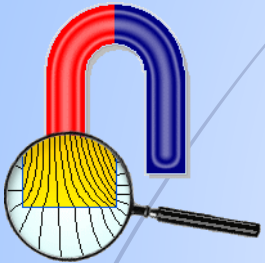


Компьютерная поддержка курса теории электромагнитного поля*



ELCUT

Новый подход к
моделированию полей



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МОИ

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»

*Использованы материалы:

Бутырин П.А., Дубицкий С.Д., Коровкин Н.В. *Использование компьютерного моделирования в преподавании теории электромагнитного поля.* – Электричество, № 10, 2014. - с. 66-71

Компьютерные модели в курсе теории электромагнитного поля: Когда, как и для чего?

1

Особенности традиционного курса ТЭМП

2

Место компьютерного моделирования

3

Ключевые компетенции

4

Почему ELCUT?

Курс теории электромагнитного поля:

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.

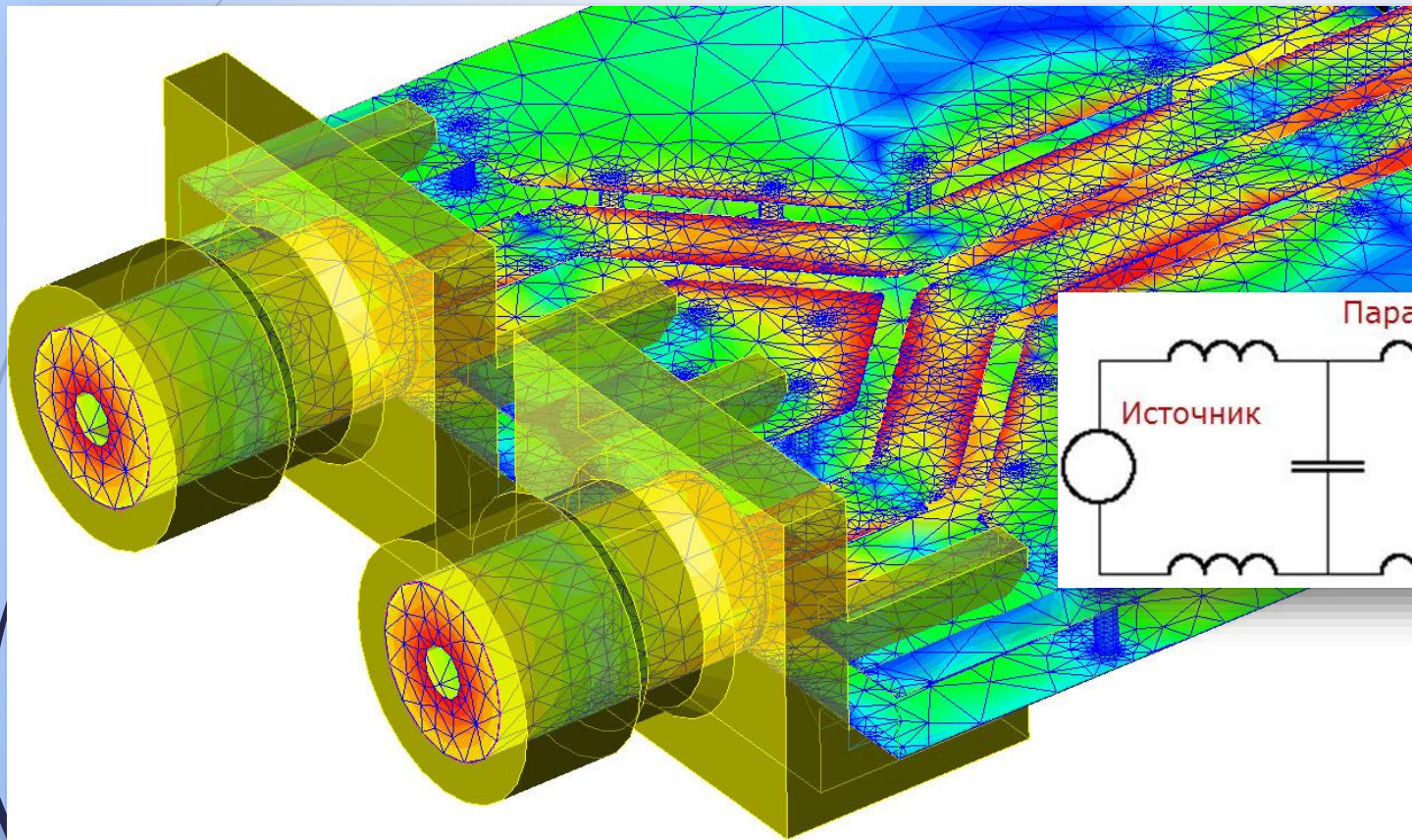
Ключевые компетенции

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

Поля и цепи – как мы думаем об электромагнитных полях

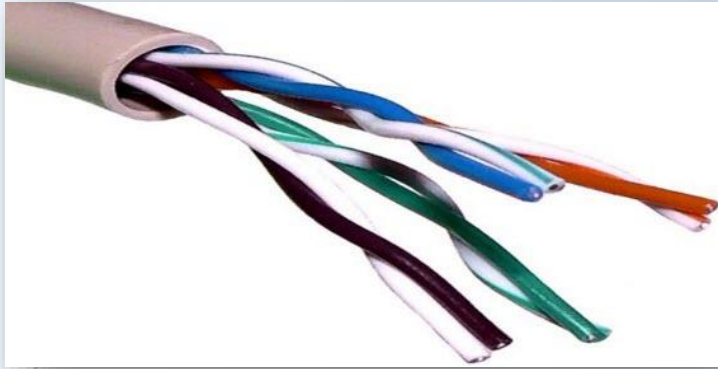
4

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



Умение видеть и вычленять полевые задачи

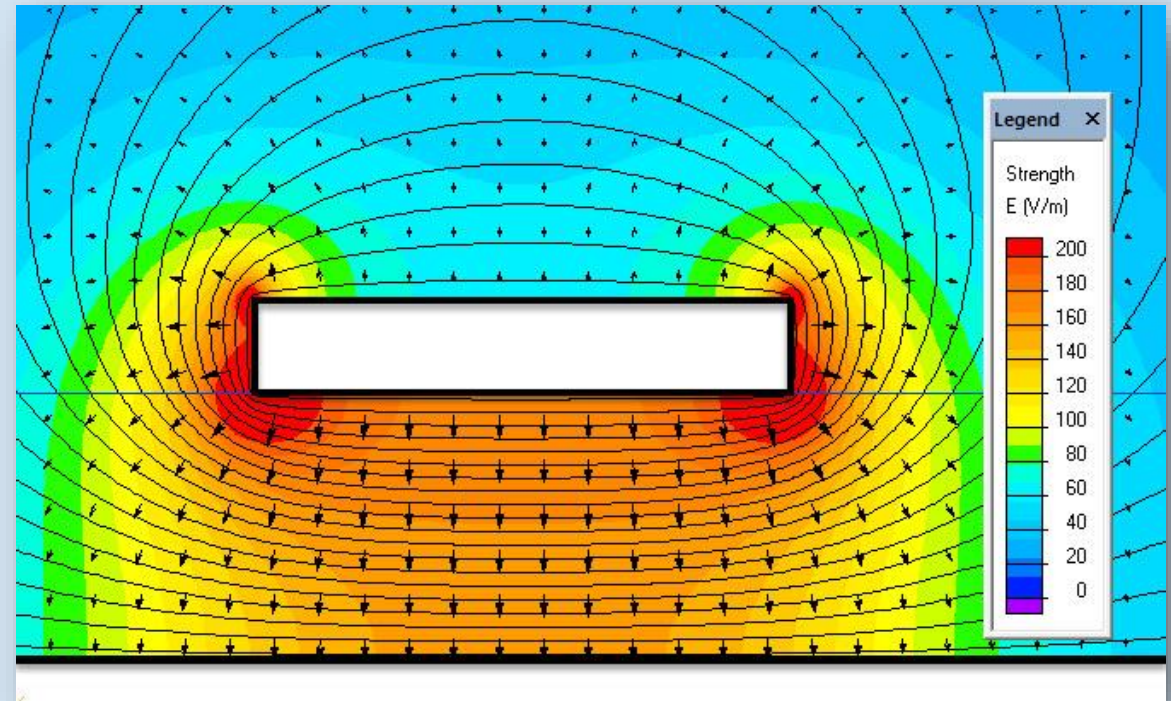
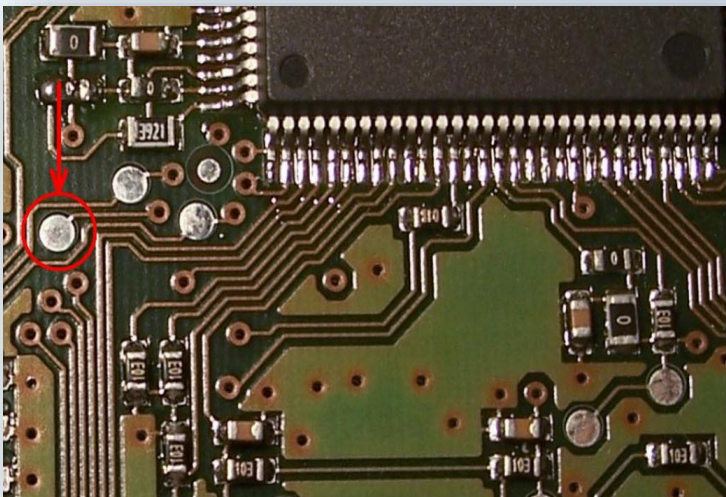
5



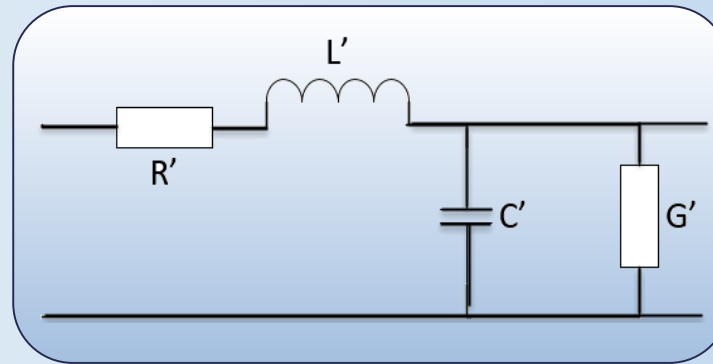
Линии передачи:
цепь или поле, в зависимости от частоты



