

ELCUT

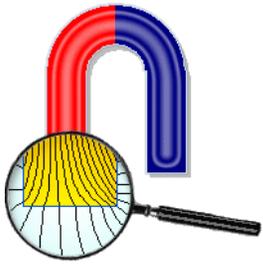
*Новый подход к
моделированию полей*

ELCUT для проектирования электротехнических компонентов

СЕМЕН ДАВИДОВИЧ ДУБИЦКИЙ
ДИРЕКТОР ООО «ТОР», К.Т.Н.

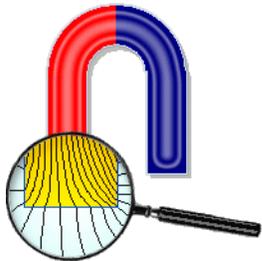
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, МОСКОВСКИЙ ПР. 22, ЛИТЕРА Т, ОФИС 12Н

INFO@ELCUT.RU
(812) 309-2734



План

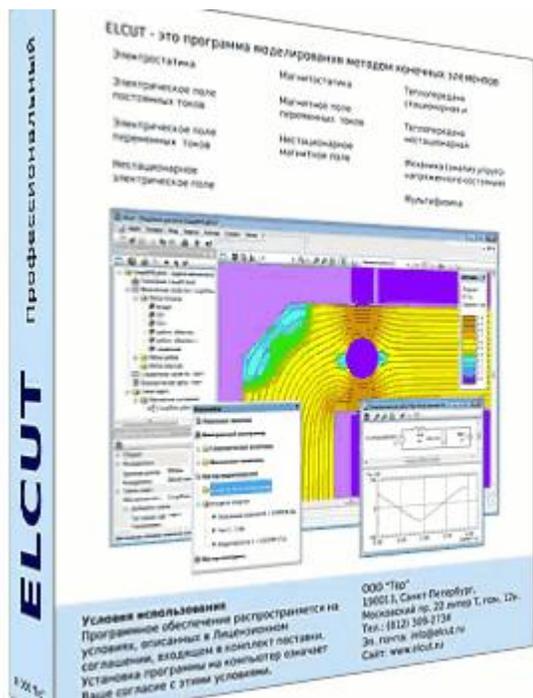
1. Как все начиналось в 1988 году?
2. Какие задачи решает ELCUT?
3. Кто использует ELCUT?
4. Как выглядит типичный расчет (ELCUT workflow)?
5. Что внутри: обзор подсистем программы
6. Примеры:
 - a) Электромагнитное поле + движение: Электрические машины
 - b) Электромагнитное поле + тепло:
 - i. Полезное тепло: Высокочастотный нагрев стальной заготовки
 - ii. Вредное тепло: Токовая нагрузка подземной кабельной линии
 - c) Параметры устройства: сварочный трансформатор



ELCUT

*инженерный инструмент моделирования
электромагнитных и температурных полей*

Анто 1988



Истоки

1988: Электросила,
Политехнический институт, ЛГУ

Становление

Компания одного продукта:
Статический анализ,
Анализ в частотной области
Нестационарные задачи

Зрелость

Программный интерфейс (API) на базе COM
Постепенный переход к 3D анализу

Обзор ELCUT: Квазистационарные задачи – обзор формулировок

Электрическое поле

Электростатика

- Емкость
- Электрическая прочность

Постоянный ток

- Сопротивление
- Омические потери

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

- Активный, реактивный ток
- Омические потери, ток смещения

$$U = f(t)$$

- Нелинейные диэлектрические среды
- Импульсная нагрузка

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

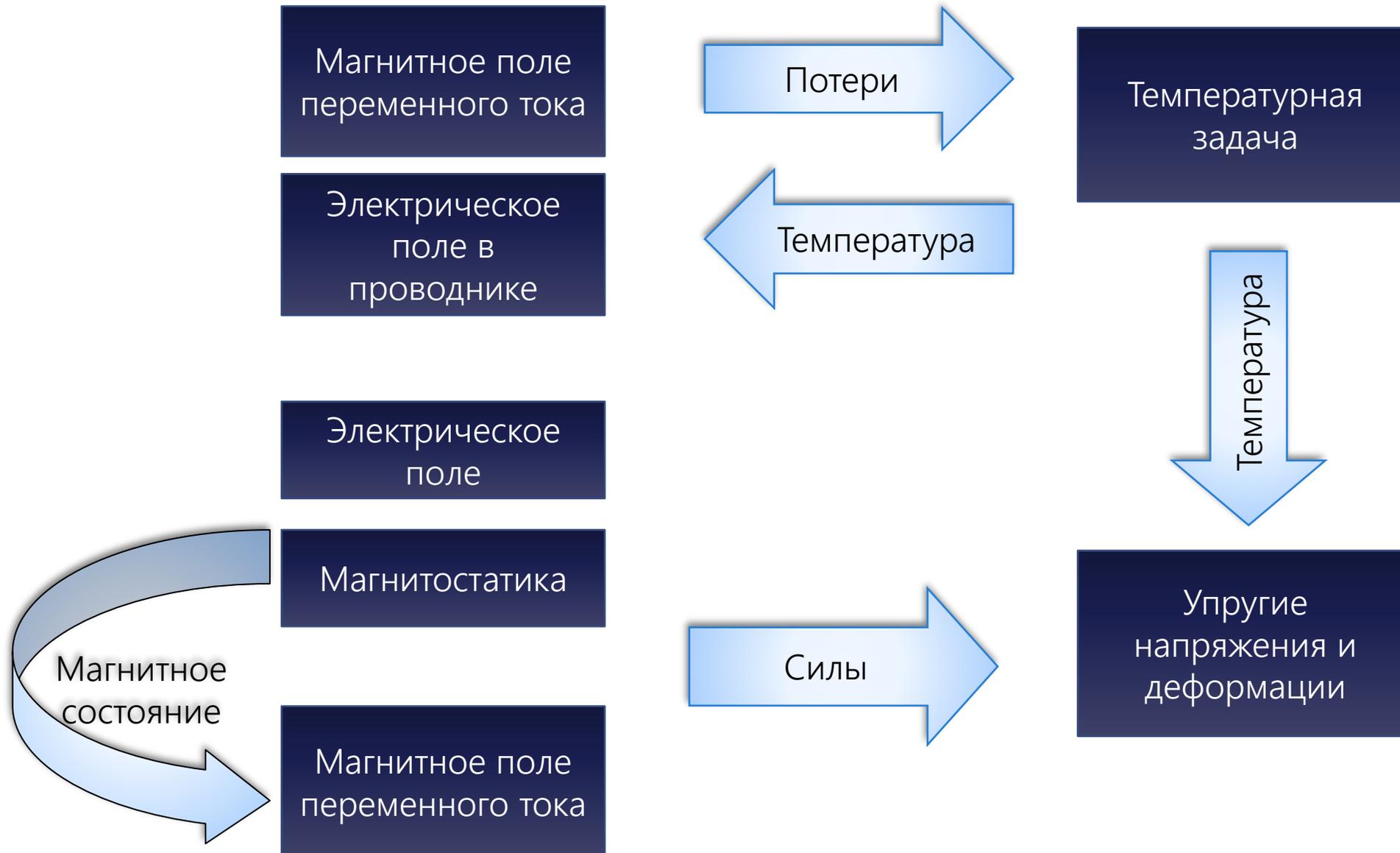
Установившаяся температура

$$T = f(t)$$

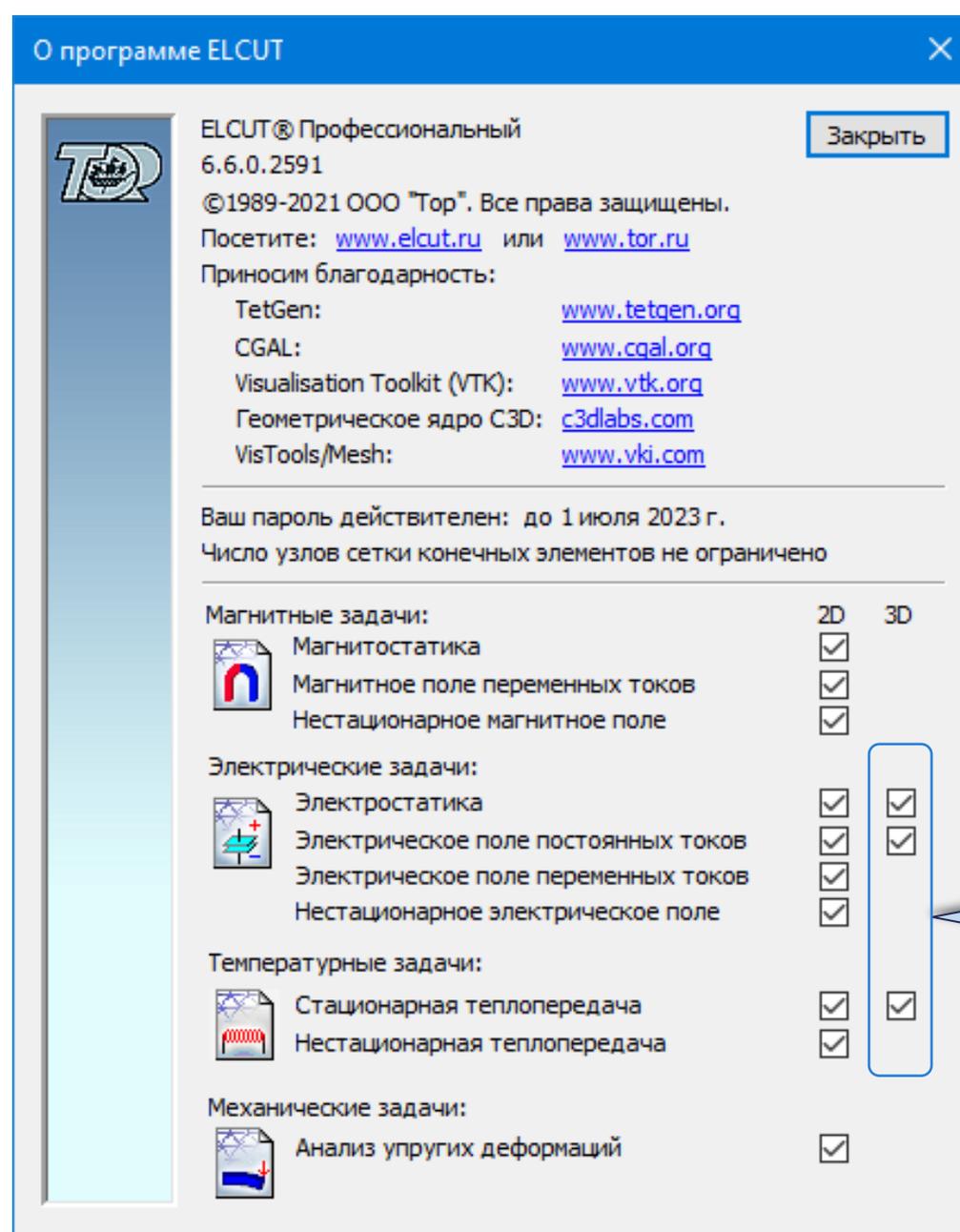
Упругость

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

Мультифизические задачи



Двумерный и трехмерный анализ



Только задачи со
скалярным потенциалом

Индустрия

Электротехника :

- Силовые машины (Электросила), СПб
- Электрогенераторный з-д (Сарапул)
- АО Авиаавтоматика (Курск)
- ЗЭТО (Великие Луки)
- СВЭЛ, УЭТМ, РосЭнергоТранс (Екб)
- ГК «Изолятор» (Истра, Моск. обл.)
- Севкабель (СПб)
- ССТ (Мытищи)
- з-д Элеконд (Сарапул)

Обогащение и сепарация:

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

Строительная теплофизика

Магнитные технологии

Исследования

Физика:

- ОИЯИ Дубна
- ВНИИЭФ Саров
- НИЦ «Курчатовский ин-т»
- ИСЭ РАН (Томск)
- ИПФ РАН (Н.Новгород)
- ТРИНИТИ (Троицк)

Электротехника:

- ВНИИКП (Москва)
- ВЭИ (ВНИИТФ)
- НИИЭФА им. Ефремова
- НТЦ Высоковольтной аппаратуры (Саров)
- ВИТ (Запорожье)

Материаловедение:

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

Образование

Москва:

- МЭИ
- МАИ
- МИЭМ (ВШЭ)
- МГСУ

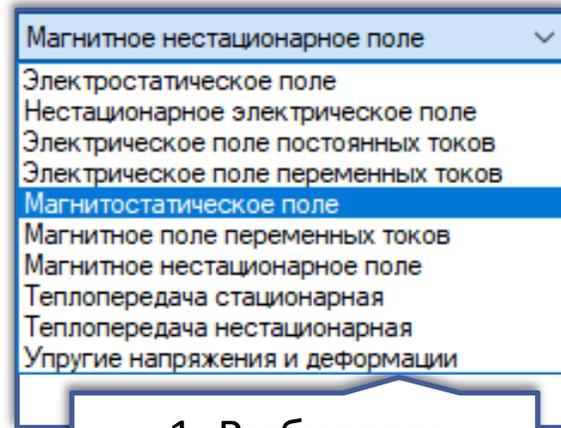
Санкт-Петербург:

- Политехнический ун-т
- ГУАП
- ПГУПС
- ИТМО
- ЛЭТИ

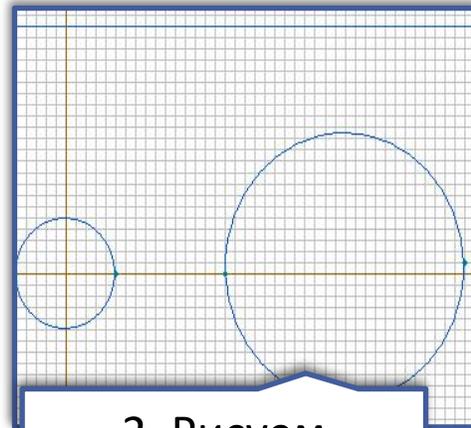
Урал и Сибирь:

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

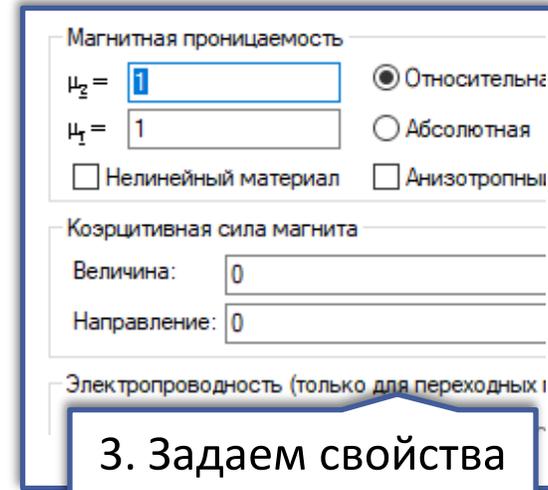
Процесс решения задачи в ELCUT



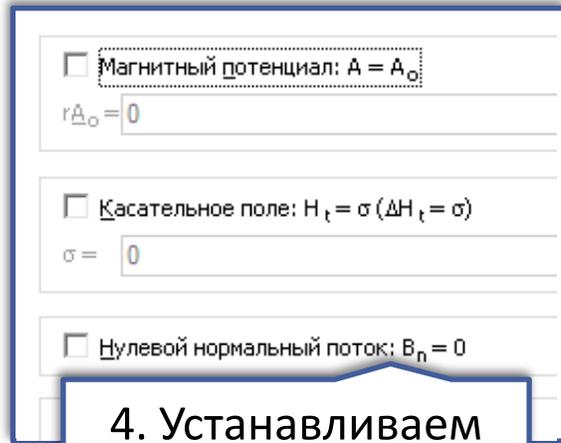
1. Выбираем формулировку



2. Рисуем геометрию



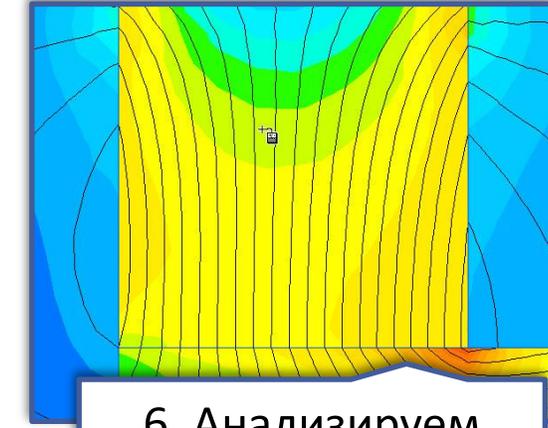
3. Задаем свойства материалов



4. Устанавливаем граничные условия



5. Строим сетку КЭ



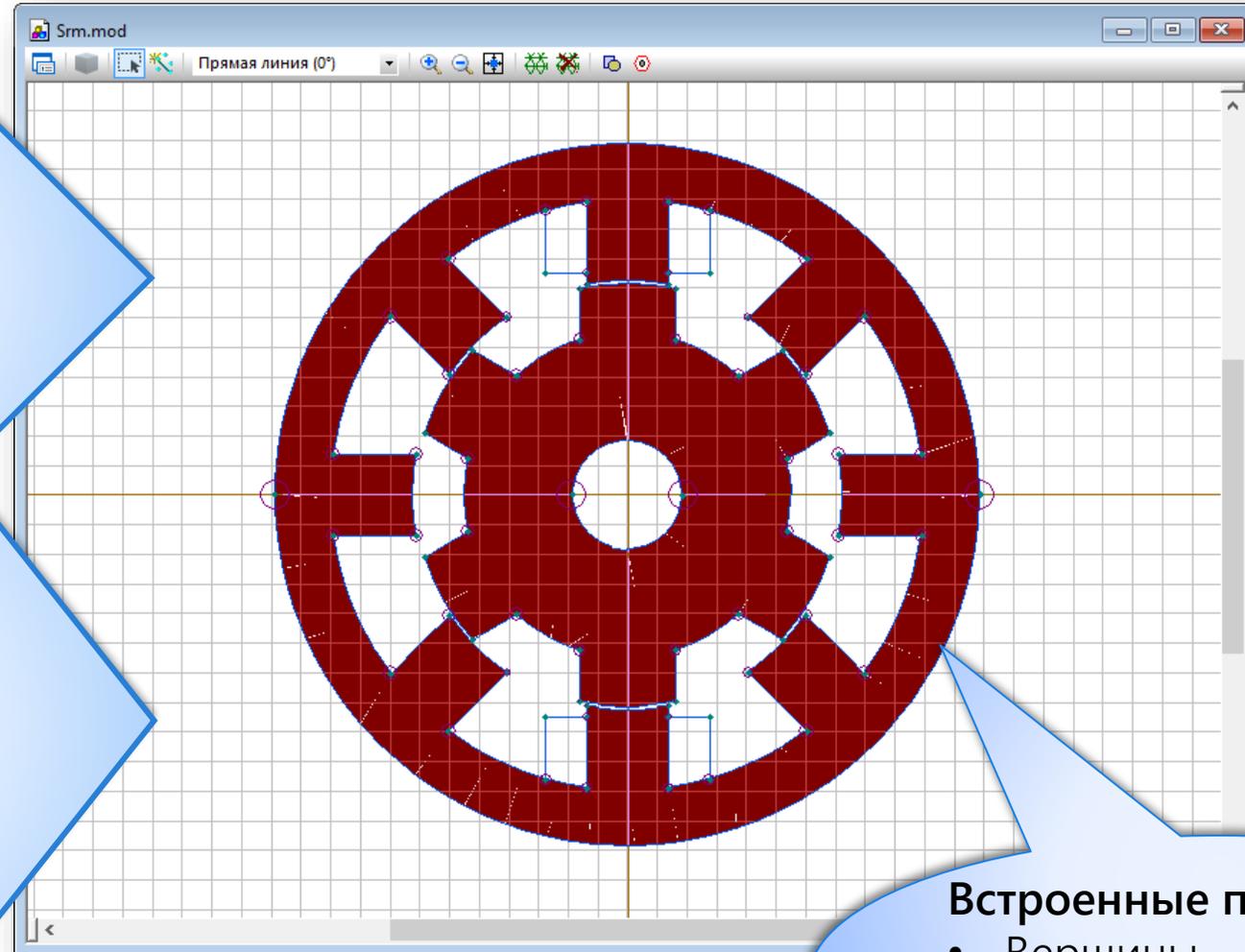
6. Анализируем решение

Импорт:

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

Вставка фигур:

- Прямоугольник
- Круг
- Эллипс

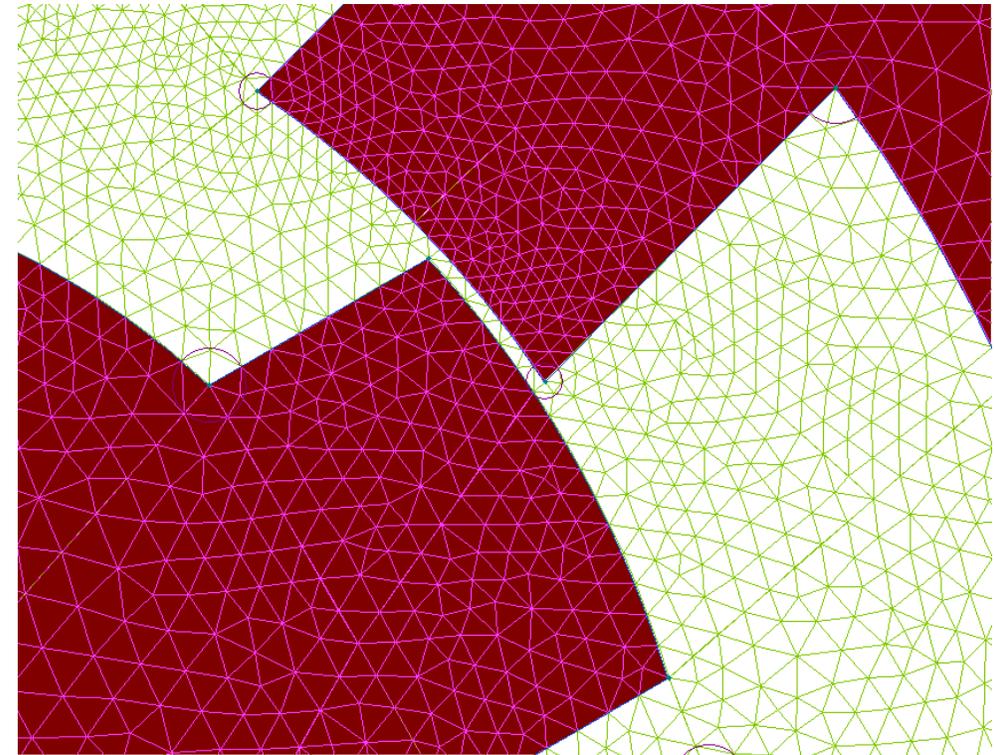
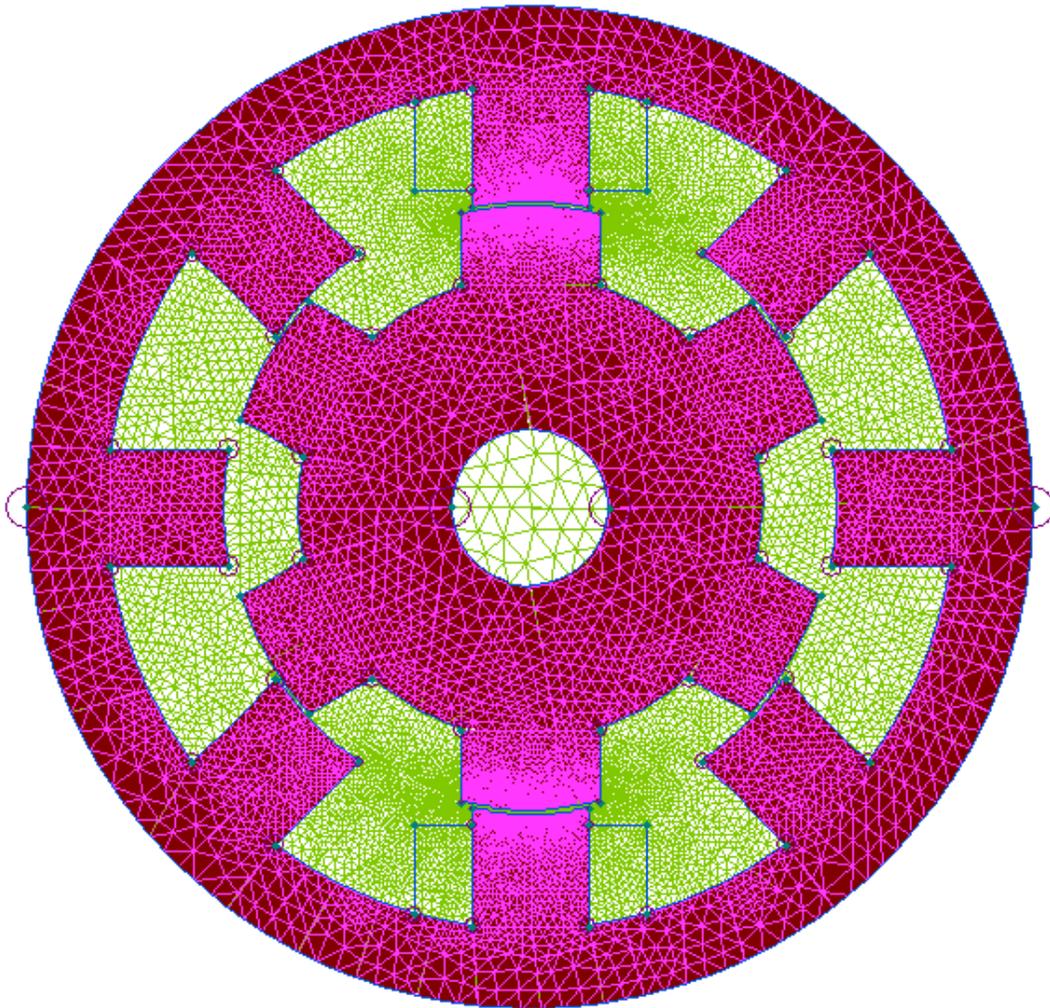


Встроенные примитивы:

- Вершины
- Отрезки
- Дуги окружности

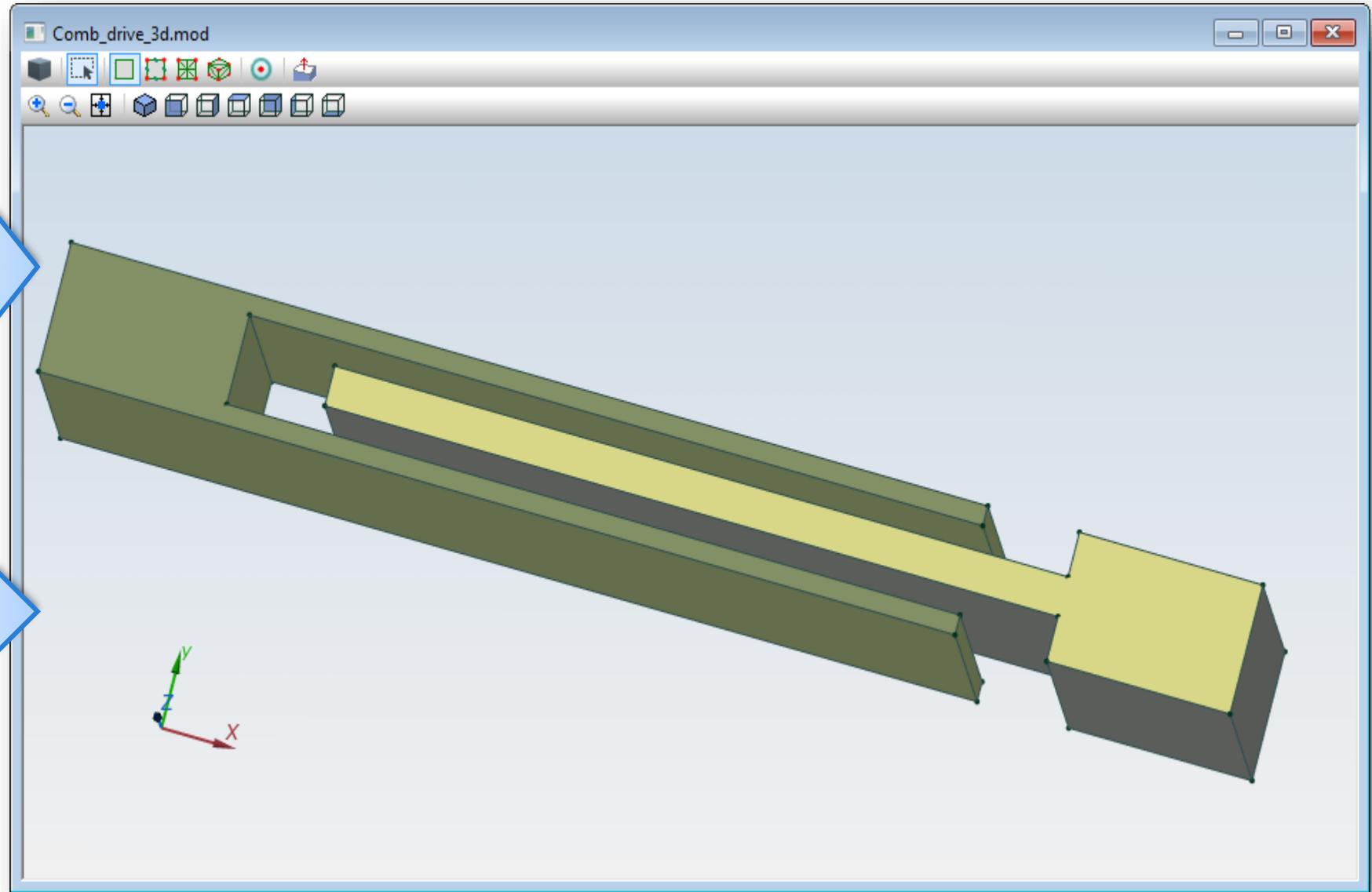
Генератор двумерной сетки конечных элементов

Сетка треугольных конечных элементов строится полностью автоматически.



