

ELCUT – программа конечно-элементного моделирования низкочастотных электромагнитных полей: опыт разработки, исследований и преподавания

1



Уважаемые коллеги!

Цель нашего сообщения – познакомить вас с программой ELCUT - инструментом численного моделирования двумерных и трехмерных полей, описываемых уравнениями Пуассона и диффузии.

Авторский коллектив включает двух заведующих старейшими и известнейшими в стране кафедрами теоретической электротехники:

член-корреспондент РАН Павел Анфимович Бутырин – глава кафедры ТОЭ в МЭИ и профессор Николай Владимирович Коровкин – зав. аналоговой кафедрой в Петербургском политехническом университете.

Меня зовут Семен Давидович Дубицкий, я представляю команду разработчиков программы ELCUT

2



Мы поговорим о происхождении программы ELCUT, ее истоках, идеологии, позиционировании;

затем обсудим сегодняшний состав пакета и его возможности моделирования;

представим некоторые из решенных задач последнего времени, и

обсудим полезность использования ELCUT в преподавании теории электромагнитного поля в рамках дисциплины теоретической электротехники.

3



Компания основана осенью 1988 г., в основном выходцами из завода «Электросила», где к тому времени функционировала сильная школа численного моделирования электромагнитных полей.

В основе математического аппарата ELCUT положены исследования в области численного моделирования, выполненные академиком РАН К.С. Демирчяном, проф. В.В. Домбровским, проф. Ю.В. Ракитским, и их учениками, выпускниками ленинградского политехнического института и ленинградского университета.

Основатели задались целью создать удобный инструмент для пользователей-инженеров, в том числе тех, для кого полевые расчеты не являются основным делом, а выполняются от

случая к случаю. Для этого инструмент должен быть компактным, легким, интуитивно ясным и функционально полным.

4

Пользователи ELCUT

Индустрия	Исследования	Образование
Электроэнергетика: <ul style="list-style-type: none"> Электросила ЭЭО (Великие Луки) СЭС (Екатеринбург) РосЭлектроТранс (Е-бург) УралЭлектроТехмаш Севкабель (Петербург) ССТ (Магидж) 3-д Электра (Саратов) Обогащение и сепарация: <ul style="list-style-type: none"> Продолгология (Ровно) Радары (Варонек) Механобр (СПб) Напыление в магн. поле: <ul style="list-style-type: none"> Изовак (Минск) Сидраб (Изра) Строительное проектир. Магнитные технологии	Физика: <ul style="list-style-type: none"> СИИИ Дубна ВНИИЭР Саратов ФИАН Москва Ин-т Сильноточной электроники РАН (Томск) Электроника: <ul style="list-style-type: none"> ВНИИКТ (Москва) ЦНИИ Электроприбор НИИЭФА им. Ефремова Ин-т Электроэнергетики РАН НТЦ Высоковольтной аппаратуры (Саров) ВИТ (Запорове) Материаловедение: <ul style="list-style-type: none"> ЦНИИ Прометей Магнетон (Владимир) ЦНИИТМАШ (Москва) 	Москва: <ul style="list-style-type: none"> МЭИ МАИ МИЭМ (ВШЭ) Архитектурно-строительный ун-т Санкт-Петербург: <ul style="list-style-type: none"> Политехнический ун-т СПб ГУАП Ун-т путей сообщения ИТМО ЛЭТИ Урал и Сибирь: <ul style="list-style-type: none"> Томский Политехн. ун-т Томский гос. ун-т Новосиб. ГТУ Новосиб. Сибстрин Уральский федер. ун-т Сибирский федер. ун-т

ELCUT как коробочный продукт продается пользователям с полки без всякой кастомизации. Тем не менее, он с успехом применяется в разных областях индустрии, в научных исследованиях и для обучения студентов.

В электротехнике – это поставщики электрических машин, трансформаторов, высоковольтных аппаратов, кабельных изделий, электролитических конденсаторов и систем электрообогрева.

Строители используют ELCUT для расчета тепловой эффективности ограждающих конструкций с учетом локальных мостиков холода.

Из исследовательских организаций программой пользуются создатели электрофизической аппаратуры, институты материаловедения, особенно магнитных материалов, неразрушающий контроль.