Электрическое поле
проводника на печатной плате

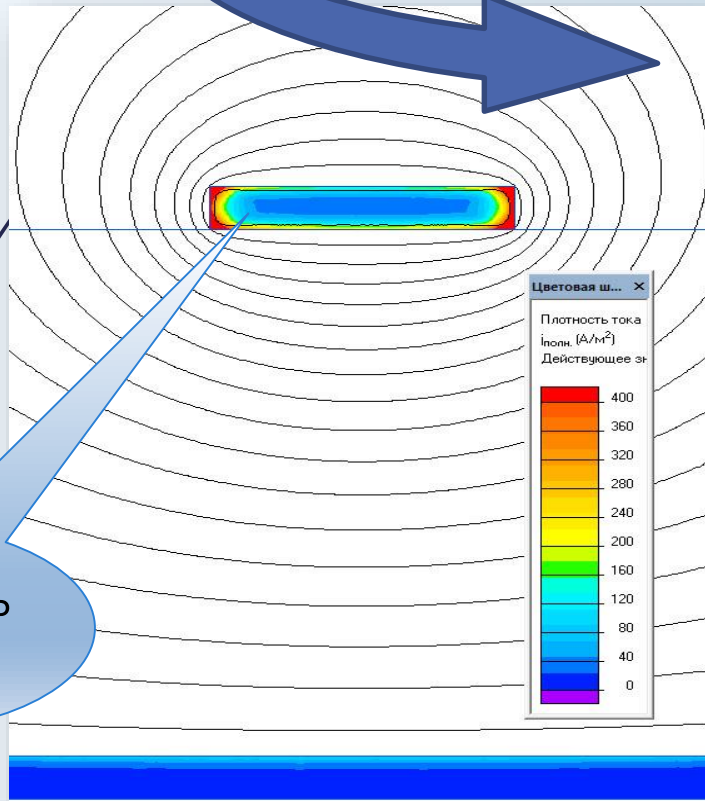


За каждым параметром эквивалентной цепи кроется картина электромагнитного поля

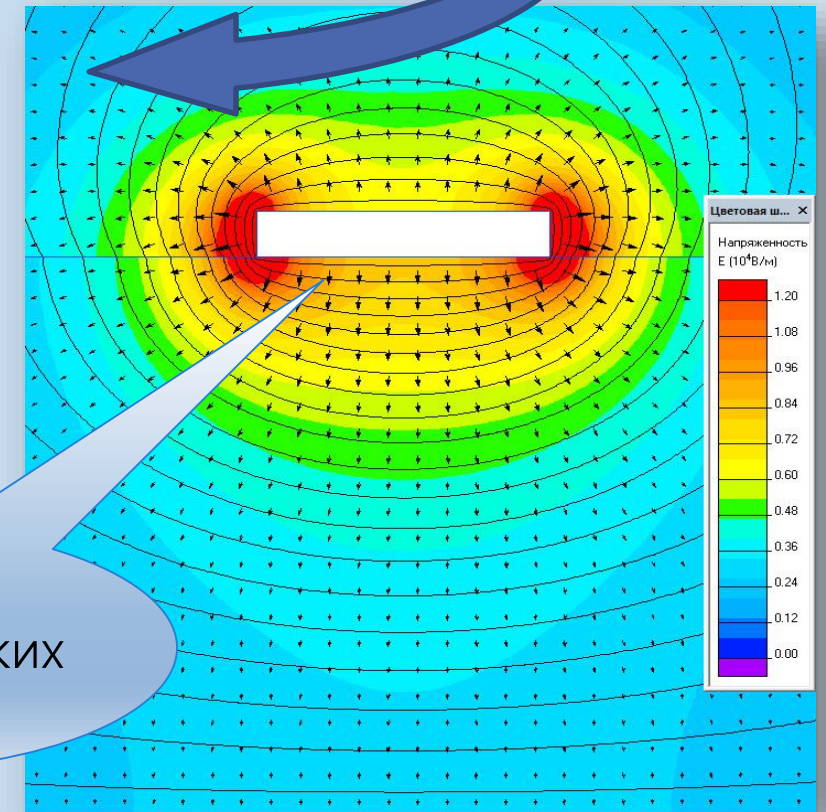


Магнитное поле:
 L, R

Электрическое поле:
 C, G



Плотность
тока



Плотность
диэлектрических
потерь

Компьютерные модели в курсе ТЭМП:

Место компьютерного моделирования в структуре курса

- 1 Особенности традиционного курса ТЭМП
- 2 Место компьютерного моделирования
- 3 Ключевые компетенции
- 4 Почему ELCUT?

Место компьютерного моделирования поля в структуре курса ТЭМП

8

1. Дополнение

Существующий теоретический курс (без изменений)

