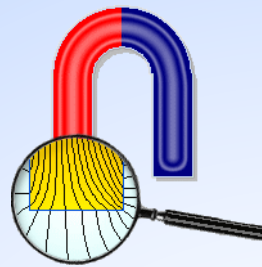




Петербургский
энергетический институт
повышения
квалификации



ELCUT

Новый подход к
моделированию полей



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

ELCUT

в задачах проектирования электроустановок

1

СЕМЕН ДАВИДОВИЧ ДУБИЦКИЙ,

ДИРЕКТОР ООО «ТОР»

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, МОСКОВСКИЙ ПР. 22, ЛИТЕРА Т

simon@tor.ru

www.elcut.ru

План

2

1

Состав и возможности программы ELCUT

2

Когда и зачем нужен расчет поля?

3

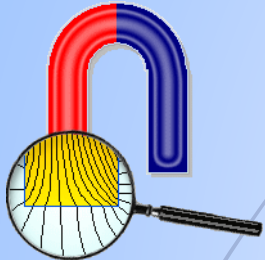
Примеры использования

4

Нагрузочная способность кабельной линии

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

Электротехника :

- 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

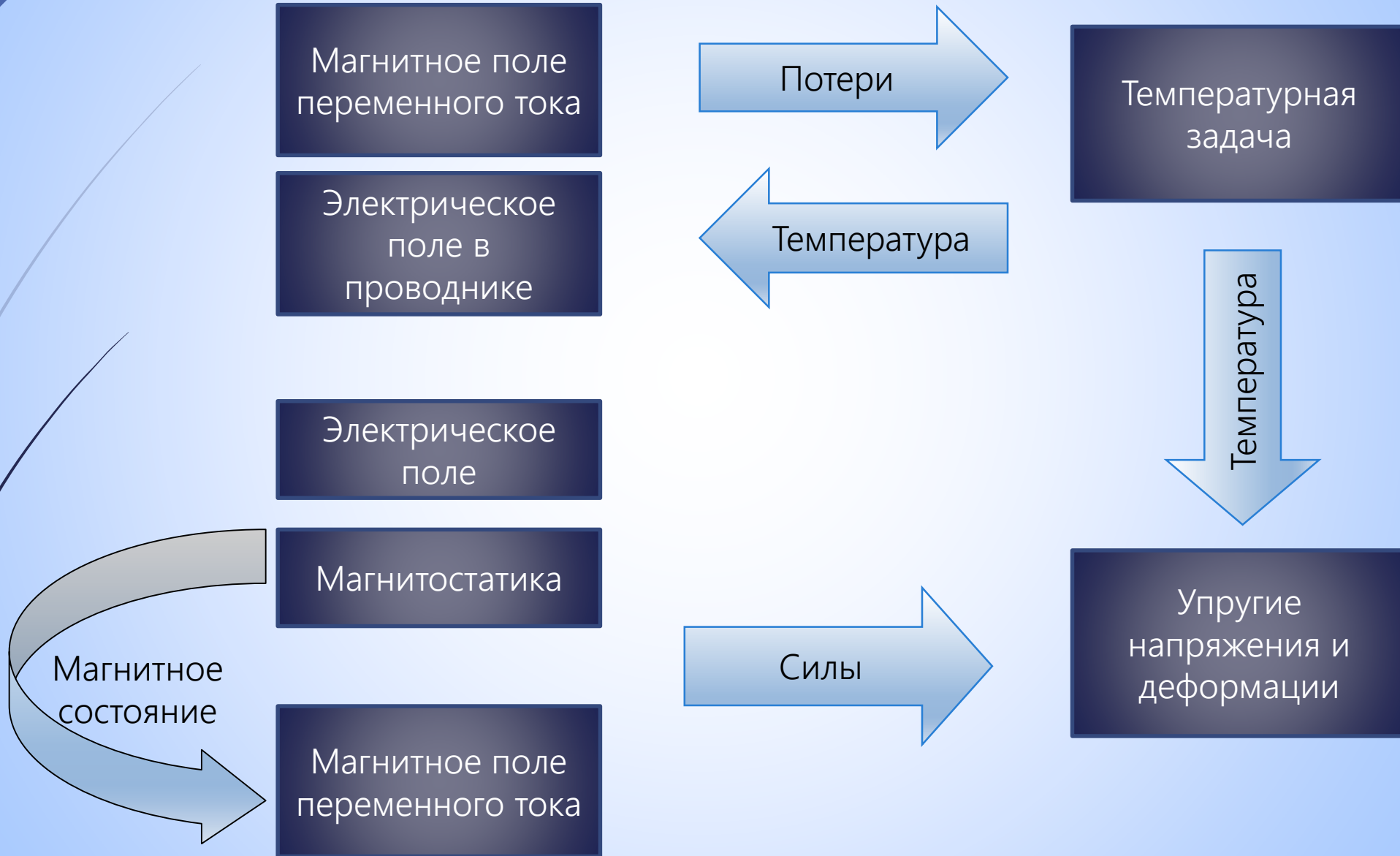
$$T=f(t)$$

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

Данные

- Материалы
- Граничные условия
- Источники

Решатели

- Статический
- Гармонический
- Нестационарный
- Нелинейность

Постпроцессор

- Картина поля
- Интегралы
- Таблицы
- Графики

Соединения

Подключенная
электрическая
цепь

Импорт:
DXF, STEP,
SolidWorks

Экспорт:
Excel, Matlab,
Garfield

Редактор геометрии 2D

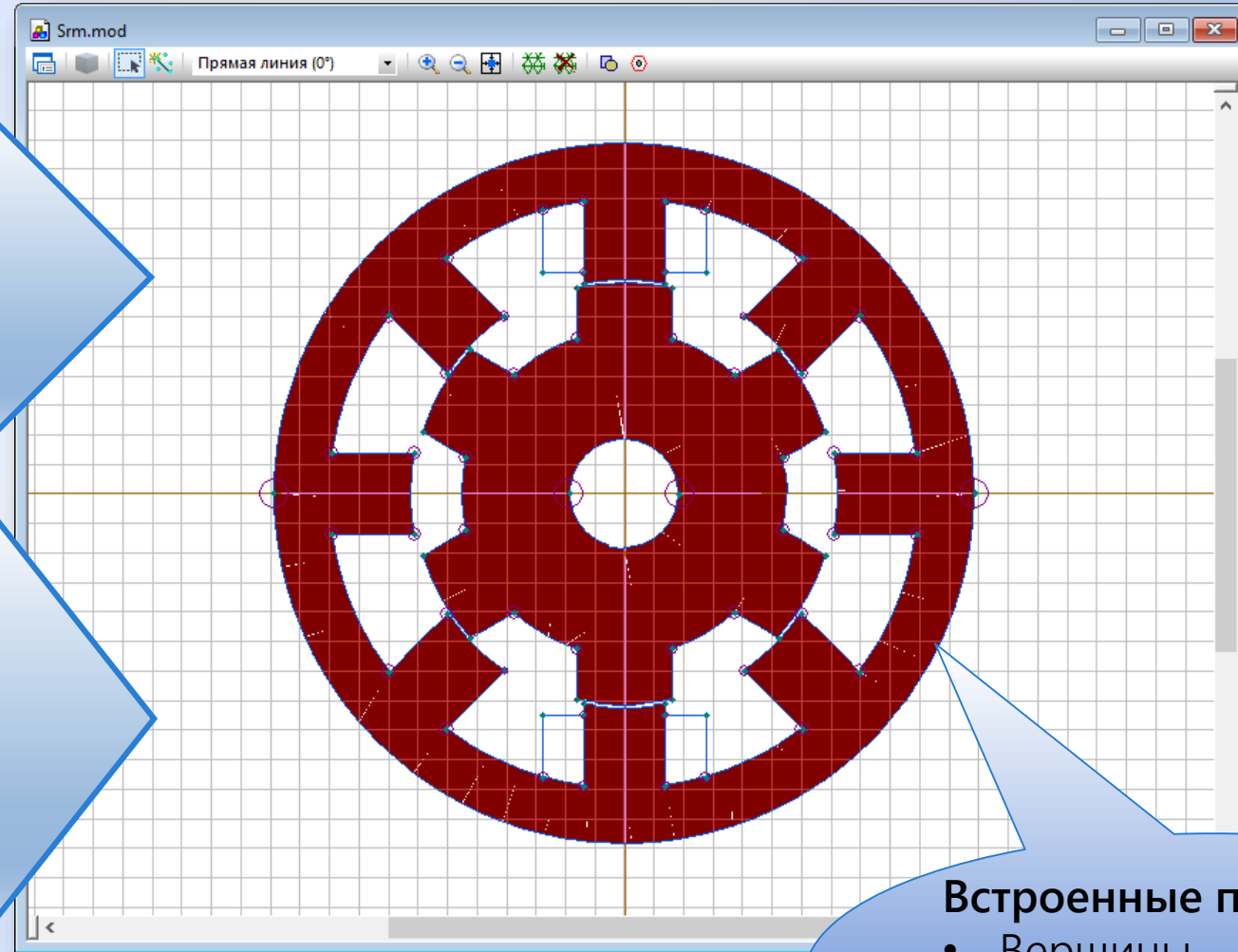
8

Импорт:

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

Вставка фигур:

- Прямоугольник
- Круг
- Эллипс



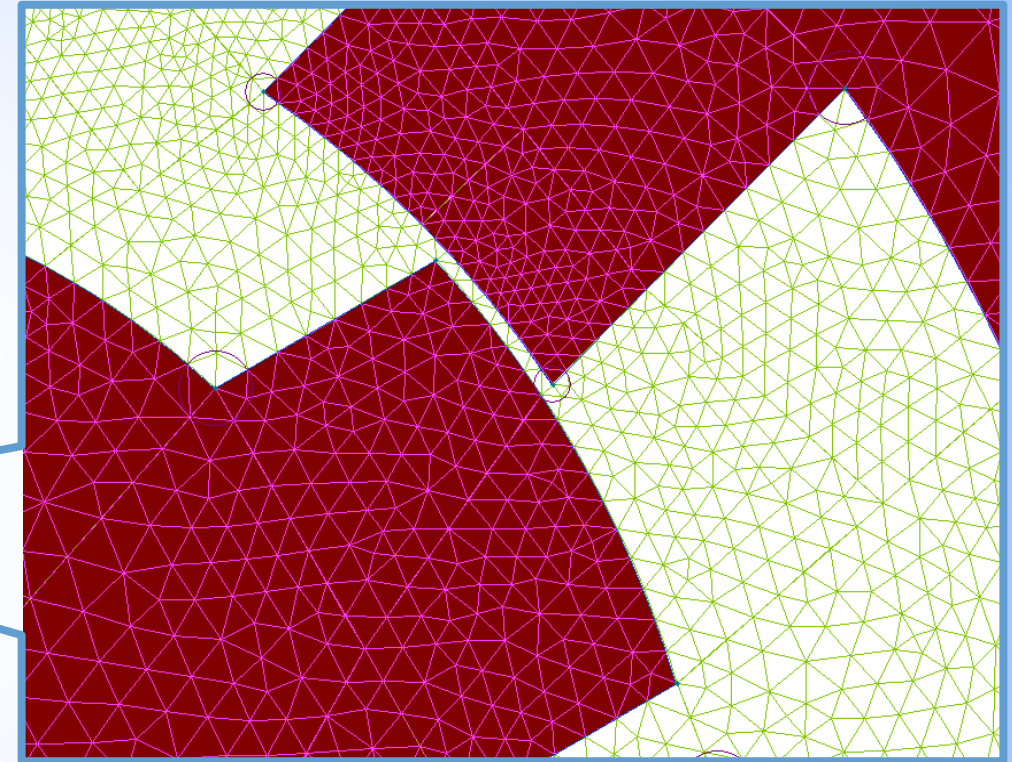
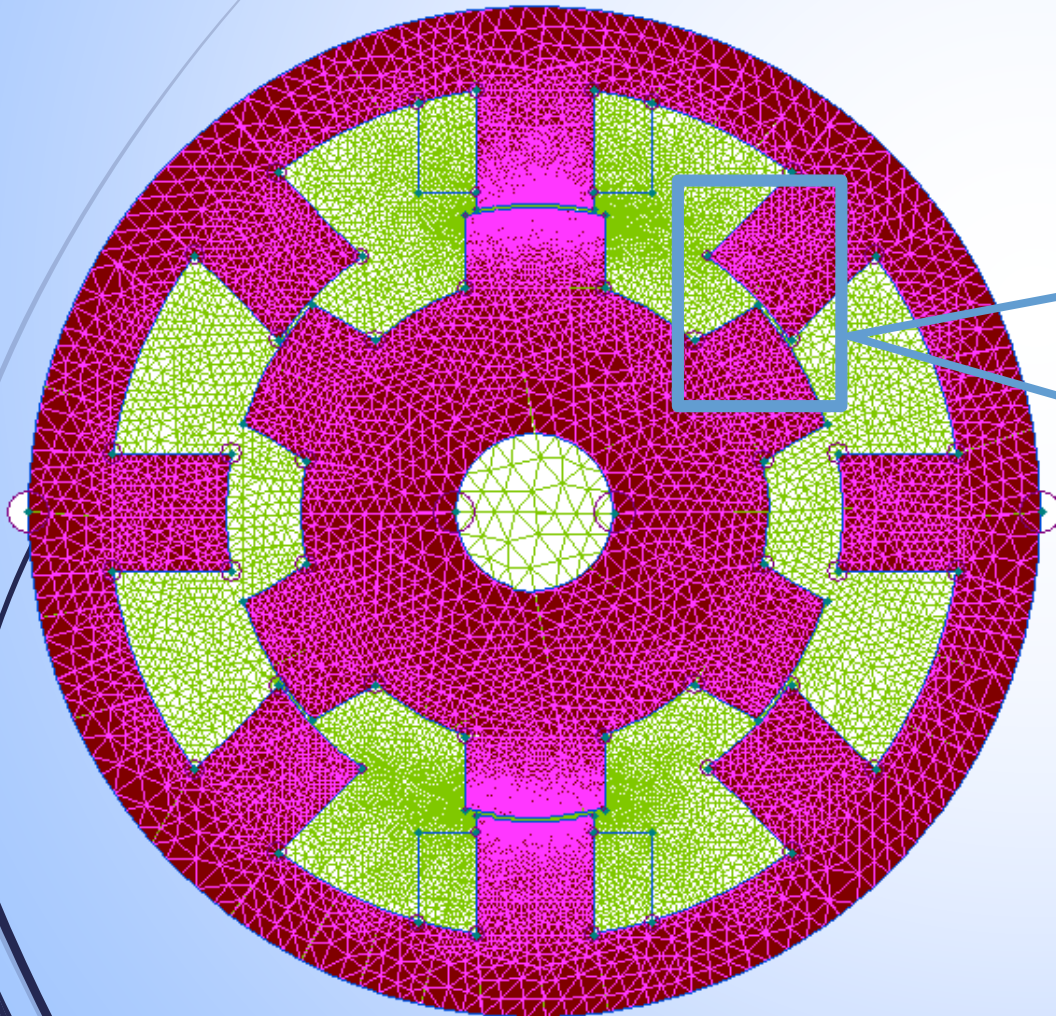
Встроенные примитивы:

- 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

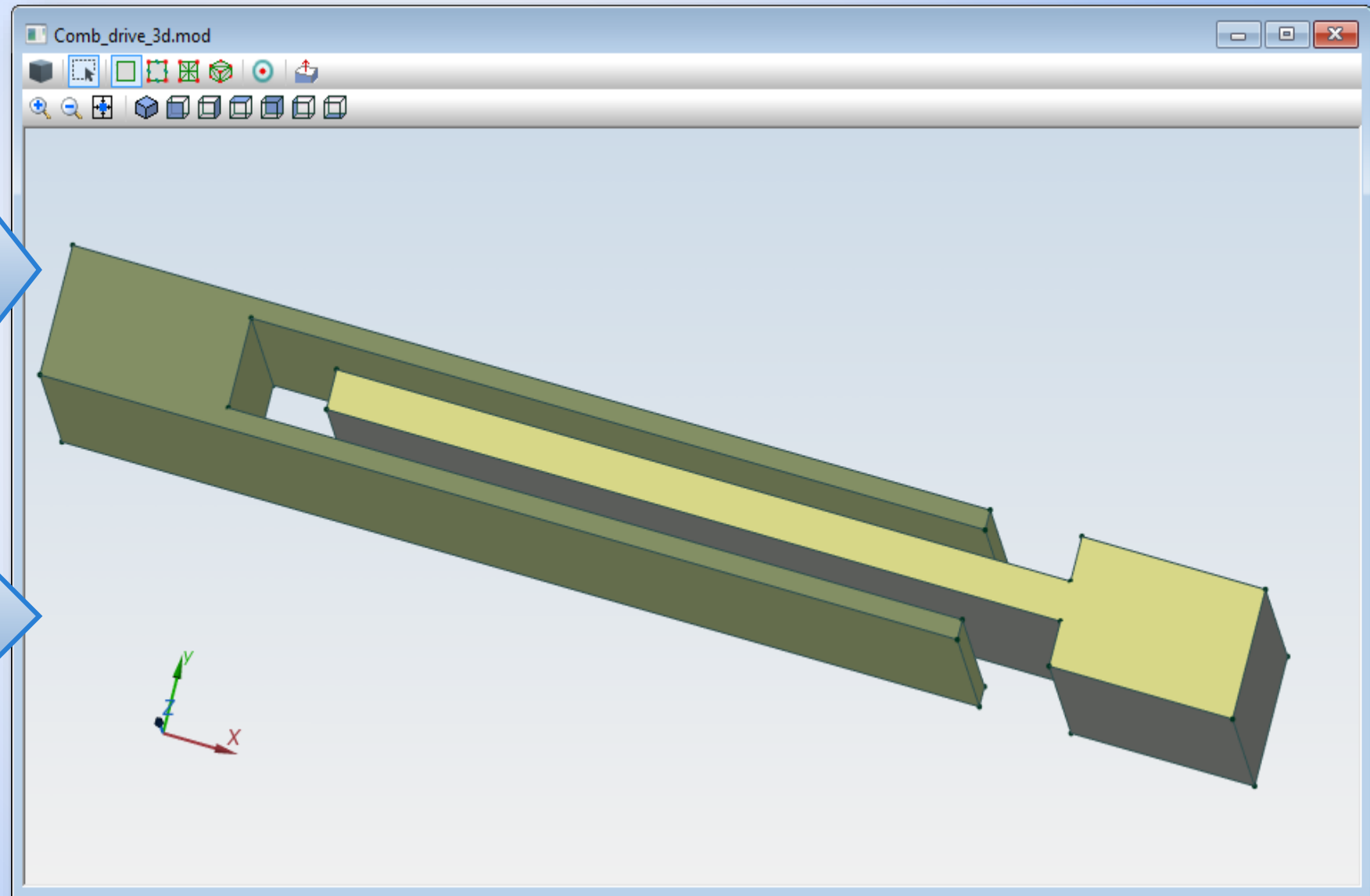
Редактор геометрии 3D

10

Экструзия
плоских фигур

Либо

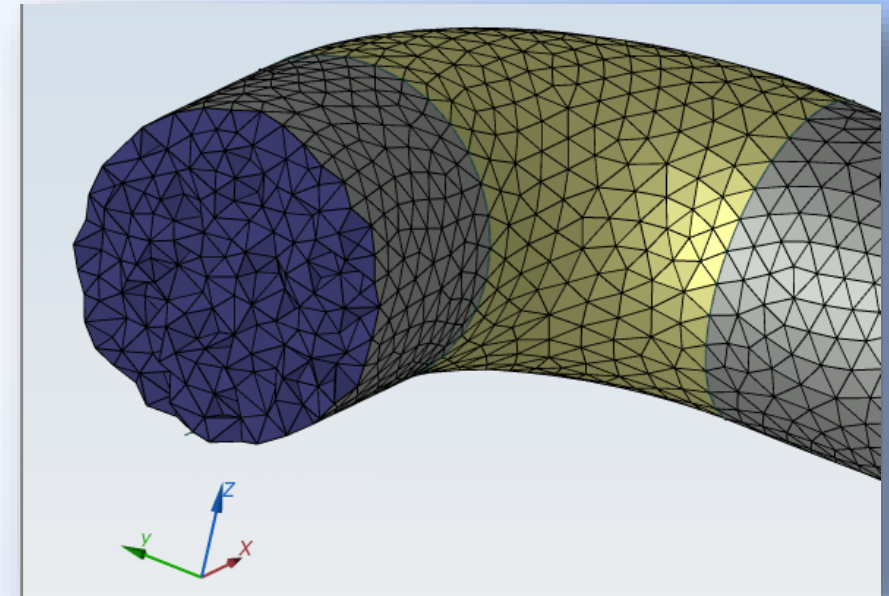
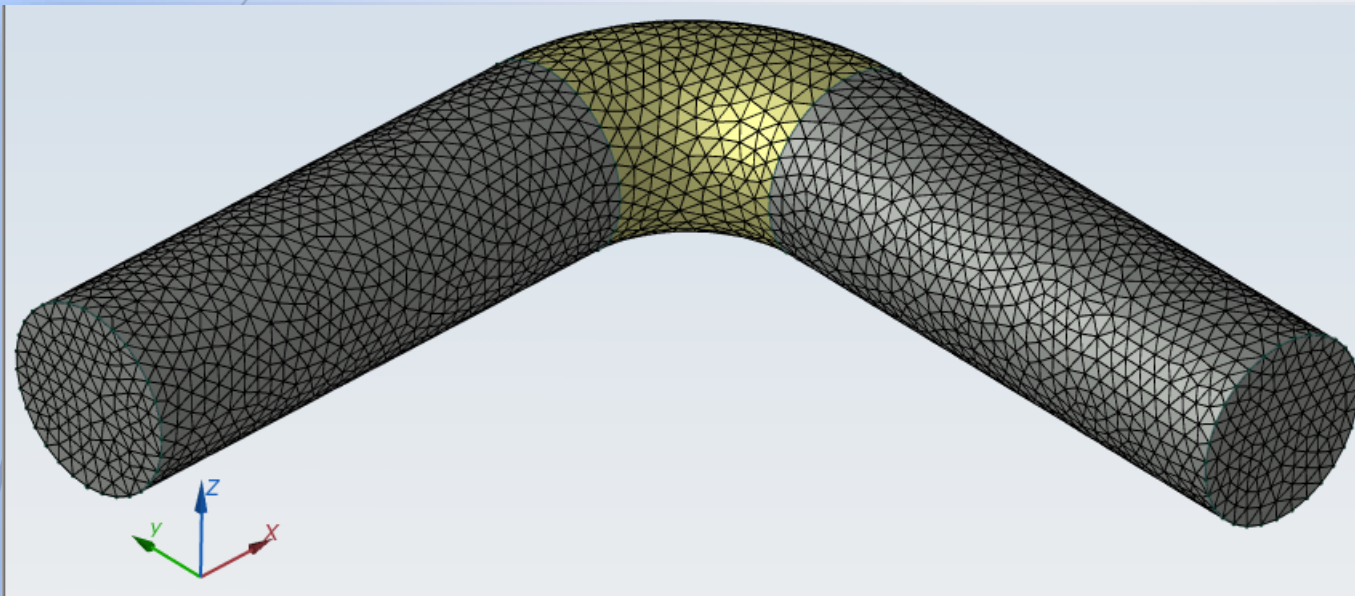
Импорт из CAD



