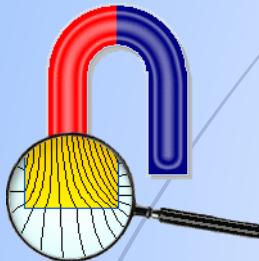


# Компьютерная поддержка курса теории электромагнитного поля\*



**ELCUT**

Новый подход к  
моделированию полей



**ПОЛИТЕХ**

Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**МОИ**

**П.А. БУТИРИН**, 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»

1

\*Использованы материалы:

Бутирин 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.

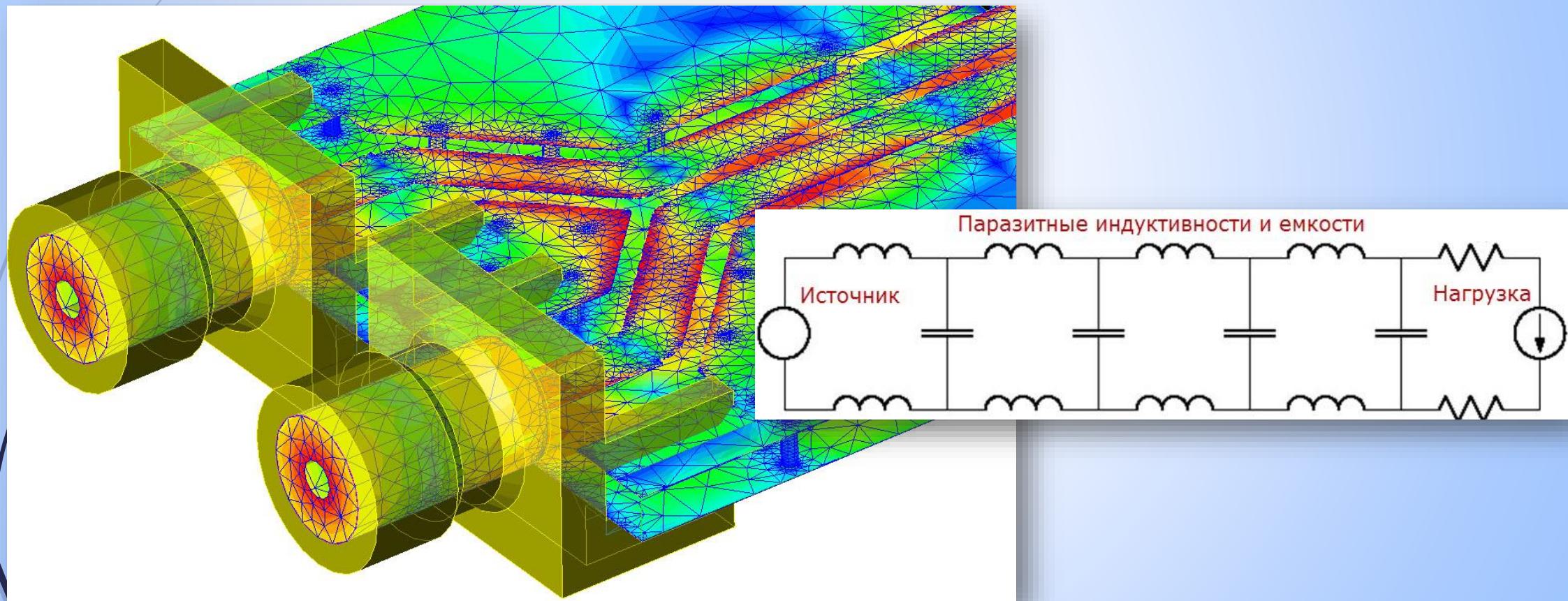
## Ключевые компетенции

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

# Поля и цепи – как мы думаем об электромагнитных полях

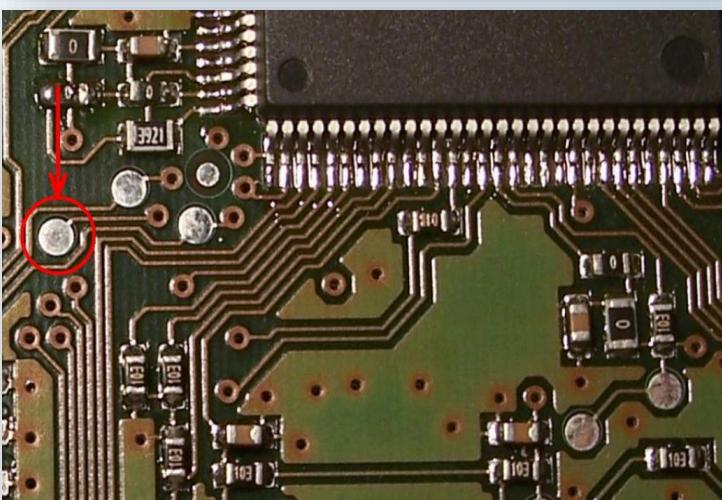
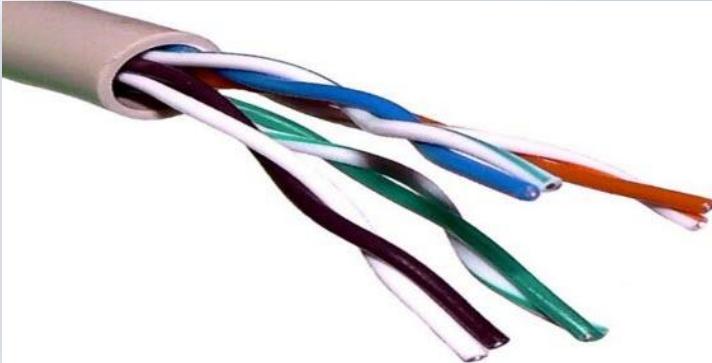
4

