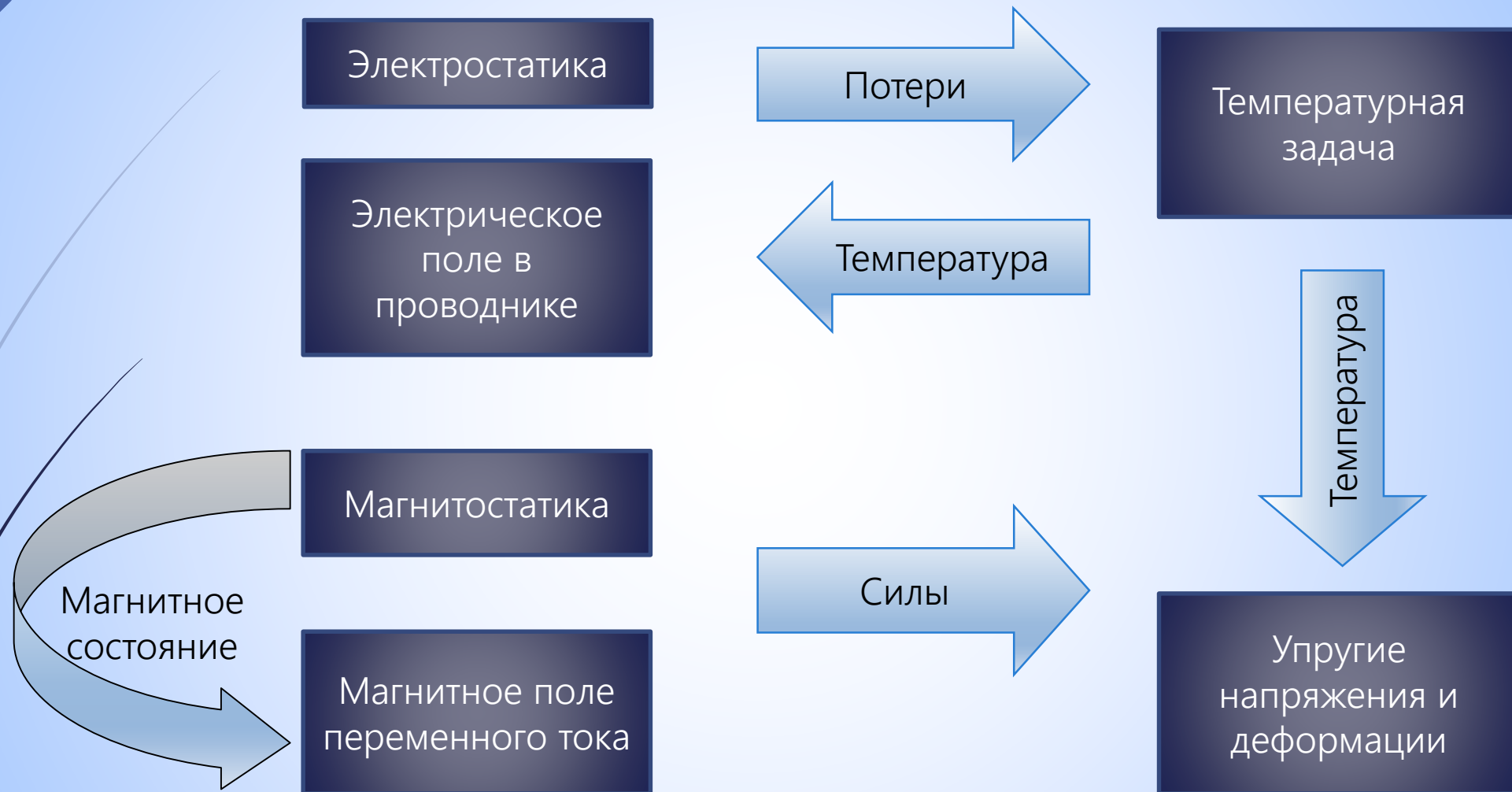
$$T=f(t)$$

Упругость

- Граничные условия: конвекция, радиация
- Температурное поле, тепловые потоки
- Нелинейная теплопроводность и теплоемкость
- Плоско-напряженное или плоско-деформированное упругое состояние

Мультифизические задачи

6



Функциональные подсистемы ELCUT

7

Модель

Геометрия
и сетка

Соединения

Подключенная
электрическая
цепь

Данные

- Материалы
- Граничные условия
- Источники

Решатели

- Статический
- Гармонический
- Нестационарный
- Нелинейность

Постпроцессор

- Картина поля
- Интегралы
- Таблицы
- Графики

Импорт:
DXF, STEP,
SolidWorks

Экспорт:
Excel, Matlab,
Garfield

Редактор геометрии 2D

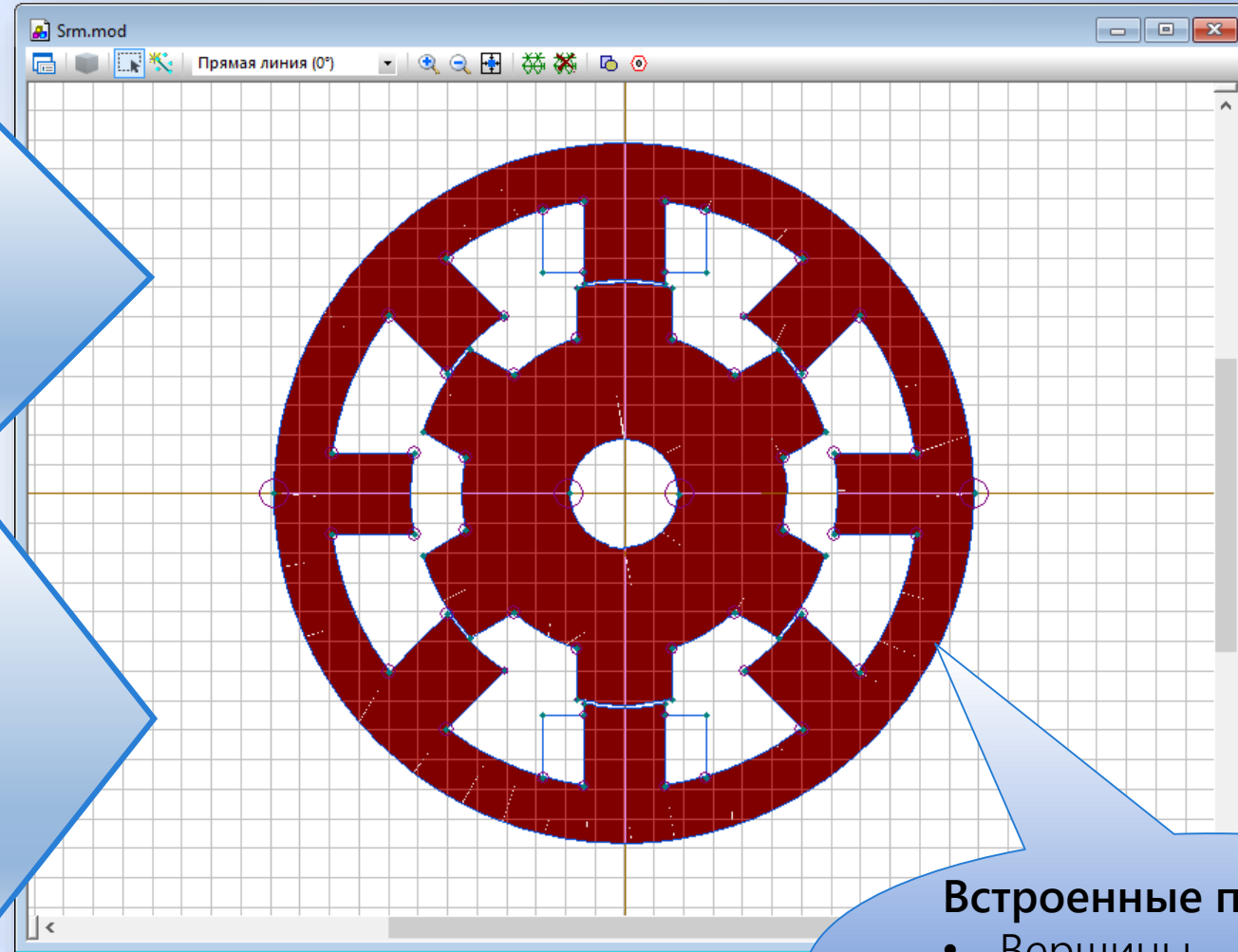
8

Импорт:

- 2D: DXF, SolidWorks
- 3D: STEP

Вставка фигур:

- Прямоугольник
- Круг
- Эллипс



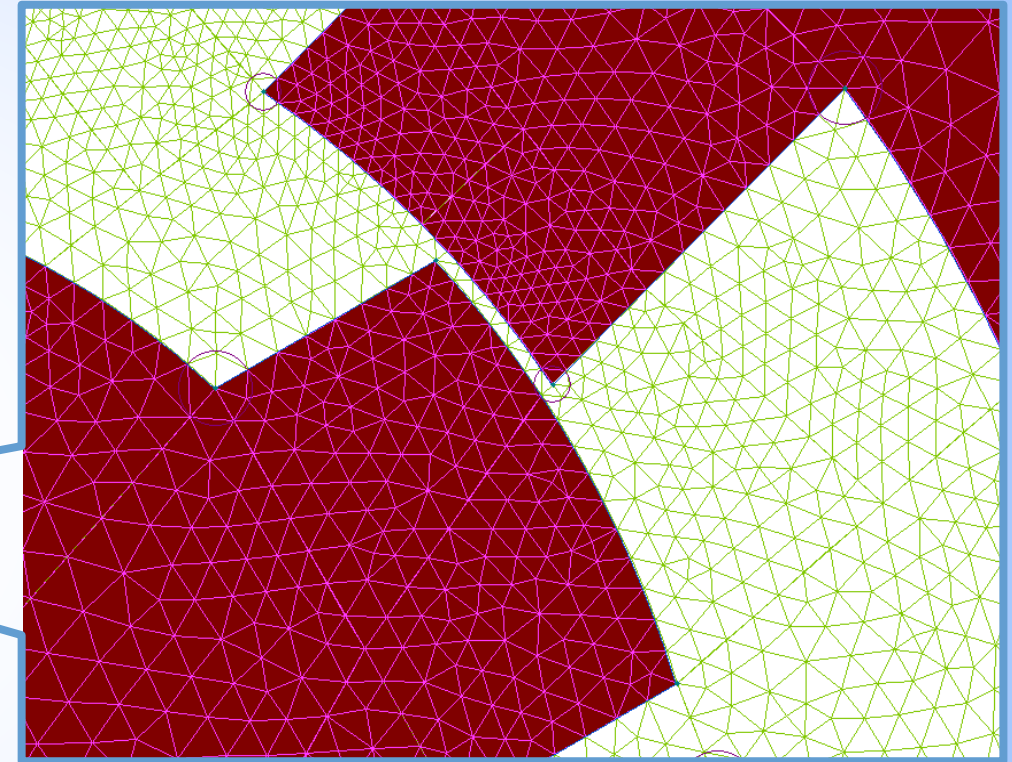
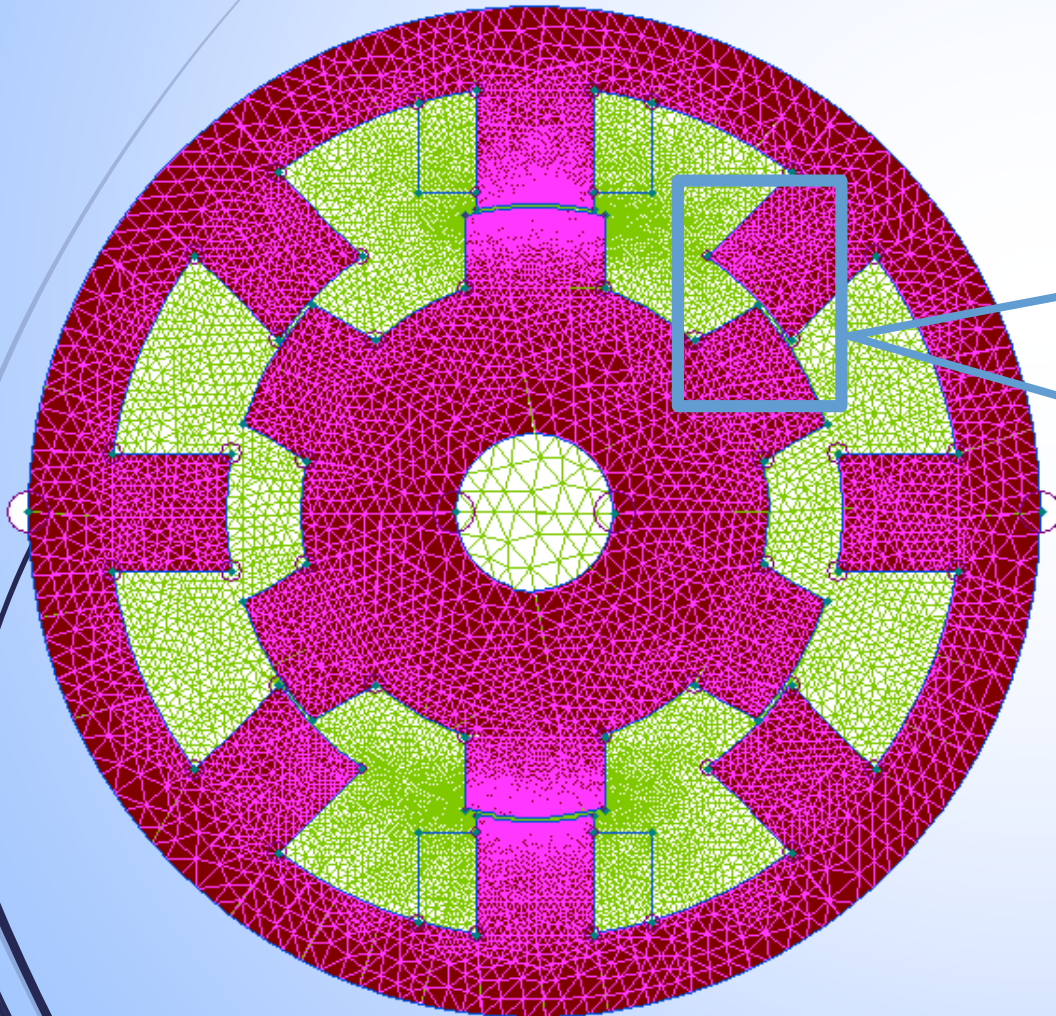
Встроенные примитивы:

- Вершины
- Отрезки
- Дуги окружности

Генератор двумерной сетки конечных элементов

9

Сетка треугольных конечных элементов строится полностью автоматически.