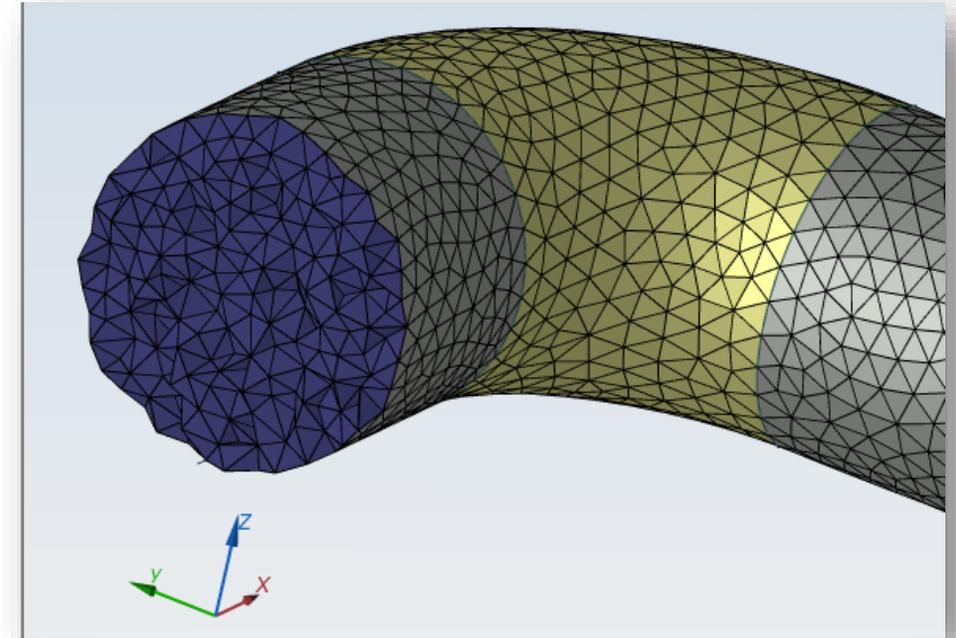
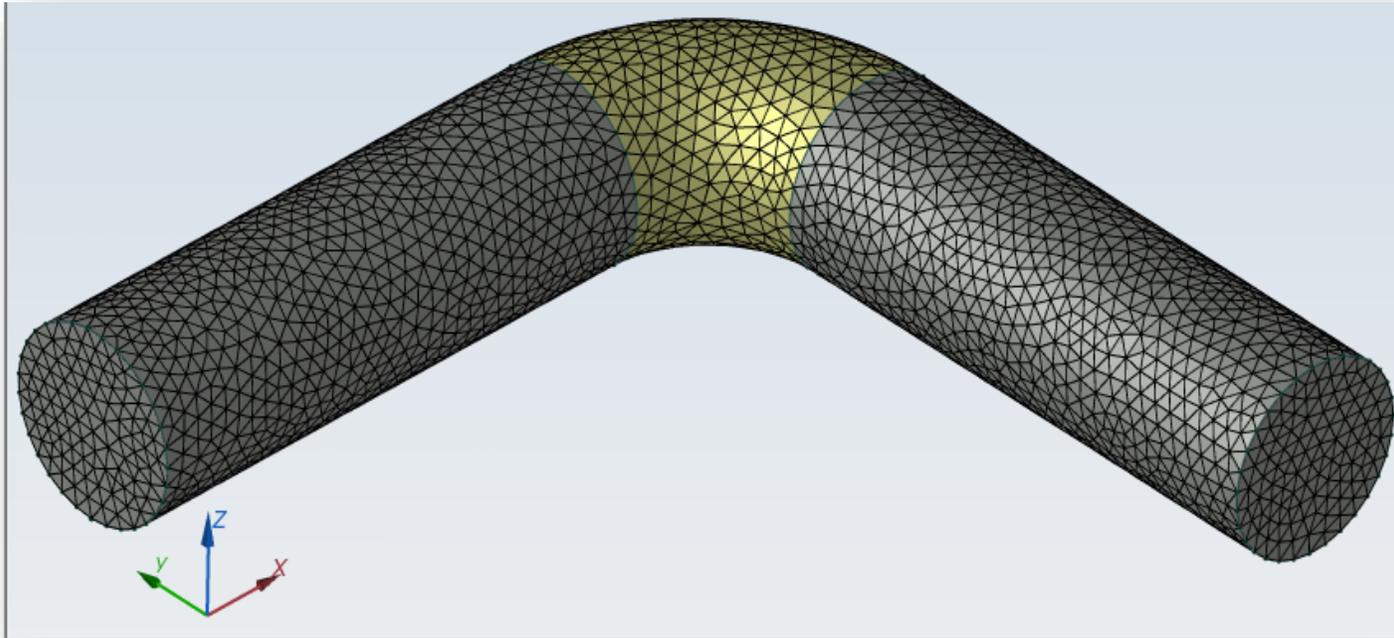
Возможности управления плотностью сетки:

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



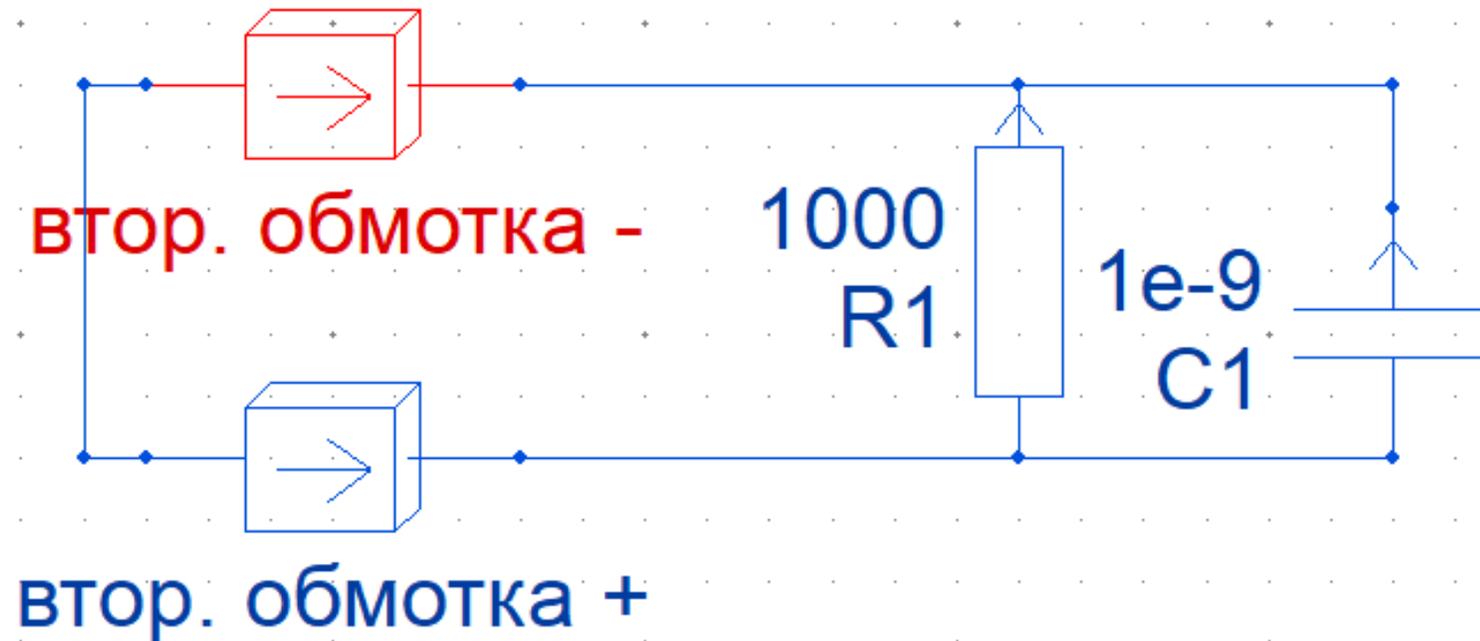
Генератор трехмерной сетки конечных элементов

Сетка из тетраэдров строится полностью автоматически.



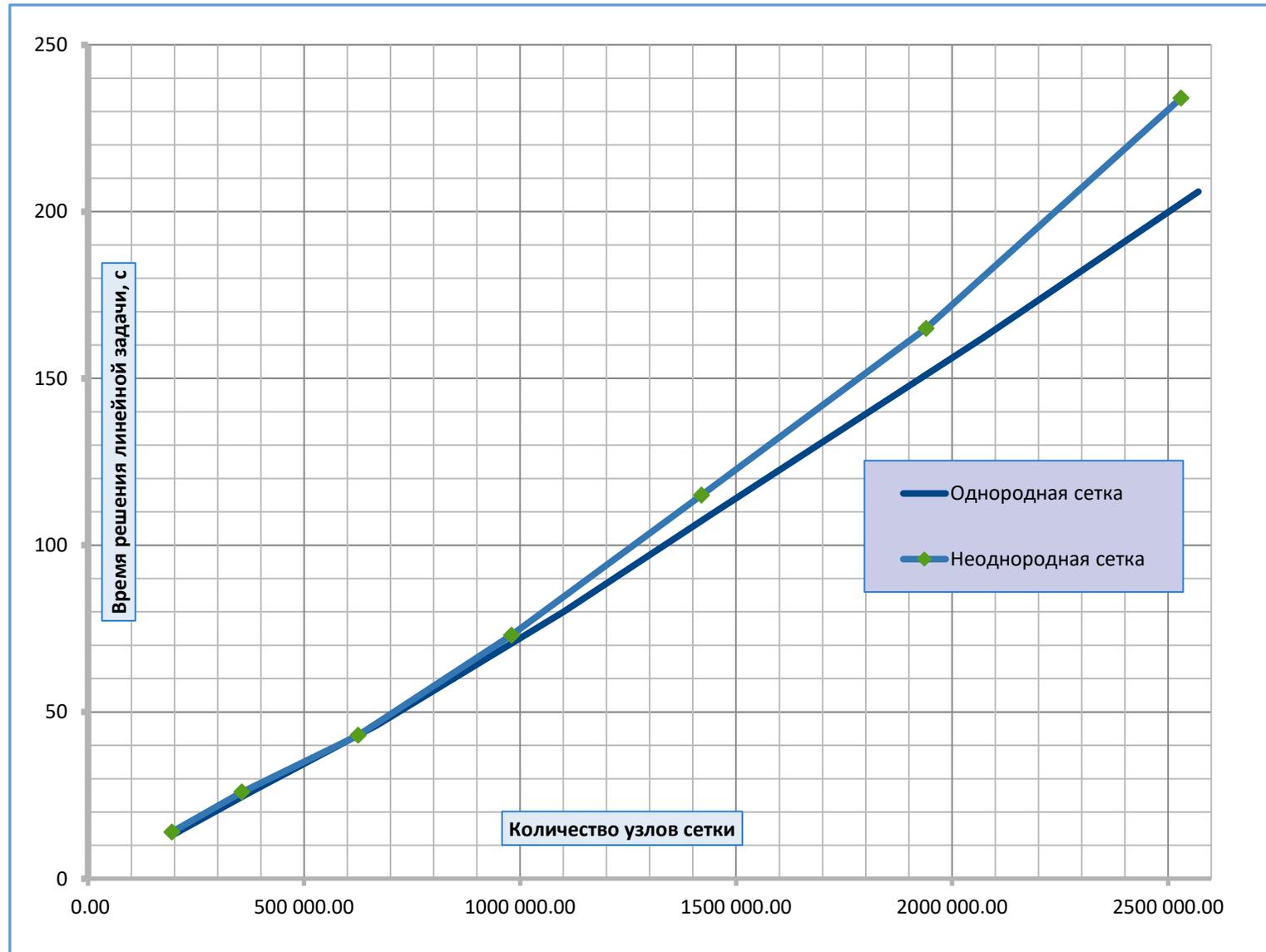
Для управления плотностью сетки можно (но не обязательно) установить желаемый шаг сетки в любых вершинах исходной геометрии