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

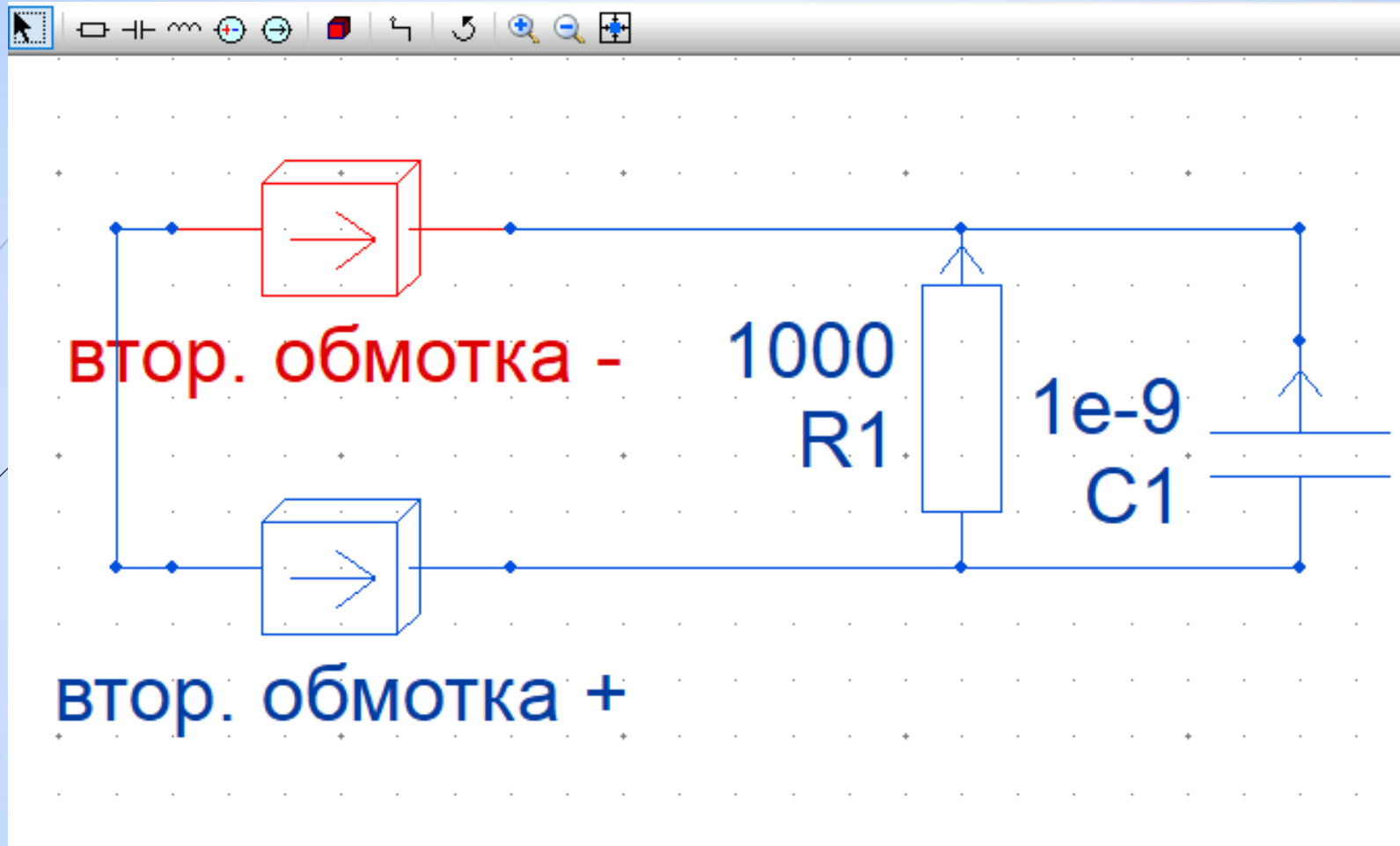
Источники поля

удельные магнитные потери

Свойства материала для расчета магнитного поля с вихревыми токами

Подключенная электрическая цепь

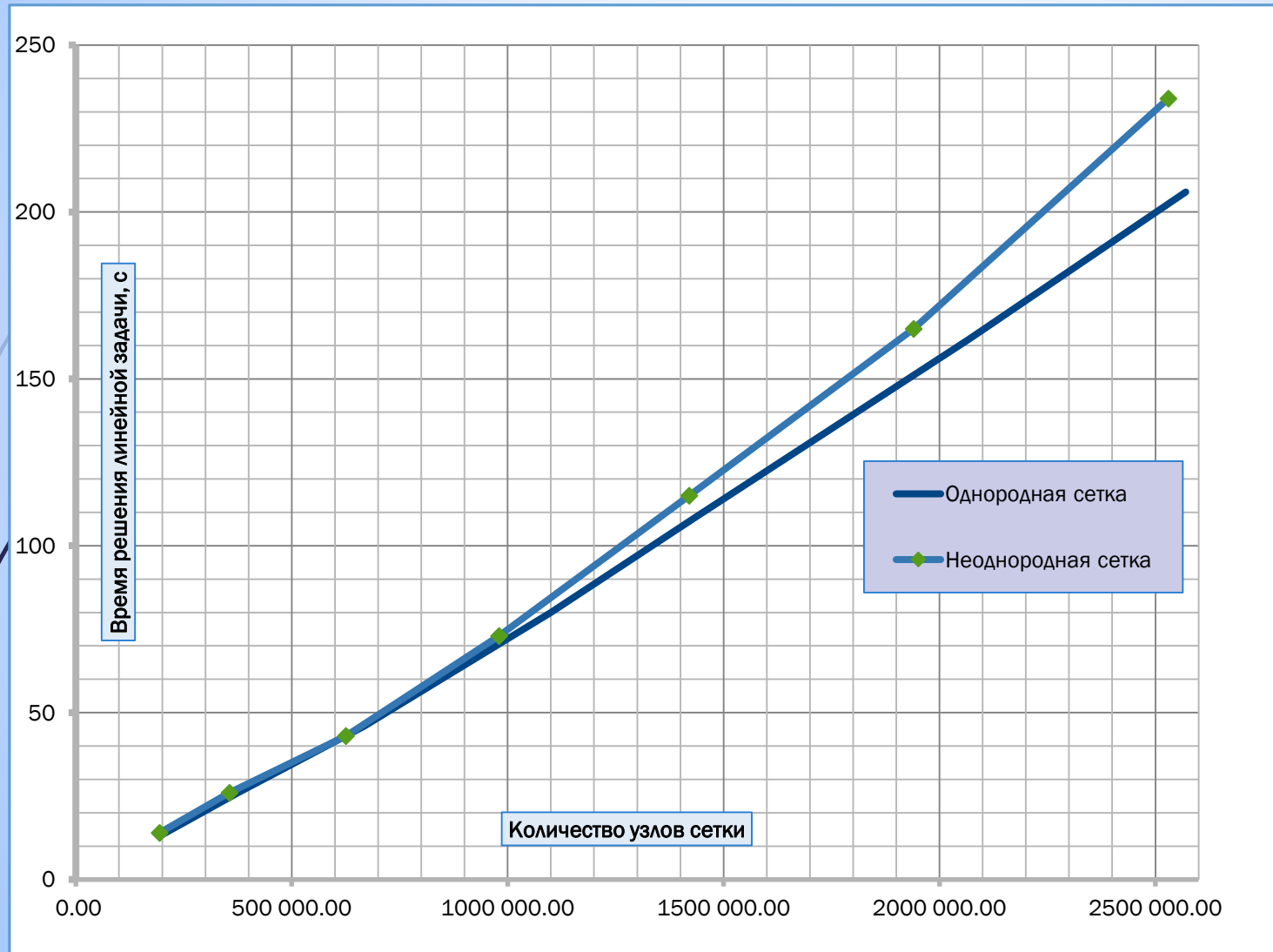
13



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

Решатель системы уравнений

14



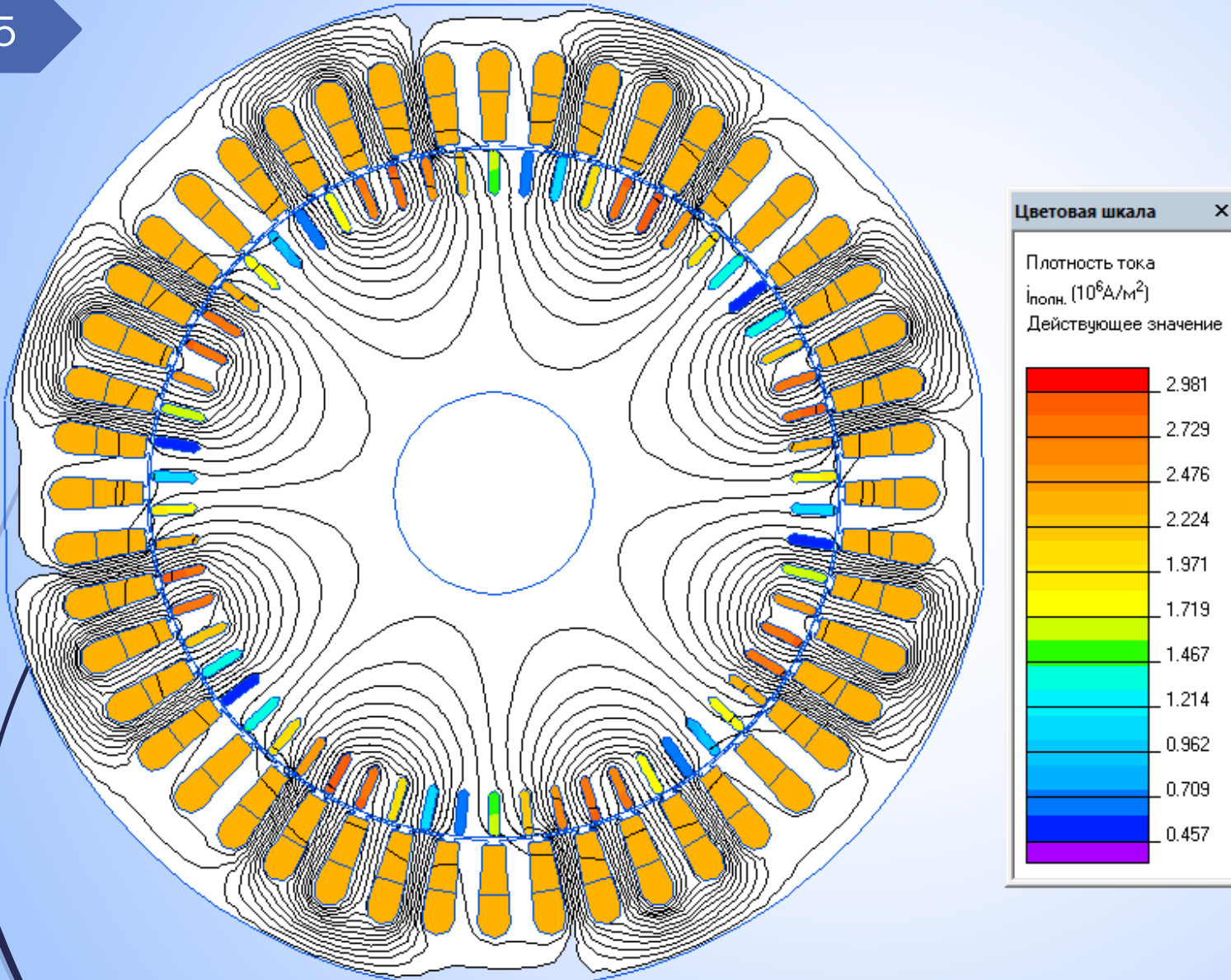
Используется метод сопряженных градиентов с предобуславливанием.

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

Состав и возможности программы ELCUT

2

Когда и зачем нужен расчет поля?

3

Примеры использования

4

Нагрузочная способность кабельной линии

Для чего нужен расчет поля?

17

1 *Ради самого поля*

- Изредка бывают случаи, когда нужны сами значения поля, например, в интересах электромагнитной экологии



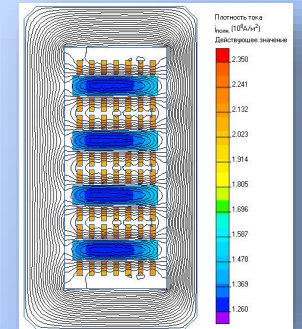
2 *Для поиска слабых мест*

- Часто целью расчета поля является поиск наиболее нагруженных мест с точки зрения перегрева, возможного пробоя изоляции и т.п.

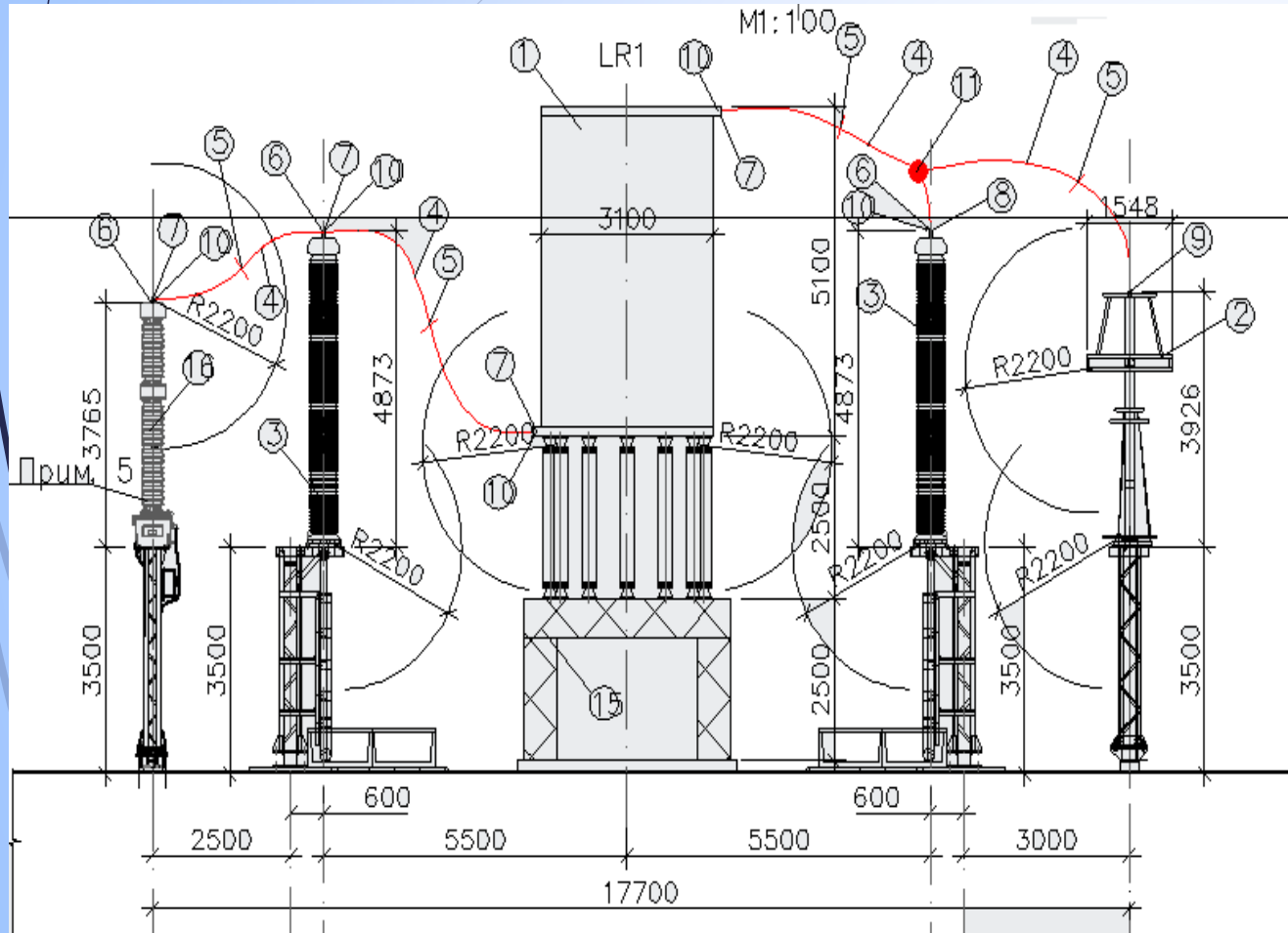


3 *Уточнение параметров*

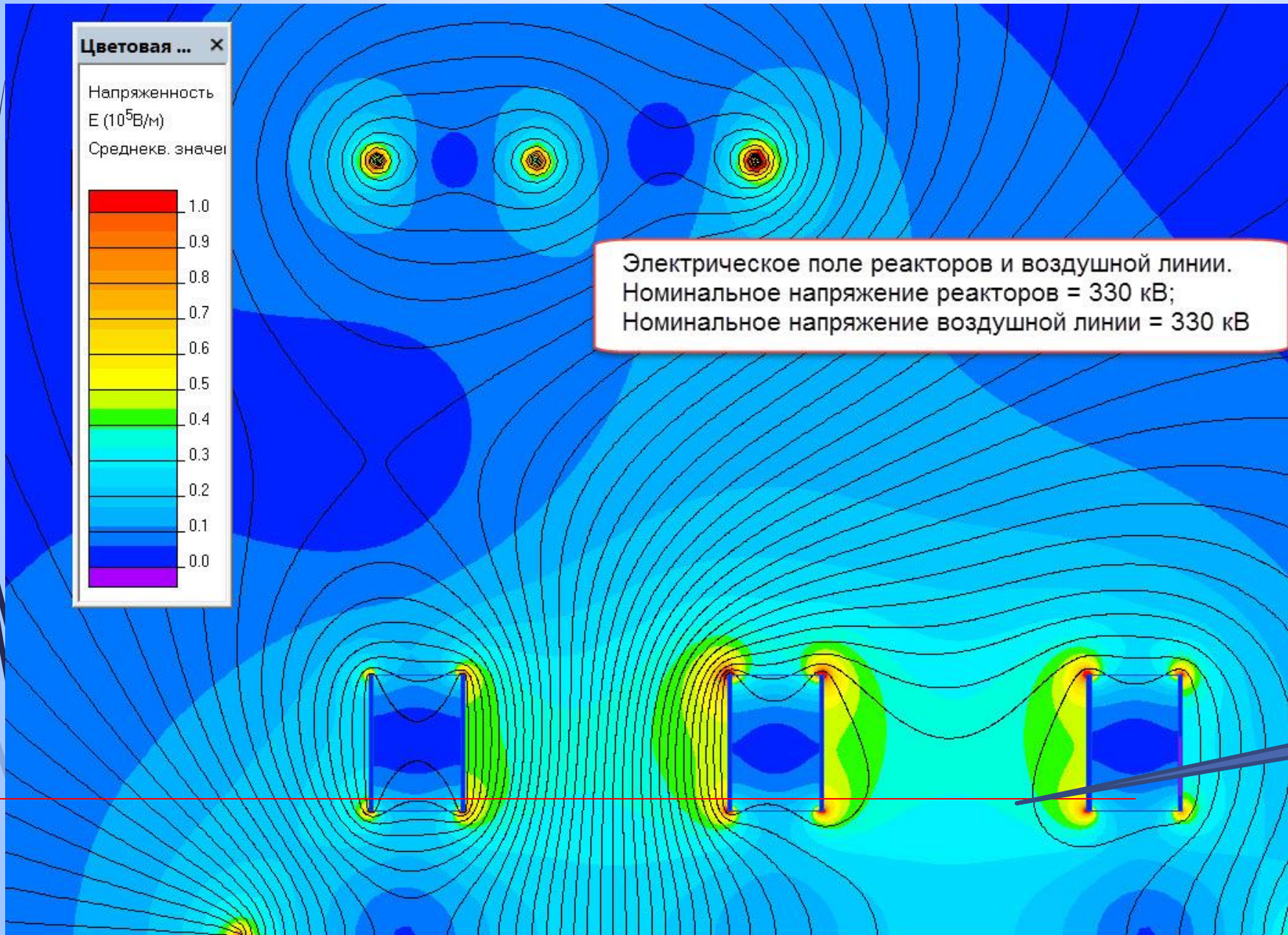
- Целью расчета может быть уточнение индуктивности, емкости, сопротивления и т.п.