Упражнения по компьютерному моделированию поля

2. Переформатирование

Теоретический курс опирается на сведения о моделировании и визуальные модели

Компьютерное моделирование излагается одновременно с теорией

3. Замена

Компьютерное моделирование во главе угла

Теоретический курс дополняет сведения о технике моделирования

Преимущества компьютерного моделирования

9

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

10

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

Соотношение между теорией и практикой компьютерного моделирования

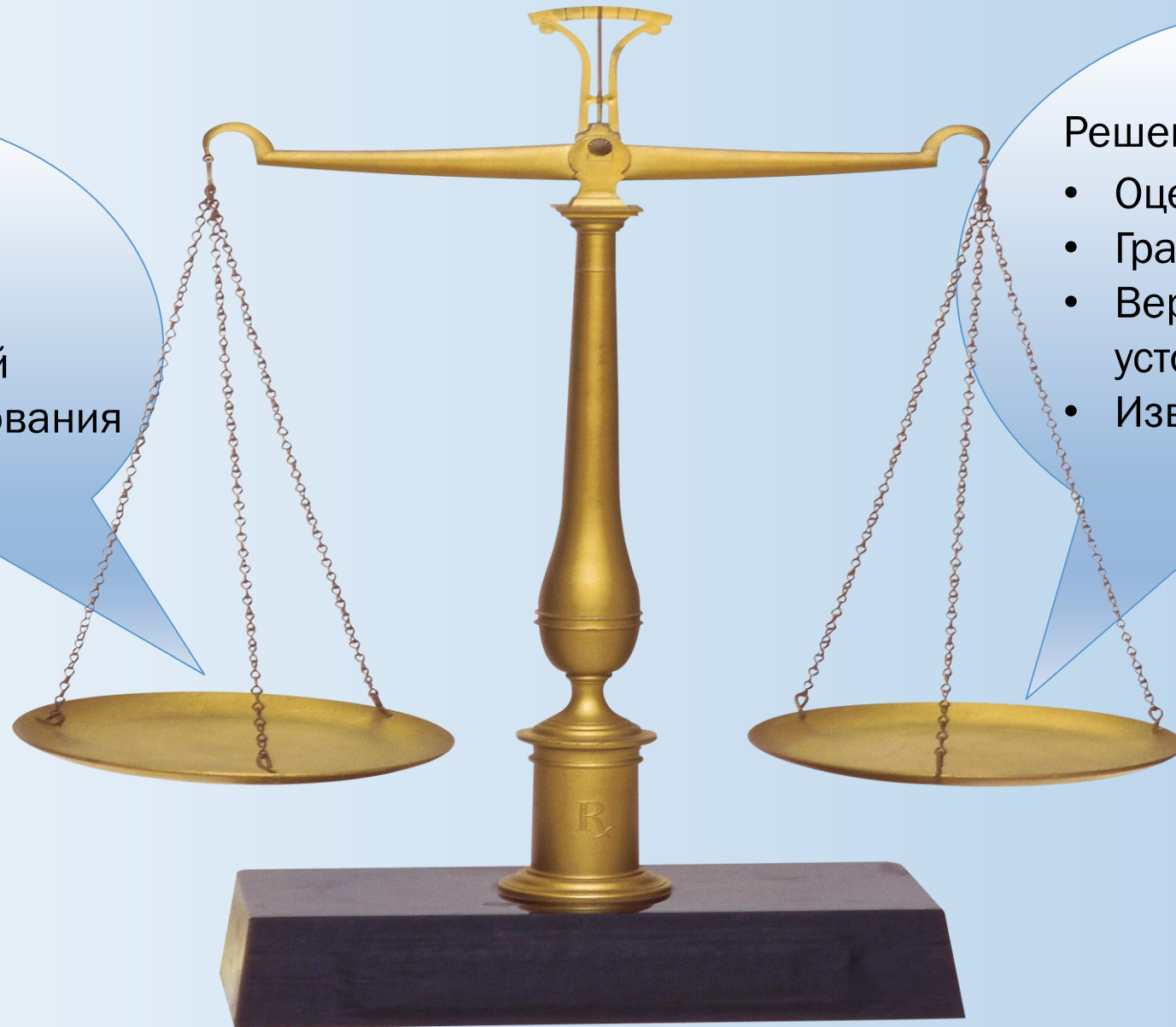
11

Численный метод:

- Сущность
- Вывод уравнений
- Техника использования

Решение задач:

- Оценка допущений
- Граничные условия
- Верификация и устойчивость решения
- Извлечение результатов



Компьютерные модели в курсе ТЭМП: Ключевые компетенции

1

Особенности традиционного курса ТЭМП

2

Место компьютерного моделирования

3

Ключевые компетенции

4

Почему ELCUT?

Ключевые компетенции

13

- Навык использования компьютерной терминологии, умения сформулировать вычислительную задачу.
- Умение грамотно описать принятые допущения и упрощения, обосновать их, предвидеть возможное влияние на результат расчета. В частности, уметь обосновать сведение трехмерной модели к двумерной, использование симметрии задачи, сведение открытой расчетной области к ограниченной.
- Умение выбрать необходимый тип анализа – подмножество системы уравнений Максвелла, обосновать возможность отбрасывания части уравнений
- Умение выбирать граничные условия для конкретных задач
- Умение оценивать влияние степени дискретизации на точность решения, строить качественную сетку конечных элементов, понимать соотношение между дискретизацией во времени и в пространстве.
- Умение верифицировать полученные результаты, сопоставлять их с теоретическими моделями и практическими сведениями, оценивать степень чувствительности результатов к исходным данным.

Содержание обучения: чему мы хотим научить?

14

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)

Компьютерные модели в курсе ТЭМП: Выбор программного обеспечения

1

Особенности традиционного курса ТЭМП

2

Место компьютерного моделирования

3









Ключевые компетенции

4

Почему ELCUT?