Возможности управления плотностью сетки:

- Расстановка желательных шагов в вершинах исходной геометрии
- Адаптивное сгущение сетки по результату решения на грубой сетке

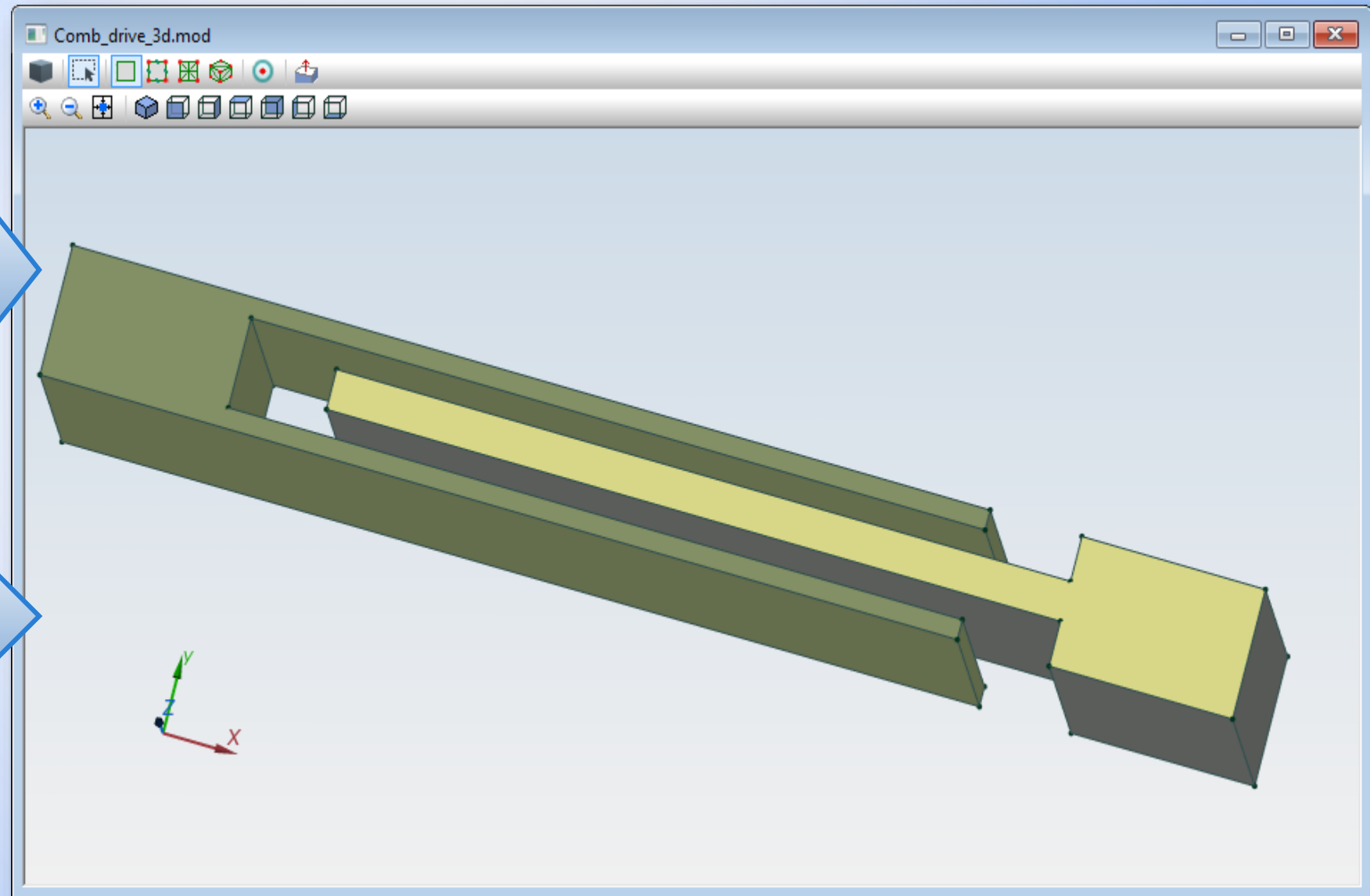
Редактор геометрии 3D

10

Экструзия
плоских фигур

Либо

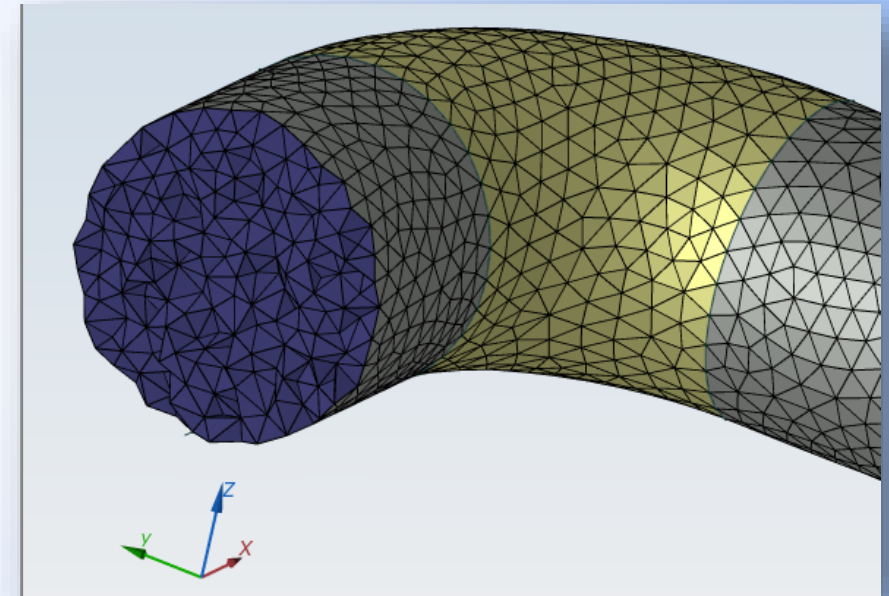
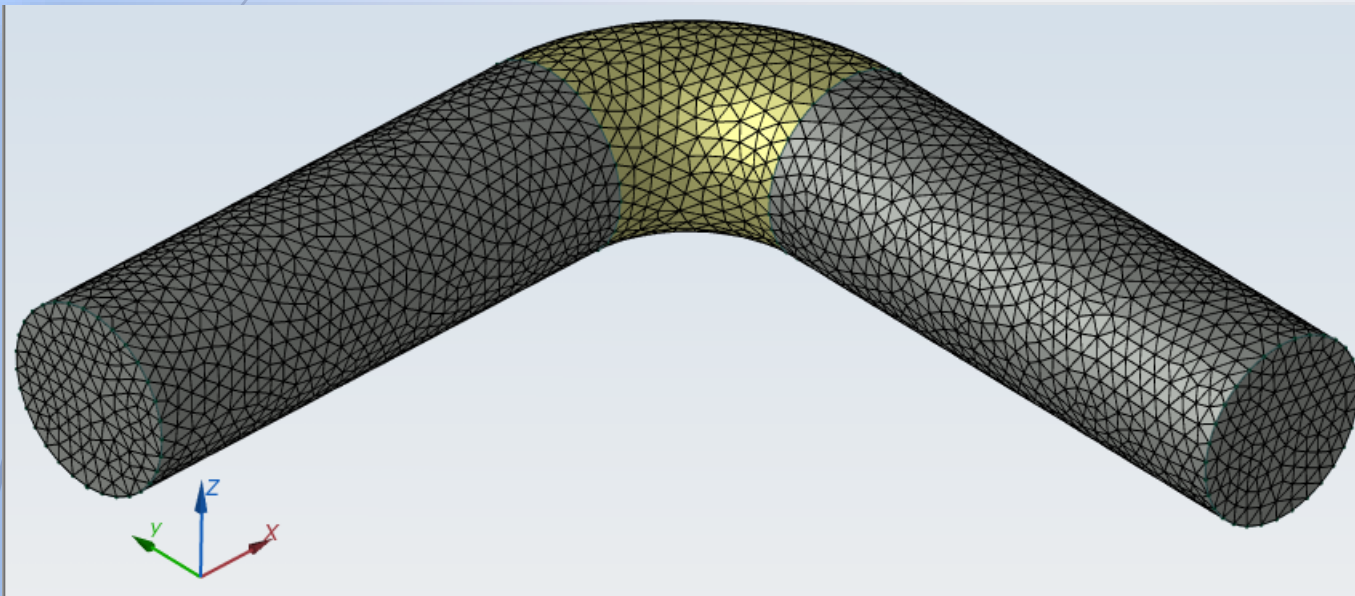
Импорт из CAD



Генератор трехмерной сетки конечных элементов

11

Сетка из тетраэдров строится полностью автоматически.



Для управления плотностью сетки можно (но не обязательно) установить желаемый шаг сетки в любых вершинах исходной геометрии

Работа с данными: материалы, источники, граничные условия

12

Общие Потери в стали

Магнитная проницаемость

$\mu_x =$ Относительная Абсолютная

$\mu_y =$ Абсолютная

Нелинейный материал Анизотропный

Координаты

Декартовы Полярные

Электропроводность

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

Температура (К)

Источники поля

$i_0 =$ (А/м²)

$\varphi =$ (град)

Вид источника:

Плотность тока Полный ток

Проводники соединены:

Параллельно Последовательно

Коэффициенты для потерь в ферромагнетике (не обязательно):

$P_{\text{iron}} = P_{\text{hyst}} + P_{\text{eddy}} + P_{\text{excess}}$ (Вт/м³)

$K_h =$ Потери на гистерезис: $P_{\text{hyst}} = K_h \cdot B^2 \cdot f$

$K_e =$ Потери от вихр. токов: $P_{\text{eddy}} = K_e \cdot B^2 \cdot f^2$

$K_e =$ Добавочные потери: $P_{\text{ex}} = K_e \cdot (B \cdot f)^{3/2}$

ЗАМЕЧАНИЕ: Потери от вихревых токов вычисляются по указанной формуле только если у материала задана нулевая электропроводность.

Магнитные свойства

Электрические свойства

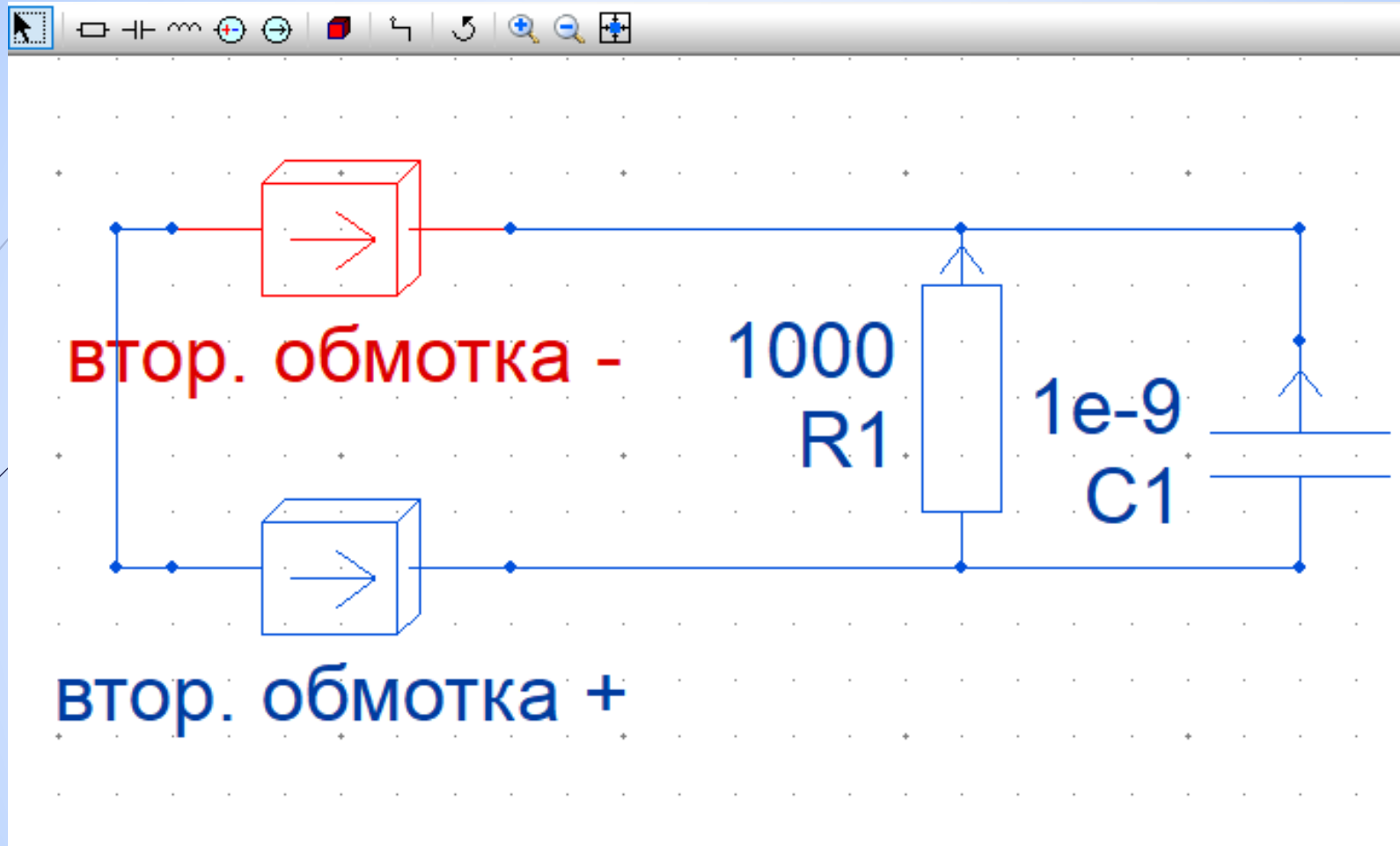
Источники поля

удельные магнитные потери

Свойства материала для расчета магнитного поля с вихревыми токами

Подключенная электрическая цепь

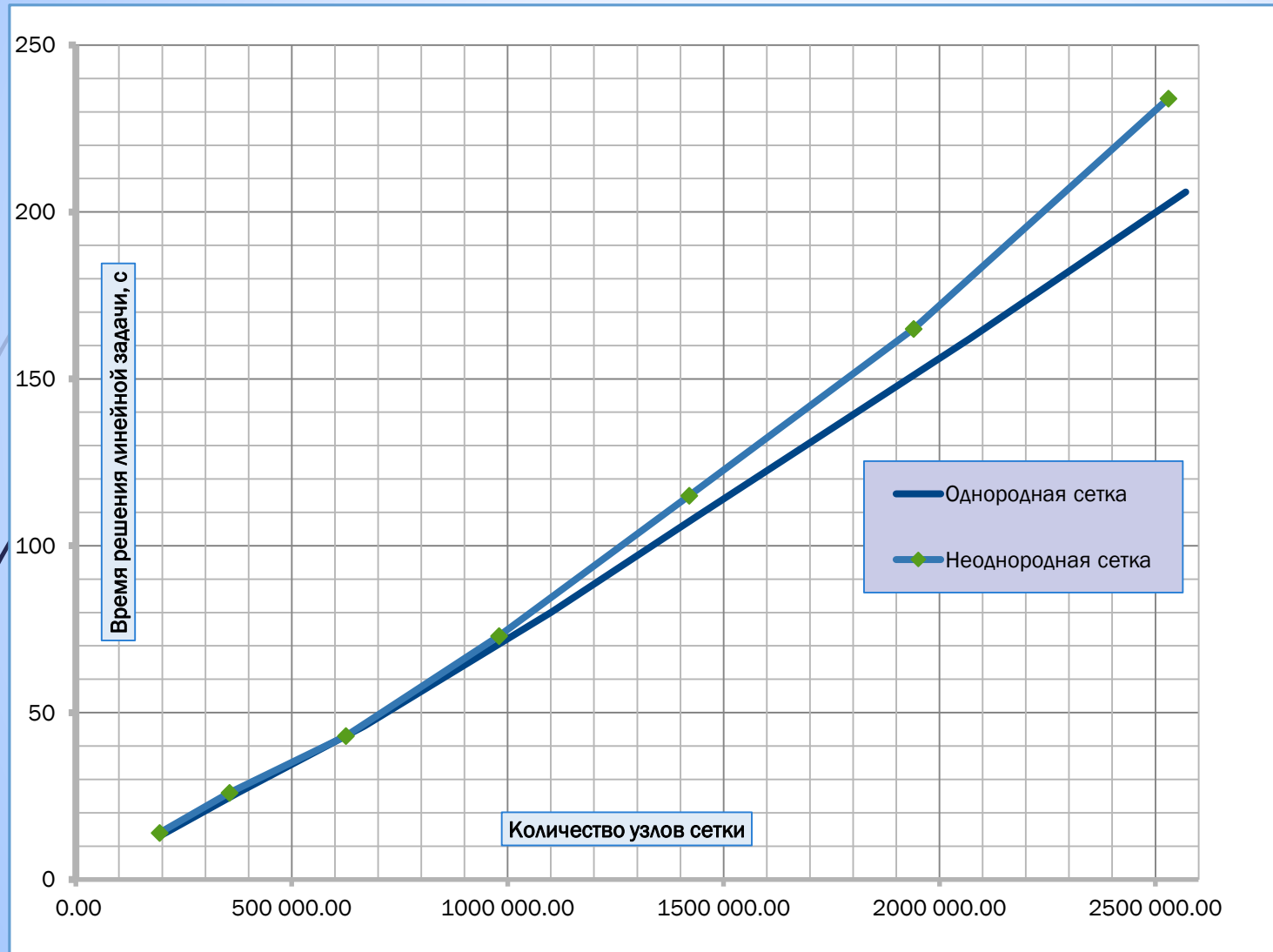
13



- Пассивные элементы: резистор, конденсатор, катушка индуктивности
- Источники: источник тока и источник напряжения
- Элементы связи с полевой частью – блоки ELCUT