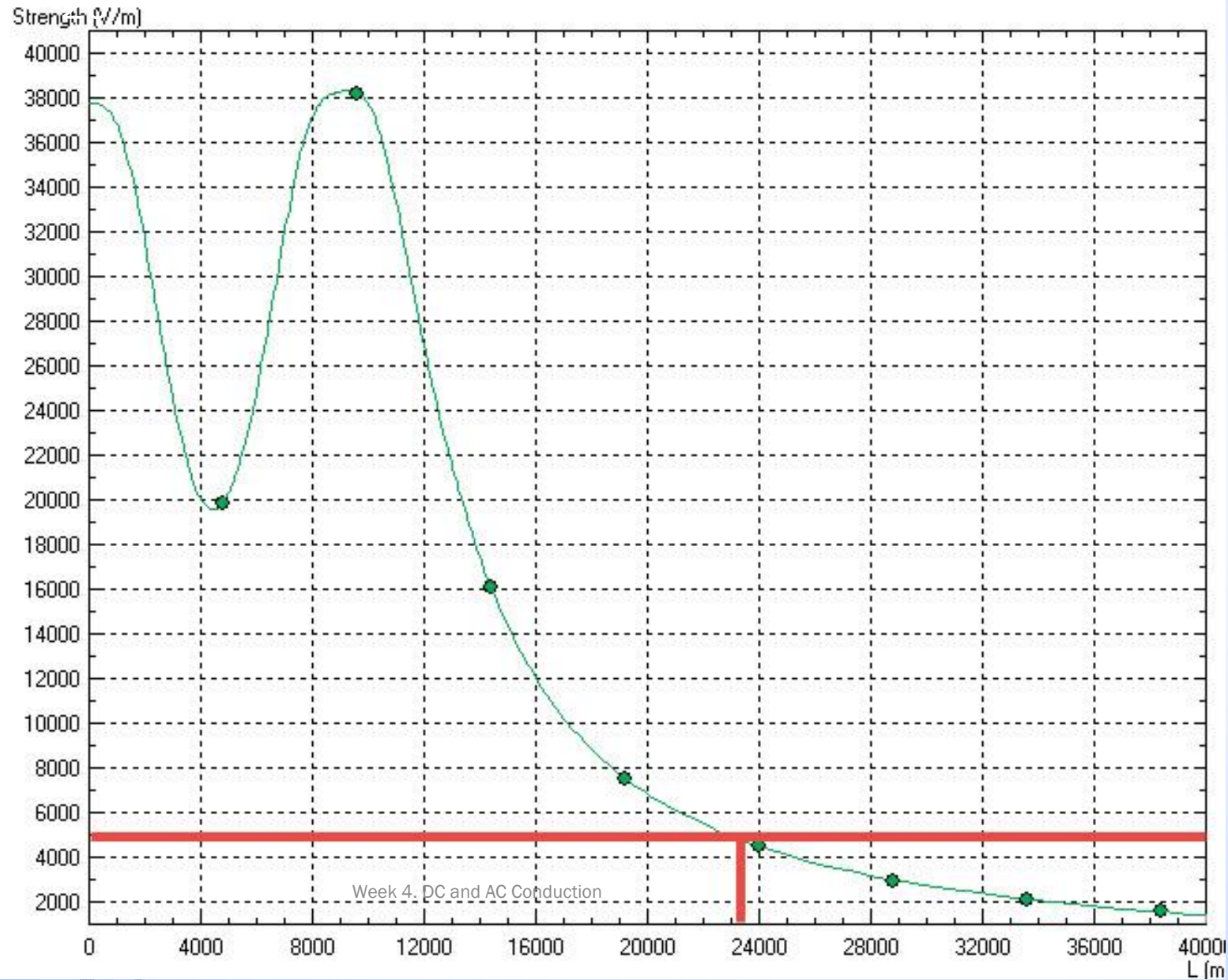
Пример из жизни: Токоограничивающий реактор (ТОР) 330 кV



Электрическое поле

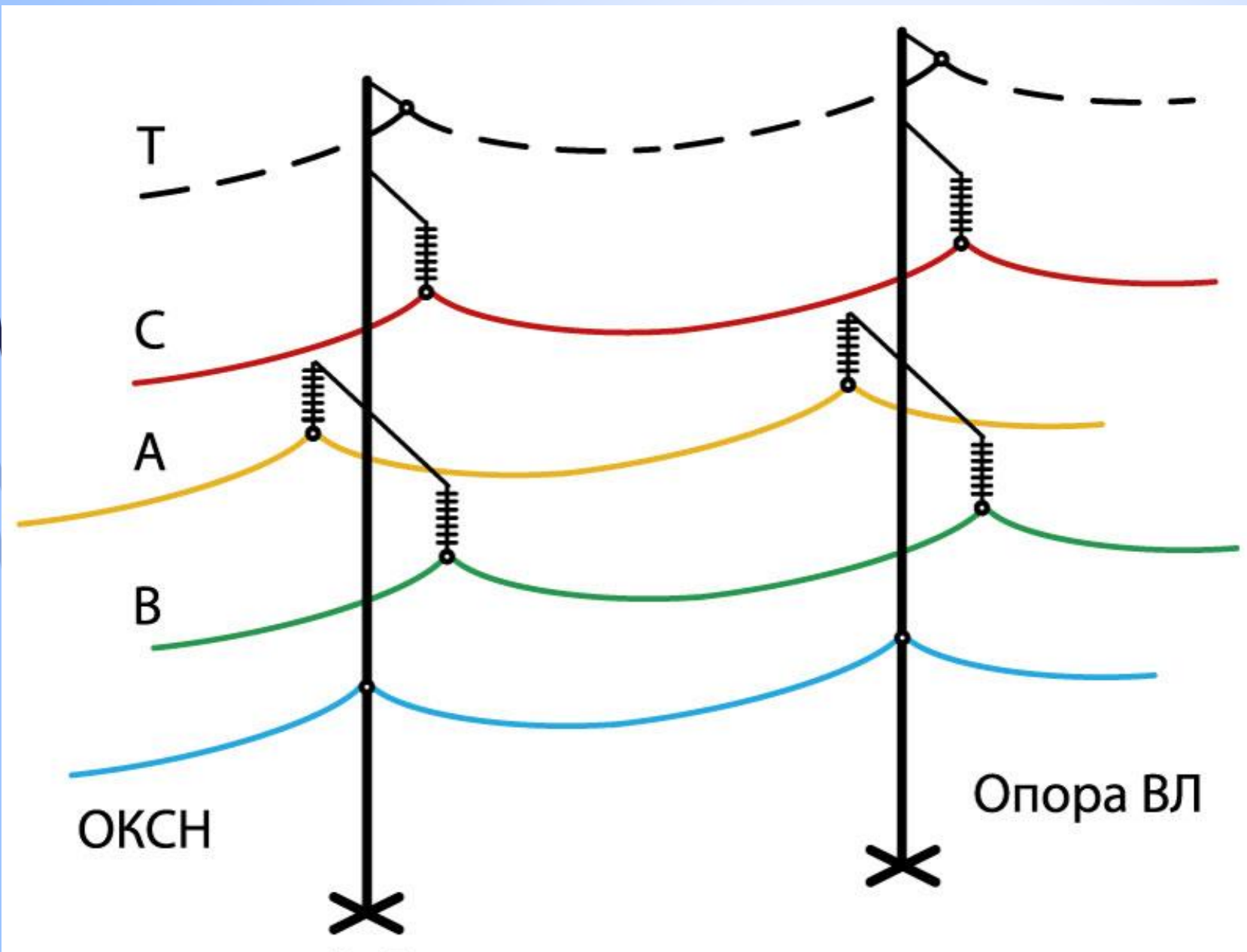


Профиль напряженности поля E , кВ/м



Рекомендации:
Время пребывания персонала ближе 23 м от центрального реактора должно быть ограничено

Подвеска кабеля ВОЛС на опоре ВЛ

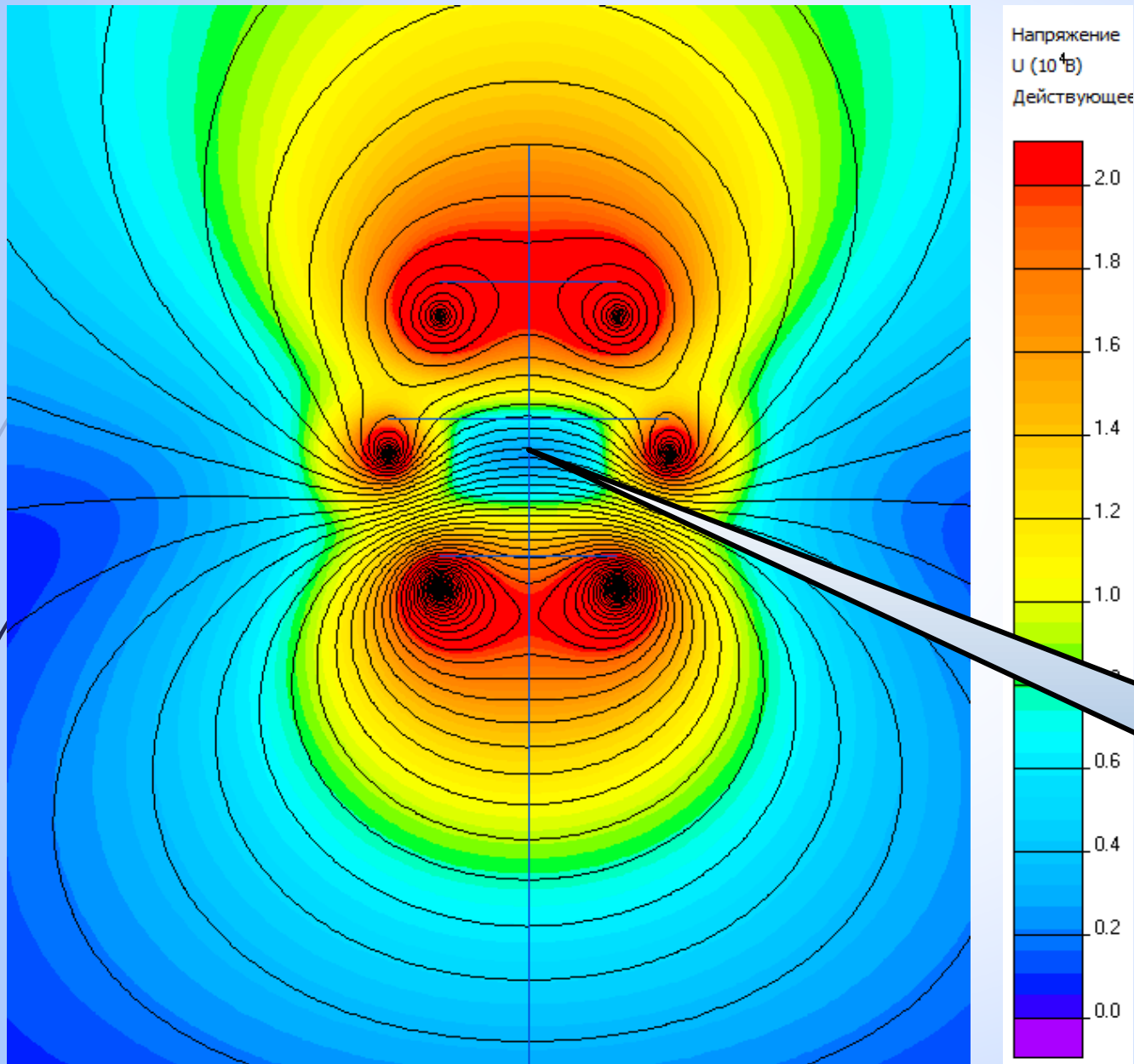


Задача:

Выбрать место с минимальным потенциалом (средним за период)

Подвеска кабеля ВОЛС на опоре ВЛ

22



Задача:

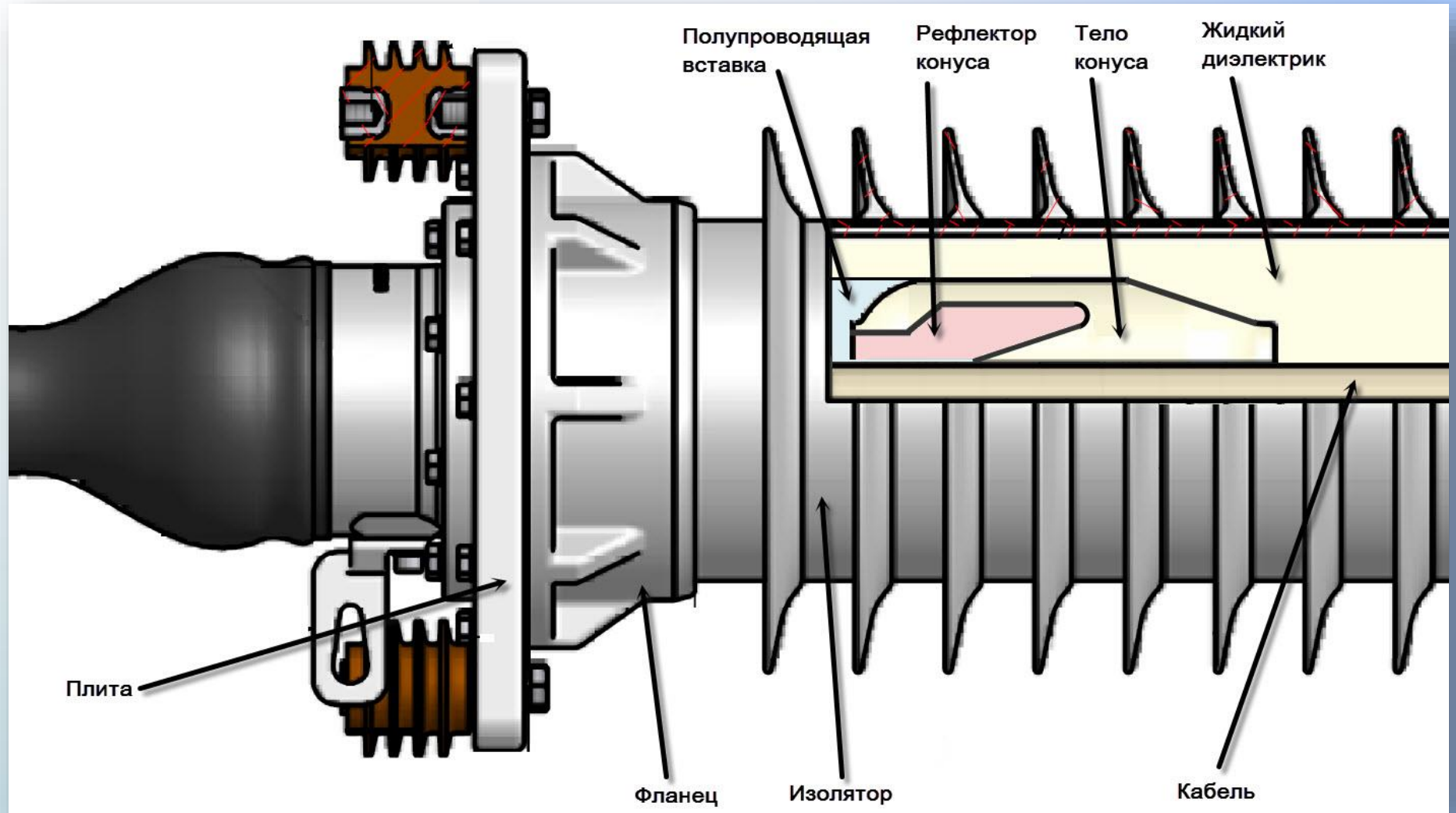
Выбрать место с минимальным потенциалом (средним за период)