Выбор программного обеспечения для моделирования поля в курсе ТЭМП

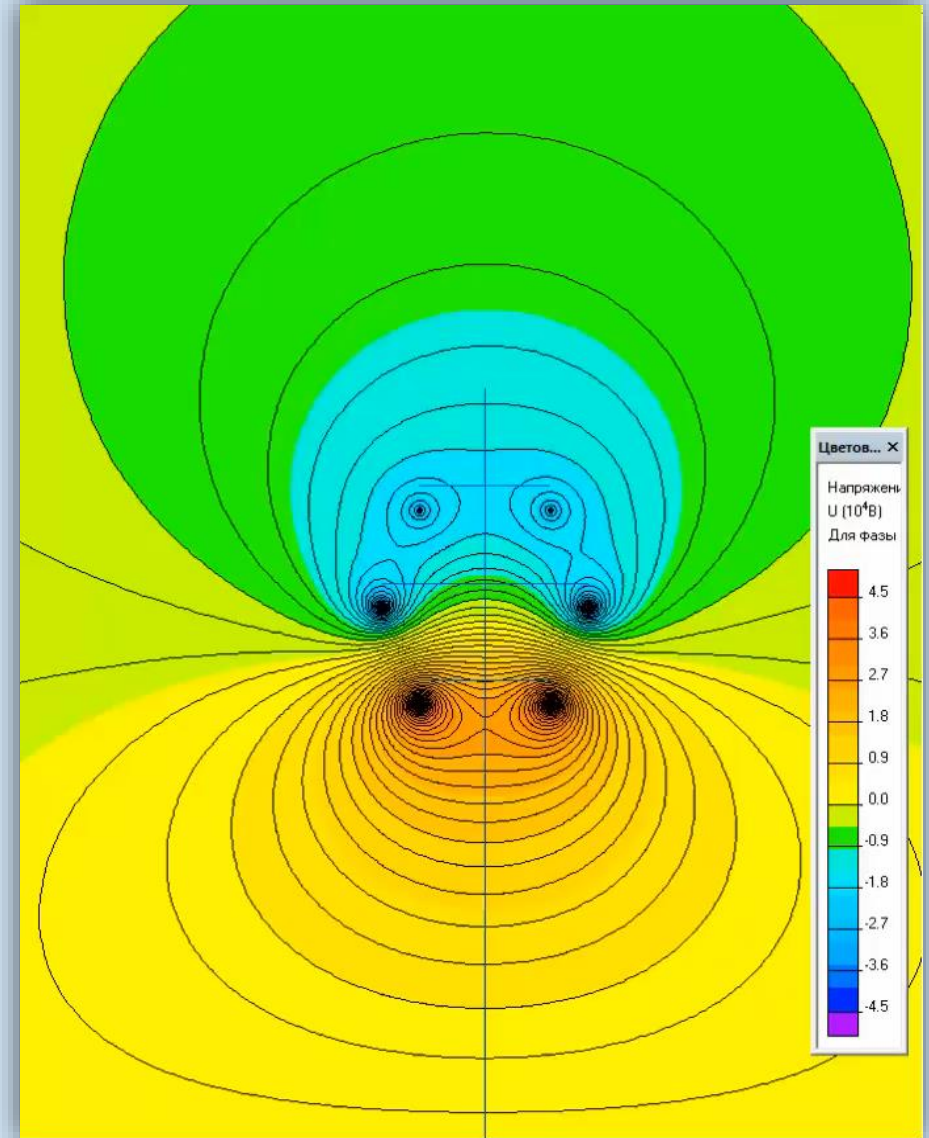
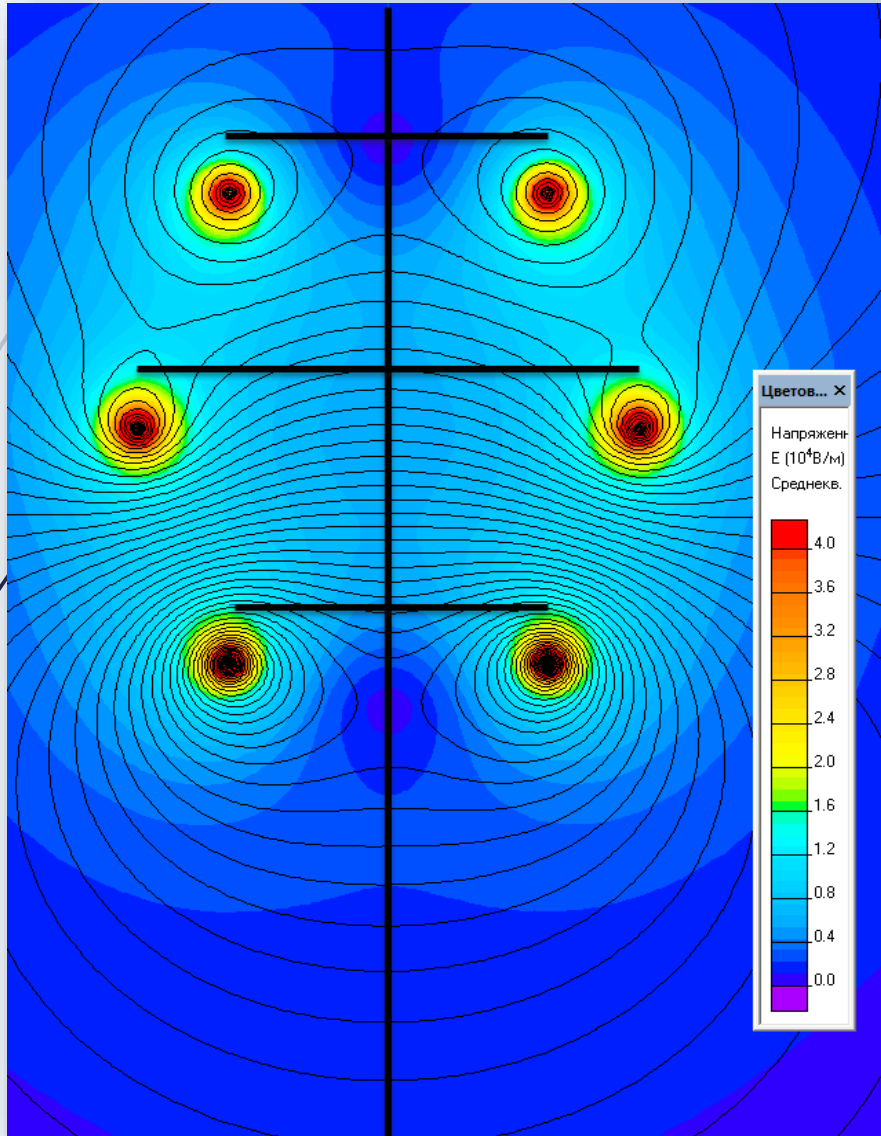
16