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



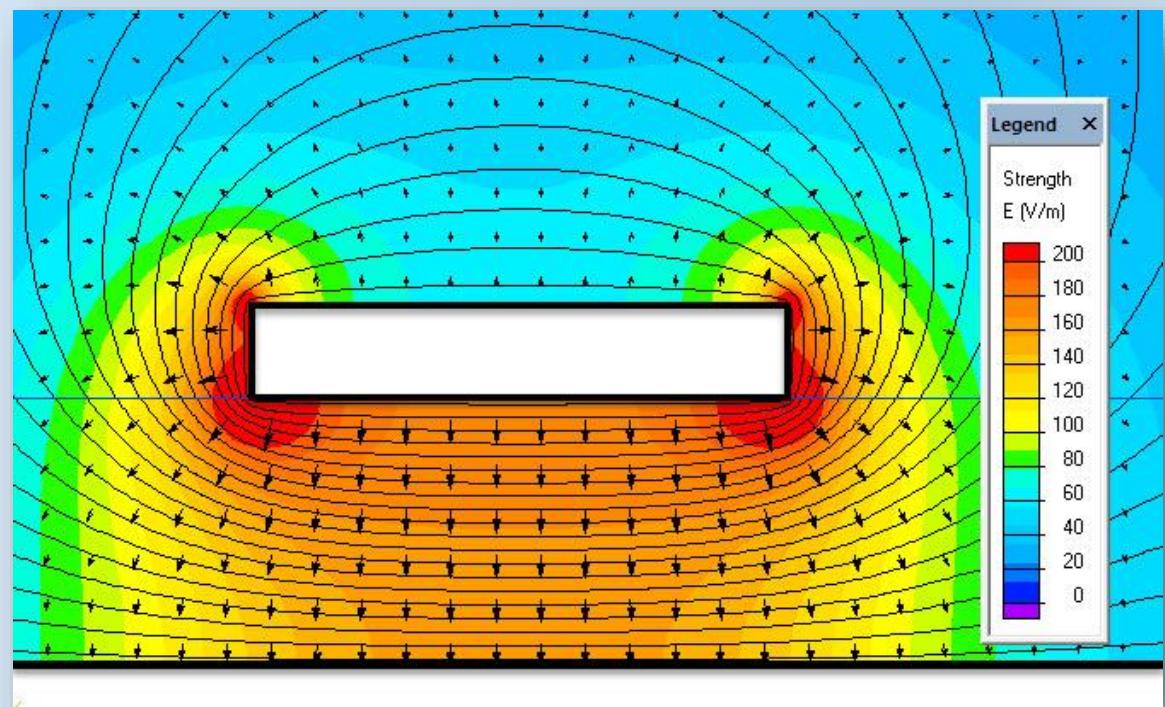
# Умение видеть и вычислять полевые задачи

5



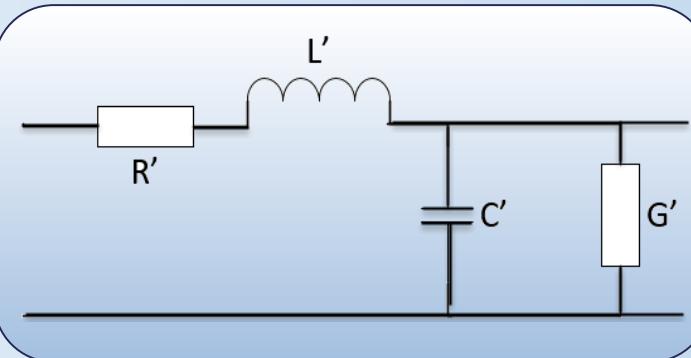
Линии передачи:  
цепь или поле, в зависимости от частоты

Электрическое поле  
проводника на печатной плате



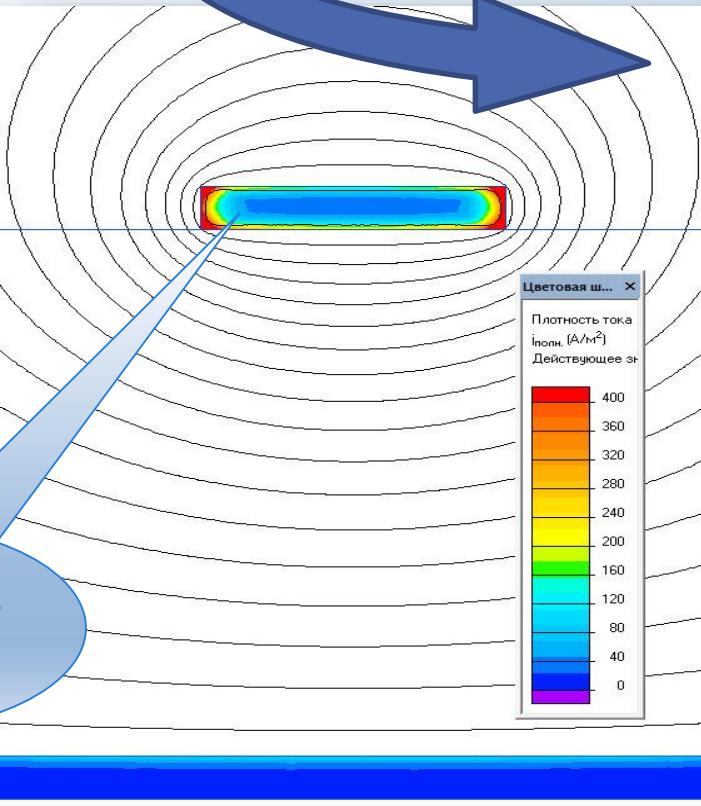
# За каждым параметром эквивалентной цепи кроется картина электромагнитного поля