Пользователи отмечают, что ELCUT отлично подходит в качестве пакета первого выбора, в т.ч. в учебных целях. Этот факт по достоинству оценен десятками технических ВУЗов страны, часть из которых упомянута на слайде

5

Обзор ELCUT: постановки задач

Электрическое поле	
Электростатика <ul style="list-style-type: none"> Векторы Электрическая проницаемость 	Постоянный ток <ul style="list-style-type: none"> Сопротивление Омические потери
$U = U_{\text{электр}}(t) + \varphi$ <ul style="list-style-type: none"> Активный, реактивный ток Омические потери Реальная мощность 	$U = f(t)$ <ul style="list-style-type: none"> Неоднородные диэлектрические среды
Магнитное поле	
Магнитоэлектроника <ul style="list-style-type: none"> Индуктивность Насыщение ферромагнетиков 	$I = I_{\text{электр}}(t) + \varphi$ <ul style="list-style-type: none"> Эффект Холла, эффект Бланта Индуктивность при повышенной частоте Потери в проводниках и в магнетиках
$I = f(t)$ <ul style="list-style-type: none"> Магнитное поле при натуральном и искусственном возбуждении 	
Температурное поле, механическая прочность	
Установившаяся температура $T = f(t)$ <ul style="list-style-type: none"> Упругость 	<ul style="list-style-type: none"> Трещины: условия, концепция, радиации Температурное поле, тепловые потоки Нелинейная теплопроводность и теплоемкость Плоско-напряженное или плоско-деформированное упругое состояние

Поскольку решаются уравнения поля в квазистационарной формулировке, система более-менее распадается на электрическое поле и магнитное поле.

Линейка формулировок для электрического поля начинается с задачи электростатики, которая изучает электрическое поле в диэлектрике, и родственной ей задачи растекания постоянных токов в проводящем массиве, которая изучает электрическое поле в проводниках.

Если добавить в задачу время, анализ становится более содержательным. Время можно добавить в предположении синусоидального изменения поля со временем на фиксированной частоте – тогда мы остаемся в частотной области. Формулировка похожа на электростатику, но в игру вступает проводимость диэлектрика, позволяя учесть токи утечки и потери от них.

Если этого недостаточно, то предлагается максимально полная нестационарная формулировка с дискретизацией также и по времени. Она позволяет учесть нелинейные свойства диэлектриков – зависимость магнитной проницаемости и электропроводности от поля.

Магнитные задачи начинаются с магнитоэлектроники магнитного поля постоянных магнитов и постоянных токов с учетом нелинейности ферромагнетика. В частотной области добавляется электропроводность материалов и вихревые токи. Точный учет нелинейности в этой формулировке не возможен, но существуют приближенные методики, и они использованы. Если этого недостаточно, то используется нестационарная формулировка с полным учетом насыщения материала и анализом вихревых токов.

Внешнее сходство уравнений позволяет распространить имеющийся математический аппарат на задачи теплопроводности – расчет температурного поля в системе твердых тел. Формулировка включает разнообразные нелинейности, в том числе такую экзотику как источник, мощность которого зависит от температуры, и специальные граничные условия – конвективного и радиационного теплообмена.

Эти же уравнения, переписанные относительно потенциала в виде двумерного вектора перемещений, позволяют рассчитывать поле механических напряжений и деформаций в упругой среде.



В ELCUT организован механизм межзадачной связи.

Сильная связь применяется для совместного решения уравнений магнитного поля и присоединенной электрической цепи.

Последовательная (слабая) связь задач позволяет передать вычисленную плотность потерь или механических усилий из электромагнитной задачи в температурную или упруго-деформационную.

Специальный вид связи используется для задания начальных условий нестационарных задач и для запоминания и повторного использования вычисленного магнитного состояния магнитомягкого материала.

Температурное поле также может использоваться для уточнения удельного электрического сопротивления проводниковых материалов.



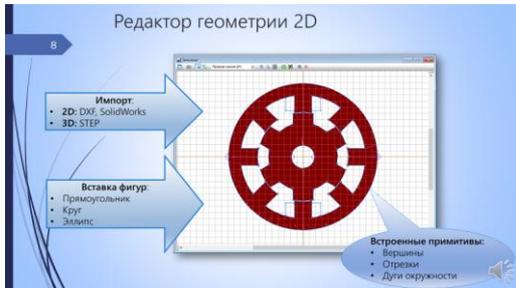
Последовательность решения задачи в ELCUT предельно проста:

- нарисовать геометрию модели,
- сгенерировать расчетную сетку конечных элементов,
- указать граничные условия, задать свойства материалов,
- решить дискретную задачу,
- проанализировать результат решения, извлекая из него локальные и интегральные инженерные параметры

Перечисленным этапам решения соответствуют подсистемы ELCUT:

- Геометрический редактор,
- Подсистема физических данных,
- Редактор электрической цепи,
- Формирователь матрицы и решатель системы уравнений,
- Подсистема анализа решения (постпроцессор).