Класс ПО	Примеры		
Бесплатное ПО		<ul style="list-style-type: none">• Всегда доступно• Удобно для домашней работы• Малый объем документации	<ul style="list-style-type: none">• Ограниченная функциональность• Трудность использования• Недостаточная визуализация результатов
Средний класс	 	<ul style="list-style-type: none">• Доступна учебная лицензия• Оптимальная функциональность и автоматизация• Взаимодействие с другими программами	<ul style="list-style-type: none">• Не доступен дома• Требуется финансирование
Тяжелые пакеты	  	<ul style="list-style-type: none">• Максимальная функциональность• Возможность решения научных и инженерных задач	<ul style="list-style-type: none">• Очень дорого• Высокие требования к компьютеру• Длинный период обучения

Ключевые моменты: визуализация поля

Пример: электрическое поле двухцепной ВЛ: поиск места для оптического кабеля

17



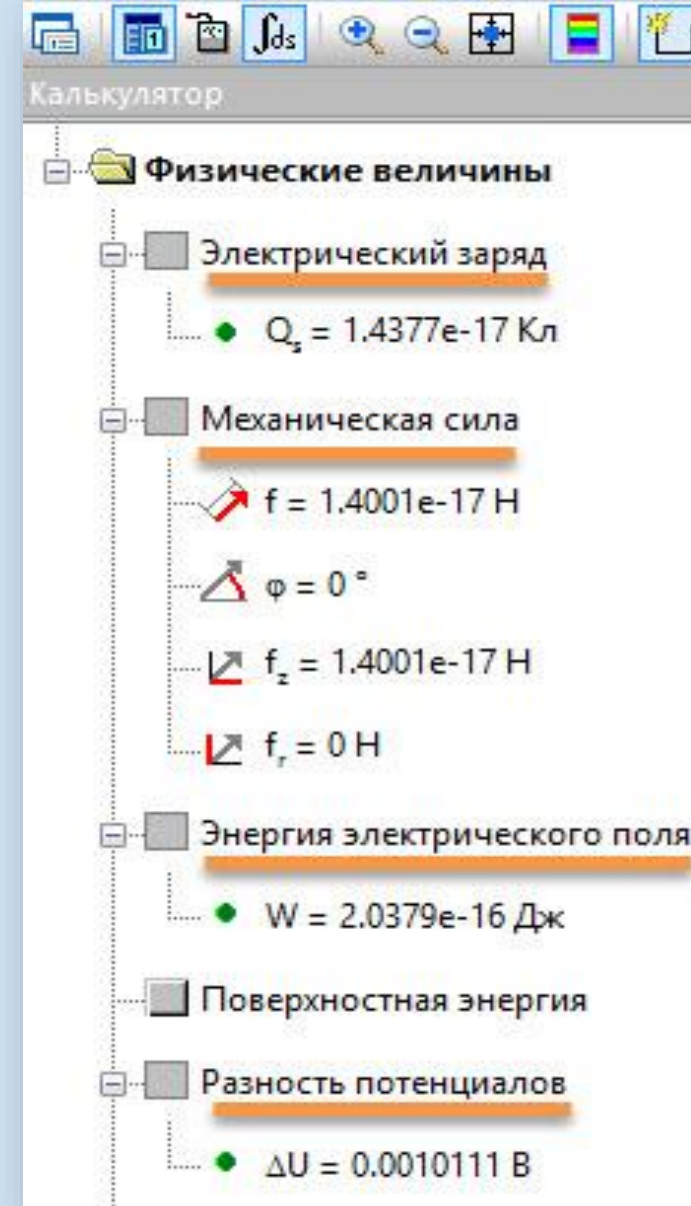
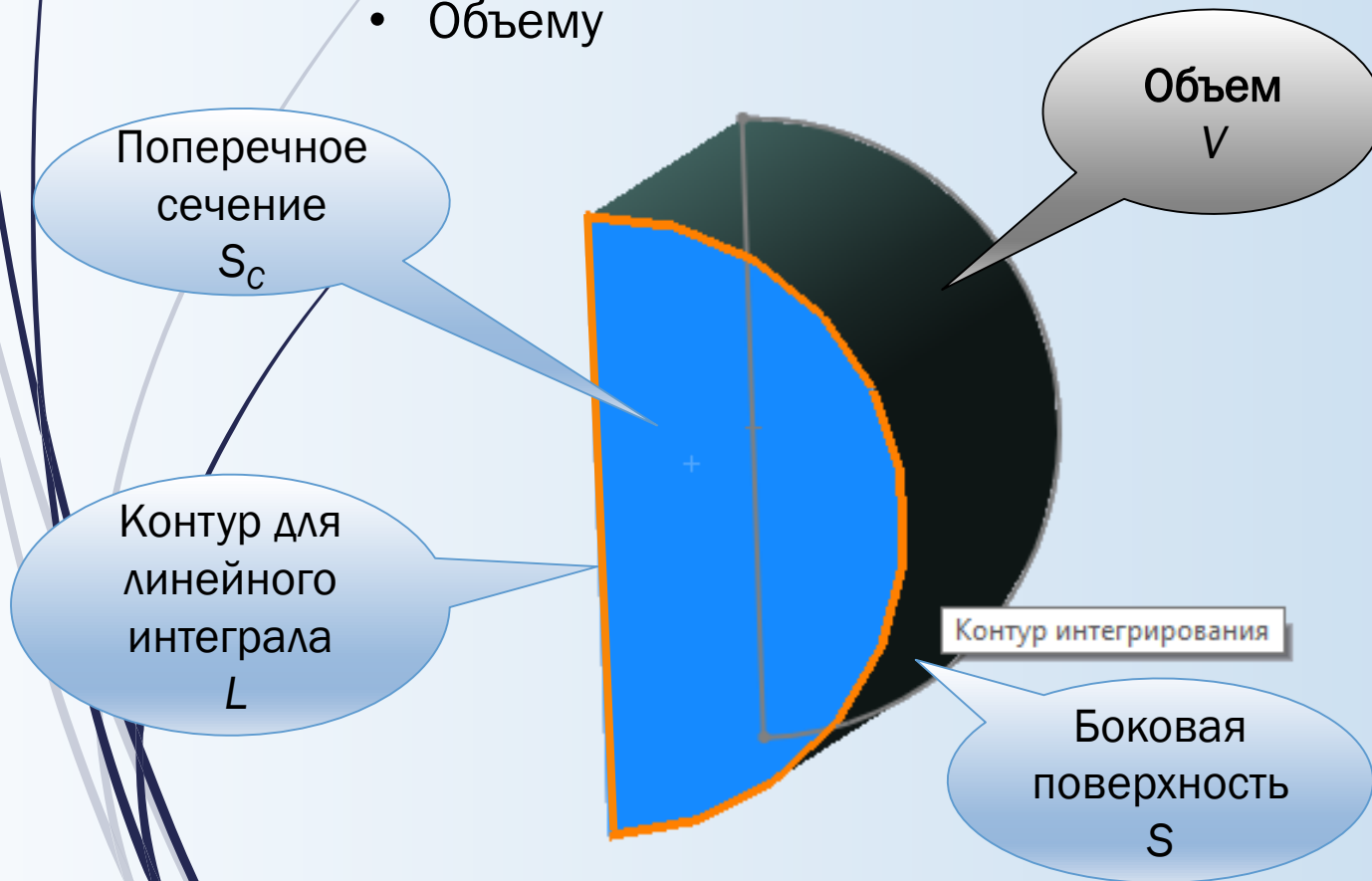
Ключевые моменты: извлечение параметров