Магнитное поле:  
 $L'$ ,  $R'$

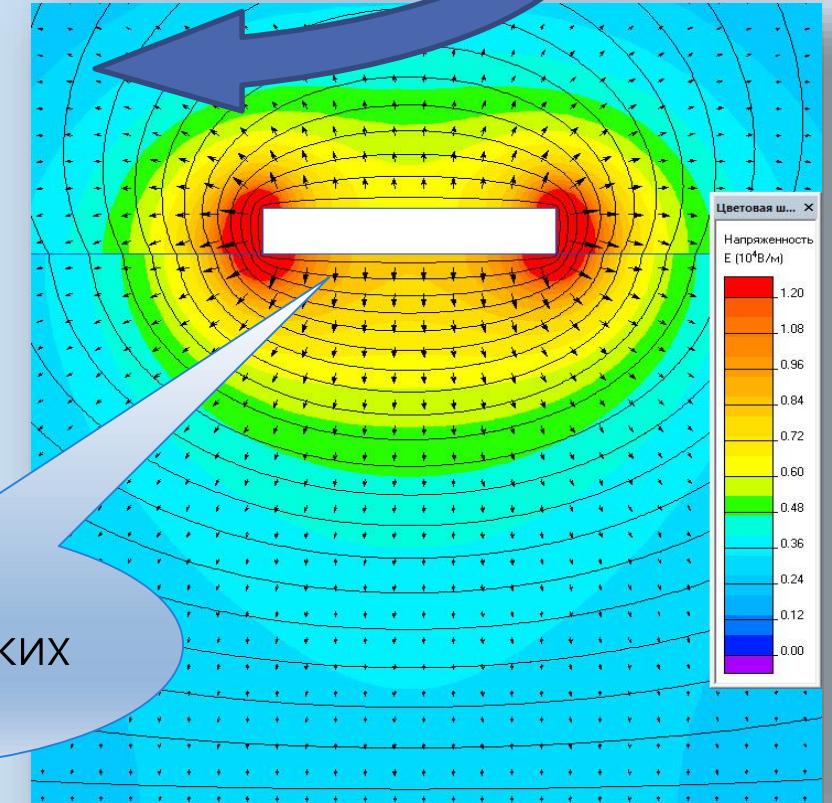


Электрическое поле:  
 $C'$ ,  $G'$

Плотность тока

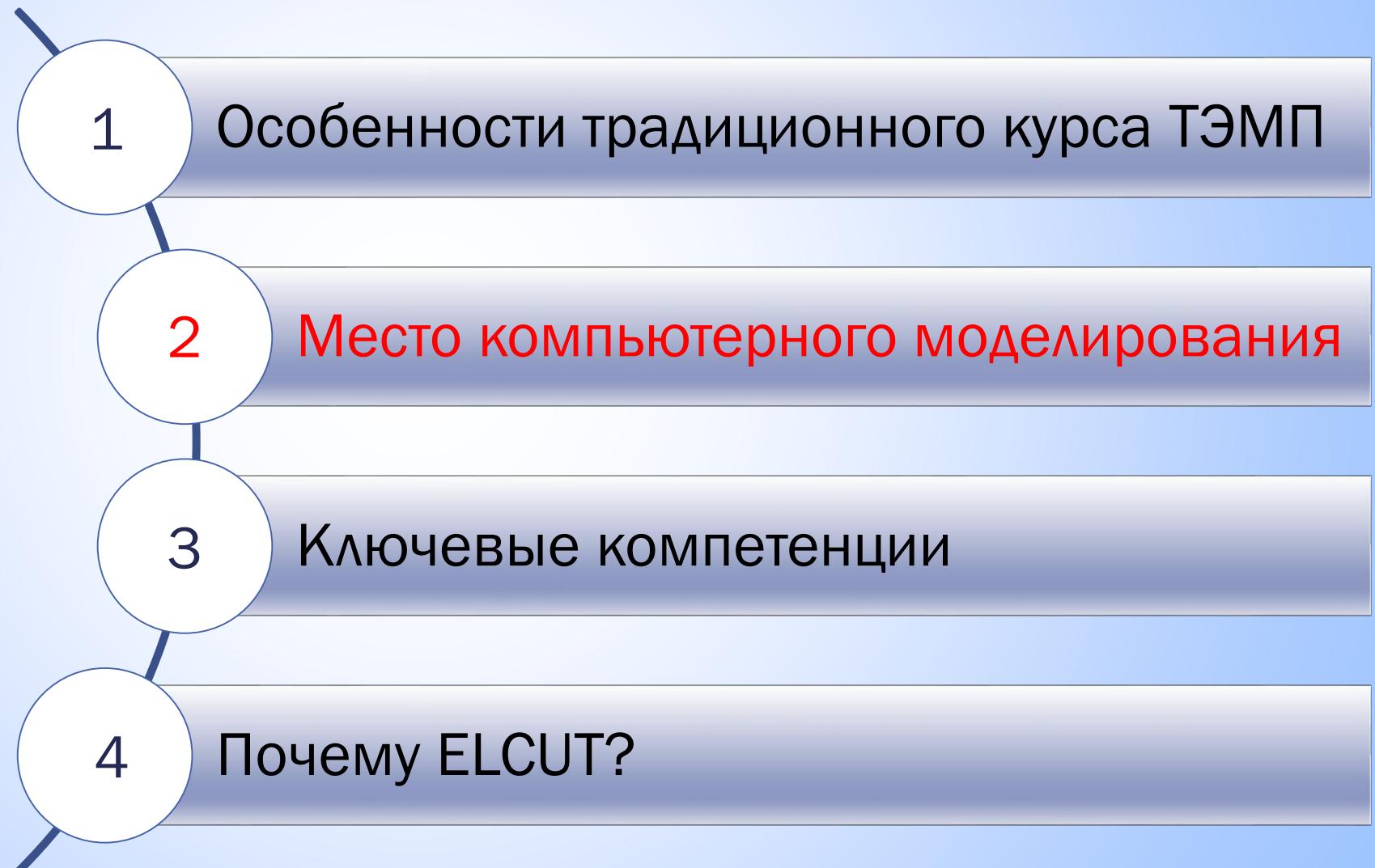


Плотность  
диэлектрических  
потерь



# Компьютерные модели в курсе ТЭМП:

## Место компьютерного моделирования в структуре курса



# Место компьютерного моделирования поля в структуре курса ТЭМП

## 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 теoriей

## 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"><li>1. Классифицировать задачу</li><li>2. Выделить и упростить расчетную область</li><li>3. Задать граничные условия и источники</li><li>4. Анализировать и верифицировать результаты</li></ol> | <p>Практическое умение использовать современный пакет(ы) программ и самостоятельно выполнять расчеты электромагнитных полей</p>  |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Увеличить наглядность изложения, заменяя статичных чертежей на динамические картины поля.</li><li>• Расширить охват материала за счет заранее заготовленных примеров и задач</li></ul>  | <ul style="list-style-type: none"><li>• Самостоятельно манипулировать «полевой» терминологией, конфигурацией расчетной области, граничными условиями и свойствами сред,</li><li>• Непосредственно наблюдать за эффектом от изменения тех или иных параметров</li></ul> |
| <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