8

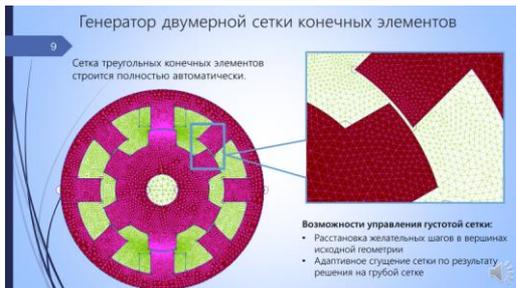


Пройдем вкратце по отдельным подсистемам.

Геометрический редактор – это окно для отрисовки геометрии и построения сетки конечных элементов. На слайде нарисовано поперечное сечение вентильного реактивного двигателя: видны ротор, статор, одна из статорных катушек. Набор геометрических примитивов для отрисовки модели – вершина, отрезок, дуга окружности – аскетичен, но достаточен. Для ускорения работы есть также возможность вставлять в модель геометрические фигуры: круг, прямоугольник, эллипс.

Фрагменты геометрии можно не только отрисовать, но и импортировать из CAD в формате DXF либо из эскиза SolidWorks.

9

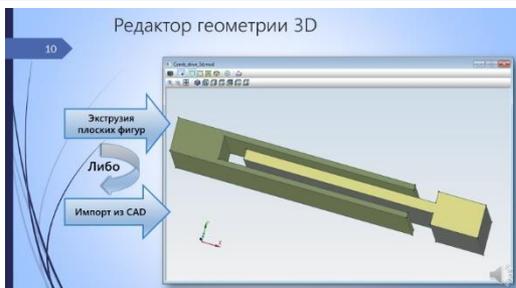


Когда геометрия готова, наступает время генерации сетки конечных элементов. ELCUT использует единственный тип двумерного конечного элемента – линейный треугольник, но все заточено на эффективную поддержку большого числа элементов -до нескольких миллионов на обычном офисном компьютере.

Генерация сетки может происходить полностью автоматически – это дает хорошее начальное приближение, либо с учетом пожеланий пользователя к густоте сетки в отдельных зонах.

Есть также подсистема адаптивного сгущения сетки на базе апостериорной оценки погрешности.

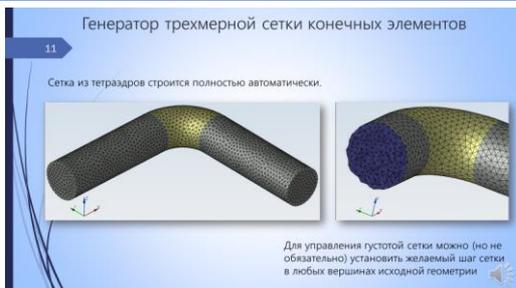
10



Трехмерная геометрия возникает в ELCUT одним из двух способов: экструзия из плоского эскиза или импорт 3D-модели из CAD через нейтральный формат STEP.

На рисунке представлена модель микро-электромеханического устройства - ячейки гребенчатого привода. Она с легкостью получается путем экструзии из плоского эскиза.

11



Вне зависимости от источника трехмерной геометрии построение сетки из тетраэдров происходит в окне редактора. Густотой сетки можно управлять также, как в двумерной модели заданием желательного размера элементов в вершинах.

Сетку можно контролировать как на поверхностях тел, так и в плоских сечениях.

12

Работа с данными: материалы, источники, граничные условия

Свойства материала для расчета магнитного поля с вытекающими токами

- Магнитные свойства
- Электрические свойства
- Источники поля
- удельные магнитные потери

Подсистема работы с физическими данными хранит и обрабатывает свойства материалов, граничные условия и источники поля.

На экране представлено окно работы со свойствами тела для задачи магнитного поля переменных токов: оно содержит магнитную проницаемость (постоянную или нелинейную), электропроводность, которая может зависеть от температуры, а также коэффициенты удельных потерь для вычисления потерь в стали по формуле Бертогги.

Кроме того, в этом окне задается источник поля в виде заданного тока или приложенного напряжения с элементами простой встроенной электрической цепи. Если цепь должна быть более сложной, то подключается отдельный компонент – электрическая цепь произвольной структуры.

