

ELCUT

Новый подход к
моделированию полей

Квазистатический анализ электромагнитного поля в программе ELCUT для задач электроники

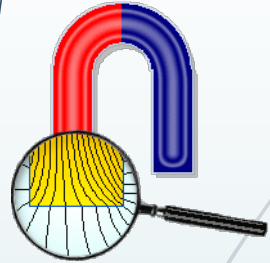
1

Семен Давидович Дубицкий
директор ООО «Тор», Санкт-Петербург

www.elcut.ru

simon@tor.ru

ELCUT инженерный инструмент моделирования электромагнитных и температурных полей



Anno 1988

Истоки

Электросила, Политехнический институт

- Компания основана в 1988 г.
Первая версия продукта вышла 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, гармонический анализ, вычисление матрицы емкостей

Пользователи ELCUT

3

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)
- ТРИНИТИ (Троицк)

Электроэнергетика:

- 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

4

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, прочность

Установившаяся температура

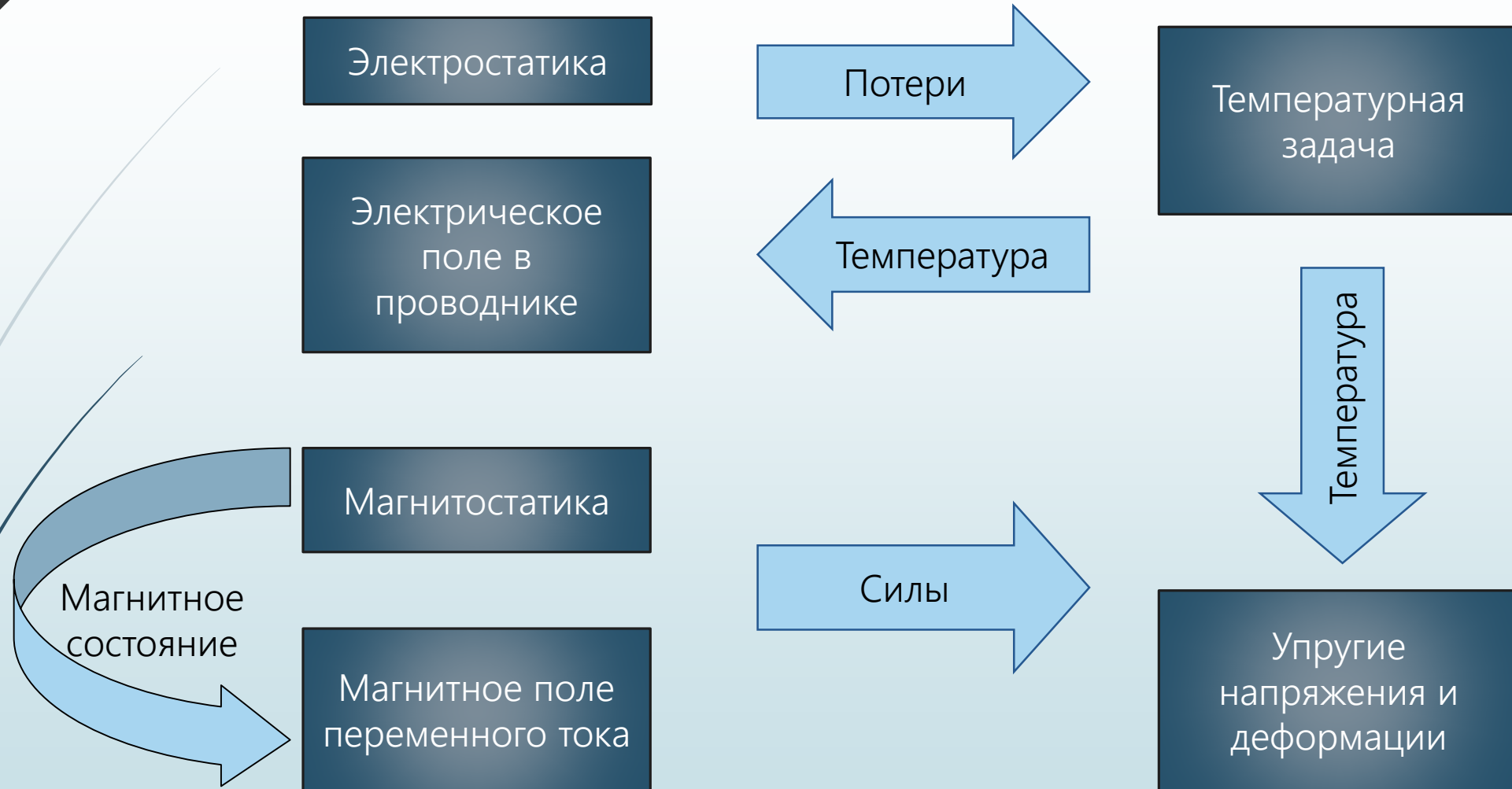
$$T=f(t)$$

Упругость

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

Мультифизические задачи

5



Функциональные подсистемы ELCUT

6

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

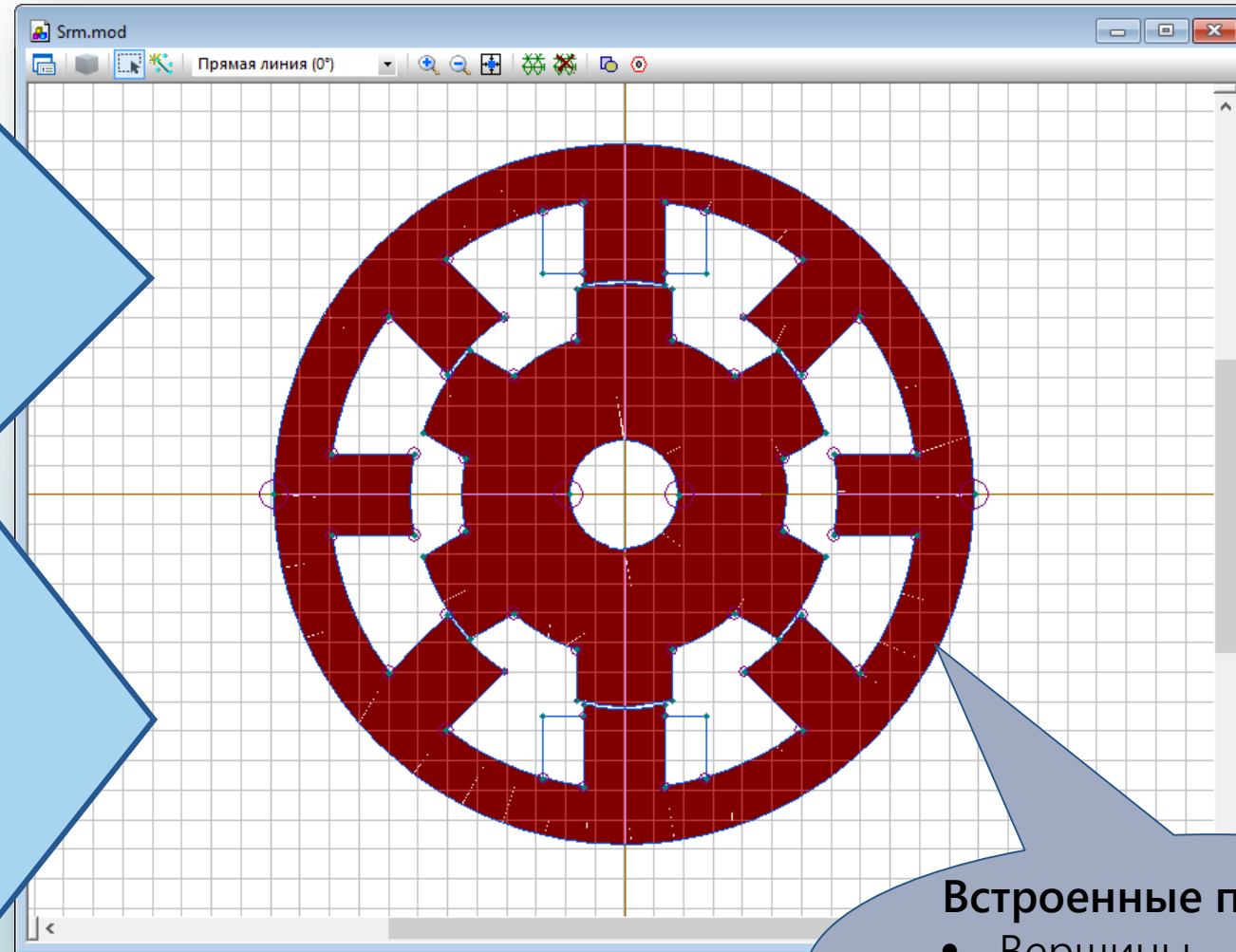
7

Импорт:

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

Вставка фигур:

- Прямоугольник
- Круг
- Эллипс



Встроенные примитивы:

- Вершины
- Отрезки
- Дуги окружности

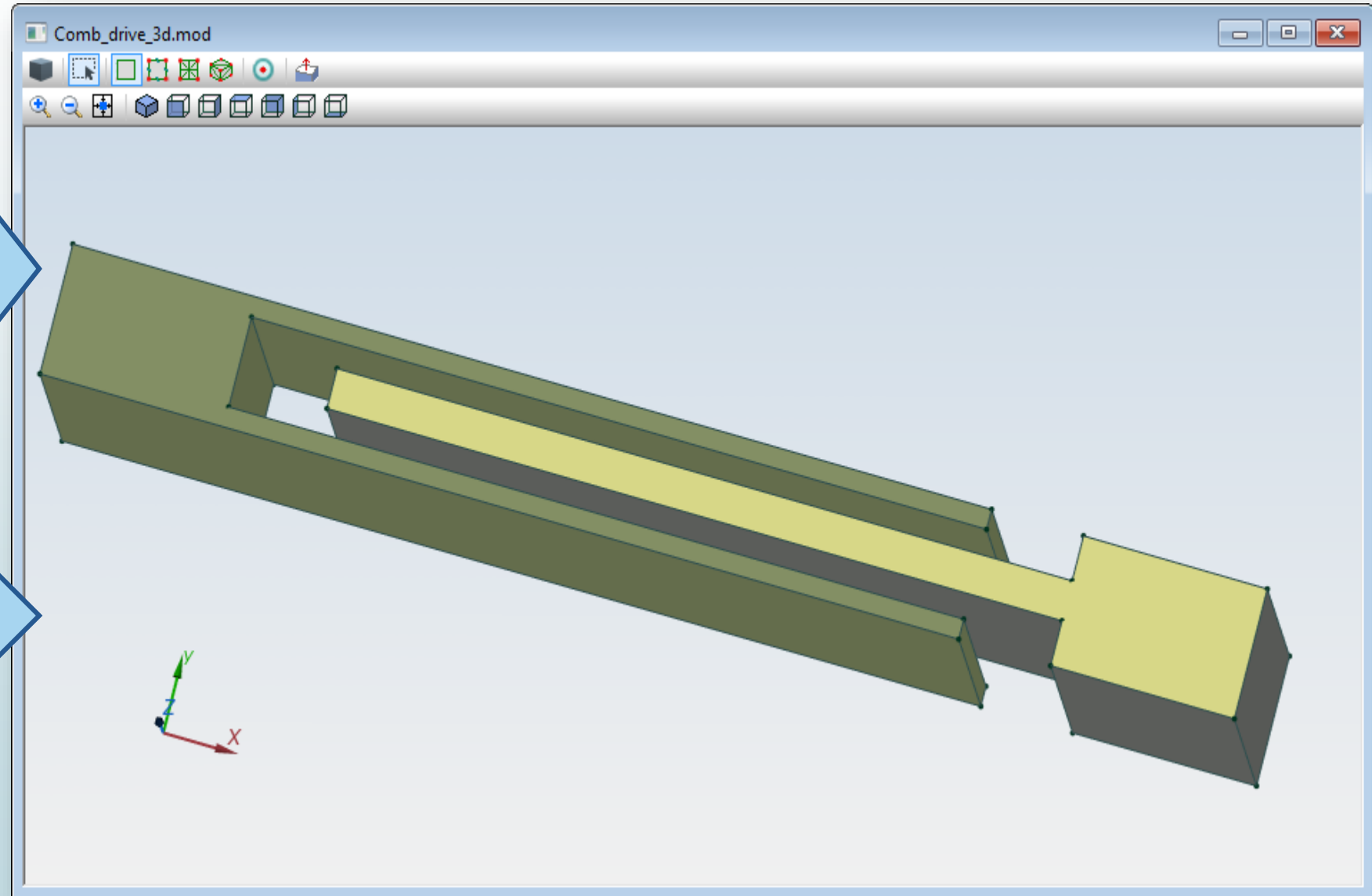
Редактор геометрии 3D

8

Экструзия
плоских фигур

Либо

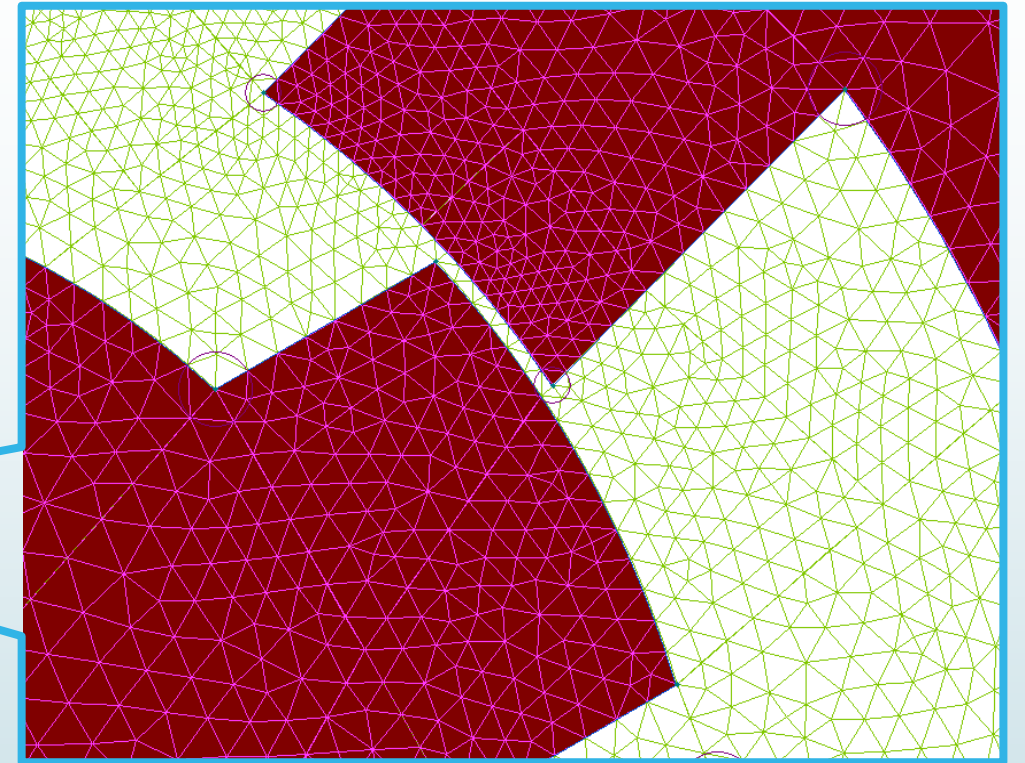
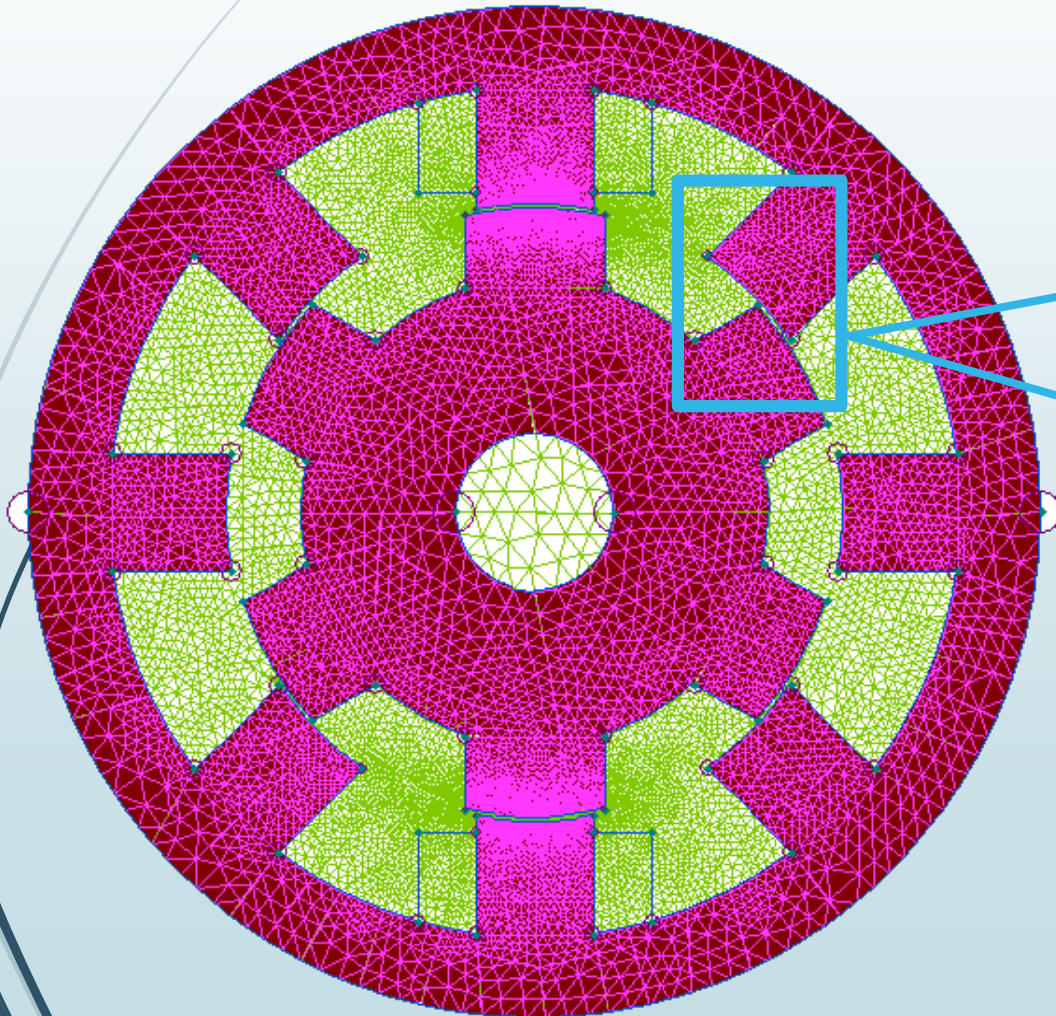
Импорт из CAD