Подключенная электрическая цепь



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

Решатель системы уравнений

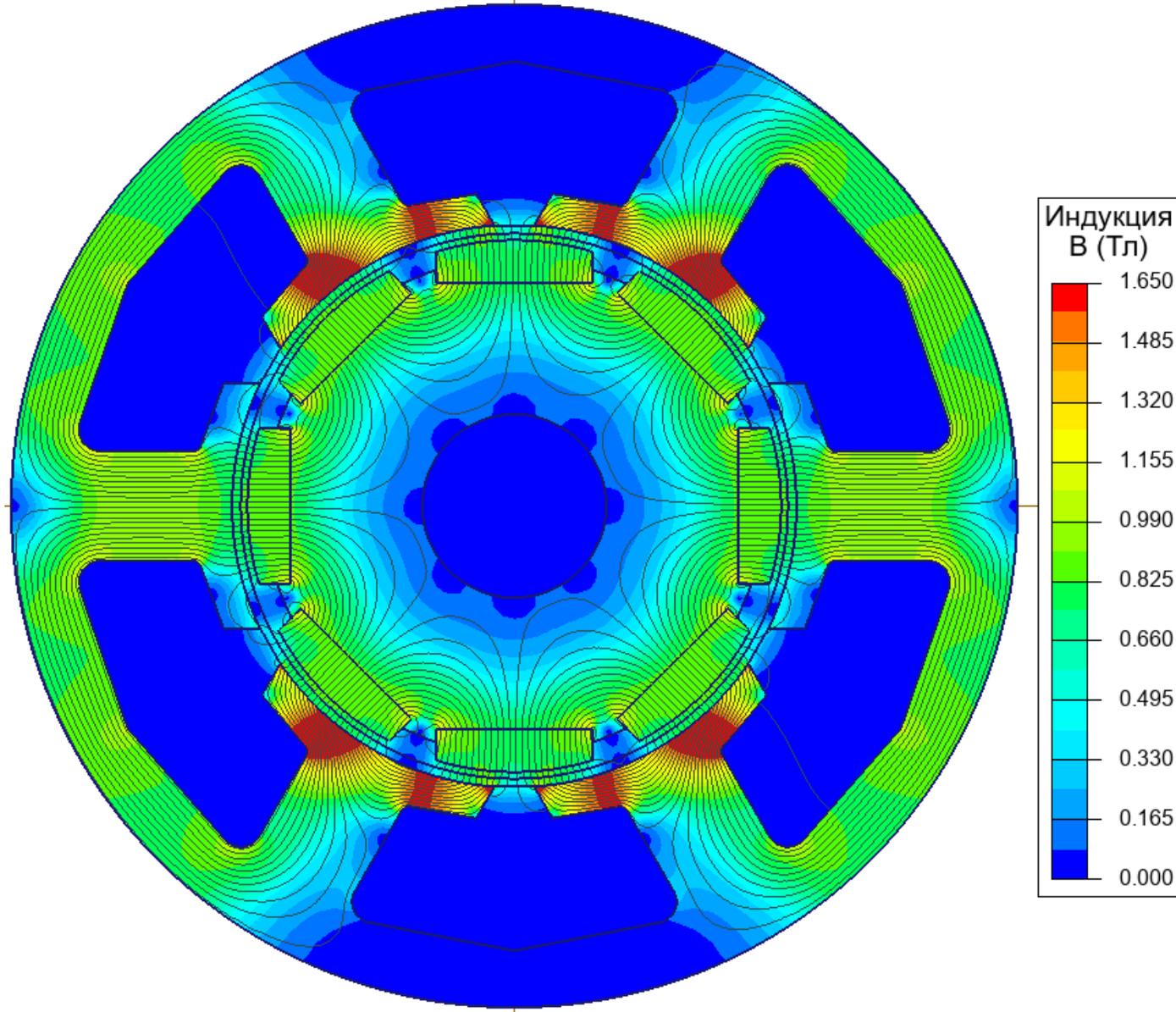


Используется метод сопряженных градиентов с предобуславливанием.

Предобуславливание проводится с использованием геометрической декомпозиции.

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

Постпроцессор – подсистема анализа результатов



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

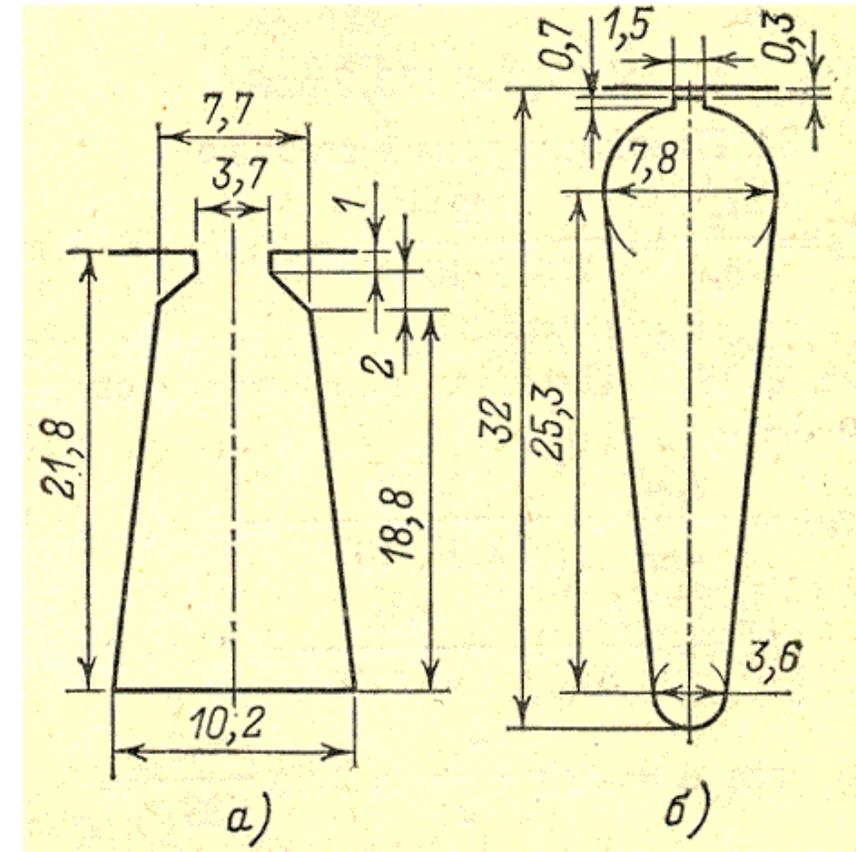
Экспорт решения

Пример-1: Асинхронный двигатель

И. П. Копылов

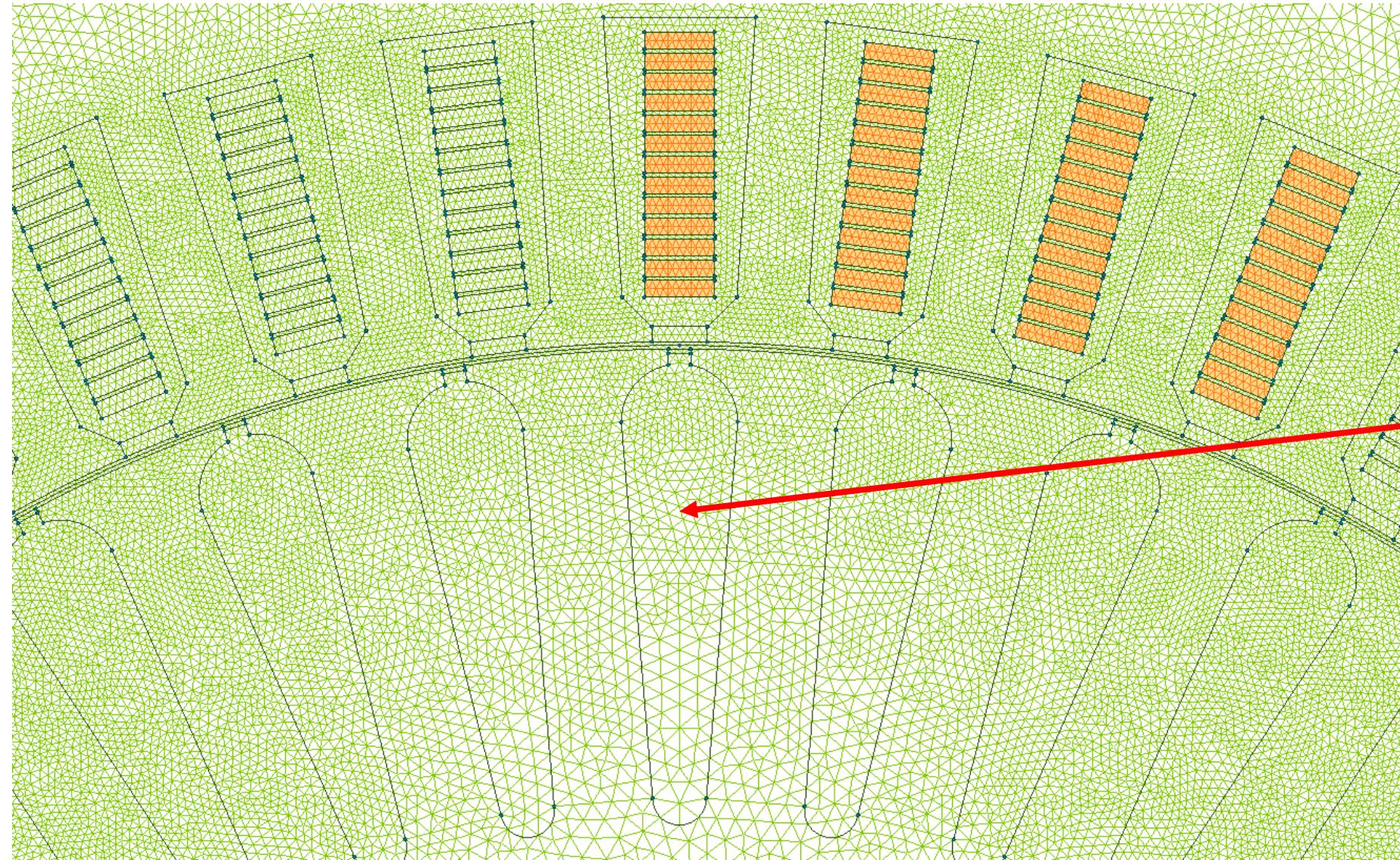
Название	Обозн.	Значение	Ед.
Статор			
Внешний диаметр статора	D	272	мм
Внутренний диам. статора	D_a	185	мм
Внешний диаметр ротора	D_2	184	мм
Внутр диам. ротора	D_j	60	мм
Длина сердечника	L_δ	130	мм
Число пазов статора	Z_1	48	
Число проводников в пазу	u_n	13	
Число параллельных ветвей	a	2	
Обмотка однослойная			
Число пазов на полюс и фазу	q	4	
Диаметр проводника	$d_{эл}$	1.25	мм
Число витков в фазе статора	w_1	112	
Ток фазы статора	I_{1H}	29	А
Плотность тока статора	J_1	5.91	А/мм ²
Ротор			
Число пазов ротора	Z_2	38	
Сечение стержня	q_c	173.2	мм ²

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН



Асинхронный двигатель: особенности моделирования

В пазу статора находится нужное число витков $w_1=13$ нужного сечения



Частота $f = 50$ Гц

Электропроводность стержня ротора обратно пропорциональна скольжению:

$$\gamma_2 = \frac{\gamma_{Al}}{s}$$

Асинхронный двигатель: особенности моделирования

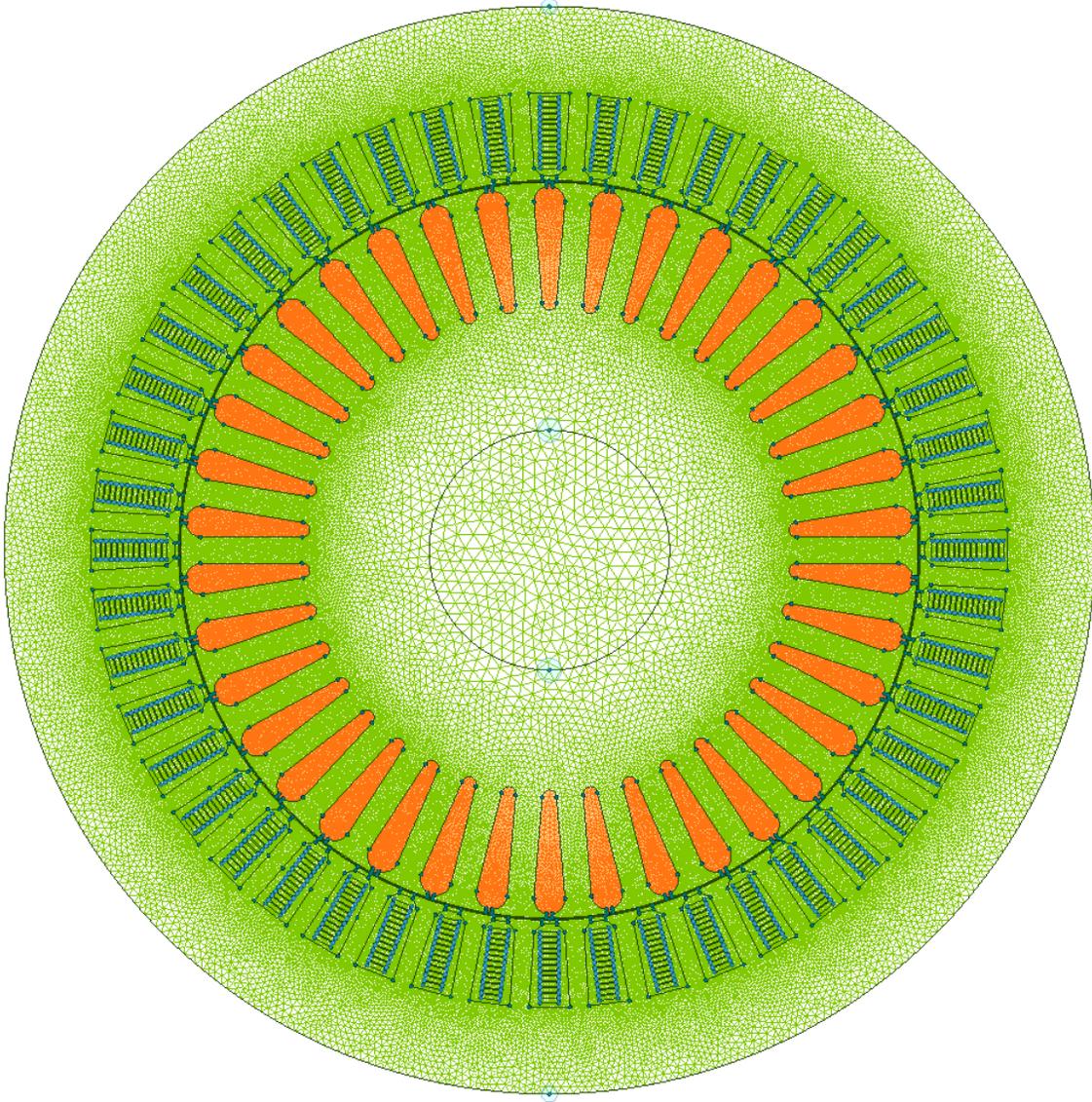
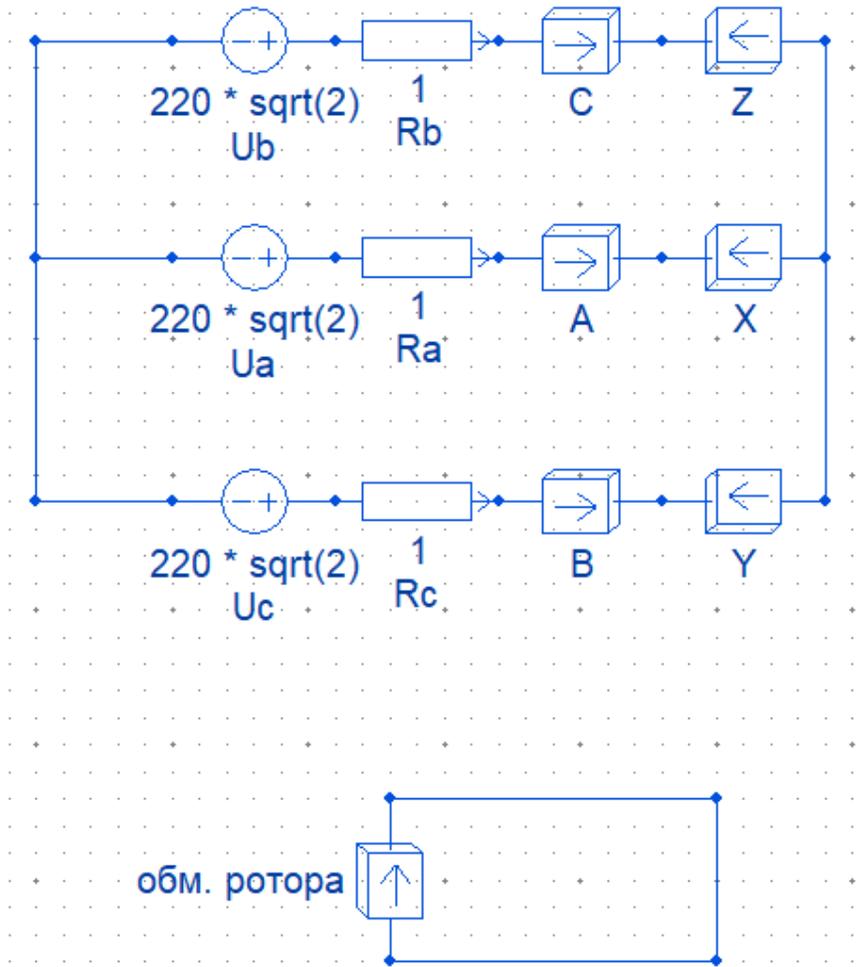
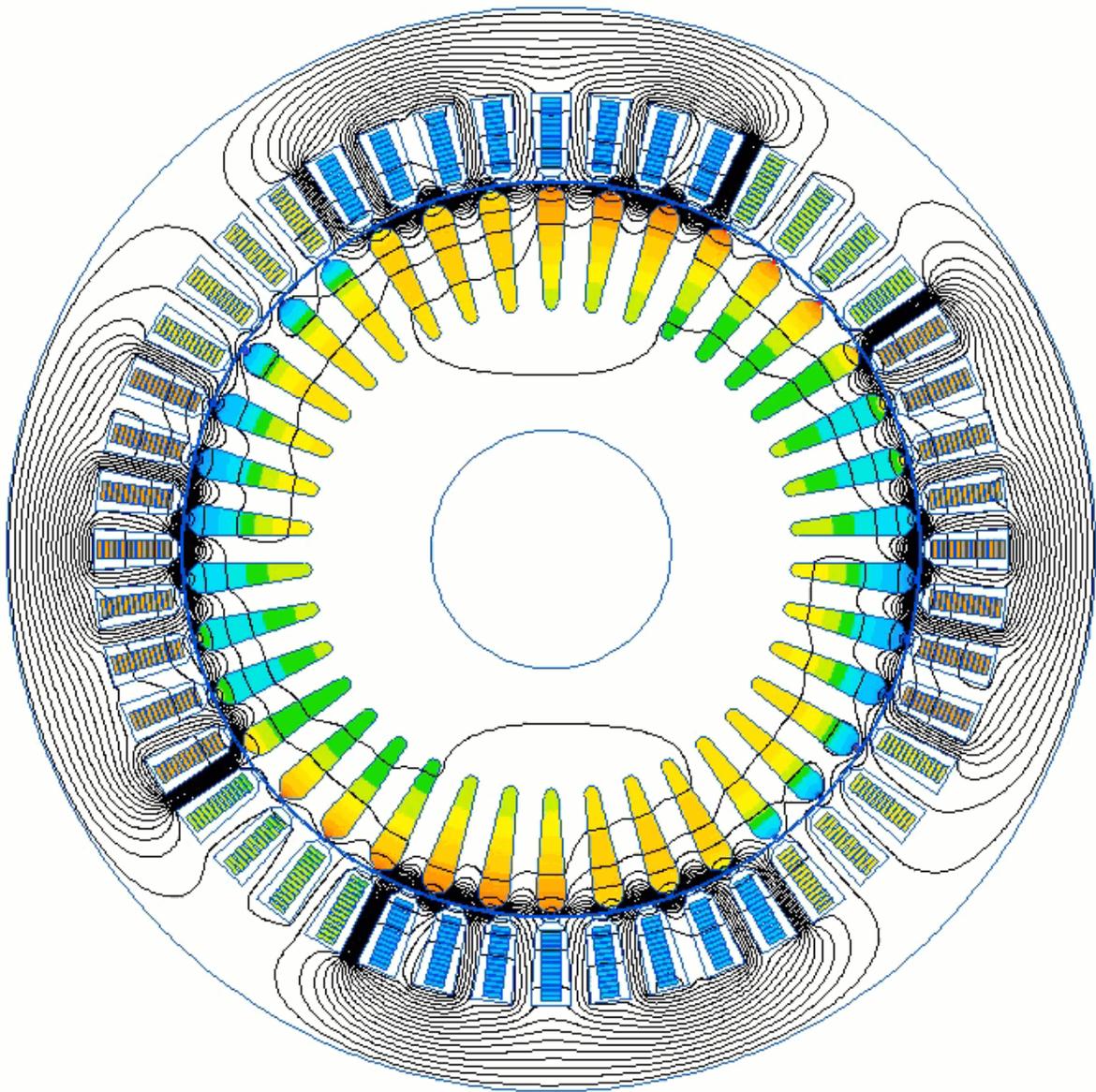


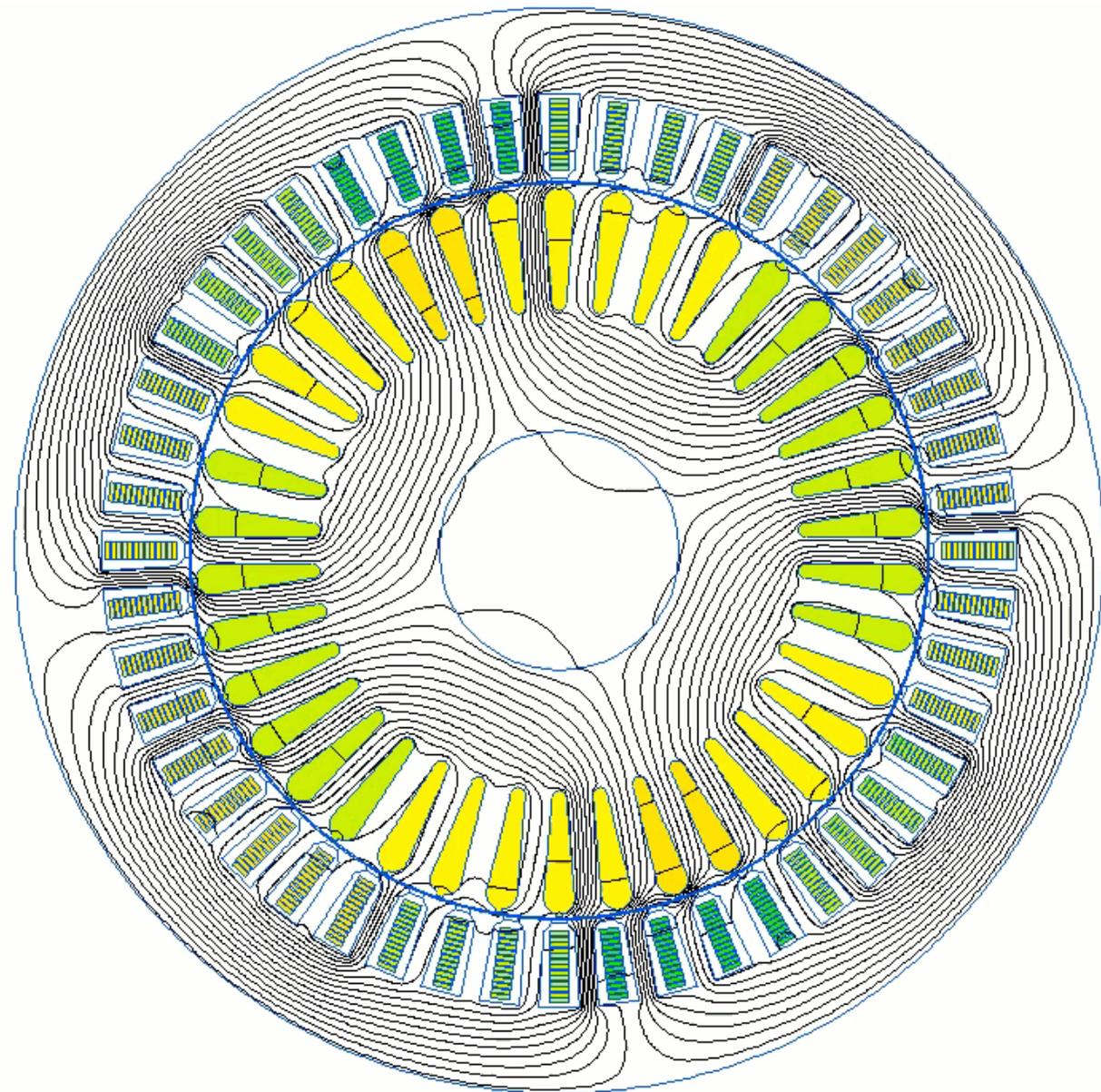
Схема присоединенной электрической цепи



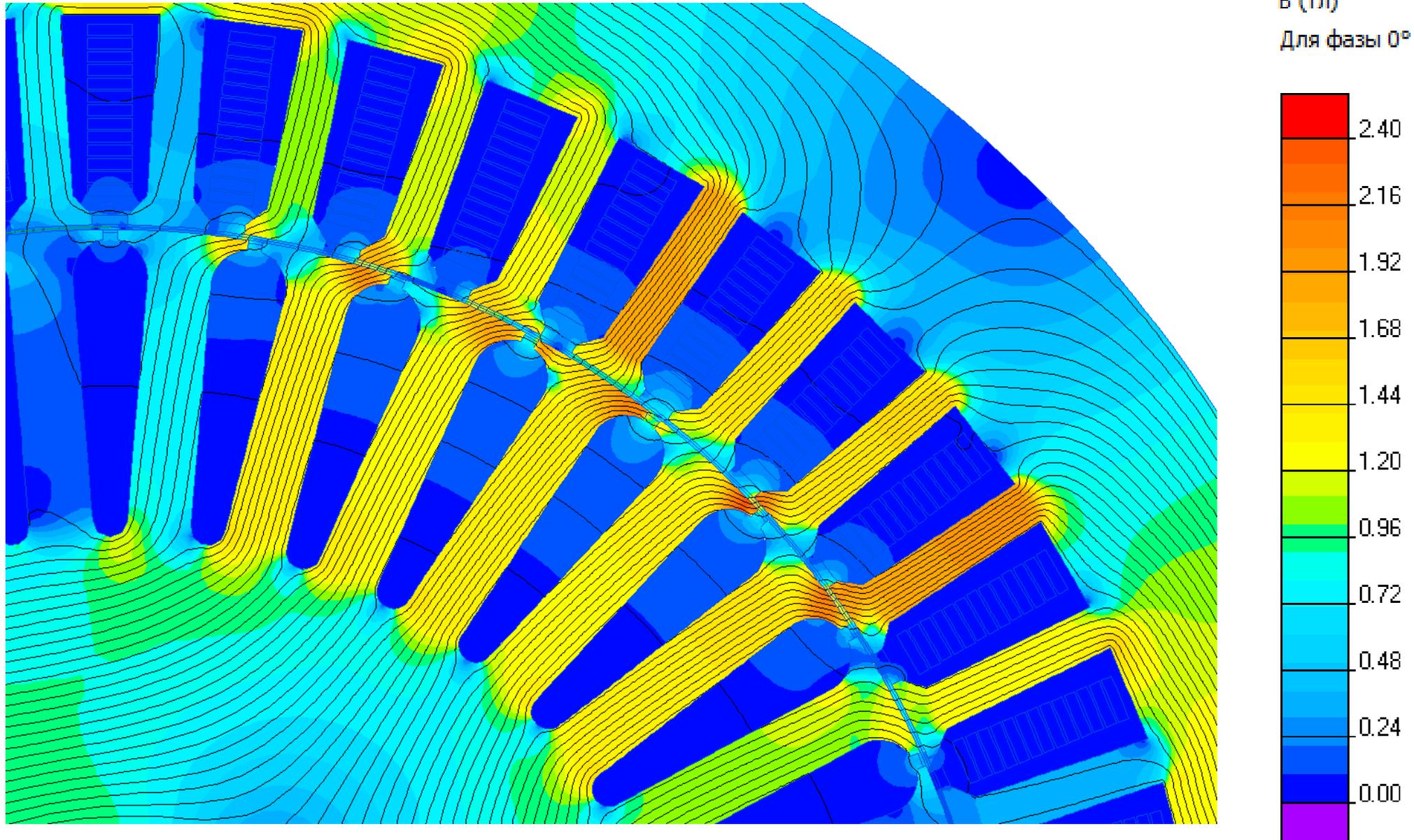
1. Пуск ($s=1$)