13

Подключенная электрическая цепь

втор. обмотка - 1000 R1 1e-9 C1
втор. обмотка +

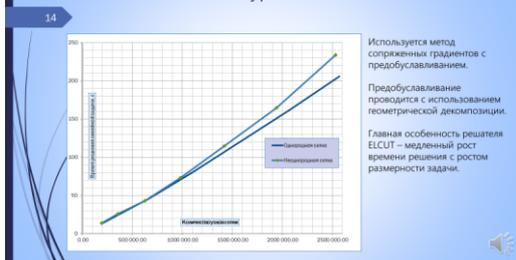
- Пассивные элементы: резистор, конденсатор, катушка индуктивности
- Источники: источник тока и источник напряжения
- Элементы связи с полевой частью – блоки ELCUT

Задача расчета переменного магнитного поля может сочетаться с уравнениями подключенной электрической цепи.

Среди элементов цепи могут быть пассивные элементы – резистор, конденсатор, индуктор, идеальные источники тока и напряжения и элементы связи цепной и полевой части модели.

14

Решатель системы уравнений

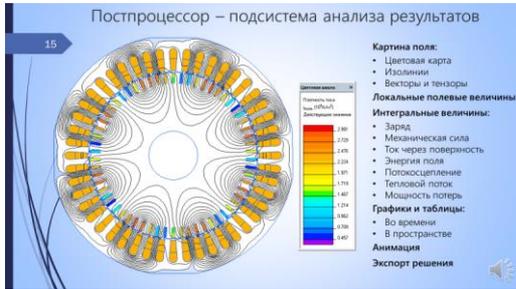


Когда задача сформирована, в работу вступает система формирования и решения системы алгебраических уравнений. Сборка глобальной матрицы производится не по узлам, как это обычно принято, а по ребрам.

Система решается методом сопряженных градиентов, который, как известно, для хорошей сходимости требует предобуславливания. Предобуславливатель ELCUT – основной фактор его высокой эффективности. Он основан на нашем методе геометрической декомпозиции, работа которого начинается еще на этапе генерации сетки, которая разбивается на связные домены заранее оцененного оптимального размера. Затем глобальная матрица формируется из этих доменов в виде блочно-диагональной структуры.

Эта система мер приводит к необычно пологой зависимости времени счета от размерности задачи: время пропорционально числу степеней свободы приблизительно в степен $1,10 \dots 1,15$ против квадратичного роста, характерного для прямых методов.

15



Законченное решение анализируется при помощи постпроцессора. Он показывает картину поля в виде цветных карт, изолиний, семейства вектором и тензоров, а также вычисляет локальные значения поля (в ответ на клик мыши).

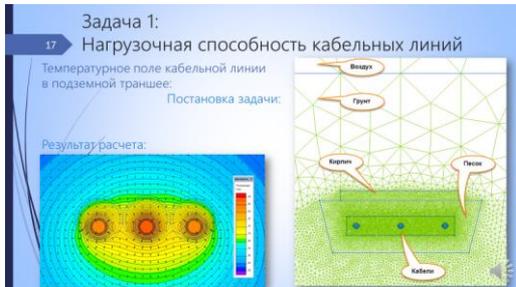
Постпроцессор также способен без обращения к решателю вычислять интегральные параметры путем интегрирования по линиям, поверхностям и объемам.

16



Далее следует краткий обзор прикладных задач, решенных нами за последнее время.

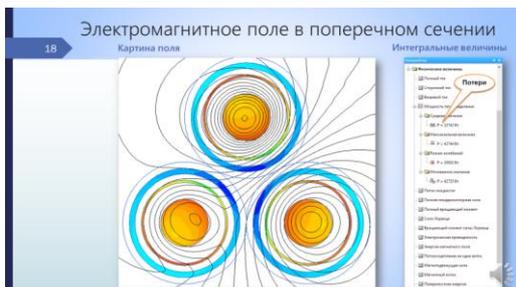
17



Рассматривается задача расчета пропускной способности по току подземной кабельной линии при симметричной нагрузке в установившемся режиме.

Исходными данными для нее являются конструкция кабелей, схема их расположения и конструктивные особенности линии: лоток, засыпка, возможные металлические конструкции, например, близко-лежащие трубопроводы, шпунт и т.п.