Генератор двумерной сетки конечных элементов

9

Сетка треугольных конечных элементов строится полностью автоматически.



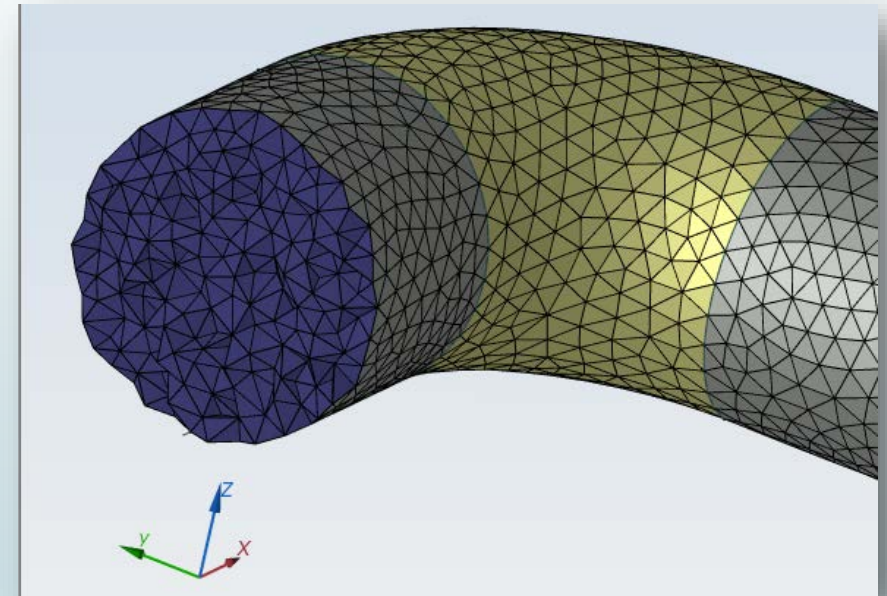
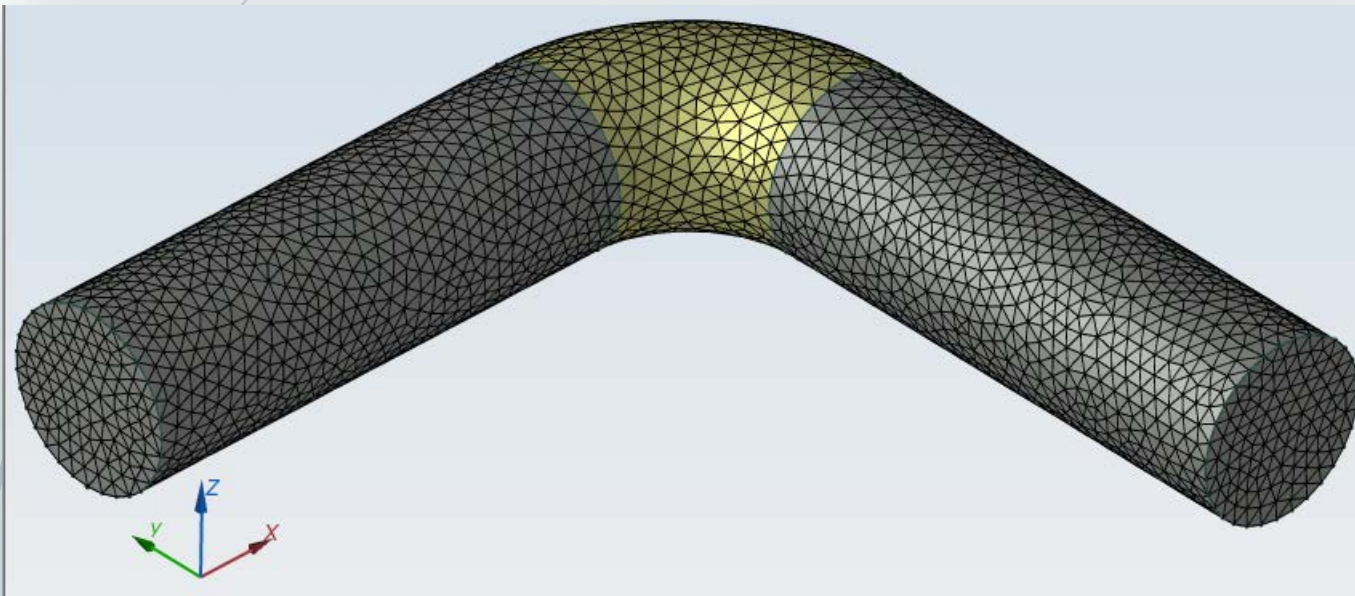
Возможности управления плотностью сетки:

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

Генератор трехмерной сетки конечных элементов

10

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

11

Магнитные свойства

Электрические свойства

Источники поля

удельные магнитные потери

Общие Потери в стали

Магнитная проницаемость

$\mu_x =$ Относительная Абсолютная

$\mu_y =$ Абсолютная Анизотропный

Нелинейный материал Анизотропный

Координаты

Декартовы Полярные

Электропроводность

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

Температура (К)

Источники поля

$j_0 =$ (А/м²) **f**

$\varphi =$ (град) **f**

Вид источника:

Плотность тока Полный ток

Проводники соединены:

Параллельно Последовательно

Коэффициенты для потерь в ферромагнетике (не обязательно):

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

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

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

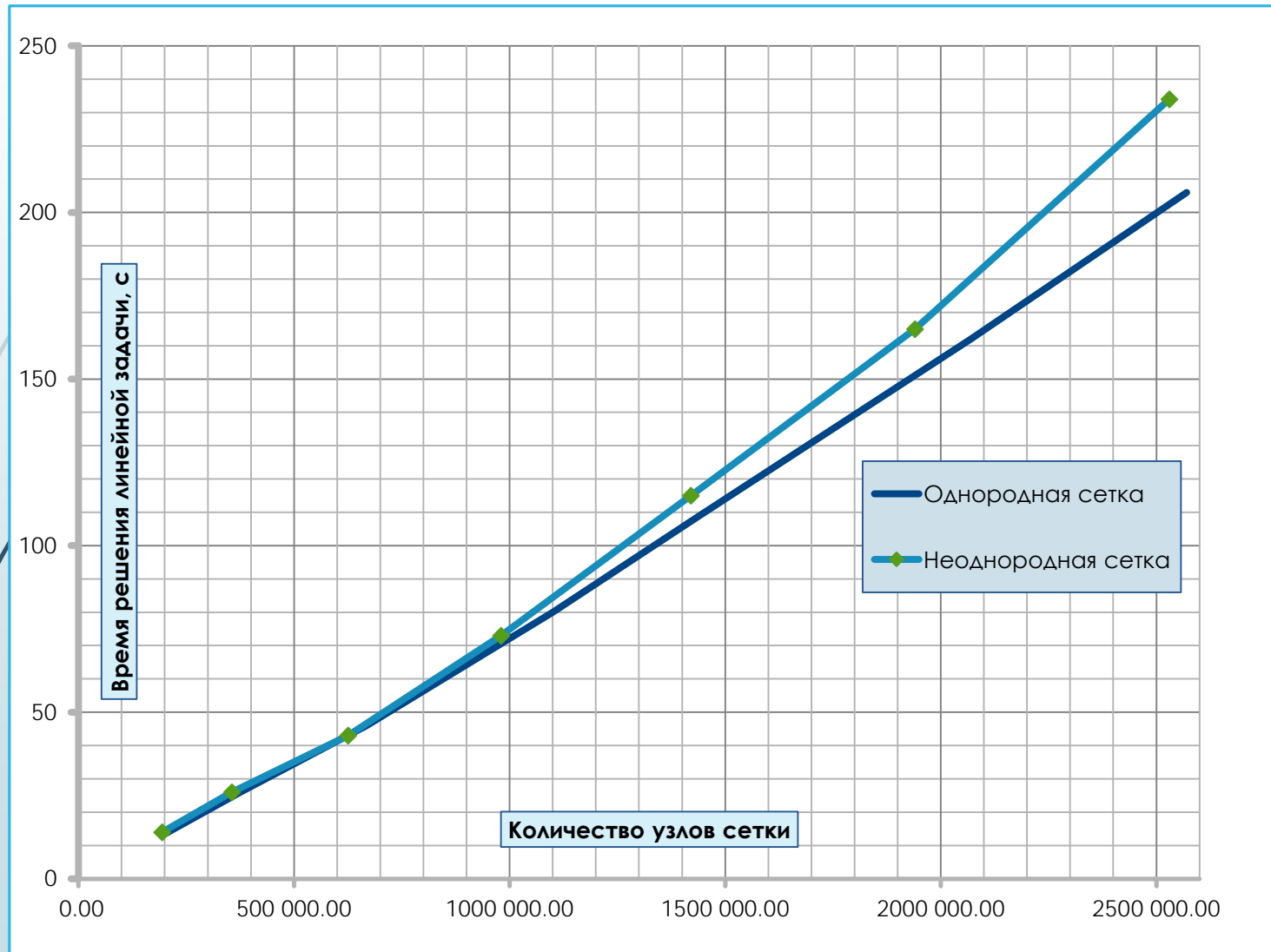
$K_{ex} =$ Добавочные потери: $P_{ex} = K_{ex} \cdot (B \cdot f)^{3/2}$