Оптимальное место

Поиск слабых мест: Сглаживание поля в кабельной муфте

23

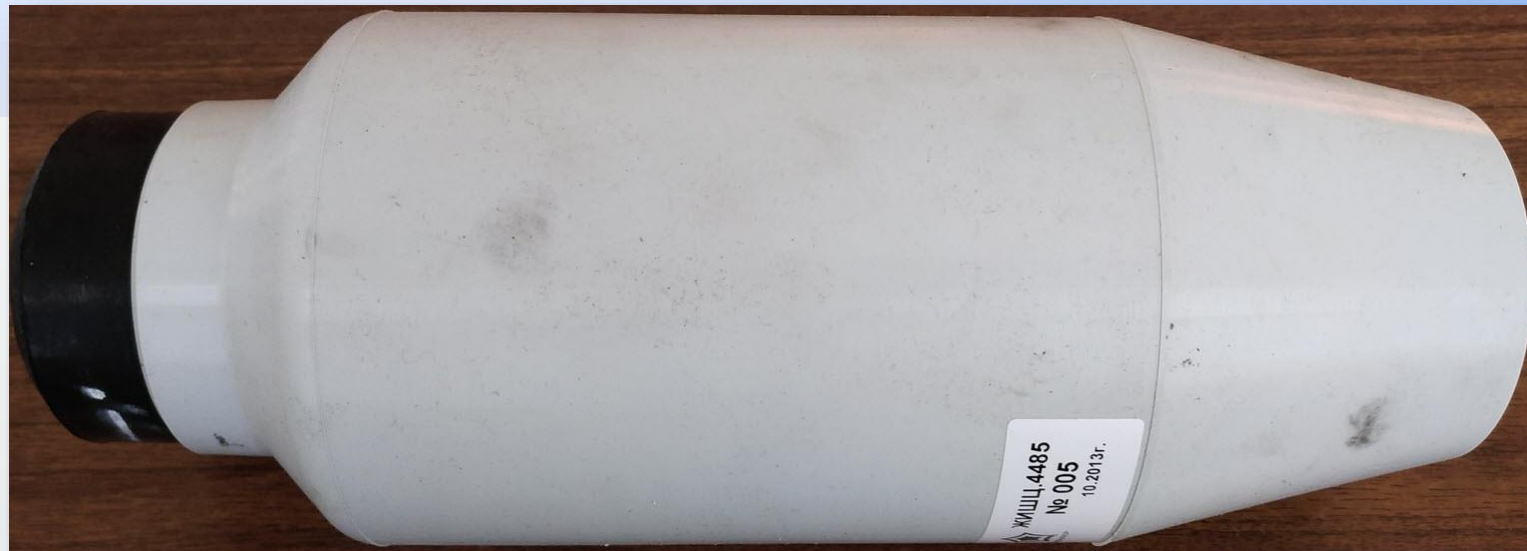
Цель работы: Выбор оптимальных параметров стресс-конуса:
геометрических (углы, радиусы закруглений, длина) и
физических (электропроводность, диэл. проницаемость)



Конструкция стресс-конуса

24

Стресс-конус
в сборе

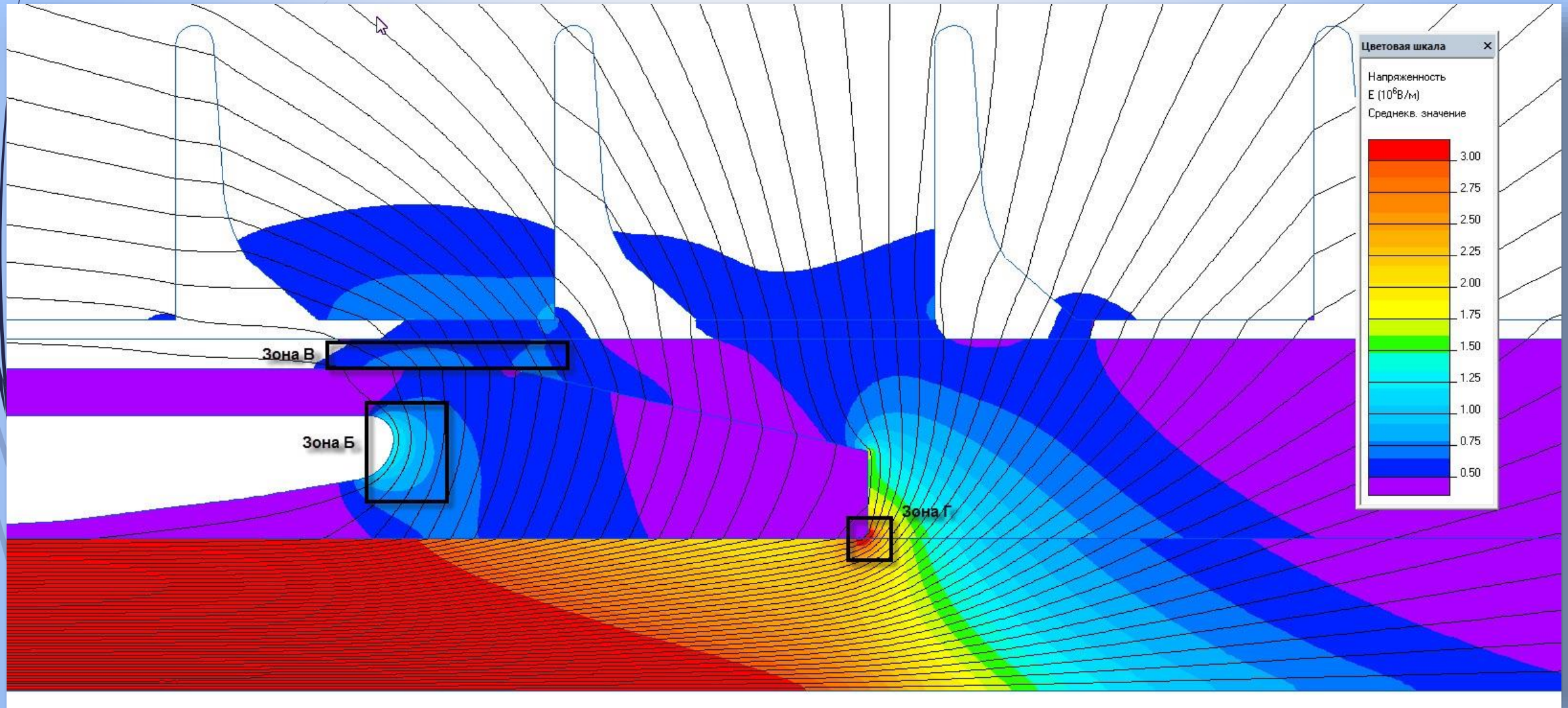


Стресс-конус в разрезе:

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

Картина поля в наиболее нагруженных зонах

25



Уточнение параметров сварочного трансформатора

26

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;



Моделирование сварочного трансформатора

27

1. Электромагнитный анализ

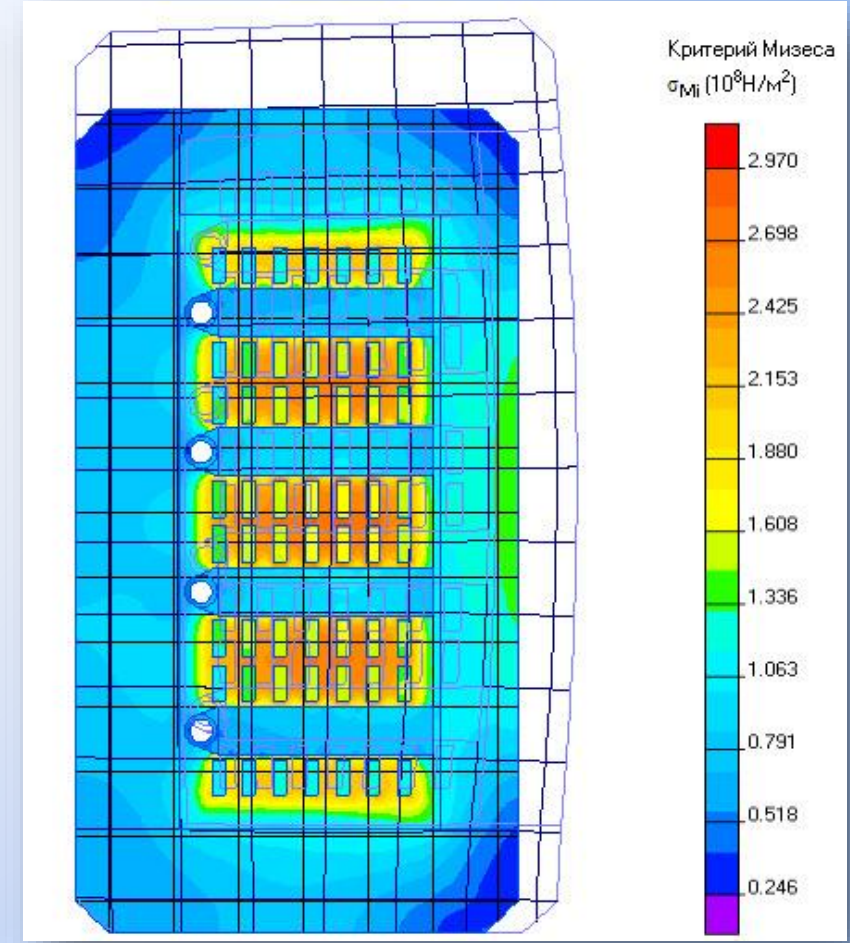
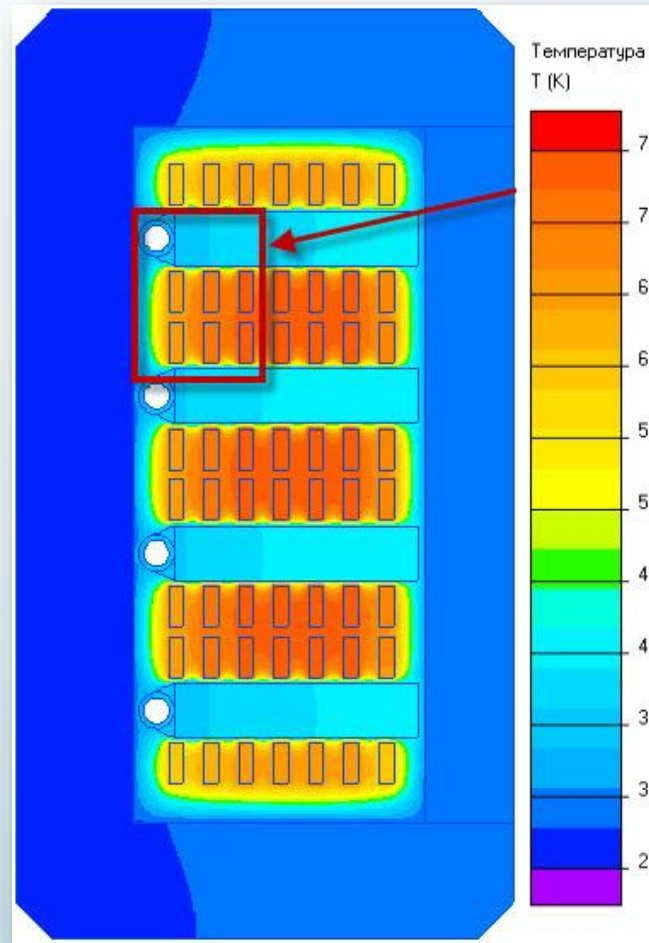
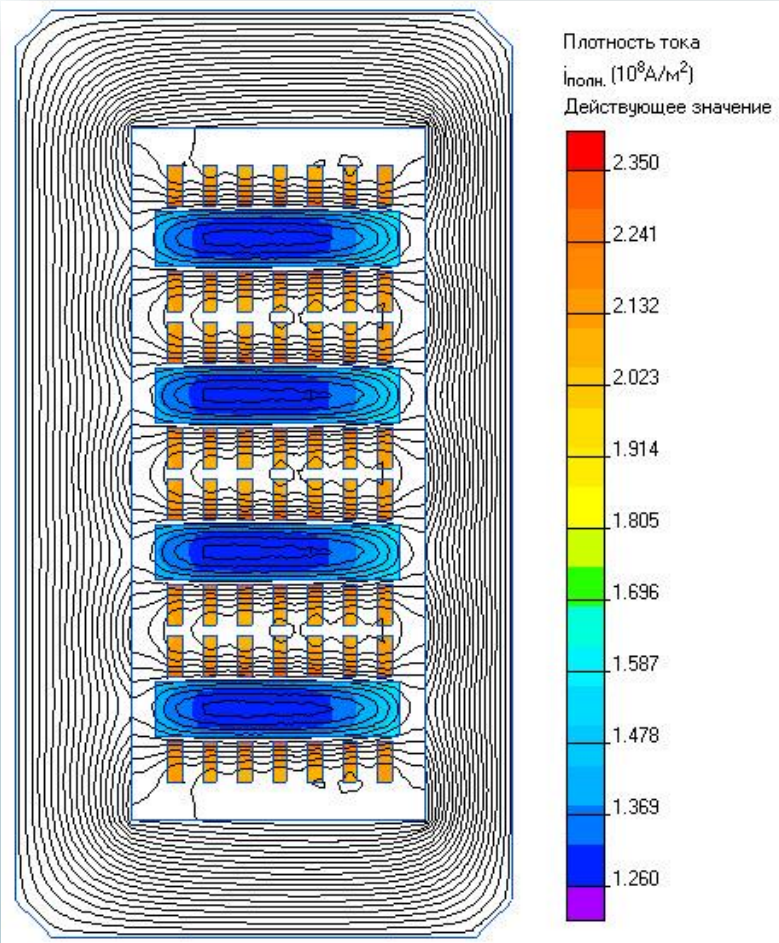
$$\operatorname{div}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A}\right) = -\mathbf{j}_{\text{extern}} + j\omega\sigma \cdot \mathbf{A}$$

2. Температурный анализ

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

3. Упруго-деформированное состояние

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



1

Состав и возможности программы ELCUT

2

Когда и зачем нужен расчет поля?