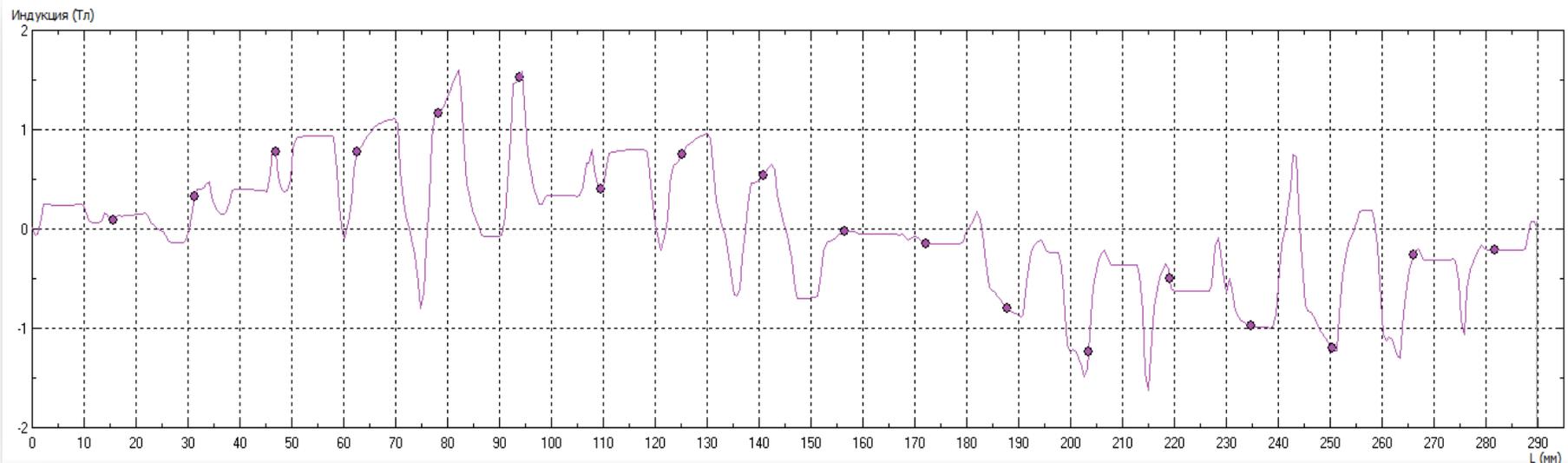
2. Номинальное скольжение $s=0.024$



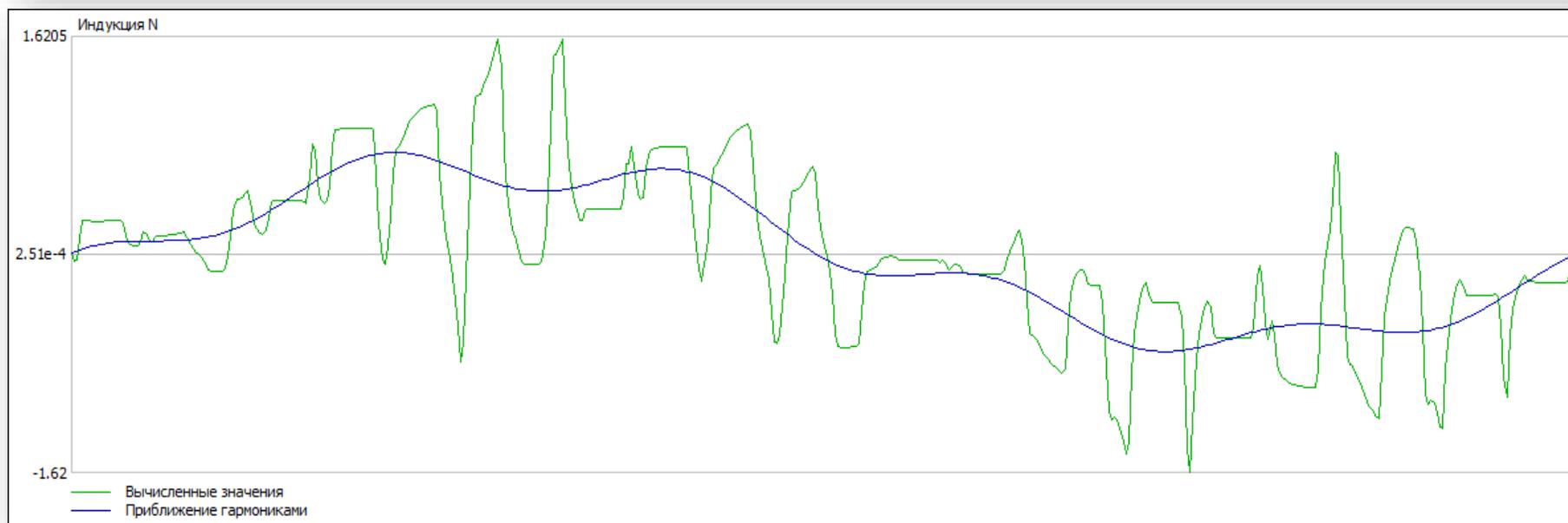
Магнитная индукция в активной зоне машины



Форма и гармонический состав поля в зазоре



Нормальная компонента индукции B_n в середине зазора

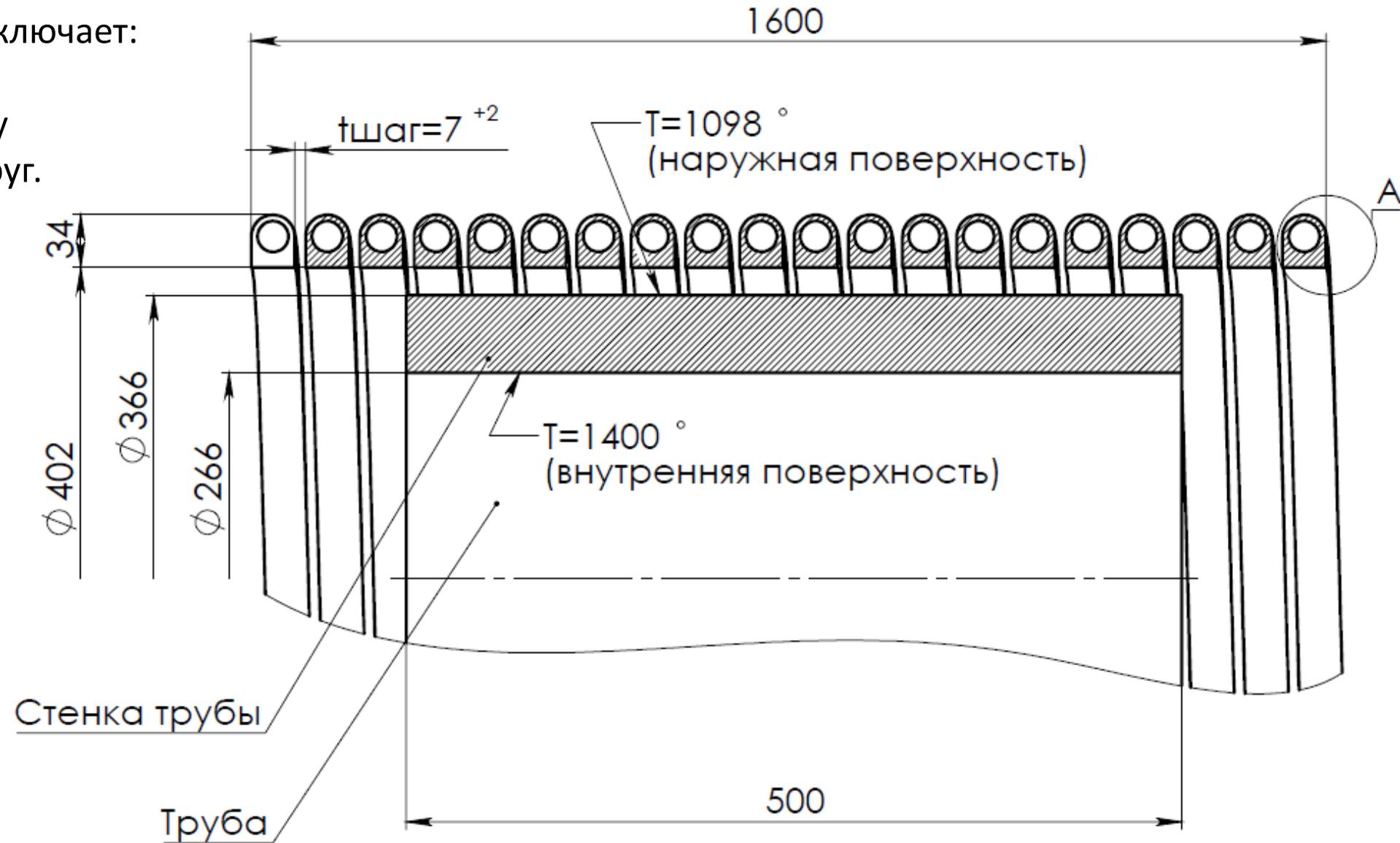


Приближение первыми 5-ю гармониками

Пример-2: Индуктор для ВЧ нагрева заготовок

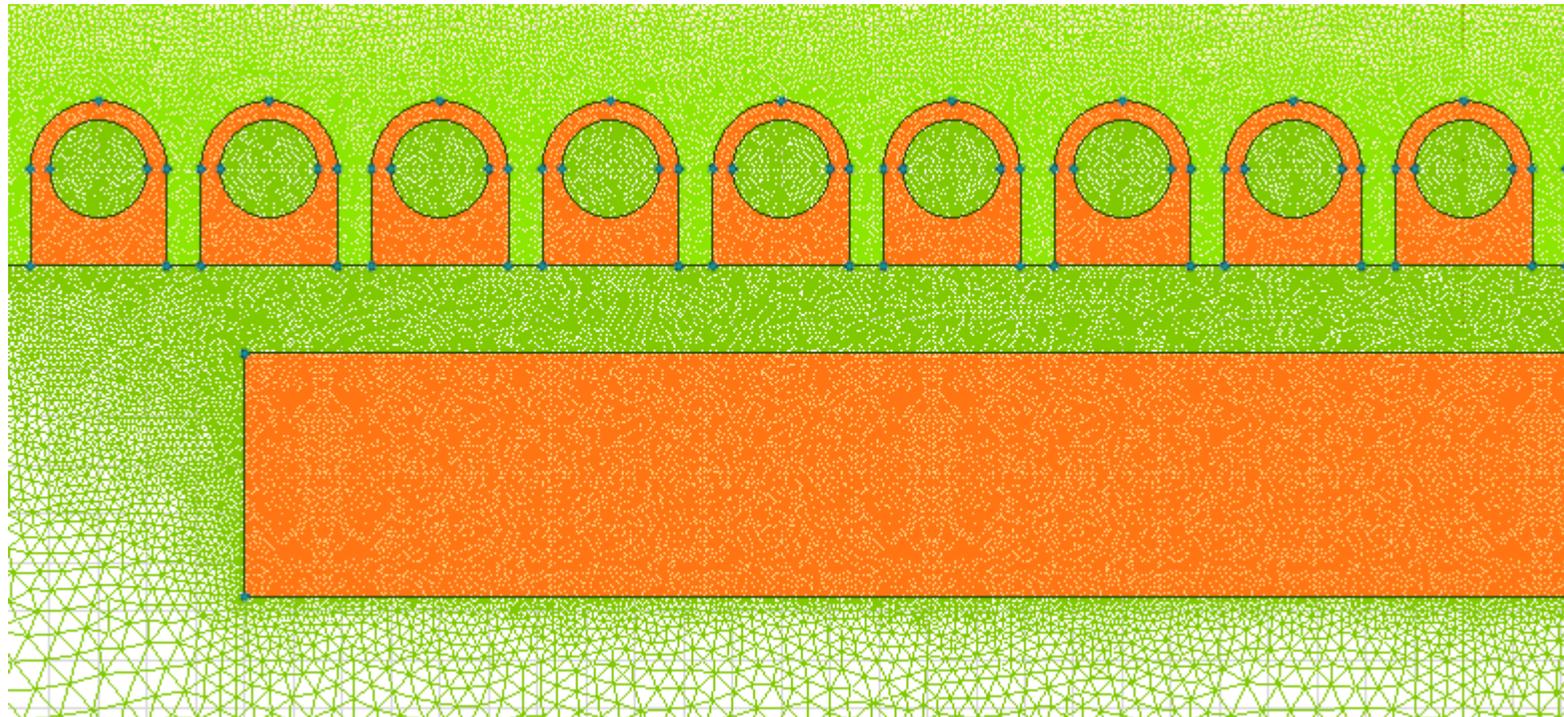
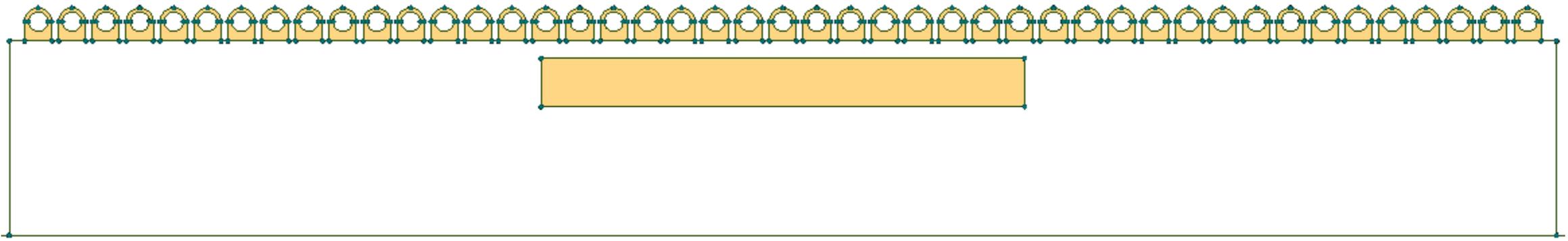
Геометрическая модель включает:

- катушку (45 витков),
- нагреваемую заготовку
- и область воздуха вокруг.