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

Свойства материала для расчета магнитного поля с вихревыми токами

Решатель системы уравнений

12



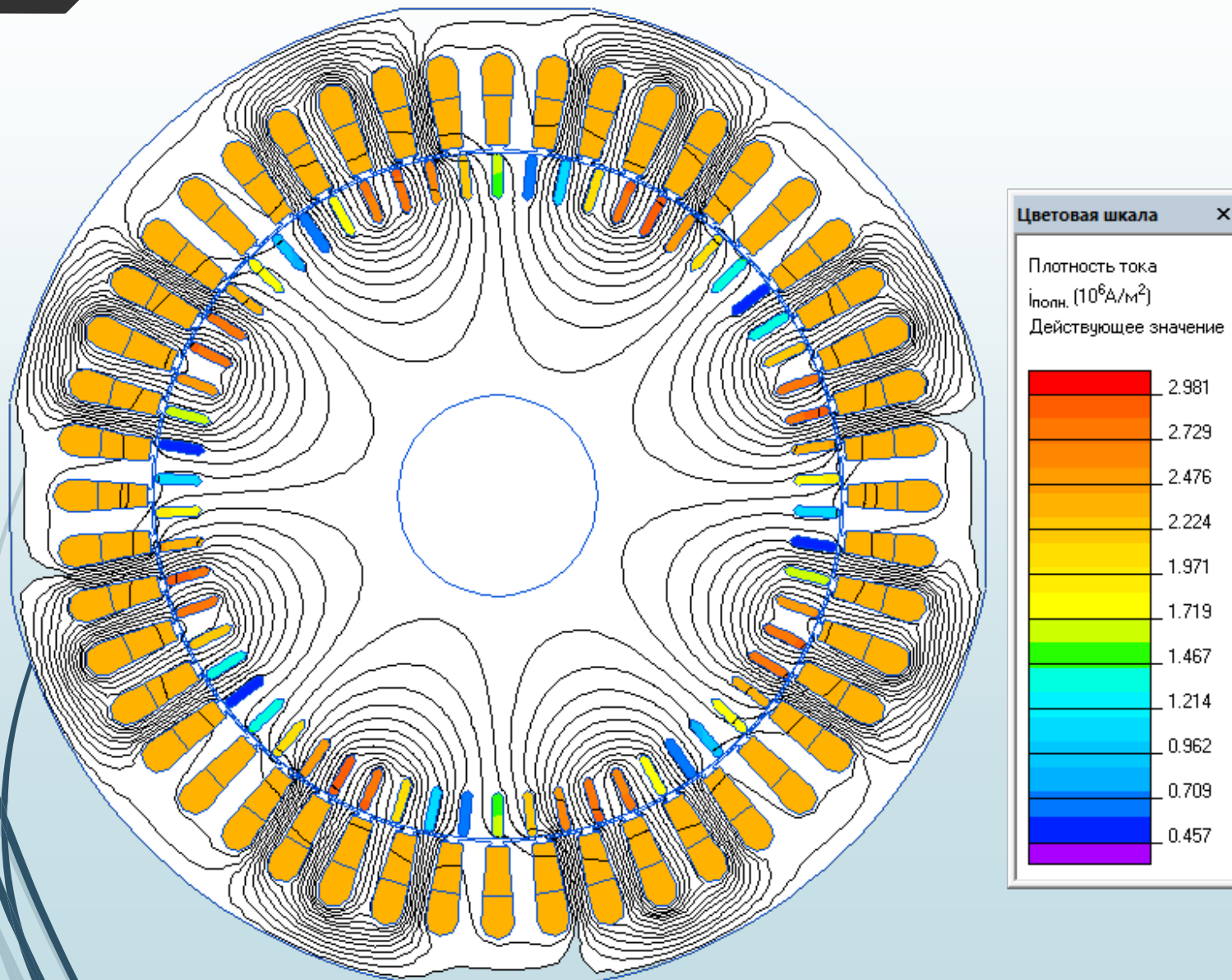
Используется метод сопряженных градиентов с предобуславливанием.

Предобуславливание проводится с использованием геометрической декомпозиции.

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

Постпроцессор – подсистема анализа результатов

13



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

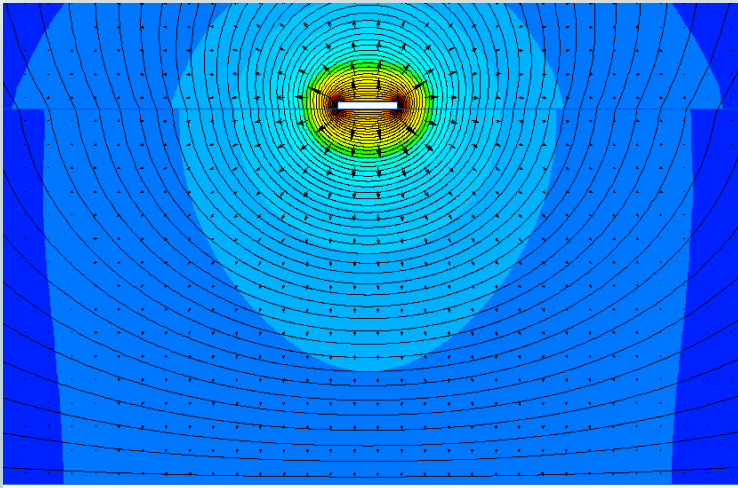
Электромагнитное поле: квазистатика и радиочастоты

14

Квазистатическая формулировка

Квазистационарное решение:

- Взаимная индуктивность
- Скин-эффект, эффект близости
- Собственная и взаимная емкость
- Потери в проводнике и диэлектрике



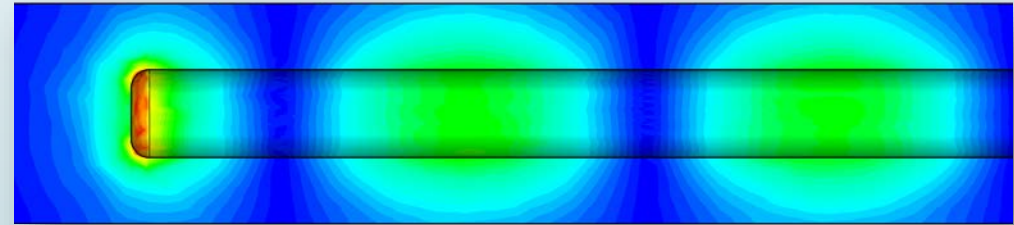
$$L < \lambda / 100$$

ELCUT

Волновая формулировка

Волновое решение:

- Ближняя и дальняя зона
- Отражение, рассеяние
- Граничные условия рассеяния
- Моды колебаний, собственные частоты



$$L > 10\lambda$$

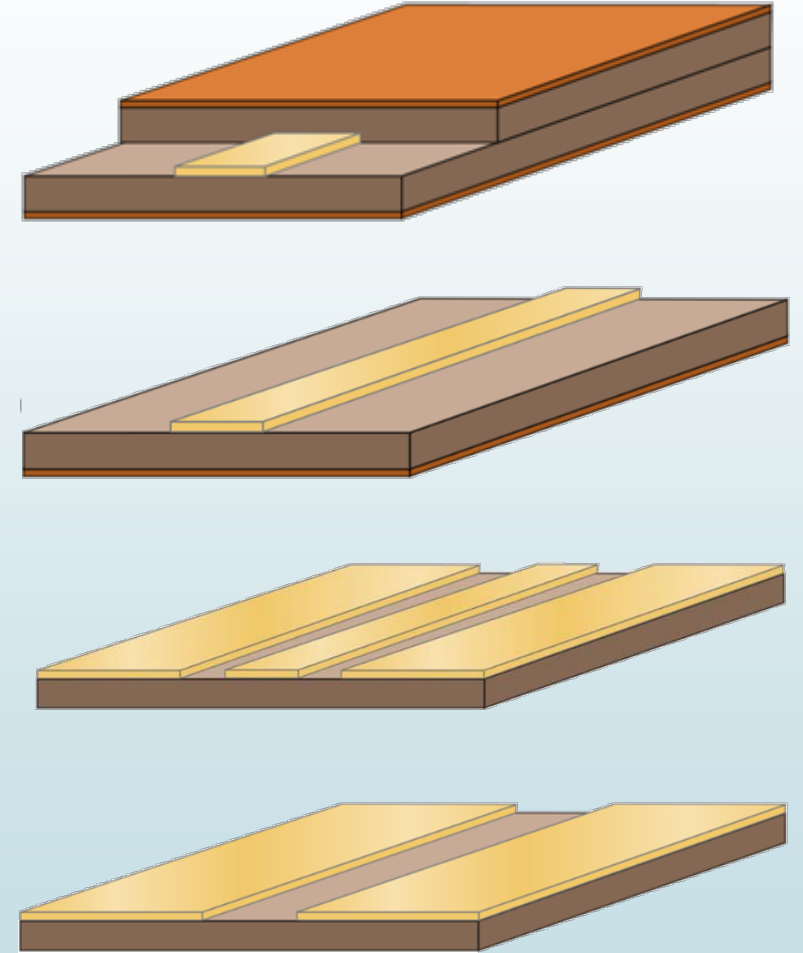
Другие программы

Квазистатический анализ электромагнитного поля

15

Что дает расчет поля по сравнению с формульным калькулятором?

- Произвольная конфигурация поперечного сечения
- Несколько диэлектриков с разными свойствами
- Диэлектрики с потерями
- При наличии нескольких электродов – любая наперед заданная мода колебаний
- Магнитное поле с учетом скин-эффекта и эффекта близости
- Потери в проводниках с учетом скин-эффекта
- Собственная и взаимные индуктивности системы нескольких проводников
- Насыщение ферромагнитных сердечников



Электростатический анализ

16

Метод расчета волнового сопротивления линии

Для расчета волнового сопротивления линии с заданной модой TEM или квази-TEM достаточно провести анализ электростатического поля.

Расчет проводится дважды:

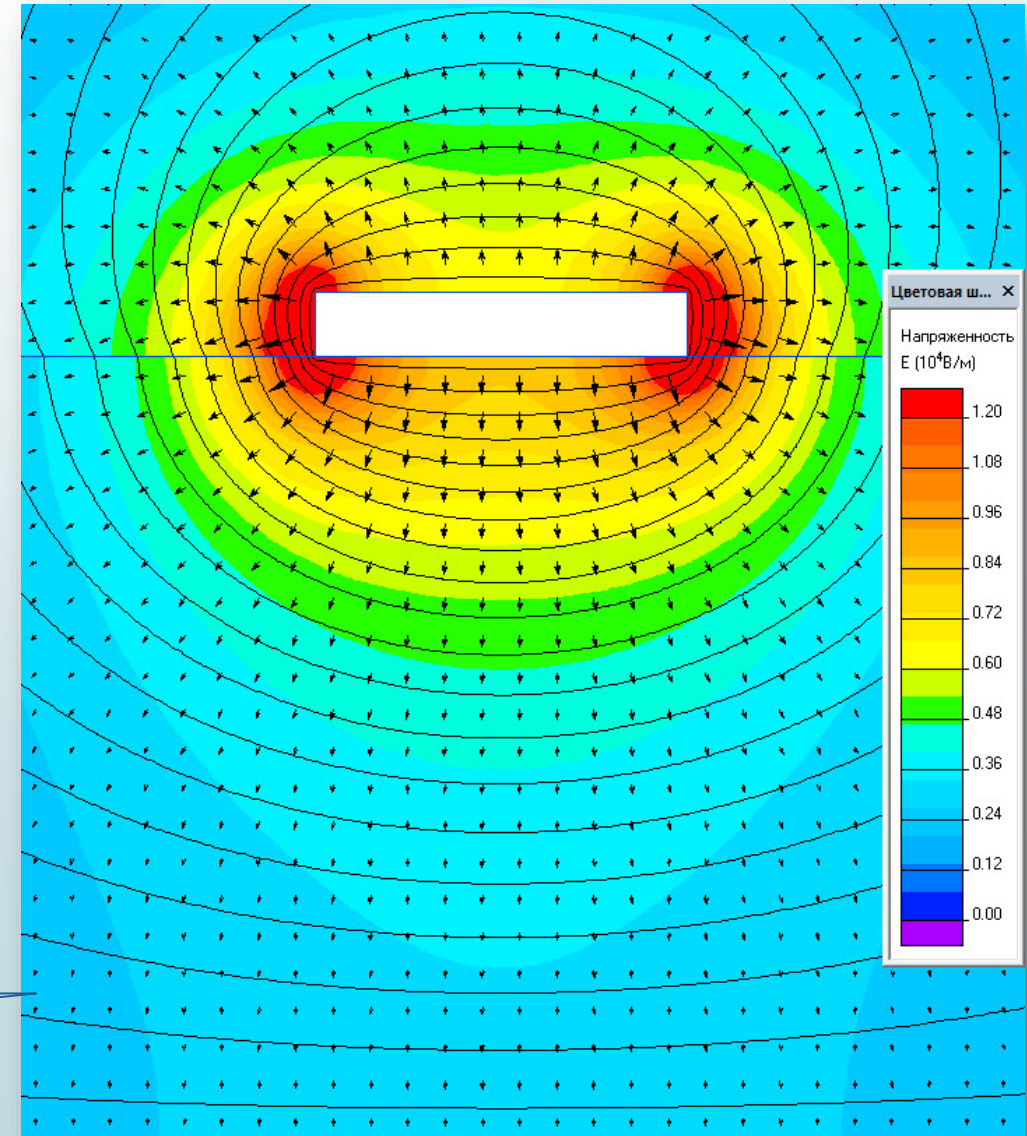
1. С заменой всех диэлектриков на свободное пространство ($\epsilon=1$)
2. С реальной диэлектрической проницаемостью диэлектрика(-ов)

Емкость в каждом из расчетов вычисляется:

через заряд сигнального проводника $q = \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s}$

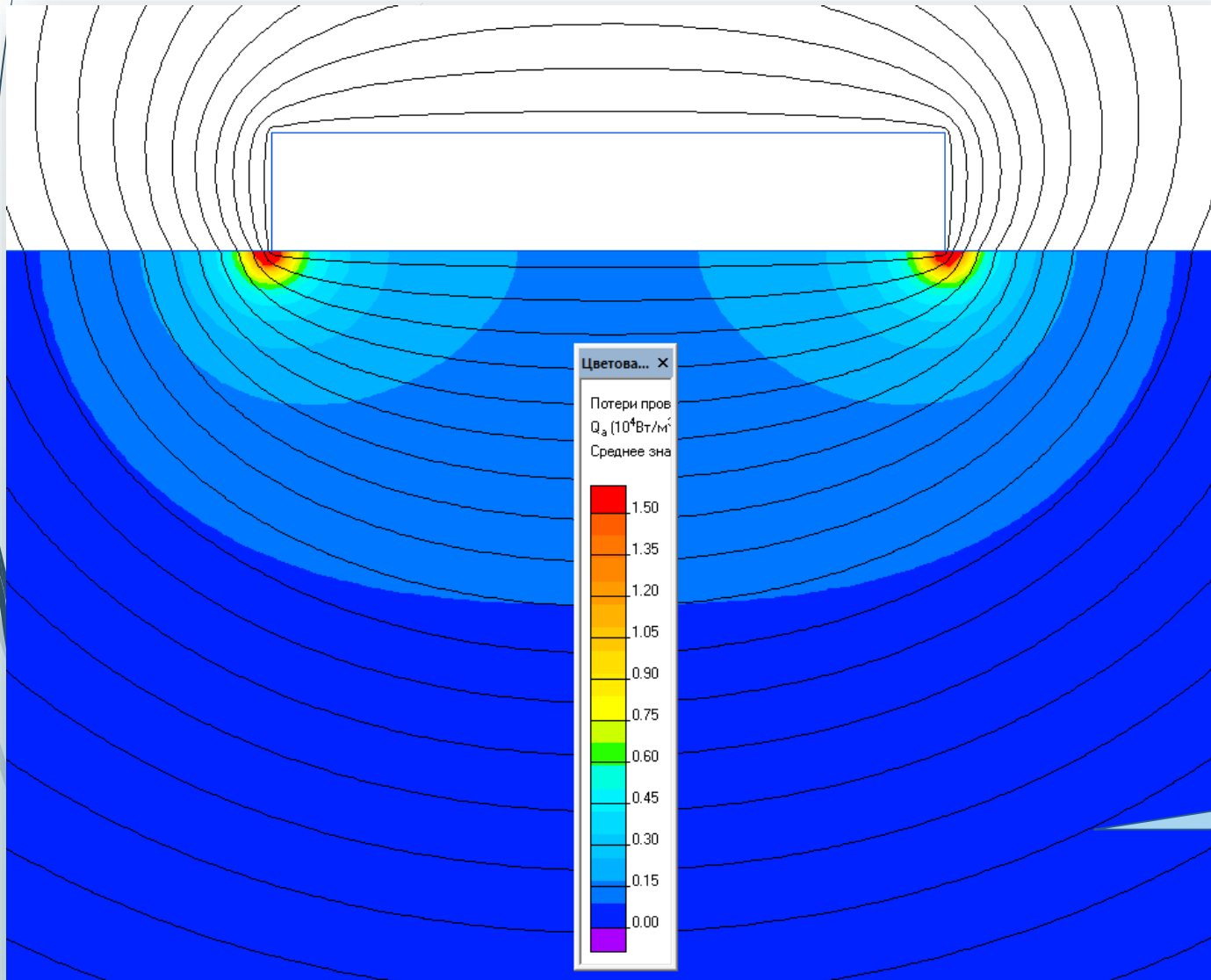
либо через полную энергию поля $W = \frac{1}{2} \int_V (\mathbf{D} \cdot \mathbf{E}) dv$