18

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

19

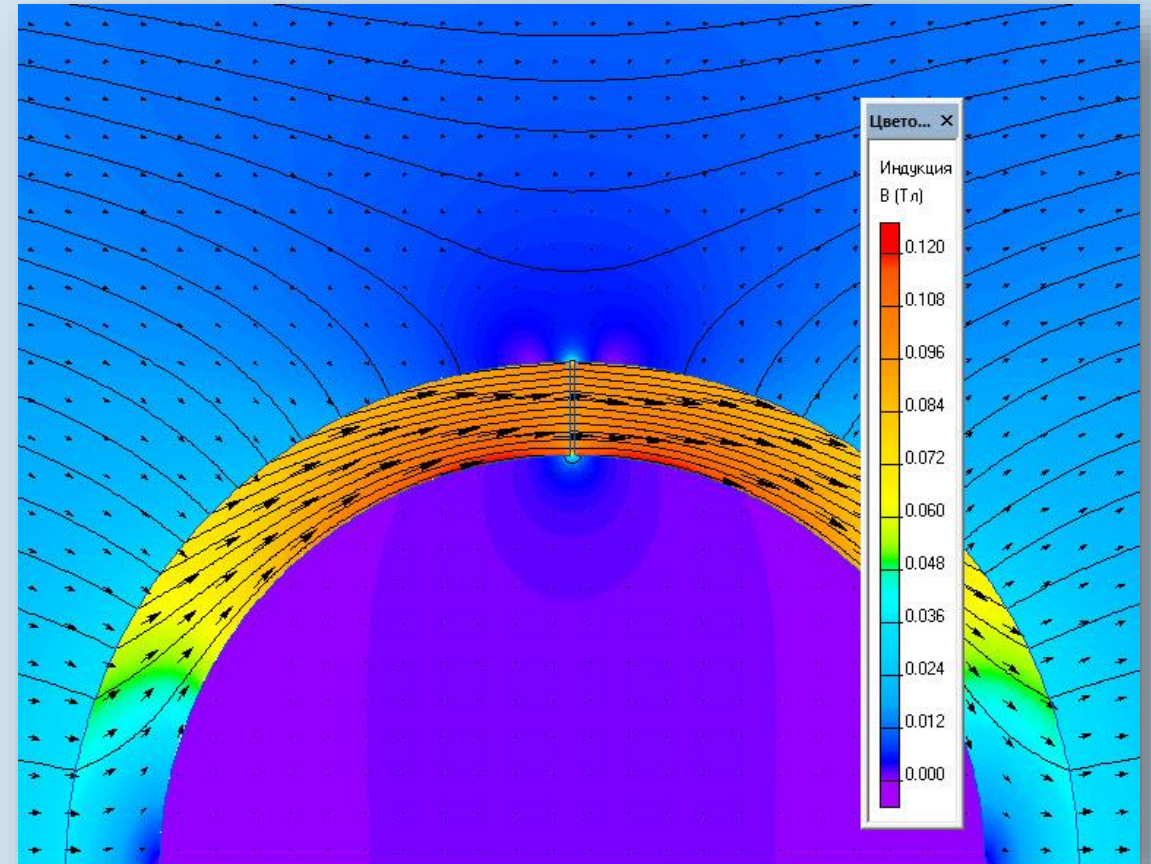
Исследование экранирования в постоянном и переменном магнитном поле