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 компьютерное программе, не  
может оценить их влияние на достоверность полученного ответа

# Соотношение между теорией и практикой компьютерного моделирования

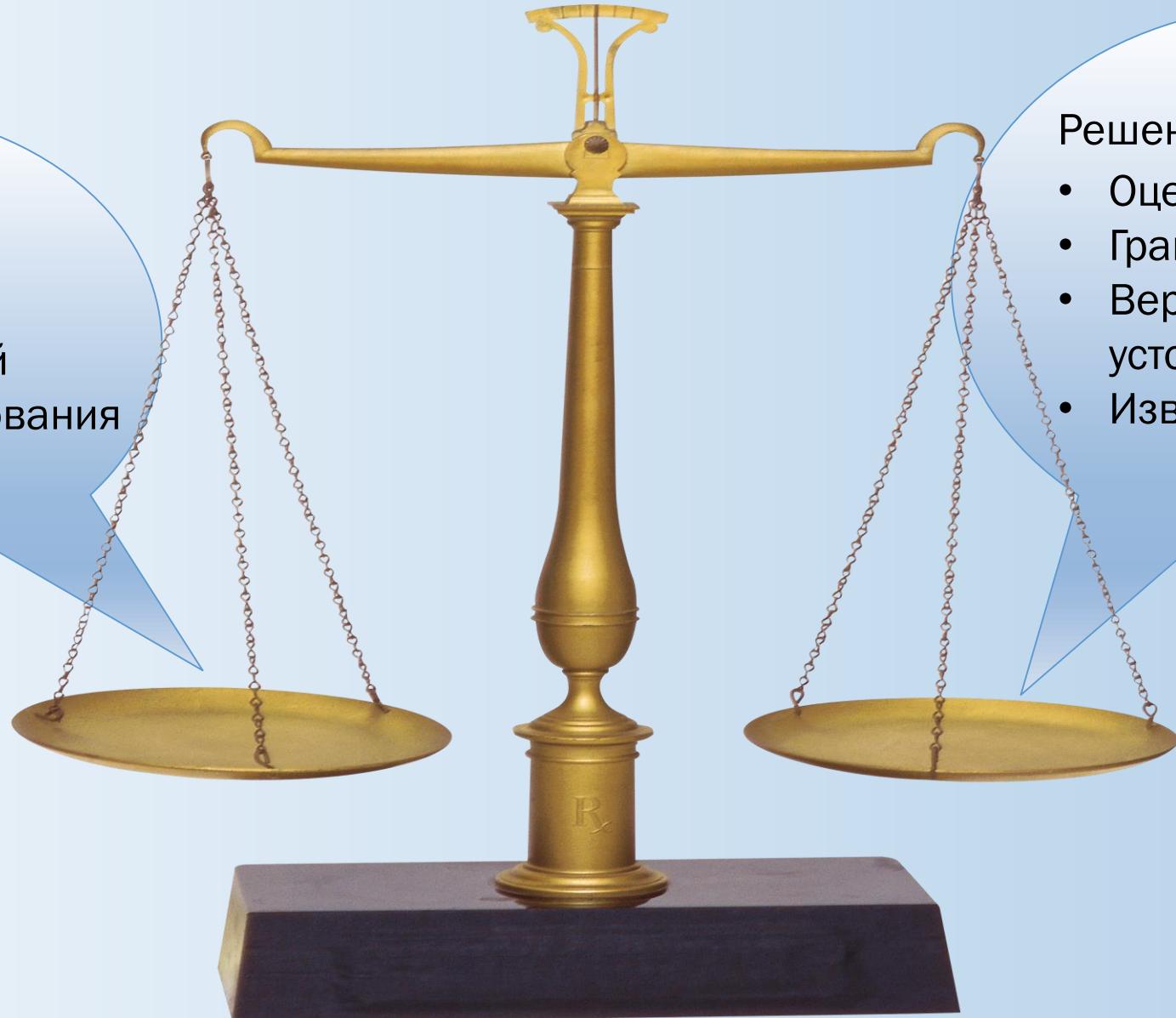
11

Численный метод:

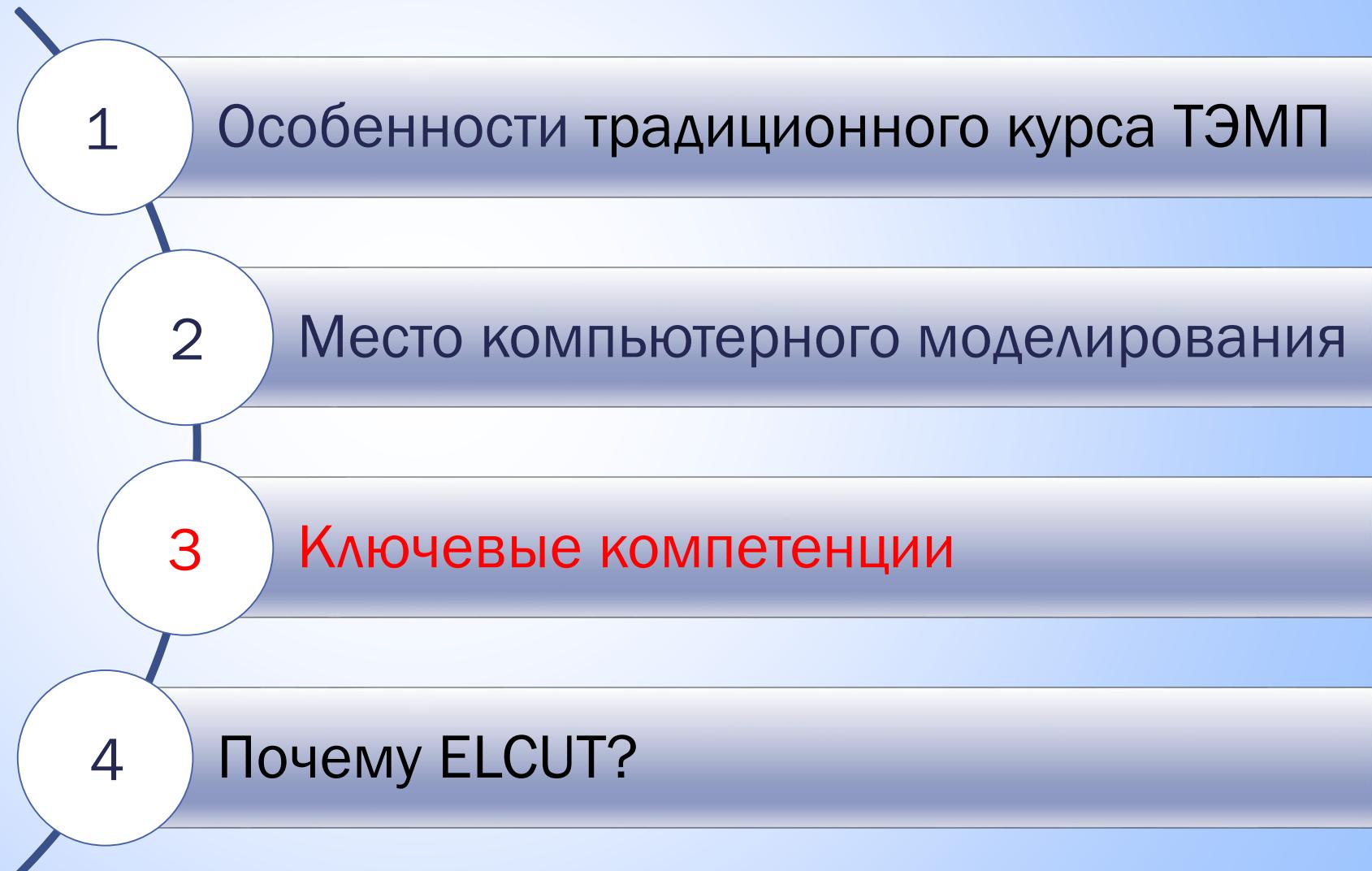
- Сущность
- Вывод уравнений
- Техника использования

Решение задач:

- Оценка допущений
- Границные 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

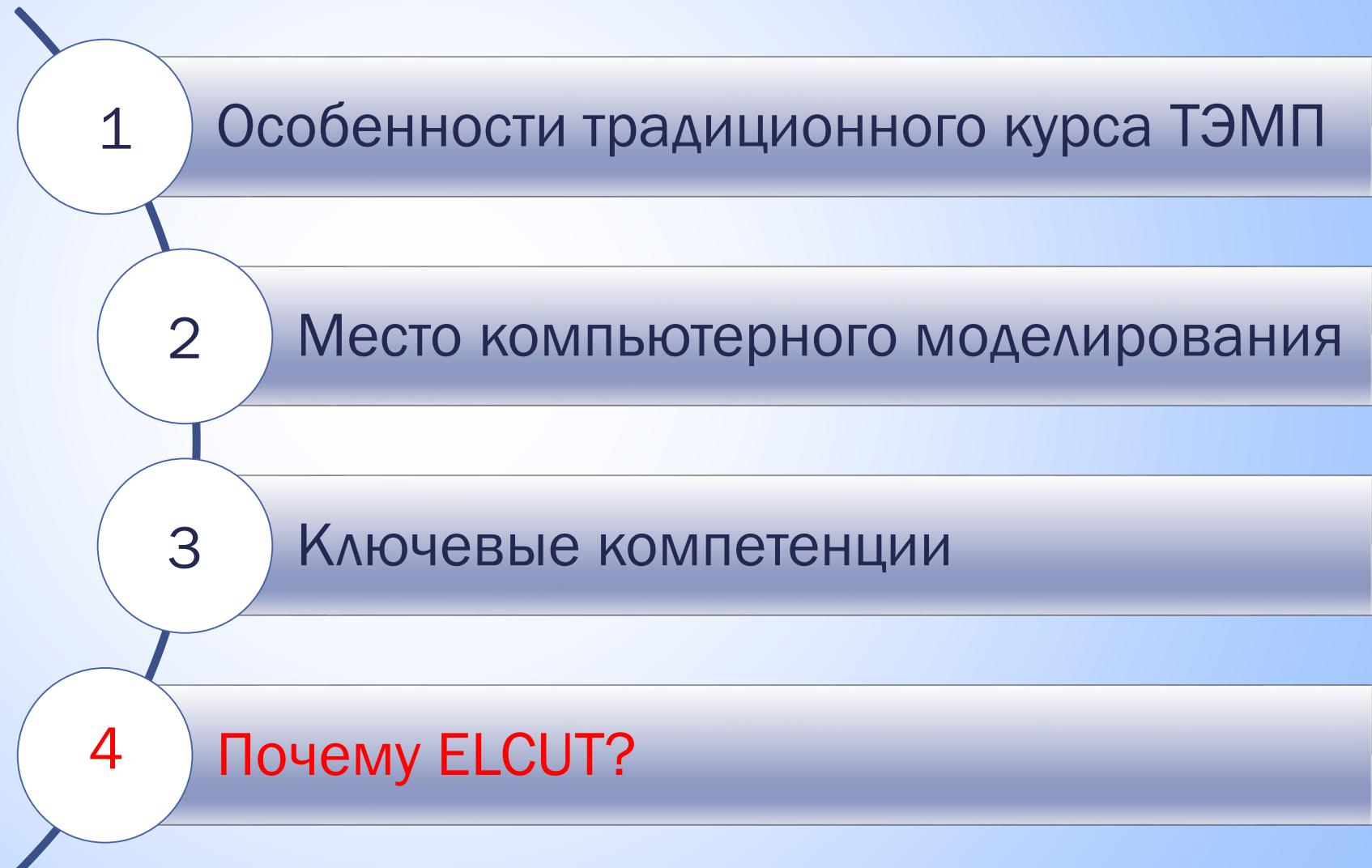
## Концептуально:

1. Видеть полевую проблематику в частных практических задачах
2. Уметь выбирать правильную формулировку задачи, т.е. подмножество уравнений Maxwella 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



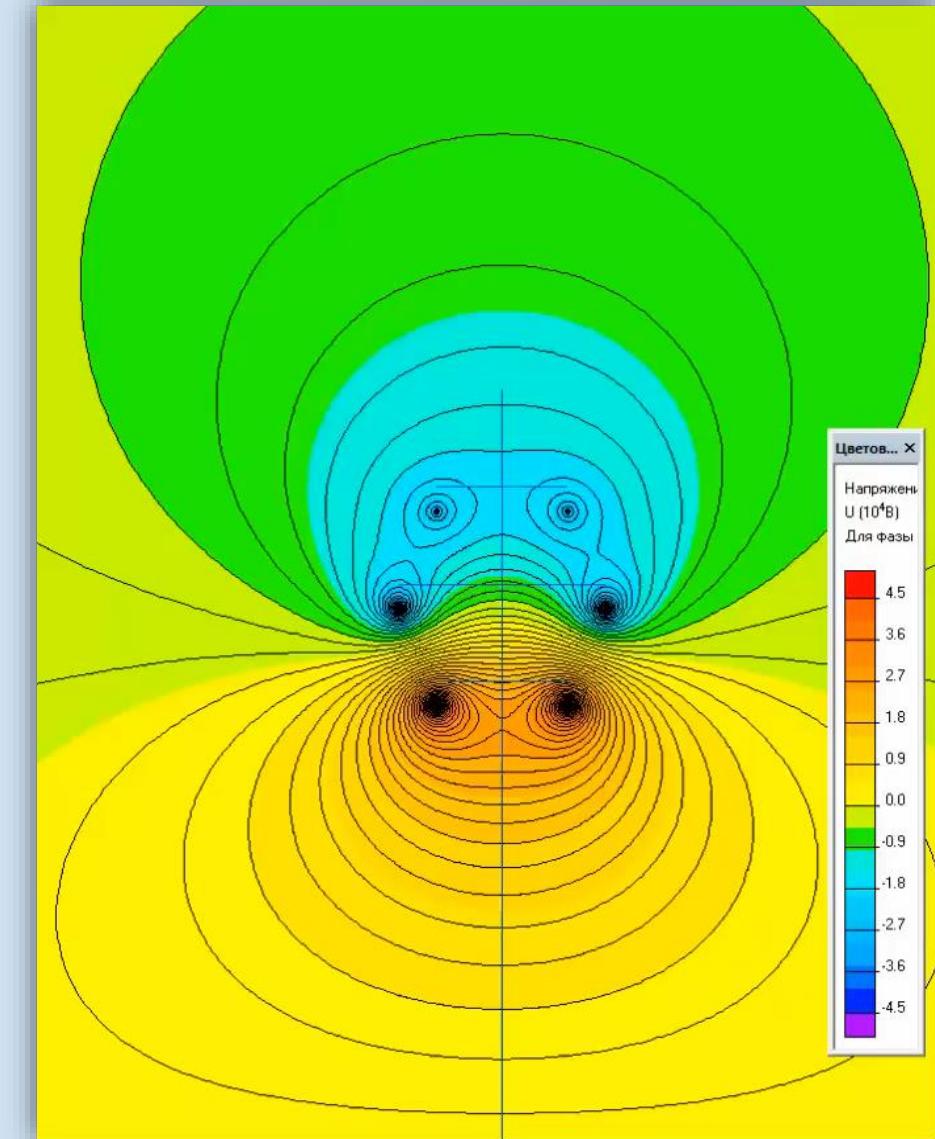
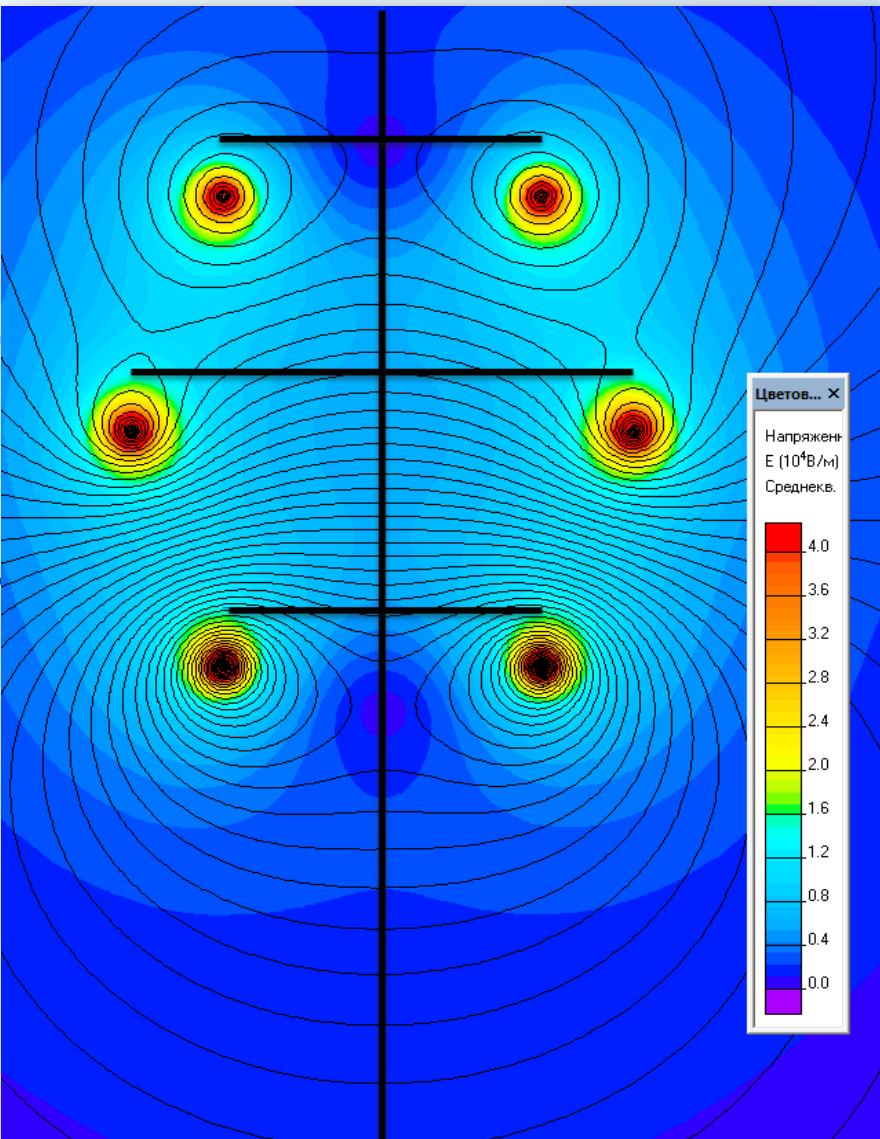
# Выбор программного обеспечения для моделирования поля в курсе ТЭМП