Напряженность
электрического
поля E



Анализ диэлектрических потерь

17



Заменяв электростатический анализ на расчет электрического поля с **неидеальным диэлектриком**, получим, в зависимости от заданного $\text{tg}\delta$ распределение в пространстве и интегральную величину диэлектрических потерь в субстрате:

$$P_{\text{диэл.}} = \int_V (\mathbf{E} \cdot \mathbf{J}) dv$$

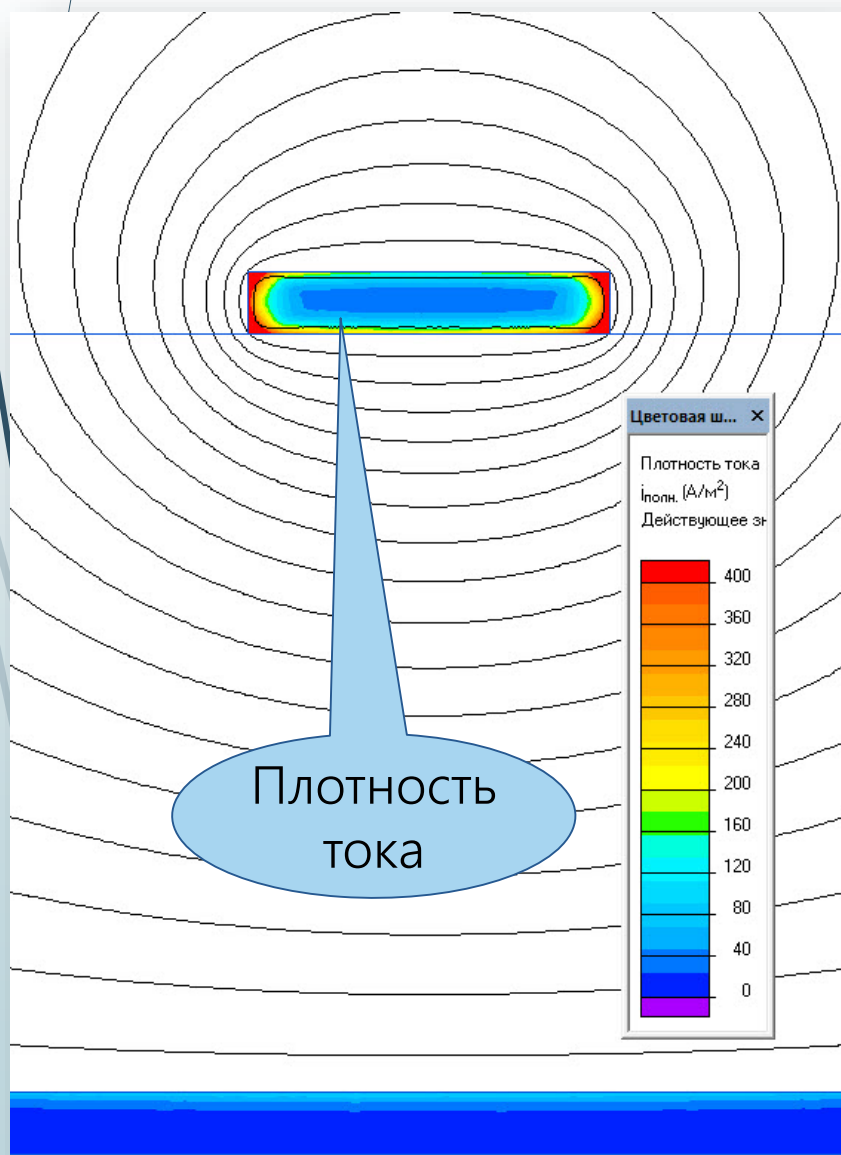
Значение емкости и волнового сопротивления останется тем же самым.

Распределение мощности потерь в диэлектрике

Анализ магнитного поля:

18

скин-эффект, эффект близости, индуктивность, потери

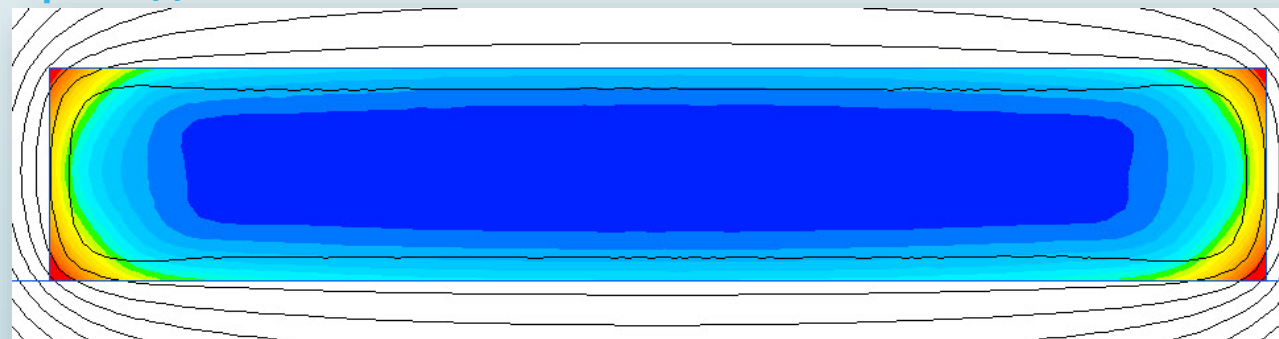


Анализ магнитного поля в частотной области с учетом вихревых токов дает возможность вычисления индуктивности линии и потерь в прямом и обратном проводниках.

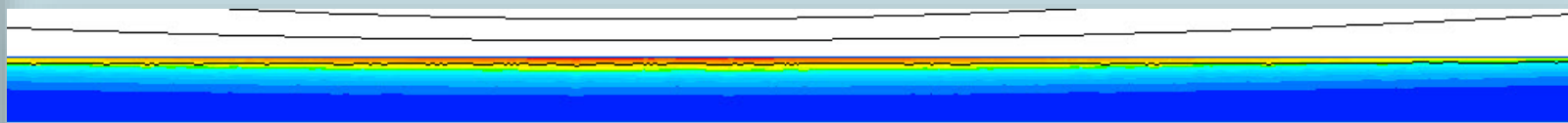
Вычисления полностью учитывают скин-эффект и поверхностный эффект.