18



Сначала решается задача электромагнитного поля с вихревыми токами, источником для которой является заданный ток, а результатом – распределение плотности тока по сечению жилы, экрана, брони и т.п., и вызванные полным током омические потери.

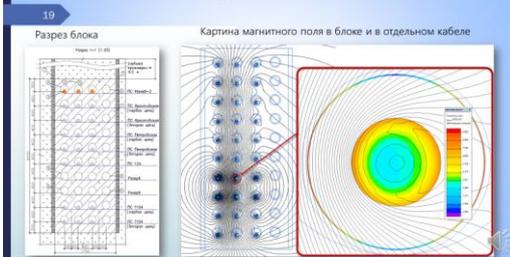
Вычисленные таким образом потери на переменном токе в полной мере учитывают все проводниковые оболочки кабеля, эффект близости и поверхностный эффект.

Затем вычисленные потери передаются в задачу температурного поля, которая учитывает особенности укладки, грунта и конвекцию с поверхности.

Опыт показывает, в случае одиночной линии результат практически точно совпадает с классическим расчетом по МЭК 60287.

19

Кабельный блок для 10-ти линий

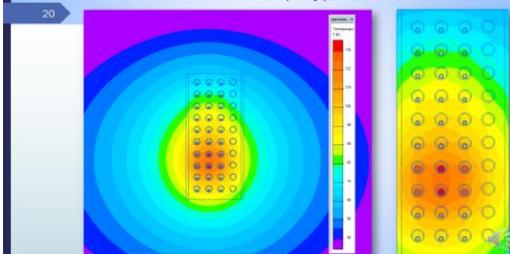


Однако, в случае близкого расположения нескольких линий результат моделирования существенно отличается от расчета по стандарту МЭК.

Нами исследован бетонный кабельный блок, содержащий 10 трехфазных линий: 8 по 110 Кв и 2 – 330 кВ. Расчеты показывают, что стандарт 60287 существенно недооценивает степень электромагнитного и температурного взаимодействия кабелей между собой.

20

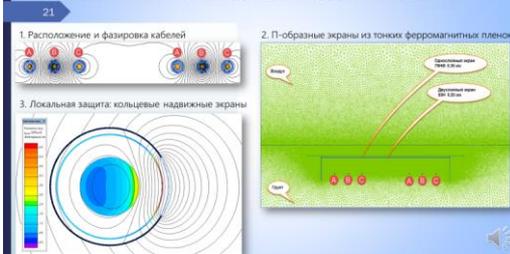
Кабельный блок: температурное поле



Как величины потерь в отдельных жилах и экранах, так и результирующие температуры оказываются выше, рассчитанных по стандарту.

21

Внешнее магнитное поле кабельной линии



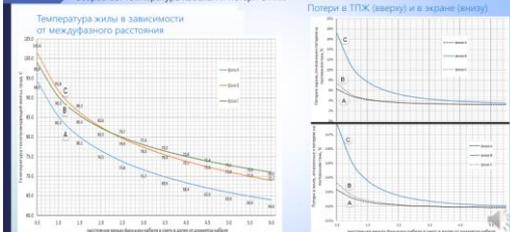
Следующая задача, тесно связанная с первой, касается оценки магнитного поля кабельной линии над поверхностью земли. Если линия проходит в населенном месте, это поле необходимо контролировать на соответствие гигиеническому нормативу.

Наш опыт показывает, что для одиночной линии, даже с сильным током, параметры норматива обычно выдерживаются. В случае двух или более линий, поле над ними нужно контролировать и при необходимости принимать меры по его снижению.

22

Влияние междофазного расстояния на температуру

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

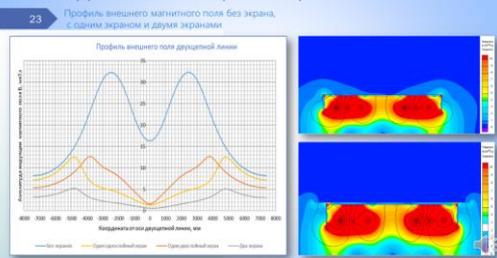


Нами замечено, что некоторые мероприятия по снижению магнитного поля имеют неблагоприятный температурный эффект.

Это обстоятельство вынуждает контролировать не только магнитное, но и температурное состояние кабелей при планировании мероприятий по снижению магнитного поля над ними в интересах электромагнитной экологии.