| Класс ПО       | Примеры                  |   |   |
|----------------|--------------------------|---|---|
| Бесплатное ПО  | FEMM                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Всегда доступно</li> <li>• Удобно для домашней работы</li> <li>• Малый объем документации</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ограниченнная функциональность</li> <li>• Трудность использования</li> <li>• Недостаточная визуализация результатов</li> </ul> |
| Средний класс  | ELCUT<br>Comsol          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Доступна учебная лицензия</li> <li>• Оптимальная функциональность и автоматизация</li> <li>• Взаимодействие с другими программами</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Не доступен дома</li> <li>• Требует финансирования</li> </ul>  |
| Тяжелые пакеты | Maxwell<br>Opera<br>Flux | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Максимальная функциональность</li> <li>• Возможность решения научных и инженерных задач</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Очень дорого</li> <li>• Высокие требования к компьютеру</li> <li>• Длинный период обучения</li> </ul>                          |

# Ключевые моменты: визуализация поля

17

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

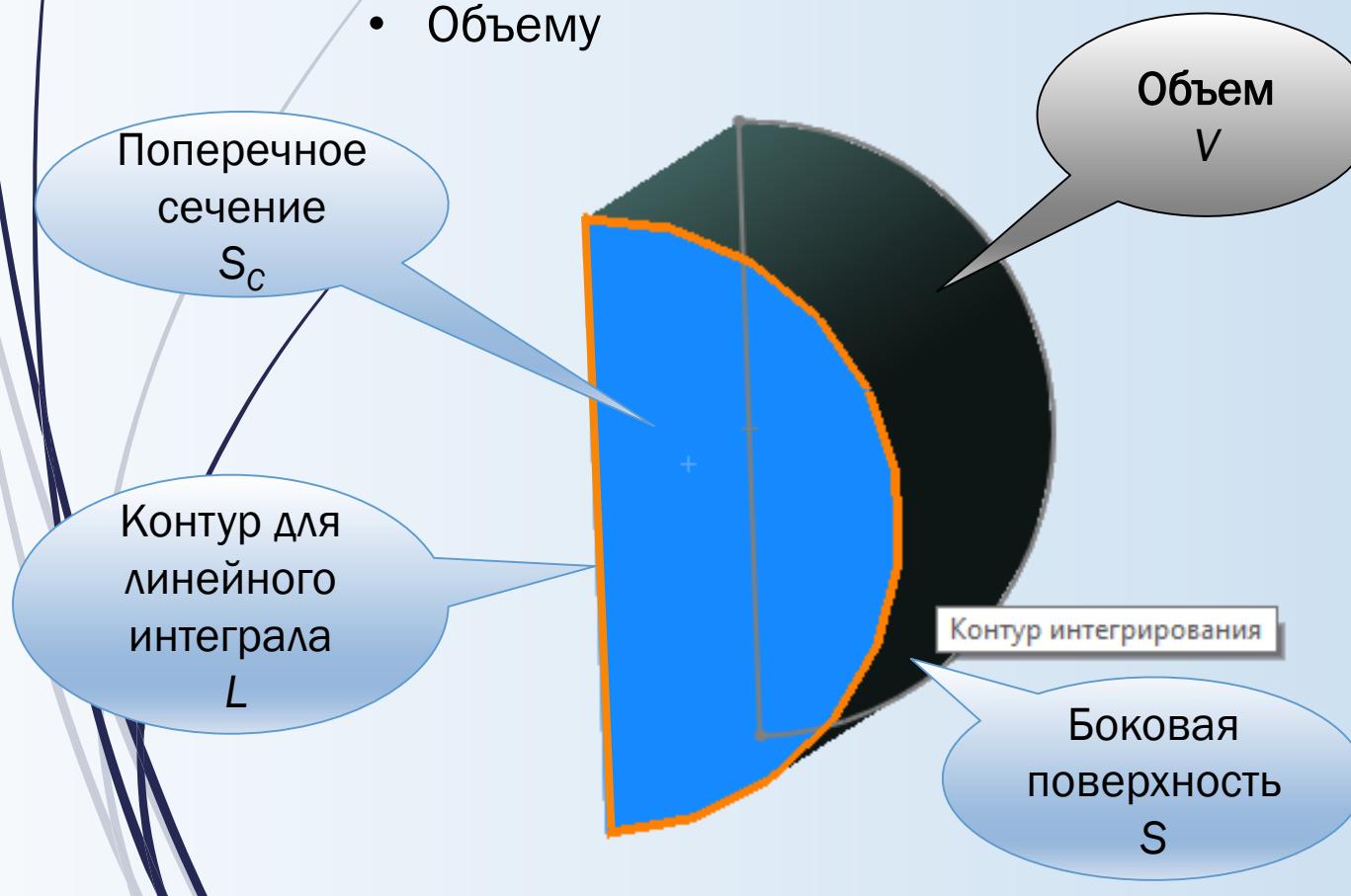


# Ключевые моменты: извлечение параметров

Интегральный калькулятор ELCUT позволяет визуально проверить основные законы электромагнетизма

Интегрирование выполняется по:

- Линии
- Поверхности
- Объему



Калькулятор

- Физические величины**
  - Электрический заряд**:  $Q_s = 1.4377e-17 \text{ Кл}$
  - Механическая сила**:  $f = 1.4001e-17 \text{ Н}$ ,  $\phi = 0^\circ$ ,  $f_z = 1.4001e-17 \text{ Н}$ ,  $f_r = 0 \text{ Н}$
  - Энергия электрического поля**:  $W = 2.0379e-16 \text{ Дж}$
  - Поверхностная энергия**
  - Разность потенциалов**:  $\Delta U = 0.0010111 \text{ В}$

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

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

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

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

# Пример: компьютерная модель лабораторной работы

19

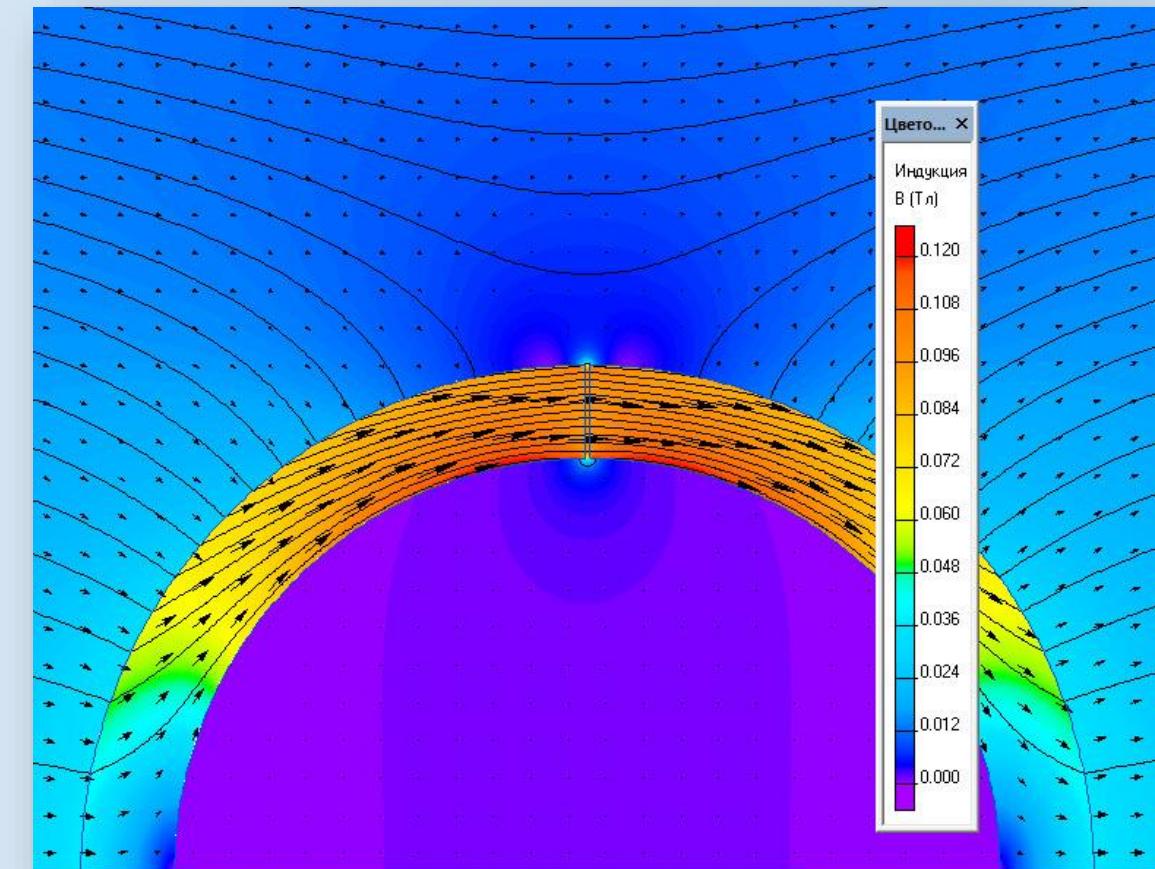
## Исследование экранирования в постоянном и переменном магнитном поле

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 $\Delta$ : | 5         | mm  |
| Internal Radius $R_1$ :     | 23        | mm  |
| External Radius $R_2$ :     |           | mm  |
| Cylinder Length L:          | 46        | mm  |

Calculate

## Calculation Results

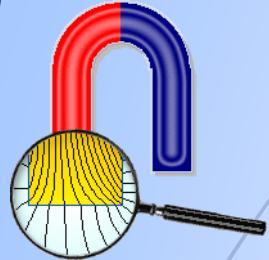
| # | Geometry | f, Hz | Material | $\mu_R$ | $\sigma, S/m$ | $\Delta, mm$ | Gap  | $H_{ext}, A/m$ | $H_{inside}, a/M$ | k     | Theory |       |
|---|----------|-------|----------|---------|---------------|--------------|------|----------------|-------------------|-------|--------|-------|
| 1 | Sphere   | 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

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

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 областях

- 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)
- CCT (Мытищи)
- з-д Элеконд (Сарапул)

### Обогащение и сепарация:

- Продэкология (Ровно)
- Рудформаш (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 Сибирской 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

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

$$U=f(t)$$

- Активный, реактивный ток
- Омические потери
- Реактивная мощность

- Нелинейные диэлектрические среды

## Магнитное поле

### Магнитостатика

- Индуктивность
- Насыщение ферромагнетиков

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

$$I=f(t)$$

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

- 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



Электростатика

Электрическое  
поле в  
проводнике

Магнитостатика

Магнитное  
поле  
переменного тока

Потери

Температура

Силы

Температурная  
задача

Упругие  
напряжения и  
деформации

# Функциональные подсистемы ELCUT

26



# Спасибо за внимание!

27

- Эту презентацию и примеры решенных задач можно найти здесь:  
[elektro2017.elcut.ru](http://elektro2017.elcut.ru)
- Бесплатную Студенческую версию ELCUT для просмотра примеров и первого знакомства можно загрузить здесь:  
[http://elcut.ru/free\\_soft\\_r.htm](http://elcut.ru/free_soft_r.htm)
- Связаться с докладчиком: [simon@tor.ru](mailto:simon@tor.ru)

Искренне ваши:



**ELCUT**

Новый подход к  
моделированию полей