Решатель системы уравнений

14



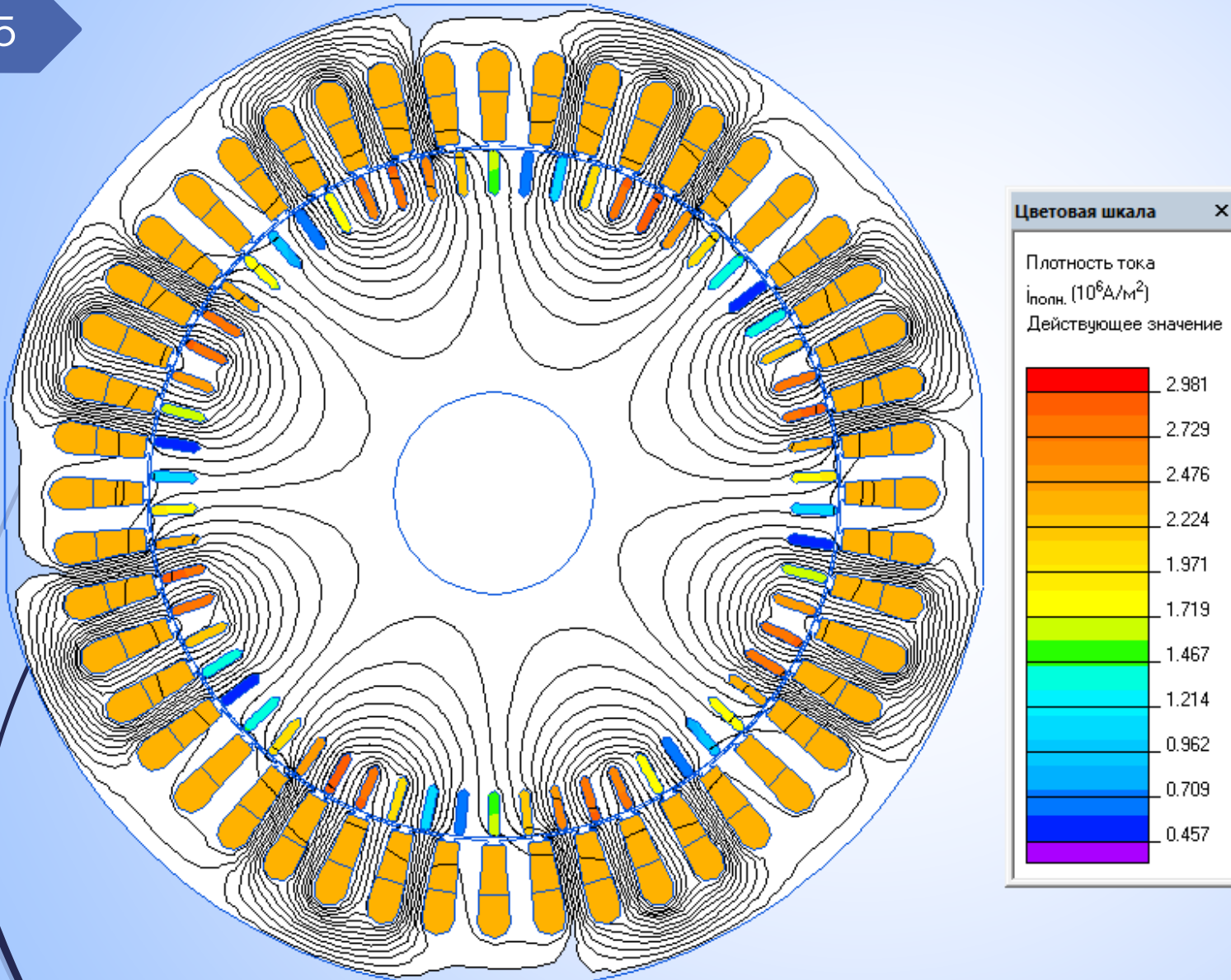
Используется метод сопряженных градиентов с предобуславливанием.

Предобуславливание проводится с использованием геометрической декомпозиции.

Главная особенность решателя ELCUT – медленный рост времени решения с ростом размерности задачи.

Постпроцессор – подсистема анализа результатов

15



Картина поля:

- Цветовая карта
- Изолинии
- Векторы и тензоры

Локальные полевые величины

Интегральные величины:

- Заряд
- Механическая сила
- Ток через поверхность
- Энергия поля
- Потокосцепление
- Тепловой поток
- Мощность потерь

Графики и таблицы:

- Во времени
- В пространстве

Анимация

Экспорт решения

1

ELCUT – инженерный инструмент

2

Состав и возможности программы

3

Некоторые прикладные задачи

4

ELCUT в курсе теоретической электротехники

Перечень решенных задач

17

Задача	Формулировка
1 Электромагнитные потери и нагрев подземных кабельных линий	Электромагнитное поле + температурное поле + цепь (схема заземления)
2 Внешнее магнитное поле силовых кабельных линий	Электромагнитное поле + температурное поле.
3 Сглаживание поля в кабельной муфте	Электрическое поле с токами утечки + температурный эффект диэлектрических потерь
4 Мультифизический анализ сварочного трансформатора	Электромагнитное поле + нестационарное температурное поле + упруго-напряженное состояние
5 Параметры микрополосковой линии связи с учетом технологических факторов	Нестационарное электромагнитное поле + нестационарное температурное поле

Задача 1:

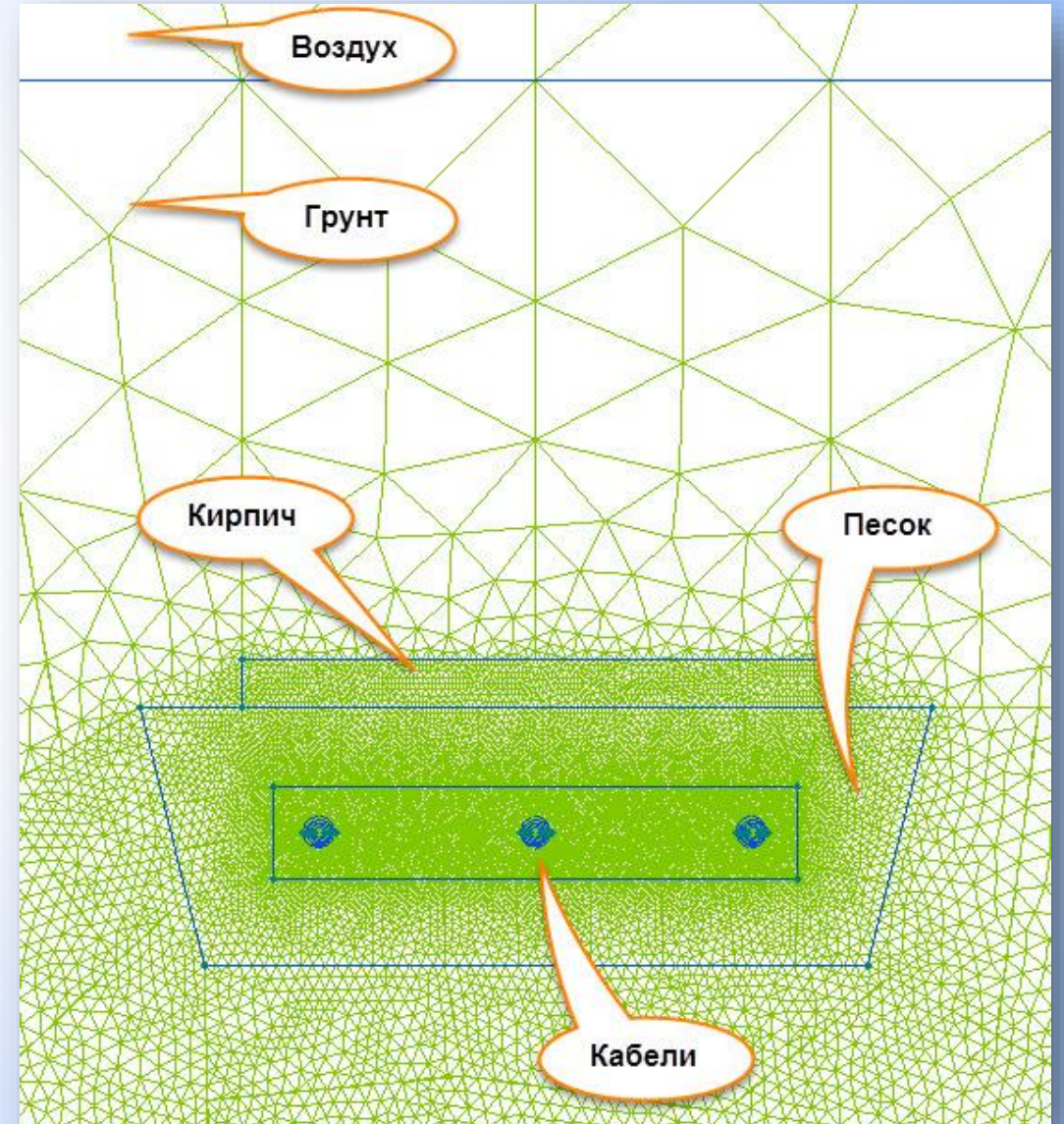
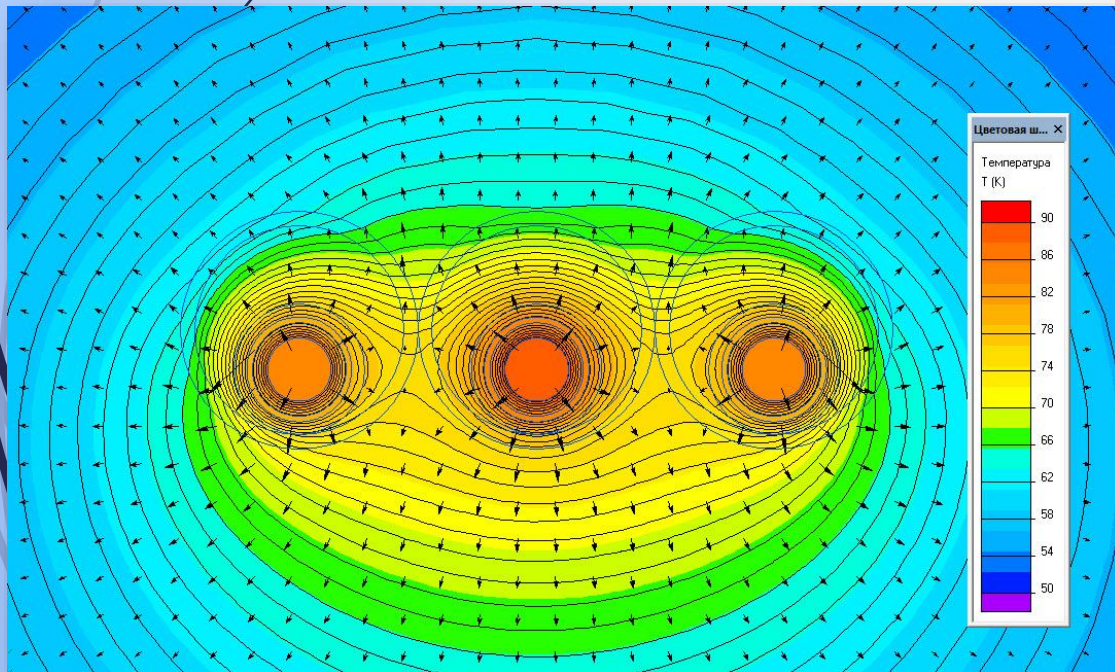
18

Нагрузочная способность кабельных линий

Температурное поле кабельной линии
в подземной траншее:

Постановка задачи:

Результат расчета:

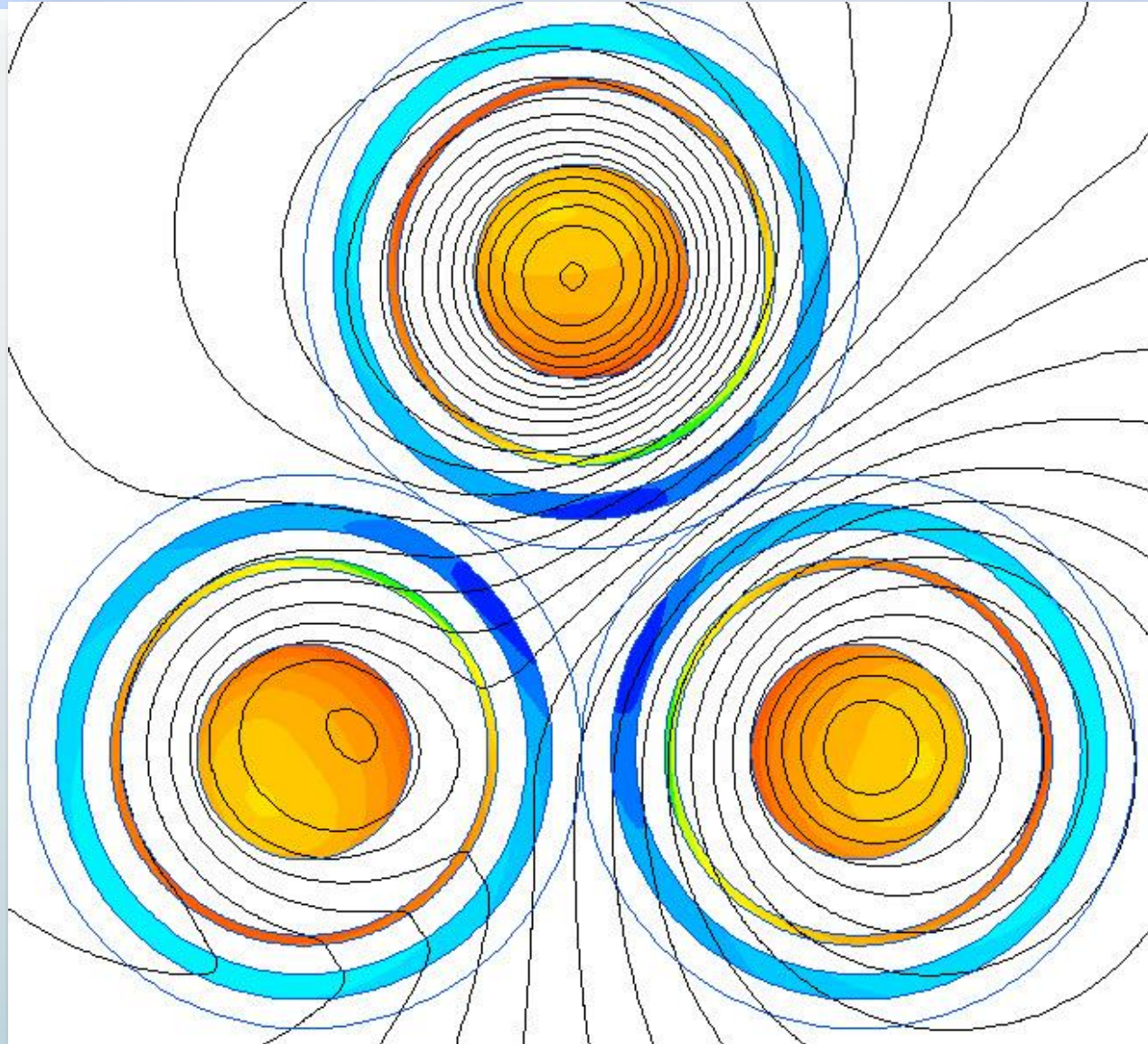


Электромагнитное поле в поперечном сечении

19

Картина поля

Интегральные величины



Калькулятор

Физические величины

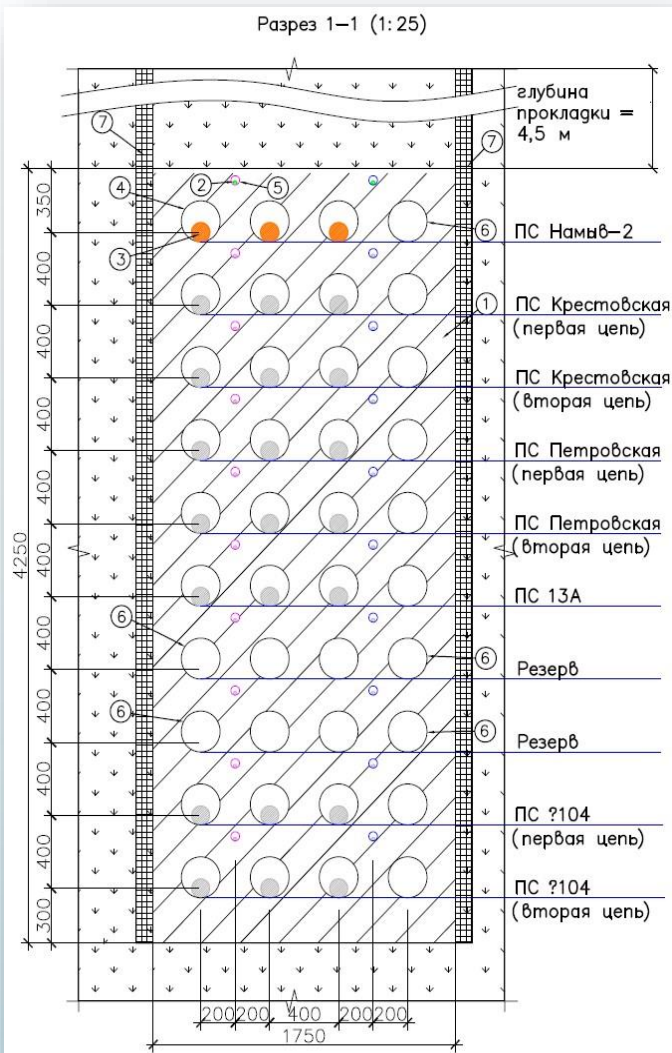
- Полный ток
- Сторонний ток
- Вихревой ток
- Мощность теп. выделения
- Среднее значение
 - $P = 22742 \text{ Вт}$
- Максимальная величина
 - $P = 42744 \text{ Вт}$
- Размах колебаний
 - $P = 20002 \text{ Вт}$
- Мгновенное значение
 - $P = 42735 \text{ Вт}$
- Поток мощности
- Полная пондеромоторная сила
- Полный вращающий момент
- Сила Лоренца
- Вращающий момент силы Лоренца
- Электрическая проводимость
- Энергия магнитного поля
- Потокосцепление на один виток
- Магнитодвижущая сила
- Магнитный поток
- Поверхностная энергия