При необходимости учитывается влияние и насыщение магнитных элементов (например, ферритовых оснований)

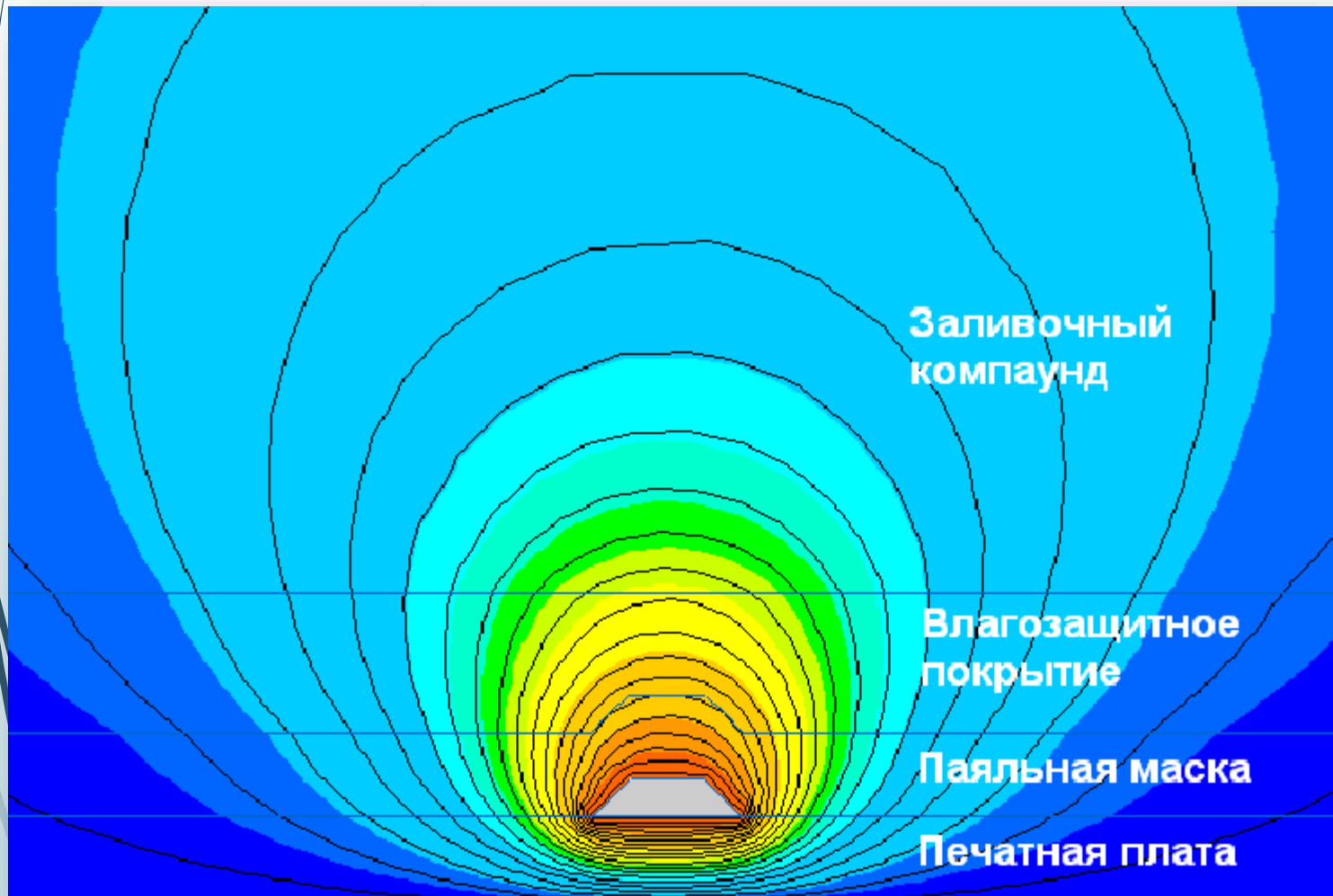
Проводник



Плоскость земли



Дополнительные возможности анализа: учет технологических факторов*



При необходимости возможен учет технологических факторов:

- 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

Электромагнитная связь проводников

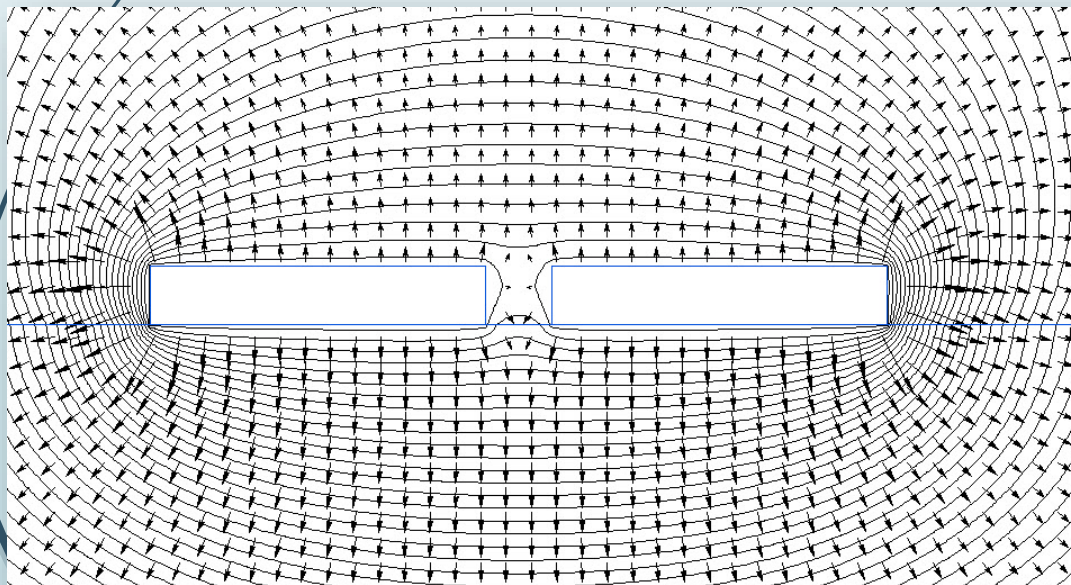
20

Электрическая и магнитная модели могут учитывать произвольное число проводников.

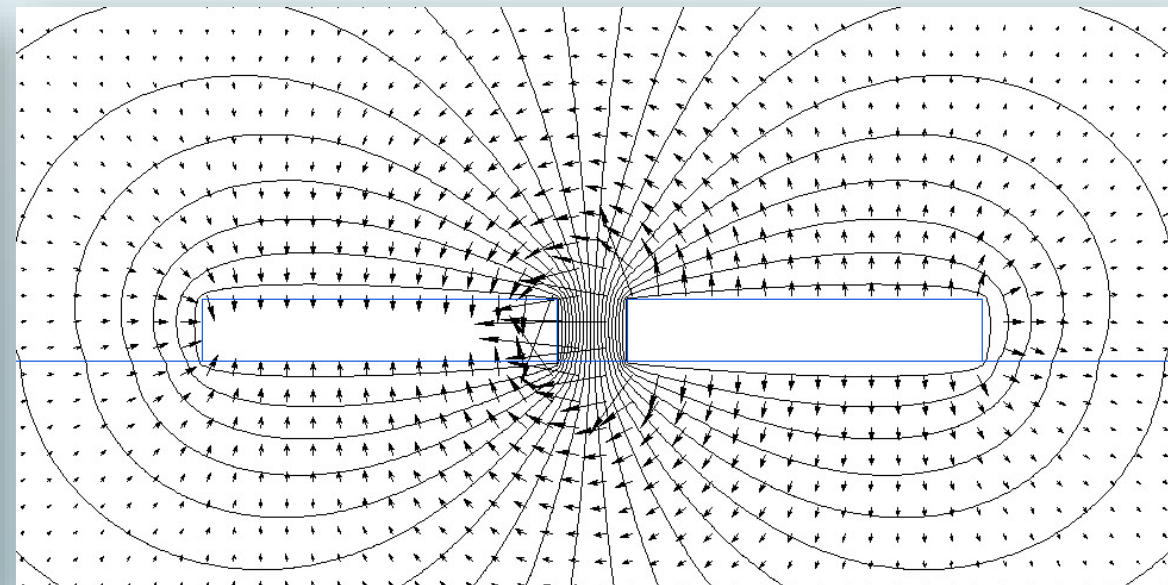
Для расчета картины поля нужно заранее задаться модой электромагнитных колебаний, то есть распределением потенциала по поверхности проводника. (для магнитной задачи необходимо знать полные токи проводников).