Пример-2: Индуктор для ВЧ нагрева заготовок

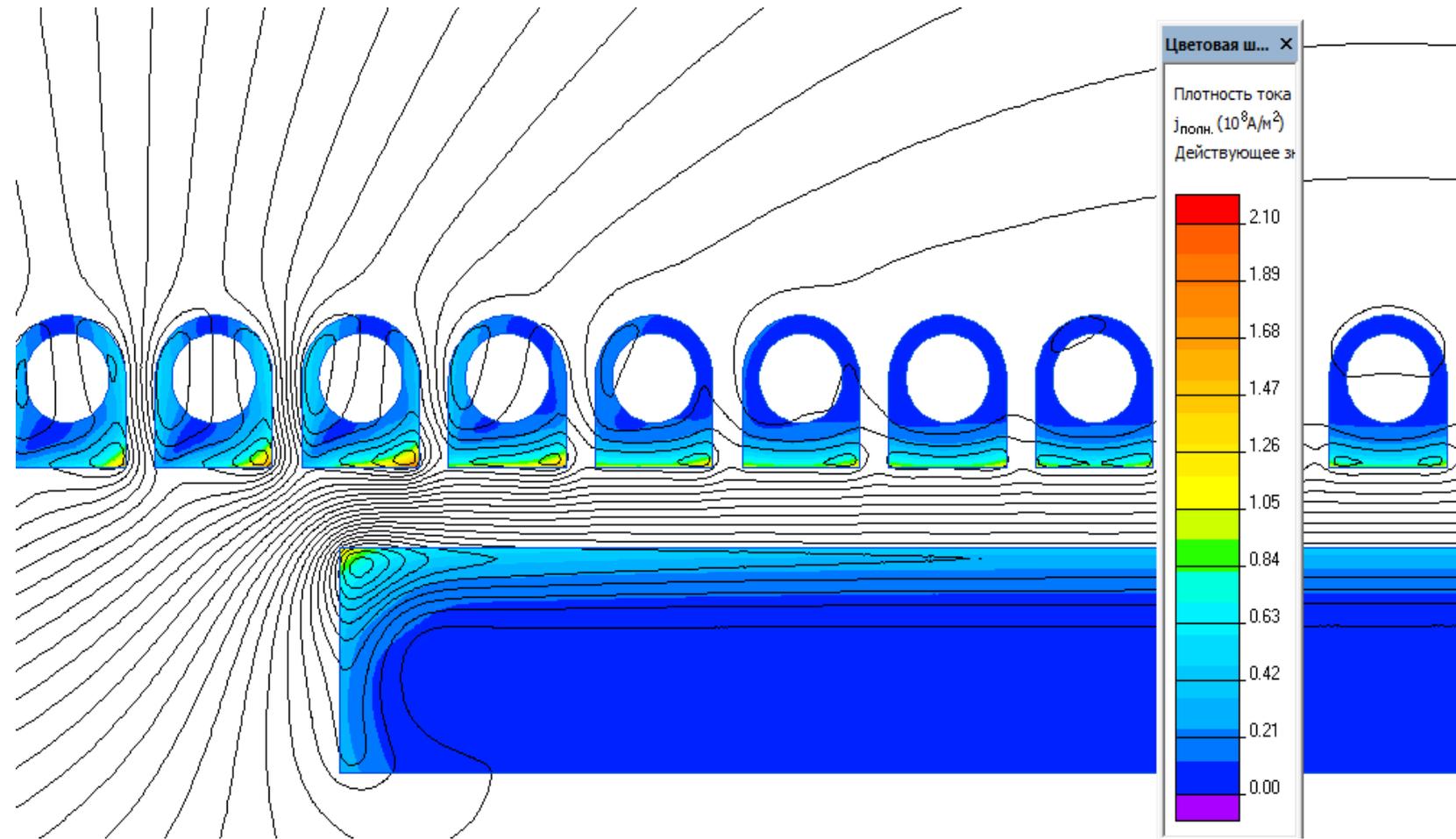
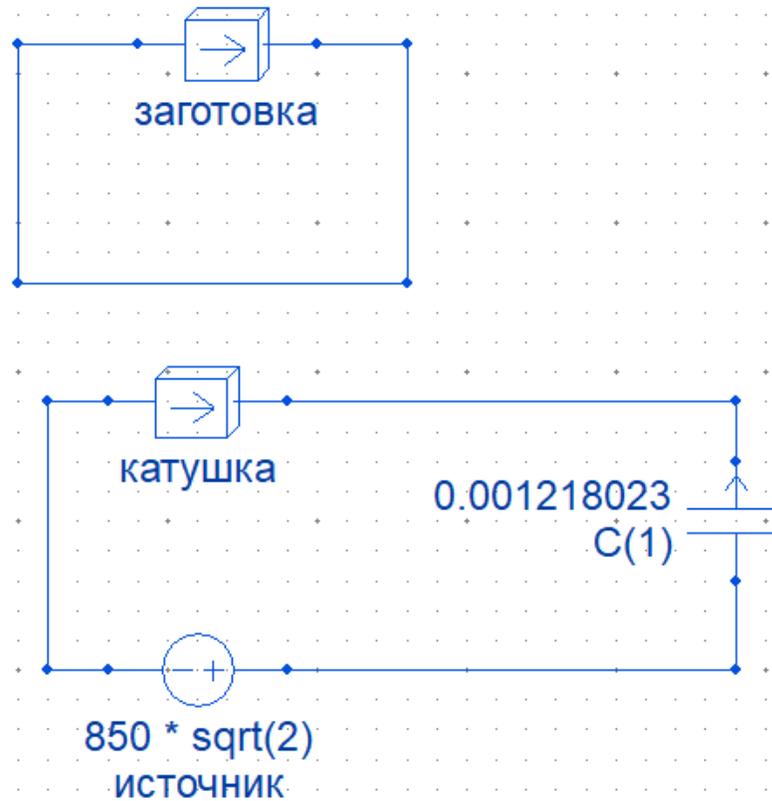
Геометрическая модель включает катушку (45 витков), нагреваемую заготовку и область воздуха вокруг.



Индуктор для нагрева заготовок: магнитное поле

Решение серии задач необходимо для подбора напряжения и частоты питания.

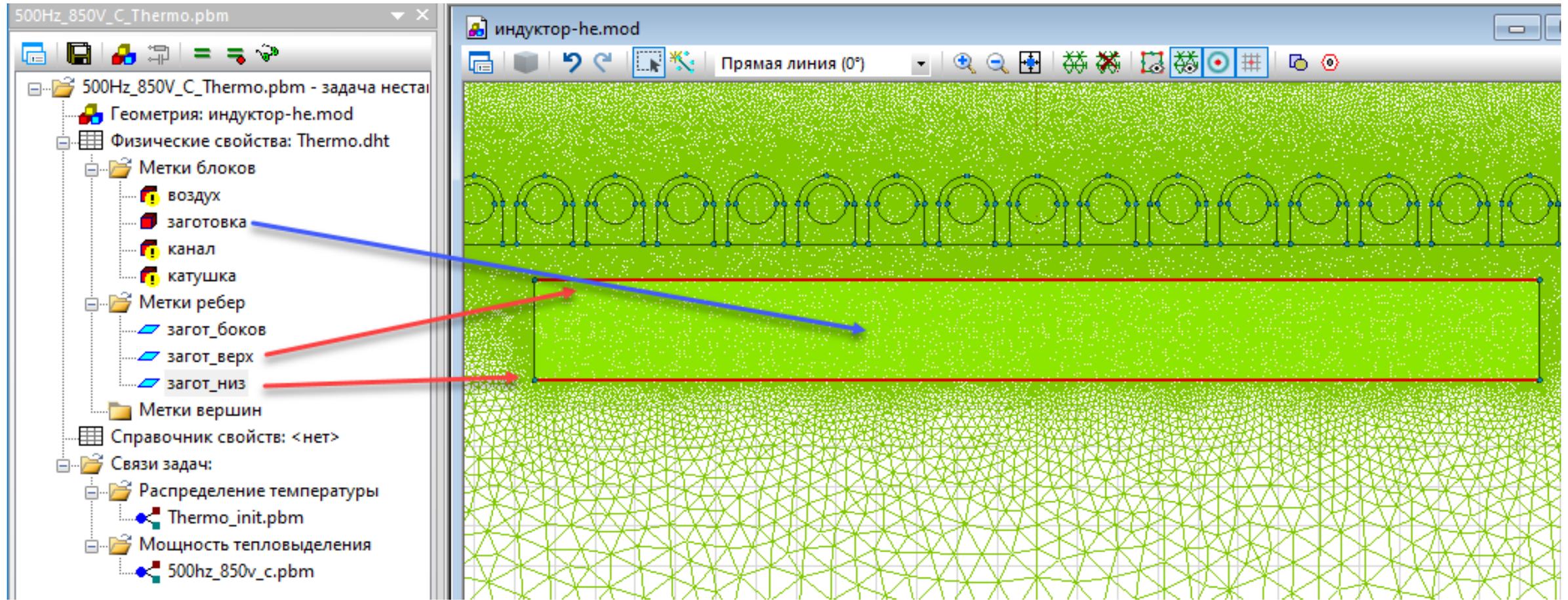
Прикладываем напряжение заданной частоты, находим ток, импеданс, активное и реактивное сопротивление



Индуктор для нагрева заготовок: температурное поле

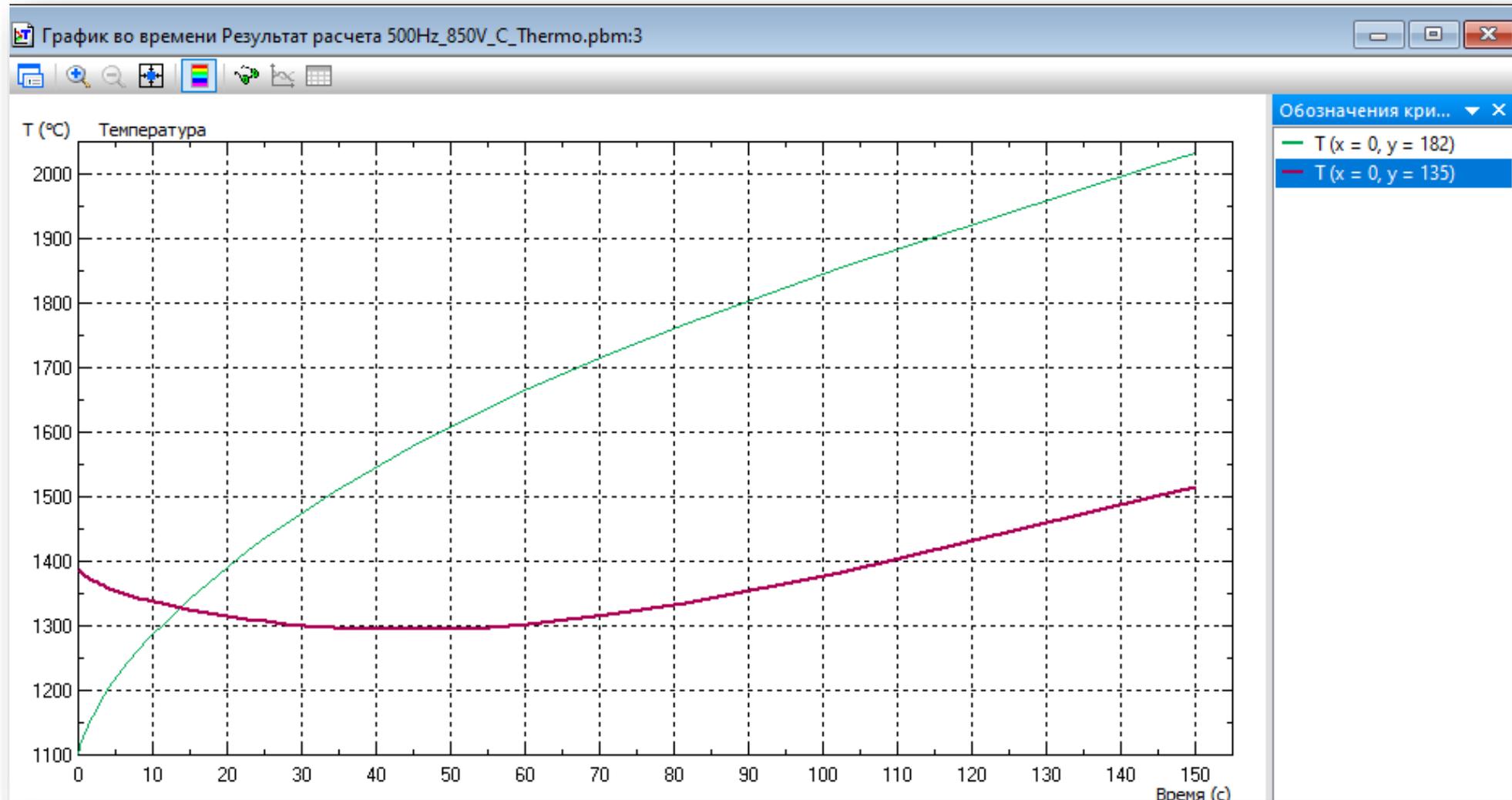
В температурную задачу включена только заготовка.