Потери

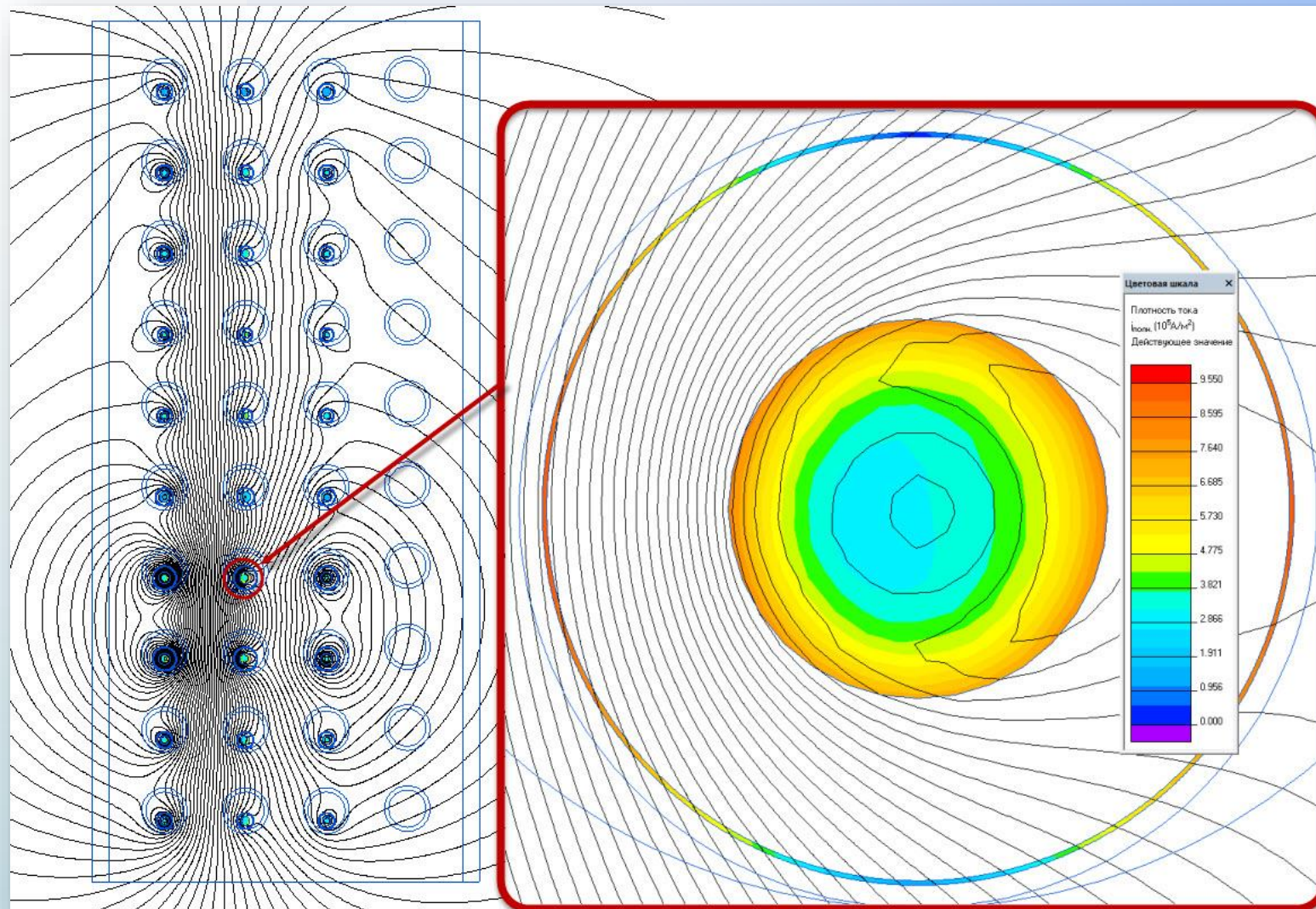
Кабельный блок для 10-ти линий

20

Разрез блока

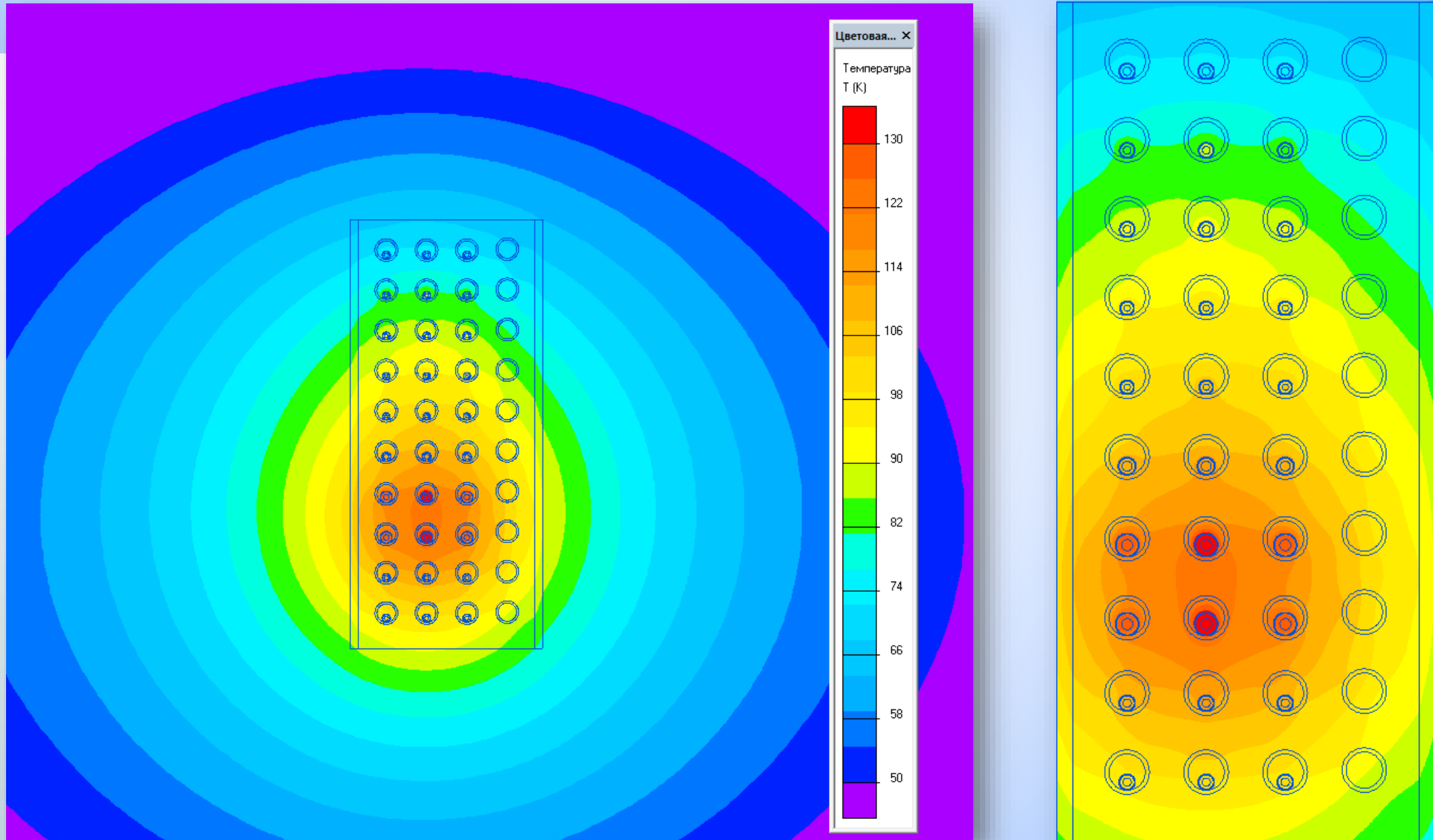


Картина магнитного поля в блоке и в отдельном кабеле



Кабельный блок: температурное поле

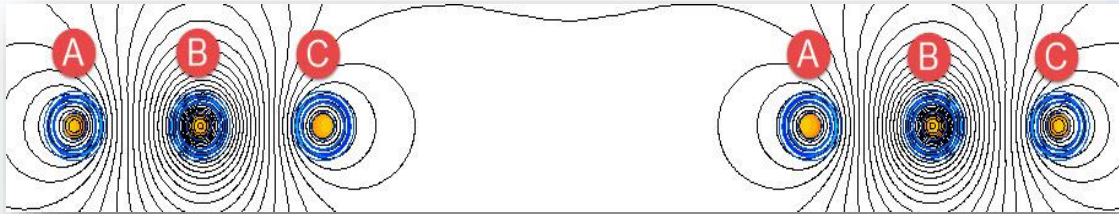
21



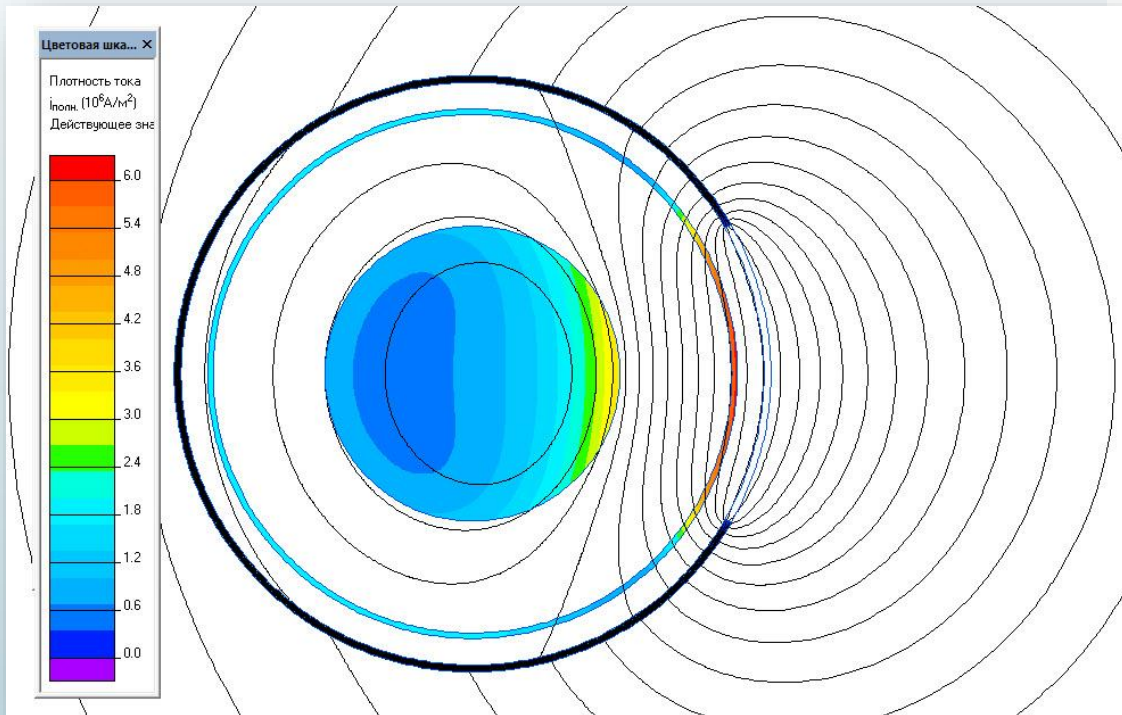
Внешнее магнитное поле кабельной линии

22

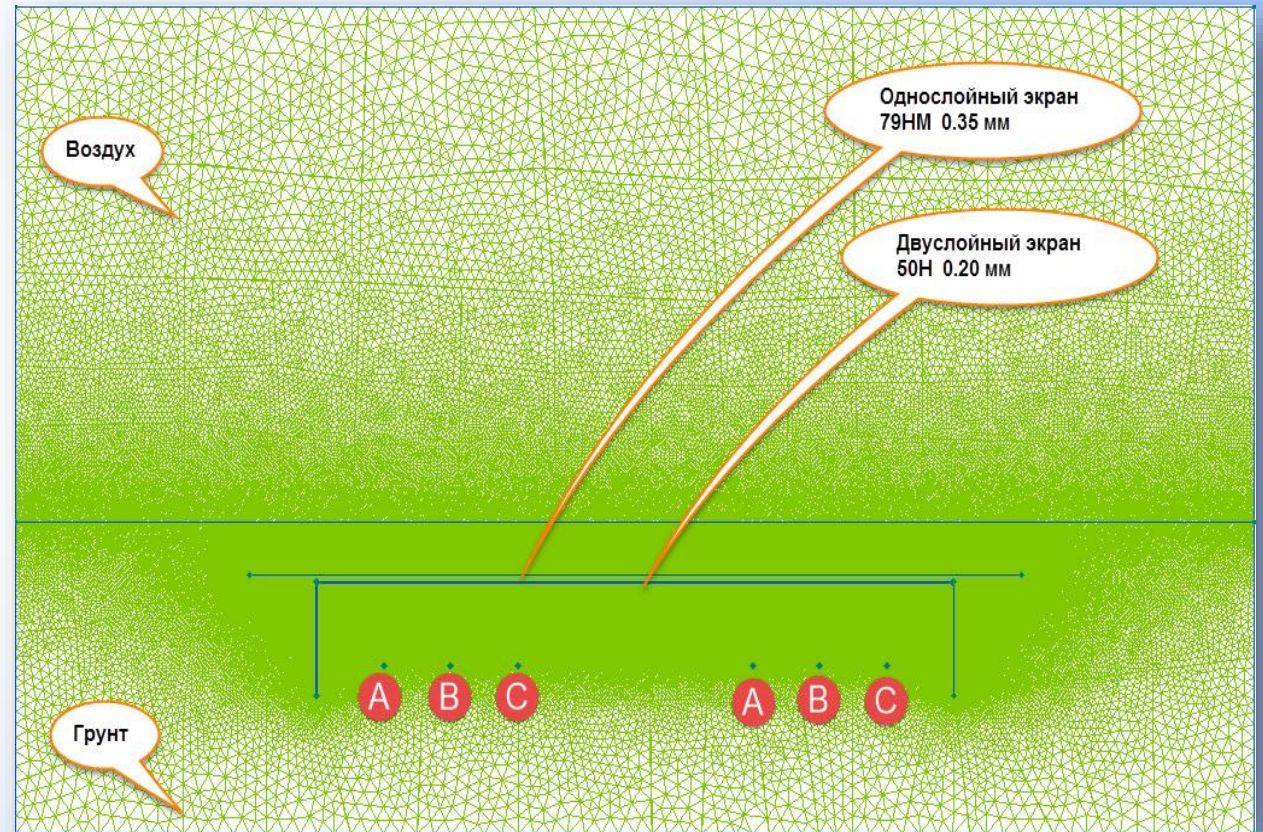
1. Расположение и фазировка кабелей



3. Локальная защита: кольцевые подвижные экраны



2. П-образные экраны из тонких ферромагнитных пленок

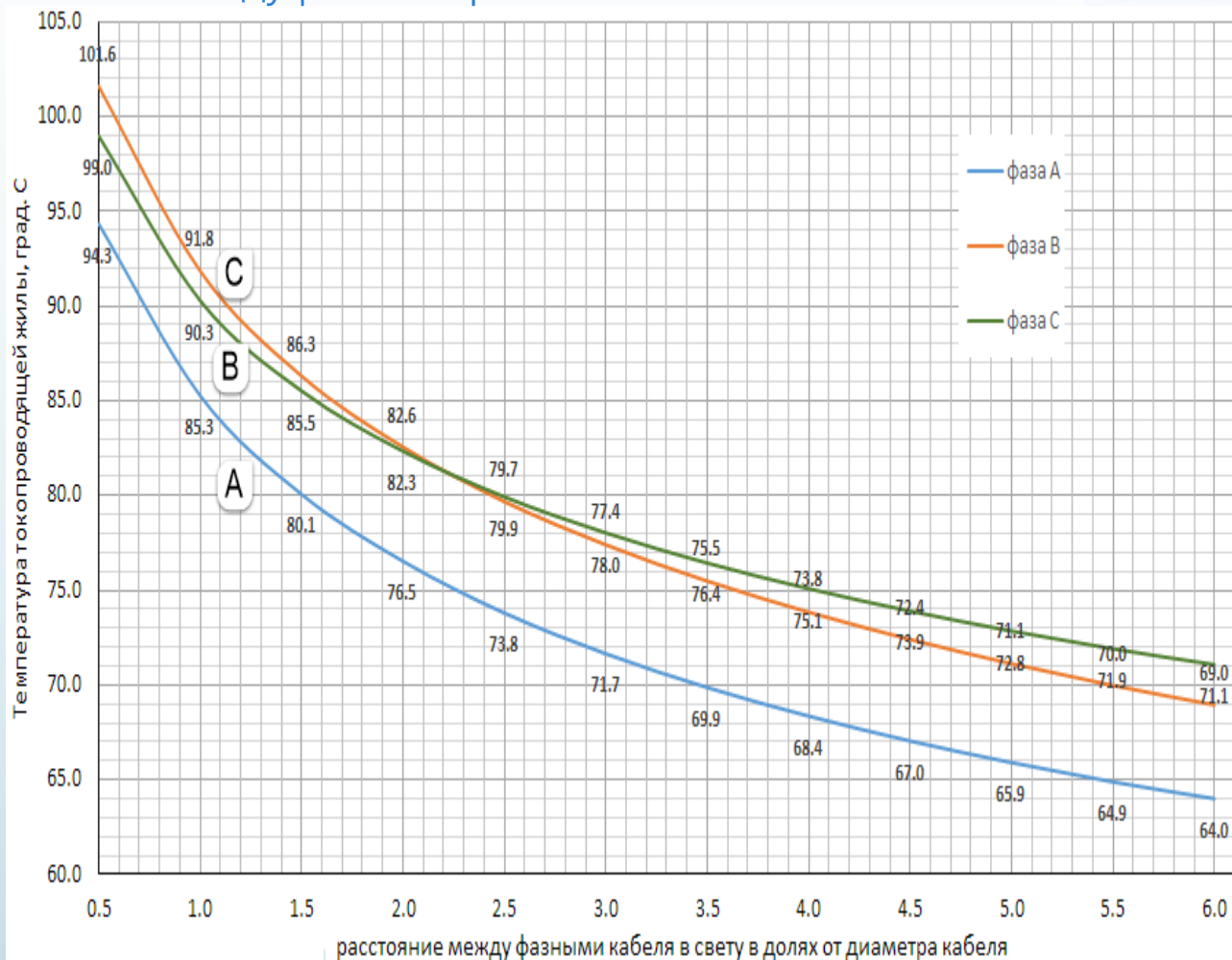


Влияние междофазного расстояния на температуру

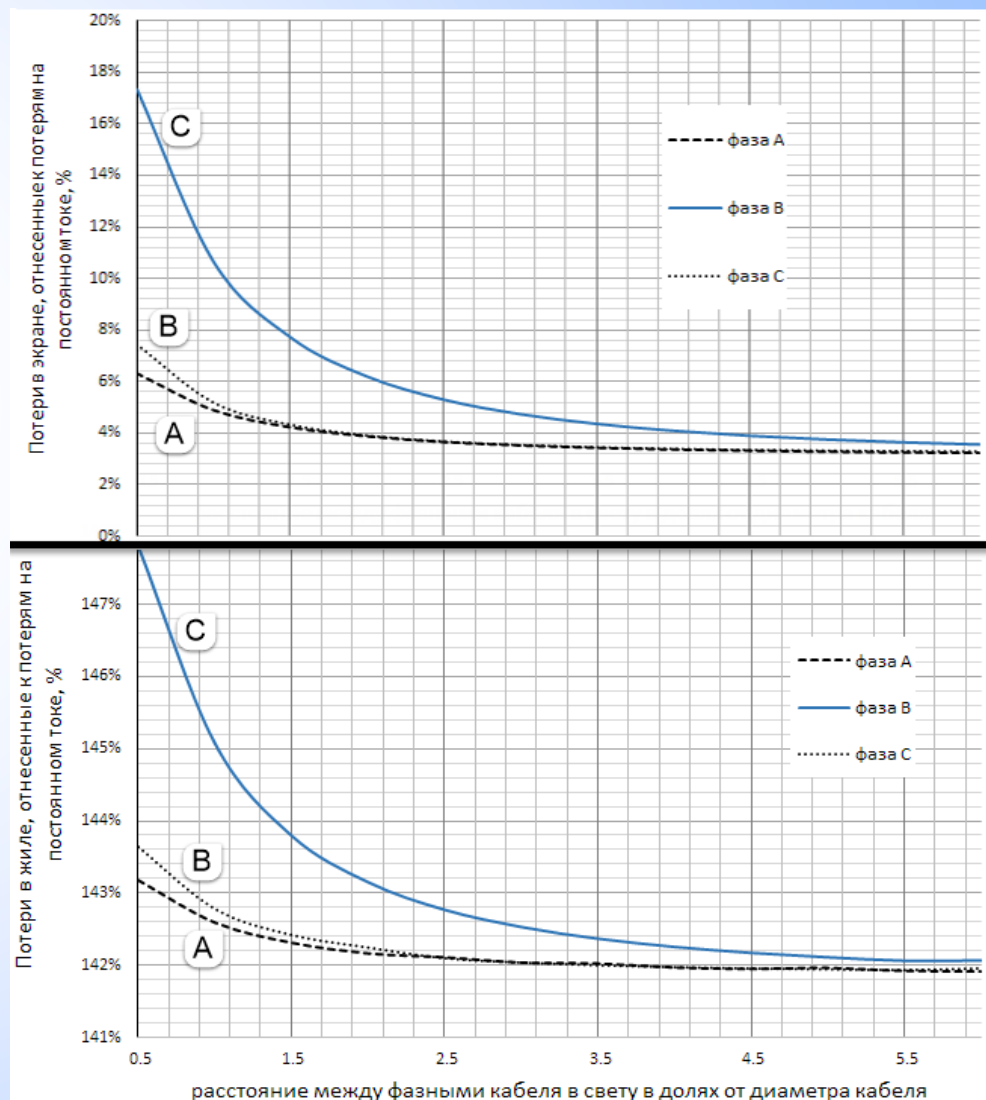
23

Выяснено, что с уменьшением междофазного расстояния возрастает температура кабелей и потери в них.

Температура жилы в зависимости от междофазного расстояния



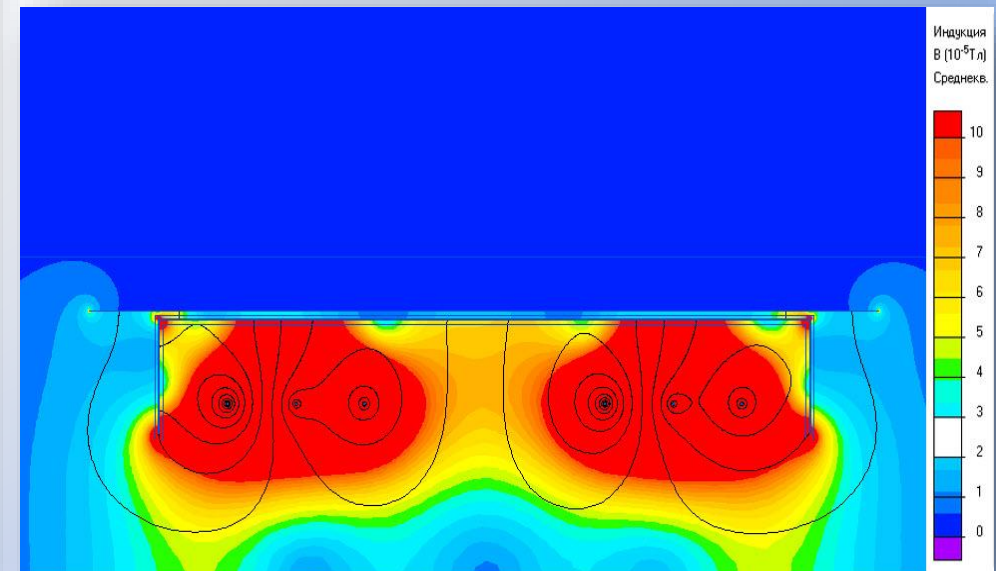
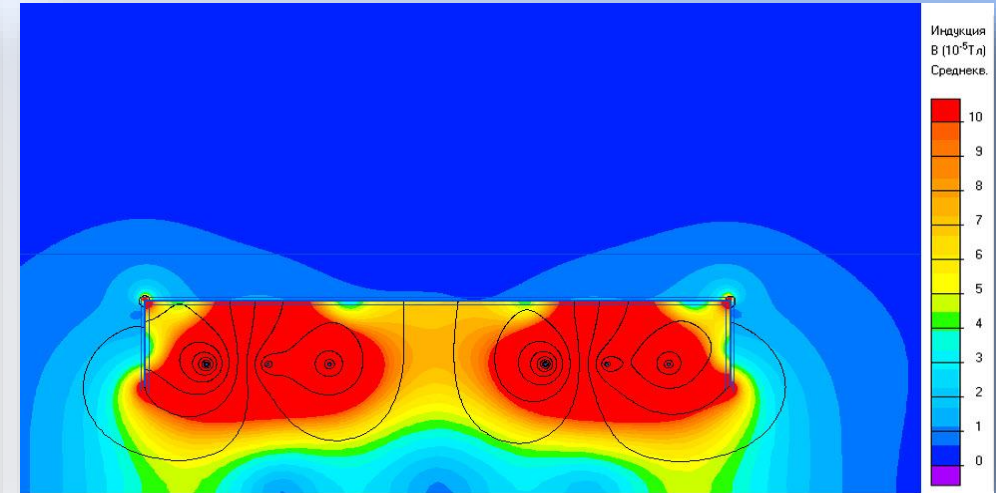
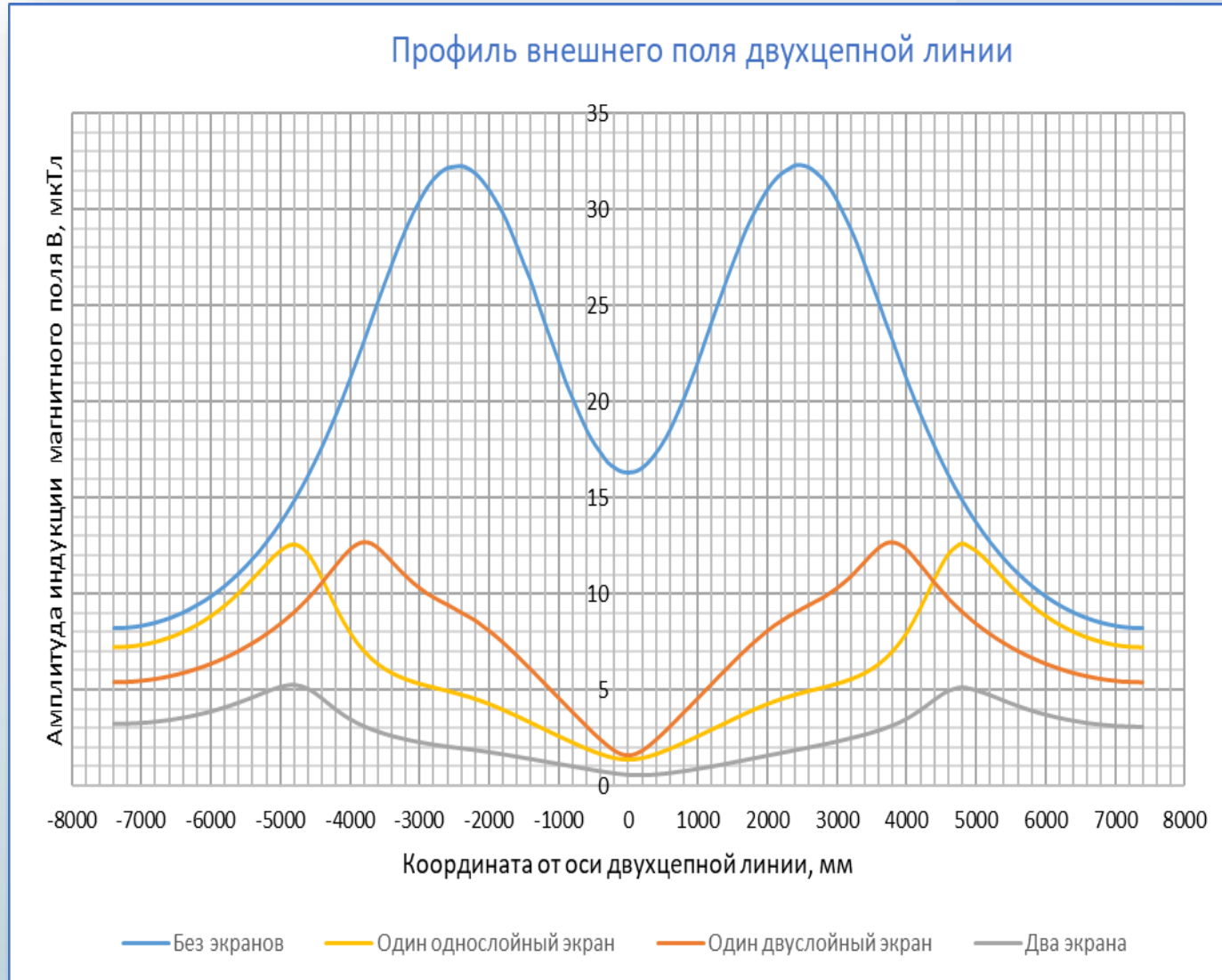
Потери в ТПЖ (вверху) и в экране (внизу)