Дифференциальная пара:

Нечетная мода:



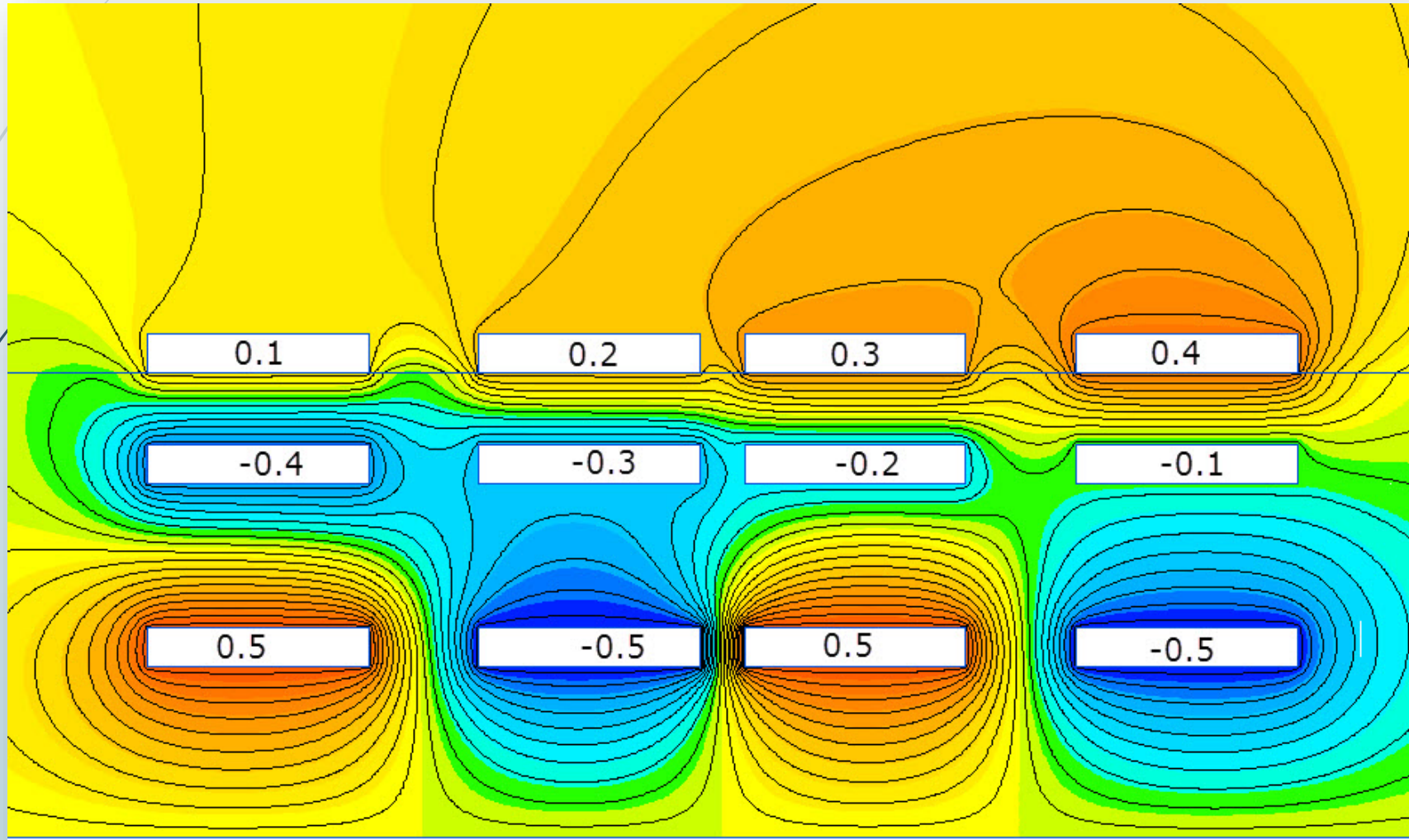
Четная мода:



Матрица емкостей и индуктивностей

21

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

Калькулятор матрицы емкостей

Список проводников (12 штук)

Частные задачи (77 штук)

Вычисленная матрица энергии

Коэффициенты электростатической индукции β_{ij}

Собственные и взаимные частичные емкости C_{ij}

CMatrix - Калькулятор матрицы емкостей

Выберите задачу

- microstrip_capacitance.pbm
- diff_pair_odd.pbm
- diff_pair_even.pbm
- matrix_capacitance...

Проводник

<input checked="" type="checkbox"/>	V_2x4	
<input checked="" type="checkbox"/>	V_3x1	
<input checked="" type="checkbox"/>	V_3x2	
<input checked="" type="checkbox"/>	V_3x3	
<input checked="" type="checkbox"/>	V_3x4	
<input checked="" type="checkbox"/>	boundary	Заземлен

Сведения

Заккрыть

Вычислить

Справка

Шаг 68 Энергия W = 2.934e-007
 Шаг 69 Энергия W = 3.1882e-007
 Шаг 70 Энергия W = 3.0909e-007
 Шаг 71 Энергия W = 2.0421e-007
 Шаг 72 Энергия W = 2.413e-007
 Шаг 73 Энергия W = 2.8013e-007
 Шаг 74 Энергия W = 2.5475e-007
 Шаг 75 Энергия W = 2.1548e-007
 Шаг 76 Энергия W = 2.8011e-007
 Шаг 77 Энергия W = 2.4132e-007

Энергия:

	0	1	2	3	4	5	6
0	1.0639e-007	2.0677e-007	2.1955e-007	2.1221e-007	9.8672e-008	2.8891e-007	2.9721e-007
1		1.1433e-007	1.9647e-007	2.1959e-007	2.7174e-007	1.4676e-007	2.9492e-007
2			1.1429e-007	2.0674e-007	2.8015e-007	2.9494e-007	1.4674e-007
3				1.0639e-007	2.7231e-007	2.9726e-007	2.8887e-007
4					1.6603e-007	3.252e-007	3.5683e-007
5						1.9089e-007	3.032e-007
6							1.9084e-007

Коэффициенты электростатической индукции

	0	1	2	3	4	5	6
0	2.1278e-011	-1.3947e-012	-1.1271e-013	-5.7015e-014	-1.7374e-011	-8.3665e-013	-1.8734e-011
1		2.2866e-011	-3.2155e-012	-1.1275e-013	-8.6191e-013	-1.5847e-011	-1.0246e-011
2			2.2858e-011	-1.3941e-012	-1.676e-014	-1.024e-012	-1.5839e-011
3				2.1278e-011	-1.0343e-014	-1.8806e-015	-8.3518e-011
4					3.3205e-011	-3.1712e-012	-3.197e-011
5						3.8178e-011	-7.8526e-011
6							3.8167e-011
7							
8							
9							
10							
11							

Собственные и взаимные частичные емкости

	0	1	2	3	4	5	6
0	1.0354e-012	1.3947e-012	1.1271e-013	5.7015e-014	1.7374e-011	8.3665e-013	1.8734e-011
1		2.7009e-013	3.2155e-012	1.1275e-013	8.6191e-013	1.5847e-011	1.0246e-011
2			2.7002e-013	1.3941e-012	1.676e-014	1.024e-012	1.5839e-011
3				1.0355e-012	1.0343e-014	1.8806e-015	8.3518e-011
4					1.676e-014	1.8587e-012	3.197e-011
5						3.1712e-012	7.8526e-011
6							7.1884e-011
7							
8							
9							
10							
11							



ELCUT из коробки способен:

- Вычислять волновое сопротивление линий передачи с неограниченным разнообразием формы, размеров и расположения проводников и диэлектриков, при условии, что заранее известна мода колебаний
- Вычислять потери в диэлектрике
- Вычислять потери в проводниках с учетом скин-эффекта и поверхностного эффекта
- Вычислять индуктивность проводников на переменном токе
- Вычислять матрицы частичных емкостей и частичных индуктивностей системы из нескольких проводников
- Оценивать тепловое состояние элементов в 2D и 3D моделях, при задании условий конвективного теплообмена.
- Проводить оптимизационный и статистический анализ

Возможности расширения и адаптации

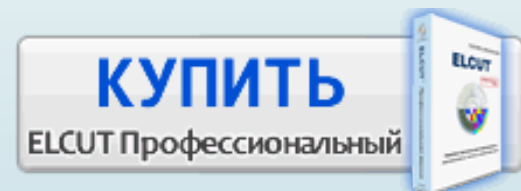
24



Адаптация через API

- Простые скрипты, автоматизирующие рутинные операции
- Автоматизированная генерация геометрии линии передачи и др.
- Импорт описания геометрии из стандартных файлов EDA и экспорт результатов
- Живое взаимодействие с другими программами потока проектирования
- Web-based приложения

Что дальше?
www.elcut.ru



На сайте:

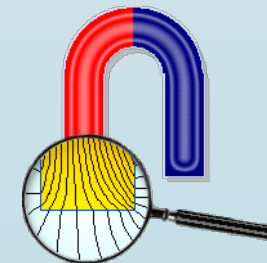
- Научно-технические статьи
- Обширная библиотека примеров
- Видео: обучение, исследования, опыт пользователей
регулярные онлайн-семинары
- Бесплатные утилиты с открытым кодом
- Полный текст Руководства пользователя
(скачать PDF или заказать книгу с доставкой)
- Учебный процесс: список ВУЗов, учебные пособия,
специальные ценовые условия
- Калькулятор цены пакета в зависимости от конфигурации
и числа лицензий. Кнопка оформления заказа
- Субсидии Минпромторга
(оператор – ООО «АДВАНС Инжиниринг»)

Спасибо за внимание!

26

- Эту презентацию и примеры решенных задач можно найти здесь:
soyuzmash2017.elcut.ru
- Бесплатную Студенческую версию ELCUT для просмотра примеров и первого знакомства можно загрузить здесь:
elcut.ru/free_soft_r.htm
- Связаться с докладчиком: simon@tor.ru

Искренне ваш



ELCUT

Новый подход к
моделированию полей