Выбраны граничные условия конвекции, параметры которых – температура омывающего воздуха и коэффициент теплоотдачи – нуждаются в уточнении



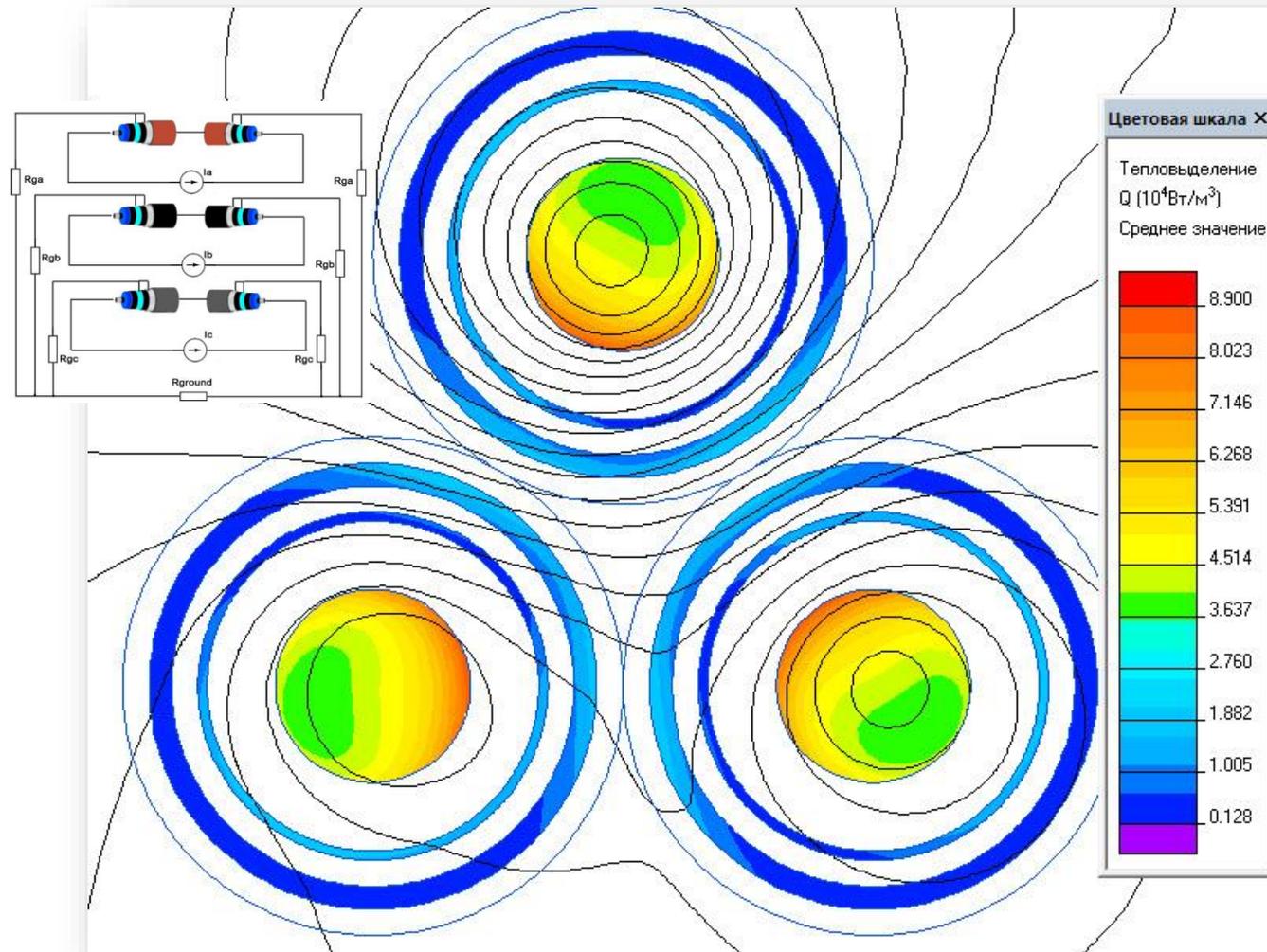
Индуктор для нагрева заготовок: температурное поле

Зависимость температуры от времени в середине заготовка вблизи наружной (зеленая линия) и внутренней (красная линия) поверхностей

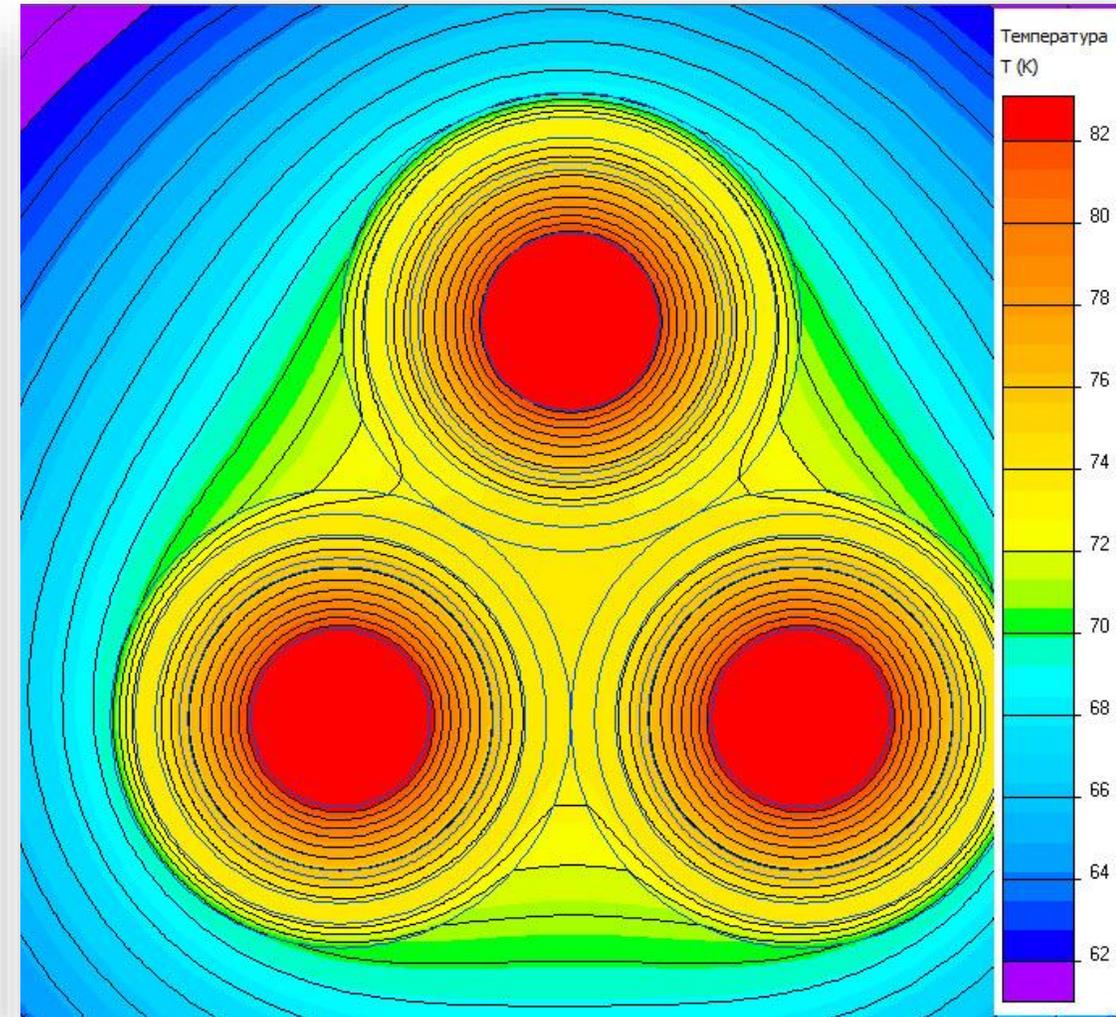


Пример-3: Максимальный ток кабельной линии

Электромагнитная модель
уточнение потерь на переменном токе



Тепловая модель
расчет поля температуры с учетом условий прокладки



Пример-4: Сварочный трансформатор – уточнение параметров

Трансформатор для морской машины контактной сварки газопроводов высокого давления.
Завод ПсковЭлектросвар

Особенности:

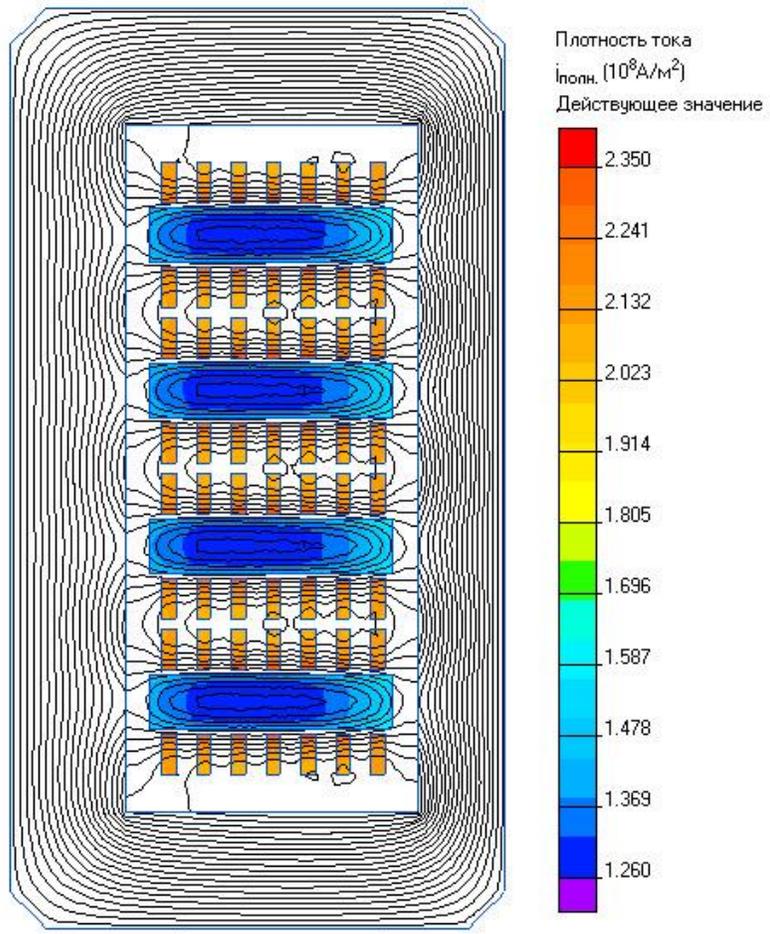
1. Рабочий режим близок к КЗ;
2. Необходимо низкая индуктивность рассеяния;
3. Повторно-кратковременная нагрузка;
4. Ограниченный габарит;



Пример-4: Сварочный трансформатор

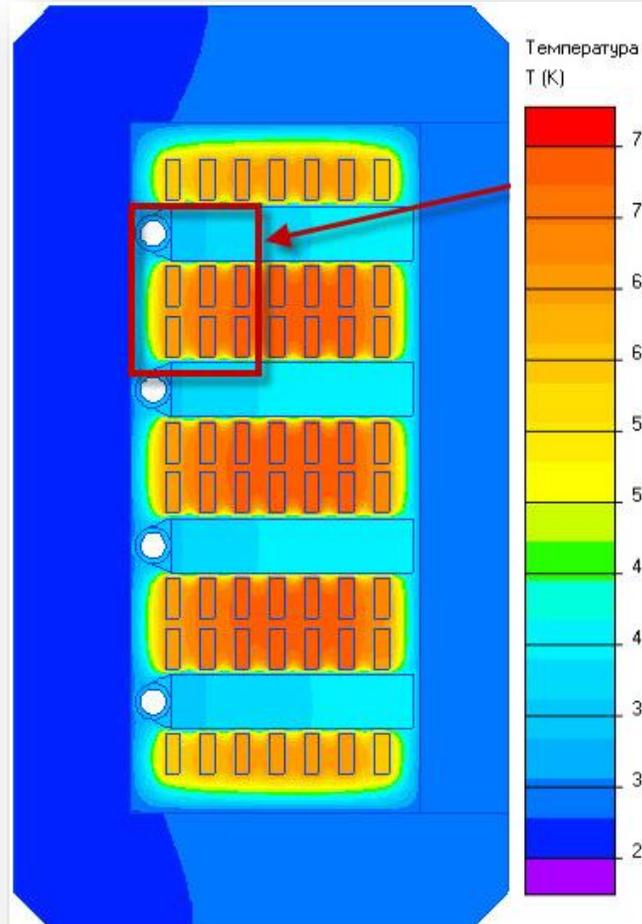
1. Электромагнитный анализ

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



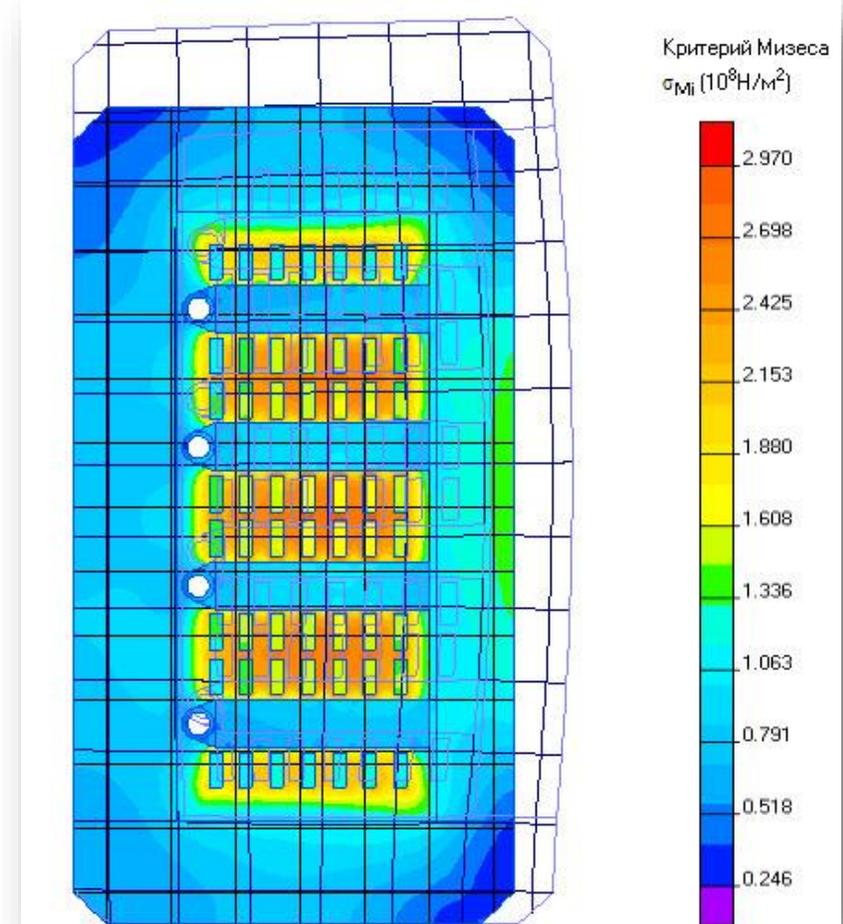
2. Температурный анализ

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



3. Прочностной анализ

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = -f_x \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = -f_y \end{cases}$$



Спасибо за внимание!

- Бесплатную Студенческую версию ELCUT для просмотра примеров и первого знакомства можно загрузить здесь: elcut.ru/free_soft_r.htm
- Связаться с докладчиком: simon@elcut.ru
- Запросить ознакомительную лицензию на 1 месяц: elcut.ru/eval
- Калькулятор цены и форма заказа: elcut.ru/order/order_r.htm
- ELCUT включен в реестр российского программного обеспечения

Искренне ваш