Эффективность П-образных экранов

24

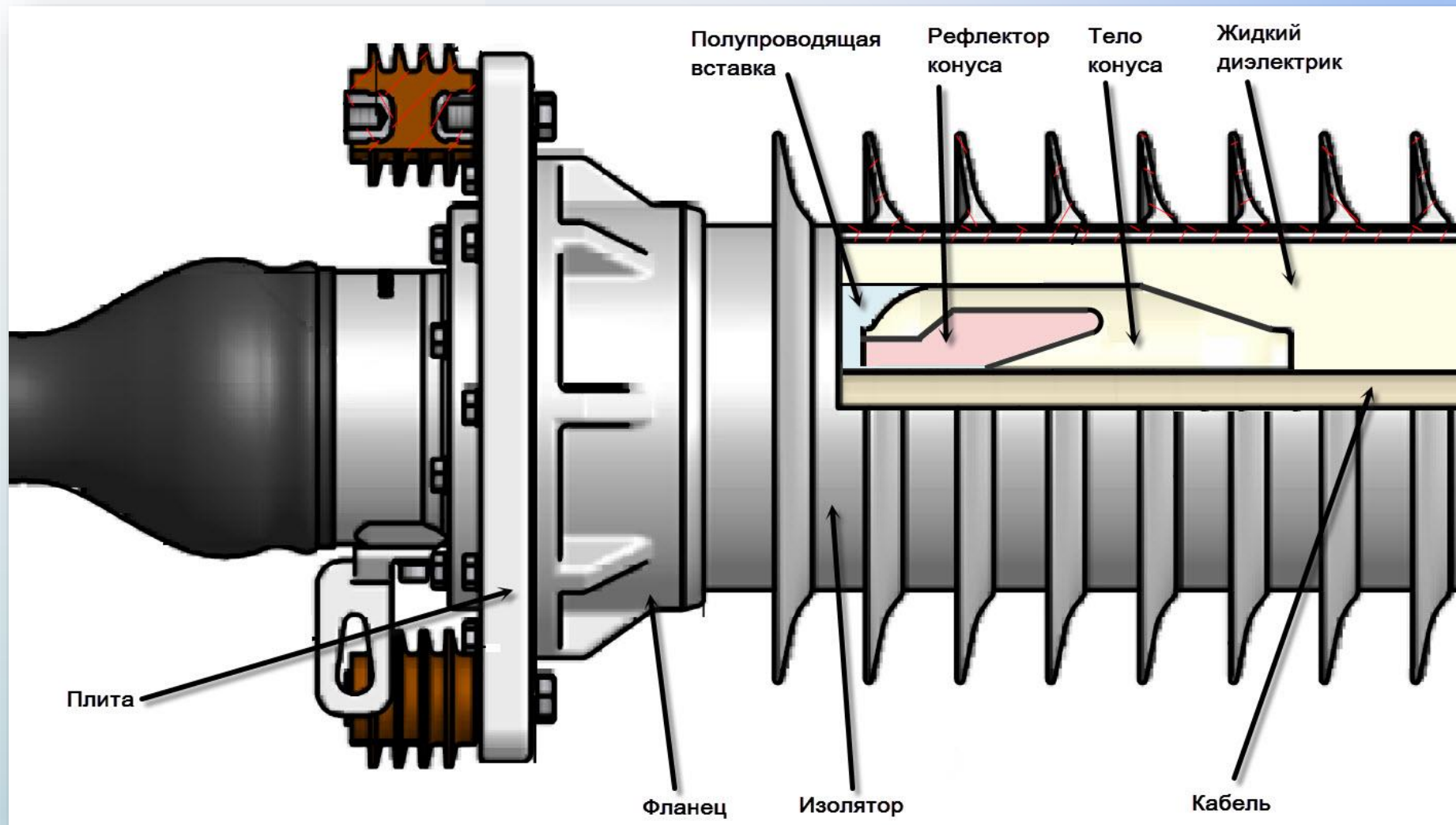
Профиль внешнего магнитного поля без экрана, с одним экраном и двумя экранами



Сглаживание поля в кабельной муфте

25

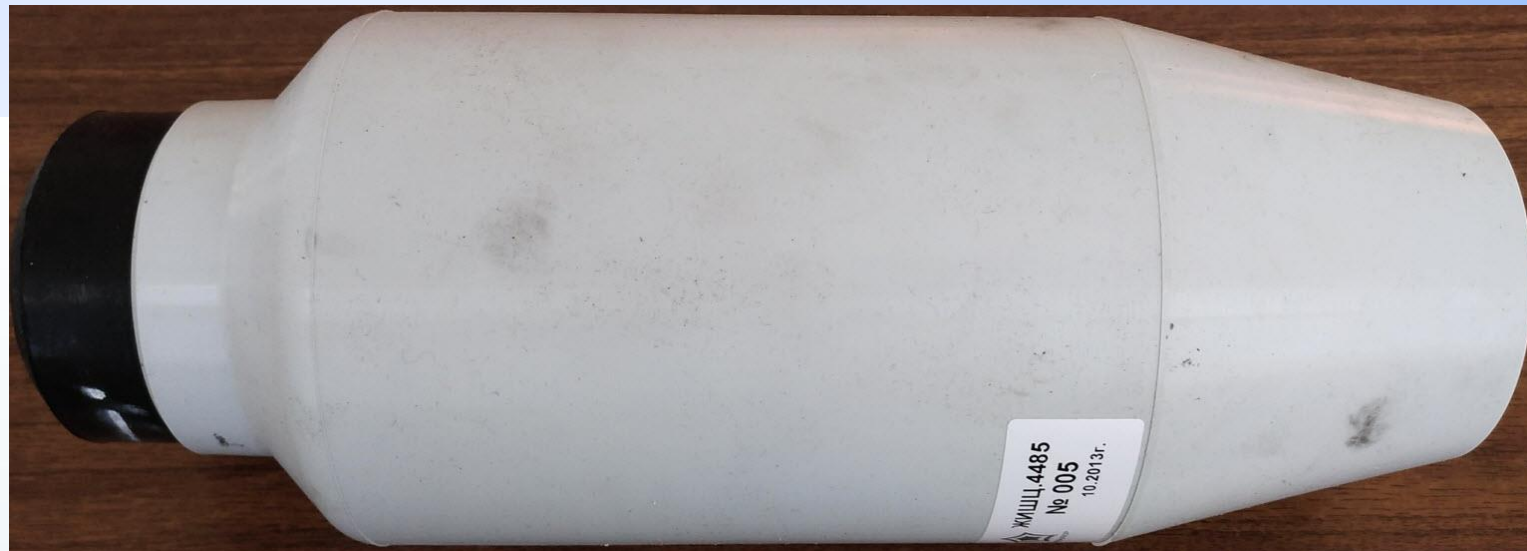
Цель работы: Выбор оптимальных параметров стресс-конуса:
геометрических (углы, радиусы закруглений, длина) и
физических (электропроводность, диэл. проницаемость)



Конструкция стресс-конуса

26

Стресс-конус
в сборе



Стресс-конус в разрезе:

1. Основное изоляционное тело (белое)
2. Рефлектор стресс-конуса (черный)

Мультифизический анализ сварочного трансформатора

27

Трансформатор для машины контактной сварки газопроводов высокого давления.

Завод ПсковЭлектросвар

Особенности:

1. Рабочий режим близок к КЗ;
2. Необходимо низкая индуктивность рассеяния;
3. Повторно-кратковременная нагрузка;
4. Ограниченный габарит;

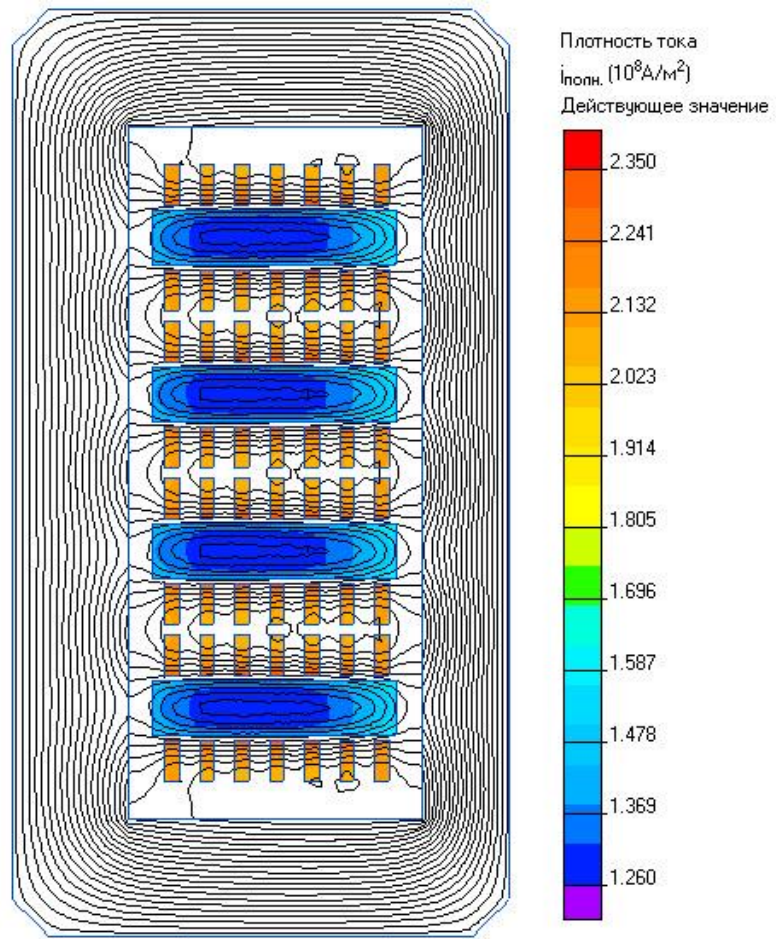


Конечно-элементный анализ

28

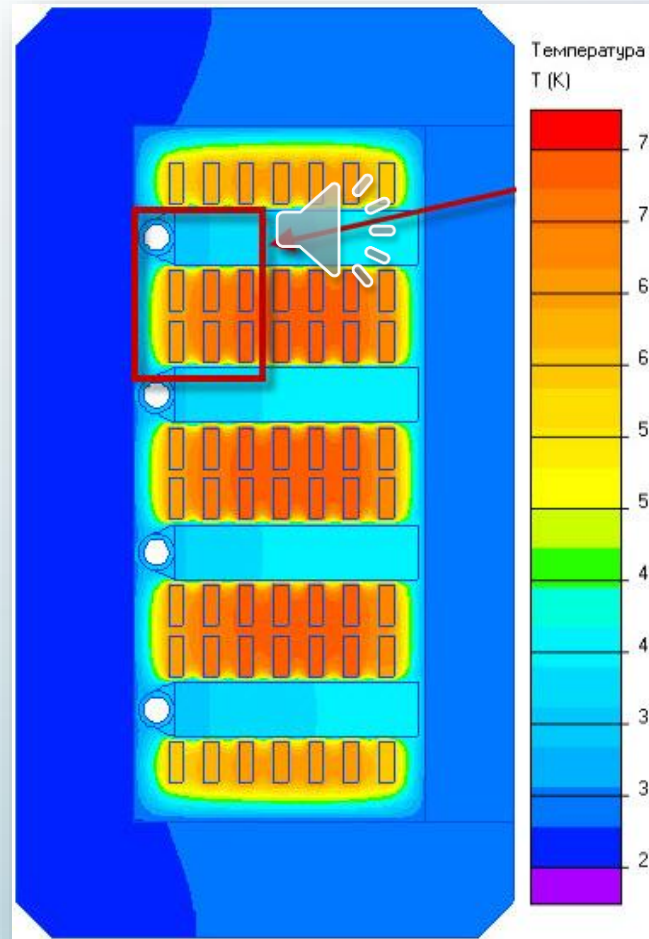
1. Электромагнитный

$$\operatorname{div}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A}\right) = -\mathbf{j}_{\text{extern}} + j\omega\sigma \cdot \mathbf{A}$$