3

Примеры использования

4

Нагрузочная способность кабельной линии

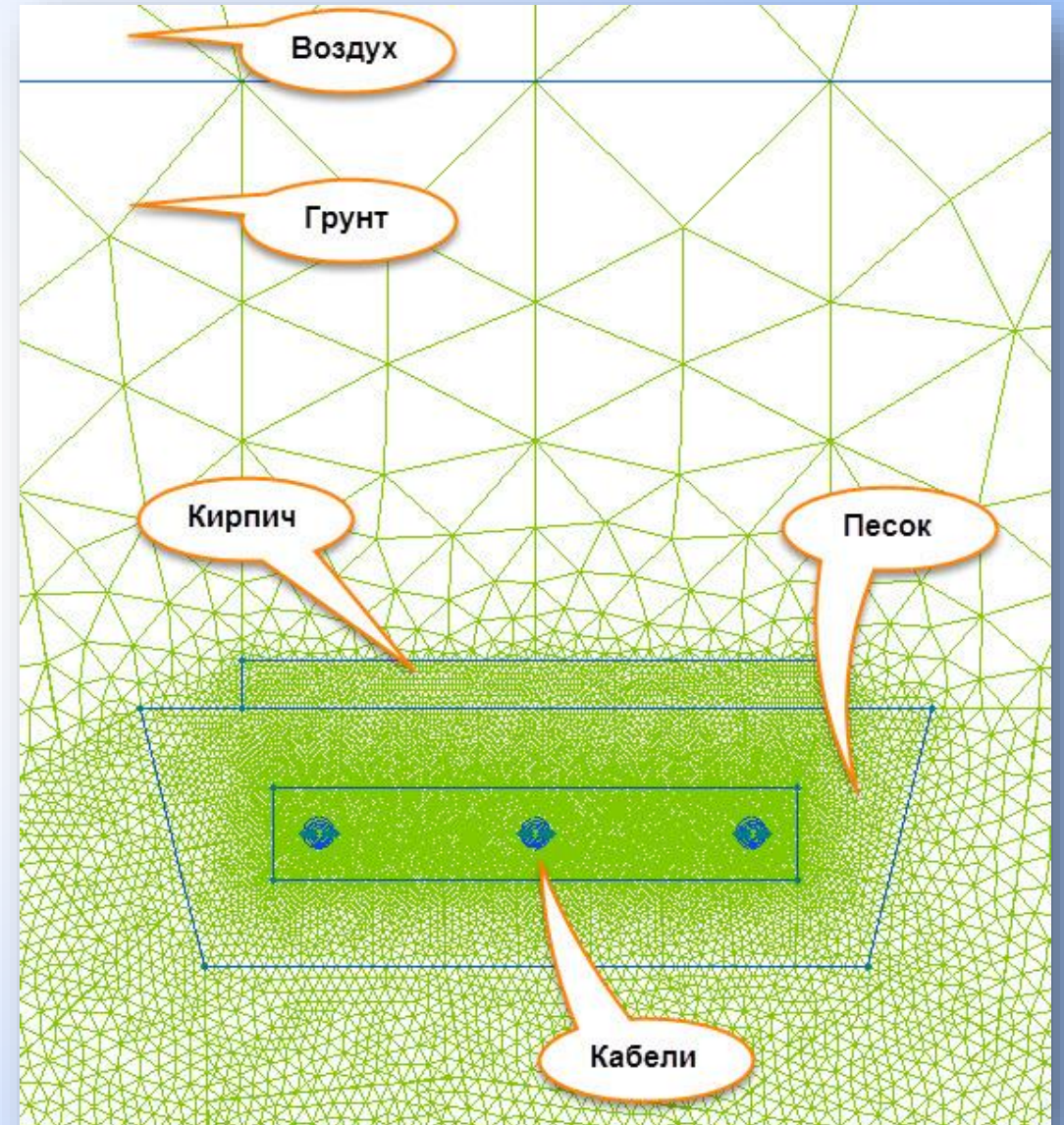
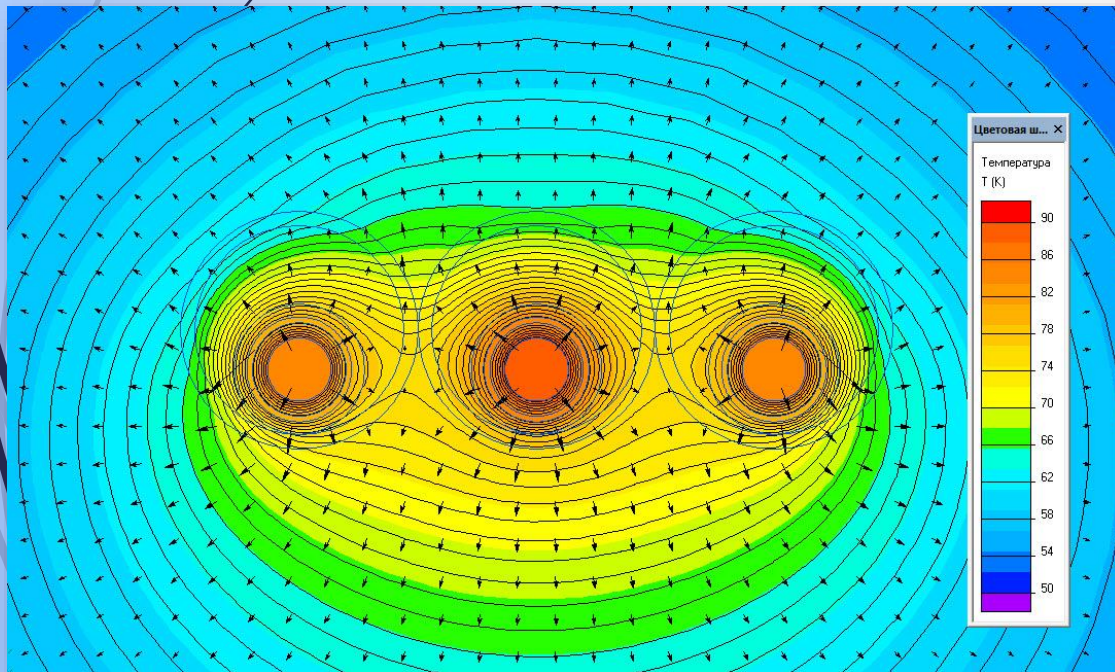
Нагрузочная способность кабельных линий

29

Температурное поле кабельной линии
в подземной траншее:

Постановка задачи:

Результат расчета:

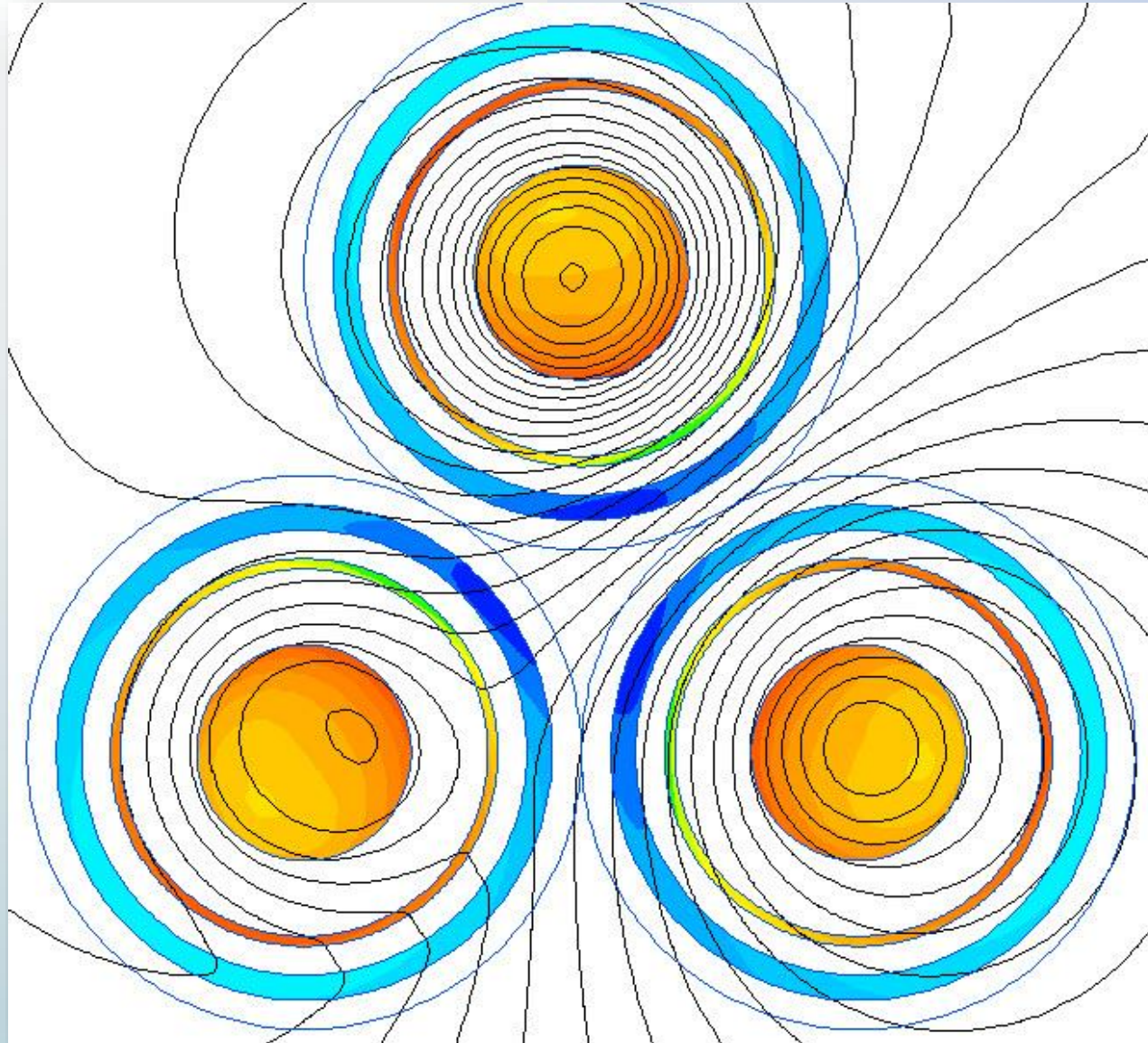


Электромагнитное поле в поперечном сечении

30

Картина поля

Интегральные величины



Калькулятор

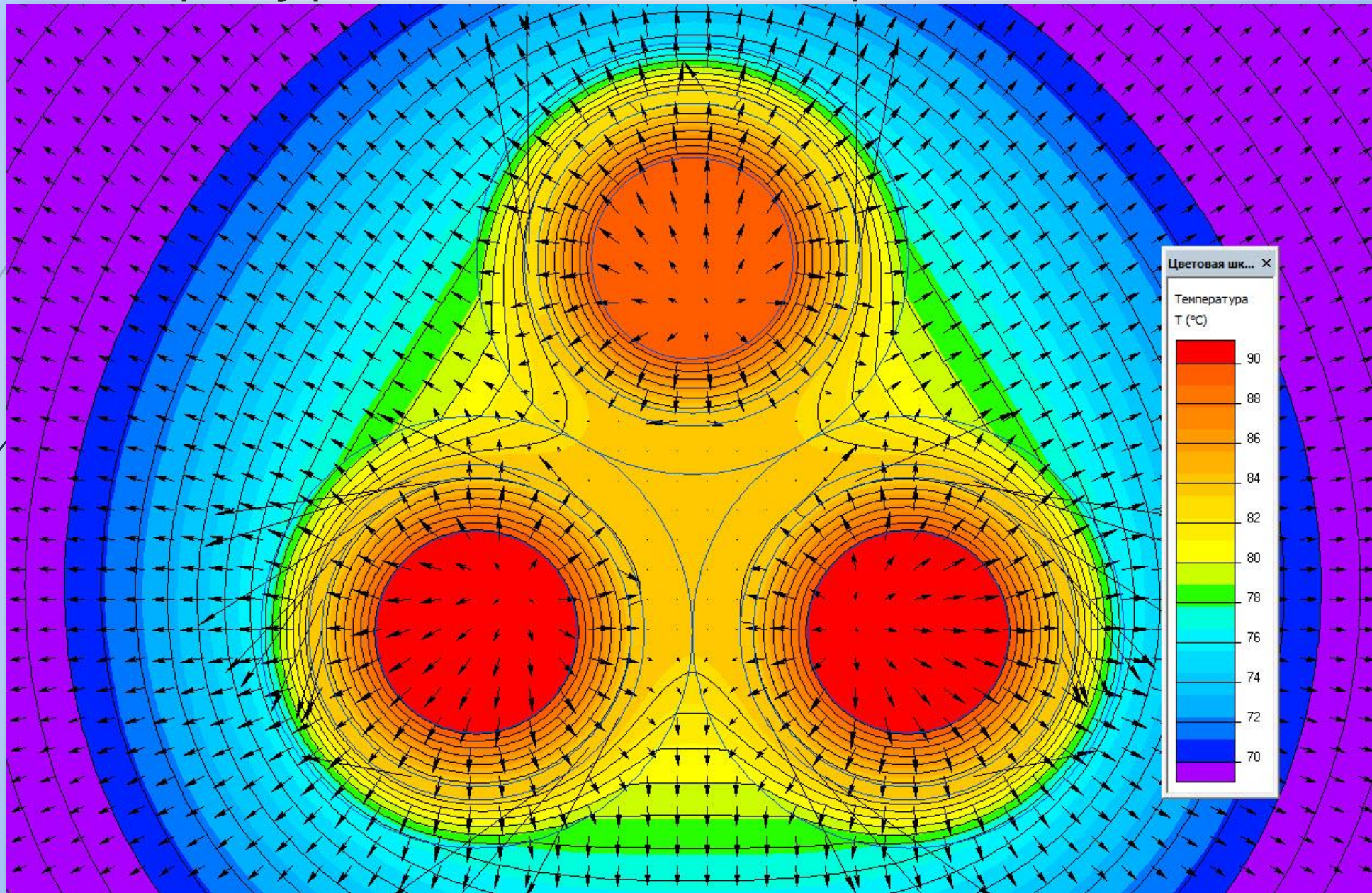
Физические величины

- 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 ponderomotorная 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

