

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет  
систем управления и радиозлектроники

С. П. Куксенко

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ**

Учебно-методическое пособие по практическим,  
лабораторным и самостоятельным занятиям

Томск  
2023

**УДК** 537.86  
**ББК** 32.841.174  
К89

**Куксенко, Сергей Петрович**

К89 Куксенко, С. П. Моделирование электромагнитной совместимости технических средств: Учебно-методическое пособие по практическим, лабораторным и самостоятельным занятиям / С. П. Куксенко. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 60 с.

Представлены методические материалы практикума, посвященного моделированию электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств и систем. Работы выполняются в программных продуктах TALGAT, ELCUT и CONCEPT-II.

Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по техническим направлениям подготовки и специальностям.

УДК 537.86  
ББК 32.841.174

© Куксенко С. П., 2023  
© Томск. гос. ун-т систем упр.  
и радиоэлектроники, 2023

## Оглавление

1	Практические занятия.....	4
1.1	Основные термины и определения в области электромагнитной совместимости .....	4
1.2	Моделирование электромагнитной совместимости.....	5
1.2.1	Математическое моделирование .....	6
1.2.2	Физическое моделирование.....	9
1.3	Метод моментов.....	10
1.4	Создание полосковой линии в системе TALGAT .....	14
1.5	Расчет погонных параметров структуры.....	16
1.6	Вычисление волнового сопротивления коаксиального кабеля .....	19
1.7	Оценка влияния сегментации структуры на точность вычислений.....	20
1.8	Моделирования в ELCUT .....	22
1.9	Микрополосковая линия передачи .....	24
1.10	Двухпроводная линия передачи.....	27
1.11	Электродинамическое моделирования в системе CONCEPT-II.....	28
2	Лабораторные занятия .....	34
2.1	Линии передачи .....	34
2.1.1	Порядок выполнения работы .....	34
2.1.2	Задание для самостоятельно выполнения.....	37
2.2	Коаксиальный кабель .....	40
2.2.1	Порядок выполнения работы: .....	43
2.2.2	Задание для самостоятельного выполнения .....	45
2.3	Контурная антенна.....	46
2.3.1	Порядок выполнения работы .....	47
2.3.2	Задание для самостоятельного выполнения .....	55
2.4	Диэлектрическая сфера .....	56
2.4.1	Порядок выполнения работы .....	56
2.4.2	Задание для самостоятельного выполнения .....	58
3	Самостоятельные занятия .....	59
	Список использованных источников .....	60

# 1 Практические занятия

## 1.1 Основные термины и определения в области электромагнитной совместимости

Термины и определения понятий в области электромагнитной совместимости технических средств устанавливает Межгосударственный стандарт ГОСТ Р 50397-2011 (МЭК 60050-161:1990<sup>1</sup>) от 2011 г. «Совместимость технических средств электромагнитная Термины и определения» (взамен ГОСТ Р 50397-92 от 1997 г.<sup>2</sup>). Настоящий стандарт устанавливает термины и определения понятий в области электромагнитной совместимости технических средств. Термины, приведенные в настоящем стандарте, рекомендуются для применения во всех видах документации, в технической и научной литературе, в письменных сообщениях и т.п. Для ясности дальнейшего изложения приведем следующие определения.

- Техническое средство, ТС – электротехническое, электронное и радиоэлектронное изделие, а также любое изделие, содержащее электрические и/или электронные составные части (может быть устройством, оборудованием, системой или установкой).
- Электромагнитная обстановка, ЭМО (electromagnetic environment)<sup>3</sup> – совокупность электромагнитных явлений, существующих в данном месте.
- Электромагнитный шум (electromagnetic noise) – изменяющееся во времени электромагнитное явление, которое не содержит информации и может налагаться на полезный сигнал или объединяться с полезным сигналом.
- Нежелательный сигнал (unwanted signal; undesired signal) – сигнал, который может ухудшить прием полезного сигнала.
- Мешающий сигнал (interfering signal) – сигнал, который ухудшает прием полезного сигнала.
- Электромагнитная помеха, ЭМП (electromagnetic disturbance)<sup>4</sup> – любое электромагнитное явление, которое может ухудшить качество функционирования технического средства<sup>5</sup>.
- Влияние электромагнитной помехи (electromagnetic interference) – ухудшение качества функционирования технического средства или канала передачи, вызванное электромагнитной помехой.
- Электромагнитная совместимость ТС (electromagnetic compatibility; EMC) – способность технического средства функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам.
- Электромагнитная эмиссия (electromagnetic emission) – явление, при котором электромагнитная энергия исходит от источника.

---

<sup>1</sup> IEC 60050-161:1990 International electrotechnical vocabulary – Chapter 161: Electromagnetic compatibility (MOD)

<sup>2</sup> Часть терминов изменена и исключена.

<sup>3</sup> В общем, электромагнитная обстановка зависит от времени и для ее описания может требоваться статистический подход.

<sup>4</sup> Электромагнитная помеха может быть электромагнитным шумом, нежелательным сигналом или изменением в среде распространения.

<sup>5</sup> Техническое средство может быть устройством, оборудованием, системой или установкой.

- Межсистемное влияние помехи (inter-system interference) – влияние электромагнитной помехи в системе, вызванное электромагнитными помехами, создаваемыми другой системой.
- Внутрисистемное влияние помехи (intra-system interference) – влияние электромагнитной помехи в системе, вызванное электромагнитными помехами, создаваемыми в той же системе.
- Естественный шум (natural noise) – электромагнитный шум, источником которого является природное явление, а не устройства, созданные человеком
- Индустриальный шум (man-made noise) – электромагнитный шум, источником которого являются технические средства.
- Ухудшение качества функционирования технического средства (degradation of performance)<sup>1</sup> – нежелательное отклонение рабочих характеристик технического средства от требуемых.
- Помехоустойчивость ТС, устойчивость ТС к ЭМП (immunity to a disturbance) – способность ТС сохранять заданное качество функционирования при воздействии на него внешних помех с регламентируемыми значениями параметров.
- Электромагнитная восприимчивость (electromagnetic susceptibility) – Неспособность технического средства функционировать без ухудшения качества при наличии электромагнитных помех.
- Электростатический разряд, ЭСР (electrostatic discharge, ESD) – перенос электростатического заряда между телами, электростатические потенциалы которых отличаются друг от друга, при их сближении или непосредственном контакте.
- Эмиттер ЭМП (emitter of electromagnetic disturbance) – техническое средство, вызывающее возрастание напряжений, токов или электромагнитных полей, которые могут действовать как электромагнитные помехи.
- Восприимчивое к ЭМП ТС (susceptible device) – техническое средство, функционирование которого может быть ухудшено при воздействии электромагнитной помехи.
- Кондуктивная (conducted disturbance) – ЭМП, энергия которой передается по одному или нескольким проводникам.
- Излучаемая ЭМП (radiated disturbance) – ЭМП, энергия которой передается в пространстве в виде электромагнитных волн.

## 1.2 Моделирование электромагнитной совместимости

Моделирование ЭМС ТС, как на внутрисистемном, так и на межсистемном уровнях – составляющая процесса их проектирования. Возможны физическое и математическое моделирование ТС. Однако любой вид моделирования современного реального устройства в полном объеме представляет практически неразрешимую задачу. Это обусловлено тем, что полная физическая модель – законченное устройство, что противоречит задаче проектирования ТС, а создание математической модели невозможно даже с применением самых современных программных продуктов. Поэтому применяются:

- имитационное математическое моделирование;
- физическое моделирование на основе упрощенных моделей действующих устройств или их частей, реализующих основные функции устройства в целом.

Трудоемкость процесса математического моделирования, как правило, меньше, чем физического, однако достоверность результатов последнего обычно выше.

---

<sup>1</sup> Термин может применяться к временному или постоянному нарушению функционирования технического средства

Общая структура построения алгоритма моделирования изображена схемой, представленной на рисунке 1.1. Алгоритм состоит из ряда последовательных стадий – этапов.

Далее кратко описаны задачи и цели каждого этапа моделирования.

Реальный объект – этап осмысления присущих объекту (процессу) существенных связей.

Постановка задачи – установление требований к результатам моделирования.

Реальная идеализация – упрощение реальной ситуации посредством исключения малозначительных деталей (упрощенная модель).



Рисунок 1.1 – Структура алгоритма моделирования ЭМС ТС

Модель:

- 1) построение моделей элементов, узлов, или блоков ТС и их взаимосвязей;
- 2) построение моделей проникновения ЭМП в ТС.

**Прогноз** – прогнозирование (на основе применения модели) различных возможных ситуаций работы реальных ТС и составление рекомендаций по проектированию и изготовлению их.

**Проверка адекватности** – сопоставление ситуаций на каждом этапе моделирования с какой-либо (или рядом) уже существующими реальными системами и ситуациями. Проверка адекватности принимаемых решений необходима, начиная с момента изучения реального объекта (при проектировании ТС – мыслимого образа объекта). По существу – это осмысление представлений разработчика об объекте исследований и путей проведения исследований.

Рассмотрим особенности видов моделирования.

### 1.2.1 Математическое моделирование

Математическое моделирование обладает рядом специфических особенностей в отношении различных объектов исследования, однако независимо от функционального назначения проектируемого ТС можно выделить общие положения процесса (алгоритма) математического моделирования. Они включают следующие этапы.

- Моделирование ЭМО – в основном вероятностное моделирование, которое базируется на теории случайных функций, так как «помеховая» ситуация, как правило является вероятностной, потому что источники помех образуют во времени изменяющиеся (случайные) комбинации.
- Моделирование ТС, которое включает в себя схмотехнические, квазистатические или электродинамические модели его элементов, узлов и блоков и их связи.
- Моделирование «путей проникновения помех» в ТС, которое строго (в полном объеме) возможно только на базе электродинамического подхода – решения (в тех

или иных приближениях) краевой задачи, то есть, решения системы уравнений Максвелла при заданных источниках и граничных условиях. Выходными величинами расчетов при этом являются напряженности электрических и магнитных полей, которые затем должны быть приведены (выражены) в терминах электрических цепей, так как именно в них описываются параметры электронных устройств. Строгий анализ путей проникновения помех в реальные ТС весьма трудоемок и реализуем только численными методами.

В инженерной практике задачу решают в приближениях. Основное из используемых приближений – условие квазистационарности – пренебрежение «фазовым запаздыванием» в уравнениях Максвелла. При этом электромагнитные процессы и поля можно разделить на электрические и магнитные, действующие независимо. Соответственно, разделяются и рассматриваемые пути проникновения помех в электронные схемы. Отдельно анализируются помехи, проникающие в сигнальные цепи по электрическим полям, отдельно – проникающие в сигнальные цепи по магнитным полям. В обоих случаях анализ процессов проводят в терминах электрических схем.

Для численного анализа какой-либо физической проблемы необходимо построить ее математическую модель, учитывающую все существенные для данной задачи особенности реального процесса. Следует отметить, что математическая модель не идентична объекту, а является его приближенным описанием. Поэтому, в зависимости от требований к точности и универсальности моделей, она может иметь различную сложность и требовать для реализации различных вычислительных ресурсов.

Процесс построения математической модели можно разбить на следующие этапы:

- 1 Постановка задачи – определение целей расчета и класса решаемых задач, определение необходимого объема входной и выходной информации, а также допустимой погрешности результатов решения.
- 2 Аналитическая обработка – формулировка уравнений, начальных и граничных условий, описание формы расчетной области и свойств заполняющей ее среды, выбор метода решения, преобразование уравнений модели к виду, наиболее подходящему для данного численного метода, априорное исследование свойств полученных уравнений и их решение.
- 3 Дискретизация модели – переход от непрерывных функций к дискретным и от функциональных уравнений к системе алгебраических уравнений (СЛАУ), в определенном смысле приближающейся к исходным уравнениям.
- 4 Решение полученной СЛАУ с заданной точностью. На этом этапе важную роль играет выбор метода решения, наиболее подходящего для данной системы уравнений.
- 5 Обработка результатов – расчет поля, характеристик и параметров системы по данным решения и их визуализация. Часто на этом этапе приходится восстанавливать отклик системы в широком диапазоне частот по результатам решения в отдельных точках этого диапазона.

На практике перечисленные этапы не являются независимыми. Так, например, выбор метода дискретизации влияет на свойства получаемой СЛАУ, что, в свою очередь, определяет выбор метода решения этой системы. От предыдущих этапов зависят и способы вычисления параметров и характеристик системы.

Одной из наиболее важных характеристик математической модели является погрешность получаемых с ее помощью результатов. Эта погрешность складывается из составляющих, вносимых на каждом этапе численного решения. В соответствии с принятой классификацией к составляющим общей погрешности решения относятся :

- Неустраняемая погрешность, возникающая на первом этапе за счет неточности исходных данных. Как показывает название, эта погрешность не может быть устранена на последующих этапах, однако она может существенно увеличиваться при решении так называемых некорректных задач.

- Погрешность математической модели, возникающая на втором этапе вследствие неполной адекватности используемой модели реальному физическому объекту или процессу.
- Погрешность метода, возникающая в результате дискретизации задачи. Вычислительная погрешность, возникающая на этапах 4 и 5 в связи с конечной точностью представления чисел и конечным числом операциями над ними.

Решение задачи компьютерного анализа сложных структур, например полосковых, линий передачи СВЧ и пр. возможно на основе следующих подходов – схмотехнического, электродинамического и квазистатического, в рамках которых применяются численные, аналитические и комбинированные методы. Схмотехнический подход основан на моделировании электрических процессов в ТС, изображаемых в виде принципиальных схем, основанном на законах Кирхгофа. Электродинамические численные методы являются универсальными, позволяют решать задачи с довольно сложной геометрией, однако при этом требования к быстродействию компьютера и объему его оперативной памяти могут оказаться чрезвычайно высокими и, следовательно, задача будет невыполнимой.

Все численные методы электромагнитного анализа элементов ТС и ТС в целом основаны на поиске уравнений Максвелла и распределяются на две большие группы методы в частотной и методы во временной областях. (При квазистатическом моделировании методы интерпретируются как методы в частотной области с нулевой частотой  $\omega = 0$  или как методы анализа во временной области с  $df/dt = 0$ ).

Методы анализа во временной области являются наиболее общими, позволяющими учесть произвольную форму воздействующего сигнала и нелинейность среды распространения. Однако, если в системе присутствуют только синусоидальные волны и отсутствуют нелинейности, что бывает достаточно часто на практике, то, как правило, с помощью преобразования Фурье переходят к формулировкам в частотной области. При этом оператор дифференцирования по времени  $d/dt$  заменяется на  $j\omega$ , а оператор интегрирования по времени на  $1/j\omega$ . Это значительно снижает сложность модели, упрощает вычислительные алгоритмы и компьютерные программы.

Кроме временной переменной или частотной, в уравнениях Максвелла фигурируют еще три независимые пространственные переменные, по отношению к которым можно ввести классификацию базовых элементов, их электромагнитных моделей, соответствующих методов анализа и автоматизированного проектирования на их основе.

Нульмерные элементы (0D) – элементы с сосредоточенными параметрами, т.к. их размеры по всем трем координатам намного меньше длины волны ( $l < \lambda/10$ ). К ним можно отнести сосредоточенные неоднородности (короткозамыкающая перемычка в сквозном отверстии, открытый конец полоскового резонатора), пассивные компоненты (конденсаторы, резисторы), полупроводниковые приборы (диоды, транзисторы), которые моделируются как «классические» цепи с сосредоточенными параметрами. К САПР таких элементов можно отнести, например, PSpice.

Одномерные элементы (1D) – линии передачи, моделируемые как цепи с распределенными параметрами. Их классический анализ включает два этапа: на первом из решения статической двумерной задачи (уравнение Лапласа или Пуассона) находятся погонные параметры волноведущей структуры; на втором этапе погонные параметры используются для решения телеграфных уравнений, из которых в итоге получаются матрицы внешних параметров (например, S-параметры) линии передачи. Телеграфные уравнения, в которых токи и напряжения динамически зависят только от одного пространственного измерения, являются теоретической основой одномерного (1D) метода.

Двухмерные элементы (2D) – двухмерные планарные компоненты, протяженные по двум координатам и достаточно «тонкие» по вертикальной оси, вдоль которой укладывается менее чем одна десятая часть рабочей длины волны. Для решения задач используются



двухмерные (2D) методы, где поле динамически зависит от двух пространственных измерений. Кроме того, существует метод 2,5 D – это 2D метод плюс учет перпендикулярно направленных токов. Типичные примеры – дисковые микрополосковые резонаторы, меандровые линии с большим размахом, пластинчатые (patch) антенны, а также другие подобные многослойные структуры. Основным методом решения таких структур метод моментов в пространственной и спектральной областях, а также метод линий.

Трехмерные элементы (3D) – произвольные электродинамические структуры, протяженные по всем координатам. Их общий анализ основан на уравнениях Максвелла. Трехмерные методы применяются для решения задач, в которых поле динамически зависит от трех пространственных измерений. Эти методы реализуют полноволновой (full-wave) анализ общего назначения. Наиболее развиты 3D методы в частотной области: конечных элементов (МКЭ, FEM), конечных разностей (МКР, FD) и метод моментов (MoM). Среди методов во временной области выделяются: метод конечных разностей во временной области (МКРО, FDTD), конечного интегрирования (FIT), метод матриц линий передачи (TLM).

## 1.2.2 Физическое моделирование

Схематично процесс проектирования ТС с учетом ЭМС, на примере электронного средства, представлен на рисунке 1.2. В конечном итоге проверка правильности проектирования может быть подтверждена лишь при испытаниях разработанного ТС.



Рисунок 1.2 – Процесс проектирования электронного средства с учетом ЭМС

Физическое моделирование по существу представляет процесс натуральных испытаний на базе упрощенных макетов. Алгоритм процесса заключается в следующих этапах.

- ЭМО – заменяется различными имитаторами (диполи или иные источники поля) с заданными параметрами.
- ТС – действующее устройство заменяется упрощенным макетом (частью ТС, его узлов, блоков).
- Результат измерения (моделирования) воздействия помехи затем обрабатывается и уточняется. Процесс моделирования предполагает путь «проб и ошибок». Физическое

моделирование, как правило, очень дорогостоящее, а получаемые результаты не всегда адекватны тем, которые будут (или могут быть) получены уже на разработанном по рекомендациям физического моделирования техническом средстве. Для решения задачи проверки адекватности физических моделей проектируемому ТС (например, при построении какой-либо новой системы, в том числе и электронных информационных систем на базе законченных блоков или в процессе разработки изделий), то есть верификации процесса моделирования ЭМС, алгоритм моделирования должен быть дополнен ещё одним следующим пунктом.

- Разработка критериев оценки адекватности используемых разработчиком физических моделей реальному объекту в различных ситуациях. В конечном итоге проверка правильности проектирования может быть подтверждена лишь при испытаниях разработанной аппаратуры.

### 1.3 Метод моментов

На современном этапе развития бытовых электронных устройств возникает проблема анализа влияния электромагнитных помех (ЭМП), которые могут привести к нарушению работы устройств. Одной из самых актуальных для ЭМС является проблема неискаженной передачи электрических сигналов. Она особенно обостряется с ростом плотности монтажа и межконтактных электрических соединений, как правило, разветвленных и произвольно ориентированных. При распространении в таких соединениях сигналы задерживаются по времени, отражаются от неоднородностей, затухают из-за потерь, испытывают влияние соседних межконтактных соединений. Однако оценка влияния устройств друг на друга является достаточно сложной задачей, т.к. включает в себя несколько уровней: искажения, воспринимаемые на уровне печатной платы и на уровне блоков внутри прибора. Для проведения анализа ЭМС в реальных условиях возникают проблемы дороговизны некоторых компонент устройства, которые необходимо восстанавливать после нахождения ошибок в уже готовом устройстве. Для того чтобы избежать энергетических и финансовых затрат при создании устройства, появляется возможность на начальных стадиях проектировки устройства провести анализ ЭМС уже готовой конструкции на программном уровне. Моделирование позволит выявить возможные ошибки создания устройства на начальных этапах и предотвратить их.

Спектр задач электродинамического анализа, стоящий перед радиоинженерами весьма широк, в него входят радиолокация, связь, медицина и др. (рисунок 1.3).

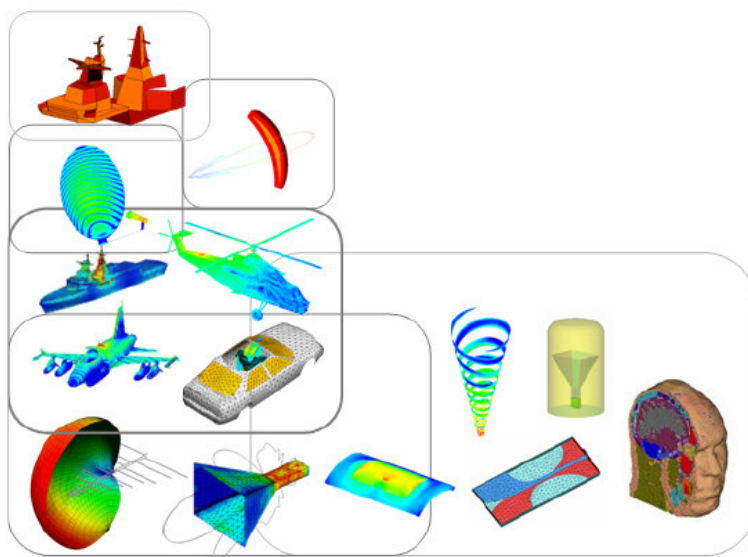


Рисунок 1.3 – Спектр задач электродинамического анализа

С внедрением мощных компьютеров и появлением возможности решения систем линейных уравнений с высокой скоростью, появился целый ряд систем электродинамического моделирования. Перед разработчиками аппаратуры возникает сложность выбора оптимальной системы для решения поставленных перед ними задач. Оптимальность системы автоматизированного проектирования (САПР) определяется функциональностью, быстродействием, системными требованиями, ценой и др. Поэтому вопрос выбора соответствующего САПР весьма актуален.

Для решения задач электромагнитного поля существуют различные подходы, которые сводятся к аналитическому или численному решению соответствующих интегральных или дифференциальных уравнений Максвелла в частотной или временной области. Аналитические решения точны, но получены лишь для ограниченного круга простых структур. Численные решения приближенны, но применимы к произвольным структурам. Кроме того, они могут выполняться с заданной точностью, что, при учёте сделанных допущений, вполне удовлетворительно в большинстве практических приложений. Один из самых известных и разработанных численных методов решения задач вычисления электромагнитного поля является метод моментов (МоМ).

Метод моментов является наиболее часто используемым методом моделирования при исследовании задач ЭМС. В частности, он удобен для внешних задач (открытых геометрий) и для нескольких различных линейных и однородных сред. Метод моментов очень подходит для гибридизации с аналитическими и численными процедурами, такими как GTD/UTD (геометрическая теория дифракции/однородная теория дифракции (ОТД)). При объединении с аналитическими методами, например на основе теорий линий передачи, можно решить много сложных задач, например точное и надёжное вычисление высоких значений эффективности экранирования или перекрестных помех на экранированные кабели. В отличие от метода конечных разностей во временной области или метода конечных элементов метод моментов требует дискретизации сеткой не объёма, а только поверхности, поэтому затраты на эту процедуру относительно малы. В силу данных обстоятельств метод моментов разрабатывался и разрабатывается очень интенсивно. Далее кратко рассмотрены история и общая теория метода моментов.

Трудно сказать точно, когда именно появился метод моментов. Численные и вариационные методы уходят ещё к временам Максвелла. Основная идея взять линейное функциональное уравнение и представить его линейным матричным уравнением также относительно стара. Галеркин, русский инженер-механик, разработал свой метод примерно в 1915 году, ещё до того, как Гильберт тщательно математически обосновал использование проекций из пространства бесконечномерной функции на конечномерное подпространство. Квантовая механика, развитая в 20-х годах XX века, использовала многие идеи из линейных пространств и их распространение на пространства Гильберта. Однако, до появления быстродействующих компьютеров эти методы не пользовались популярностью из-за утомительных вычислений, требуемых для их применения. К ним часто относились как к используемым лишь в последнюю очередь численным методам, к которым обращались, только если всё остальное исчерпало себя. Но они не более численные, чем некоторые, так называемые, аналитические методы, по крайней мере, если грамотно применяются. Просто они делают акцент на другой аспект математики, аспект линейных пространств и ортогональных проекций.

После изучения книги Канторовича и Крылова для Харрингтона стало очевидно, что метод Галеркина формально эквивалентен вариационному методу Рэлея-Ритца. Не было веской причины выбирать функцию разложения и тестовую функцию одинаковыми, как делалось и в методе Галеркина, и в вариационном методе Рэлея-Ритца. Когда они были одинаковыми, легче было доказать математические теоремы, но вычисление решений давалось труднее. Для удобства вычислений функцию разложения и тестовую функцию можно выбрать разными и, по-прежнему, утверждать, что решение стационарно.

Когда стал вопрос, как назвать этот общий метод, Харрингтон, понимая, что другие использовали его в прошлом, не стал вводить новый термин. После поиска литературы, он решил, что самым близким аналогом того, что он использовал, было изложение, данное Канторовичем и Акиловым. Они назвали это «метод моментов», и именно так Харрингтон назвал метод, применённый им к различным задачам. С тех пор, общий метод моментов вошел в широкое применение для практических задач электродинамики и электромагнитной совместимости.

Рассмотрим детерминированное уравнение:

$$\mathbf{L}f = g \quad (1.1)$$

где  $\mathbf{L}$  – линейный оператор,  $g$  – известная функция, а  $f$  – искомая неизвестная функция. Пусть  $f$  представляется системой базисных функций  $\{f_1, f_2, f_3, \dots\}$  в области  $\mathbf{L}$  как линейная комбинация

$$f = \sum_j \alpha_j f_j, \quad (1.2)$$

где  $\alpha_j$  – искомые скаляры. Для приближённых решений (1.2) является конечной суммой, а для точных – обычно бесконечной. Подставляя (1.2) в (1.1) и используя линейность  $\mathbf{L}$ , мы имеем

$$\sum_j \alpha_j \mathbf{L}f_j = g, \quad (1.3)$$

где равенство является обычно приближённым. Теперь зададим набор тестовых или весовых функций  $\{w_1, w_2, w_3, \dots\}$  в области  $\mathbf{L}$ . Возьмём скалярное произведение (обычно интегрирование) (1.3) с каждым  $w_i$  и используем линейность этого скалярного произведения для получения

$$\sum_j \alpha_j \langle w_i, \mathbf{L}f_j \rangle = \langle w_i, g \rangle, \quad i=1, 2, 3, \dots \quad (1.4)$$

Эту систему уравнений можно записать в матричном виде как

$$[L]\underline{\alpha} = \underline{g}, \quad (1.5)$$

где  $[L]$  является матрицей

$$[L] = [\langle w_i, \mathbf{L}f_j \rangle], \quad (1.6)$$

а  $\underline{\alpha}$  и  $\underline{g}$  являются векторами-столбцами

$$\underline{\alpha} = [\alpha_j]; \quad (1.7)$$

$$\underline{g} = [\langle w_i, g \rangle]. \quad (1.8)$$

Если  $[L]$  несингулярна, то существует её инверсия, и  $\underline{\alpha}$  находится как

$$\underline{\alpha} = [L]^{-1} \underline{g}. \quad (1.9)$$

Решение для  $f$  теперь даётся посредством (1.2). Для краткого обозначения зададим вектор-строку функций

$$\tilde{f} = [f_j]. \quad (1.10)$$

Записав (1.2) как  $f = \tilde{f} \underline{\alpha}$  и подставив  $\underline{\alpha}$  из (1.9), получим решение

$$f = \tilde{f} [L]^{-1} \underline{g}, \quad (1.11)$$

которое может быть приближённым или точным в зависимости от выбора функций разложения и тестовых функций.

Для любого численного метода важно выяснить вопросы, связанные с его сходимостью, скоростью сходимости и точностью, которые для метода моментов зависят от оператора  $\mathbf{L}$ , базисных функций  $f_i$ , весовых функций  $w_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) и их числа  $N$ . Эффективность приложения метода для получения результата с заданной точностью определяется, в конечном счёте, затратами времени и памяти компьютера. Если пока не

рассматривать задачу синтеза, а ограничиться задачей одновариантного анализа, то для метода моментов решение сводится к следующим шагам:

- получение из уравнений Максвелла интегральных уравнений структуры;
- дискретизация структуры (разбиение структуры на  $N$  подобластей, в каждой из которых искомая функция аппроксимируется базисными функциями);
- вычисление элементов матрицы систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) размером  $N*N$ ;
- вычисление элементов вектора воздействий размером  $N$ ;
- решение СЛАУ;
- вычисление требуемых характеристик из вектора решения СЛАУ.

Метод моментов предусматривает следующие этапы решения электродинамической задачи. Металлические элементы анализируемой структуры заменяются эквивалентными поверхностными электрическими токами. Затем решается задача возбуждения окружающей среды данными токами. При этом среда может быть сложной, т.е. может содержать магнито-диэлектрические слои.

Решение задачи возбуждения среды осуществляется с помощью аппарата тензорных функций Грина. После того как задача возбуждения решена, и электрическое поле найдено, на него накладываются граничные условия на металлических элементах. Последнее условие используется для определения эквивалентных токов. Важным моментом решения является разбиение поверхности металла на элементарные площадки и аппроксимация электрического тока в пределах площадки. Пример разбиения приведен на рисунок 1.4.

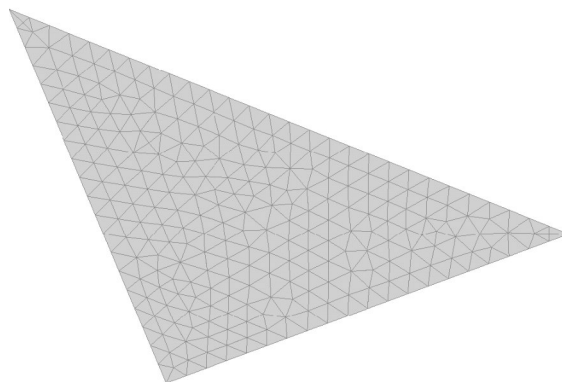


Рисунок 1.4 – Поверхность, разбитая на элементарные площадки

Чаще всего для аппроксимации тока используются постоянные, линейные и треугольные функции, которые принято называть базисными функциями. Граничные условия на поверхности металла в МоМ выполняются приближенно, а именно в нескольких точках в пределах каждой элементарной площадки (строго говоря, эти условия должны выполняться во всех точках). В результате выполнения граничных условий в дискретных точках получается СЛАУ относительно коэффициентов при базисных функциях, которые имеют смысл амплитуд токов, текущих в пределах элементарной площадки. Данная СЛАУ решается с помощью известного метода исключения Гаусса или итерационно.

В программных продуктах элементарная площадка имеет треугольную (FEKO, EMC Studio) или в случае с CONCEPT-II прямоугольную и треугольную, что позволяет хорошо описывать, в том числе и искривленные поверхности. Точность МоМ тем выше, чем меньше размер элементарной площадки. Считается, что для получения приемлемой точности размер площадки не должен превышать  $\lambda/10$ , где  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве. Число уравнений в СЛАУ  $N$  связано с числом элементарных площадок, которое неизбежно увеличивается при увеличении размеров анализируемого объекта или при увеличении частоты. Поэтому легко увидеть, что непосредственное решение задачи типа рассеяния

радиоволн на автомобиле с помощью МоМ потребует решения СЛАУ огромной размерности. На практике оно просто невозможно из-за ограниченной оперативной памяти ЭВМ, поэтому необходимо исследовать средства улучшения эффективности прямых методов решения электродинамических задач вообще, и МоМ в частности, так чтобы типичные проблемы ЭМС могли моделироваться с использованием реалистичных компьютерных ресурсов.

### 1.4 Создание полосковой линии в системе TALGAT

Данная работа содержит информацию, необходимую для построения конфигурации полосковой структуры (рисунок 1.5) в системе TALGAT, для последующего вычисления ее погонных параметров и пр. Параметры структуры: ( $w=0,5$  мм,  $s=1$  мм,  $d=3w$ ,  $t=105$  мкм,  $h=300$  мкм).

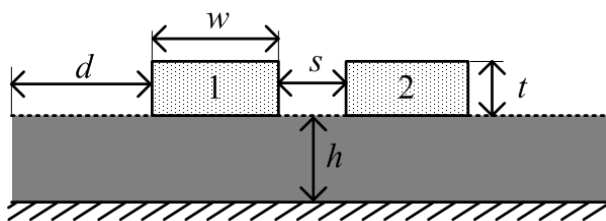


Рисунок 1.5 – Связанная микрополосковая линия передачи (1, 2 – проводники)

Система TALGAT, базирующаяся на математических моделях на основе МоМ, предназначена для компьютерного моделирования широкого класса задач ЭМС за счет выполнения следующих основных функций: квазистатического анализа (вычисления матриц погонных параметров) произвольных двухмерных и трехмерных структур проводников и диэлектриков; электродинамического анализа произвольных трехмерных структур из проводов с *RLC*-нагрузками; вычисления временного и частотного откликов произвольных схем из отрезков многопроводных линий передач; структурно-параметрической оптимизации с указанными видами анализа. Структурная схема системы приведена на рисунке 1.6.

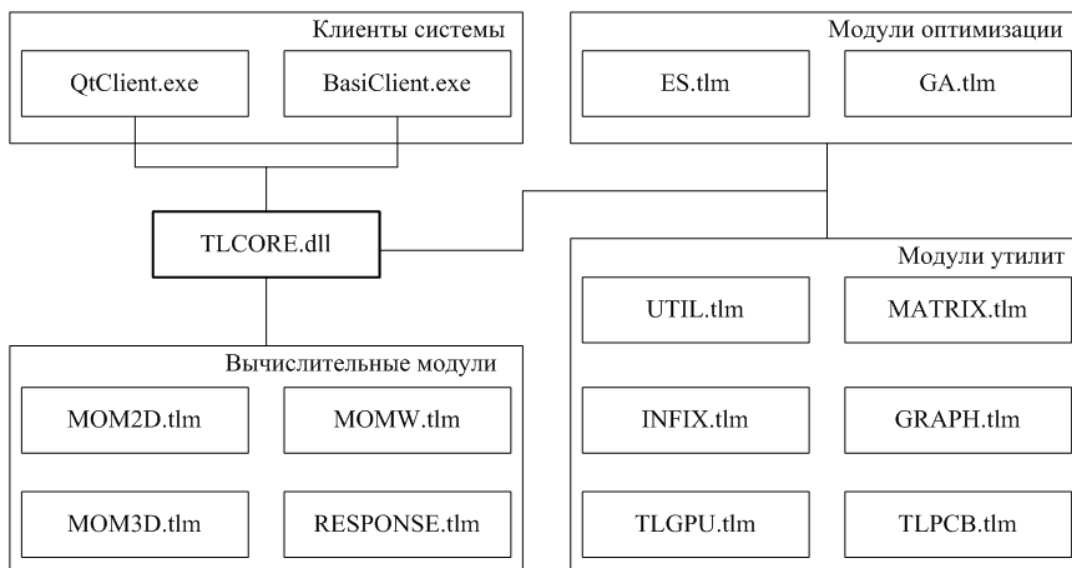


Рисунок 1.6 – Структурная схема системы TALGAT

Клиенты системы – модули пользовательского интерфейса. Ядро системы – TLCORE. Вычислительные модули: MOM2D – двухмерный квазистатический анализ; MOM3D –

трехмерный квазистатический анализ; RESPONSE – вычисление оклика; MOMW – электродинамический анализ проводных структур. Модули оптимизации: ES – эволюционные стратегии; GA – генетические алгоритмы. Модули утилит вспомогательные (матричные операции, работа с графиками и пр.). Для «общения» пользователя с системой используется интерпретируемый скриптовый язык TALGAT\_Script, использующий постфиксную запись выражений.

Для выполнения практики необходимо подключить следующие модули: UTIL (команды общего назначения, математические и условные команды, преобразование типов, проверка версий и т.д.), MATRIX и MOM2D. Подключение осуществляется при помощи команды: INCLUDE "имя модуля":

```
INCLUDE "UTIL"
INCLUDE "MATRIX"
INCLUDE "MOM2D".
```

После подключения модулей необходимо задать тип бесконечной плоскости земли: конечная (0) или бесконечная (1), с помощью команды SET\_INFINITE\_GROUND значение. В рассматриваемом случае требуется бесконечная плоскость земля:

```
SET_INFINITE_GROUND 1
```

Далее необходимо создать переменные для описания геометрии структуры (ширина проводника  $t$ , толщина диэлектрической подложки  $h$  и пр.). В системе TALGAT для этого используется команда SET "название переменной" присваиваемое значение, например:

```
SET "t" 105e-6.
```

Для задания параметра  $d$  необходимо воспользоваться командой умножения MUL:

```
SET "d" MUL 3. t
```

После задания переменных необходимо приступить к построению самой конфигурации. В первую очередь создаются проводники (CONDUCTOR), затем диэлектрик (DIELECTRIC).

Подробно разберем создание первого проводника. Первоначально используется команда CONDUCTOR без параметров (аналог имени класса). Далее используются линии (границы проводника), построение которых производится командами LINE и LINETO. Команда LINE  $x$   $y$   $x1$   $y1$ , где  $x$ ,  $y$  – координаты начальной точки линии, а  $x1$ ,  $y1$  – конечной. Команда LINETO применяется после команды LINE и начинается с точки координаты которой соответствуют координатам конечной точки, указанной в команде LINE (т.е. начинается с конца предыдущей линии). LINETO  $x2$   $y2$ , где  $x2$ ,  $y2$  – координаты конечной точки. Рекомендуется рисовать линии против часовой стрелки (рисунок 1.7).

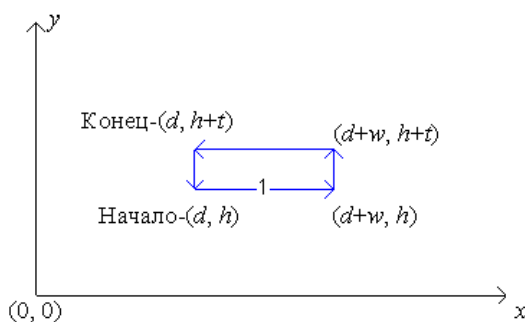


Рисунок 1.7 – Последовательность создания границ проводника с помощью линий

Поясним особенности использования арифметических операций. Сложение:

- выражению  $a+b$  соответствует PLUS a b;  
выражению  $a+b+c$  соответствует PLUS a PLUS b c или PLUS PLUS a b c.

Операции умножения (MUL), деления (DIV), разницы (MINUS) имеют аналогичный синтаксис.

С помощью описанных команд и пояснений из рисунка 1.7 создать первый проводник. Второй проводник создается аналогичным образом.

Создание границ диэлектрика аналогично созданию границ проводника. Единственное отличие заключается в использовании в самом начале создания команды **DIELECTRIC** без параметров вместо **CONDUCTOR**.

При необходимости комментирования части кода необходимо поставить перед тем, что надо комментировать двойной правый слеш // (или горячая клавиша ctrl + k).

После того как отрисовка конфигурации завершена, необходимо ее сохранить с помощью команды:

**SET "имя конфигурации" GET\_CONFIGURATION\_2D**

Для отображения созданной конфигурации предназначена команда: **DRAW\_CONFIGURATION "имя конфигурации"**.

Далее необходимо запустить программу с помощью клавишу F5 на клавиатуре или нажать соответствующую кнопку в панели инструментов. После выполнения в главном окне программы будет отображена построенная конфигурация (рисунок 1.8). Если отображаемая конфигурация не соответствует требуемой, то необходимо провести соответствующую корректировку.

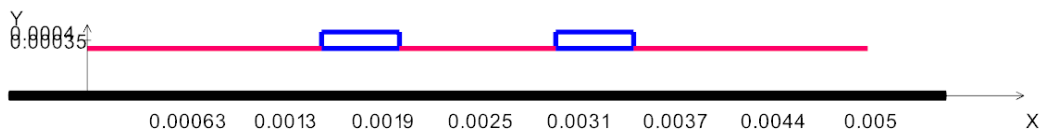


Рисунок 1.8 – Вид связанной микропослойковой линии в системе TALGAT (синий цвет – проводниковые границы, красный – диэлектрические границы)

## 1.5 Расчет погонных параметров структуры

Для расчета погонных параметров структуры необходимо корректно указать длину подынтервалов с помощью, которой сегментируется структура и назначения относительной диэлектрической проницаемости (рисунок 1.9).

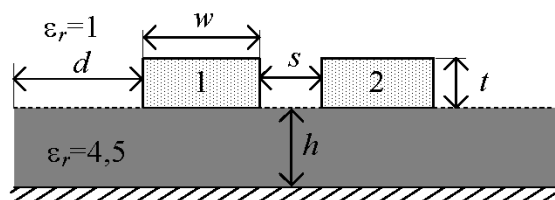


Рисунок 1.9 – Связанная линия и её параметры

Для задания автоматической сегментации необходимо воспользоваться командой (команду ввести до создания проводников и диэлектриков): **SET\_AUTO\_SEGMENT\_LENGTH** длина подынтервала или с помощью уже заданных параметров структуры, например, **SET\_AUTO\_SEGMENT\_LENGTH DIV t 2**. (Второй вариант предпочтителен, поскольку будет использован в дальнейшем.)

Для задания значения диэлектрической проницаемости используется команды:

**SET\_ER\_PLUS** значение диэлектрической проницаемости;

**SET\_ER\_MINUS** значение диэлектрической проницаемости.

При создании проводников используется только **SET\_ER\_PLUS**. Для построения подложки используется тот же подход, что и при создании проводника. Исключение составит только значение диэлектрической проницаемости (в данном случае используются команды **SET\_ER\_PLUS** и **SET\_ER\_MINUS**).



Различие в **SET\_ER\_PLUS 5** и **SET\_ER\_MINUS 1** продемонстрировано на рисунке 1.10. Так, **SET\_ER\_PLUS** находится справа по направлению стрелки, а **SET\_ER\_MINUS** слева.

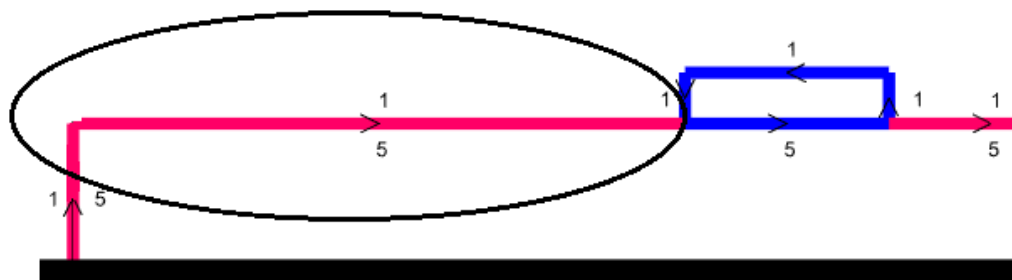


Рисунок 1.10 – Для задания относительной диэлектрической проницаемости

Чтобы отобразить значения относительной диэлектрической проницаемости в открывшемся окне с построенной структурой необходимо нажать клавишу «E». Пример создания слоя диэлектрика выглядит следующим образом:

**DIELECTRIC**

**SET\_ER\_PLUS 5.**

**SET\_ER\_MINUS 1.**

**LINE 0. h MUL 3. w h**

**LINE MUL 4. w h PLUS s MUL 4. w h**

**LINE PLUS s MUL 5. w h PLUS MUL 8. w s h**

Аналогичным образом прорисовываются все линии. После выполнения скрипта в новом окне отобразится структура, показанная на рисунке 1.11.

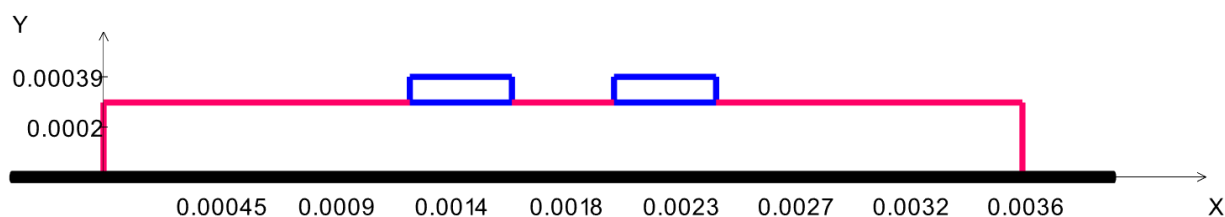


Рисунок 1.11 – Вид связанной полосковой линии в системе TALGAT

Иногда, для лучшего отображения требуется сделать линии тоньше. Для этого в открывшемся окне с построенной структурой необходимо нажать клавишу «/».

Для того чтобы вычислить значение матриц используются команды:

**ECHO Cmn**

**SET "smn" SMN\_C conf\_ig**


**ECHO TO\_STRING CALCULATE\_C smn conf\_ig**

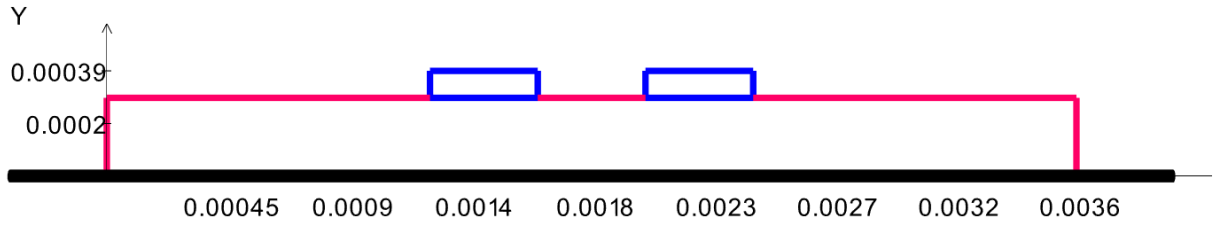
**ECHO Lmn**

**SET "smn" SMN\_L conf\_ig**

**ECHO TO\_STRING CALCULATE\_L smn conf\_ig**

При запуске программы в консоли будут отображены полученные значения матриц **L** и **C** (рисунок 1.12).

Аналогично процессу создания конфигурации, описанном выше, можно воспользоваться специальным конфигуратором. Чтобы открыть конструктор, необходимо использовать инструмент . Далее необходимо задать размер ячейки, в данном случае 1 мм (рисунок 1.13).



```

Console
Cmn
1.12942e-010 -1.09274e-011
-1.09274e-011 1.12942e-010
Lmm
3.16184e-007 5.8356e-008
5.8356e-008 3.16184e-007
>|

```

Рисунок 1.12 – Вывод результатов расчета

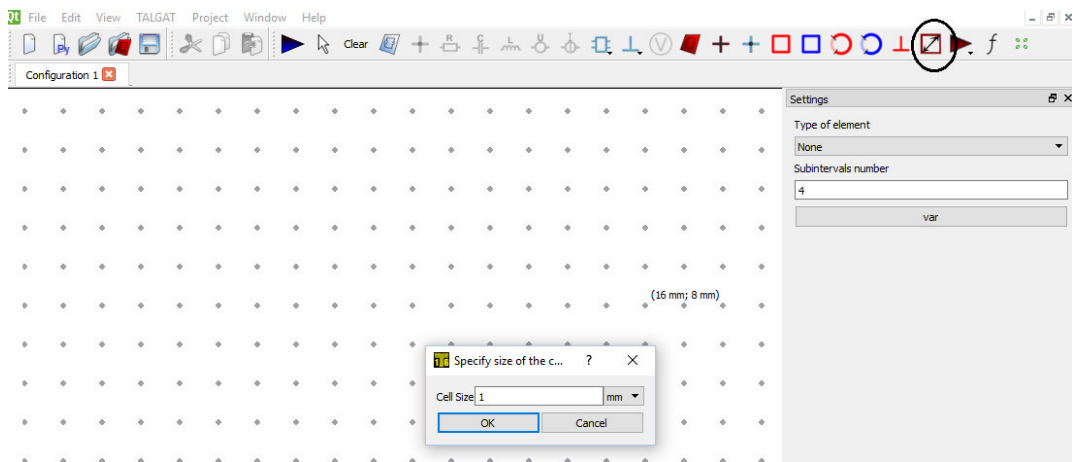



Рисунок 1.13 – Задание размера ячеек для рисования

Далее нужно задать бесконечную землю с помощью инструмента . После этого с помощью специальных инструментов, представленных на панели, создается требуемая конфигурация. Пример показан на рисунке 1.14. Если нужно изменить размеры структуры, для этого требуется выделить отрезок и задать координаты по  $x$ ,  $y$  и указать относительную диэлектрическую проницаемость (рисунок 1.15).

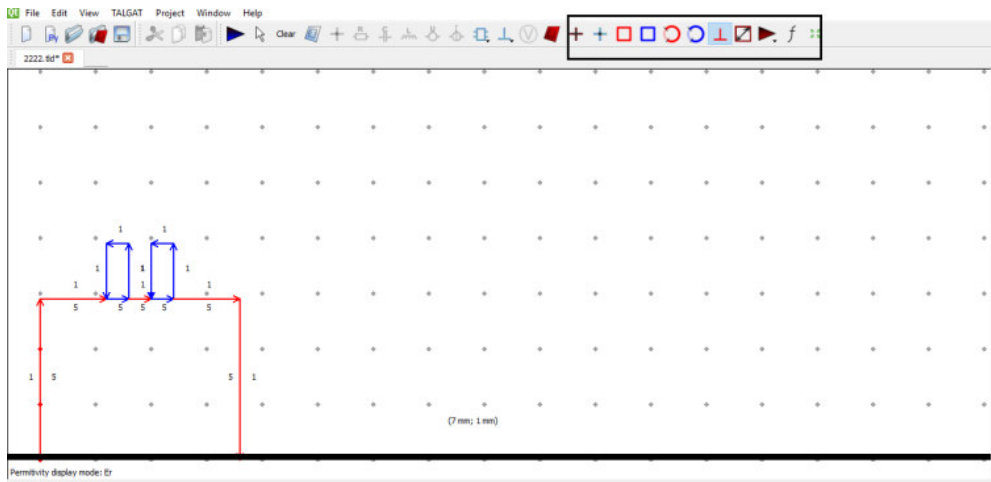


Рисунок 1.14 – Создание структуры с помощью «Конфигуратора»

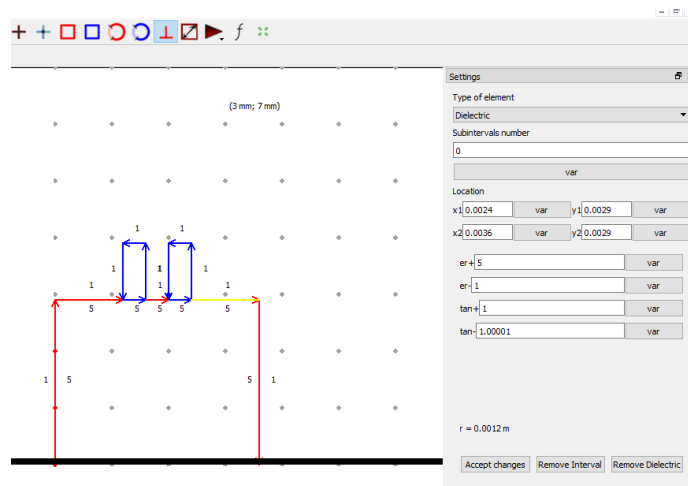


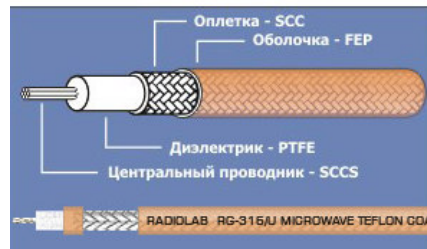
Рисунок 1.15 – Редактирование структуры

Далее необходимо запустить программу, после чего можно проанализировать результаты.

## 1.6 Вычисление волнового сопротивления коаксиального кабеля

Для успешного выполнения работы необходимо с помощью руководства пользователя к системе TALGAT ознакомиться с особенностями представления круглых границ (кругового интервала), используя примеры описанные в нем.

Далее необходимо ознакомиться с параметрами кабеля RG-316U, анализируемого на данном занятии. Конструкция кабеля приведена на рисунке 1.16 (<http://www.radiolab.ru>).



SCCS – посеребренная омедненная сталь, PTFE – фторопласт,  
 SCC – посеребренная медь, FEP – экструдированный тефлон.

Рисунок 1.16 – Конструкция RG-316U

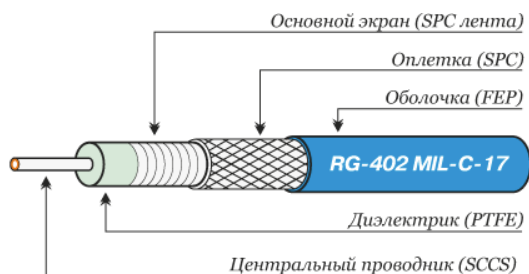
Геометрические и электрофизические параметры кабеля приведены на рисунке 1.17 (<http://www.radiolab.ru>).

Конструктив		Электрические характеристики	
Центральный проводник (7x0.16 мм)	SCCS 0.5 мм	Коэффициент укорочения	1.42
Диэлектрик	PTFE 1.53 мм	Относительная диэлектрическая проницаемость	2.07
Основной экран	отсутствует	Импеданс	50±2 Ом
Оплетка (16x5x0.1 мм) (95% плотности)	SCC 1.98 мм	Номинальная погонная емкость	95 пФ/м
Оболочка	FEP 2.52 мм	Номинальная погонная индуктивность	0.22 мкГн/м
Механические характеристики		Сопротивление центрального проводника по постоянному току	275.9 Ом/км
Минимальный радиус изгиба (однократно)	15 мм	Сопротивлению оплетки по постоянному току	21.4 Ом/км
Минимальный радиус изгиба (многократно)	30 мм	Сопротивление изоляции	1000 МОм*км
Вес	14.9 кг/км	Испытательное напряжение изоляции частотой 50 Гц (rms/1 мин.)	2000 В
Стойкость к сдавливанию	0.18 кг/мм	Эффективность экранирования (максимальная)	50 дБ
Усилие на разрыв	9.5 кг	Напряжение пробоя оболочки	3000 В
Эксплуатационные характеристики			
Температура хранения/рабочая	-55 +250 °C/-55 +250 °C		

Рисунок 1.17 – Параметры кабеля RG-316U

В ходе работы требуется вычислить погонные емкость, индуктивность и волновое сопротивление. Оценить различие в значениях, указанных в справочных данных и полученных численных путем.

На основе разработанного файла провести аналогичный расчет кабеля RG-402. Конструкция кабеля приведена на рисунке 1.18, а его геометрические и электрофизические параметры – рисунке 1.19 (<http://www.radiolab.ru>). На основе полученных данных сформировать выводы по работе.



SCCS – посеребренная омедненная сталь, PTFE – фторопласт,  
 SCC – посеребренная медь, FEP – экструдированный тефлон.

Рисунок 1.18 – Конструкция RG-402

Конструктив			Электрические характеристики	
Центральный проводник	SCCS	0.92 мм	Граничная частота	53 ГГц
Диэлектрик	PTFE	2.97 мм	Максимальная рабочая частота	30 ГГц
Основной экран	SPC лента	3.25 мм	Коэффициент укорочения	1.43
Оплетка (97% плотности)	SPC	3.58 мм	Относительная диэлектрическая проницаемость	2.07
Оболочка (цвет-синий)	FEP	4.14 мм	Импеданс	50±2 Ом
Механические характеристики			Номинальная погонная емкость	95.1 пФ/м
Минимальный радиус изгиба (однократно)		12.7 мм	Номинальная погонная индуктивность	0.23 мкГн/м
Минимальный радиус изгиба (многократно)		50.0 мм	Сопротивление центрального проводника по постоянному току	67.3 Ом/км
Вес		43.6 кг/км	Сопротивление оплетки по постоянному току	14.8 Ом/км
Стойкость к сдавливанию		- кг/мм	Сопротивление изоляции	1000 МОм*км
Усилие на разрыв		31.8 кг	Испытательное напряжение изоляции частотой 50 Гц (rms/1 мин.)	
				5000 В
Эксплуатационные характеристики			Эффективность экранирования (максимальная)	100 дБ
Температура хранения		-55/+200 °С	Напряжение пробоя оболочки	3000 В
Рабочая температура		-55/+200 °С		

• SCCS: Омедненная сталь покрытая серебром (Silver Plated Copper)

Рисунок 1.19 – Параметры кабеля RG-402

## 1.7 Оценка влияния сегментации структуры на точность вычислений

Аналитические методы для решений задач линии передачи основываются на конформных отображениях. Это общепризнанный математический метод для решения двумерных уравнений Лапласа и Пуассона. Решение дает две погонные матрицы емкостей для однородного воздушного и диэлектрического заполнения, которые используются для нахождения других, представляющих интерес, параметров структуры.

Цель работы – сравнение результатов вычисления волнового сопротивления, полученного аналитически и вычислительно для оценки влияния сегментации на точность вычислений.

На рисунке 1.20 приведено поперечное сечение микрополосковой линии передачи.

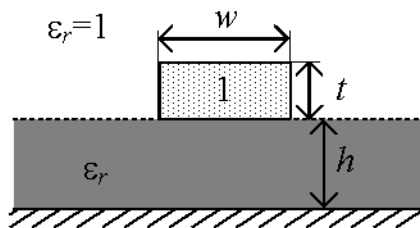


Рисунок 1.20 – Поперечное сечение микрополосковой линии передачи

Значения эффективной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_{\text{эф}}$ ) и волнового сопротивления ( $Z$ ) и вычисляются по следующим формулам (без учета толщины проводника):

$$\epsilon_{\text{эф}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/w}},$$

$$Z = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}} \ln\left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h}\right), & \text{для } \frac{w}{h} < 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}} \left[ \frac{w}{h} + 1,93 + 0,667 \ln\left(\frac{w}{h} + 1,444\right) \right], & \text{для } \frac{w}{h} \geq 1. \end{cases} \quad (1.12)$$

Для реализации вычисления, согласно данных формул, необходимо воспользоваться пакетом Scilab. Сперва минимально опишем особенности его использования с учетом поставленной задачи.

Первоначально необходимо определить собственную подпрограмму-функцию в виде файла с расширением sci, используя встроенный редактор Scipad. Имя созданного файла и определяет имя функции, которое будет использоваться при ее вызове (т.е. имя функции должно совпадать в именем файла). Подпрограмма-функция должна содержать заголовок и оператор окончания. Заголовок идет в первой строке и начинается оператором function. После этого в заголовке указываются имена выходных переменных (если переменных несколько, то их имена перечисляются в квадратных скобках). Затем, после знака равенства, указывается имя функции и приводится заключенный в круглые скобки список имен входных переменных, разделенных запятой. После заголовка идет само тело функции, за которым следует оператор окончания endfunction.

Пример. После создания файла func.sci, в нем необходимо определить, что делает функция. В данном случае функция будет получать значение, возводить его в квадрат и возвращать полученное значение. В результате получим:

```
function [y] = func(t)
    y = t^2 // тело функции
endfunction
```

После описания подпрограммы-функции ее необходимо запустить на исполнение функцией exec. Для этого в командном окне ввести команду exec('func.sci'). После этого из командного окна можно вызывать созданную функцию func. Пример: func(3). Результатом выполнения будет значение 9.

Для использования условных операторов используются следующие конструкции: **if** (условие) требуемое действие – **end**, **if** (условие) действие 1 – **else** действие 2 – **end**.

Использование арифметических операций +, -, /, \* аналогично общепринятому. Квадратный корень вычисляется с помощью встроенной функции **sqrt**(значение).

Для комментирования используется две косых черты (аналогично языкам C/C++) – //. После чего комментируемый текст меняет цвет на зеленый.

Scilab поддерживает различные способы записи вещественных чисел. Например, допустимы записи: 4, -5.2, 32e3, 7.8e-5, -12E-10, -12D-10. Разделителем между мантиссой и порядком при вводе могут служить символы e, E, d, D. Разделителем между целой и дробной частями числа служит символ «точка». Запись -5,2 соответствует двум выражениям (-5 и 2). В среде Scilab не делается различия между целыми и вещественными числами, поэтому при создании переменных нет необходимости указывать их тип, как принято, например, в C/C++.

С помощью описанного выше синтаксиса Scilab необходимо реализовать функцию **microstrip**, вычисляющую волновое сопротивление микрополосковой линии. После чего требуется реализовать аналогичное вычисления волнового сопротивления микрополосковой линии в системе TALGAT, с теми же параметрами. Затем учащая сегментацию, начиная от

самой грубой (длина подынтервала равна ширине проводника), оценить ее влияние на точность вычислений, сравнивая с результатами по формуле (1.12).

## 1.8 Моделирования в ELCUT

К решению задач квазистатического поля существуют различные подходы, они сводятся к аналитическому или численному решению соответствующих интегральных или дифференциальных уравнений Максвелла в частотной или временной области. Аналитические решения точны, но получены лишь для ограниченного круга простых структур. Численные решения приближенны, но применимы к произвольным структурам. Кроме того, они могут выполняться с заданной точностью, что, при учёте сделанных допущений, вполне удовлетворительно в большинстве практических приложений.

Следует отметить большое разнообразие математических методов, которые используются в программах электродинамического моделирования. Среди них имеются прямые методы решения граничных задач, например, МКЭ. Возможность анализировать практически любую структуру, то есть универсальность с точки зрения пользователя является отличительной и наиболее привлекательной их чертой. В случае МКЭ количество элементов разбиения зависит от размерности решаемой задачи и является максимально возможным.

Обычно решение граничной задачи ищется в частотной области. Метод конечных элементов позволяет вести разработку численных алгоритмов с высокой степенью универсальности. Эти алгоритмы оказываются весьма эффективными для широкого круга таких задач как: анализ волноводных и полосковых структур, моделирование антенн и расчет сложных устройств.

Программный пакет ELCUT представляет собой интегрированную диалоговую систему, позволяющую решать плоские и осесимметричные задачи следующих типов: расчет электрического поля, расчет магнитного поля, задачи теплопередачи, задачи механической прочности, мультидисциплинарные задачи. Моделирование производится с использованием МКЭ. ELCUT – комплекс программ для инженерных расчетов, широко используемый в научных исследованиях, промышленности и образовании.

При использовании ELCUT пользователь может работать с разными типами документов: задачи, геометрические модели, библиотеки свойств материалов и др. Каждый документ открывается в своём отдельном окне внутри главного окна программы. Одновременно можно открыть любое число любых окон. Переходя из окна в окно, происходит переключение с одного документа на другой. Только одно окно в каждый момент времени является активным. Можно изменять содержание активного документа, используя позиции меню, расположенного вверху главного окна ELCUT. Содержание меню различно для документов разных типов. ELCUT использует следующие типы документов:


*Описание задачи* соответствует каждой физической задаче. Этот документ содержит такие общие характеристики, как тип задачи (электростатика, магнитостатика, теплопередача и пр.), класс модели (плоская или осесимметричная), а также имена других документов, ассоциированных с данной задачей.

*Геометрическая модель* содержит полное описание геометрии задачи, метки различных её частей и расчетную сетку конечных элементов. Разные задачи могут использовать общую модель (это, в частности, полезно при решении связанных задач).

*Физические свойства, или Данные*, различаются для разных типов задач (свойства для электростатики, свойства для магнитного поля переменных токов и т.д.). Эти документы содержат значения свойств материалов, источников поля и граничных условий для разных помеченных геометрических объектов модели. Документ свойств может быть использован как библиотека материалов для различных задач.

Чтобы решить задачу, нужно ассоциировать с ней имена как минимум двух документов: модели и физических свойств. Для большего удобства задача может ссылаться на два документа свойств одновременно: один из них, называемый справочник свойств, содержит свойства часто используемых материалов (библиотека материалов), а другой документ содержит данные, специфичные для данной задачи или группы задач.

В процессе решения задачи ELCUT создает еще один файл – файл результатов. Этот файл всегда имеет расширение \*.res, имя, совпадающее с именем файла описания задачи, и помещается в ту же папку, в которой находится файл описания задачи.

После запуска программы открывается основное окно программы. Графический интерфейс включает в себя: панель меню, панель инструментов, справочную панель, дерево проекта и рабочую область (рисунок 1.21). Повторный вызов справочной панели осуществляется нажатием клавиш *Ctrl+F1* или кнопки  на панели инструментов.

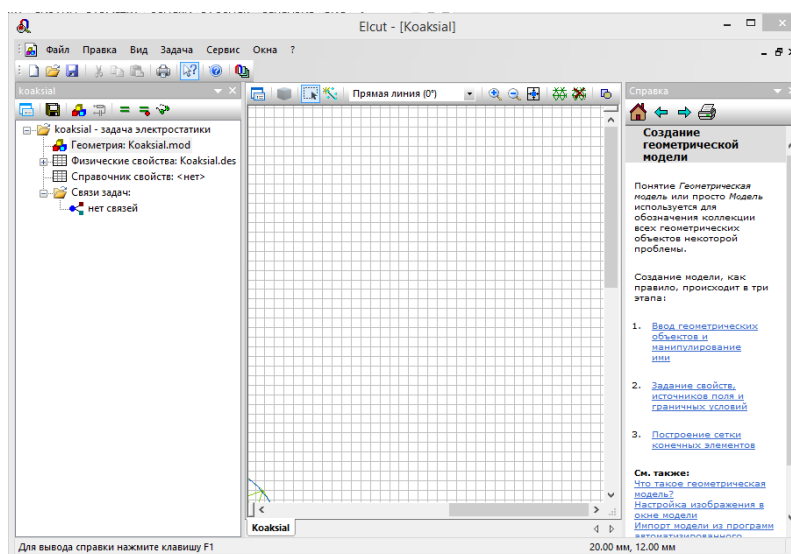


Рисунок 1.21 - Главное меню и панель инструментов ELCUT

Дерево задачи также показывает имена файлов, на которые ссылается описание задачи. Ветви дерева *Физические свойства* и *Библиотека свойств* содержат списки меток, присвоенных блокам, ребрам и вершинам (рисунок 1.22).

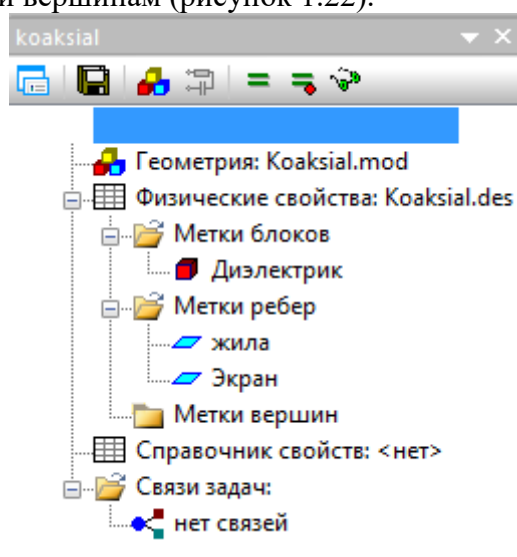











Рисунок 1.22 – Дерево задачи

Иконки слева от меток означают следующее:

-  - метка блока с заданными свойствами материала;
-  - метка ребра с заданным граничным условием;
-  - метка вершины с заданным граничным условием или источником поля;
-    - метка для которой еще не заданы свойства;
-   - метка с естественными граничными условиями и без источника поля;
-  - метка пустого блока, исключенного из расчета поля.

Чтобы перейти к работе с документом, на который ссылается описание задачи, следует дважды щелкнуть по имени файла в дереве проекта или выбрать команду *Открыть* в контекстном меню. Создание модели в большинстве случаев происходит в три этапа:

- ввод геометрических объектов и манипуляции над ними;
- задание свойств, источников поля и граничных условий;
- построение сетки конечных элементов.

Для решения задачи необходимо выбрать команду *Решить задачу* в пункте *Задача* главного меню или в контекстном меню (рисунок 1.23).

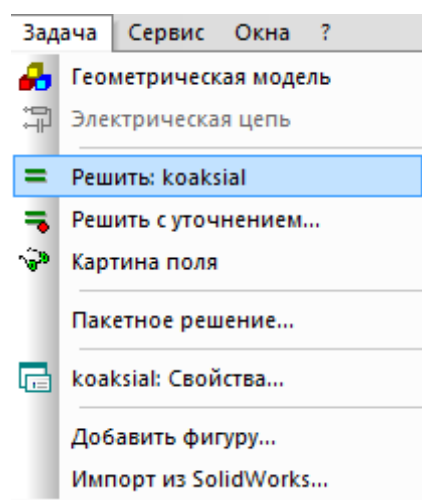


Рисунок 1.23 – Вкладка задача

Программа дает возможность представить решение задачи несколькими способами:

- картины поля;
- локальные полевые значения;
- интегральные величины;
- мастера вычисления параметров;
- графики и таблицы в пространстве;
- графики и таблицы во времени;
- схема присоединенной электрической цепи.

## 1.9 Микрополосковая линия передачи

Цель работы – рассчитать электростатическое поле, определить собственную емкость микрополосковой линии передачи.

Расчеты выполнить в системах ELCUT, TALGAT и с помощью разработанной в Scilab функции. Структура линии приведена на рисунке 1.24.

Для моделирования в ELCUT. Область задачи ограничена снизу плоскостью земли и бесконечна в трех других направлениях. Тип задачи: *задача электростатики*. Класс задачи:




плоско-параллельная. Относительная диэлектрическая проницаемость воздуха – 1, а подложки 2. Оболочка заземлена, т.е.  $U=0$  В. Остальные размеры (в миллиметрах) приведены на рисунке 1.24.



Рисунок 1.24 – Микрополосковая линия передачи

Для начала работы нужно запустить программу и создать новый проект с помощью команды *Создать задачу...* пункта меню *Файл* или нажать сочетание клавиш *Ctrl+N*. В появившемся окне *Создание задачи* ввести название проекта и выбрать место сохранения файлов задачи. В следующем окне необходимо задать свойства задачи, в поле *Тип задачи* указать электростатическое поле, в поле *Класс модели* – плоская, *Расчет* – обычный, *Координаты* – декартовы, *Единицы длины* – сантиметры. После задания всех свойств нажать кнопку *Готово*.

Для создания поля геометрического представления модели необходимо дважды кликнуть по разделу *Геометрия* в дереве задачи. Кликнув правой кнопкой мыши по координатной сетке выбрать пункт *Сетка привязки*, установить шаги равными 0,5 см. Пользуясь кнопкой  и ориентируясь по координатам, выводимым в левом нижнем углу главного окна, изобразить расчетную модель заданных размеров (рисунок 1.25). Ребро *AD* необходимо при этом совместить с вертикальной осью.

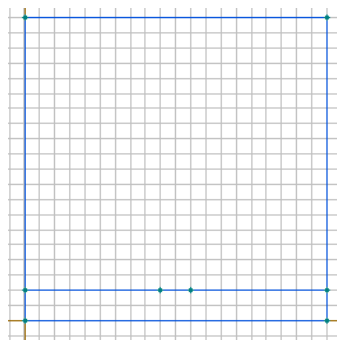


Рисунок 1.25 - Геометрическая модель структуры

После определения геометрии модели необходимо присвоить метки геометрическим объектам: блокам, ребрам, вершинам. Для этого необходимо кликнув левой кнопки мыши по объекту выделить его, затем в контекстном меню выбрать пункт *Свойства*. В открывшемся окне необходимо ввести название метки блока, например, подложка и нажать кнопку *ОК*.


Также второму блоку необходимо присвоить метку, например, воздух. Аналогичным образом метки присваиваются ребрам. Для одновременного выделения ребер, образованных вершинами *A*, *B*, *C* и *D*, нужно держать зажатой кнопку *Ctrl*. Выделенным ребрам присвоить метку, например, экран. Ребру *EF* присвоить метку, например, проводник, а вершине *E* или *F* – заряд.


Также в окне свойств меток можно задать шаг дискретизации, для более точного построения сетки конечных элементов, но учитывая ограничения накладываемые студенческой версией программы в 255 узлов, рекомендуется для всех меток оставить автоматическое задание шага дискретизации.


Для задания физических свойств среды необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши по метке «воздух» в дереве задачи. В контекстном меню выбрать пункт *Свойства*. В появившемся окне следует ввести диэлектрическую проницаемость воздуха и плотность электрического заряда в воздухе  $\rho = 0$ .

Аналогичным образом задать значение диэлектрической проницаемости для метки «подложка», для данной задачи это значение будет равно 10. Для задания граничных условий необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши по метке «экран» в дереве задачи. В контекстном меню выбрать пункт *Свойства*. В появившемся окне следует включить флажок «потенциал  $U = U_0$ », оставить значения по умолчанию. Аналогичным образом открыть окно свойств метки «проводник». Включить флажок «изолированный проводник».

Чтобы ввести данные для метки вершины «заряд» необходимо в окне свойств метки включить флажок «заряд» и ввести значение 1. Сетка образована узлами, а линии, соединяющие узлы, делят всю область задачи на отдельные ячейки – конечные элементы.

Для автоматического создания расчетной сетки следует нажать кнопку *Построение сетки*  на панели инструментов. Так же можно воспользоваться командой *Построить сетку* в списке команд подменю *Правка*

Для решения задачи необходимо нажать кнопку *Решить* , расположенную на панели инструментов. После решения откроется окно *Результат расчета*, в котором будет изображена картина поля.

Далее производится расчет емкости проводника. Для этого нужно нажать кнопку *Калькулятор* , расположенную на панели инструментов. Дважды нажать на пункт *Мастер емкостей* в меню калькулятора, в открывшемся диалоговом окне нажать кнопку *Далее*. Выбрать нужный проводник из предложенного списка, при этом его потенциал отобразится в поле *Потенциал*, нажать кнопку *Далее*. В следующем окне приводится список всех проводников, на которых было задано значение заряда. Нужно выбрать нужный проводник мышкой. Для того чтобы воспользоваться альтернативным способом вычисления емкости, нужно нажать *Вычислить энергию*, а затем кнопку *Далее*. Последняя страница мастера емкостей отображает значения, вычисленные двумя разными способами. При их сравнении возможно оценить точность полученных результатов. Также все вычисленные значения отображаются в окне калькулятора (рисунок 1.26).

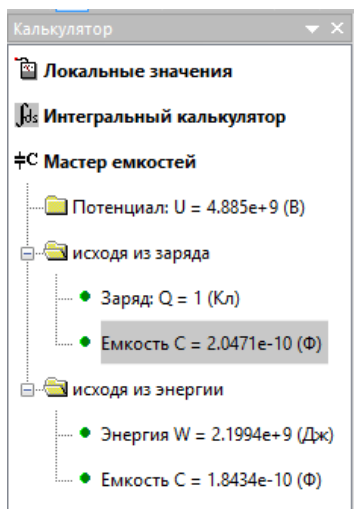


Рисунок 1.26 – Окно калькулятора

## 1.10 Двухпроводная линия передачи

Цель работы – рассчитать электростатическое поле, определить собственную и взаимную емкости проводников двухпроводной линии передачи.

Расчеты выполнить в системах ELCUT и TALGAT. Структура линии приведена на рисунке 1.27.

Для моделирования в ELCUT. Область задачи ограничена плоскостью земли снизу и бесконечна в трех других направлениях. Тип задачи: – *задача электростатики*, класс задачи – плоско-параллельная. Исходные данные: размер проводника –  $10 \times 30 \text{ мм}^2$ , расстояние между проводниками – 20 мм, толщина диэлектрика – 10 мм, относительная диэлектрическая проницаемость воздуха – 1, относительная диэлектрическая проницаемость подложки (диэлектрика) –  $\epsilon_r=2$ .

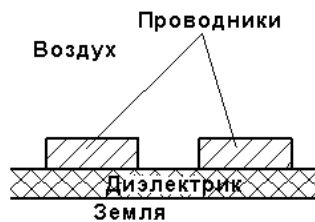



Рисунок 1.27 – Двухпроводная линия передачи

Для решения теоретически бесконечной задачи удобно определить область расчета как прямоугольник, достаточно большой (например,  $24 \times 40 \text{ мм}$ ), для того чтобы исключить влияние краевых эффектов. Для вычисления матрицы емкостей необходимо установить потенциалы  $U=1 \text{ В}$  у одного проводника и  $U=0 \text{ В}$  у другого, тогда выражения для емкостей примут вид: собственная емкость  $C_{11}=C_{22}=Q_1/U_1$ , взаимная емкость  $C_{12}=C_{21}=Q_2/U_2$ , где заряды проводников  $Q_1$  и  $Q_2$  вычисляются как интегралы вдоль прямоугольных контуров, проведенных вокруг проводников 1 и 2 с отступом от их границ.



Сначала нужно запустить ELCUT и создать новый проект. В окне свойств задачи задать: *Тип задачи* – электростатическое поле, *Класс модели* – плоская, *Расчет* – обычный, *Координаты* – декартовы, *Единицы длины* – миллиметры. После задания всех свойств нажать кнопку Готово.

Для создания геометрической модели необходимо дважды кликнуть по разделу Геометрия в дереве задачи. Кликнув правой кнопкой мыши по координатной сетке выбрать пункт Сетка привязки, установить шаги равными 5 мм. Пользуясь кнопкой  и ориентируясь по координатам выводимым в левом нижнем углу главного окна, изобразить расчетную модель заданных размеров. Ограничение размеров расчетной области при этом от  $-160 \text{ мм}$  до  $160 \text{ мм}$  по горизонтальной оси, от  $0 \text{ мм}$  до  $160 \text{ мм}$  по вертикальной оси.

Далее необходимо присвоить метки блокам Воздух и Диэлектрик. А также ребрам: Земля, Проводник 1, Проводник 2. Для этого необходимо кликнув левой кнопки мыши по объекту выделить его, затем в контекстном меню выбрать пункт Свойства. В открывшемся окне необходимо ввести название метки. Шаг дискретизации для всех меток оставить автоматическим.

Для задания физических свойств среды необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши по метке Воздух в дереве задачи. В контекстном меню выбрать пункт Свойства. В появившемся окне следует ввести диэлектрическую проницаемость воздуха и плотность электрического заряда в воздухе  $\rho = 0$ . Аналогичным образом задать значение диэлектрической проницаемости для метки Диэлектрик, для данной задачи это значение будет равно 2.

Для задания граничных условий необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши по метке Земля в дереве задачи. В контекстном меню выбрать пункт *Свойства*. В появившемся окне следует включить флажок *Потенциал  $U = U_0$* , оставить значения по умолчанию (0 В). Аналогичным образом открыть окно свойств первого проводника и задать значение  $U_0 = 1\text{В}$ . Для второго проводника значение  $U_0 = 0\text{В}$ . (Проводники следует рисовать в виде ребер.)

Создать сетку конечных элементов нажав кнопку *Построение сетки*  на панели инструментов. Для решения задачи необходимо нажать кнопку *Решить* , расположенную на панели инструментов. После решения откроется окно Результат расчета, в котором будет изображена картина поля.

Собственную емкость можно вычислить как

$$C_{11} = C_{22} = Q_1 / U_1, \quad (1.13)$$

а взаимную емкость –

$$C_{12} = C_{21} = Q_2 / U_1 \quad (1.14)$$

Здесь  $Q_1$  и  $Q_2$  – заряды, которые вычисляются как интегралы вдоль прямоугольных контуров, построенных вокруг проводников с отступом от их границ.

После получения значений в ELCUT необходимо выполнить аналогичные вычисления в TALGAT и сравнить полученные значения, после чего сделать выводы по работе.

## 1.11 Электродинамическое моделирования в системе CONCEPT-II

Программный продукт CONCEPT-II был разработан в Гамбургском институте электромагнитной теории. Этот программный пакет предназначен для численного решения задач электромагнитного излучения и рассеивания в частотной области. Ядро вычислений основано на методе моментов и интегральных уравнениях для электрических (EFIE) и магнитных полей (MFIE). CONCEPT-II может использоваться для вычисления токов, напряжений и полей, которые являются результатом какого-либо возбуждения металлических структур или диэлектрических тел. Электромагнитные поля могут быть вычислены как в ближней, так и в дальней зоне.

Программа CONCEPT-II позволяет моделировать задачи, включающие в себя кабельные структуры, произвольные нагрузки или источники возбуждения, а также структуры с произвольной металлической поверхностью, которые могут содержать апертуры, щели и стыки; диэлектрические тела с потерями произвольной формы; тела, покрытые тонкими слоями материала с конечной проводимостью (для анализа задач экранирования); произвольные гальванические связи проводов и металлических поверхностей; структуры, как в свободном пространстве, так и над идеально проводящей плоскостью. В системе реализовано сочетание метода моментов и метода физической оптики.

В последнее время разработчики представили новую, улучшенную версию программы CONCEPT-II, с более удобным и понятным графическим интерфейсом. Для образовательных целей разработчики предлагают демонстрационную версию системы, которая и используется в данном пособии.

Далее кратко рассмотрен процесс установки CONCEPT-II. Для установки программы CONCEPT-II необходим файл с именем «concept-II-12.0-p23-64bit-demo-setup.exe», который можно скачать с официального сайта разработчиков программы. Запустить файл установки и следовать указаниям установщика не меняя параметров (рисунок 1.28).

Следующим этапом является расширение пути, для этого необходимо открыть папку «Мой компьютер», правой кнопкой мыши открыть свойства. Открываем вкладку *Дополнительные параметры системы* → *Переменные среды*. Далее выбрать пункт *Path* в системных переменных и нажать *Изменить*. Путь необходимо продлить символом «;» и

прописать путь нахождения программы CONCEPT-II «C:\Program Files (x86)\gnuplot\bin» (рисунок 1.29). Нажать *OK*.

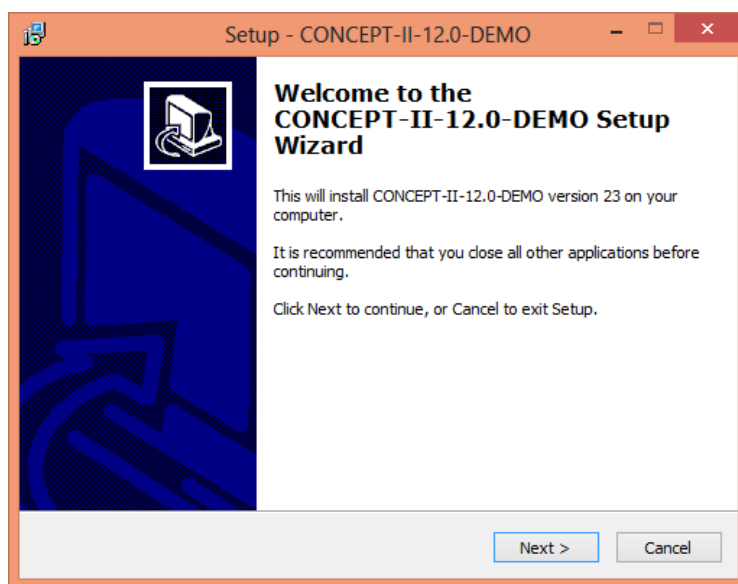


Рисунок 1.28 – Окно установки программы

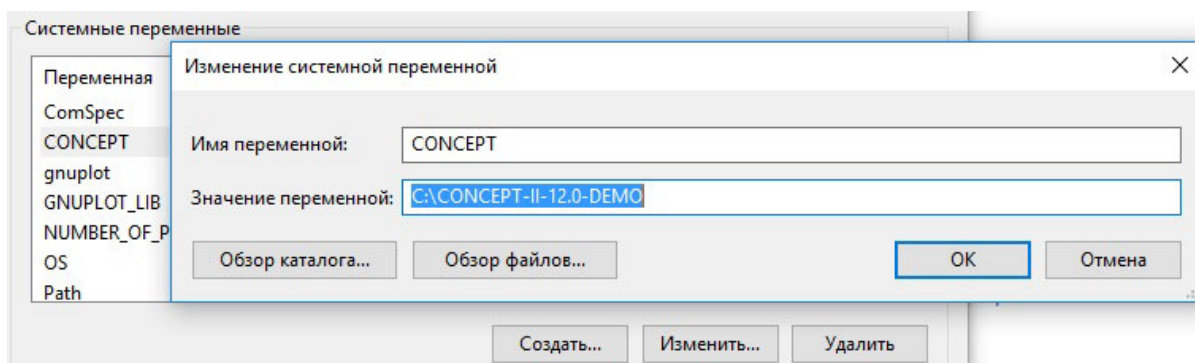


Рисунок 1.29 – Расширение пути

Для графического представления кривых потребуется расширение «Gnuplot». Для установки необходимо скачать файл «gnuplot.exe» с официального сайта разработчиков программы. Запустить установку и после завершения расширить путь как показано на рисунке 1.30. Графический интерфейс программы CONCEPT-II включает в себя следующие элементы: панель меню, панель инструментов, рабочая область, окно для вывода системных сообщений, панель основных этапов моделирования (рисунок 1.31).

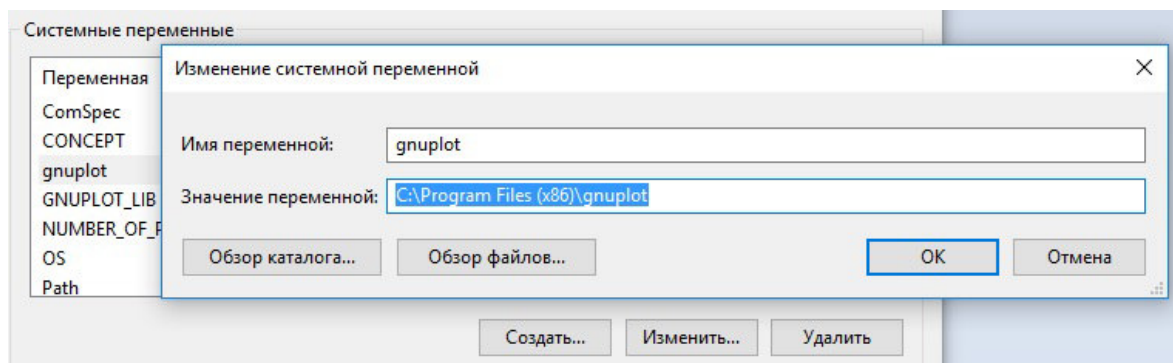


Рисунок 1.30 – Расширение пути для программы «Gnuplot»

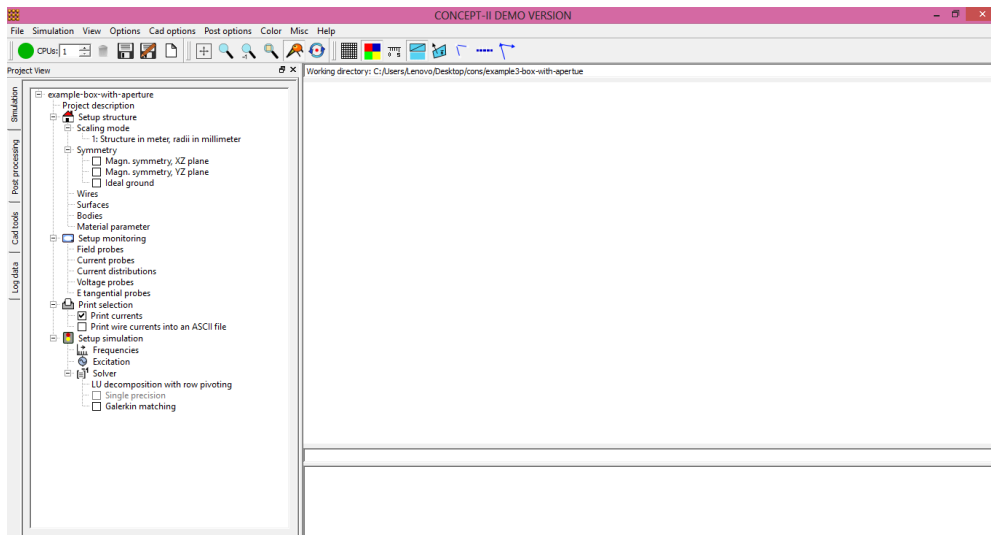


Рисунок 1.31 – Графический интерфейс программы CONCEPT-II

Моделирование в CONCEPT-II состоит из следующих этапов: препроцессинг; ввод входных данных; проверка входной геометрии; вычисление; визуализация результатов.

На этапе препроцессинга и дискретизации поверхностей осуществляется создание структуры. Для моделирования сложных структур, CONCEPT-II содержит собственные инструменты дискретизации. Эти инструменты обеспечивают треугольные или смещенные сетки, состоящие из треугольников и четырехугольников. Также доступны 3D средства просмотра. Возможно локальное усовершенствование поверхности сетки. Все необходимые инструменты содержатся во вкладке *Cad tools*, которая включает в себя две дополнительные вкладки *Cad tools 1* (рисунок 1.32 а) и *Cad tools 2* (рисунок 1.32 б).

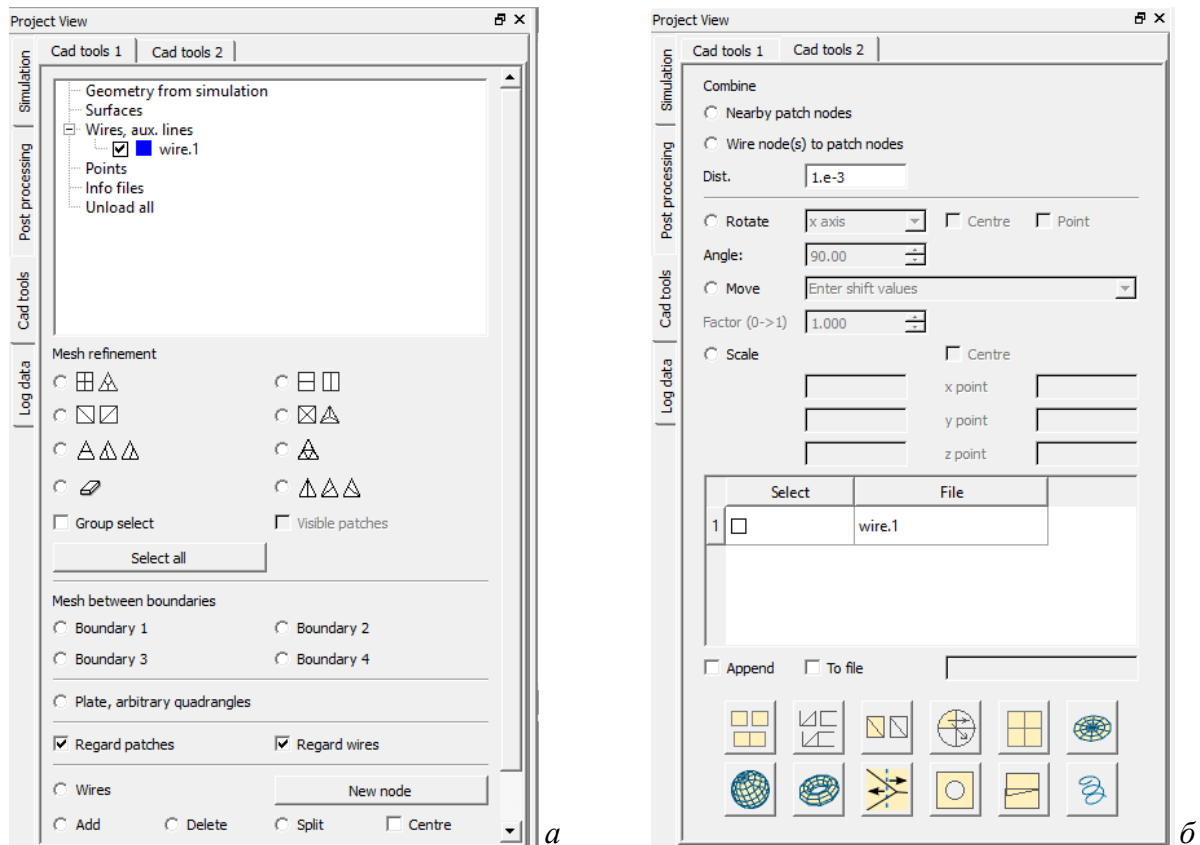


Рисунок 1.32 – Вкладки Cad tools 1 (а) и Cad tools 2 (б)

На этапе ввода данных формируется главный файл, который содержит информацию о входных данных (кабели, источники возбуждения, нагрузки и др.). В системе предусмотрены следующие источники возбуждения: генератор напряжения; подводимая мощность; источник поверхностных токов; плоская волна; вибратор Герца и др. Входные данные формируются во вкладке *Simulation* и хранятся в дереве проекта (рисунок 1.33).

Дерево проекта включает в себя 4 основных раздела:

- 1 *Setup of the structure* (настройка структуры: геометрия, симметрия, виды проводов и т.д.).
- 2 *Setup monitoring* (настройка полей тока, напряжения, распределение тока).
- 3 *Setup printing* (настройка печати, используются значения по умолчанию).
- 4 *Setup simulation* (настройка моделирования: частоты дискретизации, тип возбуждения и выбор используемой структуры).

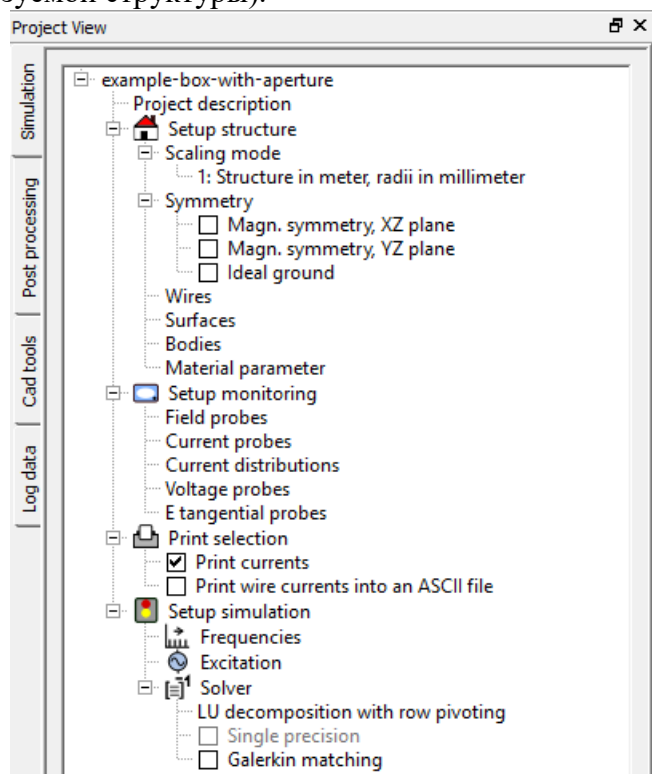


Рисунок 1.33 – Дерево проекта

В разделе *Setup simulation* возможен выбор вычислительного режима из двух представленных. Одинарный режим вычисления *Single precision* дает верный результат для структур хорошо согласованных с источником возбуждения. Для вычислений более сложных структур содержащих отверстия наиболее точный результат можно получить в режиме *Galerkin matching*. Недостатком такого режима является то, что для вычисления требуются матрицы больших размеров и, следовательно, затрачивается больше времени. Также режим *Galerkin matching* может использоваться для строго треугольной сетки.

На этапе проверки входной геометрии производится проверка заданной геометрии и правильности входных данных. Осуществляется проверка после построения структуры и установки всех параметров. Во вкладке *Simulation* (панель меню) располагается кнопка *Run simulation front-end* (рисунок 1.34), после нажатия которой запускается проверка геометрии. После успешного окончания проверки во вкладке *Post processing* активизируется кнопка *Show complete structure* (рисунок 1.34), которая позволяет достроить структуру на основании заданной симметрии.

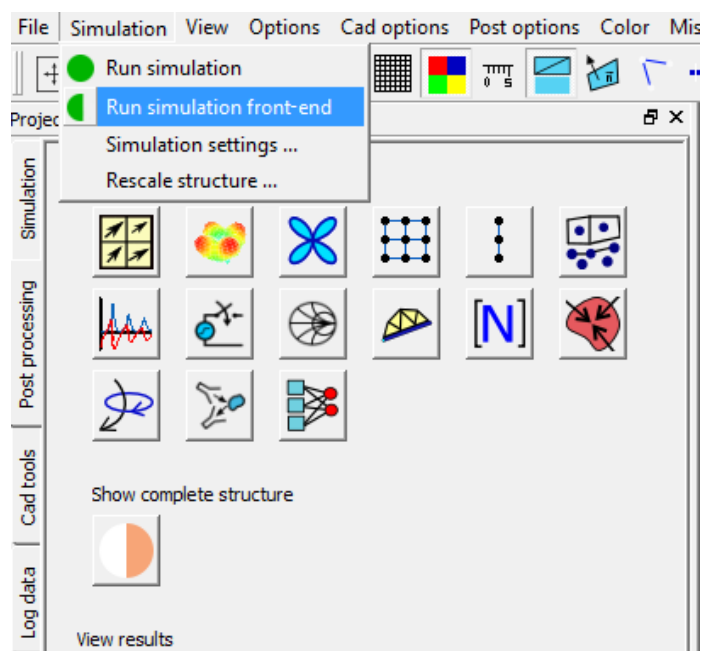


Рисунок 1.34 – Проверка заданной геометрии и правильности входных данных

На этапе вычислений производится запуск процесса вычисления. В окне для вывода системных сообщений отображается процесс расчета, время вычисления, анализируемая частотная точка и др. (рисунок 1.35).

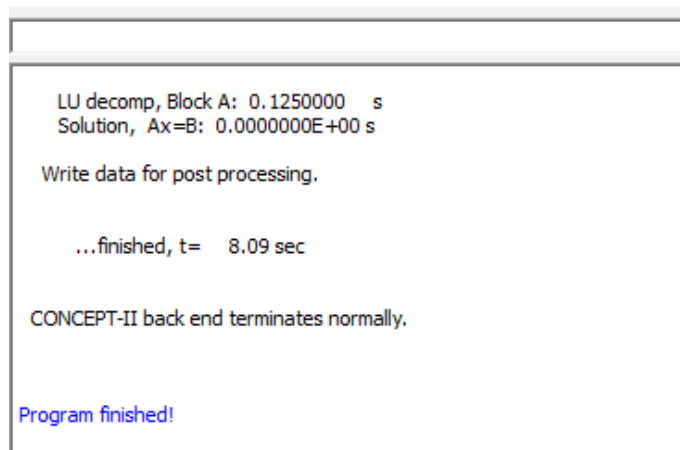


Рисунок 1.35 – Окно для вывода системных сообщений

После окончания вычислений доступна вкладка *Post processing*, в которой находятся инструменты для графического отображения полученных результатов (рисунок 1.36). Доступны аппроксимация распределение токов и другие характеристики, такие как графическое представление распределения токов на поверхностях, наведенное напряжение или токи, как функции частоты. Трехмерные представления электромагнитных полей позволяют идентифицировать полное электромагнитное поведение структуры. Весьма полезными, для практических исследований, являются анимации токов и распределения поля, которые могут быстро быть сгенерированы.

Результаты решения представляются в CONCEPT-II различными способами: 3D и 2D диаграммы направленности; распределения токов на поверхностях и проводах;  $(I, U, E, H)$  как функция частоты и времени; 2D и 1D распределения поля; электромагнитные поля в произвольных точках (как поток энергии, вектор Поинтинга); коэффициент удельного поглощения.



Вкладка *Log data* отвечает за просмотр полученных результатов для каждой графической формы представления вычислений.

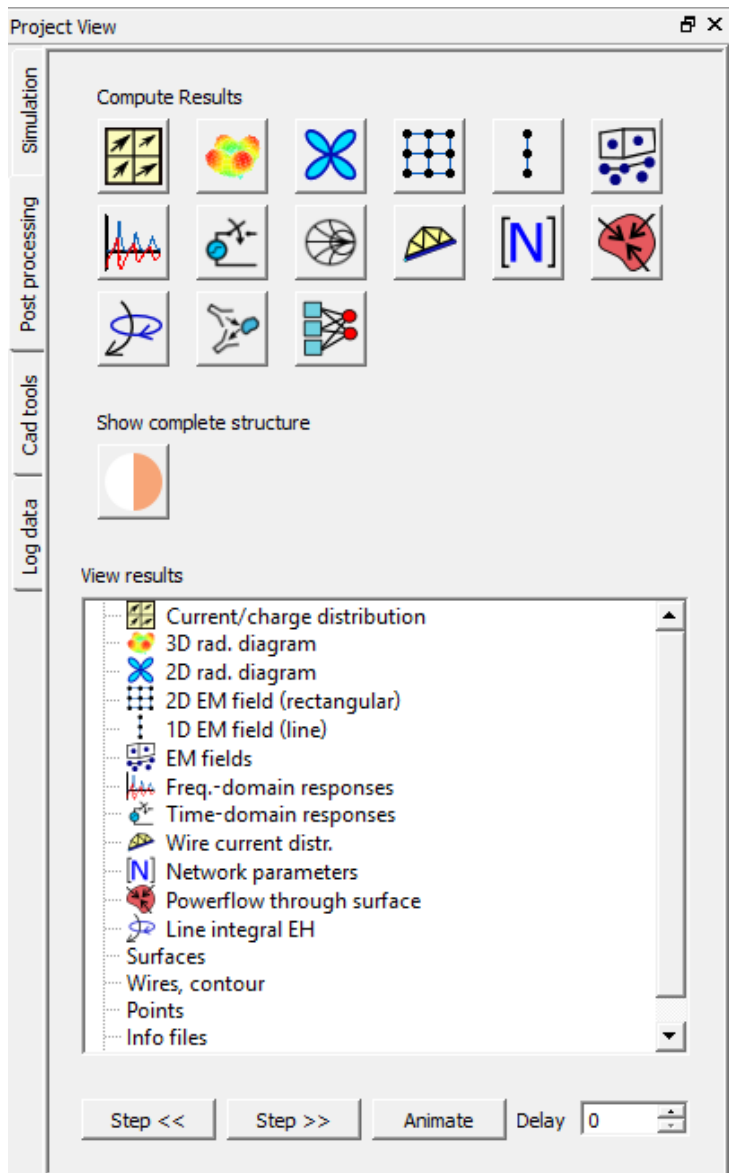


Рисунок 1.36 – Постобработка вычислений

## 2 Лабораторные занятия

### 2.1 Линии передачи

Цель работы – оценка перекрестных помех в линиях передачи на примере печатной платы.

#### 2.1.1 Порядок выполнения работы

Для выполнения оценки помех в линиях передачи на основной сигнал нужно выполнить следующие этапы:

- 1 Построить геометрические модели поперечных сечений заданных отрезков линий передач.
- 2 Вычислить матрицы погонных коэффициентов электростатической  $C$  и электродинамической  $L$  индукции.
- 3 Составить схему для моделирования.
- 4 Задать нагрузки и воздействие.
- 5 Вычислить временной отклик на импульсное воздействие

Указанные этапы целесообразно выполнить для многопроводной линии передачи (МПЛ), имеющей 2, 3, 4, 5 проводников. Все пункты выполняются в системе TALGAT.












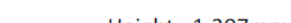
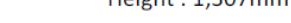
Для корректного выполнения выше поставленных задач необходимо в системе TALGAT подключить следующие программные модули:

MOM2D – модуль двухмерного электростатического анализа;

UTIL – модуль для использования команд общего назначения (**PLUS**, **DIV**, **MINUS**, **MUL** и т.д.);

MATRIX – модуль матричных операций.

На рисунке 2.1 представлены типовые слои и параметры исследуемой печатной платы.

Stack Up		Layer Stack			
Layer	Board Layer Stack	Name	Material	Thickness	Constant
1		Top Paste			
2		Top Overlay			
3		Top Solder	Solder Resist	0,010mm	3,5
4		Top Layer	Copper	0,035mm	
5		Dielectric1	FR-4	0,510mm	4,2
6		GND	Copper	0,035mm	
7		Dielectric2		0,127mm	4,2
8		+3V	Copper	0,035mm	
9		Dielectric3		0,510mm	4,2
10		Bottom Layer	Copper	0,035mm	
11		Bottom Solder	Solder Resist	0,010mm	3,5
12		Bottom Overlay			
13		Bottom Paste			

Height : 1,307mm

Рисунок 2.1 – Типовые слои и параметры исследуемой печатной платы

Значения параметров исследуемых структур для построения поперечных сечений исследуемых линий: ширина проводников  $w = 500$  мкм, расстояние между проводниками

$s = 300$  мкм, высота проводников на слое TOP и BOTTOM  $t = 50$  мкм, высота проводников на слое GND  $t = 35$  мкм, расстояние от края структуры до проводника  $d = 3w$ , толщина слоев TOP, BOTTOM, GND и +3V  $hT = 510$  мкм, толщина покрывающего диэлектрического слоя GND  $hG = 127$  мкм, толщина покрывающих слоев диэлектриков TOP и BOTTOM  $hB = 60$  мкм, диэлектрическая проницаемость воздуха  $ErAir = 1$ , диэлектрическая проницаемость TOP и BOTTOM  $ErT$  и  $ErB = 3,5$ , диэлектрическая проницаемость GND и +3V  $ErG$  и  $ErV = 4,2$ . При построении поперечного сечения используется автосегментация с граничным шагом (SET\_AUTO\_SEGMENT\_LENGTH) 10 мкм и бесконечная плоскость земли.

Пример поперечного сечения линии передачи приведен на рисунке 2.2.

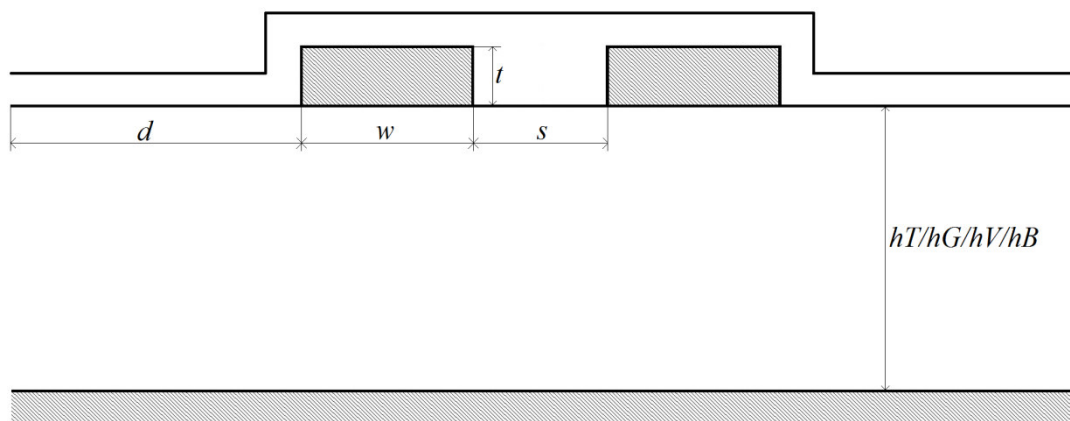


Рисунок 2.2 – Поперечное сечение линии передачи

Далее приведен пример построения поперечного сечения трехпроводной линии передачи.

```

INCLUDE "MOM2D" // подключаемые модули
INCLUDE "UTIL" // подключаемые библиотеки
INCLUDE "MATRIX" // подключаемые библиотеки

SET "w" 500.e-6 //ширина проводника
SET "s" 300.e-6 //расстояние между проводниками
SET "t" 50.e-6 //высота проводника
SET "d" MUL 3. w //размах диэлектрика
SET "hT" 510.e-6 //высота top layer и bottom
SET "hG" 127.e-6 //высота покрывающего диэлектрика на gnd layer
SET "hB" 10.e-6 //высота диэлектрика на bottom и top layer
SET "ErAir" 1. //диэлектрическая проницаемость воздуха
SET "ErT" 42.e-1 //диэлектрическая проницаемость диэлектриков GND и +3 V
SET "ErB" 35.e-1 //диэлектрическая проницаемость bottom и top

SET "segm" 10.e-6 //шаг сегментации

SET_AUTO_SEGMENT_LENGTH segm
SET_INFINITE_GROUND 1 // задание бесконечной земли

DIELECTRIC // Покрывающий слой диэлектрика
SET_ER_PLUS ErB
SET_ER_MINUS ErAir
LINE 0. PLUS hT hB MINUS d hB PLUS hT hB

```

LINETO MINUS d hB PLUS PLUS hT hB t  
 LINETO PLUS PLUS d hB w PLUS PLUS hT hB t  
 LINETO PLUS PLUS d hB w PLUS hT hB  
 LINETO PLUS PLUS d w MINUS s hB PLUS hT hB  
 LINETO PLUS PLUS d w MINUS s hB PLUS t PLUS hT hB  
 LINETO PLUS PLUS PLUS PLUS d w s w hB PLUS t PLUS hT hB  
 LINETO PLUS PLUS PLUS PLUS d w s w hB PLUS hT hB  
 LINETO PLUS PLUS PLUS PLUS d w s w MINUS s hB PLUS hT hB  
 LINETO PLUS PLUS PLUS PLUS d w s w MINUS s hB PLUS t PLUS hT hB  
 LINETO PLUS PLUS PLUS PLUS PLUS PLUS d w s w s w hB PLUS t PLUS hT hB  
 LINETO PLUS PLUS PLUS PLUS PLUS PLUS d w s w s w hB PLUS hT hB  
 LINETO PLUS PLUS PLUS PLUS PLUS PLUS PLUS PLUS d w s w s w hB MINUS d hB PLUS hT hB

DIELECTRIC // *Слой диэлектрика*

SET\_ER\_PLUS ErT  
 SET\_ER\_MINUS ErB  
 LINE 0. hT d hT  
 LINE PLUS d w hT PLUS PLUS d w s hT  
 LINE PLUS PLUS PLUS d w s w hT PLUS PLUS PLUS PLUS d w s w s hT  
 LINE PLUS PLUS PLUS PLUS PLUS PLUS d w s w s w hT PLUS PLUS PLUS PLUS PLUS PLUS d w s w s w d hT

CONDUCTOR // *Первый проводник*

SET\_ER\_PLUS ErT  
 LINE d hT PLUS d w hT  
 SET\_ER\_PLUS ErB  
 LINETO PLUS d w PLUS hT t  
 LINETO d PLUS hT t  
 LINETO d hT

CONDUCTOR // *Второй проводник*

SET\_ER\_PLUS ErT  
 LINE PLUS s PLUS w d hT PLUS s PLUS w PLUS w d hT  
 SET\_ER\_PLUS ErB  
 LINETO PLUS s PLUS w PLUS w d PLUS hT t  
 LINETO PLUS s PLUS w d PLUS hT t  
 LINETO PLUS s PLUS w d hT

CONDUCTOR // *Третий проводник*




SET\_ER\_PLUS ErT  
 LINE PLUS PLUS PLUS PLUS d w s w s hT PLUS PLUS PLUS PLUS PLUS PLUS d w s w s w hT  
 SET\_ER\_PLUS ErB  
 LINETO PLUS PLUS PLUS PLUS PLUS PLUS d w s w s w PLUS hT t  
 LINETO PLUS PLUS PLUS PLUS PLUS PLUS d w s w s PLUS hT t  
 LINETO PLUS PLUS PLUS PLUS PLUS PLUS d w s w s hT  
 SET "conf\_ig" GET\_CONFIGURATION\_2D  
 DRAW\_CONFIGURATION conf\_ig

SET "mL\_THREE" CALCULATE\_L SMN\_L conf\_ig conf\_ig // *Вычисление матрицы L и присвоение ей имени «mL\_THREE»*

SET "mCG" CALCULATE\_CG SMN\_CG conf\_ig conf\_ig 0. // *Вычисление матрицы C*

SET "mC\_THREE" GET\_REAL\_MATRIX mCG // *Вычисление матрицы C и присвоение ей имени «mC\_THREE»*

```
ECHO LINE_TO_STRING // матрица погонных индуктивностей L
ECHO mL_THREE
ECHO LINE_TO_STRING // матрица погонных емкостей C
ECHO mC_THREE
```

После построения необходимых поперечных сечений требуется перейти к построению принципиальной схемы, для этого на панели меню нужно выбрать *Создать принципиальную схему* (). В открывшемся окне необходимо пользуясь панелью инструментов () , построить принципиальную схему для требуемого варианта задания. Перед запуском анализа схемы нужно подключив вольтметры () к началу и к концу линий и выбрать временной отклик. В появившемся окне задать параметры для корректного отображения отклика, как показано на рисунке 2.3.

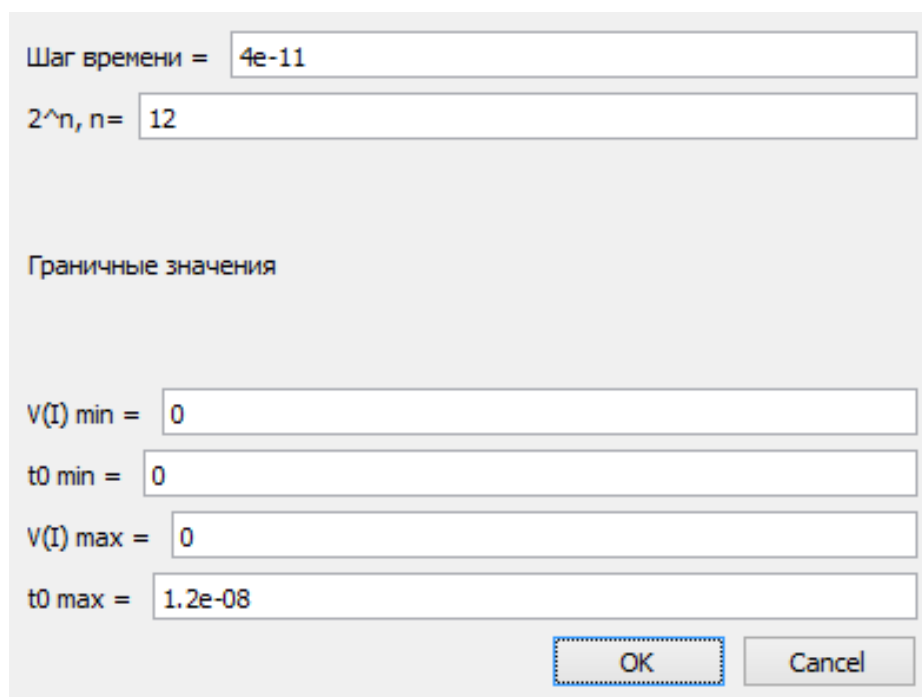


Рисунок 2.3 – Параметры временного сигнала

По результатам анализа проанализировать полученный отклик и определить уровень перекрестных помех на пассивные линии по отношению к активной. В отчете также должны быть приведены выводы по работе.

### 2.1.2 Задание для самостоятельно выполнения

Для построения временного отклика необходимо построить схему в системе TALGAT и задать воздействующий импульс. Схема состоит из отрезков линий передачи, характеризующихся матрицами **L** и **C**, нагрузок по 50 Ом, емкостей – 0,1 пФ и индуктивностей – 500 пГн. Параметры воздействующего импульса: амплитуда  $V = 5$  В, длительность плоской вершины импульса  $tD = 1$  нс, длительности переднего фронта и заднего  $tRT = tFT = 2$  нс.

В таблицах 2.1–2.4 и на рисунках 2.4–2.7 приведены параметры и принципиальные схемы четырех вариантов заданий.

### 2.1.2.1 Вариант 1

Таблица 2.1 – Параметры линий передачи

№ отрезка линии передачи	Слой	Число проводников	Длина отрезка линии передачи
1	TOP	1	0,1
2	TOP	1	0,12
3	GND	1	0,21
4	BOTTOM	1	0,25
5	BOTTOM	2	0,15
6	BOTTOM	3	0,125
7	BOTTOM	3	0,32

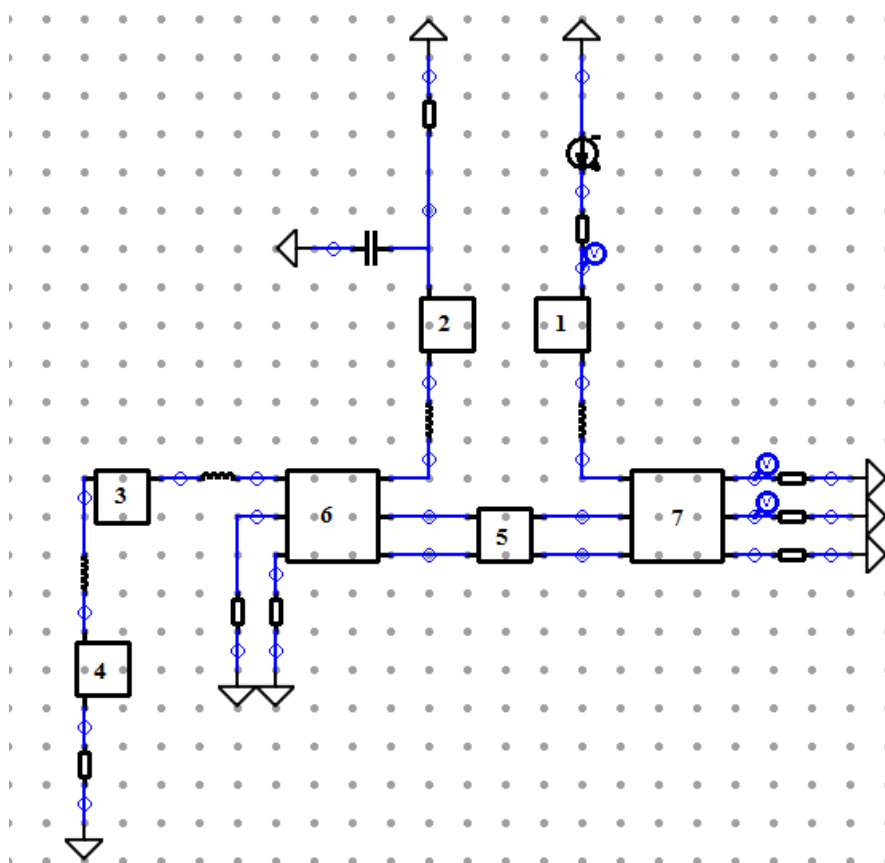


Рисунок 2.4 – Тестовая принципиальная схема

### 2.1.2.2 Вариант 2

Таблица 2.2 – Параметры линий передачи

№ отрезка линии передачи	Слой	Число проводников	Длина отрезка линии передачи
1	TOP	1	0,8
2	TOP	1	0,75
3	TOP	1	0,5
4	BOTTOM	1	0,21
5	BOTTOM	1	0,5
6	BOTTOM	4	0,25
7	BOTTOM	5	0,12

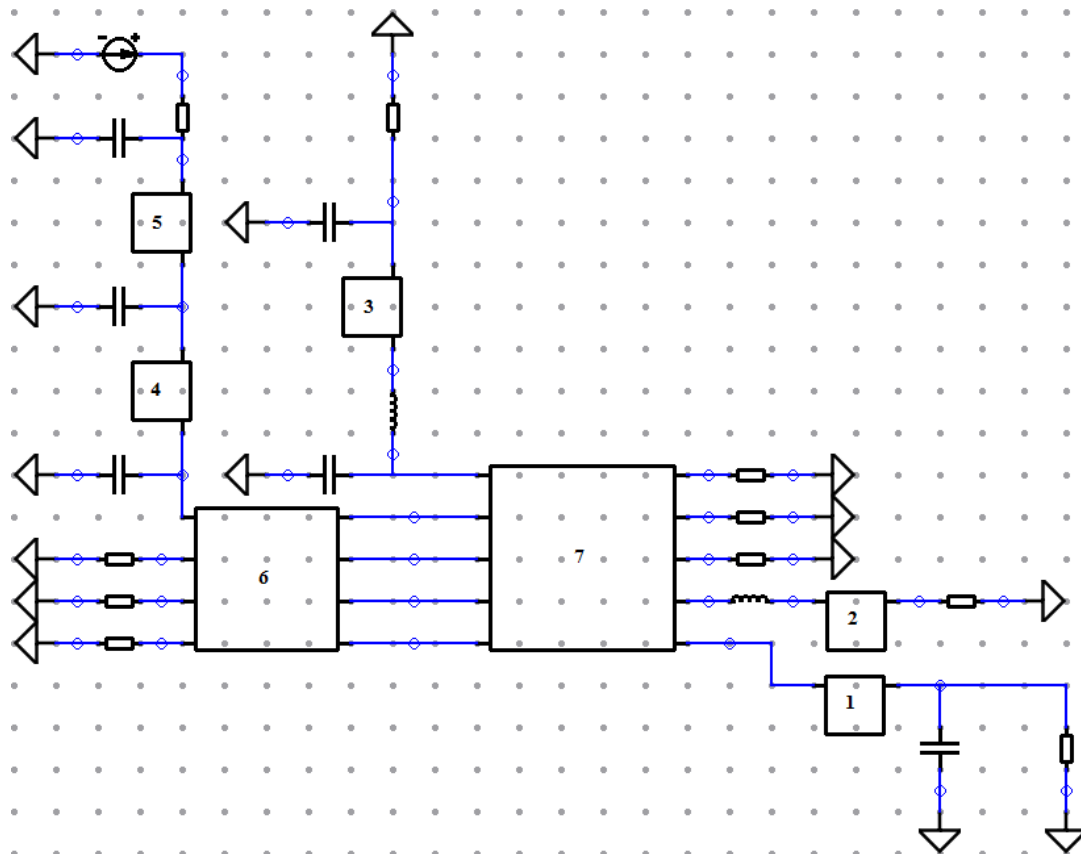


Рисунок 2.5 – Тестовая принципиальная схема

### 2.1.2.3 Вариант 3

Таблица 2.3 – Параметры линий передачи

№ отрезка линии передачи	Слой	Число проводников	Длина отрезка линии передачи
1	TOP	1	0,05
2	BOTTOM	1	0,125
3	BOTTOM	1	0,05
4	BOTTOM	1	0,05
5	BOTTOM	1	0,375
6	BOTTOM	2	0,125
7	BOTTOM	3	0,05
8	BOTTOM	4	0,375
9	BOTTOM	5	0,3
10	BOTTOM	5	0,35

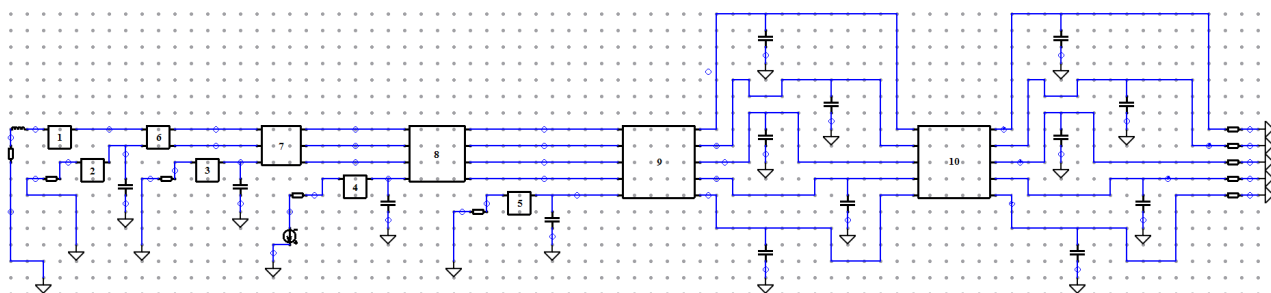


Рисунок 2.6 – Тестовая принципиальная схема

### 2.1.2.4 Вариант 4

Таблица 2.4 – Параметры линий передачи

№ отрезка линии передачи	Слой	Число проводников	Длина отрезка линии передачи
1	TOP	1	0,1
2	TOP	1	0,075
3	GND	3	0,25
4	GND	5	0,275
5	BOTTOM	1	0,4
6	BOTTOM	2	0,15
7	BOTTOM	2	0,625
8	BOTTOM	3	0,225
9	BOTTOM	5	0,025

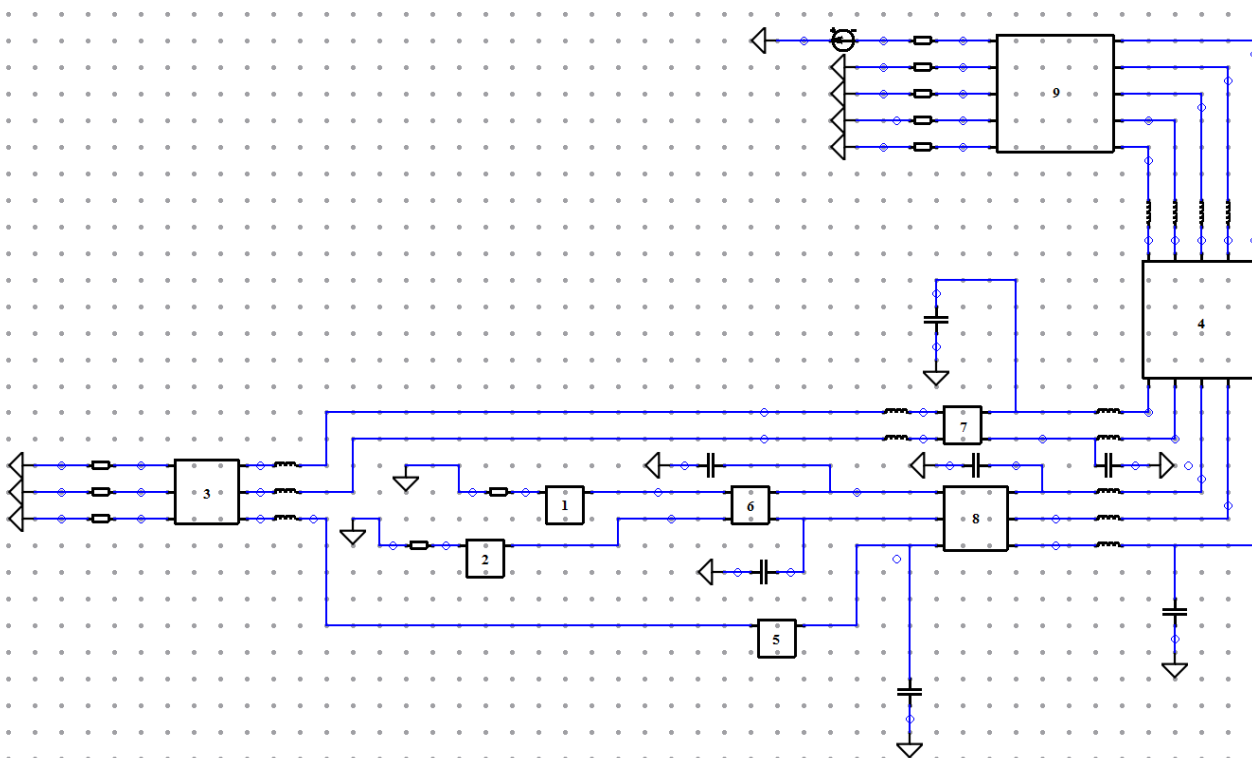


Рисунок 2.7 – Тестовая принципиальная схема

## 2.2 Коаксиальный кабель

Цель работы – изучение влияния конструктивных параметров коаксиального кабеля на картину электростатического поля во внутренней области.

Одножильный кабель на рабочее напряжение  $U_0$  имеет радиус жилы  $r_1$  и внутренний радиус оболочки  $r_2$  (рисунок 2.8). В идеале оба проводника должны иметь общую ось, однако в процессе изготовления или эксплуатации возможно смещение проводников на расстояние  $d$ , что может привести к пробое изоляции кабеля, если максимальная напряженность электростатического поля превысит допустимое значение.

Обычно при проектировании коаксиального кабеля задается радиус жилы  $r_1$ , который выбирается по величине токовой нагрузки. Внешний радиус изоляции (внутренний радиус оболочки  $r_2$ ) определяется исходя из допустимого значения максимальной напряженности электростатического поля и рабочего напряжения кабеля  $E_{\max 0}$  как



$$E_{\max 0} = \frac{U_0}{r_1 \ln(r_2 / r_1)}. \quad (2.1)$$

Тогда

$$r_2 = r_1 \exp\left(\frac{U_0}{r_1 E_{\max 0}}\right). \quad (2.2)$$

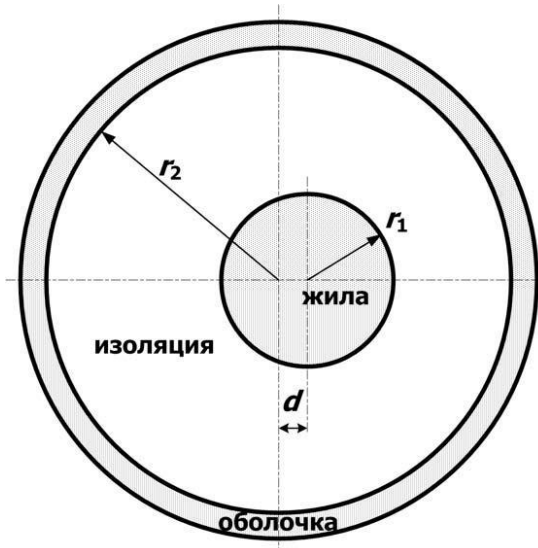


Рисунок 2.8 – Конструкция коаксиального кабеля

Для уменьшения внешнего радиуса кабеля часто применяется изоляция из кабельной бумаги с различной диэлектрической проницаемостью слоев. При этом стараются обеспечить наименьшую неравномерность распределения напряженности электростатического поля вдоль радиуса. Существенного выравнивания поля можно добиться при выполнении определенных соотношений между диэлектрическими проницаемостями слоев и их радиусами.

В частности, для кабеля с двухслойной изоляцией (рисунок 2.9) оптимальное распределение напряженности поля достигается при соблюдении следующего равенства

$$\varepsilon_1 r_1 = \varepsilon_2 r_3. \quad (2.3)$$

Тогда радиус оболочки  $r_2$  можно выразить равенства

$$E_{\max 0} = \frac{U_0}{r_1 \left( \ln(r_3 / r_1) + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \ln(r_2 / r_3) \right)}. \quad (2.4)$$

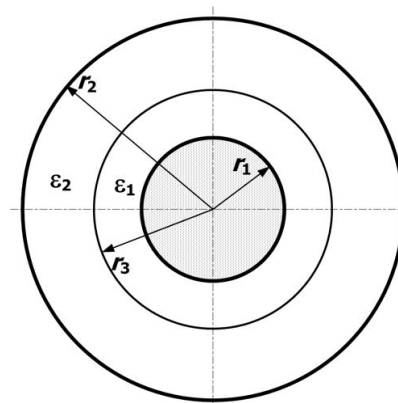


Рисунок 2.9 – Кабель с градирированной изоляцией

При расчете электростатического поля, создаваемого такой системой, принимают, что потенциал на поверхности внутреннего проводника равен  $U_0$ , а потенциал на поверхности наружного проводника равен нулю. При этом поле сосредоточено в области диэлектрика, заполняющего кабель, и во внешнее пространство не проникает. Здесь учитывается и тот факт, что электростатическое поле в проводник не проникает, поэтому поверхности проводников становятся границами области существования поля.

Учитывая, что длина кабеля велика по сравнению с его диаметром, поле можно считать плоскопараллельным, т.е. не изменяющимся вдоль оси проводников. В однородном изотропном диэлектрике ( $\epsilon_r = \text{const}$ ) такое поле описывается двухмерным уравнением Лапласа для электростатического потенциала  $U$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0. \quad (2.5)$$

В общем случае электростатическое поле для плоскопараллельной задачи описывается уравнением Пуассона

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_y \frac{\partial U}{\partial y} \right) = -\rho, \quad (2.6)$$

где  $\rho$  – объемная плотность заряда в рассматриваемой области, а диэлектрические свойства различны вдоль осей координат.

Для того чтобы уравнения Лапласа и Пуассона были эквивалентны, необходимо положить  $\rho = 0$  и задать изотропность свойств диэлектрика ( $\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon$ ). Решение уравнения Лапласа может быть получено при учете условий на границах рассматриваемой области. Применительно к поставленной задаче следует задать потенциалы на поверхности проводящих цилиндров.

Перед началом вычислений следует разработать расчетную модель решаемой задачи. При моделировании обычно следует стараться использовать наличие симметрии в расположении элементов конструкции. Это позволяет повысить скорость расчетов. В частности для анализируемой задачи в качестве оси симметрии может быть рассмотрена горизонтальная ось. Условие симметрии означает равенство нулю производной от электростатического потенциала по направлению нормали к поверхности (граничное условие Неймана), т.е.  $\partial U / \partial n = 0$ . В результате расчетная модель приобретет вид, изображенный на рисунке 2.10. Такая модель соответствует начальному расположению элементов. Если по условию задачи задан однослойный диэлектрик, то полуокружность радиуса  $r_3$  прорисовывать не следует.

Требуемые изменения модели после проведенного базового расчета будут проводиться путем смещения соответствующих элементов или изменения их радиусов. Смещение жилы предполагается осуществлять вдоль оси  $Ox$ , а изменение радиуса обеспечивать смещением узловых точек.

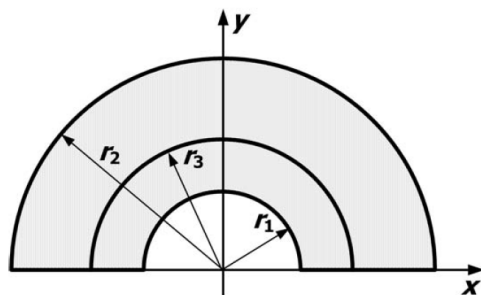


Рисунок 2.10 – Расчетная модель


Этапы решения задачи схематично приведены на рисунке 2.11.



Рисунок 2.11 – Этапы решения задачи

## 2.2.1 Порядок выполнения работы:

1. При создании новой задачи (*Файл – Создать задачу*) в соответствующих диалоговых окнах необходимо указать: имя задачи – Lab1 (также необходимо указать путь к рабочей папке на сетевом диске, где будут храниться файлы); *Тип задачи* – электростатическое поле; *Класс модели* – плоская; *Единицы длины* – миллиметры; *Координаты* – декартовы. В результате на рабочей панели слева появится окно задачи (проекта) lab1.pbm, а в центре окно геометрического редактора с координатной сеткой, на которой красным цветом нанесены координатные оси.

2. Для построения геометрической модели необходимо установить шаг сетки равным 1 мм (*Вид – Сетка привязки* или клик правой кнопкой мыши по координатной сетки – *Сетка привязки*). Далее необходимо перейти в режим вставки новых объектов с помощью элемента  и используя инструменты *Половина круга (180°)* и *Прямая линия (0°)* нарисовать расчетную модель согласно заданных начальных размеров.

Далее необходимо назначить соответствующие метки. Для этого перейти в режим *Выделение объектов* и присвоить имена:

- Блокам – замкнутым геометрическим областям, обладающим материальными свойствами (для данной задачи диэлектрической проницаемостью);
- ребрам – линиям, ограничивающим расчетную область, на которых будут заданы граничные условия.

Для этого кликнуть правой кнопки мыши по объекту, который необходимо выделить, после чего он сменит цвет на красный, и выбрать пункт «Свойства». В появившемся диалоговом окне задать имя метки объекта.

3. Для задания (описания) физических свойств материалов необходимо двойным кликом мыши по имени блока в окне задачи вызвать диалоговое окно для ввода свойств. В появившемся окне ввести необходимое значение относительной диэлектрической проницаемости.

Правильность задания свойств меток выполняется с помощью рисунка 2.12.

Значок	Двумерные задачи
	Метка блока с заданными свойствами материала
	Метка ребра с заданным граничным условием
	Метка вершины с заданным граничным условием или источником поля
	- нет -
	Метка, упомянутая в модели, для которой еще не заданы свойства
	Метка пустого блока (тела), исключенного из расчета поля
	Метка с естественными граничными условиями (устанавливаемыми по умолчанию) и без источника поля

Рисунок 2.12 – Корректность задания меток

4. Далее необходимо задать граничные условия. Для этого двойным кликом по метке ребра в окне задачи вызвать диалоговое окно для ввода свойств. На рисунке 2.13 показаны условия, соответствующие разным границам. Ребро  $b_1b - U = 0$  В. Ребро  $a_1a - U = U_0$ . Ребра  $ab, a_1b_1 - \sigma = 0$ .

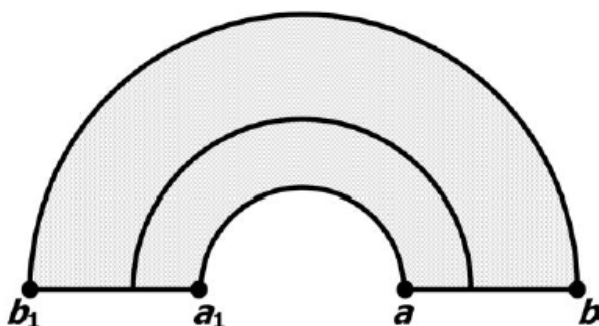


Рисунок 2.13 – Структура с указанием ребер

5. Для построения конечно-элементной сетки необходимо задать шаг дискретизации расчетной области. Шаг дискретизации определит густоту сетки в различных областях модели. Для рассматриваемой задачи можно предположить существенную неоднородность поля вблизи центральной жилы, поэтому здесь сетка должна быть гуще. Для задания шага необходимо двойным кликом по ребру вызвать окно свойств выделенных объектов, переключатель с автоматического режима перевести в режим *Задан* и указать необходимые значения (для ребра  $aa_1 - 0,1$  мм (в задании №3 –  $0,02$  мм), для  $bb_1 - 1$  мм). Важно, что в отличие от поля *Метка*, поле *Шаг дискретизации* является общим для страниц диалога, относящихся к блокам, ребрам и вершинам, ввиду чего значения шагов дискретизации на разных страницах диалога всегда одинаковы. Если изменить шаг дискретизации на одной из этих страниц, значения, показываемые на остальных страницах, изменятся. Для построения сетки необходимо выбрать структуру целиком или её часть и воспользоваться инструментом . (Для удаления сетки предназначен инструмент .)

6. Для решения задачи необходимо нажать или в меню *Задача* выбрать пункт *Решить: lab1.pbt*. После решения в основной части окна программы отобразится рассчитанная картина поля текущей задачи.

7. Анализ результатов

7.1 Построить зависимость напряженности поля вдоль контура  $ab$ :

- Выбрать *Контур – Добавить (Линия/Ребро/Блок)* – клик левой кнопки мыши по ребру. При необходимости сменить направление контура, чтобы он шел от узла  $a$  к узлу  $b$  необходимо выбрать *Контур – Сменить направление*.
- Выбрать *Вид – График* и из предложенного набора величин выбрать *Напряженность*.

- Распечатать (сохранить) график полученной зависимости для чего выбрать *Файл – Печать*.

7.2 Определить максимальное значение напряженности (соответствует узлу  $a$ ) и занести его в таблицу результатов.

- Выбрать *Вид – Локальные значения*. В результате появляется новое окно.
- Кликом правой кнопки мыши по строке *Укажите точку* вызвать контекстное меню и выбрать пункт *Координаты точки*.
- В предложенном поле ввести координаты узла  $a$ .
- Полученное значение записать в таблицу.

7.3 Закрыть окно *Анализ результатов*.

8. В соответствии с программой работы произвести необходимые изменения в геометрии задачи, используя возможности геометрического редактора (смещение объектов):

8.1левой кнопкой мыши выделить объект – ребро или узел (ребро  $a_1a$  при изучении влияния смещения жилы, узел  $a(a_1)$  при изменении радиуса жилы, узел  $b(b_1)$  при изменении радиуса обмотки).

8.2 Выбрать *Правка – Передвинуть выделенное*. В появившемся диалоговом окне необходимо указать координаты вектора переноса (смещение производится только по оси  $Ox$ ).

8.3 При изменении радиуса жилы или оболочки п. 8.2 повторяется дважды (для каждого из узлов), при этом вектора переноса антисимметричны, например,  $(2, 0)$  и  $(-2, 0)$ .

9. Построить сетку (при этом не надо менять шаг дискретизации, а просто воспользоваться файловым меню – см. п.5), решить задачу и выполнить п. 7.2.

10. Пункты 8 и 9 повторить необходимое число раз. Для найденного окончательного варианта построить зависимость напряженности поля вдоль контура  $ab$  в соответствии с п. 7.1 и распечатать картину эквипотенциальных линий.

## 2.2.2 Задание для самостоятельного выполнения

Задача №1. Определить, на какую величину может быть допущено смещение оси жилы кабеля по отношению к оси оболочки, чтобы максимальная напряженность поля в диэлектрике не превысила двойной по сравнению с максимальной напряженностью при совпадении осей. Изоляцию кабеля считать однородной.

Построить зависимость  $E_{\max}(d)$  (результаты расчета  $E_{\max}$  при изменении  $d$  должны быть занесены в таблицу). Для построения использовать не менее 8–10 точек. Привести зависимости напряженности поля вдоль контура  $ab$  для исходной и конечной конфигурации. Привести картину эквипотенциальных линий для конечной модели. Параметры задачи приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Параметры для моделирования

№	$U_0, \text{В}$	$\epsilon_r$	$r_1, \text{мм}$	$r_2, \text{мм}$
1	3	2	5	20
2	3	2,2	6	22
3	6	2,2	7	25
4	6	2,4	8	25
5	10	2,4	9	30
6	10	3	10	30

Задача №2. При заданном размере оболочки кабеля, рассчитанного на  $U_0 = 3 \text{ кВ}$ , определить оптимальный радиус жилы (соответствует минимальному значению

максимальной напряженности поля в конструкции). Результирующее значение найти с точностью до десятых долей миллиметра. Исходное значение радиуса жилы приведено в таблице 2.6. Построить зависимость  $E_{\max}(r_1)$  (результаты расчета  $E_{\max}$  для различных  $r_1$  должны быть занесены в таблицу). Для построения использовать не менее 8–10 точек. Привести зависимости напряженности поля вдоль контура  $ab$  для исходной и оптимальной конструкции и картину эквипотенциальных линий для оптимальной модели.

Таблица 2.6 – Параметры для моделирования

№	$\epsilon_r$	$r_1$ , мм	$r_2$ , мм
1	2	10	15
2	2	11	17
3	2,2	12	20
4	2,2	13	22
5	2,4	14	23
6	2,4	15	25

Задача №3. Исследовать, как изменится радиус оболочки кабеля при использовании двухслойного диэлектрика. Вначале по формуле (2.4) рассчитать радиус внутреннего слоя изоляции  $r_3$ , а потом изменять радиус оболочки так, чтобы напряженность не превысила  $E_{\max 0} = 2.5 \cdot 10^6$  В/м. Базовый вариант – кабель с однородной изоляцией  $\epsilon_{r2}$ . Построить зависимость  $E_{\max}(r_2)$  (результаты расчета  $E_{\max}$  для различных  $r_2$  должны быть занесены в таблицу). Для построения использовать не менее 6–8 точек. Привести зависимости напряженности поля вдоль контура  $ab$  для базового и оптимального варианта и картину эквипотенциальных линий для оптимальной модели. Параметры для моделирования приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Параметры для моделирования

№	$\epsilon_{r1}$	$\epsilon_{r2}$	$r_1$ , мм	$r_2$ , мм
1	3,4	2	2	14
2	4,2	2	2,5	12,5
3	3,6	2	3	11,5
4	4,1	2	3,5	11,5
5	3,2	2	4	11,5
6	4,2	2	2,7	12,5

В этой задаче при прорисовке геометрии модели вводятся три полуокружности радиусами  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$ . В результате получаются две замкнутые области (между  $r_1$  и  $r_3$ ; между  $r_3$  и  $r_2$ ), которые должны быть поименованы. В предварительном расчете их свойства одинаковы и определены  $\epsilon_{r2}$ . В дальнейших расчетах свойства ближайшего к центральной жиле блока изменяют на  $\epsilon_{r1}$ .

### 2.3 Контурная антенна

Цель работы – получение навыков электродинамического моделирования методом моментов на примере моделирования контурной антенны в системе CONCEPT-II.

Контурная антенна является широко используемым источником магнитного поля в ближней зоне. Её часто используют при проведении испытания на ЭМС. При этом её конструкция является достаточно примитивной. Поэтому данная антенна является хорошим примером для получения начальных навыков электродинамического моделирования.

### 2.3.1 Порядок выполнения работы

Исследуемой структурой является квадратная контурная антенна со следующими параметрами (рисунок 2.14): длина стороны  $a = 0,1$  м, радиус провода  $r = 1$  мм, частота сигнала  $f = 1$  МГц, напряжение генератора  $U = 1$  В.

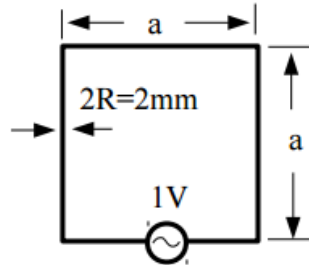


Рисунок 2.14 – Параметры контурной антенны

Для начала работы необходимо запустить CONCEPT-II и создать новый проект. Для этого правой кнопкой мыши навести на панель меню *File – New Simulation*, ввести название проекта и нажать *OK*.

На дереве проекта находится вкладка *Wires*, необходимо нажать правой кнопкой мыши и во всплывающем меню выбрать *Edit a new wire file*. Откроется диалоговое окно (рисунок 2.15), в котором необходимо ввести параметры провода: координаты начала и конца провода, радиус провода и др. Название файла должны иметь имя следующих типов: *xxx.wire* или *wire.xxx*.

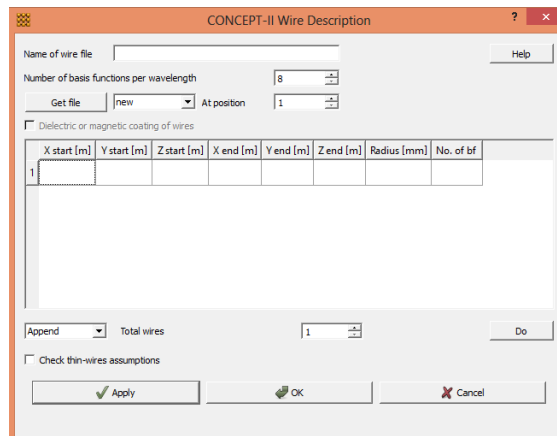


Рисунок 2.15 – Диалоговое окно для создания проводов

Изначально имеется строка для создания одного провода, необходимо добавить еще три, для этого в нижней части окна в графе *Total wires* необходимо выбрать 3 (добавить провода) и нажать *Do*. В итоге появляется возможность создания четырех проводов одновременно. Необходимо ввести их координаты (рисунок 2.16).

	X start [m]	Y start [m]	Z start [m]	X end [m]	Y end [m]	Z end [m]	Radius [mm]	No. of bf
1	0	0	0	0,1	0	0	1	9
2	0,1	0	0	0,1	0,1	0	1	9
3	0,1	0,1	0	0	0,1	0	1	9
4	0	0,1	0	0	0	0	1	9

Рисунок 2.16 – Координаты и параметры, необходимые для создания контурной антенны

Для того чтобы установить необходимую частоту генератора необходимо выполнить следующее. В дереве проекта находится вкладка *Setup simulation*, щелкнуть правой кнопкой мыши на строку *Frequencies – Single Fre*. Откроется диалоговое окно, в котором надо указать частоту 1 МГц (рисунок 2.17), затем нажать *OK*.

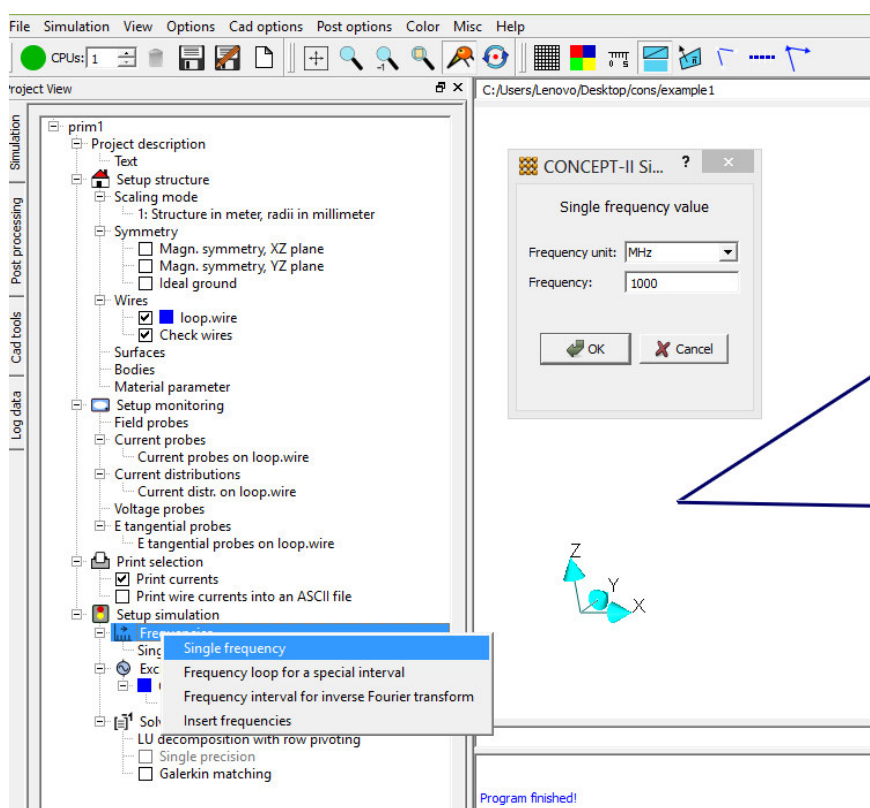


Рисунок 2.17 – Установка частоты генератора контурной антенны

Для того чтобы установить необходимое напряжение генератора в разделе *Setup simulation* нужно щелкнуть правой кнопкой мыши на строку *Excitation – Voltage generator(s)*, где выбрать необходимый провод и ввести амплитуду и фазу как показано на рисунке 2.18, далее нажать *Apply* и затем *OK*.

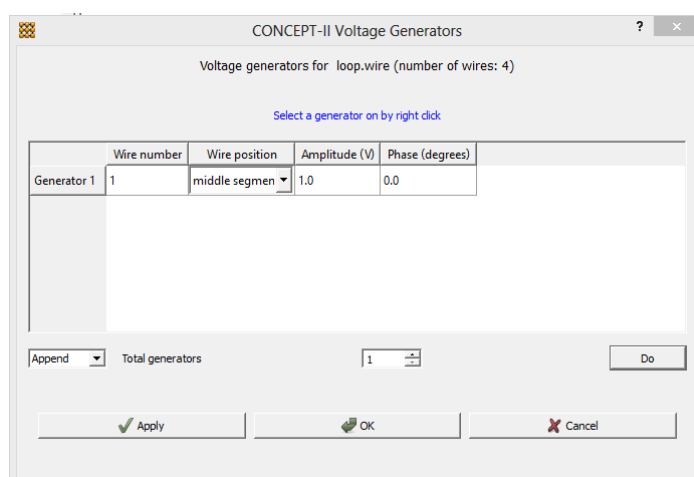


Рисунок 2.18 – Размещение генератора напряжения на проводе

После того как была создана структура и установлены все параметры необходимо запустить процесс моделирования, нажав на кнопку . В процессе вычислений формируется система линейных алгебраических уравнений, которая затем решается при



помощи  $LU$ -разложения (модификация метода Гаусса). Если активировать вкладку *Log data*, которая находится на левой панели вкладок графического интерфейса программы, и нажать на *Concept-II-simulation* на дисплее, то можно увидеть содержимое файла журнала *concept.out*.

В ходе вычисления происходит расчет распределение плотности поверхностного тока и последующее сохранение полученных значений на жесткий диск. Для вычисления напряженности магнитного поля  $H$  вдоль антенны. Для этого необходимо открыть вкладку *Post processing* и нажать на кнопку  $\vdots$ . В результате открывается вспомогательное окно (рисунок 2.19). Первая строка содержит координаты начала и конца имеющегося провода и число сегментов на которые он разбивается. Если выбрать *Field probes* (вторая строка в выпадающем меню), появляется возможность самостоятельно выбрать необходимый провод и ввести его координаты. После нажатия кнопки *OK* происходит вычисление напряженности магнитного поля.

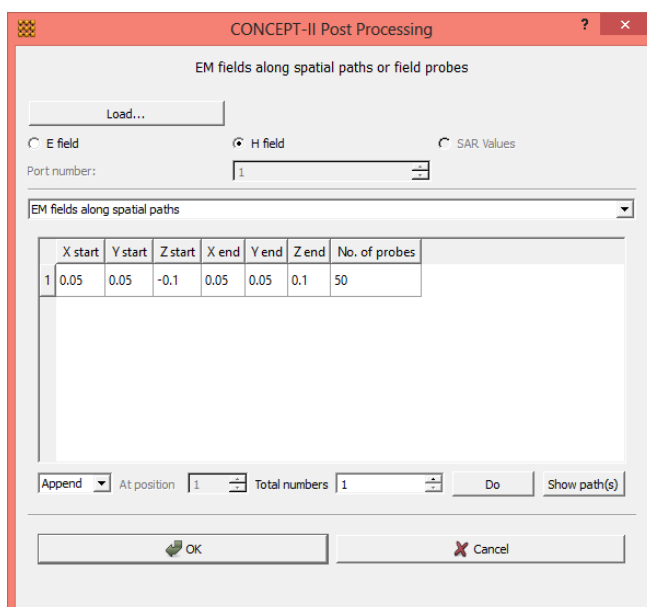


Рисунок 2.19 – Настройки для вычисления значений напряженности магнитного полей

После окончания процесса вычислений открывается дополнительное диалоговое окно (рисунок 2.20), в котором можно выбрать необходимую компоненту поля для отображения. Так как изначально имеются данные для поля  $H$  по умолчанию имя файла – *H-path1.asc* (рисунок 2.20). Необходимо поставить галочку на *Max. magn.* и нажать *OK*.

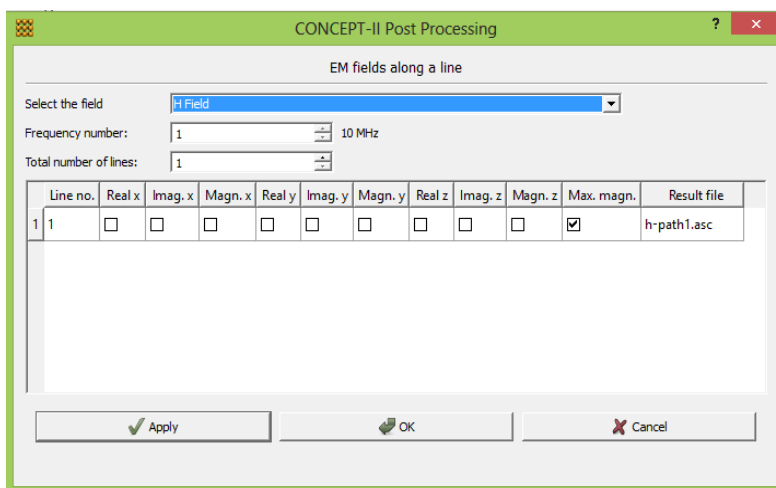


Рисунок 2.20 – Выбор компоненты магнитного поля для отображения

После вычислений на экране отображается зависимость напряженности магнитного поля вдоль выбранного пути (рисунок 2.21).

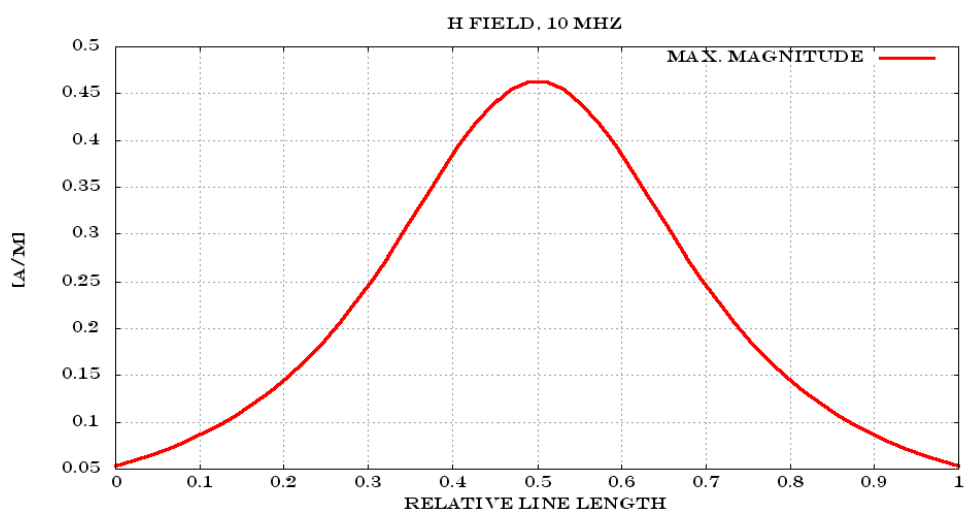


Рисунок 2.21 – График зависимости напряженности магнитного поля вдоль выбранного контура

Представление кривой можно изменить двумя способами. Первый, нажав правой кнопкой мыши во вкладке *Post processing* в окне просмотр результатов (дерево постобработки) на строчку *1D EM field (line)* с иконкой  $\vdots$  (рисунок 2.22). Дерево постобработки дает возможность обеспечить замену отображения уже вычисленных результатов следующими способами: *Curve selection* – выбор дополнительных компонент поля; *Show result* – возможность сравнение сохраненных результатов вычисления. Выходными форматами являются SVG, PNG и PostScript.

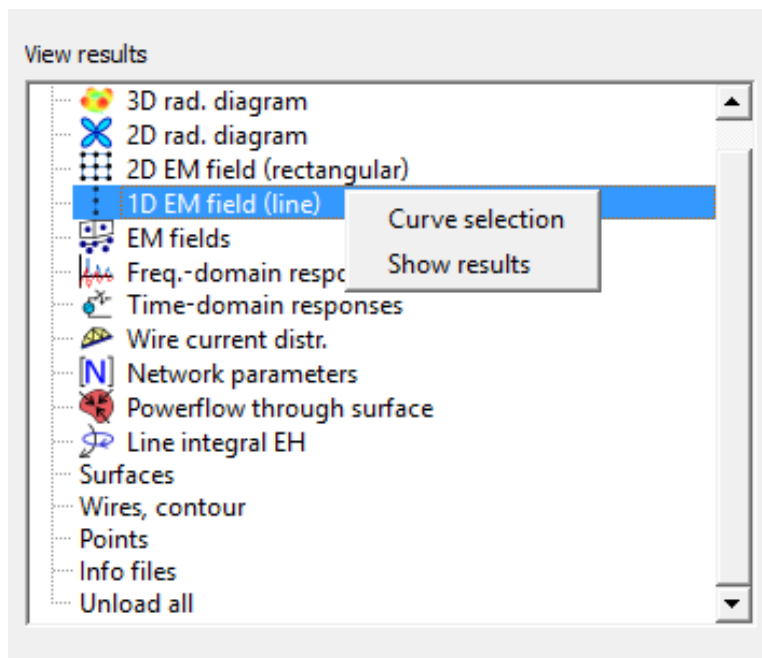


Рисунок 2.22 – Дерево модуля постобработки результатов вычислений

Для того чтобы перейти в двумерный формат представления необходимо выполнить предварительные преобразование: изменить частоту с 1 МГц на 1000 МГц. Для этого во вкладке *Simulation* в дереве проекта необходимо правой кнопкой мыши нажать на строчку *Single frequency – Set frequency* и в открывшемся окне изменить значение частоты на требуемое (рисунок 2.23).

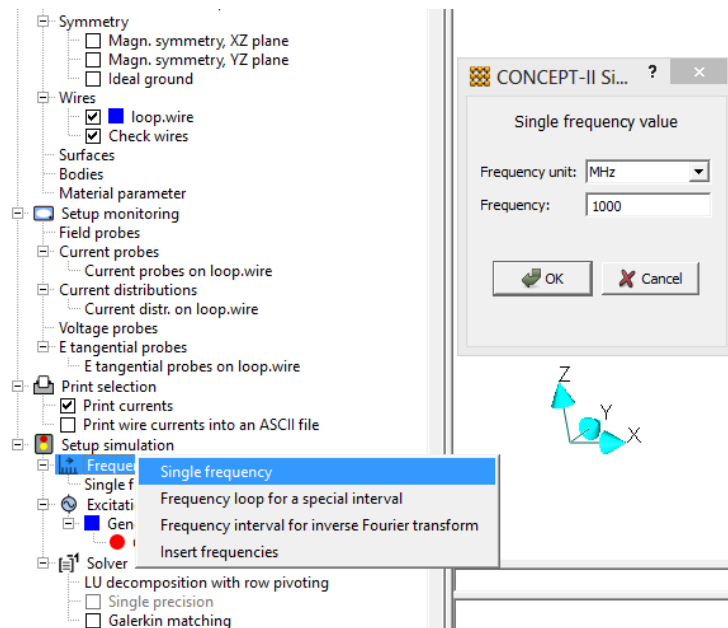


Рисунок 2.23 – Изменение частоты

После внесения изменений необходимо запустить процесс моделирования повторно, нажав на кнопку . После того как появится сообщение об окончании вычислений в нижнем окне графического интерфейса программы появится возможность продолжить повторную обработку результатов вычисления. Для того чтобы вычислить двумерное распределение поля необходимо открыть вкладку *Post processing* и нажать на кнопку , после чего откроется диалоговое окно (рисунок 2.24), в котором необходимо использовать значения по умолчанию, но нужно проконтролировать, чтобы координаты по оси  $Oz$  для трех точек ( $P1$ ,  $P2$ ,  $P3$ ), описывающих двумерную область, были равны нулю. После нажатия кнопки *OK* происходит процесс вычисления, по окончании которого открывается дополнительное диалоговое окно. В нем нужно выбрать *Field(s) at phases* и установить шестнадцать фазовых интервалов (рисунок 2.25a).

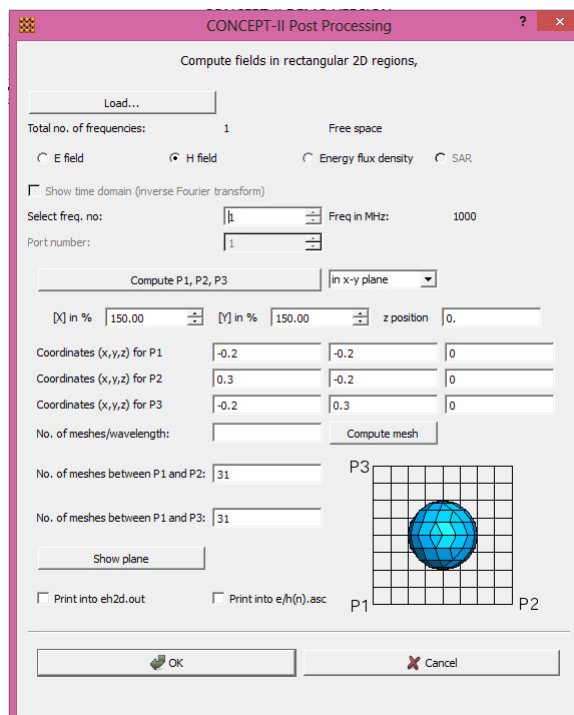


Рисунок 2.24 – Задание области отображения

Нажав на кнопку *OK* на экране графического интерфейса программы отобразится двумерное распределение напряженности магнитного поля для значения фазы, равной  $0^\circ$ . Просмотр распределения поля при различных значениях фазы можно осуществлять пошагово или в виде анимации, для этого в левом нижнем углу во вкладке *Post processing* предусмотрены специальные кнопки (рисунок рисунок 2.25б). Поле *Delay* отвечает за скорость просмотра анимации.

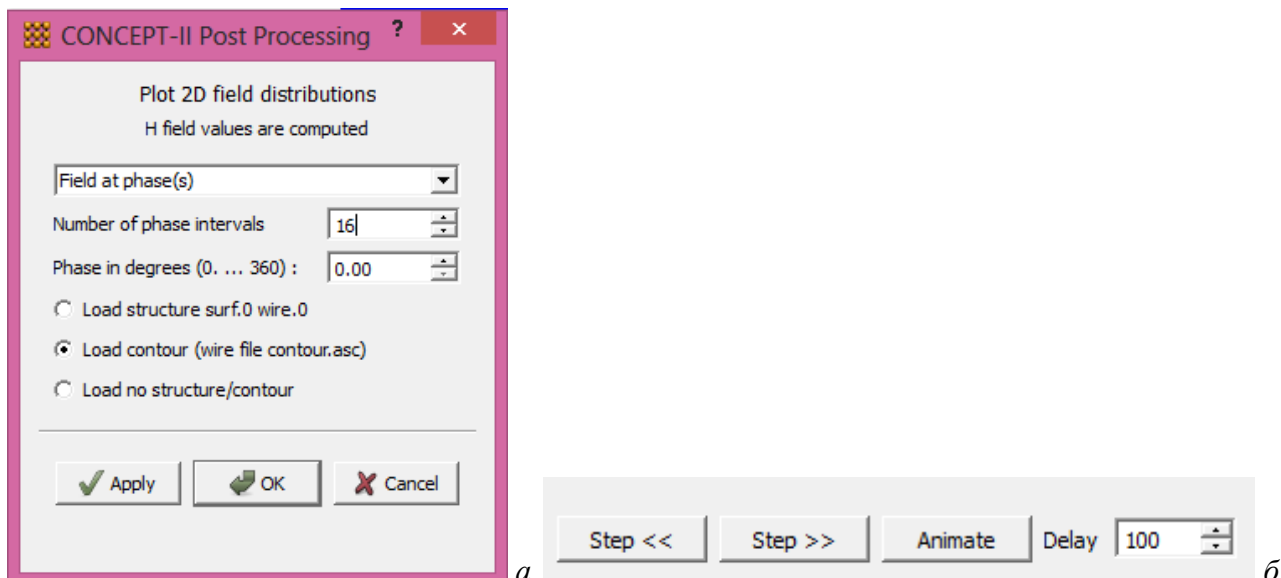


Рисунок 2.25 – Выбор фазовых интервалов и кнопки для их переключения

Для хорошего представления поля необходимо выполнить масштабирование, для чего на панели меню открыть вкладку *Post options – Arrows circles*. После этого откроется диалоговое окно, в котором нужно указать параметры в соответствии с рисунком 2.26. Далее необходимо активировать строчку *Circles* и нажать кнопку *OK*. В результате на отображается требуемое распределение напряженности магнитного поля с использованием цветовой градации значений (рисунок 2.27).

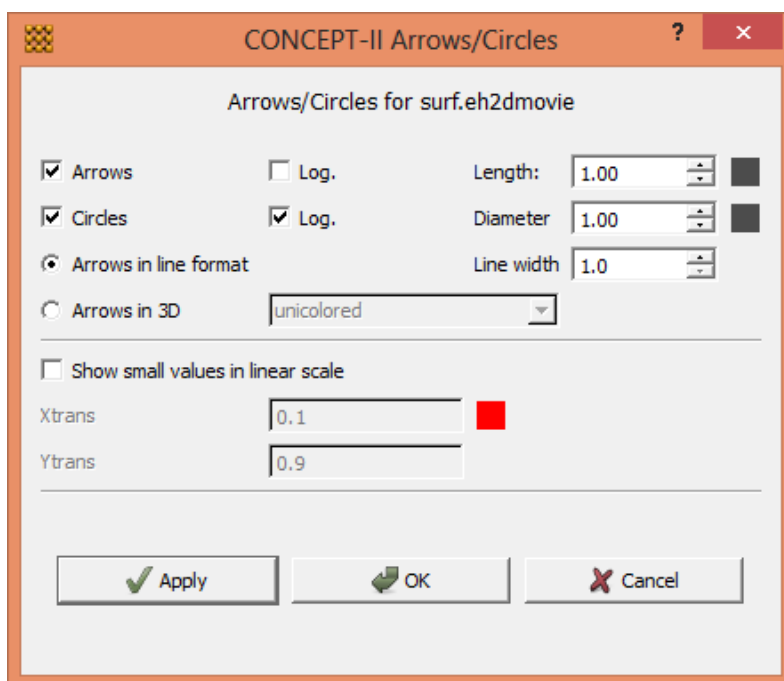


Рисунок 2.26 – Параметры для масштабирования распределения напряженности магнитно поля

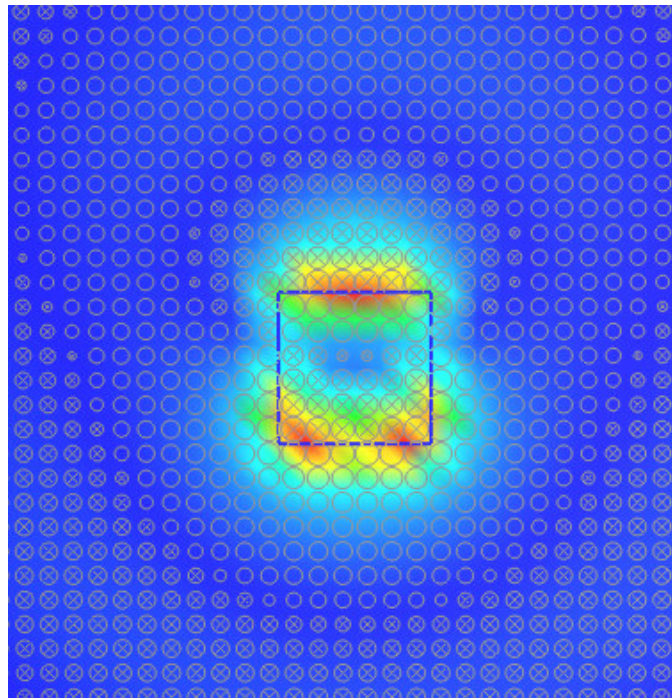



Рисунок 2.27 – Пример распределения напряженности магнитного поля контурной антенны на частоте 1ГГц

Далее необходимо активировать вкладку *Post processing* и нажать на кнопку , после чего откроется диалоговое окно, в котором необходимо сохранить указанные значения по умолчанию и нажать кнопку *OK* (рисунок 2.28).

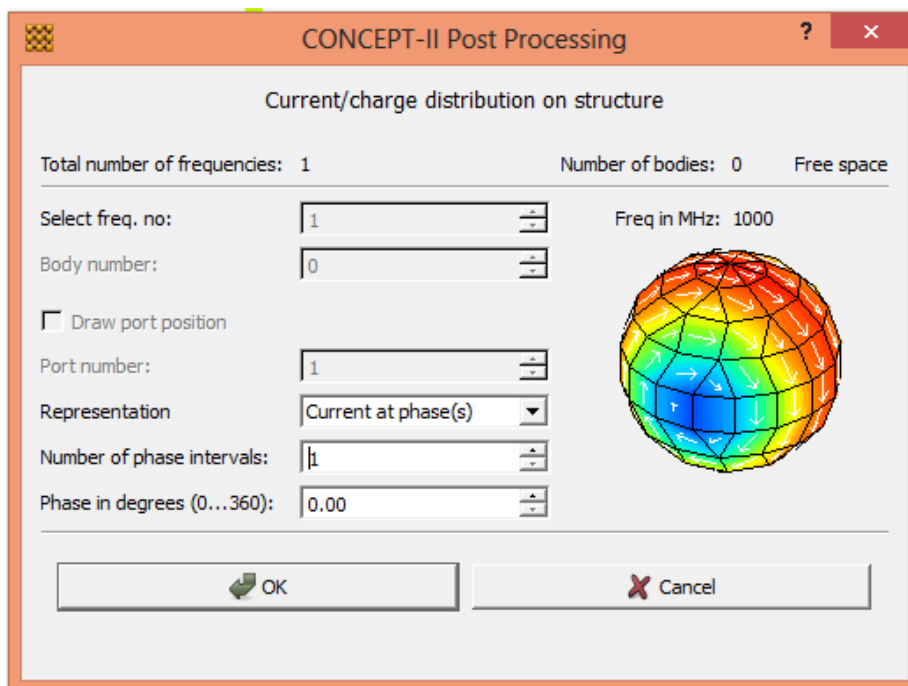


Рисунок 2.28 – Вспомогательное окно для создания графического представления распределения тока

Для лучшего представления распределения тока необходимо увеличить толщину проводников, для этого на панели меню открыть вкладку *Options – Setting for wires in the line mode...* и установить желаемую ширину проводников, равную 10 мм. Также рекомендуется указать нумерацию проводов во вкладке *Post processing*. В дереве постобработки правой кнопкой мыши нажать на строчку *wire.0 – Show labels* и в открывшемся окне отметить

строку *Show element numbers* и нажать *OK*. В итоге на экране появится графическое представление распределения тока на частоте 1 ГГц (рисунок 2.29).

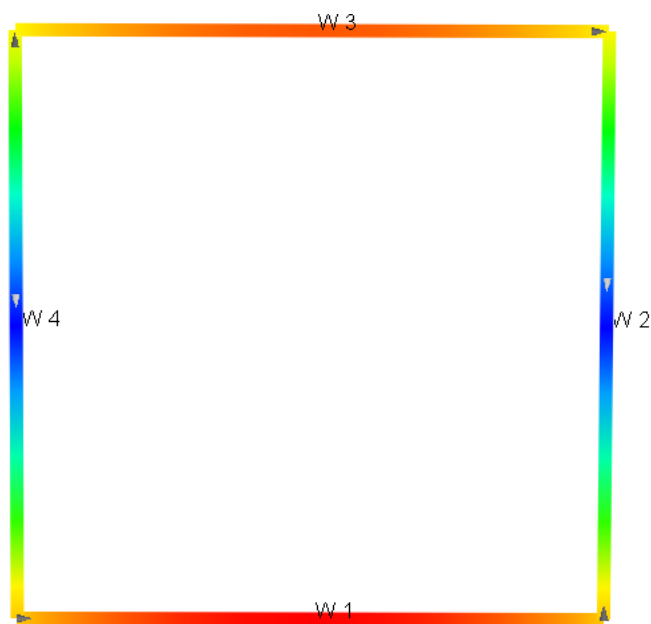


Рисунок 2.29 – Распределение тока на частоте 1ГГц

Каждый провод должен быть в центре нагружен резистором 50 Ом. Для этого необходимо открыть вкладку *Simulation*, в дереве проекта в разделе *Wires* правой кнопкой мыши нажать на строчку *loop.wire* и выбрать *Set loads*, после чего откроется вспомогательное окно как показано на рисунке 2.30.

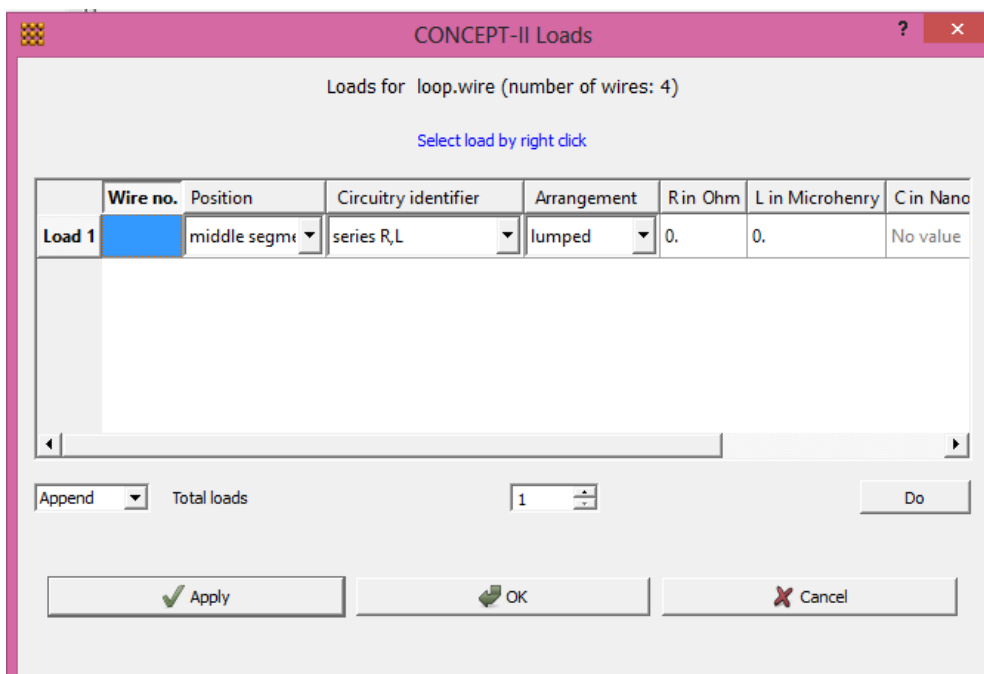


Рисунок 2.30 – Вспомогательное окно для задания нагрузки в проводах

Для того чтобы создать нагрузку, необходимо правой кнопкой мыши нажать на провод в структуре контурной антенны, после чего в диалоговом окне появится строка для создания нагрузки. При этом на проводе при графическом отображении нагрузка отобразится в виде зеленого цилиндра (рисунок 2.31).

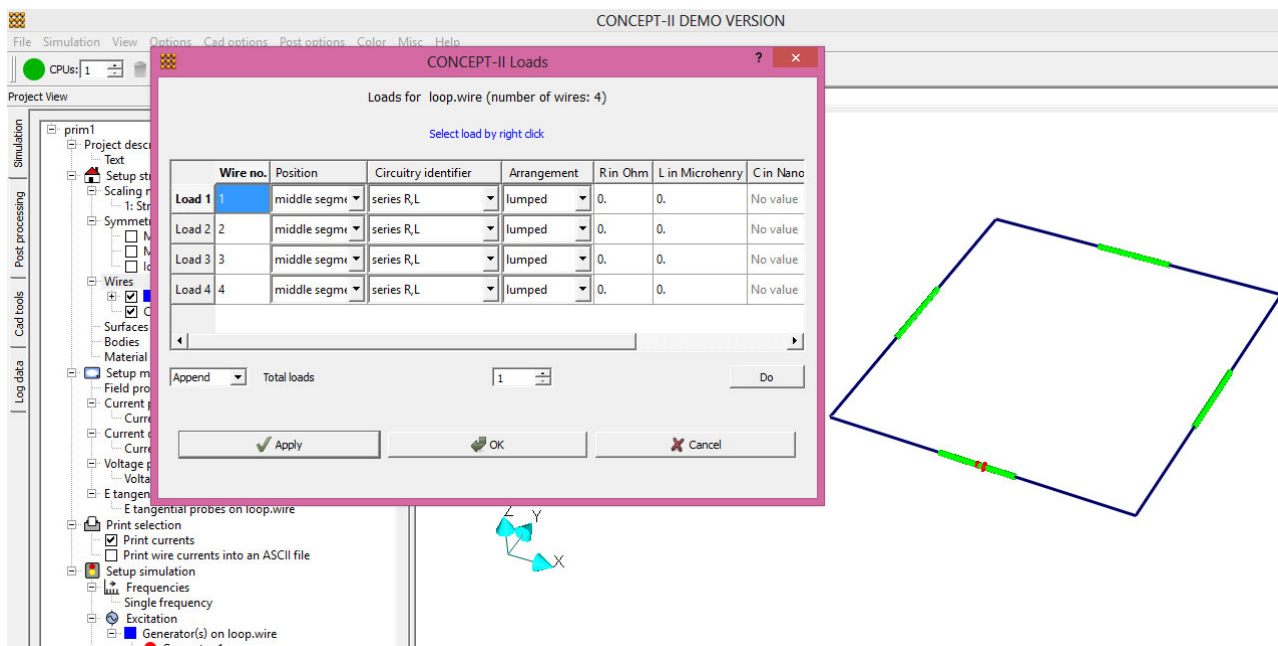


Рисунок 2.31 – Размещение сосредоточенных нагрузок на проводах

Нагрузку можно расположить не только в середине провода, но и в начале или конце. Для этого в окне создания нагрузок необходимо правой кнопкой мыши нажать на ячейку в столбце *Position* и выбрать необходимое положение, после чего нажать *Apply*. Задать общее значение нагрузок можно, нажав правой кнопкой мыши на столбец *R in Ohm – Set global* и в открывшемся диалоговом окне ввести необходимое значение. Также можно установить различные значения для каждой нагрузки с помощью ввода в соответствующие строки.

### 2.3.2 Задание для самостоятельного выполнения

1. Построить отдельные графики, на которых будут изображены реальная и мнимая части поля по каждой пространственной координате.

2. Определить максимальные значения напряженности магнитного поля для частот: 1 МГц, 10 МГц, 50 МГц, 100 МГц, 200 МГц, 500 МГц и 600 МГц. Результаты занести в таблицу 2.8 и построить график зависимости максимального значения напряженности магнитного поля от частоты воздействующего сигнала.

Таблица 2.8 – Зависимость максимального значения напряженности магнитного поля от частоты воздействующего сигнала

$f$ , МГц	1	10	50	100	200	500	600
$ H_{\max} $							

3. Задать напряжение генератора 10 В и частоту 1 МГц. В двумерном виде визуально определить значение фазы, при котором распространение напряженности магнитного поля вдоль проводов максимально.

4. Не изменяя значение напряжения генератора на частоте 1 МГц, установить нагрузку на каждый провод номиналом 100 Ом. Изменяя положения нагрузки вдоль провода, определить при каком ее расположении напряженность магнитного поля максимальна.

5. Оформить отчет по результатам проделанной работы и проанализировать полученные результаты.

## 2.4 Диэлектрическая сфера

Цель работы – получение навыков электродинамического моделирования методом моментов на примере задачи рассеяния электромагнитной волны на диэлектрической сфере в системе CONCEPT-II.

### 2.4.1 Порядок выполнения работы

Исследуемой структурой является диэлектрическая сфера с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 4$  и радиусом  $R = 0,1$  м. Сфера облучается плоской электромагнитной волной с амплитудой 1 В/м и частотой 900 МГц (рисунок 2.32).

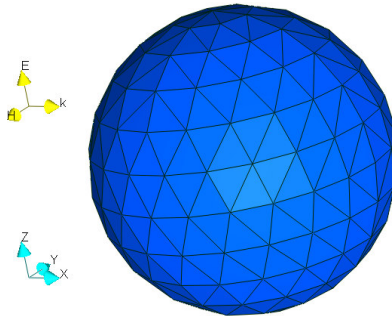



Рисунок 2.32 – Диэлектрическая сфера, облучаемая плоской электромагнитной волной

Для создания модели сферы необходимо создать электрически и геометрически симметричную фигуру, т.е. только половину сферы. Для этого нужно во вкладке *Cad tools* нажать на кнопку со значком . В открывшемся диалоговом окне (рисунок 2.33) необходимо указать следующие параметры: радиус 0,1 м, координаты центра (0; 0; 0), частота 900 МГц, число ячеек дискретизации на длину волны – 12, симметрия относительно плоскости *XZ*. Затем, после нажатия кнопку *OK*, на экране отобразится требуемая структура.

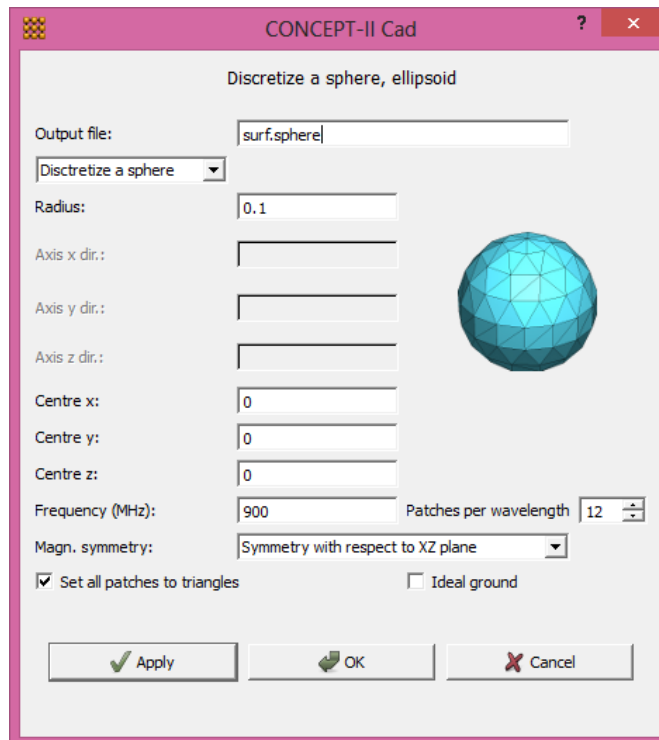


Рисунок 2.33 – Параметры для создания сферы



Открыть вкладку *Simulation*, в дереве проекта правой кнопкой мыши нажать на строку заголовка и во всплывающем меню выбрать *Load all files from 'CAD'*. В дереве проекта, в разделе *Symmetry* активировать строку *Magn. Symmetry, XZ plane*. Правой кнопкой мыши нажать на строку *Bodies* → *Add body*, после чего в данном разделе появятся строки созданного проекта (рисунок 2.34).

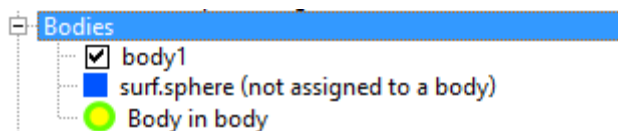


Рисунок 2.34 – Создание проекта

Далее необходимо правой кнопкой мыши нажать на строку *body 1* → *Surface selection by mouse* и выбрать произвольный участок на полусфере. Правой кнопкой мыши нажать на строку *body 1* – *Set material values*, после чего откроется диалоговое окно, в котором необходимо ввести следующие данные: *conductivity* – 0, *rel. permittivity* – 4, *rel. permeability* – 1. Затем нужно нажать на кнопку *OK*. После чего правой кнопкой мыши нажать на строку *surf.sphere* – *Set boundary condition* и в открывшемся диалоговом окне выбрать тип поверхности – *Dielectric boundary*. Установить частоту генератора 900 МГц.

Параметры плоской электромагнитной волны задаются нажатием правой кнопкой мыши на строку *Excitation – Plane wave field* и в открывшемся диалоговом окне необходимо ввести следующие параметры (рисунок 2.35):  $\theta = 270^\circ$ ,  $\Phi = 0^\circ$ ,  $\Psi = 0$ ,  $E$  [V/m] = 1. Далее нажать кнопку *OK* и запустить процесс моделирования.

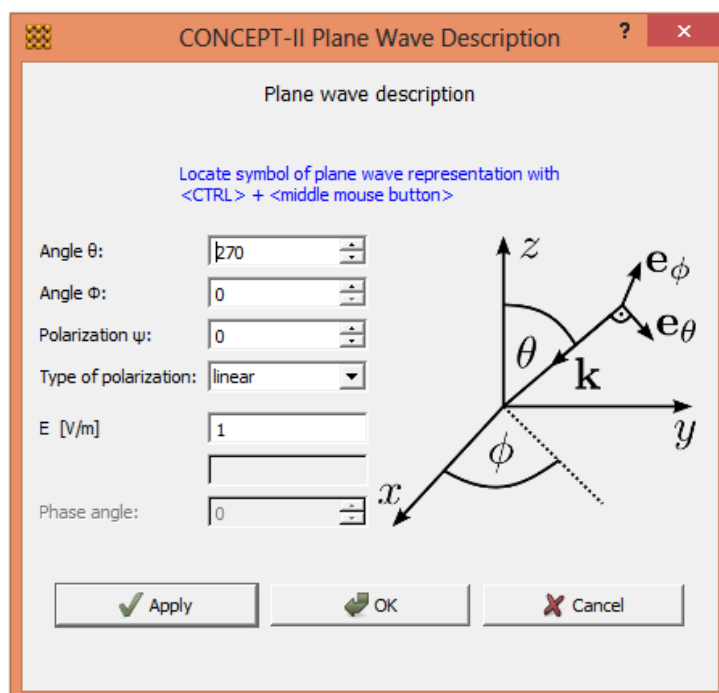



Рисунок 2.35 – Установка параметров плоской электромагнитной волны

Для просмотра полученного распределения тока на поверхности сферы необходимо воспользоваться инструментом с иконкой , а в диалоговом окне использовать значения по умолчанию. Следует обратить внимание на то, что распределение тока можно пронаблюдать как на внешней поверхности сферы, так и на внутренней (рисунок 2.36), изменяя номер поверхности проекта.

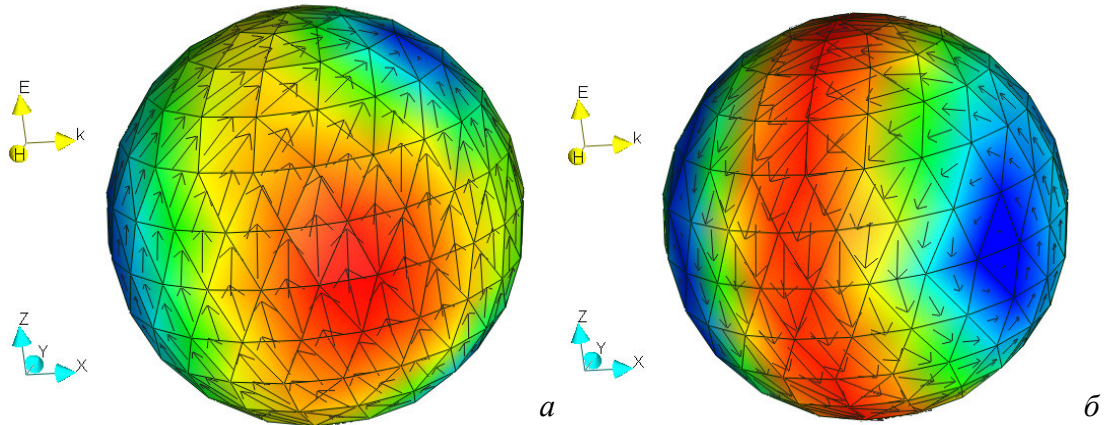


Рисунок 2.36 – Распределения плотности тока на внешней (а) и внутренней (б) поверхностях сферы

### 2.4.2 Задание для самостоятельного выполнения

1. Оценить изменение рассеяния электромагнитного на поверхности сферы при изменении (от 1,1 до 20) относительной диэлектрической проницаемости ее материала (8–10 значений).
2. Получить графическое представление распределения поля в плоскости  $XZ$  для всех значений из п. 1.
3. Вычислить рассеянную сферой энергию на частотах: 300 МГц, 600 МГц, 900 МГц.
4. Оформить отчет о проделанной работе и выполнить анализ полученных результатов.

### 3 Самостоятельные занятия

Любой вид занятий, создающий условия для зарождения самостоятельной мысли, познавательной и творческой активности студента связан с самостоятельной работой. В широком смысле под самостоятельной работой понимают совокупность всей самостоятельной деятельности студентов как в учебной аудитории, так и вне ее, в контакте с преподавателем и в его отсутствие.

В процессе подготовки к семинарским занятиям, студентам необходимо обратить особое внимание на проработку лекционного материала и самостоятельное изучение рекомендованной учебно-методической (а также научной и популярной) литературы. Самостоятельная работа с учебниками, учебными пособиями, научной, справочной и популярной литературой, материалами периодических изданий и Интернета, статистическими данными является наиболее эффективным методом получения знаний, позволяет значительно активизировать процесс овладения информацией, способствует более глубокому усвоению изучаемого материала, формирует у студентов свое отношение к конкретной проблеме. Более глубокому раскрытию вопросов способствует знакомство с дополнительной литературой, рекомендованной преподавателем по каждой теме семинарского или практического занятия, что позволяет студентам проявить свою индивидуальность в рамках выступления на данных занятиях, выявить широкий спектр мнений по изучаемой проблеме.

Для получения больших навыков работы с программными средствами рекомендуется ознакомление с инструкциями пользователя и рассмотрение тестовых примеров.

Отдельного внимания заслуживает изучение нормативной документации по ЭМС. При её изучении рекомендуется составлять конспекты, которые позволят систематизировать знания по обеспечению и моделированию ЭМС.

## Список использованных источников

- 1 ГОСТ Р 50397-2011 Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения [Текст]. – взамен ГОСТ Р 50397–92; введ. 08.12.2011. – М.: Стандартиформ, 2011. – 61 с.
- 2 Harrington R.F. Matrix methods for field problems // IEEE Proceedings. – 1967. – No. 2. – P. 136–149.
- 3 Геворкян В.М. Электромагнитная совместимость электронных информационных систем. В 2 частях, ч. 2. Электромагнитная совместимость систем цифровой обработки и передачи данных: учебное пособие по курсу «Электромагнитная совместимость информационных систем» / В.М. Геворкян; Ред. Ю.А. Казанцев. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 308 с.
- 4 Demo-Version| Institut [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tet.tuhh.de/concept/demo-version/> (дата обращения 01.06.2023).
- 5 Gnuplot homepage [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gnuplot.info/> (дата обращения 01.06.2023).
- 6 Жобава Р.Г. Адаптивная схема Метода Моментов в применении к задачам электромагнитной совместимости. // EDA Express. – 2005. – №12. – С. 14–19.
- 7 Газизов Т.Р. Итерационные методы решения системы линейных алгебраических уравнений с плотной матрицей. / С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов // – Томск: Томский государственный университет, 2007. – 208 с.
- 8 ELCUT [Электронный ресурс]. – Режим доступа, <http://ELCUT.ru>, свободный (дата обращения 01.06.2023).
- 9 Воронин А.В. Применение программного пакета ELCUT для моделирования потенциальных электрических полей: учебно-методическое пособие // Гомель: БелГУТ, 2010 – 70с.