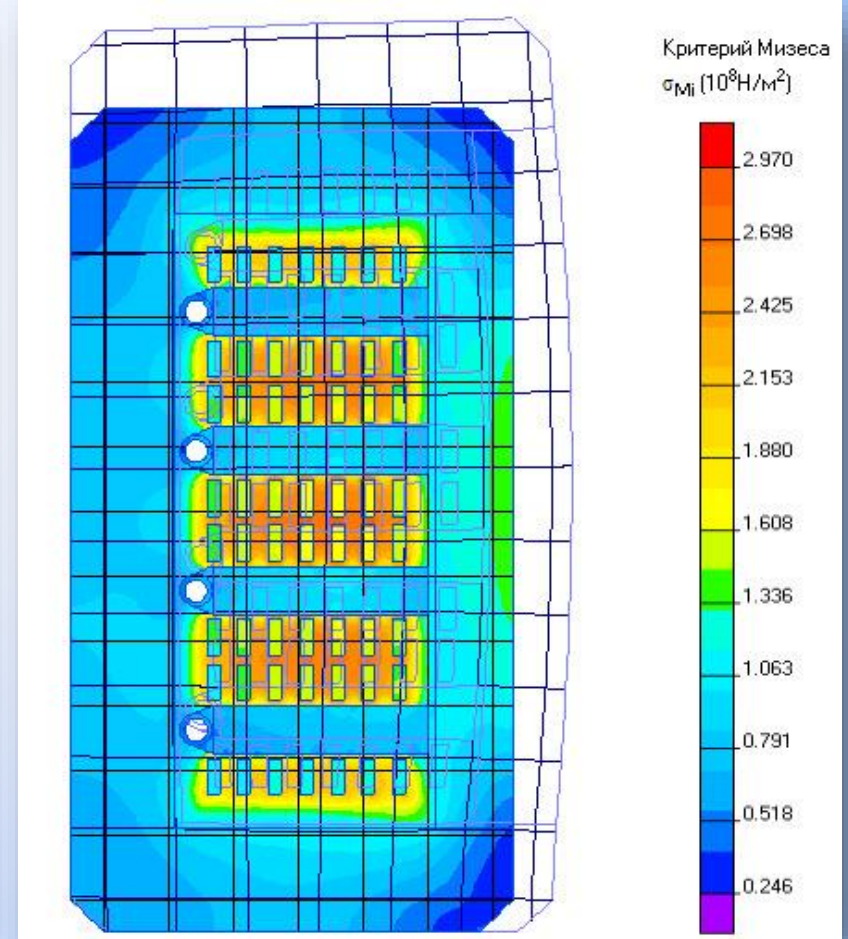
2. Температурный

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} \theta) = q$$



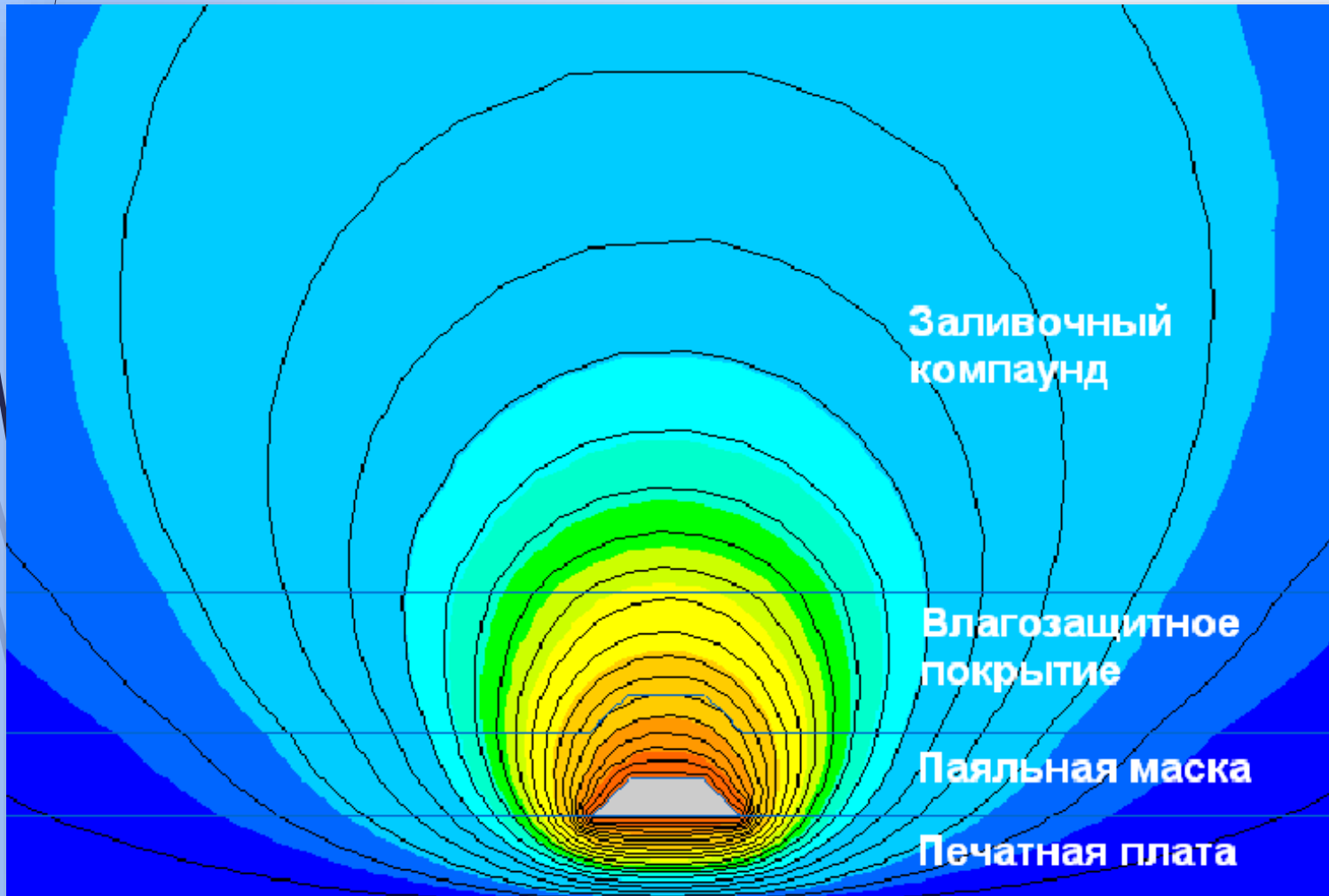
3. Упруго-деформированное состояние

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = -f_x \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = -f_y \end{array} \right.$$



Параметры микрополосковой линии связи с учетом технологических факторов*

29



В геометрической модели учтены технологические факторы:

- Дополнительные слои диэлектрика: паяльная маска, влагозащитное покрытие, заливочный компаунд
- Подтравы печатных проводников
- Неровная поверхность печатных проводников и плоскости заземления

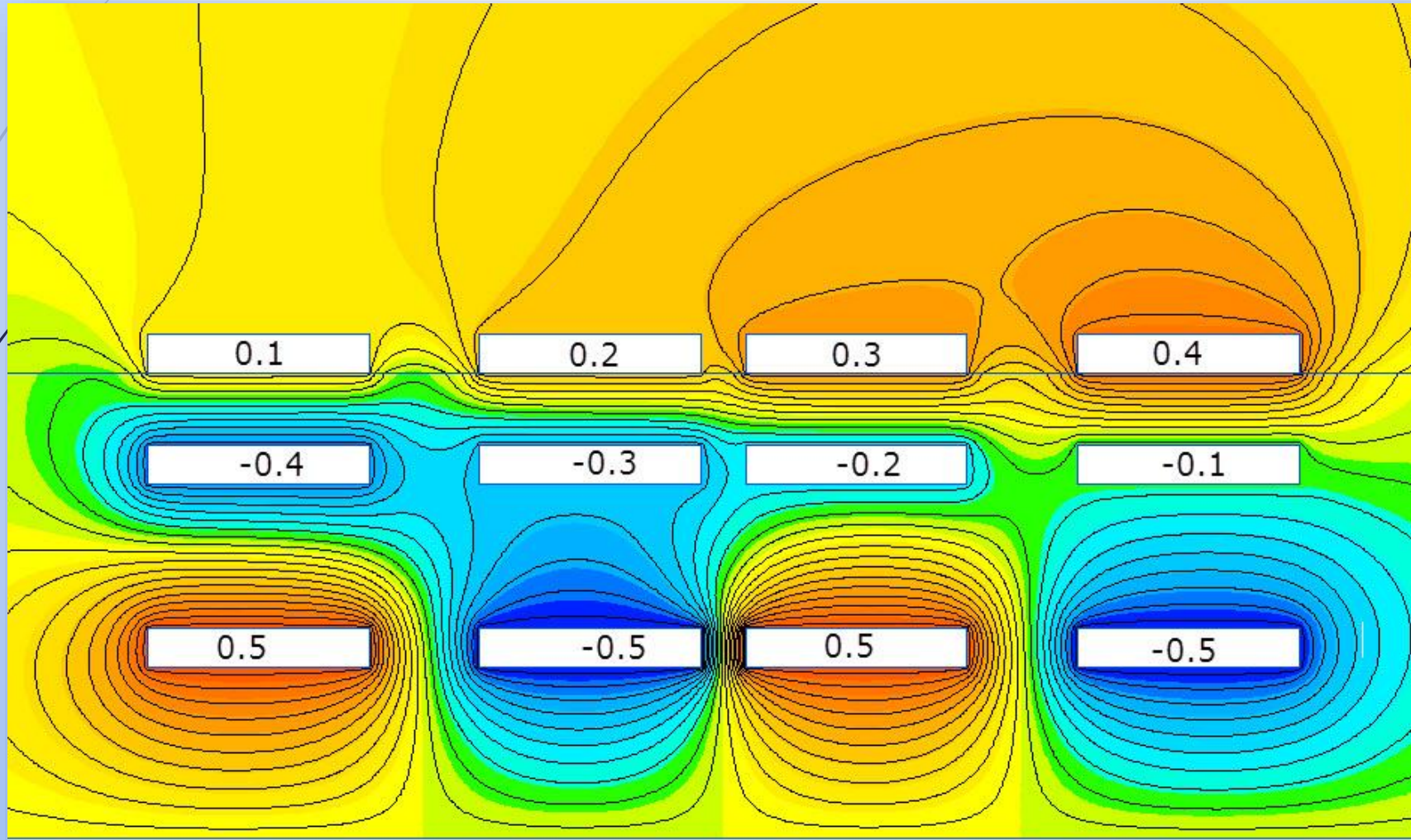
* Кечиев Л.Н., Смирнов А.М., Соловьев А.В., Нисан А.В.

Математические модели для расчета значений волнового сопротивления микрополосковых линий передачи

Матрица емкостей и индуктивностей

30

В системах из нескольких параллельных проводников актуальной является задача нахождения электромагнитной связи между ними в форме матрицы собственных и взаимных емкостей и индуктивностей.



Система из 12 проводников с разным потенциалом

1

ELCUT – инженерный инструмент

2

Состав и возможности программы

3

Некоторые прикладные задачи

4

ELCUT в курсе теоретической электротехники

Курс теории электромагнитного поля:

33

Важность

Квинтэссенция теоретической подготовки студента-электротехника перед погружением в специальные дисциплины.

Репутация

Имеет репутацию трудного курса из-за аксиоматического построения

Пре-реквизиты

- Навыки дифференцирования и интегрирования
- Понятия и техника векторного анализа: градиент, дивергенция, ротор, интеграл по контуру и по поверхности

Визуальность

- Преобладают статические картинки.
- Трудно построить визуальные образы ключевых концептов.

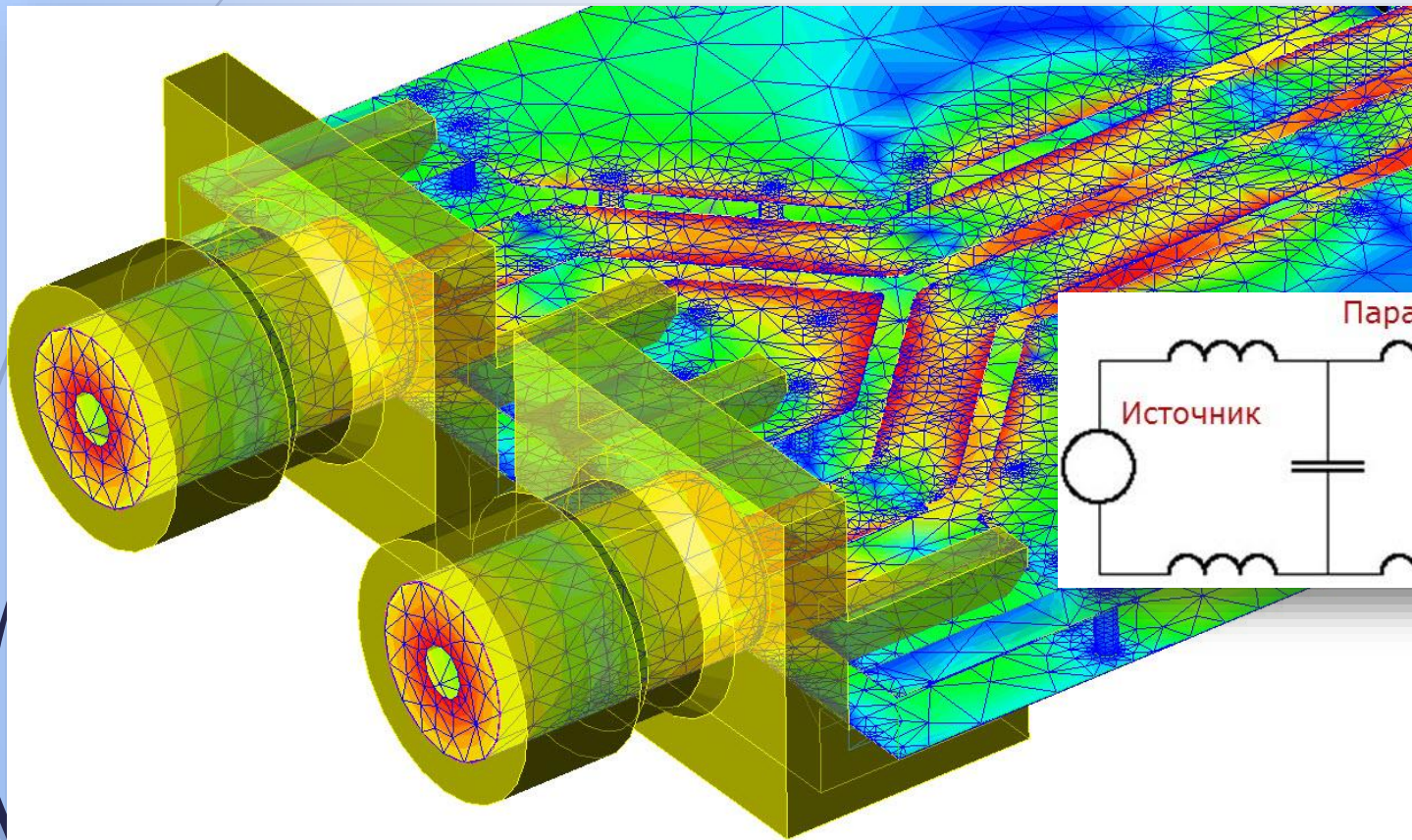
Ключевые компетенции

- Умение вычленить и сформулировать полевую задачу;
- Навык постановки граничных условий;
- Умение получить решение и верифицировать его.

Поля и цепи – как мы думаем об электромагнитных полях

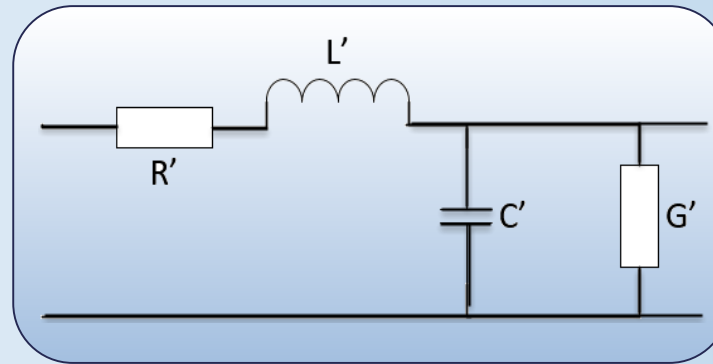
34

Привычка, сформированная десятилетиями инженерного опыта:
Мы говорим «поле» – подразумеваем эквивалентную цепь.