Температурное поле в поперечном сечении

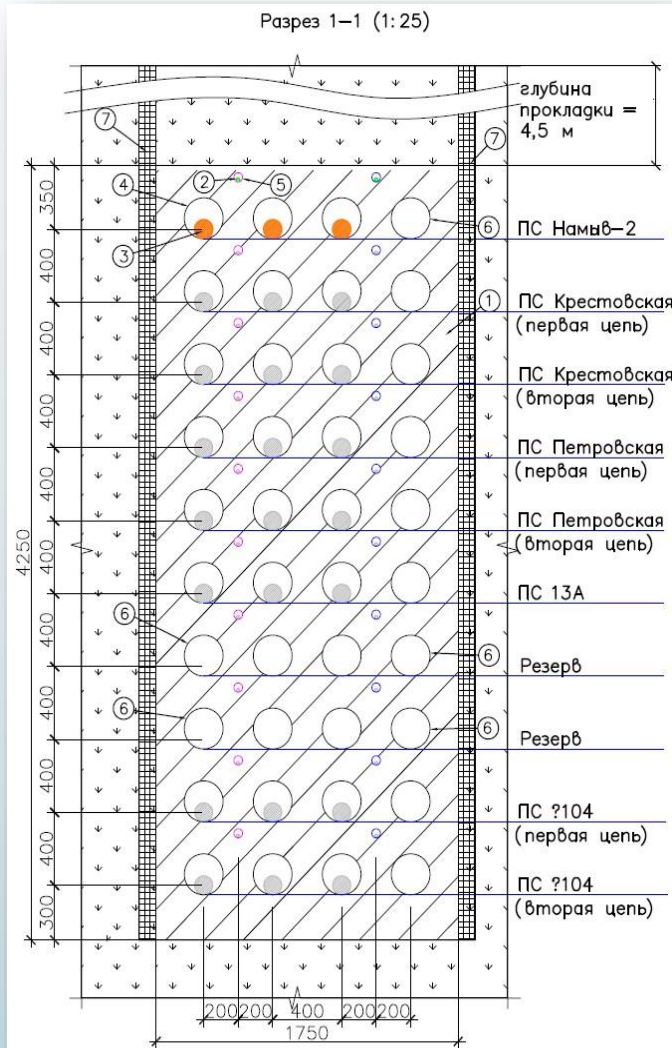
31



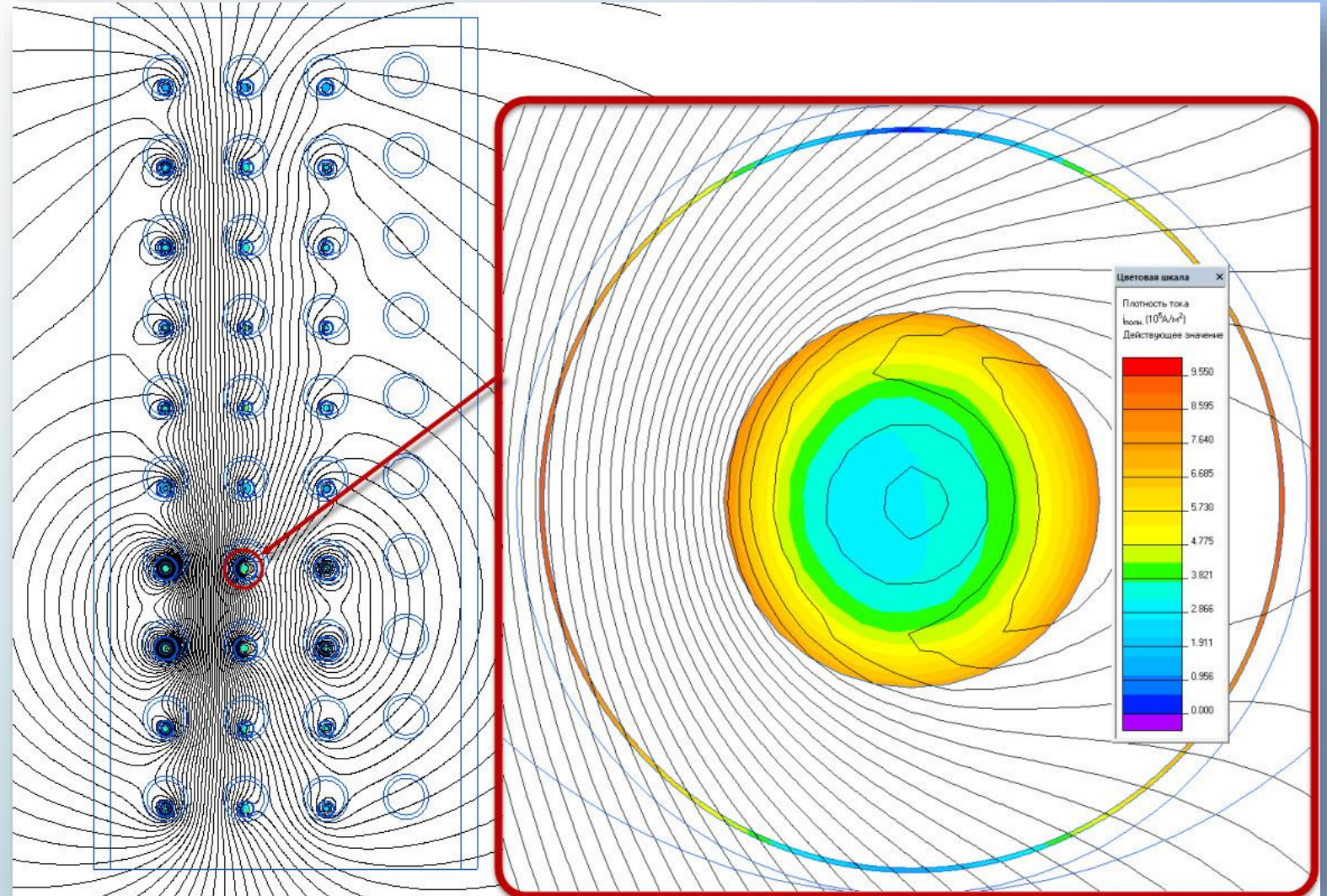
Кабельный блок для 10-ти линий

32

Разрез блока

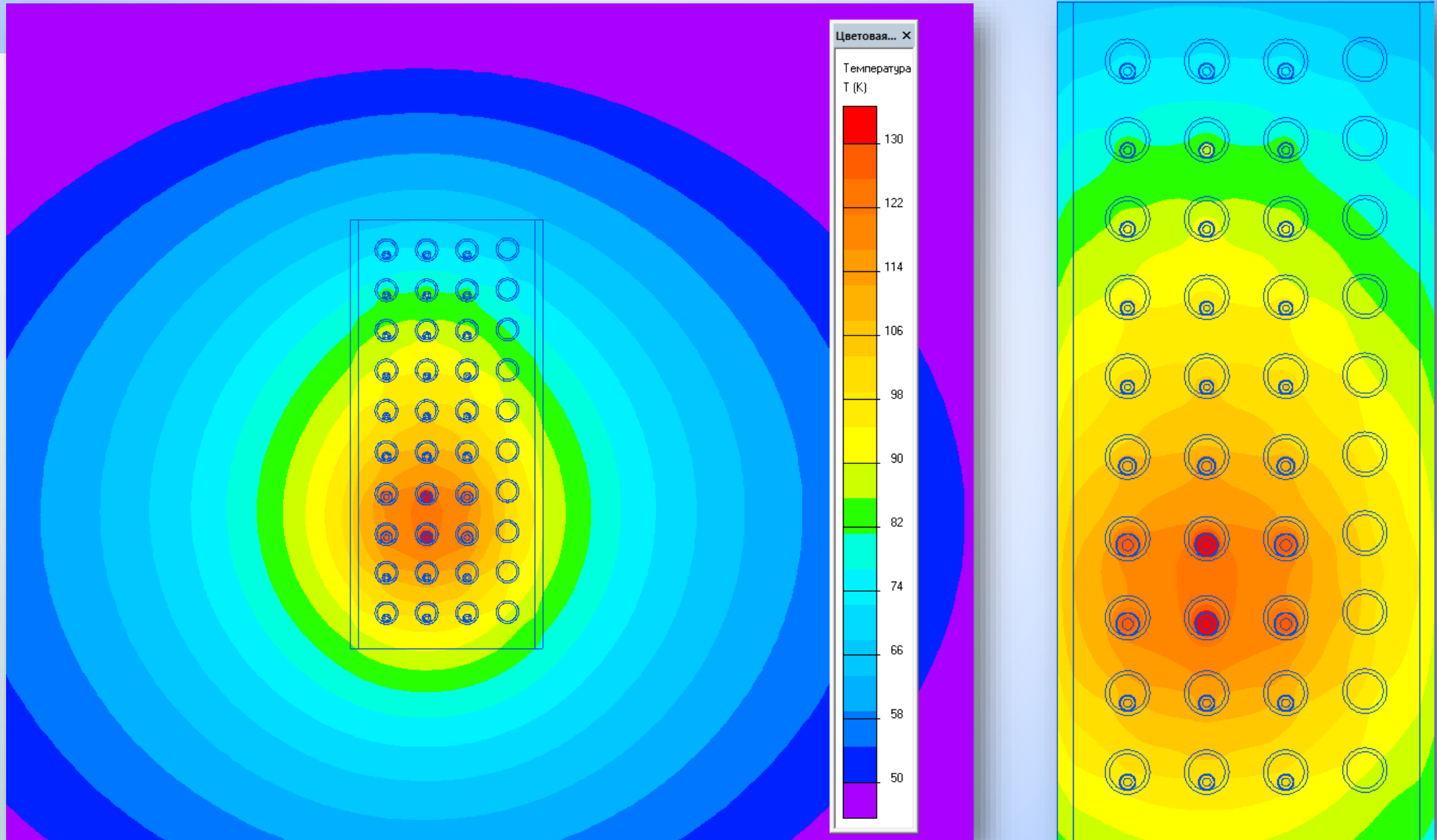


Картина магнитного поля в блоке и в отдельном кабеле



Кабельный блок: температурное поле

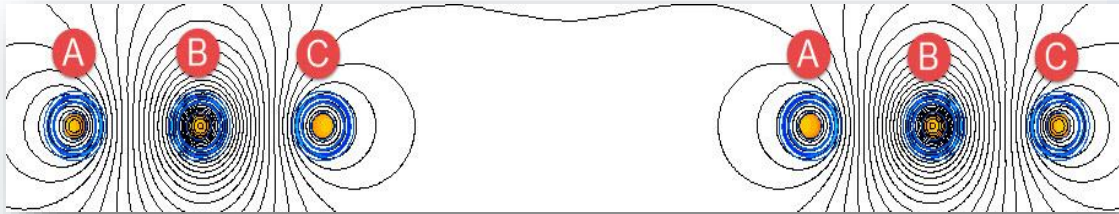
33



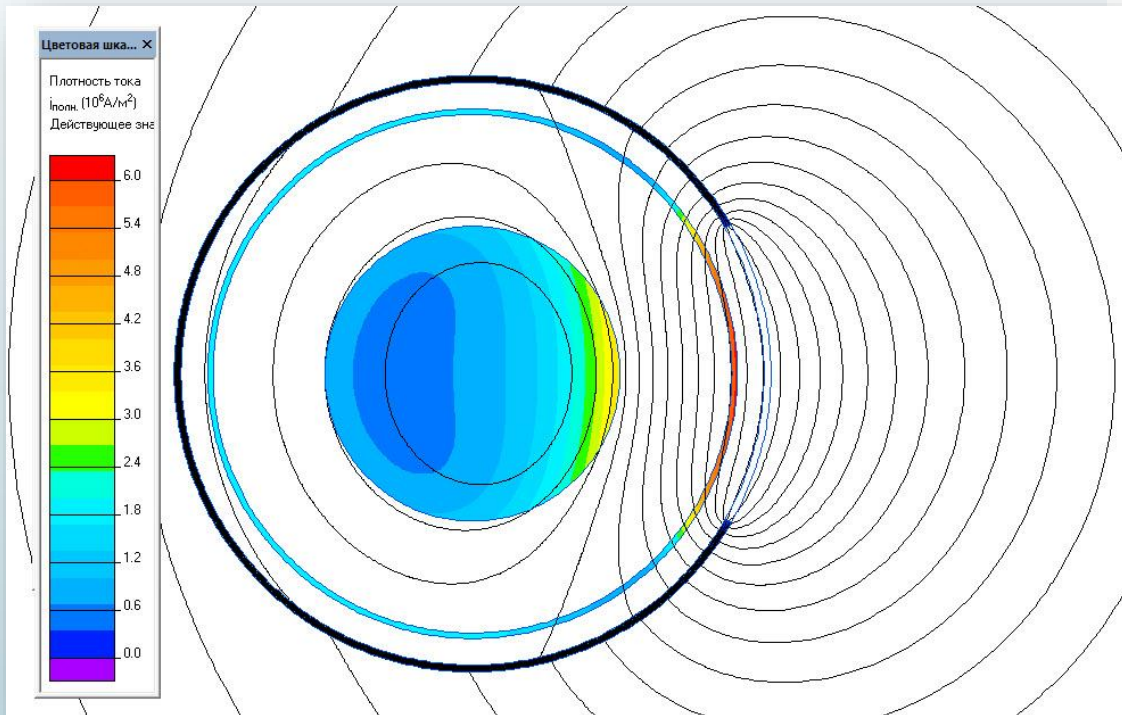
Внешнее магнитное поле кабельной линии

34

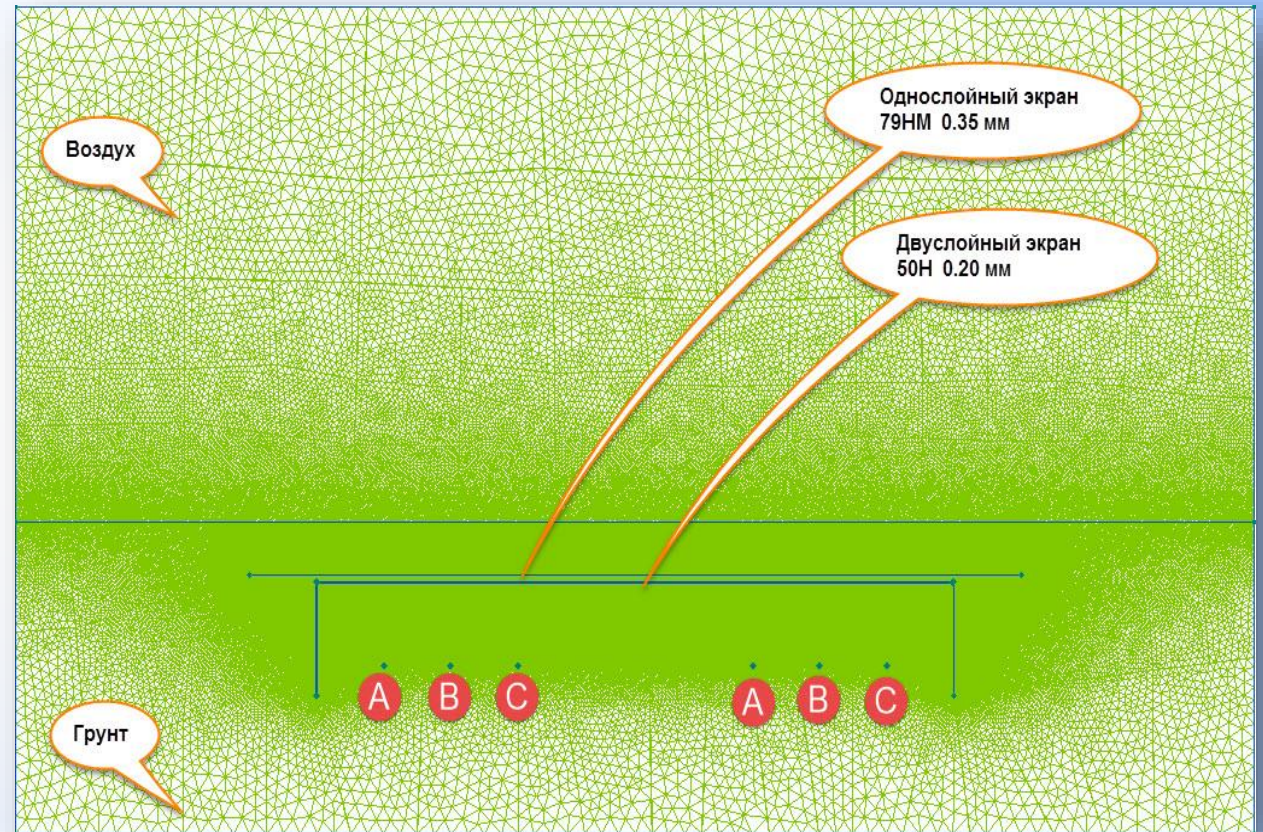
1. Расположение и фазировка кабелей



3. Локальная защита: кольцевые подвижные экраны



2. П-образные экраны из тонких ферромагнитных пленок

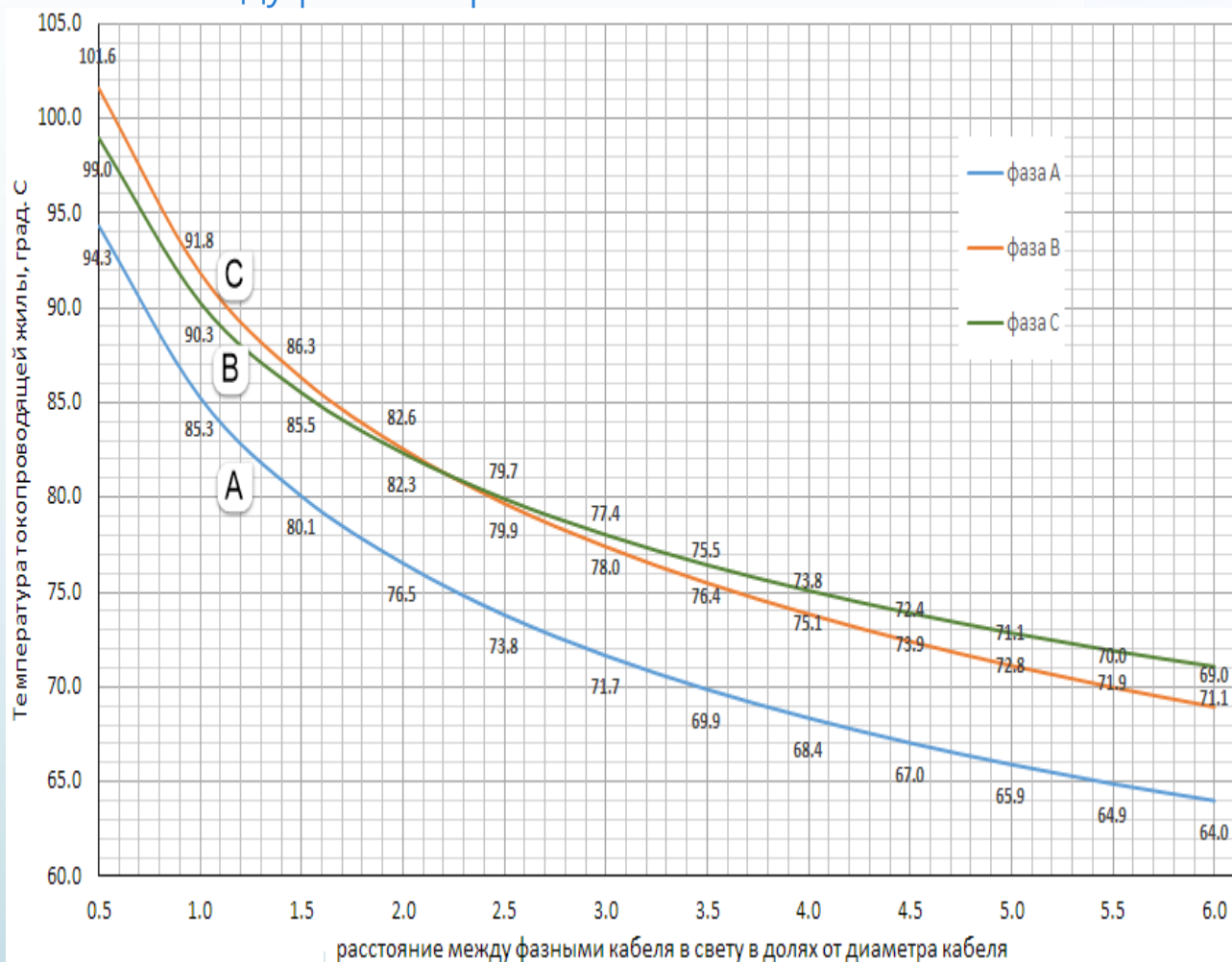


Влияние междуфазного расстояния на температуру

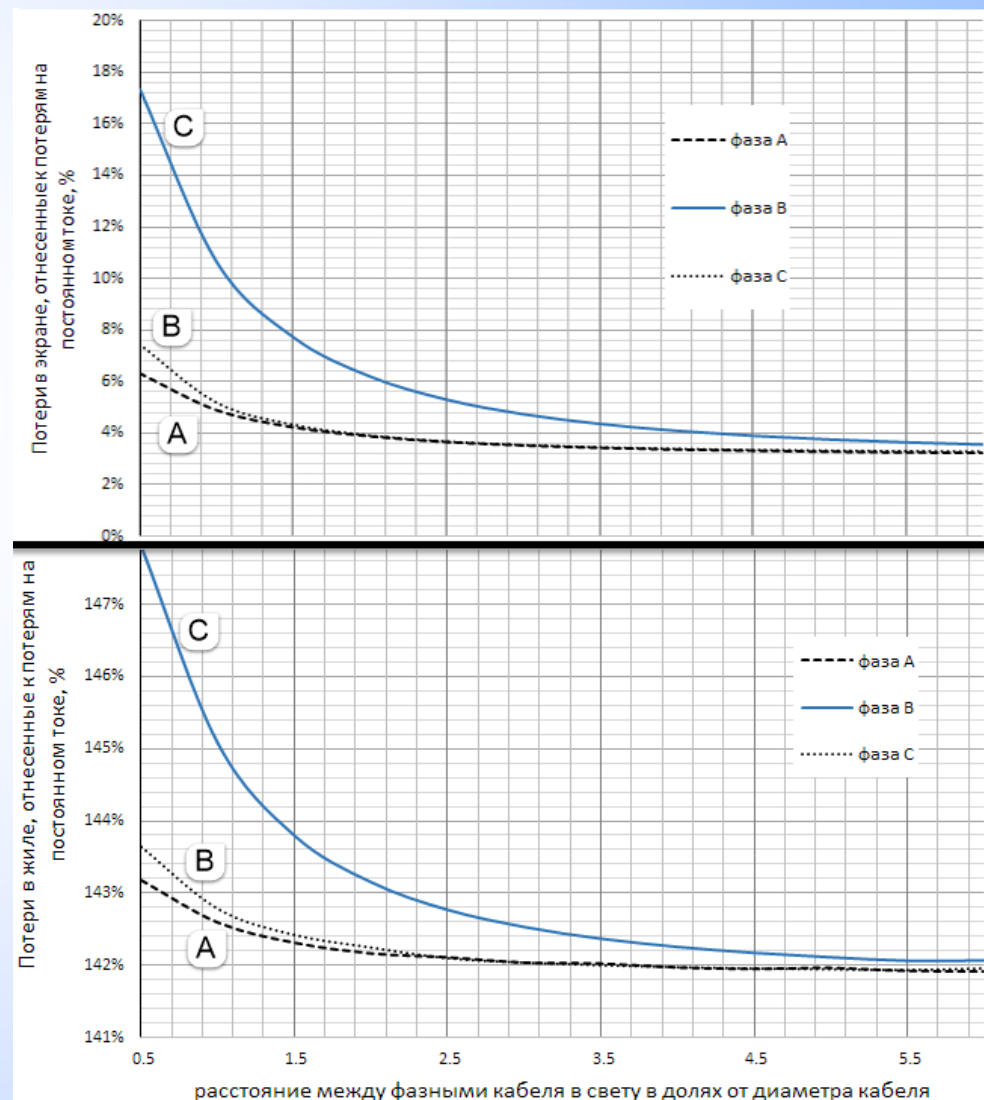