23

Эффективность П-образных экранов



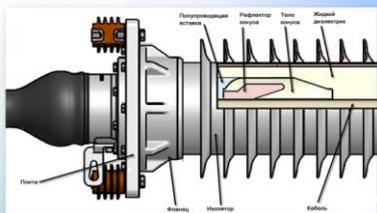
Одной из мер по снижению поля является размещение над линией плоских или П-образных тонкопленочных экранов из материалов с высокой магнитной проницаемостью: пермаллой или аморфные магнитные сплавы.

С вычислительной точки зрения эта задача характеризуется высокой разномасштабностью: диапазон характерных размеров от десятков метров до сотен или даже десятков микрон (толщина пленки). Лишь немногие программы, в числе которых ELCUT, способны генерировать разумную сетку конечных элементов в такой ситуации.

24

Сглаживание поля в кабельной муфте

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



Следующая задача относится к проектированию кабельной арматуры. Как известно, внутри соединительной или концевой кабельной муфты неизбежен срез экрана и полупроводящего слоя под ним. Вблизи среза происходит резкое увеличение электрического поля, которое нуждается в сглаживании. Средство сглаживания для высоковольтных кабелей с пластмассовой изоляцией является специальный элемент муфты – стресс-конус.

25

Конструкция стресс-конуса

25 Стресс-конус в сборе



Стресс-конус в разрезе:
1. Основное изоляционное тело (белое)
2. Рефлектор стресс-конуса (черный)

Мы рассматривали и оптимизировали конструкцию стресс-двухэлементного стресс-конуса.

Отличием от предыдущих работ являлась формулировка задачи на переменном токе с токами утечки, что позволило включить в пространство оптимизируемых параметров не только орму и диэлектрическую проницаемость материалов, но и электропроводность.

По результатам расчетов муфты были спроектированы НИИ Севкабель, изготовлены московским заводом «Изолятор» и прошли испытания на подольском полигоне ВНИИКП.

26

Мультифизический анализ сварочного трансформатора

26 Трансформатор для машины контактной сварки газопроводов высокого давления. Завод ПоковЭлектросвар

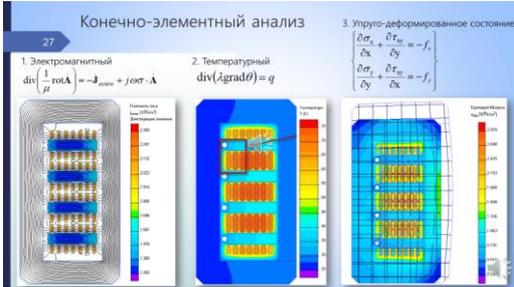


Особенности:
1. Рабочий режим близок к КЗ;
2. Необходимо низкая индуктивность рассеяния;
3. Повторно-кратковременная нагрузка;
4. Ограниченный габарит;

Следующая задача касалась всестороннего моделирования сварочного трансформатора для машины контактной сварки морских трубопроводов большого диаметра.

Особенность этого устройства в том, что оно работает по сложному циклу нагрузки вблизи режима короткого замыкания. Оптимизация его состоит во всемерной снижении индуктивности рассеяния при соблюдении температурных и механических нагрузок.

27



Модель состояла из трех взаимосвязанных задач:

1. Магнитное поле переменных током совместно с подключенной цепью в режиме холостого хода, короткого замыкания и номинальной нагрузки.
2. Температурное поле, обусловленное потерями при номинальной нагрузке, с учетом водяного и воздушного охлаждения
3. Анализ механических напряжений в компаунде, вызванных совместным действием термических деформаций и магнитных сил.

28



Последняя из рассмотренных задач – анализ параметров микрополосковой линии связи на печатной плате с учетом технологических факторов: паяльной маски, покрытия, компаунда и технологических искажений формы.

Эта задача интересна тем, что она в целом относится к области высокочастотного поля, то есть за пределами возможностей ELCUT. Однако, в поперечном сечении если мода колебаний известна заранее, расчет электрического и магнитного поля в квазистационарном приближении тоже дает полезные и нетривиальные результаты.

31



Заключительная тема:

использование компьютерного моделирования и программы ELCUT в преподавании электротехнических дисциплин

32

32

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	<ul style="list-style-type: none"> • Навыки дифференцирования и интегрирования • Понятия и техника векторного анализа: градиент, дивергенция, ротор, циркуляция, поток.
Визуальность	<ul style="list-style-type: none"> • Преобладают статические картинки. • Трудно построить визуальные образы ключевых концептов.
Ключевые компетенции	<ul style="list-style-type: none"> • Умение вычленивать и сформулировать полевую задачу; • Навык постановки граничных условий; • Умение получить решение и верифицировать его.