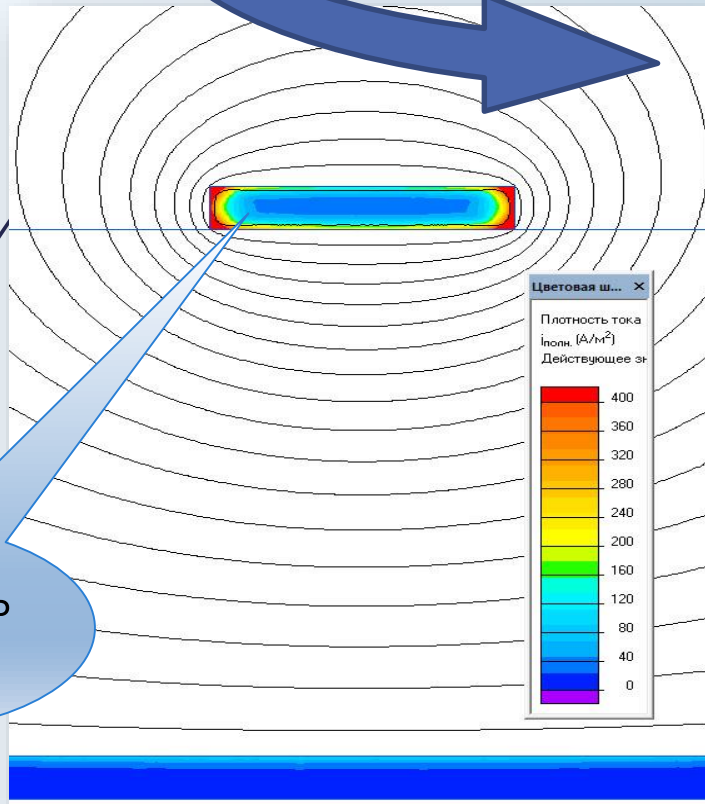
За каждым параметром эквивалентной цепи кроется картина электромагнитного поля

35

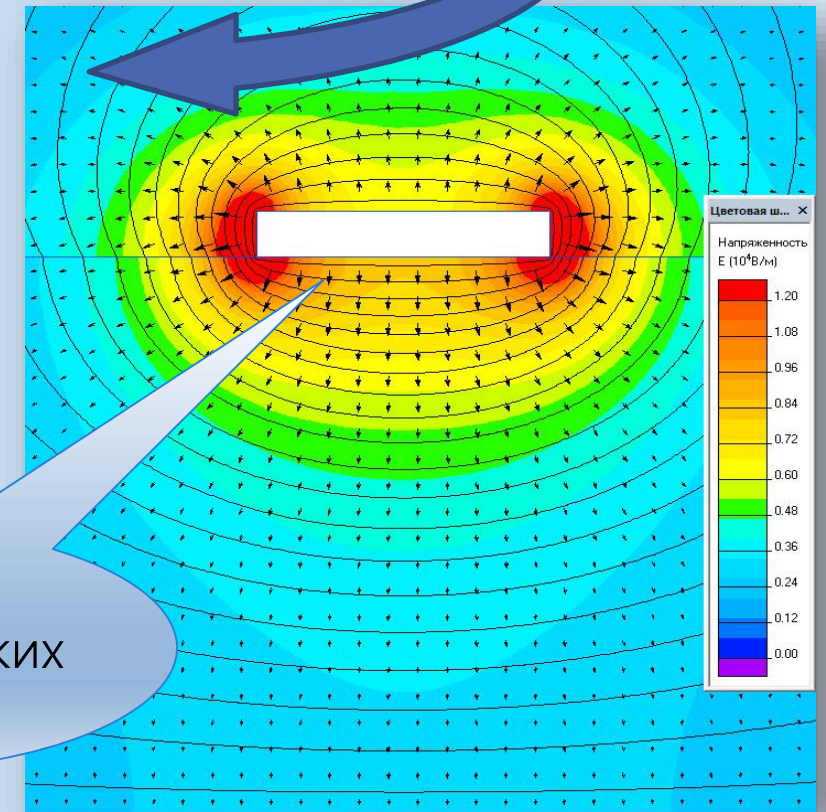


Магнитное поле:
 L, R

Электрическое поле:
 C, G



Плотность
тока



Плотность
диэлектрических
потерь

Преимущества компьютерного моделирования

37

Для преподавателя	Для студента
<p>Обучить студентов мета-алгоритмам:</p> <ol style="list-style-type: none">1. Классифицировать задачу2. Выделить и упростить расчетную область3. Задать граничные условия и источники4. Анализировать и верифицировать результаты	<p>Практическое умение использовать современный пакет(ы) программ и самостоятельно выполнять расчеты электромагнитных полей</p>
<ul style="list-style-type: none">• Увеличить наглядность изложения, заменяя статичных чертежей на динамические картины поля.• Расширить охват материала за счет заранее заготовленных примеров и задач	<ul style="list-style-type: none">• Самостоятельно манипулировать «полевой» терминологией, конфигурацией расчетной области, граничными условиями и свойствами сред,• Непосредственно наблюдать за эффектом от изменения тех или иных параметров
<p>Изложить существо предмета, не «спотыкаясь» о математические выкладки, но и не опуская их.</p>	<p>Сформировать живое объемное представление о характерных картинах поля и тенденциях его поведения, вместо слабо усвоенных схоластических понятий</p>

Потенциальные трудности использования моделей в обучении

38

1. Избегая технических сложностей, связанных с аналитическими выводами, мы рискуем попасть в дебри технических деталей управления программой расчета и утонуть в них
2. Студенту легко получить решение полевой задачи, но трудно верифицировать его, убедиться, что техника вычислений применена правильно, задача корректна, решение устойчиво и имеет физический смысл
3. Студент не всегда отчетливо знает о наборе допущений и упрощений, заложенных в готовой компьютерной программе, не может оценить их влияние на достоверность полученного ответа

Содержание обучения: чему мы хотим научить?

40

Концептуально:

1. Видеть полевую проблематику в частных практических задачах
2. Уметь выбирать правильную формулировку задачи, т.е. подмножество уравнений Максвелла и набор допущений
3. Формулировать набор допущений и оценивать их правомочность

Технически:

1. Выделять расчетную область и ставить граничные условия
2. Находить и использовать признаки симметрии задачи
3. Учитывать асимптотику задачи для оценки правильности
4. Извлекать из решения необходимые интегральные параметры (индуктивность, емкость, импеданс, силы и моменты)

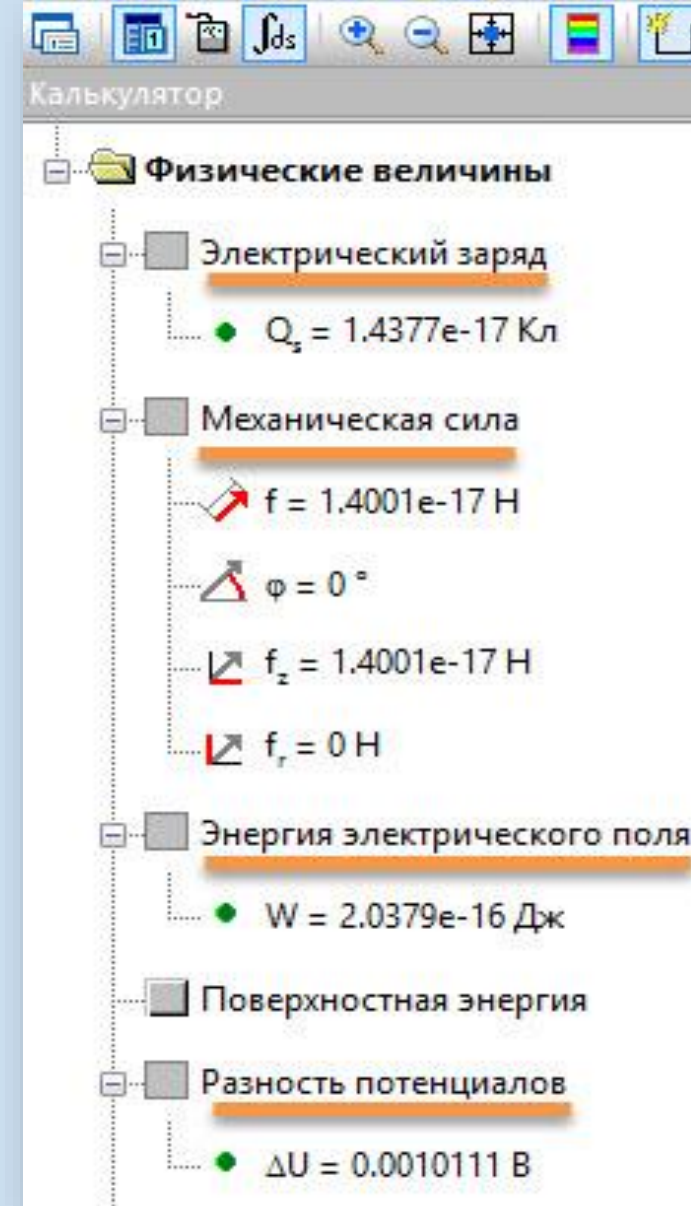
Ключевые моменты: извлечение параметров

42

Интегральный калькулятор ELCUT позволяет визуально проверить основные законы электромагнетизма

Интегрирование выполняется по:

- Линии
- Поверхности
- Объему



$$q = \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s}$$

$$\mathbf{F} = \oint_S \mathbf{T}_M \cdot d\mathbf{s}$$

$$W = \frac{1}{2} \oint_S \mathbf{E} \cdot \mathbf{D} dv$$

$$\Delta U = \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

Пример: компьютерная модель лабораторной работы

43

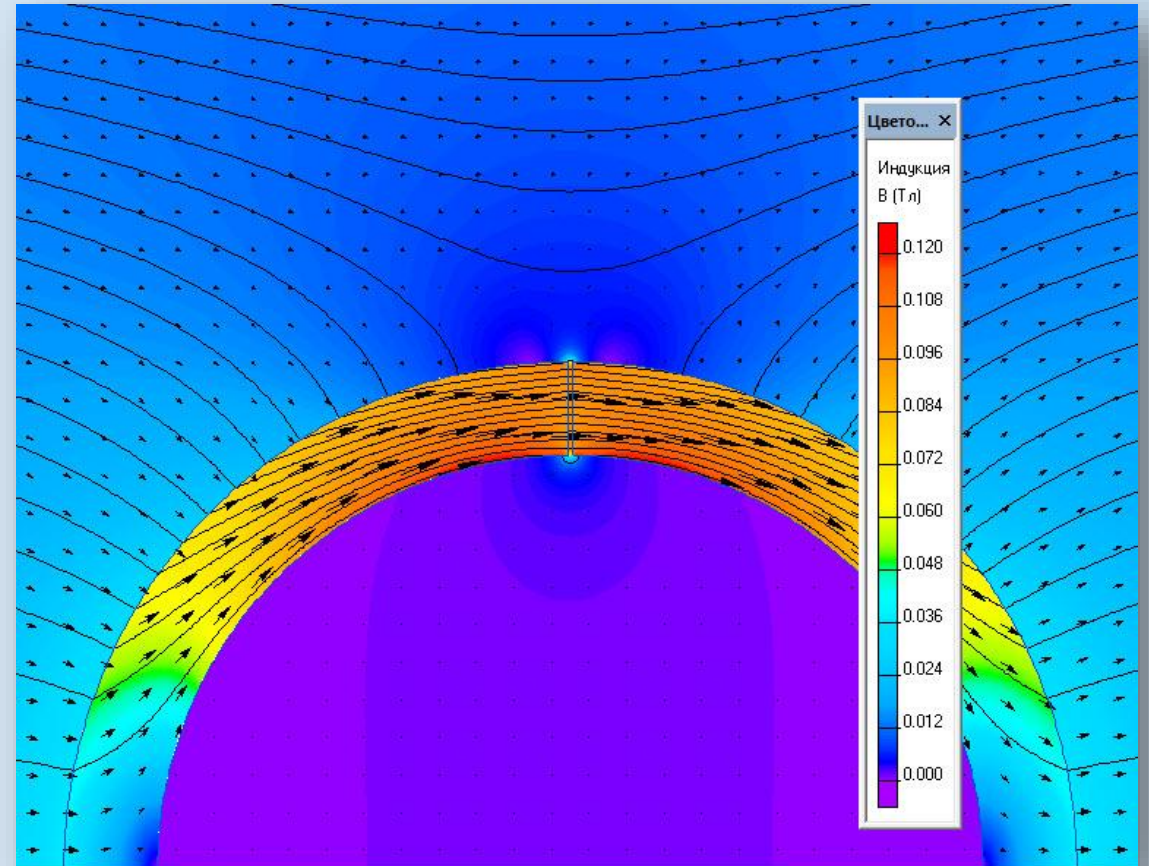
Исследование экранирования в постоянном и переменном магнитном поле

Разъемный сферический экран помещается в однородное магнитное поле



Изучается зависимость степени экранирования от:

- Материала экрана
- Толщины экрана
- Рода тока и частоты
- Положения плоскости разъема



Параметризованная модель лабораторной работы

44

Lab Works 5 and 6:

Research of the electromagnetic shielding in DC and AC fields

Input Data

Shield

Geometry:	Spherical	
Material:	Steel	
Permeability	table	
Conductivity	none	S/m
Shield Thickness Δ :	5	mm
Internal Radius R_1 :	23	mm
External Radius R_2 :		mm
Cylinder Length L:	46	mm

Calculate

Air Gap

Orientation:	Horizontal	
Thickness:	0.05	mm

Surrounding Air

Radius:	280	mm
Axial Length:	280	mm

QuickField Problem

Name:	tryHE.pbm	...
Path:		

Applied Magnetic Field

Field Strength H:	10 000.00	A/m
Flux Density B:	0.0126	T
Frequency:	50.0	Hz

Calculation Results

#	Geometry	f, Hz	Material	μ_R	σ , S/m	Δ , mm	Gap	H_{extr} A/m	$H_{insider}$ a/M	k	Theory
1	Sphere	50	Fe	var	none	5	no	9963.9	120.6	82.62	99.86
2	Sphere	50	Fe	var	none	5	0.05	9964.8	397.1	25.10	99.86
3	Sphere	50	Fe	var	none	5	0.05 =	9963.9	120.6	82.62	99.86

Технические университеты России: Учебные пособия

45

Белорусский ГУИР (Минск)	В.Ф. Алексеев, В.Е. Матюшков, В.И. Журавлев	Физические основы проектирования радиоэлектронных устройств (лаб. практикум)	2010
Белорусский ГУТ (Гомель)	Воронин А.В,	Применение пакета ELCUT	2010
ИТМО (СПб)	П.А. Борисов, Ю.М. Осипов	Потенциальные электрические поля	2006
МАИ	С.А. Хартов	Методические указания Плазменные ускорители	2008
Мордовский ГУ (Саранск)	В.Ф. Белов Г.И. Шабанов С.А.Карпушкина	Математическое моделирование	2001
Тамбовский ГТУ	Жуков, Майникова, Никулин, Антонов	Решение задач теплопроводности методом конечных элементов	2014
УРФУ	Ф.Н. Сарапулов, В.Э.Фризен И.В.Черных	Виртуальная электротехническая лаборатория	2003
УРФУ	В.Э. Фризен	Методы расчета электрических и магнитных полей	2014
ЮРГТУ (Новочеркасск)	Ткачев А.Н. Селюк С.С, Шкуропадский И.В.	Математическое и компьютерное моделирование электромагнитных процессов	2010

Спасибо за внимание!

46

- Эту презентацию можно найти здесь:

www.elcut.ru/mpei2018

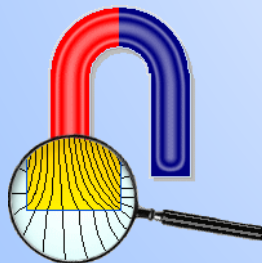


- Бесплатную Студенческую версию ELCUT для просмотра примеров и первого знакомства можно загрузить здесь:

http://elcut.ru/free_soft_r.htm

- Связаться с докладчиком: simon@tor.ru

Искренне ваши:



ELCUT

Новый подход к
моделированию полей



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

