



Почтовый, фактический и юридический адрес	Россия, 190013, Санкт-Петербург, Московский пр. 22 лит. Т, помещение 5Н, ООО «Тор»
Электронная почта	info@elcut.ru
Тел./факс	(812) 710-1659, (812) 309-1064
Интернет-сайт	http://elcut.ru/

Примерная программа курса с углублённым изучением магнитных задач

1. Введение. Решение задачи в ELCUT

- 1.1. Основные функциональные характеристики (типы решаемых задач)
- 1.2. Основы метода конечных элементов. Особенности и ограничения ELCUT
- 1.3. Типы версий
- 1.4. Системные требования и поддерживаемые платформы

2. Основные операции

- 2.1. Этапы решения задачи в ELCUT
- 2.2. Структура задачи (файлы, составляющие задачу)
- 2.3. Создание задачи
- 2.4. Создание геометрической модели
- 2.5. Определение физических свойств
- 2.6. Анализ результатов

3. Магнитостатика. Особенности. Граничные условия. Способы визуализации поля

Разбор примера одиночный виток (точечный). *Задание: смоделировать реальный виток (задать плотность тока). Построить график распределения поля вдоль оси.*

Получение однородного поля. Пример: катушка Гемгольца. *Задание: смоделировать катушку Гемгольца (расстояние между витками равно радиусу).*

Задание на дом: разместить третий виток и подобрать ток (положение витка) такое, чтобы распределение поля на оси было линейным.

Пример: соленоид как источник однородного поля. *Задание: смоделировать соленоид и подобрать размеры так, чтобы получился участок с однородным полем. Определить размеры зоны однородности.*

Пример: бесконечно-длинный соленоид. Граничные условия. *Задание: используя граничные условия смоделировать центральную часть бесконечно-длинного соленоида. Проверить,*



что поле однородно по оси R. Упростить модель - убрать внешний воздух, заменить обмотку токовым слоем.

Необходимость задания потенциала (аналогия с теплом, когда требуется задать температуру).
Задание: задать потенциал так, чтобы поле было 2 Тл. Задание на дом: получить однородное поле в плоской задаче индукцией 2 Тл. ($V = \text{rot } A, V_x = dA/dy$)

Понятие индуктивности, $L = \text{Поток} / \text{ток}$. индуктивность соленоида. Мастер вычисления индуктивности. *Задание: индуктивность катушки Гельмгольца. Где провести контур?*

Взаимная индуктивность двух контуров. Индуктивность распределенной обмотки с неидеальной связью, http://elcut.ru/glossary/multi_turn_winding_inductance.htm.

Суммарная индуктивность системы двух магнитно-связанных контуров с точки зрения цепи.

4. Магнитное поле переменных токов. Особенности. Учет электрических цепей. Особенности модуля электрической цепи. Мастер импеданса. *Задание: посчитать индуктивность 2-проводной линии. Сравнить цепной и полевой подход. Задание на дом: посчитать индуктивность 3-фазной линии передачи.*

5. Постоянные магниты, способы представления (намагниченность, ток). Магнитная сфера, магнитный брусок. *Задание: смоделировать магнитную трубу, намагниченную по радиусу, два способа представления модели. Задание на дом: отметить, какие постановки допустимы и написать класс модели.*

Граничные условия для обозначения симметрии в магнитной задаче. Граничное условие $V_n = 0$ (сверхпроводник), отличие от $H_t = 0$, отличие от $A = 0$. Разбор задачи.

Периодическая структура с постоянными магнитами. *Задание: показать, какие граничные условия надо поставить, чтобы уменьшить модель. Задание на дом: посчитать индуктивность тороида (3-мерная задача). Переделка в цилиндрическую задачу.*

Вычисление силы взаимодействия между постоянными магнитами (как правильно проводить контур). Сила зависит от направления намагниченности. *Задание: два цилиндра намагничены по оси. Найти силу. Поменять направление намагниченности. Найти силу.*

Ферромагнетик всегда притягивается. *Задание: заменить магнит на ферромагнетик (задать граничным условием $H_t = 0$). Найти силу. Задание на дом: посчитать силу притяжения к сверхпроводнику.*

Постоянный ток и постоянный магнит - как моделировать магниты сложной формы. Разбор задачи: подковообразный магнит.

6. Сложные случаи расчета индуктивности. *Задание: заменить одно из колец током и измерить индуктивность. Увидеть, что поток создается магнитом.*

Как посчитать индуктивность - отключить постоянный магнит (индуктивность это геометрический параметр).

Индуктивность на переменном токе при наличии постоянного магнита - магнитостатика



(индуктивность это геометрический параметр).

Нелинейная зависимость (сплайны). *Задание: ввести кривую и решить задачу. Изменить кривую так, чтобы осталось только 20 точек.*

Индуктивность при наличии постоянных магнитов и ферромагнетиков (статическая, динамическая). *Задание: решить две задачи и найти приращение потока. $L_{\text{дин}} = \text{приращение потока} / \text{приращение тока}$.*

Сохранение и восстановление статуса постпроцессора (контура, настроек картины поля).
Индуктивность на переменном токе и ферромагнетик - задача нестационарного магнитного поля.

7. *Как правильно провести контур, чтобы измерить индуктивность. Ответ: см. цепь.*

Виртуальный опыт: воздушная катушка на переменном токе. Поднесли постоянный магнит. Что станет с током? Поднесли стальной диск. Что станет с током? Поднесли проводящий диск. Что станет с током?

Что ещё влияет на индуктивность, кроме ферромагнетика - вихревые токи в массивных проводниках. Вихревой ток зависит от скорости изменения процесса. Вихревой ток при постоянном поле, линейно меняющемся, переменном. Зависимость вихревого тока от частоты.

Задание: смоделировать задачу с проводящим диском (магнитное поле переменных токов). Задан источник напряжения. Посчитать ток и индуктивное сопротивление для разных частот.

Разница в источнике поля: полный ток/полное напряжение равно 0.

Задание на дом: поднесли к катушке сверхпроводящий диск. Что станет с током?

8. Нестационарное магнитное поле. Особенности.

Показать нестационарную задачу на базе модели с дисками и задать постоянный магнит и переменный ток (именно ток). Посчитать поток, ток, силу во времени.

Индуктивность с точки зрения цепи. Постоянная времени цепи (ток меняется в e раз) - практическое значение. Когда идет динамический процесс, индуктивность меняется (меняются вихревые токи, уровень намагниченности материала).

Задание: смоделировать нестационарную задачу с проводящим диском ($g=40e6$ включение напряжения). Определить постоянную времени (0,1 В, автоматический шаг, 10 секунд). Был ли ток в диске? (график во времени). Анимация тока, потерь во времени.

Итог: индуктивность статическая (когда только токи), индуктивность на переменном токе (когда проводящие вещества), индуктивность динамическая (ферромагнетики, постоянные магниты).



9. Теплопередача. Особенности. Результат - установившееся температура.

Показать задачу - проводник в пазу электрической машины. Понятие «объемной мощности тепловыделения». *Задание: ток вырос на 5%, на сколько вырастут потери? (в квадрате).*

Решить задачу: определить увеличение температуры. Задание: задать кривую для изоляции ($T=273, 0,25$ /// $T=373 0,35$). Процесс не сходится. Надо задавать кривую во всем диапазоне.

Исходные данные для теплопередачи - потери. *Задание: посчитать потери в катушке Гельмгольца. Плотность тока 2 A/mm^2 $\rho = 1 / 56e6 =$
 $q = 10e6 * 10e6 / 56e6 = 17800 \text{ Вт/м}^3$*

Пример стационарной теплопередачи (коэффициент конвекции 10). Воздух не нужен - не надо моделировать. (между катушками нет тепловой связи - можно рисовать одну). Какую задавать теплопроводность - витки изолированные (как у меди, т. к. есть связь).

Задание: определить температуру катушки с воздушным и с водяным охлаждением (коэффициент конвекции 100). Задание на дом: определить температуру катушки в изоляции (1 мм, тепл 0,5).

10. Пример нестационарной теплопередачи. Нагрев и остывание катушки.

Показать: определить, допустимое время работы с воздушным охлаждением - нулевые начальные условия. Показать, как делать ненулевые начальные условия. Начальные условия: связанные тепловые задачи. *Задание: определить время остывания. Задание на дом: определить, допустимое время работы после отключения водяного охлаждения.*

Если потери распределены неравномерно - мультифизические задачи.

11. Связанные задачи. Особенности. Нагрев диска вихревыми токами. *Задание: сделать связанную задачу и определить температуру диска (статика).* Не все материалы участвуют в обеих постановках. *Задание: сделать связанную задачу и определить время остывания диска (нестационарная задача с ненулевыми начальными условиями). Задание на дом: посчитать время нагрева диска (мультифизическая задача с нулевыми начальными условиями).*

12. Нестационарный нагрев. *Задание: включение катушки с диском на постоянное напряжение.* Мы посчитали в одном процессе нагрев и охлаждение диска. Разные постоянные времена магнитной и тепловой задачи. *Задание на дом: добавить нестационарную задачу и посчитать процесс охлаждения до конца*

13. Что ещё может нагревать? Электрическое поле постоянных токов. Особенности. Разбор задачи растекание тока в заземлителе. Посчитать сопротивление. *Задание: разместить ещё два стержня и опять посчитать сопротивление. Задание на дом: разместить 4 стержня так, чтобы сопротивление было меньше 8 Ом.*

14. Импорт чертежа из DXF файла. Проверка координат. *Задание: изогнутая плоская шина, dxf файл. Течет ток 5 A/mm^2 . Импорт DXF. Какие граничные условия ставить? Почему нельзя в магнитной - изогнута. Посчитать тепловыделение. Задание: сделать связанную тепловую задачу.*



15. Если на переменном токе - какую задачу решать? С постоянным током, т.к. вихревых токов в этой задаче нет.

Остальные электрические задачи чтобы считать поле в диэлектрике. Отличие от магнитных - малые токи проводимости по сравнению с токами смещения. Поэтому индуктивная составляющая не важна. Важна емкостная составляющая.

Показать электростатика - посчитать емкость плоского конденсатора.

Задание: посчитать емкость при $\epsilon_r=3$. Емкость увеличится не в три раза, т. к. не идеальный конденсатор. Задание: посчитать емкость 2 проводной ЛЭП.

А если линия на переменном токе? - тоже статика. Емкость - геометрический параметр.

Емкость 3-фазной линии - цепи нет. Будет много емкостей.

Задание: определить собственную емкость одного из проводов. Определить взаимную емкость между парой проводов. Увидеть, что сильно они разные.

Зачем нужно знать емкость?

Эл. задача - кабель в изоляции в трубопроводе. Какой будет потенциал трубы? Опасно или нет?

Автомобиль под ЛЭП. Какой потенциал автомобиля? Опасно или нет? - смоделировать.

Задание: найти емкость трубы относительно земли.

Какие ещё действия оказывает ток? Сила на проводники. *Задание: шины в проводниках.*

Какая будет сила? Сделали задачу магнитную, задачу растекания тока. Увидели, что потери посчитать можно, а силу посчитать нельзя. В задаче растекания токов силы нет, т.к. сила действует через магнитное поле.

16. *Задание: механическая задача, изгиб двух балок.*

Плоская задача - две постановки (плоские деформации, плоские напряжения). Задача плоских напряжений подходит для анализа структур, тонких по глубине, которые нагружены в плоскости модели. Напряжение в направлении, нормальном к плоскости модели, предполагается отсутствующим. Задача плоских деформаций предполагает отсутствие деформаций вне плоскости модели. Эта задача подходит для моделирования объектов с весьма большой толщиной в направлении, нормальном к плоскости модели.

Показать: две шины, притягиваются силой 100 Н.

Задание: трубопровод, 2 атм, цилиндр. Определить, хватит ли толщины стенки 0.5 мм. как закрепить?

Теперь сварили бак из такой стали - крышку к цилиндру. Посчитали допустимые напряжения (цилиндрическая задача - как смоделировать,).

Задание: сделать осесимметричную задачу. подобрать толщину стенки дна (вдвое толще)

Как посчитать вмятину в боковой стенке бака - никак. Вмятина будет по всей окружности или по всей длине. Как посчитать изгиб вала - никак.

Тепловые деформации - источник напряжения в задаче механики.

Задание: изгиб биметаллической пластины (тепловые деформации).



Задание: тепловая посадка. Нагрели на 200 градусов. Как смоделировать напряжения.

Посчитать силу. Сильная сторона ELCUT - связанные задачи.

Задание: магнитная задача - катушка. Суммарная сила ноль, но растягивающая есть.

Задание: электростатическая задача - конденсатор на 10 кВ. Деформация диэлектрика.

Пошаговые задачи: показать, как двигать магнит и измерять силу.

Задание: вращать цилиндр и измерять емкость (заряд)

17. Оптимизационные задачи. Задача: Оптимизация толщины сердечника в соленоиде.

Функции - для чего нужны.

Задание: Линейно меняющийся потенциал на катушке. Посчитать емкость.

Задание: вращающийся цилиндр. Центробежная сила.

Замена движущегося магнита на движущееся поле.

18. ActiveField и его приложения. Программирование с ELCUT .

Разбор задачи динамики - движение сердечника в катушке.

Движение под действием силы от постоянного тока.