Курс теории электромагнитного поля, входящий в программу дисциплины теоретические основы электротехники, слушают все будущие инженеры-электрики.

Курс имеет репутацию сложного:

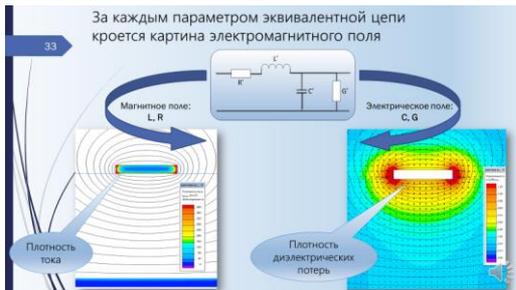
- во-первых, из-за принятой аксиоматической манеры изложения,
- во-вторых, потому что пререквизиты включают понятия векторного анализа, такие как градиент, дивергенция, ротор, циркуляция, поток и навык манипулирования с ними
- в-третьих, основные концепции теории поля не слишком наглядны и плохо поддаются визуализации, что противоречит современным трендам восприятия информации

- и, наконец, основным способом решения полевых задач является работа с аналитическими формулами и техниками, которые не являясь первостепенным предметом обучения, сами по себе сложны и громоздки

Следует сосредоточиться на основных целях обучения, т.е. на том знании, которое должно остаться в умах учеников после того, как вспомогательные приемы забудутся.

Это, прежде всего умение увидеть, вычленив и сформулировать полевую задачу, навык правильной работы с граничными условиями, способность довести задачу до результата, верифицировать его и извлечь из решения требуемые параметры. Заметим, что этот перечень инвариантен относительно того, численный или аналитический подход используется для решения уравнений.

33



Включение в ткань курса численного моделирования с его наглядностью, визуальностью и непосредственным чувственным ощущением улучшает климат для обучающихся, повышает их мотивацию и интерес.

На простом примере микрострипа, т.е. проводника печатной платы над заземленным листом, можно показать, как один и тот же объект при низкой частоте является просто проводником, а при высоких частотах имеет все признаки устройства со многими параметрами. В течении одного занятия нетрудно показать, как с помощью электростатической формулировки можно вычислить емкость и индуктивность линии на постоянном токе, а, следовательно, оценить волновое сопротивление и скорость распространения сигнала.

Введя в рассмотрение электрическую и магнитную задачу в частотной области, можно дополнить предыдущий расчет анализом потерь в проводнике и в диэлектрике, уточнить сопротивление и индуктивность на переменном токе, ввести понятие частотной характеристики линии и сформировать ее полную эквивалентную схему.

34

Преимущества компьютерного моделирования

Для преподавателя	Для студента
<ul style="list-style-type: none"> Обучить студентов мета-алгоритмам: <ol style="list-style-type: none"> 1. Классифицировать задачу 2. Выделить и упростить расчетную область 3. Задать граничные условия и источники 4. Анализировать и верифицировать результаты Увеличить наглядность изложения, заменяя статичные чертежи на динамические картины поля. Расширить охват материала за счет заранее заготовленных примеров и задач 	<ul style="list-style-type: none"> Практическое умение использовать современный пакет(и) программы и самостоятельно выполнять расчеты электромагнитных полей
<ul style="list-style-type: none"> Сформировать живое объемное представление о характере кватерных полей и тенденциях его поведения, вместо слабо усвоенных скалярных понятий 	<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
<ul style="list-style-type: none"> Изложить существо предмета, не спотыкаясь о математические выкладки, но и не опуская их. 	

Для преподавателя использование моделирования позволяет более простыми средствами достичь главной задачи: обучить студентов мета-алгоритмам, не зависящим от конкретного подхода к решению, и мотивировать их, увеличив наглядность важнейших концепций и зависимостей.

Для студентов плюс в том, что он обучается работе с прикладной программой профессионального уровня, которую он может встретить на производстве.

Кроме того, самостоятельное манипулирование граничными условиями и геометрией задачи, наблюдение за результатом в понятной графической форме снимает отчуждение и робость при мысли о расчете поля, поясняет основные концепции и повышает свободу владения материалом.

35

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

Простота получения численного решения влечет за собой также трудности и опасности. Необходимо приводить студентов к пониманию того, что хотя получить численное решение довольно просто, убедиться самому и убедить других в том, что оно верное, весьма важно и весьма непросто.

Задача преподавателя – привить культуру анализа решения, его предпосылок, упрощений и допущений, влияния качества дискретизации на решение и т.п. Время, потраченное на привитие этой культуры не будет напрасным, потому что в ней содержится сама суть предмета.

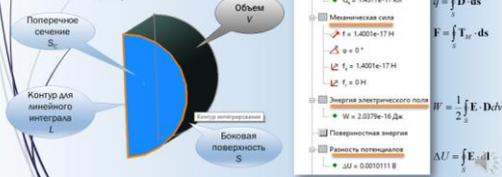
36

Ключевые моменты: извлечение параметров

Интегральный калькулятор ELCUT позволяет визуально проверить основные законы электромагнетизма

Интегрирование выполняется по:

- Линии
- Поверхности
- Объему



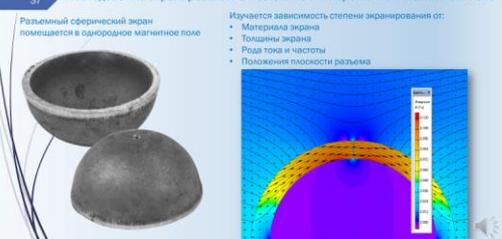
Как уже упоминалось, в состав постпроцессора ELCUT входит вычислитель интегралов, который в ходе одной интерактивной сессии позволяет визуально проверить выполнение интегральных тождеств, таких как теорема Гаусса, закон полного тока, выражение для электромагнитной силы и плотности потока энергии.

Это способствует лучшему усвоению концепций на образном и эмоциональном уровне.

37

Пример: компьютерная модель лабораторной работы

Исследование экранирования в постоянном и переменном магнитном поле



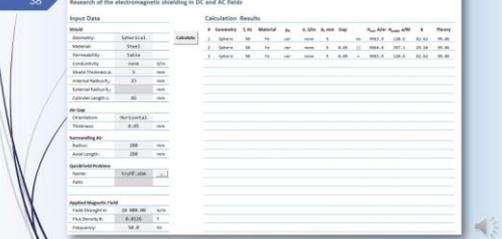
Полезно совмещать натурные лабораторные работы по теории поля с их компьютерными моделями.

В СПбПУ студентам предлагается 15 лабораторных работ по ТЭМП. Для шести из них имеются компьютерные модели в программе ELCUT.

38

Параметризованная модель лабораторной работы

Calculation Results



Параметризованная модель лабораторной работы выполнена в MS Excel.

Интерфейс представляет собой форму для ввода входных параметров (слева) и вывода результатов справа.

Графические изображения в форму не выводятся – для их просмотра лучше использовать ELCUT.

Программа сочетает в одном интерфейсе вычисления через полевую модель ELCUT и по аналитической формуле (правый столбец)

39	Белорусский ГИИР (Минск)	В.Ф. Алексеев, В.Е. Матюшков, В.И. Журавлев	Физические основы проектирования радиоэлектронных устройств (лаб. практикум)	2010
	Белорусский ГТУ (Гомель)	Вороженин 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. Шафанов	Математическое моделирование	2001
	Тамбовский ГТУ	Жуков, Майникова, Николаев, Липинов	Решение задач теплопроводности методом конечных элементов	2014
	УрФУ	Ф.И. Садылов, В.З. Фризен, И.В. Черныш	Виртуальная электротехническая лаборатория	2003
	УрФУ	В.З. Фризен	Методы расчета электрических и магнитных полей	2014
	ЮрГТУ (Новочеркасск)	Ткачев А.Н., Семюк С.С., Шкурлатский И.В.	Математическое и компьютерное моделирование электромагнитных процессов	2010

Для успешного использования моделирования совершенно обязательными предпосылками являются:

- Наличие качественного программного обеспечения, которое позволит сосредоточиться на физической сущности явлений, вместо трудностей манипулировании громоздким пользовательским интерфейсом;
- Хорошее методическое обеспечение курса: наличие пособий, большого набора индивидуальных заданий для самостоятельного решения.

Спасибо за внимание!

40

• Эту презентацию можно найти здесь:

www.elcut.ru/mppei2018



• 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:



Большое количество дополнительной информации о программе ELCUT и ее использовании можно найти на сайте www.elcut.ru

Благодарим Вас за внимание и будем рады Вашим вопросам, замечаниям и предложениям.

Эл. почта службы поддержки ELCUT: info@elcut.ru