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

20

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

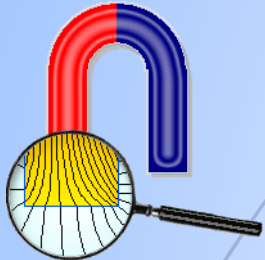
Технические университеты России: Учебные пособия

21

Беларусский ГУИР (Минск)	В.Ф. Алексеев, В.Е. Матюшков, В.И. Журавлев	Физические основы проектирования радиоэлектронных устройств (лаб. практикум)	2010
Беларусский 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

ELCUT инженерный инструмент моделирования электромагнитных и температурных полей

Отечественный программный продукт мирового уровня.



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

Пользователи ELCUT

23

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

24

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

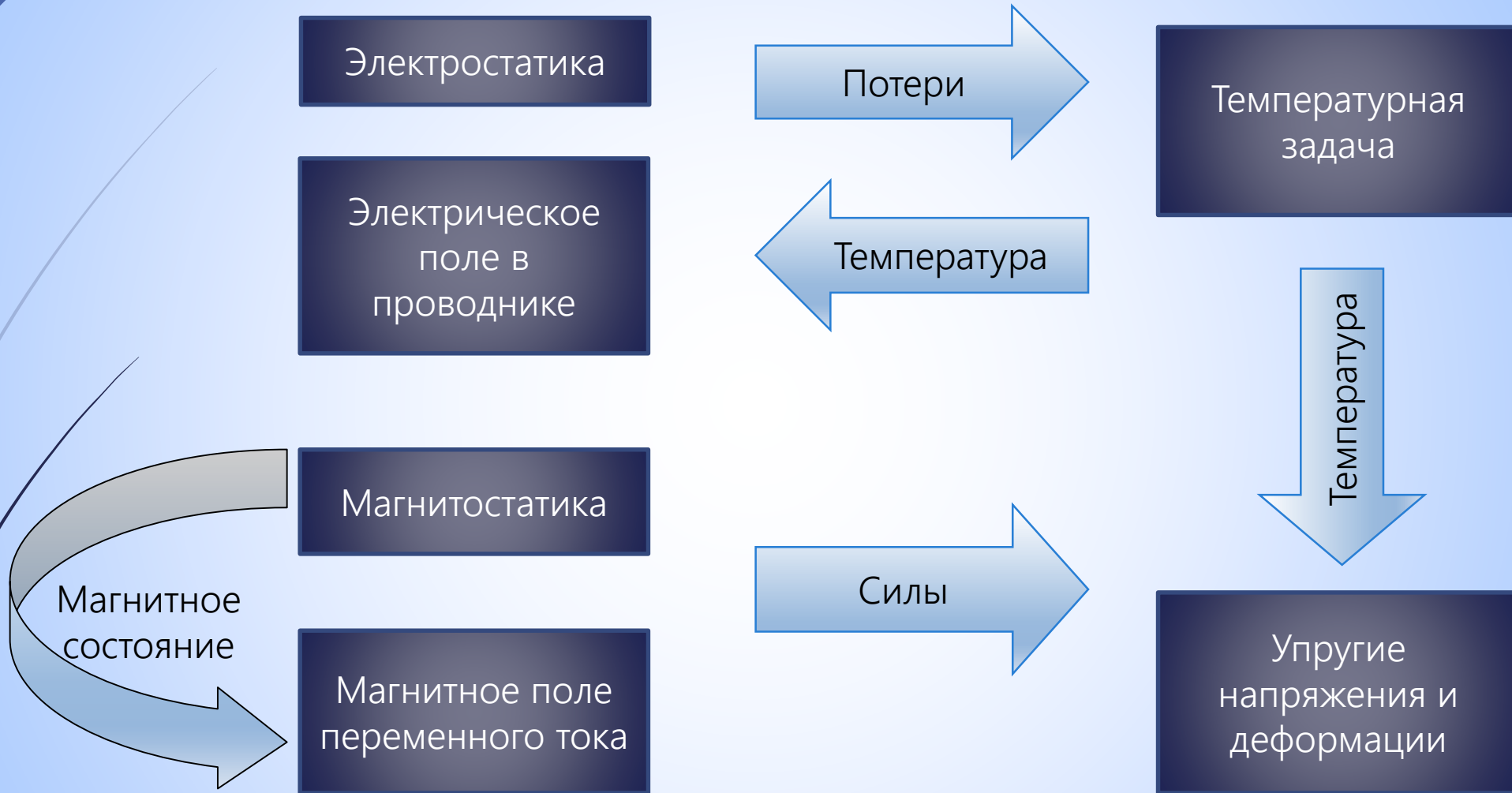
$$T=f(t)$$

Упругость

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

Мультифизические задачи

25



Функциональные подсистемы ELCUT

26

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

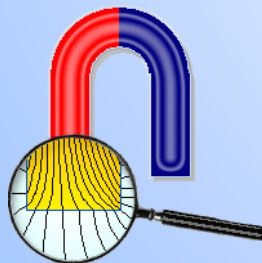
Экспорт:
Excel, Matlab,
Garfield

Спасибо за внимание!

27

- Эту презентацию и примеры решенных задач можно найти здесь:
elektro2017.elcut.ru
- 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