35

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

Температура жилы в зависимости от междуфазного расстояния



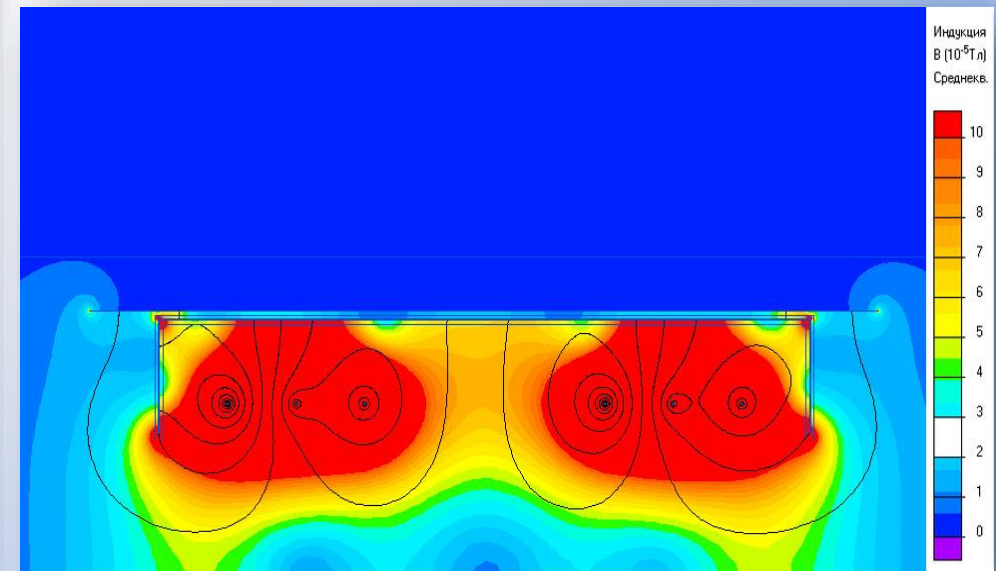
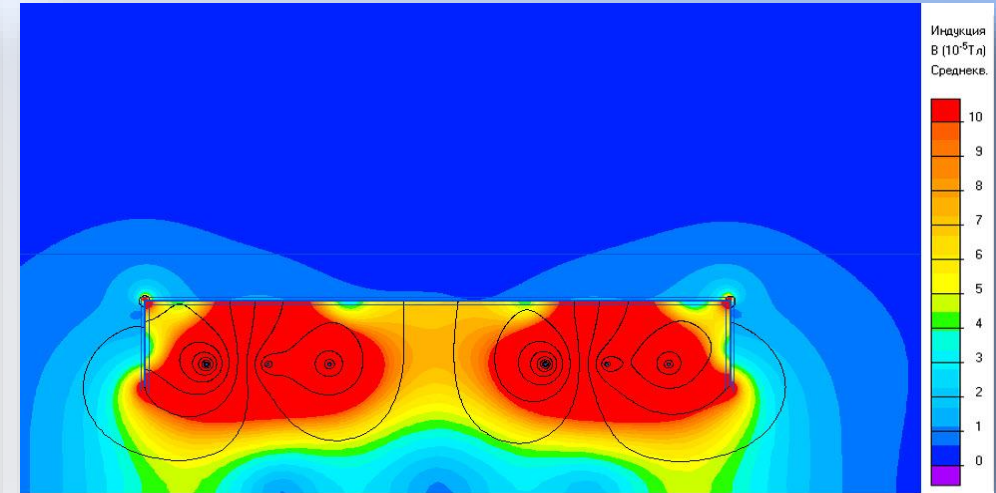
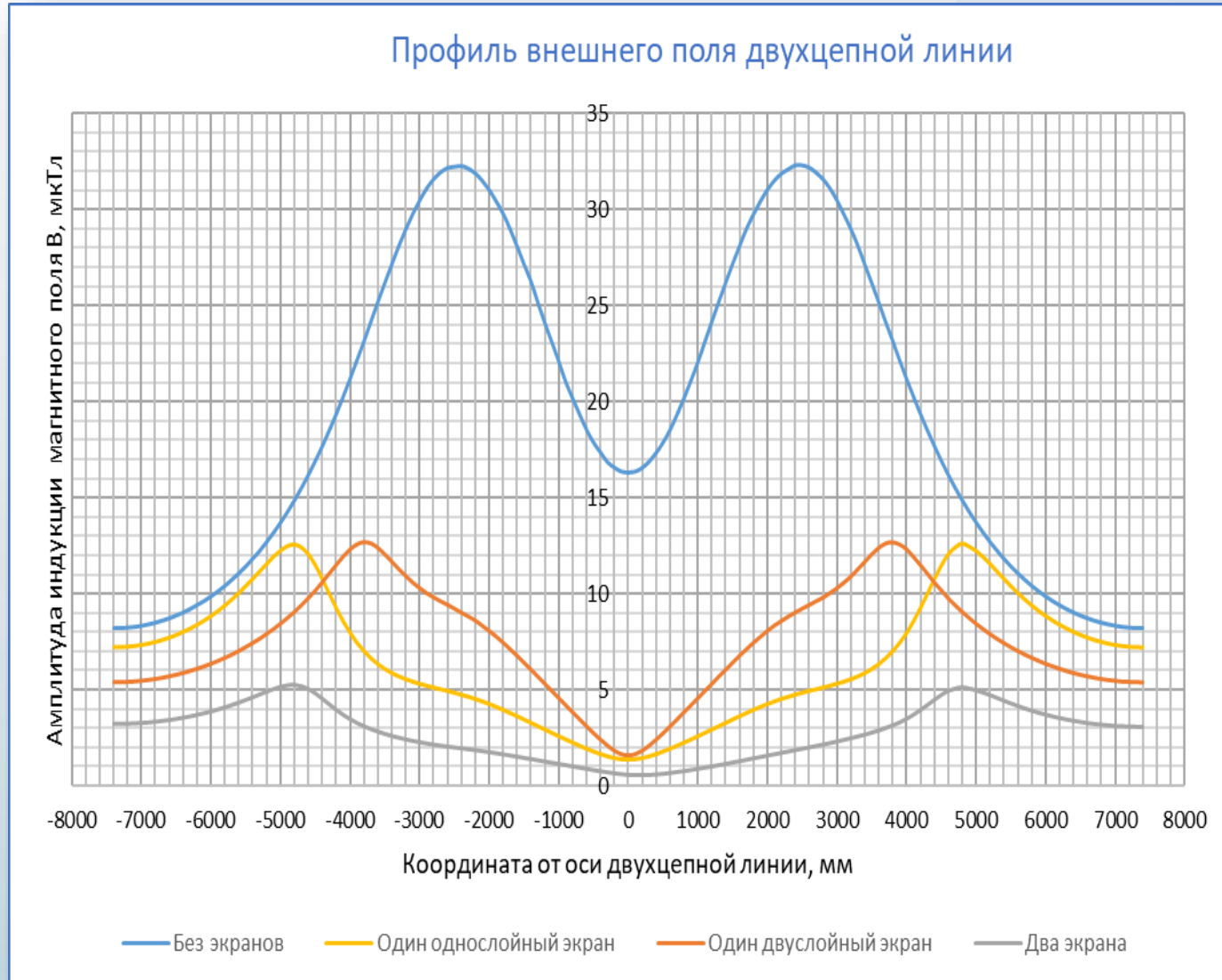
Потери в ТПЖ (вверху) и в экране (внизу)



Эффективность П-образных экранов

36

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



Спасибо за внимание!

37

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

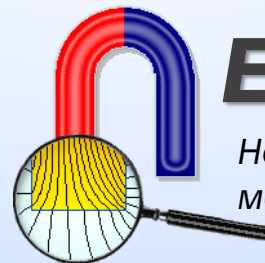
http://elcut.ru/free_soft_r.htm

- Связаться с докладчиком: simon@tor.ru

Искренне ваши:



*Петербургский
энергетический институт
повышения
квалификации*



ELCUT

*Новый подход к
моделированию полей*



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого