

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)

**Кафедра Телевидения и управления (ТУ)**

Утверждаю:

Зав. Кафедрой ТУ

Д.т.н., с.н.с.

 Т.Р. Газизов  
«18» 05 2017 г.

**Электромагнитная совместимость:  
моделирование и обеспечение**

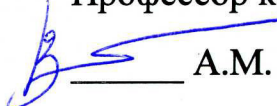
Учебно-методическое пособие по практическим и самостоятельным занятиям  
для аспирантов направлений 09.06.01 «Информатика и вычислительная  
техника» и 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи»

Разработчик:

Доцент каф. ТУ, к.т.н.

 С.П. Куксенко

Профессор каф. ТУ, д.т.н.

 А.М. Заболоцкий

Томск – 2017

**Куксенко С.П., Заболоцкий А.М.**

Электромагнитная совместимость: моделирование и обеспечение / учеб. метод. пособие. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2017. – 96 с.

Учебно-методическое пособие предназначено для аспирантов технических вузов, обучающихся по направлениям подготовки 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника» и 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи».

## Оглавление

1	Практические занятия .....	5
1.1	Основные термины и определения в области электромагнитной совместимости .....	5
1.2	Моделирование электромагнитной совместимости.....	7
1.2.1	Математическое моделирование .....	8
1.2.2	Физическое моделирование .....	12
1.3	Метод моментов.....	13
1.4	Теоретические основы моделей для вычисления временного отклика произвольных схем многопроводных межсоединений.....	18
1.4.1	Решение волновых уравнений .....	19
1.4.2	Уравнения для отрезка многопроводной линии передачи .....	20
1.4.3	Формулировка уравнений схемы для моделирования отклика.....	22
1.4.4	Моделирование временного отклика с учетом дисперсии .....	24
1.5	Моделирование линий передачи в системе TALGAT .....	25
1.5.1	Вычисление погонных параметров .....	25
1.5.2	Оценка влияния сегментации на точность вычислений .....	32
1.5.3	Вычисление отклика .....	34
1.5.4	Команды для вычисления отклика в меандровых линиях .....	36
1.5.5	Редактор принципиальных схем.....	39
1.5.6	Команды для задания воздействующих сигналов и нагрузок.....	43
1.6	Моделирования в системе Elcut .....	45
1.7	Моделирование микрополосковой линии .....	49
1.8	Моделирование двухпроводной линии передачи .....	51
1.9	Электродинамическое моделирования в системе Concept-II.....	53
2	Самостоятельные занятия .....	60
2.1	Линии передачи .....	60
2.1.1	Порядок выполнения работы .....	60
2.1.2	Задание для самостоятельно выполнения.....	64
2.2	Коаксиальный кабель .....	67
2.2.1	Порядок выполнения работы: .....	70

2.2.2	Задание для самостоятельного выполнения.....	73
2.3	Контурная антенна.....	74
2.3.1	Порядок выполнения работы .....	74
2.3.2	Задание для самостоятельного выполнения.....	85
2.4	Диэлектрическая сфера .....	86
2.4.1	Порядок выполнения работы .....	86
2.4.2	Задание для самостоятельного выполнения.....	88
2.5	Методики анализа ЭМС печатных узлов .....	89
2.5.1	Методика предварительного анализа электромагнитной совместимости.....	89
2.5.2	Методика анализа целостности сигнала печатной платы в системе TALGAT.....	93
	Список использованных источников .....	95

# 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>.

---

<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.

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.

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

---

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

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.

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



Рисунок 1.1 – Структура алгоритма моделирования ЭМС ТС

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).

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 схемотехнические, 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:

Постановка задачи – определение целей расчета и класса решаемых задач, определение необходимого объема входной и выходной информации, а также допустимой погрешности результатов решения.

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.

Дискретизация модели – переход от непрерывных функций к дискретным и от функциональных уравнений к системе алгебраических уравнений (СЛАУ), в определенном смысле приближающейся к исходным уравнениям.

Решение полученной СЛАУ с заданной точностью. На этом этапе важную роль играет выбор метода решения, наиболее подходящего для данной системы уравнений.

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 методов 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 ( $l \ll \lambda/10$ ). 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) антенн, 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

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 ЭА (РЭА, ЭВА и т. п.)), то есть верификации процесса моделирования ЭМС, алгоритм моделирования должен быть дополнен ещё одним 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 ЭА.

Схематично процесс проектирования ТС с учетом ЭМС, на примере электронного средства, представлен на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Процесс проектирования электронного средства с учетом ЭМС

В конечном итоге проверка правильности проектирования может быть подтверждена лишь при испытаниях разработанного ТС.

### 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., (рис. 1.3).

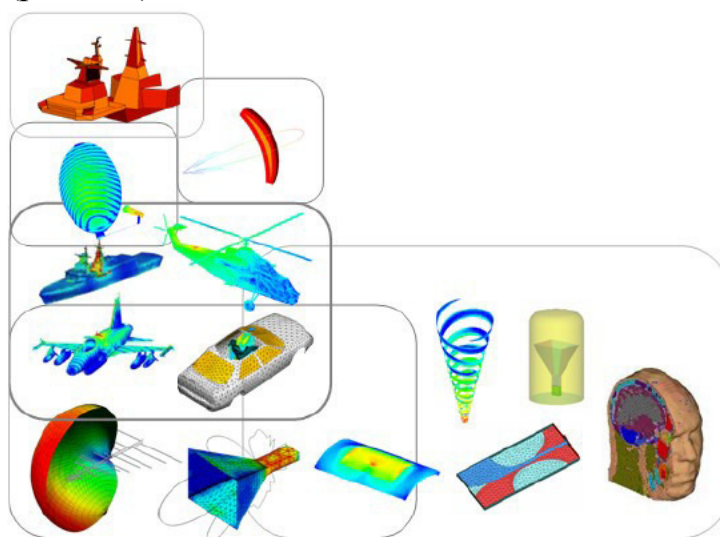


Рисунок 1.3 – Спектр задач электродинамического анализа

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 приближены, 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 наводок 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

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

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 рис. 1.4.

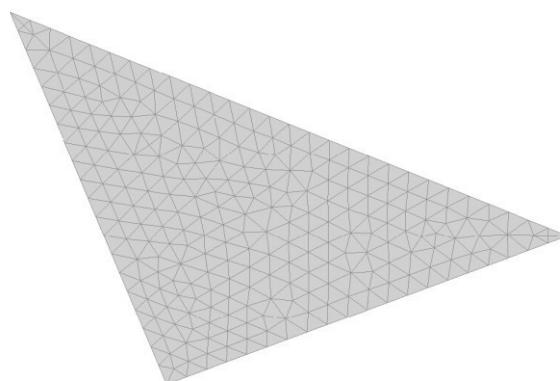


Рисунок 1.4 – Поверхность, разбитая на элементарные площадки

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, как правило, с помощью известного метода исключения Гаусса или итерационных методов.

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. Количество уравнений в СЛАУ равно числу элементарных площадок  $N$ , 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 Теоретические основы моделей для вычисления временного отклика произвольных схем многопроводных межсоединений

В данном разделе представлены основные уравнения, которые необходимы для анализа многопроводных линий передачи, и приведены теоретические основы трех моделей по вычислению временного отклика в многопроводных линиях передачи. На рис. 1.5а показан отрезок многопроводной линии передачи с  $N$  сигнальными проводниками и земляным (опорным) проводником, где  $x$  – расстояние вдоль линии передачи ( $x=0$  в начале линии и  $x=l$  в конце линии). (Полагается, что земля находится под нулевым потенциалом для всех рассматриваемых многопроводных линий передачи). Линия передачи регулярна по длине при произвольном поперечном сечении.

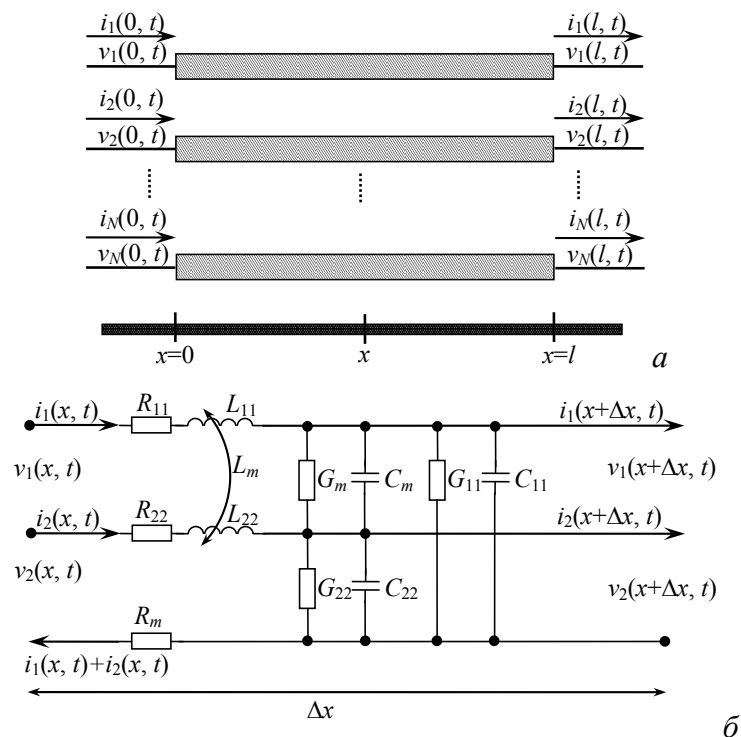


Рисунок 1.5 – Отрезок  $N$ -проводной линии передачи (а) и эквивалентная схема для элемента длины двухпроводной линии передачи (б)

В межсоединениях с неоднородным диэлектрическим заполнением, а также при учете влияния потерь и их частотной зависимости, считается, что вдоль линии распространяются смешанные или гибридные волны (т.е. волны, которые представляют собой некоторую комбинацию ТЕ- и ТМ-волн). Однако при соответствующих размерах линии (т.е. при максимальных поперечных размерах, достаточно малых по сравнению с длиной волны для представляющей интерес составляющей наивысшей частоты) продольные составляющие напряженности поля будут много меньше поперечных составляющих. Такие гибридные волны можно аппроксимировать ТЕМ-волнами, которые для большей точности следует называть квази-ТЕМ волнами. Поэтому далее всегда будет считаться, что в межсоединении распространяются квази-ТЕМ волны. Пример эквивалентной схемы с

сосредоточенными элементами для элемента длины двухпроводной линии передачи приведен на рис. 1.5б.

Обозначения элементов эквивалентной схемы: собственные ( $L_{11}$ ,  $L_{22}$ ) и взаимная ( $L_m$ ) индуктивности проводников структуры; собственные ( $C_{11}$ ,  $C_{22}$ ) и взаимная ( $C_m$ ) емкости; собственные ( $G_{11}$ ,  $G_{22}$ ) и взаимная ( $G_m$ ) проводимости, обусловленные потерями в диэлектриках; собственные ( $R_{11}$ ,  $R_{22}$ ) и взаимное ( $R_m$ ) сопротивления, обусловленные потерями в проводниках. (Взаимное сопротивление обусловлено влиянием конечной проводимости земляного (опорного) проводника, а также вихревых токов, наводимых в одном сигнальном проводнике при прохождении тока в другом.)

#### 1.4.1 Решение волновых уравнений

Согласно теории цепей, напряжения и токи линий передачи при распространении ТЕМ-волн связаны телеграфными уравнениями:

$$\frac{d}{dx}\mathbf{V} = -\mathbf{Z}\mathbf{I}, \quad (1.12)$$

$$\frac{d}{dx}\mathbf{I} = -\mathbf{Y}\mathbf{V}, \quad (1.13)$$

где  $\mathbf{I}$  и  $\mathbf{V}$  – матрицы-столбцы размера  $N \times 1$  напряжений и токов в линиях,

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R} + j\omega\mathbf{L}, \quad (1.14)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{G} + j\omega\mathbf{C}, \quad (1.15)$$

где  $j$  – мнимая единица,  $\omega$  – угловая частота,  $\mathbf{C}$  – матрица размера  $N \times N$  погонных коэффициентов электростатической индукции,  $\mathbf{L}$  – матрица размера  $N \times N$  погонных коэффициентов электромагнитной индукции,  $\mathbf{G}$  – матрица размера  $N \times N$  погонных проводимостей,  $\mathbf{R}$  – матрица размера  $N \times N$  погонных сопротивлений. Из телеграфных уравнений получаем волновое уравнение

$$\frac{d^2}{dx^2}\mathbf{V} = (\mathbf{Z}\mathbf{Y})\mathbf{V}; \quad 0 < x < l. \quad (1.16)$$

Его решение ищется в виде

$$\mathbf{V}^m(x) = \mathbf{V}_0^m \exp(\pm\gamma_m x), \quad \mathbf{I}^m(x) = \mathbf{I}_0^m \exp(\pm\gamma_m x), \quad m=1, \dots, N. \quad (1.17)$$

Знак минус в (1.17) соответствует моде, распространяющейся вдоль оси  $x$  (падающая волна), а знак плюс соответствует моде, распространяющейся в противоположном направлении (отражённая волна).

После подстановки (1.17) в уравнение (1.16) получаем систему относительно напряжений в линиях

$$(\mathbf{Z}\mathbf{Y} - \gamma_m^2 \mathbf{U})\mathbf{V}_0^m = 0, \quad (1.18)$$

нетривиальное решение которой возможно при условии

$$|\mathbf{Z}\mathbf{Y} - \gamma_m^2 \mathbf{U}| = 0, \quad (1.19)$$

где  $\mathbf{U}$  – единичная матрица размера  $N \times N$ .

Решением для (1.19) является  $N$  комплексных чисел  $\gamma_m^2$ , которые называются собственными значениями. Каждое собственное значение имеет соответствующий собственный вектор  $\mathbf{V}_0^m$ , который является решением для (1.18) и является уникальным для константы  $\gamma_m^2$ . Вычисляя квадратный корень из  $\gamma_m^2$ , получают коэффициент распространения для каждой  $m$ -моды, которые записываются в виде диагональной матрицы  $\mathbf{\Gamma}$ . Вычисленные собственные вектора  $\mathbf{V}_0^m$  записываются в столбцы матрицы  $\mathbf{S}_V$ , которая называется матрицей модальных напряжений, а  $\mathbf{S}_I$  – матрица модальных токов, столбцы которой являются векторами  $\mathbf{I}_0^m$ . Эти модальные матрицы связаны уравнением

$$\mathbf{S}_I = \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{S}_V \mathbf{\Gamma}. \quad (1.20)$$

Напряжения и токи линии передачи в любой точке  $x$  можно записать как суммы падающей ( $i$ ) и отражённой ( $r$ ) волн:

$$\mathbf{V}(x) = (\mathbf{V}_i(x) + \mathbf{V}_r(x)) = \mathbf{S}_V (\mathbf{E}(x) \mathbf{C}_1 + \mathbf{E}(x)^{-1} \mathbf{C}_2), \quad (1.21)$$

$$\mathbf{I}(x) = (\mathbf{I}_i(x) - \mathbf{I}_r(x)) = \mathbf{S}_I (\mathbf{E}(x) \mathbf{C}_1 - \mathbf{E}(x)^{-1} \mathbf{C}_2), \quad (1.22)$$

где  $\mathbf{C}_1$  и  $\mathbf{C}_2$  – векторы констант,

$$\mathbf{E}(x) = \text{diag}(\exp(-\gamma_1 x), \exp(-\gamma_2 x), \dots, \exp(-\gamma_N x)). \quad (1.23)$$

Матрица характеристического импеданса  $\mathbf{Z}_C$  линии определяется соотношениями:

$$\mathbf{V}_i(x) = \mathbf{Z}_C \mathbf{I}_i(x); \quad \mathbf{V}_r(x) = -\mathbf{Z}_C \mathbf{I}_r(x), \quad (1.24)$$

из которых следует

$$\mathbf{Z}_C = \mathbf{S}_V \mathbf{S}_I^{-1} = \mathbf{S}_V \mathbf{\Gamma}^{-1} \mathbf{S}_V^{-1} \mathbf{Z}. \quad (1.25)$$

Матрицу характеристического адмитанса линии  $\mathbf{Y}_C$  можно вычислить как  $\mathbf{Y}_C = \mathbf{Z}_C^{-1}$ .

#### 1.4.2 Уравнения для отрезка многопроводной линии передачи

Матрицы параметров и выражения, описанные в разделе 1.4.1, используются для формирования системы уравнений для отрезка многопроводной линии передачи. В модели Теше это уравнение называется BLT уравнением, записываемым для напряжения и тока в виде

$$\mathbf{V} = (\mathbf{1} + \mathbf{S})(\mathbf{S} - \mathbf{\Phi})^{-1} \mathbf{V}_s, \quad (1.26)$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y}_C (\mathbf{1} - \mathbf{S})(\mathbf{S} - \mathbf{\Phi})^{-1} \mathbf{V}_s, \quad (1.27)$$

где  $\mathbf{S}$  – матрица рассеяния конечных и соединительных цепей линии передачи,  $\mathbf{\Phi}$  – матрица размера  $2N \times 2N$  распространения линии передачи,  $\mathbf{V}_s$  – «супервектор» размера  $2N \times 1$  входных воздействий. Матрица рассеяния для конечных и соединительных цепей линии передачи связывает все отраженные волны с падающими волнами как

$$\mathbf{V}_r = \mathbf{S} \mathbf{V}_i. \quad (1.28)$$

Более подробно определение матрицы рассеяния для произвольного числа линий передачи с оконечными и соединительными цепями в схеме рассматривается в разделе 1.4.3. Отраженные волны на концах линии передачи связаны с падающими волнами уравнением

$$\mathbf{V}_r = \Phi \mathbf{V}_i + \mathbf{V}_s. \quad (1.29)$$

Уравнение (1.27), при  $x=0$  на ближнем и  $x=l$  дальнем концах линии передачи, запишется в виде

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_r(0) \\ \mathbf{V}_r(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{S}_V \mathbf{E}(l) \mathbf{S}_V^{-1} \\ \mathbf{S}_V \mathbf{E}(l) \mathbf{S}_V^{-1} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_i(0) \\ \mathbf{V}_i(l) \end{bmatrix} + \mathbf{V}_s \quad (1.30)$$

и

$$\mathbf{V}_s = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -\mathbf{S}^{-1} \mathbf{E}(x_s) \mathbf{S} \{ \mathbf{V}_0 + \mathbf{Z}_C \mathbf{I}_0 \} \\ \mathbf{S}^{-1} \mathbf{E}(l-x_s) \mathbf{S} \{ \mathbf{V}_0 - \mathbf{Z}_C \mathbf{I}_0 \} \end{bmatrix}, \quad (1.31)$$

где

$$\mathbf{E}(l) = \text{diag} \{ \exp(\gamma_1 l), \dots, \exp(\gamma_N l) \},$$

$$\mathbf{E}(x_s) = \text{diag} \{ \exp(\gamma_1 x_s), \dots, \exp(\gamma_N x_s) \}$$

$$\mathbf{E}(l-x_s) = \text{diag} \{ \exp(\gamma_1 (l-x_s)), \dots, \exp(\gamma_N (l-x_s)) \},$$

$\mathbf{V}_0$  и  $\mathbf{I}_0$  векторы, содержащие независимые источники напряжения и тока, размещенные на линии в  $x=x_s$ .

Для моделей Джорджевича и Накхлы используются соотношения для напряжений и токов на ближнем ( $x=0$ ) и дальнем ( $x=l$ ) концах, полученные из (1.21) и (1.22) в виде

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{V}(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_V & \mathbf{S}_V \\ \mathbf{S}_V \mathbf{E}(l) & \mathbf{S}_V [\mathbf{E}(l)]^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 \\ \mathbf{C}_2 \end{bmatrix}, \quad (1.32)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}(0) \\ \mathbf{I}(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_I & -\mathbf{S}_I \\ \mathbf{S}_I \mathbf{E}(l) & -\mathbf{S}_I [\mathbf{E}(l)]^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 \\ \mathbf{C}_2 \end{bmatrix}. \quad (1.33)$$

Для вычисления напряжений или токов по модели Джорджевича вначале необходимо вычислить  $\mathbf{C}_1$  и  $\mathbf{C}_2$ , используя матричное соотношение (раздел 1.4.3), которое описывает произвольные соединительные и оконечные цепи в рассматриваемой схеме. Затем, подставляя  $\mathbf{C}_1$  и  $\mathbf{C}_2$  в (1.34)–(1.37), получают напряжения и токи на ближнем и дальнем концах линии передачи:

$$\mathbf{V}(0) = \mathbf{S}_V (\mathbf{C}_1 + \mathbf{E}(l) \mathbf{C}_2); \quad (1.34)$$

$$\mathbf{V}(l) = \mathbf{S}_V (\mathbf{E}(l) \mathbf{C}_1 + \mathbf{C}_2); \quad (1.35)$$

$$\mathbf{I}(0) = \mathbf{Y}_C \mathbf{S}_V (\mathbf{C}_1 - \mathbf{E}(l) \mathbf{C}_2); \quad (1.36)$$

$$\mathbf{I}(l) = \mathbf{Y}_C \mathbf{S}_V (\mathbf{E}(l) \mathbf{C}_1 - \mathbf{C}_2). \quad (1.37)$$

В модели Накхлы константы  $\mathbf{C}_1$ ,  $\mathbf{C}_2$  в (1.32) и (1.33) исключаются, в результате получается

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}(0) \\ \mathbf{I}(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_I & -\mathbf{S}_I \\ \mathbf{S}_I \mathbf{E}(l) & -\mathbf{S}_I [\mathbf{E}(l)]^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{S}_V & \mathbf{S}_V \\ \mathbf{S}_V \mathbf{E}(l) & \mathbf{S}_V [\mathbf{E}(l)]^{-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{V}(l) \end{bmatrix}. \quad (1.38)$$

Принимая во внимание, что для представления линии передачи в виде  $\mathbf{Y}$ -параметров необходимо, чтобы все токи на концах линии втекали в неё,  $\mathbf{I}(l)$  умножается на  $-1$  и (1.38) запишется в виде

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}(0) \\ -\mathbf{I}(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_I \mathbf{E}_1 \mathbf{S}_V^{-1} & \mathbf{S}_I \mathbf{E}_2 \mathbf{S}_V^{-1} \\ \mathbf{S}_I \mathbf{E}_2 \mathbf{S}_V^{-1} & \mathbf{S}_I \mathbf{E}_1 \mathbf{S}_V^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{V}(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11} & \mathbf{Y}_{12} \\ \mathbf{Y}_{21} & \mathbf{Y}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{V}(l) \end{bmatrix}, \quad (1.39)$$

где

$$\mathbf{E}_1 = \text{diag} \left\{ \frac{1 + e^{-2\gamma_k l}}{1 - e^{-2\gamma_k l}} \right\}; \quad \mathbf{E}_2 = \text{diag} \left\{ \frac{2}{e^{-\gamma_k l} - e^{\gamma_k l}} \right\}, \quad k=1, 2, \dots, N. \quad (1.40)$$

Полученная матрица проводимости в дальнейшем подставляется в уравнение модифицированного узлового метода (раздел 1.4.3), который используется для вычисления отклика схемы.

### 1.4.3 Формулировка уравнений схемы для моделирования отклика

Модели, описанные в разделе 1.4.2, позволяют выполнить моделирование для линий передачи, оканчивающихся произвольным образом. Например, проводник линии может быть закорочен на землю, оставлен на холостом ходу, оканчиваться произвольным импедансом, управляться генератором, или он может быть присоединён к проводнику, принадлежащему к этой же или другой линии передачи.

Описание конечных и соединительных цепей линии передачи в модели Теше осуществляется с помощью матрицы рассеяния  $\mathbf{S}$ . Для отрезка многопроводной линии передачи в случае, если проводники на ближнем и дальнем концах линии оканчиваются внешним импедансом, матрица  $\mathbf{S}$  равна матрице коэффициентов отражения:

$$\boldsymbol{\rho} = (\mathbf{Z} - \mathbf{Z}_C)(\mathbf{Z} + \mathbf{Z}_C)^{-1}, \quad (1.41)$$

где  $\mathbf{Z}$  – матрица, состоящая из импедансов, подключенных к проводникам линии. Для этого случая ВЛТ уравнение запишется в виде

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{V}(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U} + \boldsymbol{\rho}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{U} + \boldsymbol{\rho}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\rho}_1 & -\mathbf{S}^{-1} \mathbf{E}(l) \mathbf{S} \\ -\mathbf{S}^{-1} \mathbf{E}(l) \mathbf{S} & \boldsymbol{\rho}_2 \end{bmatrix}^{-1} \mathbf{V}_s; \quad (1.42)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}(0) \\ \mathbf{I}(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_C & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Y}_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U} - \boldsymbol{\rho}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{U} - \boldsymbol{\rho}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\rho}_1 & -\mathbf{S}^{-1} \mathbf{E}(l) \mathbf{S} \\ -\mathbf{S}^{-1} \mathbf{E}(l) \mathbf{S} & \boldsymbol{\rho}_2 \end{bmatrix}^{-1} \mathbf{V}_s. \quad (1.43)$$

Для случая, когда соединительная цепь связывает  $n$  многопроводных линий передачи, матрица рассеяния для такой цепи запишется в виде

$$\mathbf{S} = -(\mathbf{C}_V - \mathbf{C}_I (\mathbf{Z}_{C_n})^{-1})^{-1} (\mathbf{C}_V + \mathbf{C}_I (\mathbf{Z}_{C_n})^{-1}), \quad (1.44)$$

где  $C_V$  – матрица размера  $M \times M$  с элементами  $\{1, -1\}$ , отображающая напряжения соединительного узла, и для ее формирования используется закон Кирхгофа для напряжений;  $C_I$  – матрица размера  $M \times M$  с элементами  $\{0, 1\}$ , отображающая токи соединительного узла, и для ее формирования используется закон Кирхгофа для токов при условии, что токи выходят из узлов соединительной цепи;  $Z_{C_n}$  – матрица размера  $M \times M$ , состоящая из характеристических импедансов линий передачи, проводники которых соединяются в соединительной цепи;  $M$  – общее число проводников, соединяющихся в соединительной цепи.

В модели Джорджевича узлы соединительных и оконечных цепей разделяются на две группы. Первая охватывает узлы, соединяющие линии передачи, которые называются внешними узлами, вторая группа охватывает все остальные узлы, которые называются внутренними. Число внешних узлов, обозначенное  $X$ , для цепи равно общему числу проводников всех линий передачи, присоединённых к этой цепи. Поскольку цепь линейна, то справедливо матричное соотношение

$$\mathbf{PV} + \mathbf{QI} = \mathbf{E}, \quad (1.45)$$

где  $\mathbf{V}$  – вектор размера  $X$  напряжений между внешними узлами цепи и землей,  $\mathbf{I}$  – вектор размера  $X$  токов между внешними узлами цепи и землей,  $\mathbf{P}$  и  $\mathbf{Q}$  – квадратные матрицы размера  $X \times X$ ,  $\mathbf{E}$  – вектор размера  $X$ . Уравнение (1.45) включает описание цепи  $Z$ -параметрами и  $Y$ -параметрами. В случае описания  $Z$ -параметрами получаем  $\mathbf{P} = \mathbf{U}$ ,  $\mathbf{Q} = \mathbf{Z}$  и  $\mathbf{E} = \mathbf{V}_0$ , где  $\mathbf{V}_0$  – вектор напряжения холостого хода. Это, в сущности, эквивалентное представление схемы по Тевенину. В случае описания через  $Y$ -параметры:  $\mathbf{P} = \mathbf{Y}$ ,  $\mathbf{Q} = \mathbf{U}$  и  $\mathbf{E} = \mathbf{I}_0$ , где  $\mathbf{I}_0$  – вектор токов короткого замыкания, это эквивалентное преобразование Нортона.

Уравнением (1.45) можно легко описать любой тип цепи, в отличие от  $Z$ -параметров и  $Y$ -параметров. А именно,  $Z$ -параметры не могут быть определены при наличии цепей на холостом ходу, а  $Y$ -параметры – для коротко замкнутых цепей. Для цепей, которые не содержат внутренних узлов, уравнение (1.45) получается записью узловых уравнений. Эти уравнения должны включать токи, вытекающие из цепи, а узловые напряжения в этих уравнениях совпадают с элементами вектора  $\mathbf{V}$ . Для цепей, не имеющих внутренних контуров (т.е. замкнутых путей по ответвлениям, которые полностью лежат внутри цепи), (1.45) получается из контурных уравнений. В этом случае, контурные токи совпадают (с точностью до знака) с элементами вектора  $\mathbf{I}$ . Чтобы вычислить  $\mathbf{C}_1$  и  $\mathbf{C}_2$ , необходимо в вектор  $\mathbf{V}$  уравнения (1.45) подставить уравнения (1.34), (1.35), а в  $\mathbf{I}$  подставить (1.36), (1.37) и решить эту систему уравнений. (Число неизвестных равно удвоенному общему числу проводников всех линий.) Затем надо подставить  $\mathbf{C}_1$  и  $\mathbf{C}_2$  в (1.34)–(1.37) и вычислить напряжения или токи в начале и конце линий передачи.

Для описания элементов схемы в модели Накхлы используется модифицированный метод узловых потенциалов. Уравнение модифицированного узлового метода в частотной области, для линейных элементов схемы и  $n$  многопроводных линий передачи, имеет вид

$$\left( s\mathbf{W} + \mathbf{H} + \sum_{k=1}^n \mathbf{D}_k \mathbf{Y}_k \mathbf{D}_k^t \right) \mathbf{V} = \mathbf{E}, \quad (1.46)$$

где  $s=j\omega$ ;  $\mathbf{W}$ ,  $\mathbf{H}$  – матрицы размера  $A \times A$ , описывающие произвольные оконечные и соединительные схемы из активных и реактивных элементов ( $A$  – количество параметров, вычисляемых в модифицированном методе узловых потенциалов);  $\mathbf{D}_k$  – матрица-селектор, отображающая токи, входящие в  $k$ -ю линию, с элементами  $d_{i,j} \in \{0, 1\}$ , где  $i \in \{1, \dots, A\}$ ,  $j \in \{1, \dots, m_k\}$  с одним ненулевым значением в каждом столбце,  $m_k = 2N_k$  – количество токов, входящих в  $k$ -ю линию, где  $N_k$  – число проводников  $k$ -й линии;  $\mathbf{Y}_k$  – матрица проводимостей для  $k$ -й линии из (1.39);  $\mathbf{V}$  – вектор узловых напряжений и токов независимых источников напряжения;  $\mathbf{E}$  – вектор, состоящий из независимых источников напряжения или токов.

#### 1.4.4 Моделирование временного отклика с учетом дисперсии

Для более точного моделирования отклика в межсоединениях необходимо учитывать потери в проводниках и диэлектриках, а также частотную зависимость потерь. Высокочастотный ток в реальных проводниках распределяется в приповерхностном слое проводника. Это явление носит название поверхностного (скин-)эффекта. С его учетом частотную зависимость погонного сопротивления линии передачи можно оценить по выражению

$$\mathbf{R}(\omega) = \mathbf{R}(\omega_0) \sqrt{\frac{\omega}{\omega_0}}, \quad (1.47)$$

где  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $f_0$  – частота, на которой вычислялась  $\mathbf{R}(\omega_0)$ , Ом/м.

Полная индуктивность, при учете потерь в проводниках, вычисляется как сумма внешней ( $\mathbf{L}$ , Гн/м) и внутренней индуктивностей:

$$\mathbf{L}(\omega) = \mathbf{L} + \frac{\mathbf{R}(\omega)}{\omega}. \quad (1.48)$$

Почти для всех видов диэлектрических материалов величина тока проводимости изменяется почти прямо пропорционально частоте. Таким образом, частотную зависимость проводимости можно вычислить как

$$\mathbf{G}(\omega) = \mathbf{G}(\omega_0) \frac{\omega}{\omega_0}, \quad (1.49)$$

где  $\omega_0 = 2\pi f_0$ , а  $f_0$  – частота, на которой вычислялась  $\mathbf{G}(\omega_0)$ , См/м.



## 1.5 Моделирование линий передачи в системе TALGAT

### 1.5.1 Вычисление погонных параметров

Данная работа содержит информацию, необходимую для построения конфигурации полосковой структуры (рис. 1.6) в системе TALGAT, для последующего вычисления погонных параметров и пр. Параметры структуры: ( $w=0,5$  мм,  $s=1$  мм,  $d=3w$ ,  $t=105$  мкм,  $h=300$  мкм).

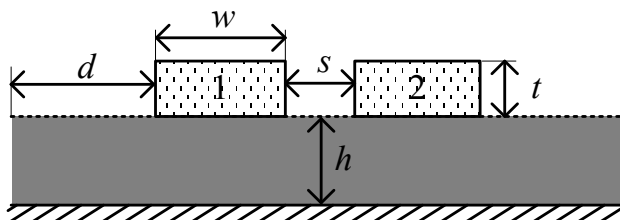


Рисунок 1.6 – Связанная микрополосковая линия  
(1, 2 – проводники)

Система TALGAT, базирующаяся на математических моделях на основе метода моментов, предназначена для компьютерного моделирования широкого класса задач электромагнитной совместимости за счет выполнения следующих основных функций: квазистатического анализа (вычисления матриц погонных параметров) произвольных двумерных 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 рис. 1.7. Клиенты системы – модули пользовательского интерфейса. Ядро системы – TLCORE. Вычислительные модули: MOM2D – двумерный квазистатический анализ; MOM3D – трехмерный квазистатический анализ; RESPONSE – вычисление отклика; MOMW – электродинамический анализ проводных структур. Модули оптимизации: ES – эволюционные стратегии; GA – генетические алгоритмы. Модули утилит – вспомогательные модули (матричные операции, работа с графиками и пр.). Для «общения» пользователя с системой используется интерпретируемый скриптовый язык TALGAT\_Script, использующий постфиксную запись выражений.

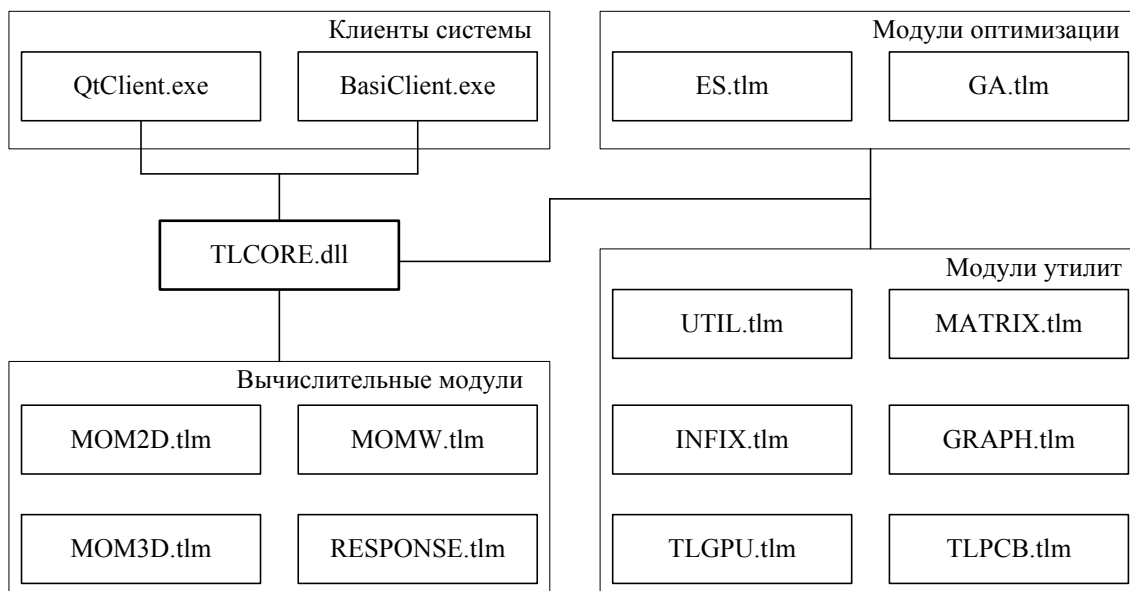


Рисунок 1.7 – Структурная схема системы TALGAT

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,  $x1,y1$  – координаты конечной

точки. Команда **LINE** 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). **LINE** ( $x_2, y_2$ ), где  $x_2, y_2$  – координаты конечной точки. Рекомендуется рисовать линии против часовой стрелки (рис. 1.8).

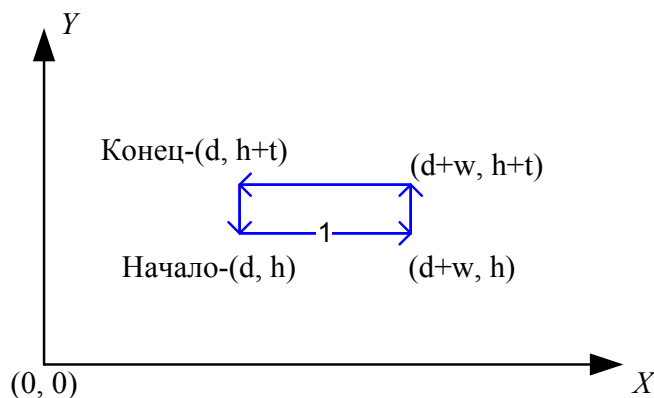


Рисунок 1.8 – Последовательность создания границ проводника с помощью линий

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 рис. 1.8 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 (рис. 1.9). Если отображаемая конфигурация не соответствует требуемой, необходимо провести соответствующую корректировку.

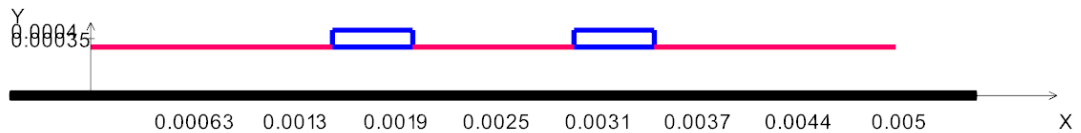


Рисунок 1.9 – Вид связанной микропослосковой линии в системе TALGAT (синий цвет – проводниковые границы, красный – диэлектрические границы)

Для расчета погонных параметров структуры необходимо корректно указать длину подынтервалов с помощью, которой сегментируется структура и назначения относительной диэлектрической проницаемости (рис. 1.10).

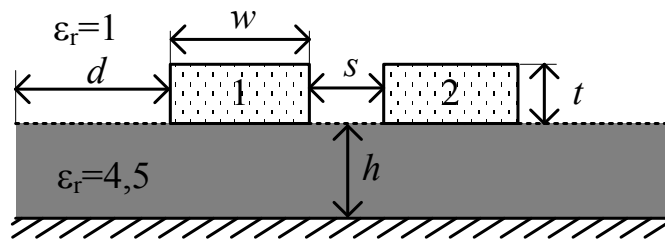


Рисунок 1.10 – Связанная линия и её параметры

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 буждет использован в дальнейшем.)

Для задания значения диэлектрической проницаемости используется команды:

*SET\_ER\_PLUS* значение диэлектрической проницаемости;

*SET\_ER\_MINUS* значение диэлектрической проницаемости.

Внимание: При создании проводника указывается 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 с помощью рис. 1.11. Так, **SET\_ER\_PLUS** находится справа по направлению стрелки, **SET\_ER\_MINUS** слева.



Рисунок 1.11 – 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 рис. 1.12.

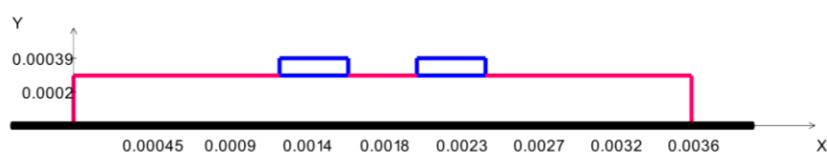


Рисунок 1.12 – Вид связанной полосковой линии в системе TALGAT

Иногда, для лучшего отображения требуется сделать линии тоньше, в открывшемся окне с построенной структурой необходимо нажать клавишу I.

Для того чтобы вычислить значения 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 (рис. 1.13).

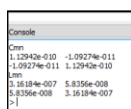
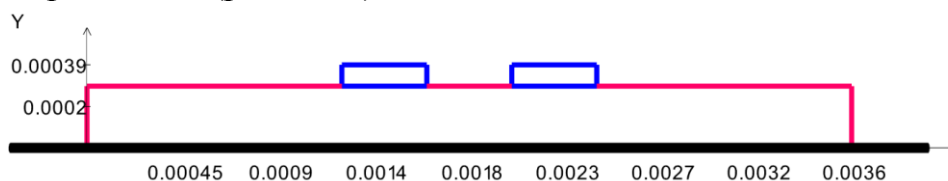



Рисунок 1.13 – Вывод результатов расчета

Аналогично описанном выше процессу создания конфигурации можно воспользоваться специальным конфигуратором. Чтобы открыть конструктор, необходимо использовать инструмент . Далее необходимо задать размер ячейки, в данном случае 1 мм (рис. 1.14).

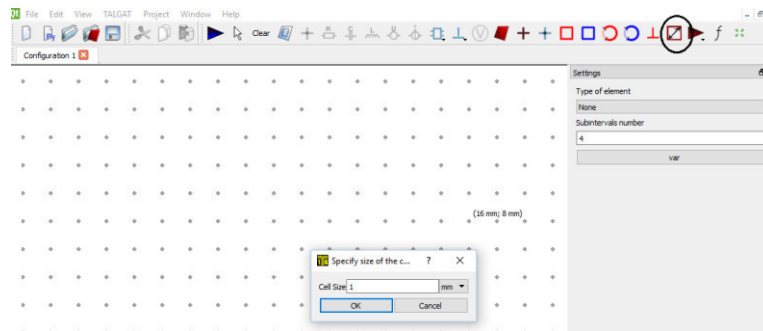



Рисунок 1.14 – Задание размера ячеек для рисования

Далее нужно задать бесконечную землю с помощью инструмента . После этого с помощью специальных инструментов, представленных на панели, создается требуемая конфигурация. Пример показан на рис. 1.15.

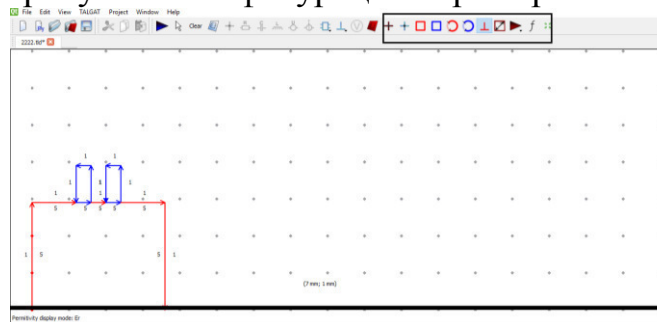


Рисунок 1.15 – Создание структуры с помощью «Конфигуратора»

Если нужно изменить размеры структуры, для этого требуется выделить отрезок и задать координаты по x, y и указать относительную диэлектрическую проницаемость (рис. 1.16).

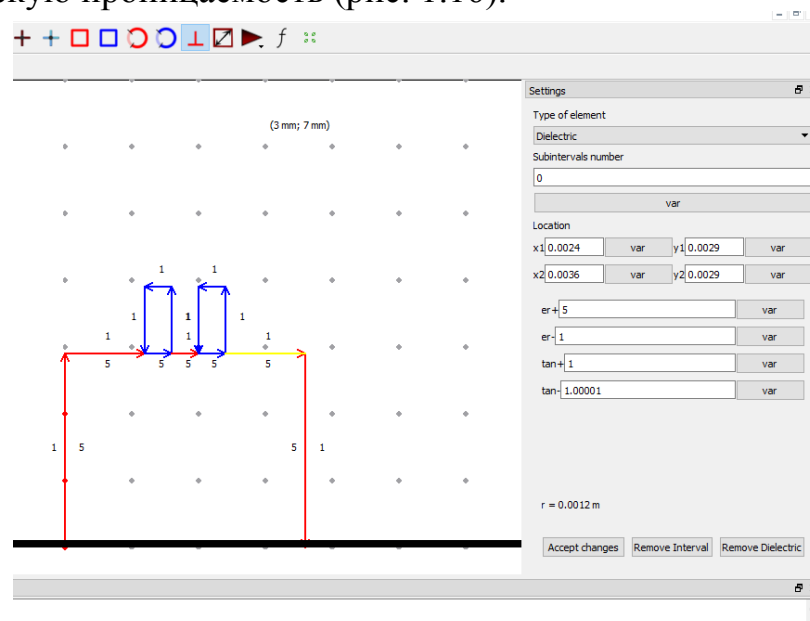


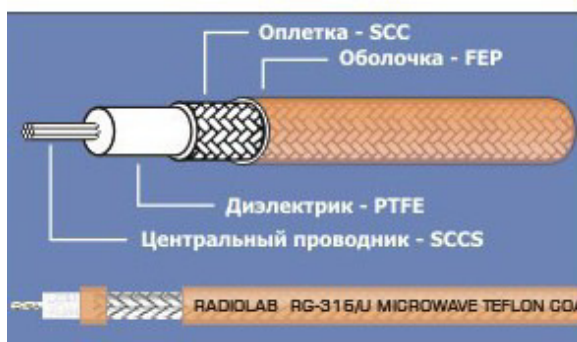
Рисунок 1.16 – Редактирование структуры

Далее необходимо запустить программу, после чего можно проанализировать результаты.

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-316\U, анализируемого на данном занятии. Конструкция кабеля приведена на рис. 1.17 (<http://www.radiolab.ru>).



SCCS – посеребренная омедненная сталь.

PTFE – фторопласт.

SCC – посеребренная медь.

FEP – экструдированный тефлон.

Рисунок 1.17 – Конструкция RG-316\U

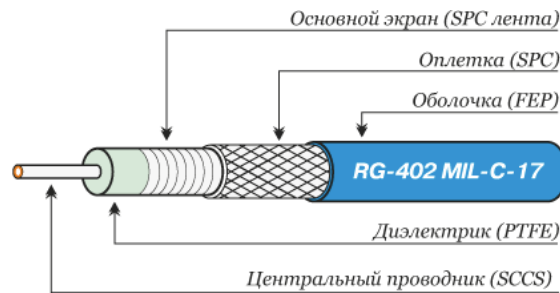
Геометрические и электрофизические параметры кабеля приведены на рис. 1.18 (<http://www.radiolab.ru>).

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	Сопротивление 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 1.18 – Параметры кабеля RG-316\U

В ходе работы требуется вычислить погонные емкость и 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 рис.1.19, геометрические и электрофизические параметры кабеля приведены на рис.1.20 (<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 1.19 – 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 1.20 – Параметры кабеля RG-402

### 1.5.2 Оценка влияния сегментации на точность вычислений

Аналитические методы для решений задач линии передачи основываются на конформных отображениях. Это общепризнанный математический метод для решения двухмерных 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 рис. 1.21 приведено поперечное сечение микрополосковой линии.

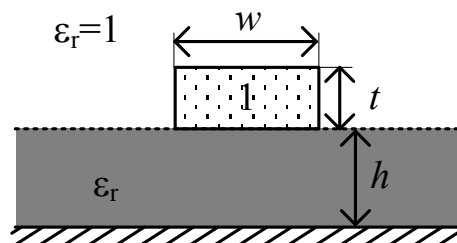


Рисунок 1.21 – Поперечное сечение микрополосковой линии

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



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

$$Z = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}}} \ln\left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h}\right), & \text{для } \frac{w}{h} < 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}} \left[ \frac{w}{h} + 1,93 + 0,667 \ln\left(\frac{w}{h} + 1,444\right) \right]}}, & \text{для } \frac{w}{h} \geq 1. \end{cases} \quad (1.50)$$

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 имени 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. Таким образом, получим следующее.

```
function [y]=func(t)
y=t^2
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 мантисой 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 согласно формулы (1.50).

### 1.5.3 Вычисление отклика

В данном разделе описываются команды для вычисления частотного и временного откликов. На конкретном примере подробно описывается последовательность ввода входных данных и вывода полученных результатов.

Рассмотрим вычисление отклика на примере, приведенном на (рис. 1.22). Вычисление выполняется использованием команд `TALGAT_Script` входного файла (или командной строки системы). Для этого необходимо загрузить модули `UTIL`, `MATRIX`, `RESPONSE` и `GRAPH`.

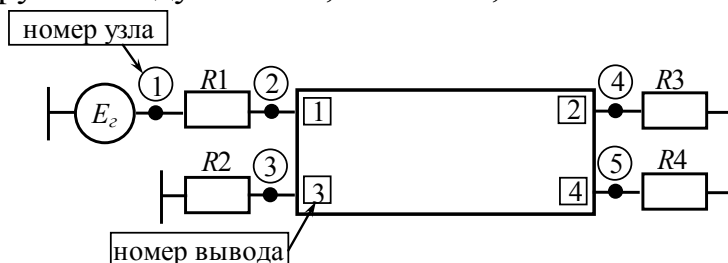


Рисунок 1.22 – Отрезок двухпроводной линии передачи

После подключения необходимых модулей надо задать матрицы погонных параметров МПЛП. Затем для выполнения анализа необходимо задать временной шаг `"step_time"` и число отсчетов ( $2^{\text{count\_degree}}$ ) на период повторения импульсов для алгоритмов БПФ с помощью команды `TRANSIENT_ANALYSIS_SETUP` (рис. 1.23).

```
TRANSIENT_ANALYSIS_SETUP "step_time" 0.05E-9
TRANSIENT_ANALYSIS_SETUP "count_degree" 12
```

Рисунок 1.23 – Команды для ввода параметров для выполнения анализа

Для создания схемы используются следующие команды: `RESISTOR` – резистор, `CAPACITOR` – емкость, `INDUCTANCE` – индуктивность, `SOURCE` – источник воздействия, `TRANSMISSION_LINE` – отрезок МПЛП. Первый аргумент для команд `RESISTOR`, `CAPACITOR`, `INDUCTANCE` – имя

конкретного параметра, заключенное в кавычки, например, для резистора "R1". Второй и третий аргументы – номера узлов, между которыми расположен элемент, а четвертый аргумент задает значение параметра.

Для задания источника воздействия используется сочетание команд. Вначале, задается команда

```
SOURCE "I1" 0 1,
```

где первый аргумент – имя конкретного параметра (ток или напряжение), а второй и третий аргументы – номера узлов, между которыми расположен источник. Затем, для задания параметров источника воздействия используется команда (например, для импульсного источника тока и напряжения):

```
SIMULATION_SOURCES_IPULSE  $I_{in}$   $I_{pv}$   $t_{TD}$   $t_{RT}$   $t_{FT}$   $t_D$  Period;
```

```
SIMULATION_SOURCES_VPULSE  $V_{in}$   $V_{pv}$   $t_{TD}$   $t_{RT}$   $t_{FT}$   $t_D$  Period.
```

Более подробно команды для задания источников тока или напряжения описаны в отдельном разделе 1.5.6.

Для задания отрезка МПЛП используется следующее сочетание команд. Вначале, задается команда

```
TRANSMISSION_LINE "t11"  $N$   $in_1$   $out_1$  ...  $in_N$   $out_N$ ,
```

где первый аргумент – имя МПЛП, второй аргумент – количество проводников  $N$ , а остальные  $in_N$  – номер узла, с которым соединен проводник  $N$  в начале линии и  $out_N$  – номер узла, с которым соединен проводник  $N$  в конце линии. Затем, для описания параметров МПЛП используется команда

```
TRANSMISSION_LINE_PARAMETERS L C R G length,
```

где **L** – матрица погонных коэффициентов электромагнитной индукции, **C** – матрица погонных коэффициентов электростатической индукции, **R** – матрица погонных сопротивлений, **G** – матрица погонных проводимостей, *length* – длина отрезка линии.

Для вывода созданной схемы используется команда DRAW\_SCHEME. Пример создания схемы для рассматриваемого примера приведен на рис. 1.24.

```
RESISTOR "R1" 1 2 50
RESISTOR "R2" 0 3 100
RESISTOR "R3" 0 4 100
RESISTOR "R4" 0 5 100
SOURCE "V1" 0 1
SIMULATION_SOURCES_VPULSE 0. 1. 0. 1.5e-9 1.5e-9 6.0e-9 0.
TRANSMISSION_LINE "t11" GET_MATRIX_ROWS L 2 4 3 5
TRANSMISSION_LINE_PARAMETERS L B R G 0.3048
DRAW_SCHEME
```

Рисунок 1.24 – Команды для построения схемы для рис. 1.22

При завершении построения схемы и ввода её параметров можно приступать к вычислению отклика. Для этого используются следующие команды:

Для вычисления токов и напряжений во временной области используются команды T\_RESPONSE\_I и T\_RESPONSE. Аргументом для обеих команд является частота  $f_0$ , на которой вычислялись матрицы потерь R, G. Пример использования команды приведен на рис. 1.25.

T\_RESPONSE  $f_0$  (или T\_RESPONSE\_I  $f_0$ )

Рисунок 1.25 – Команда для вычисления отклика

Для вычисления токов и напряжений в частотной области используются команда F\_RESPONSE\_I и F\_RESPONSE. Аргументом для обеих команд является частота  $f_0$ , на которой вычислялись матрицы потерь R, G.

Команда F\_RESPONSE также используется при вычислении в частотной области при гармоническом воздействии. Диапазон частот и шаг вычисления задается с помощью параметров «start\_frequency», «stop\_frequency», «step\_frequency» команды TRANSIENT\_ANALYSIS\_SETUP. Пример задания диапазона частот от 10 Гц до 10 ГГц и шага вычисления приведен на рис. 1.26. При этом, если используются эти параметры, то параметры, приведенные на рис. 1.23, не задаются. Для задания параметров источника гармонического воздействия используется команда

SIMULATION\_SOURCES\_HARMONICS ( $I,0.$ ),

где  $I$  ( $V$ ) – амплитуда тока или напряжения, A (B).

```
TRANSIENT_ANALYSIS_SETUP "start_frequency" 10.
TRANSIENT_ANALYSIS_SETUP "stop_frequency" 10.e+9
TRANSIENT_ANALYSIS_SETUP "step_frequency" 1.e+6
```

Рисунок 1.26 – Команды для задания диапазона частот и шага вычисления

#### 1.5.4 Команды для вычисления отклика в меандровых линиях

Геометрия меандровой линии из двух витков (с двумя плоскостями земли) показана на рис. 1.27, где  $t$  и  $w$  – толщина и ширина проводников,  $s$  – расстояние между ними,  $d$  – расстояние от проводника до края структуры,  $l$  – длина проводника и  $h_1$  и  $h_2$  – толщины слоев диэлектрика,  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

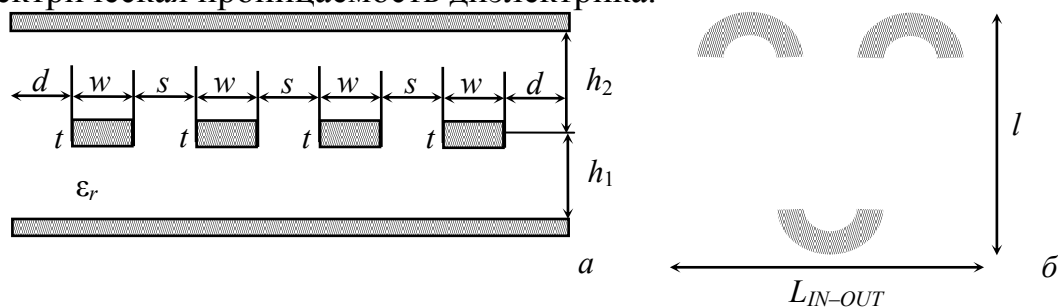


Рисунок 1.27 – Геометрия меандровой линии задержки: поперечное сечение (a); вид сигнального проводника сверху (б)

Длины меандровой линии и её проводника:

$$L_{IN-OUT}=(s+w)N, \quad L_{TOTAL}=(l+(s+w)\pi/2)N, \quad (1.1)$$

где  $N$  – количество проводников.

Первая схема меандровой линии представляется в виде одного отрезка МПЛП, соответствующие концы проводников которого замкнуты (рис. 1.28).

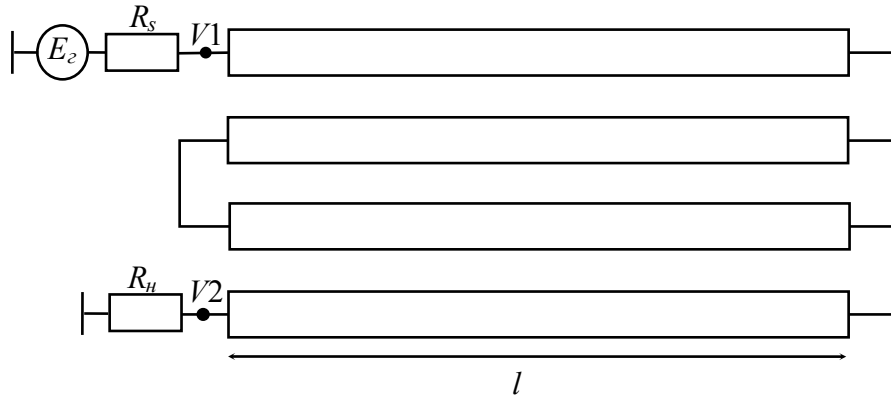


Рисунок 1.28 – Меандровая линия из двух витков без учета задержек на стыках полувитков

Для задания данной схемы используется следующее сочетание команд. Вначале, задается команда

```
TRANSMISSION_LINE_MEANDER "t11" N,
```

где первый аргумент – имя структуры, второй – количество проводников  $N$ . Затем, для описания параметров используется команда

```
TRANSMISSION_LINE_PARAMETERS L C R G length,
```

где *length* – длина отрезка линии  $l$ .

Для учета задержки в дугах на стыках полувитков можно добавлять короткий отрезок однопроводной линии передачи (рис. 1.29).

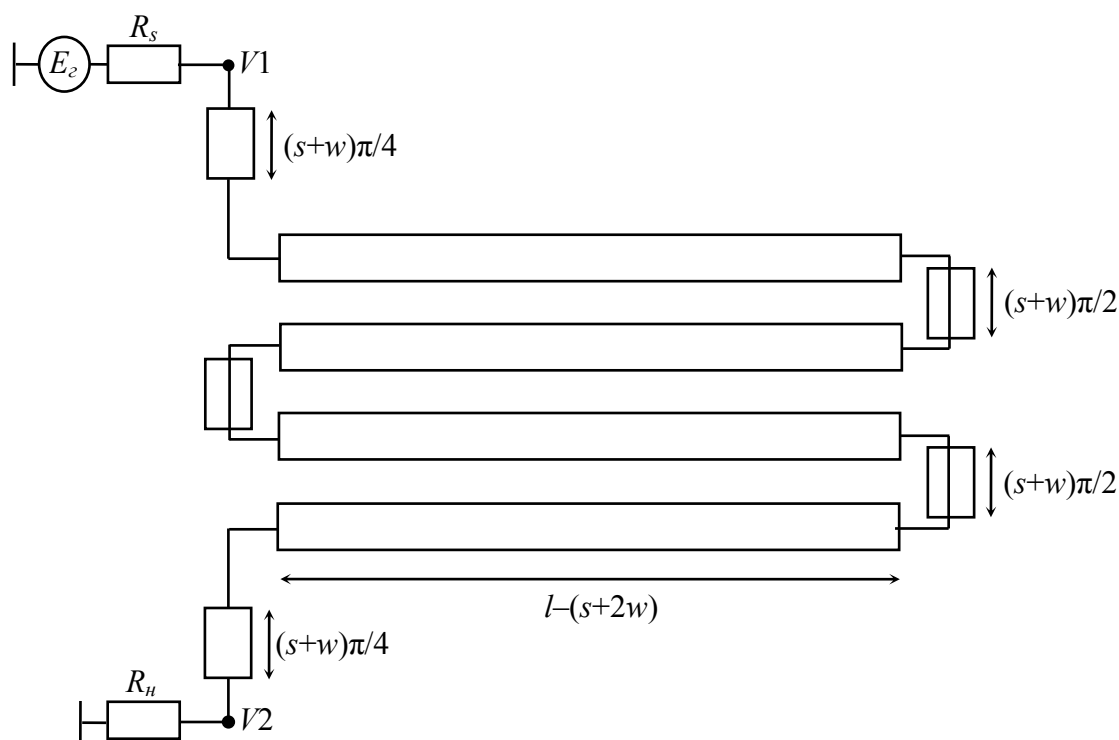


Рисунок 1.29 – Меандровая линия из двух витков

Для задания данной структуры используется следующее сочетание команд. Вначале, задается команда

`TRANSMISSION_LINE_MEANDER2 "t11" N L1 C1 R1 G1 length1,`

где первый аргумент – имя структуры, второй – количество проводников  $N$ , аргументы, с третьего по седьмой – параметры однопроводной линии передачи. Затем, для описания параметров используется команда:

`TRANSMISSION_LINE_PARAMETERS L C R G length,`

где *length* – длина отрезка линии  $l-(s-2w)$ .

Таким образом, вторая эквивалентная схема позволяет точнее учесть задержку сигнала на стыках полувитков, что может оказаться существенным при больших значениях разноса проводников меандра. Примечательно, что в такой схеме полностью учитываются взаимовлияния не только ближайших проводников, но и всех (сколько бы их ни было), т.е. каждого с каждым, что является всё более существенным в случае усиления связи, получаемом при уплотнении меандра.

Схемы на рис. 1.28 и 1.29 – частный случай целого числа витков (т.е. для четных  $N$ ). Однако описанные выше команды можно использовать и для нечетных  $N$  (рис. 1.30).

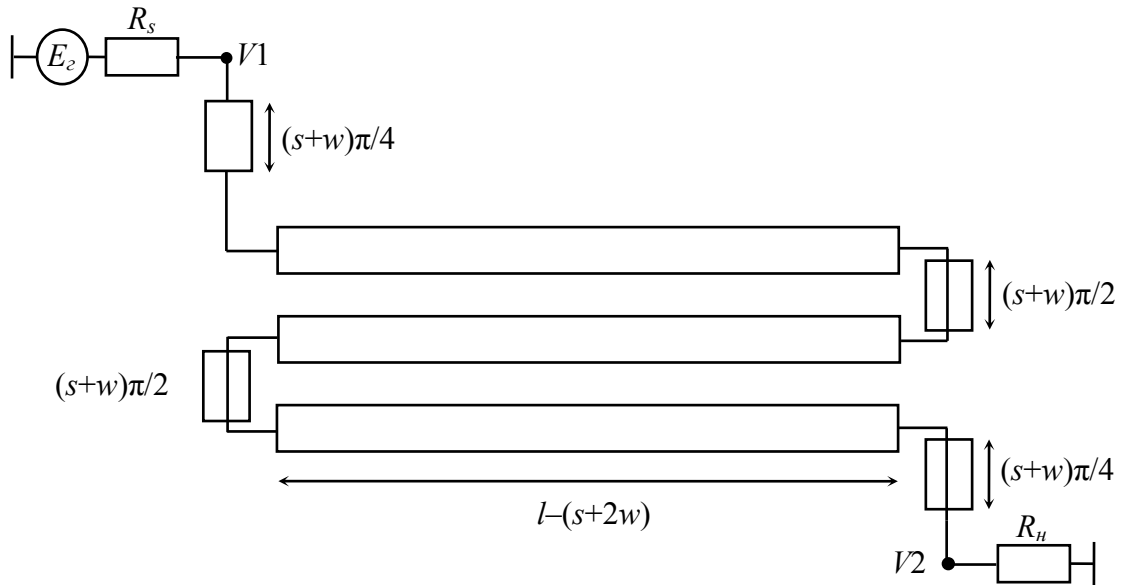


Рисунок 1.30 – Меандровая линия из полутора витков

Кроме того, на основе двух отрезков МПЛП, соединенных со сдвигом (для ещё более точного подбора задержки в меандре), можно выполнить анализ даже для целого числа четвертьвитков (рис. 1.31).

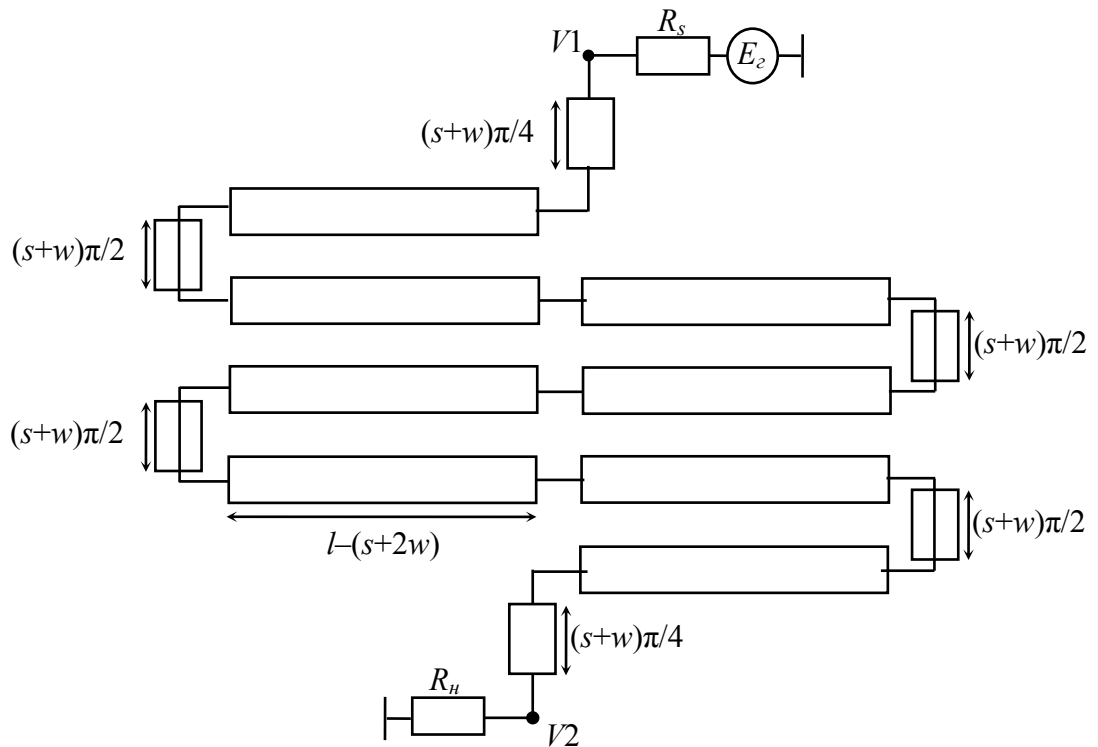














Рисунок 1.31 – Меандровая линия из четвертьвитков

### 1.5.5 Редактор принципиальных схем

В данном разделе описан редактор принципиальных схем, который используется для построения произвольной схемы и вычисления отклика. Окно редактора, которое используется для построения принципиальных схем, представлено на рис. 1.32. Меню редактора состоит из следующих элементов:

	– создать новое окно для построения принципиальных схем;
	– соединительная линия (соединяет элементы схемы);
	– резистор;
	– конденсатор;
	– индуктивность;
	– источник напряжения;
	– источник тока;
	– отрезок МПП;
	– сигнальная или схемная земля;
	– маркер (устанавливается в узлах схемы для вывода результатов вычислений)
	– очистка поля окна редактора схемы;
	– запуск вычисления отклика.



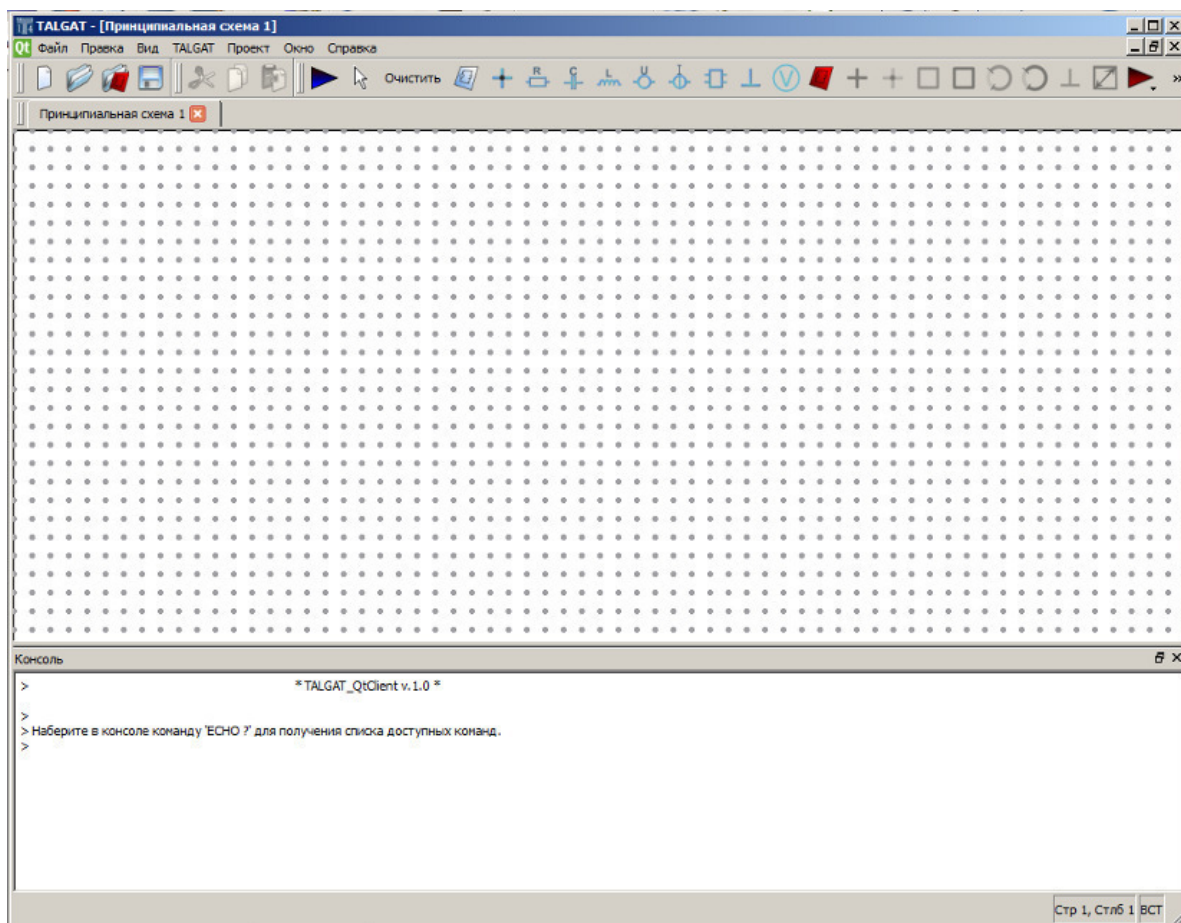


Рисунок 1.32 – Окно редактора принципиальных схем в TALGAT

При построении схемы пользователь выбирает элементы схемы в меню и размещает их на поле окна редактора. Элементы соединяются между собой с помощью элемента «соединительная линия». При размещении элемента на поле ему автоматически присваивается имя. В местах соединения выводов элементов образуются узлы, которым присваиваются соответствующие номера. Если вывод элемента соединен с сигнальной землёй, то номер узла 0. Для элементов резистор, конденсатор, индуктивность, источник тока, источник напряжения, отрезок МПЛП создано дополнительное окно «Параметры». С помощью него задаются соответствующие параметры элементов. Примеры ввода параметров для резистора, источника воздействия и отрезка МПЛП представлены на рис. 1.33.

Параметры

Имя

Ориентация

R  Ом

а

Параметры

Имя

Ориентация

Импульсный сигнал

Vin (Начальное значение напряжения)

Vrv (Максимальное значение напряжения)

tTD (Время задержки)

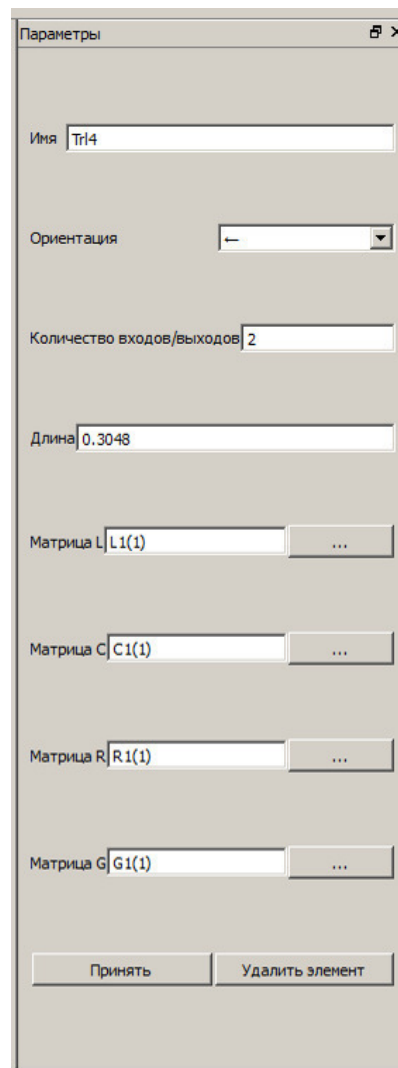
tRT (Длительность переднего фронта)

tFT (Длительность заднего фронта)

tD (Длительность вершины импульса)

Period (Период повторения)

б



б

Рисунок 1.33 – Окно ввода параметров для резистора (а), импульсного сигнала (б), отрезка МПЛП (в)

### 1.5.6 Команды для задания воздействующих сигналов и нагрузок

В данном разделе представлено описание форм воздействующих сигналов и нагрузок. Приведены параметры сигналов и нагрузок, используемых при проведении испытаний на восприимчивость к кондуктивным помехам в электрических кабелях и цепях питания, согласно MIL-STD-461F.

Импульсное воздействие, в основном, используется при проверке испытуемого устройства на быстро нарастающие и спадающие переходные процессы, которые могут возникнуть из-за переключений и внешних переходных воздействий, таких как молния и электромагнитный импульс. Команда для задания импульсного воздействия (например, для источника тока):

`SIMULATION_SOURCES_IPULSE  $I_{in}$   $I_{pv}$   $t_{TD}$   $t_{RT}$   $t_{FT}$   $t_D$  Period,`

где  $I_0$  – постоянная составляющая тока, А;  $I_A$  – амплитуда тока, А;  $t_{TD}$  – время задержки, с;  $t_{RT}$  – длительность фронта, с;  $t_{FT}$  – длительность спада, с;  $t_D$  –

длительность плоской вершины импульса, с; *Period* – период повторения импульсов, с.

Используя данную команду, можно задать импульсное воздействие с требуемыми параметрами. Например, для требований CS115 стандарта MIL-STD-461F (максимальная амплитуда 5 А, время нарастания и спада менее 2 нс, ширина импульса минимум 30 нс, частота повторения 30 Гц) команда запишется в следующем виде:

```
SIMULATION_SOURCES_IPULSE 0. 5. 0. 2.0e-9 2.0e-9 30.0e-9 30.
```

Синусоидальное воздействие, в основном, используется для имитации формы сигналов тока и напряжения, происходящего от возбуждения естественных резонансов. Команда для задания синусоидального воздействия: (например, для источника тока):

```
SIMULATION_SOURCES_ISIN  $I_0$   $I_A$   $F_{sin}$   $t_{TD}$  THETA Phase,
```

где  $I_0$  – постоянная составляющая тока, А;  $I_A$  – максимальное значение тока, А;  $F_{sin}$  – частота сигнала, Гц;  $t_{TD}$  – время задержки, с; *THETA* – коэффициент затухания, 1/с; *Phase* – фаза, град.

Используя данную команду, можно задать синусоидальное воздействие с требуемыми параметрами. Например, для требований CS116 стандарта MIL-STD-461F (уровень максимального тока затухающей синусоиды 10 А, максимальная частота сигнала 100 МГц, коэффициент затухания 50e6 1/с, 0) команда запишется в следующем виде:

```
SIMULATION_SOURCES_ISIN 0 10 100.e6 0. 50.e6 0.
```

Экспоненциальное воздействие, в основном, используется для имитации формы сигналов тока и напряжения электростатических разрядов. Команда для экспоненциального воздействия (например, для источника тока):

```
SIMULATION_SOURCES_IEXP  $I_0$   $I_A$   $t_{TD}$   $t_{RT}$   $t_{FT0}$   $t_{FT}$ ,
```

где  $I_0$  – постоянная составляющая тока, А;  $I_A$  – максимальное значение тока, А;  $t_{TD}$  – время задержки, с;  $t_{RT}$  – длительность фронта, с;  $t_{FT0}$  – начало спада, с;  $t_{FT}$  – длительность спада, с.

Используя данную команду, можно задать экспоненциальное воздействие с требуемыми параметрами. Например, если максимальная амплитуда сигнала 5 А, время фронта 2 нс, время спада 20 нс, то команда запишется в следующем виде:

```
SIMULATION_SOURCES_IEXP 0. 5. 0. 2.e9 2.e9 20.e9.
```

Гауссов импульс, в основном, используется для имитации формы СКИ. Команда для задания Гауссова импульса (например, для источника напряжения):

```
SIMULATION_SOURCES_VGAUSS  $V_{pv}$   $f_c$   $r$   $b_w$   $t_{pr}$   $b_{wr}$ ,
```

где  $V_{pv}$  – максимальное значение амплитуды, В;  $f_c$  – несущая частота генерируемого сигнала, Гц;  $b_w$  – относительная (т.е. нормированная к несущей частоте) ширина спектра, %;  $t_{pr}$  – максимальное уменьшение

огибающей относительно ее пикового уровня, дБ;  $b_{wr}$  – уменьшение спектральной функции относительно ее пикового значения, дБ.

Эквивалент нагрузки LISN используется для измерения кондуктивных эмиссий. Принципиальная схема эквивалента нагрузки LISN (line stabilization network), который используется при измерении кондуктивных эмиссий по MIL-STD-461F, приведена на рис. 1.34, где  $R_1=5$  Ом,  $R_2=1$  кОм,  $C_1=8$  мкФ,  $C_2=0,25$  мкФ и  $L=50$  мкГн.

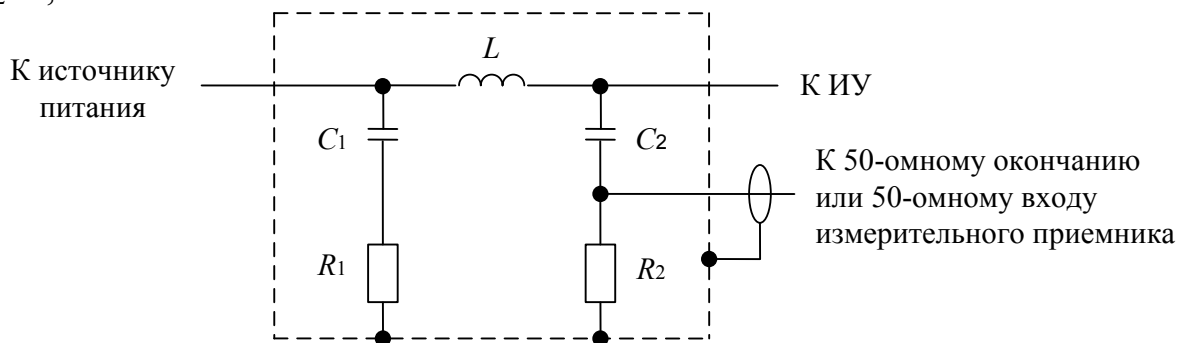


Рисунок 1.34 – Принципиальная схема LISN по MIL-STD-461F

## 1.6 Моделирования в системе 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 приближены, 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, метод конечных элементов (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 разработан российской компанией ООО «ТОР» в 1990 года и 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 методом конечных элементов. 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, решаемой при помощи ELCUT. Этот документ содержит такие общие характеристики, как тип задачи ("Электростатика", "Магнитостатика", "Теплопередача" и пр.), класс модели (плоская или осесимметричная) и тому подобные, 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 Elcut включает в себя: панель меню, панель инструментов, справочную панель, дерево проекта и рабочую область (рис. 1.35). Повторный вызов справочной панели осуществляется нажатием клавиш *Ctrl+F1* или кнопки  на панели инструментов.

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 (рис. 1.36).

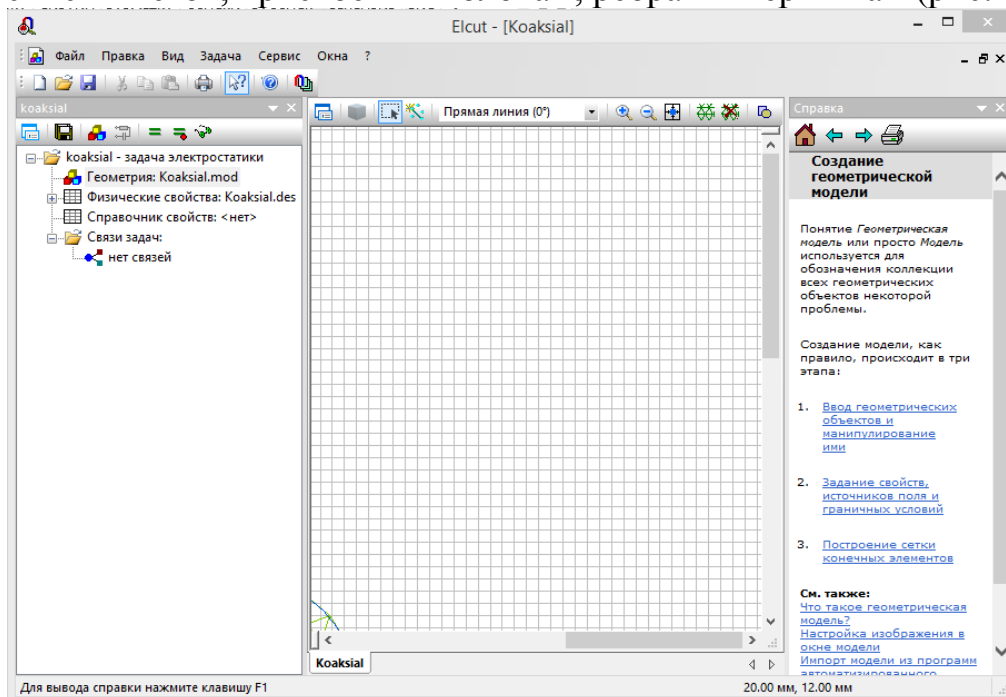











Рисунок 1.35 - Главное меню и панель инструментов Elcut

Значки 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.

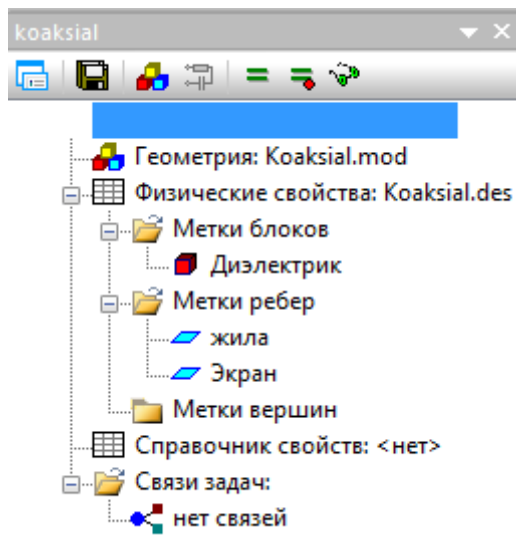


Рисунок 1.36 – Дерево задачи

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 Elcut или в контекстном меню (рис. 1.37).

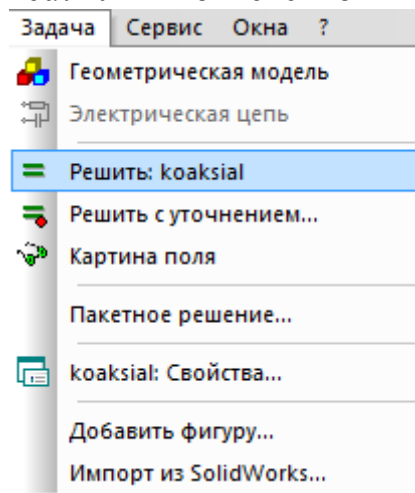


Рисунок 1.37 – Вкладка задача

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.

## 1.7 Моделирование микрополосковой линии

Цель работы – рассчитать электростатическое поле, определить собственную и взаимную емкость проводников.


Расчеты выполнить в системах Elcut Student, TALGAT и с помощью функции разработанной в Scilab ранее. Структура линии приведена на рис. 1.38.

Для моделирования в Elcut. Область задачи ограничена Землей снизу и бесконечна в трех других направлениях. Тип задачи: Задача электростатики. Класс задачи: Плоско-параллельная. Относительная диэлектрическая проницаемость воздуха  $\epsilon_0=1$ . Относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика  $\epsilon=2$ . Оболочка заземлена  $U=0$ В. Остальные размеры (в миллиметрах) приведены на рис. 1.38.



Рисунок 1.38 – Микрополосковая линия

Для начала работы нужно запустить программу Elcut, затем 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 (рис. 1.39). Ребро AD необходимо при этом совместить с вертикальной осью.

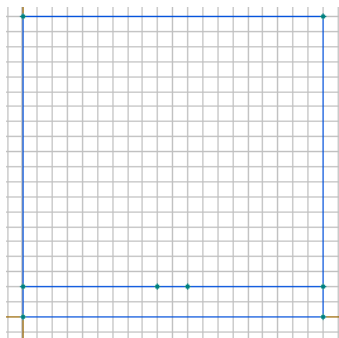


Рисунок 1.39 - Геометрическая модель структуры.

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


Также второму блоку необходимо присвоить метку Воздух. Аналогичным образом метки присваиваются ребрам. Для одновременного выделения ребер, образованных вершинами A, B, C, D, нужно держать нажатой кнопку Ctrl. Выделенным ребрам присвоить метку Экран. Ребру EF присвоить метку Проводник. Вершине E или F присвоить метку 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 ( $\epsilon_x = 1$ ) 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 проводника. Включить флажок Изолированный проводник.

Чтобы ввести данные для метки вершины Заряд необходимо в окне свойств метки включить флажок Заряд и ввести значение равное 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 (рис. 1.40).

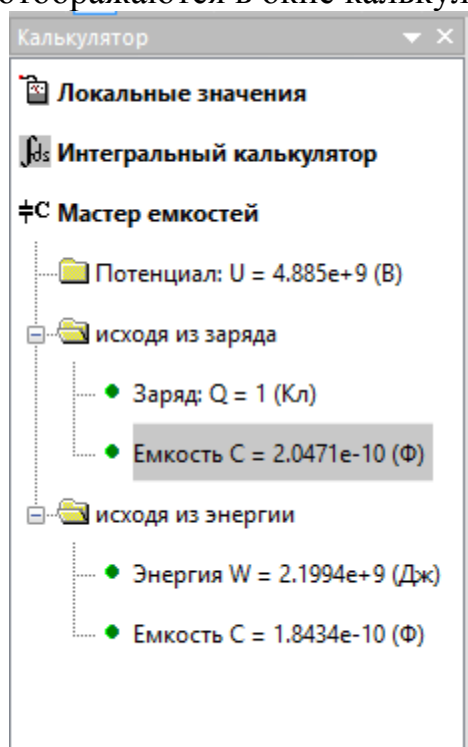


Рисунок 1.40 – Окно калькулятора

## 1.8 Моделирование двухпроводной линии передачи

Цель работы – рассчитать электростатическое поле, определить собственную и взаимную емкость проводников.

Расчеты выполнить в системах Elcut и TALGAT. Структура линии приведена на рис. 1.41.

Для моделирования в Elcut. Область задачи ограничена Землей снизу и бесконечна в трех других направлениях. Тип задачи: Задача электростатики. Класс задачи: Плоско-параллельная. Исходные данные: Размер проводника: 10х30 мм. Расстояние между проводниками: 20 мм. Толщина диэлектрика: 10 мм. Относительная диэлектрическая проницаемость воздуха  $\epsilon_0=1$ . Относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика  $\epsilon=2$ .

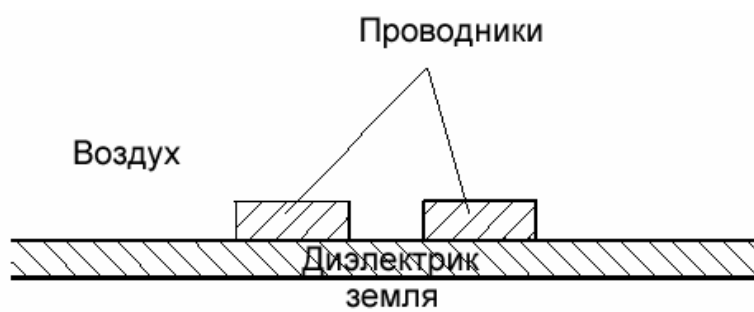



Рисунок 1.41 – Двухпроводная линия передачи

Для решения теоретически бесконечной задачи удобно определить область расчета как прямоугольник, достаточно большой (например, 24×40 мм), для того чтобы исключить влияние краевых эффектов. Для вычисления матрицы емкостей необходимо установить потенциалы  $U=1$  В у одного проводника и  $U=0$  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 мм до 160 мм по горизонтальной оси, от 0 мм до 160 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 ( $\epsilon_x = 1$ ) 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. Аналогичным образом открыть окно свойств первого проводника и задать значение  $U_0 = 1$  В. Для второго проводника значение  $U_0 = 0$  В.

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 по формуле:

$$C_{11} = C_{22} = \frac{Q_1}{U_1}.$$

Взаимная емкость вычисляется по формуле:

$$C_{12} = C_{21} = Q_2/U_1.$$

Здесь  $Q_1$  и  $Q_2$  заряды, которые вычисляются как интегралы вдоль прямоугольных контуров, построенных вокруг проводников с отступом от их границ. В качестве контуров для расчета зарядов  $Q_1$  и  $Q_2$  следует построить прямоугольники с координатами от -60 мм до 0 мм по горизонтальной оси, от 0 мм до 40 мм по вертикальной оси и от 0 мм до 60 мм по горизонтальной оси, от 0 мм до 40 мм по вертикальной оси соответственно.

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

## 1.9 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 (рис. 1.42).

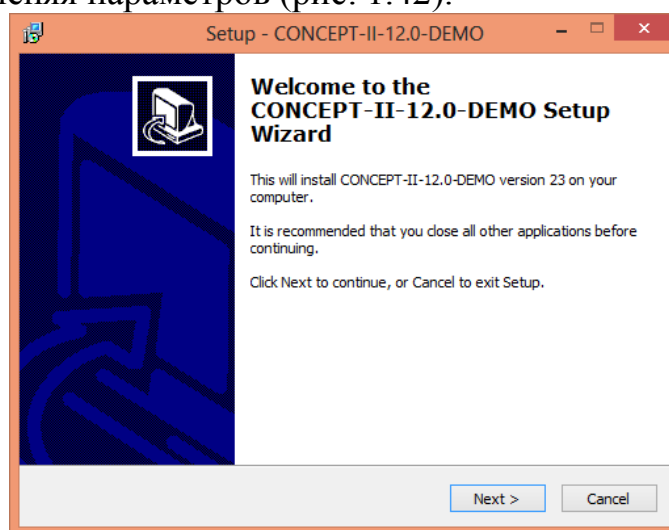


Рисунок 1.42 – Окно установки программы

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» (рис. 1.43). Нажать ОК.

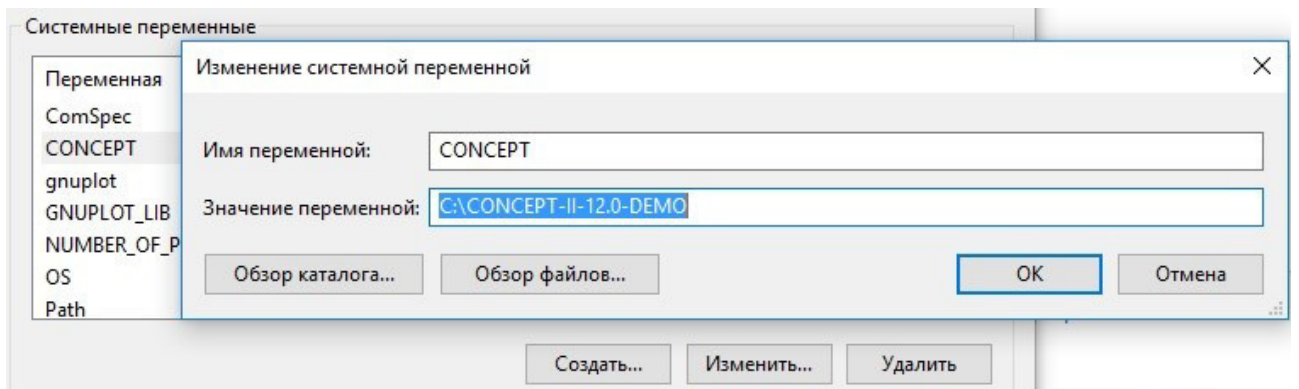


Рисунок 1.43 – Расширение пути

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 в соответствии с пунктом 0 (рис. 1.44).

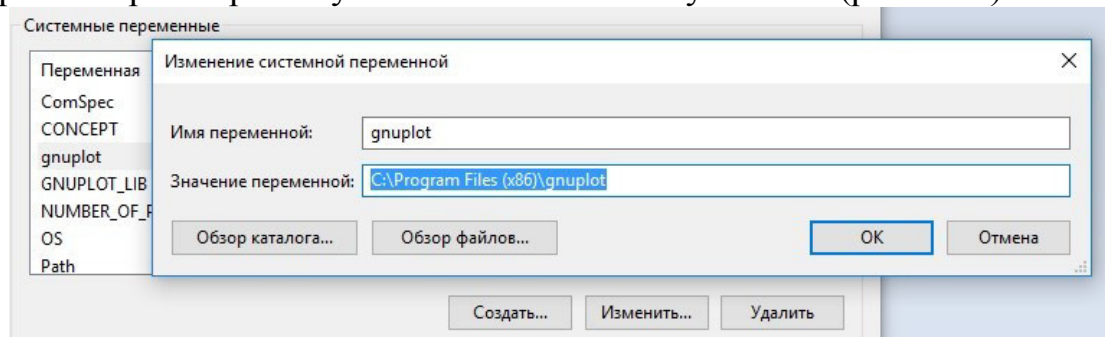


Рисунок 1.44 – Расширение пути для программы «Gnuplot»

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 (рис. 1.45).

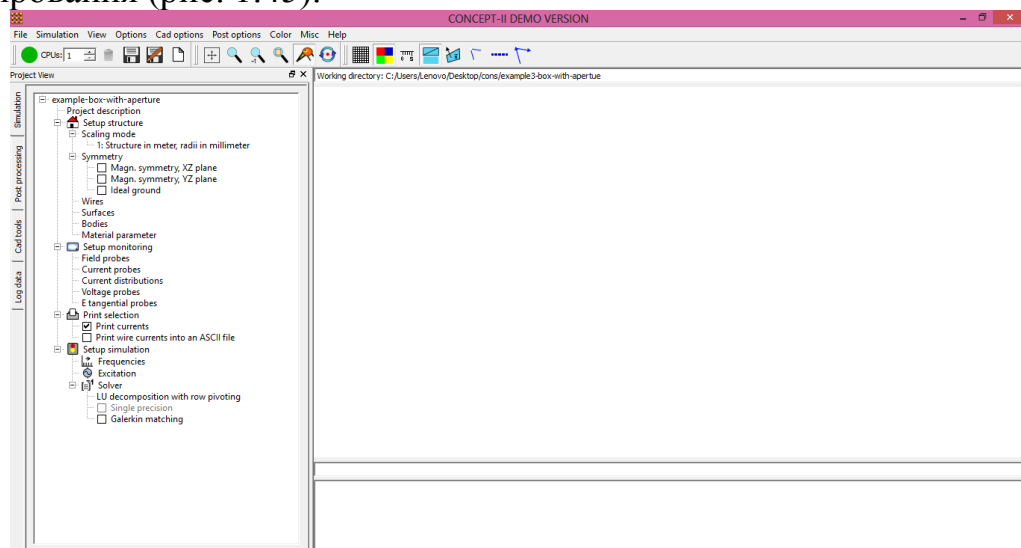


Рисунок 1.45 – Графический интерфейс программы CONCEPT-II

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

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* (рис. 1.46 а) и *Cad tools 2* (рис. 1.46 б).

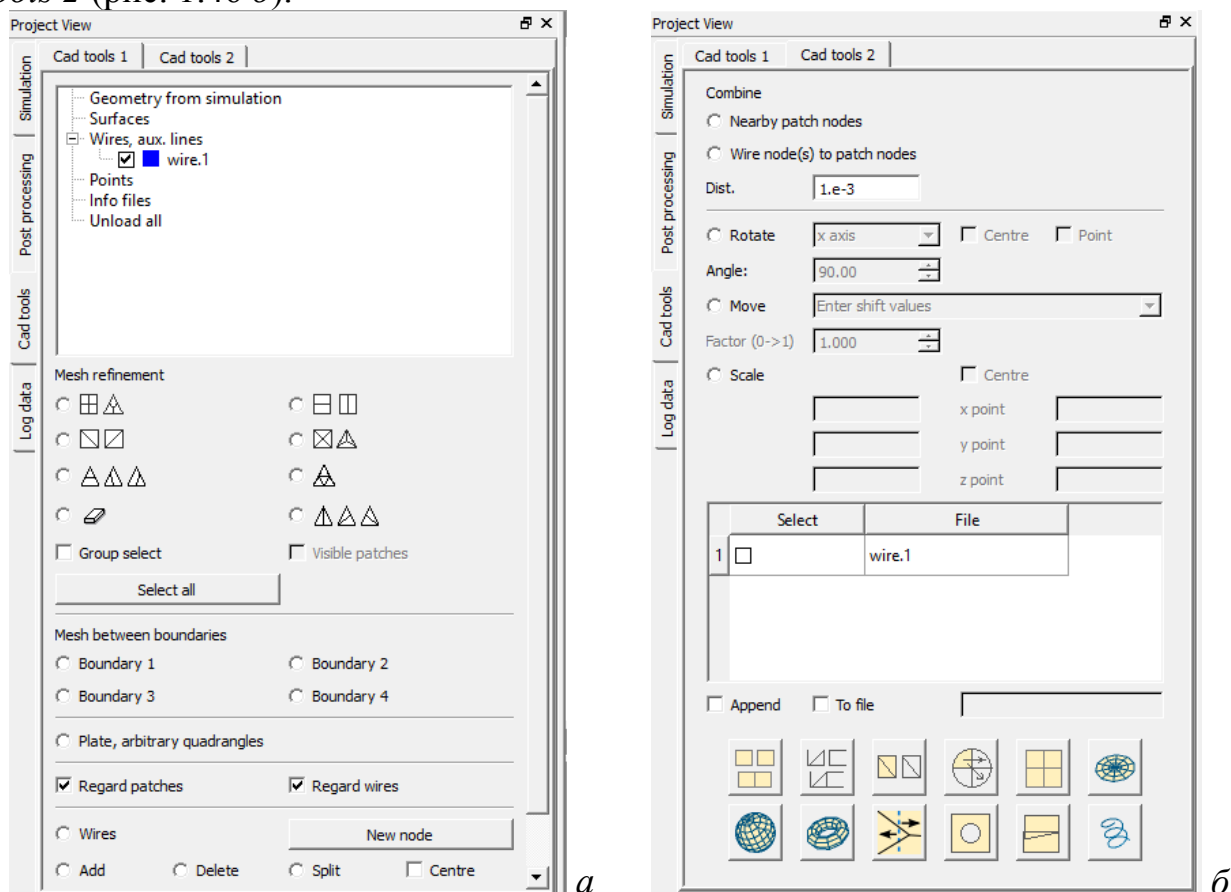


Рисунок 1.46 – Вкладки *Cad tools 1* (а) и *Cad tools 2* (б)

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 (рис. 1.47).

Дерево проекта включает в себя 4 основных раздела:

*Setup of the structure* (настройка структуры: геометрия, симметрия, виды проводов и т.д.).

*Setup monitoring* (настройка полей тока, напряжения, распределение тока).

*Setup printing* (настройка печати, используются значения по умолчанию).

*Setup simulation* (настройка моделирования: частоты дискретизации, тип возбуждения и выбор используемой структуры).



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. Так же режим *Galerkin matching* может использоваться для строго треугольной сетки.

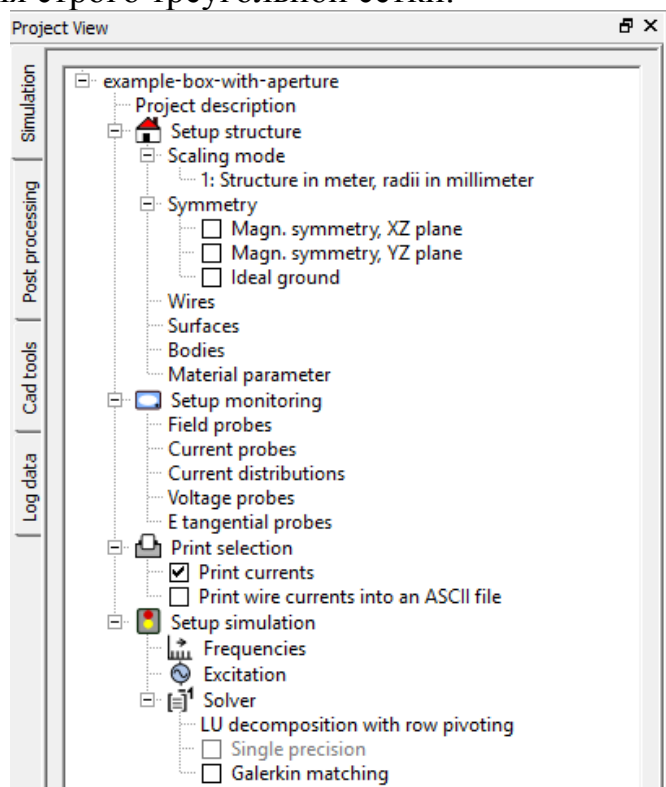


Рисунок 1.47 – Дерево проекта

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* (рис. 1.48), после нажатия которой запускается проверка геометрии. После успешного окончания проверки во вкладке *Post processing* активируется кнопка *Show complete structure* (рис. 1.48), которая позволяет достроить структуру на основании заданной симметрии.

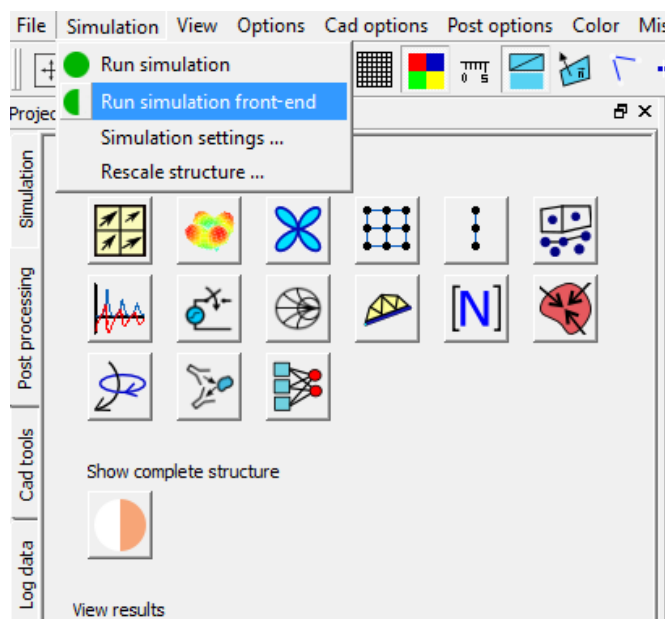


Рисунок 1.48 – Проверка заданной геометрии и правильности входных данных

На этапе вычислений производится запуск процесса вычисления. В окне для вывода системных сообщений (рис. 1.49) отображается процесс расчета, время вычисления, анализируемая частотная точка и др.

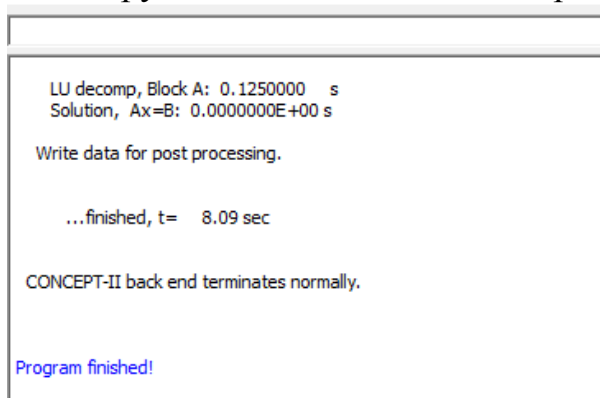


Рисунок 1.49 – Окно для вывода системных сообщений

После окончания вычислений доступна вкладка *Post processing*, в которой находятся инструменты для графического отображения полученных результатов (рис. 1.50). 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.

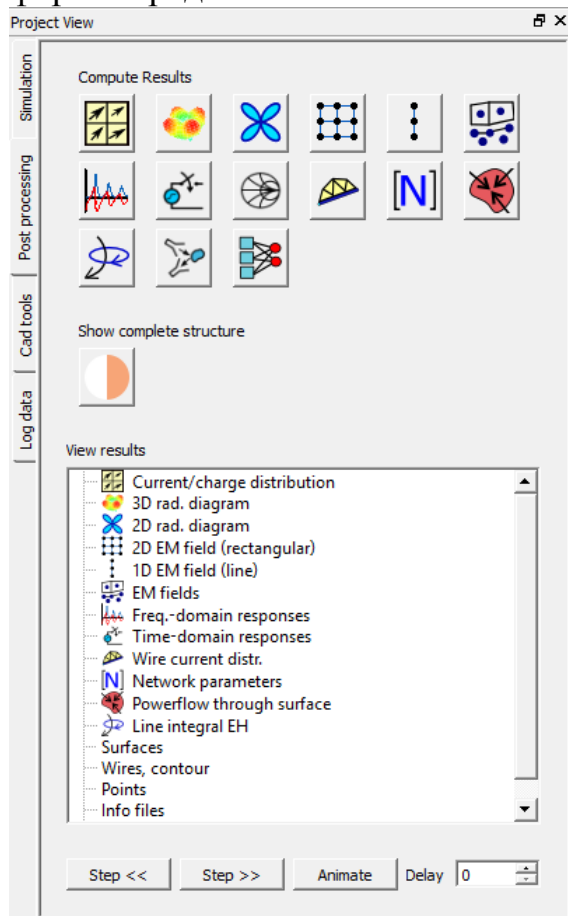


Рисунок 1.50 – Постобработка вычислений

## 2 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.

### 2.1 Линии передачи

Цель работы – оценка перекрестных наводок 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  $L$  индукций.
- 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 вышепоставленных задач необходимо в ПО TALGAT подключить следующие программные модули:

MOM2D – модуль двумерного электростатического анализа.

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

MATRIX – модуль матричных операций.

На рис. 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

Пример поперечного сечения линии передачи приведен на рис. 2.2.

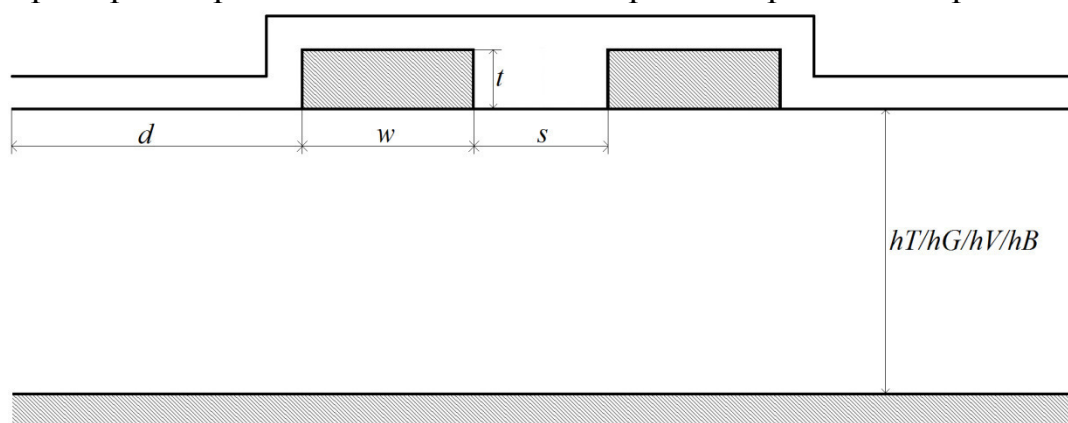


Рисунок 2.2 – Поперечное сечение линии передачи

Значения параметров исследуемых структур для построения поперечного сечения исследуемых линий следующие: ширина проводника  $w = 500$  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  $d = 3 \times w$ , 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.

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 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 d w s w s w hT
SET_ER_PLUS ErB
LINETO PLUS PLUS PLUS PLUS PLUS d w s w s w PLUS hT t
LINETO PLUS PLUS PLUS PLUS d w s w s PLUS hT t
LINETO 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 выбирать *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 рис. 2.3.

Рисунок 2.3 – Параметры временного сигнала

По результатам анализа проанализировать полученный отклик и *определить уровень наводок* на пассивные линии по отношению к активной. В отчете также должны быть приведены выводы по лабораторной 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 передач (матриц L и C), нагрузок (по 50 Ом), емкостей (по 0,1 пФ) и индуктивностей (по 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.

#### 2.1.2.1 Вариант 1

Таблица 2.1 – Параметры линий передачи

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



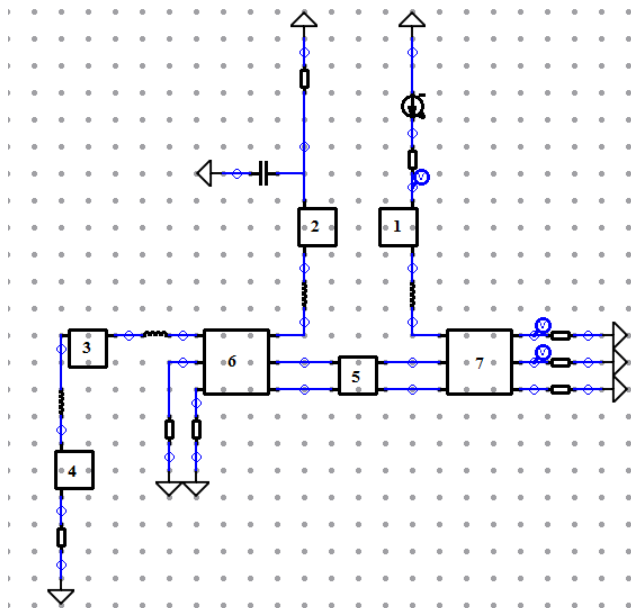


Рисунок 2.4 – Принципиальная схема

### 2.1.2.2 Вариант 2

Таблица 2.2 – Параметры линий передачи

№ отрезка линии передачи	Слой	Количество 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

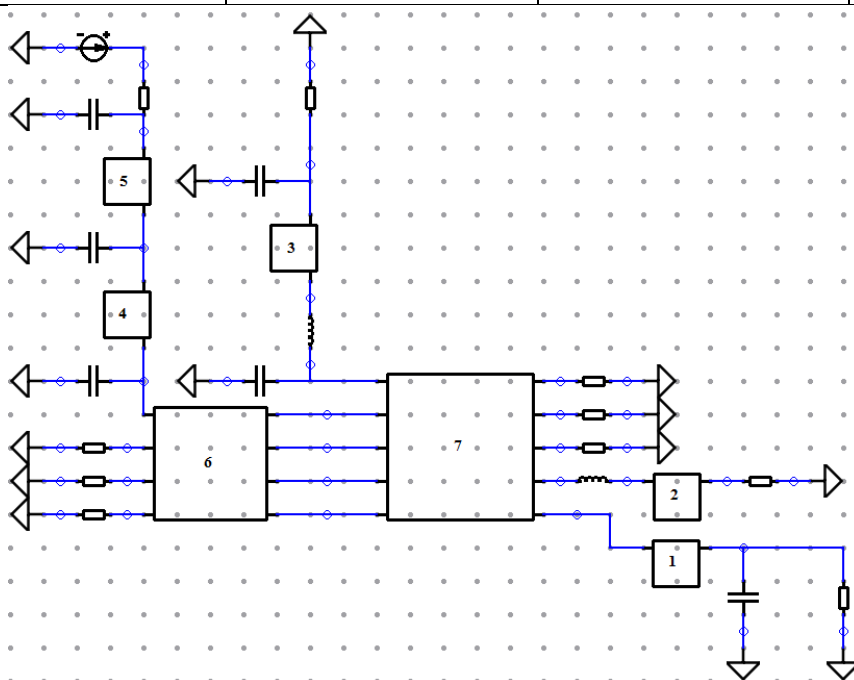


Рисунок 2.5 – Принципиальная схема

### 2.1.2.3 Вариант 3

Таблица 2.3 – Параметры линий передачи

№ отрезка линии передачи	Слой	Количество 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

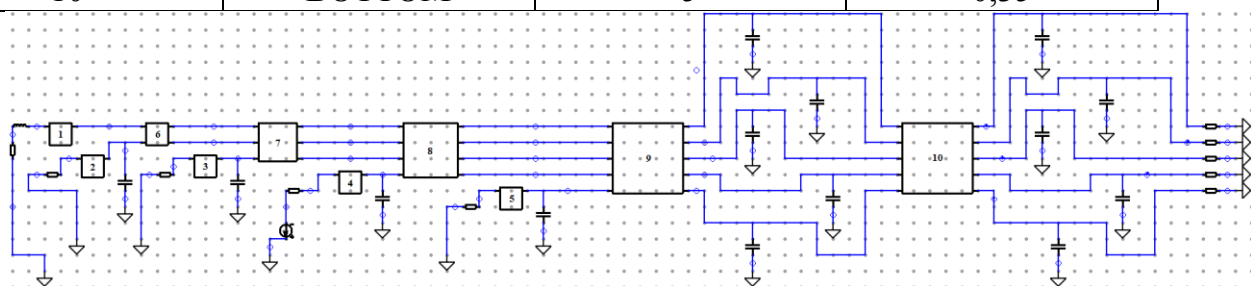


Рисунок 2.6 – Принципиальная схема

### 2.1.2.4 Вариант 4

Таблица 2.4 – Параметры линий передачи

№ отрезка линии передачи	Слой	Количество 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

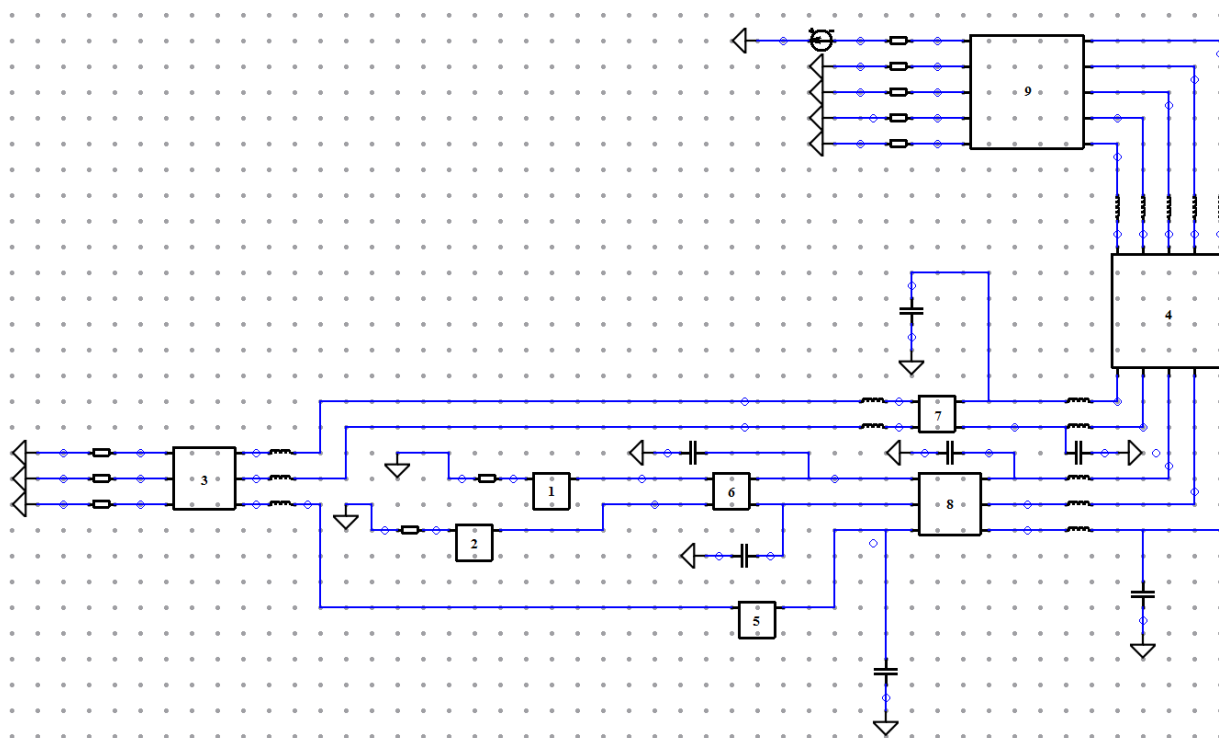


Рисунок 2.7 – Принципиальная схема

## 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  $r_2$  (рис. 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.

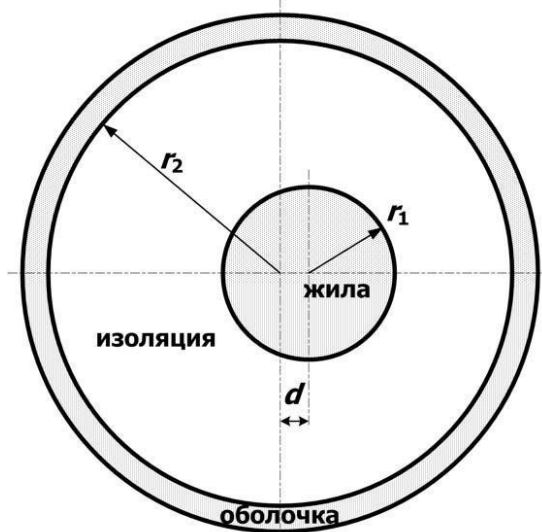


Рис. 2.8 – Конструкция коаксиального кабеля

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  $E_{\max 0}$ :

$$E_{\max 0} = \frac{U_0}{r_1 \ln(r_2/r_1)}, \text{ откуда } r_2 = r_1 \cdot \exp(U_0/r_1 E_{\max 0})$$

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 (рис. 2.9) оптимальное распределение напряженности поля достигается при соблюдении равенства:

$$\varepsilon_1 r_1 = \varepsilon_2 r_3. \quad (1)$$

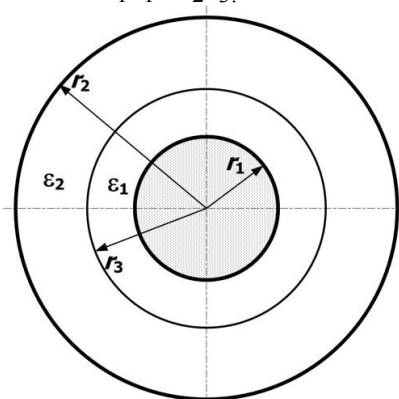


Рис. 2.9 – Кабель с градирированной изоляцией

Радиус оболочки  $r_2$  в этом случае может быть найден из равенства

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

При расчете электростатического поля, создаваемого такой системой проводников, принимают, что потенциал на поверхности внутреннего проводника (жилы) 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 ( $\varepsilon = \text{const}$ ) такое поле

описывается двумерным уравнением Лапласа для электростатического потенциала  $U$ .

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0.$$

В общем случае электростатическое поле для плоскопараллельной задачи описывается уравнением Пуассона.

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

где  $\rho$  – объемная плотность заряда в рассматриваемой области, а диэлектрические свойства различны вдоль осей координат. Поэтому, 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 работы в пакете ELCUT следует разработать расчетную модель решаемой задачи. При моделировании обычно стараются выделить часть конструкции, используя наличие симметрии в расположении элементов конструкции и приложенных нагрузок. Это позволяет повысить точность 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 ( $\partial U/\partial n = 0$ ).

В результате расчетная модель приобретет вид, изображенный на рис. 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.

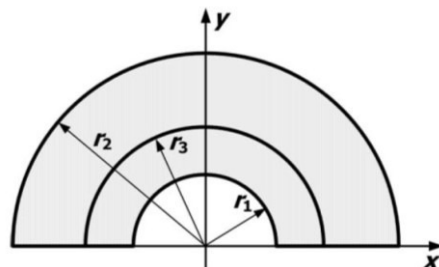



Рисунок 2.10 – Расчетная модель

Этапы решения задачи схематично приведены на рис. 2.11.



Рисунок 2.11 – Этапы решения задачи

### 2.2.1 Порядок выполнения работы:

- 1 При создании новой задачи ELCUT («Файл»-«Создать задачу») в соответствующих диалоговых окнах указать: имя задачи – Lab1 также (также необходимо указать путь к папке на сетевом диске в папке группы 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  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.

- 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 рис. 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

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

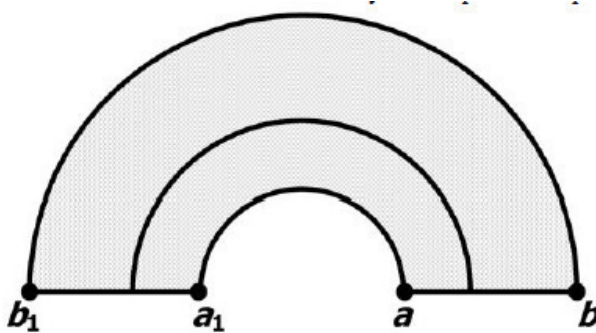





Рисунок 2.13 –Ребра структуры

- Для построения конечно-элементной сетки предварительно необходимо задать шаг дискретизации (сегментации) расчетной области. Шаг дискретизации определит густоту сетки в различных областях модели. Для рассматриваемой задачи можно предположить существенную неоднородность поля вблизи 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). Обратите внимание на то, 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 соответственно. Для построения сетки необходимо выбрать структуру целиком или её часть и воспользоваться инструментом . (Для удалее сетки воспользоваться инструментом .)

6 Для решения задачи необходимо нажать  или в меню задача выбрать пункт решить: lab1.pbm. 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**:

- «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* («Контур»–«Сменить направление»).
- «Вид»–«График» и из предложенного набора величин выбрать «Напряженность».
- Распечатать график: «Файл»–«Печать».

7.2 Определить максимальное значение напряженности (соответствует узлу *a*) и занести в таблицу результатов

- «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<sub>1</sub>* *a* при изучении влияния смещения жилы, узел *a* (*a<sub>1</sub>*) при изменении радиуса жилы, узел *b* (*b<sub>1</sub>*) при изменении радиуса обмотки).

8.2 «Правка»–«Передвинуть выделенное». В появившемся диалоговом окне 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 пункт 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  $E_{max}$  для различных  $d$  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.

№	$U_0$ , кВ	$\epsilon_r$	$r_1$ , мм	$r_2$ , 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  $U_0=3$  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. 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.

№	$\epsilon_r$	$r_1$ , 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 (1)

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  $\epsilon r_2$ . 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.

№	$\epsilon r_1$	$\epsilon r_2$	$r_1, \text{мм}$	$r_2, \text{мм}$
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  $r_3$  ( $r_3$  находят по формуле (1)). В результате получают 2 замкнутые области (между  $r_1$  и  $r_3$ , и между  $r_3$  и  $r_2$ ), они обе должны быть проименованы. В предварительном расчете их свойства одинаковы и определены  $\epsilon r_2$ . В дальнейших расчетах свойства ближайшего к жиле блока изменяют на  $\epsilon r_1$ .

## 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 навыком электродинамического моделирования.

### 2.3.1 Порядок выполнения работы

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

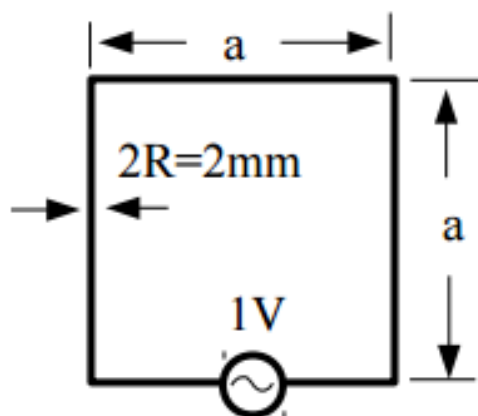


Рисунок 2.14 – Параметры контурной антенны

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 в всплывающем меню выбрать *Edit a new wire file*, откроется диалоговое окно (рис. 2.15), в котором необходимо ввести параметры провода, а именно: координаты начала и конца провода, радиус провода и др. Название файла должны иметь имя следующих типов: xxx.wire или wire.xxx.

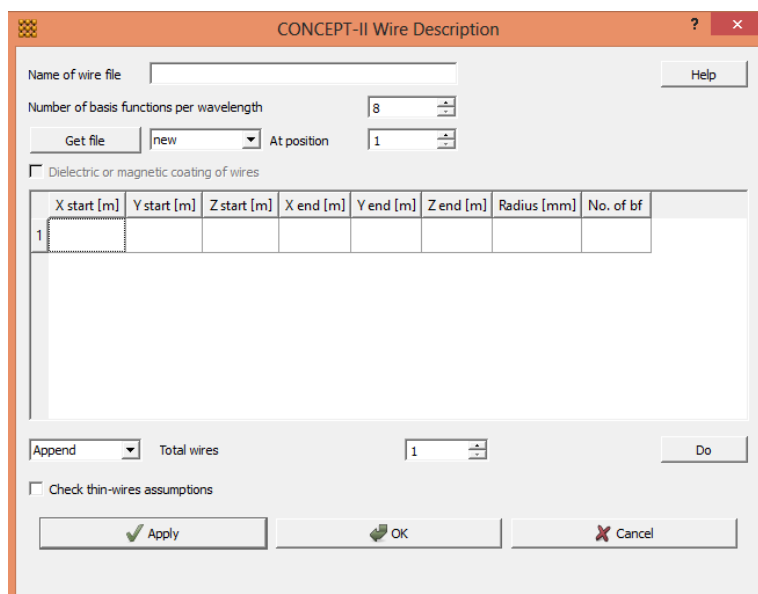


Рисунок 2.15 – Диалоговое окно для создания проводов

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 три провода) и нажать *Do*. В итоге появляется возможность создать четыре провода одновременно. Далее необходимо ввести координаты как показано на рис. 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 контурной антенны необходимо выполнить следующие действия:

- 1 В дереве проекта находится вкладка *Setup simulation*, щелкнуть правой кнопкой мыши на строчку *Frequencies* (частоты) → *Single Fre.*
- 2 Откроется диалоговое окно, в котором вводится необходимая частота 1 МГц (рис.2.17), затем нажать *OK*.

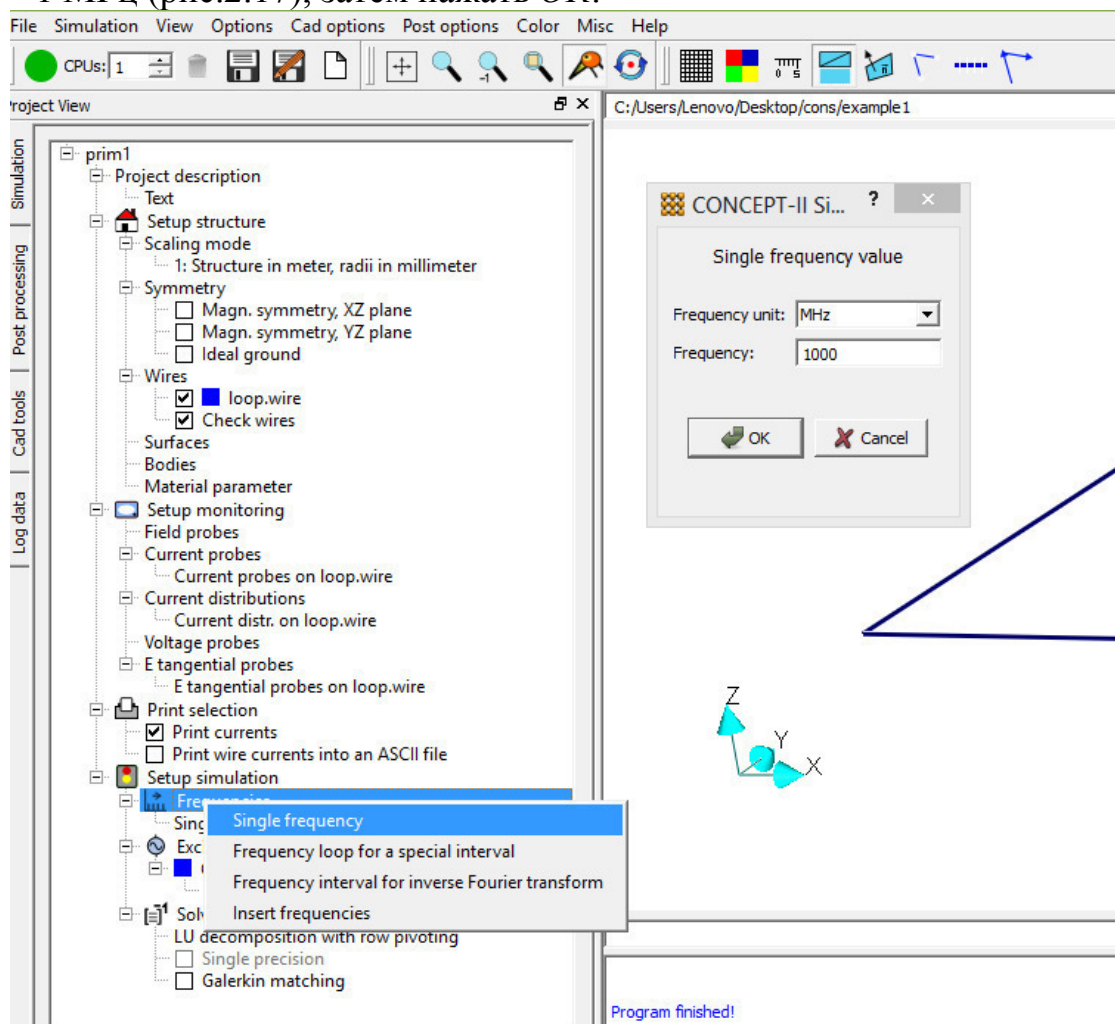


Рисунок 2.17 – Установка частоты генератора контурной антенны

Для того чтобы установить необходимое напряжение генератора в дереве проекта, в разделе *Setup simulation* нужно щелкнуть правой кнопкой мыши на строчку *Excitation* → *Voltage generator(s)*, далее выбрать

необходимый проводник и ввести амплитуду и фазу как показано на рисунке 2.18, далее нажать *Apply* → *OK*.

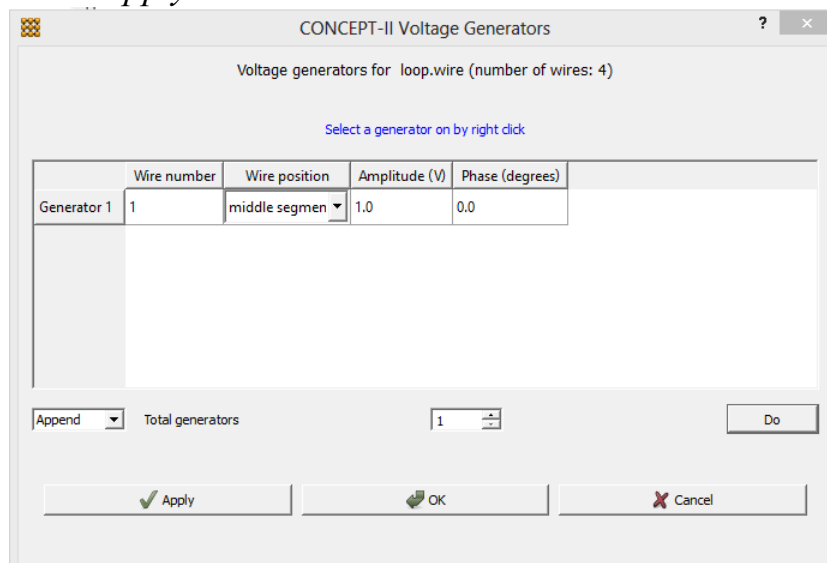




Рисунок 2.18 – Размещение генератора напряжения на проводе

После того, как была создана заданная структура и установлены все параметры, необходимо запустить процесс моделирования нажав на кнопку . В процессе вычислений устанавливается система уравнений, интегральное уравнение электрического поля переходит в линейную систему уравнений, которая затем решается при помощи *LU*-разложения (разновидность метода Гаусса). Если активировать вкладку *Log data*, которая находится на левой панели вкладок графического интерфейса CONCEPT-II и нажать на *Concept-II-simulation* на дисплее можно увидеть содержимое файла журнала *concept.out*.

Вычисляется распределение тока автоматически и записывается на жесткий диск, данные при этом доступны для вычисления электромагнитных полей. Мы хотим, вычислить поле *H* вдоль пространственной траектории, проходящей через центр петли. Для этого необходимо открыть вкладку *Post processing* и нажать на кнопку . Открывается вспомогательное окно, как показано на рисунке 2.19. Первая строка содержит координаты начала и конца имеющегося провода и количество сегментов на которые разбивается проводник. Если выбрать *Field probes* (вторая строка в ниспадающем меню), появляется возможность самостоятельно выбрать необходимый провод и ввести его координаты. После нажатия кнопки *OK* начинается вычисление поля.

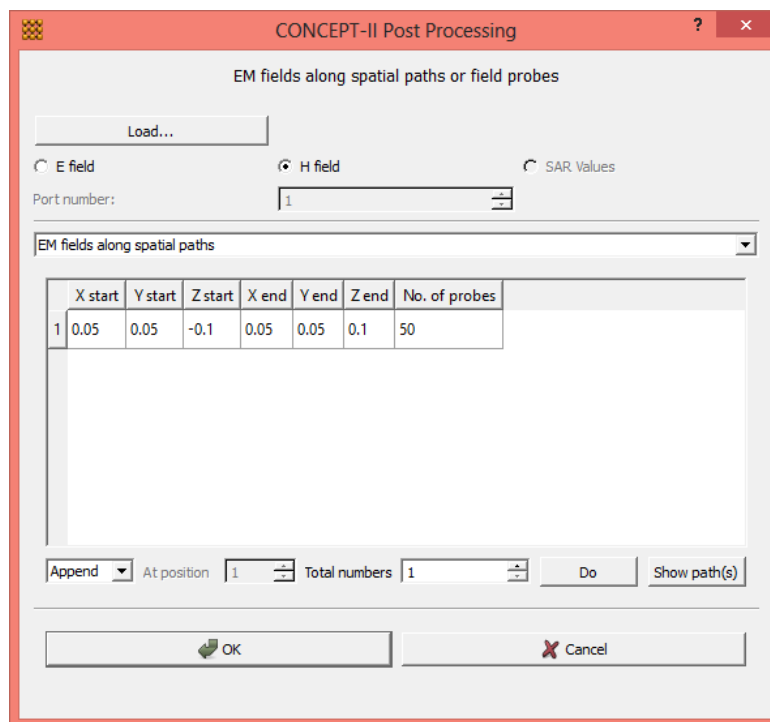


Рисунок 2.19 – Установка пространственного пути для вычисления электромагнитных полей

После окончания процесса вычисления открывается дополнительное диалоговое окно (рисунок 2.20), в котором можно выбрать необходимую компоненту поля, выводимую графически, которая будет отображаться в зависимости от местоположения. Так как изначально имеются данные для поля Н по умолчанию имя файла «H-path1.asc» (рисунок 2.20). Необходимо поставить галочку на «Max. magn.» и нажать *OK*.

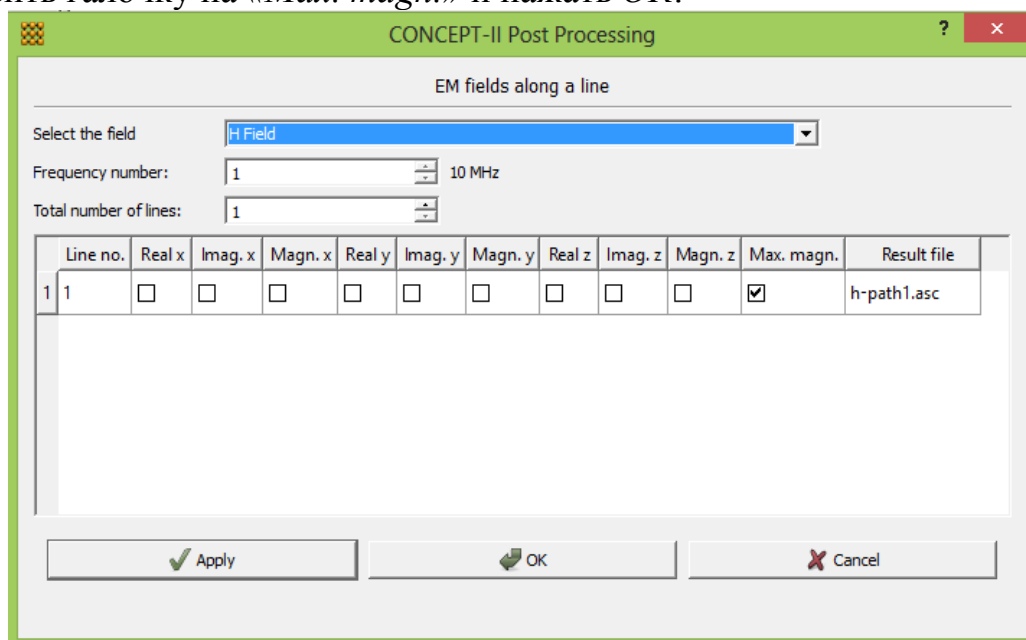


Рисунок 2.20 – Выбор компоненты поля

После вычислений на экране отображается график зависимости поля Н от относительной длины линии (рисунок 2.21).

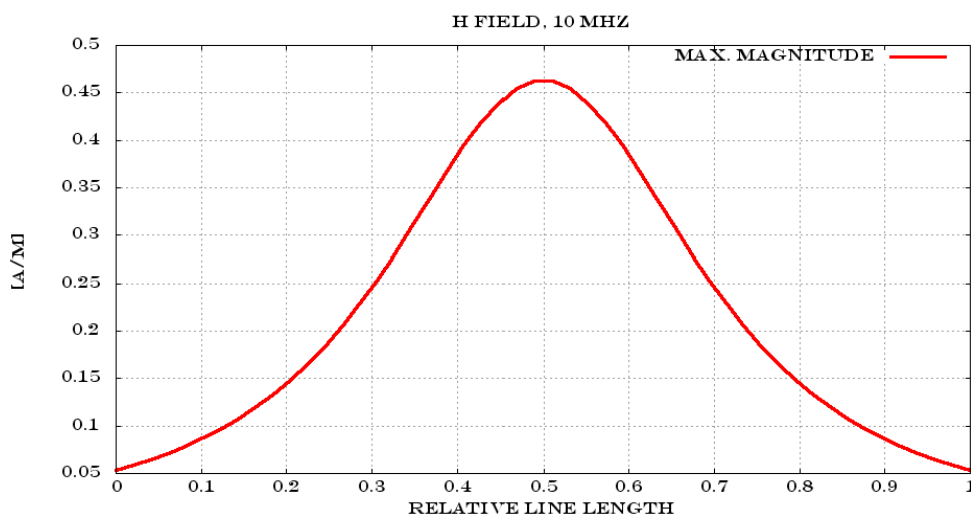



Рисунок 2.21 – График зависимости поля Н от относительной длины линии

После получения результата вычисления представление кривой можно изменить двумя способами, нажав правой кнопкой мыши в вкладке *Post processing* в окне просмотр результатов (дерево пост-обработки) на строчку *1D EM field (line)* со значком  (рисунок 2.22).

Так называемое дерево пост-обработки дает возможность обеспечить быструю перезагрузку уже вычисленных результатов следующими способами:

- *Curve selection* – выбор дополнительных компонент поля;
- *Show result* – возможность сравнение сохраненных результатов вычисления. Выходные форматы являются SVG, PNG и PostScript.

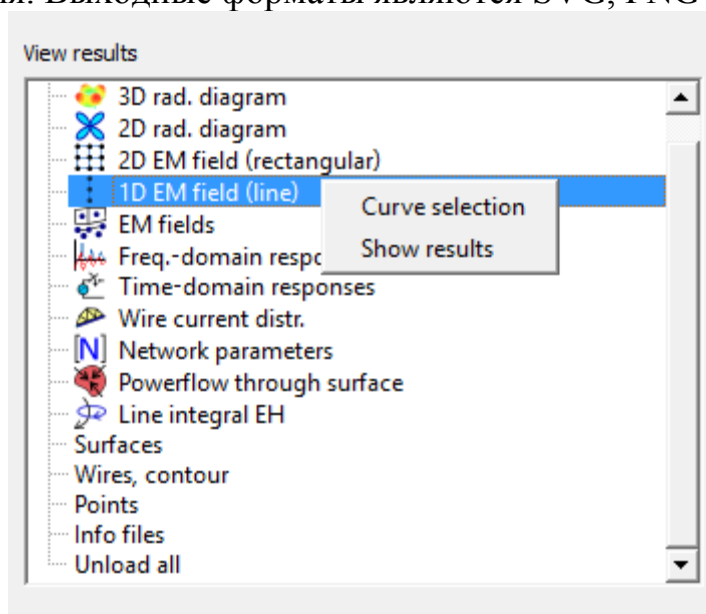


Рисунок 2.22 – Дерево пост-обработки

Для того чтобы перейти в формат представления *2D* необходимо выполнить предварительные преобразование, а именно, изменение частоты с 1 МГц на 1000МГц. Для этого во вкладке *Simulation* в дереве проекта необходимо правой кнопкой мыши нажать на строчку *Single frequency* → *Set frequency* и изменить значение частоты в открывшемся окне (рисунок 2.23).

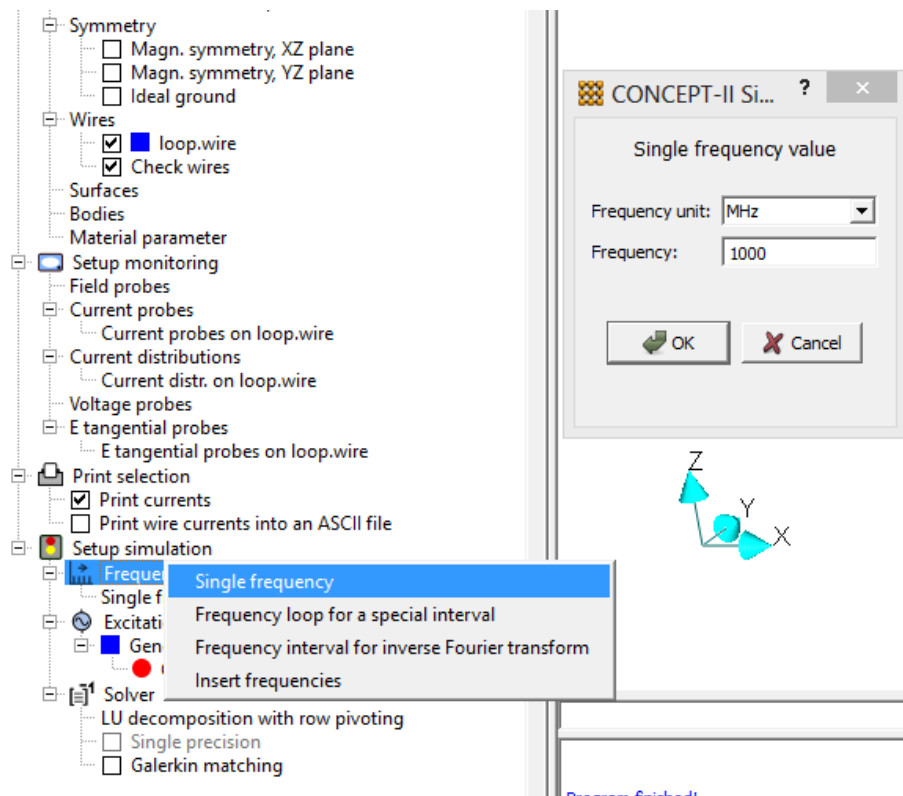




Рисунок 2.23 – Изменение частоты

После внесения изменений необходимо запустить процесс моделирования повторно, нажав на кнопку . После того как появляется сообщение об окончании вычислений в нижнем окне графического интерфейса программы появляется возможность продолжить повторную обработку результатов вычисления.

Для того чтобы вычислить двумерное распределение электромагнитного 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 проследить за тем чтобы координаты  $z$  для трех точек ( $P1$ ,  $P2$ ,  $P3$ ), описывающих область  $2D$  поле были равны нулю.

После нажатия кнопки ОК начнется процесс вычисления, по окончании которого открывается дополнительное диалоговое окно. В нем выбирается *Field(s) at phases* и рекомендуется установить шестнадцать фазовых интервалов (рисунок 2.25).

Нажав на кнопку ОК на экране графического интерфейса программы отобразится распределение поля  $H$  в двумерном пространстве 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 2.26). Поле *Delay* отвечает за скорость просмотра анимации.



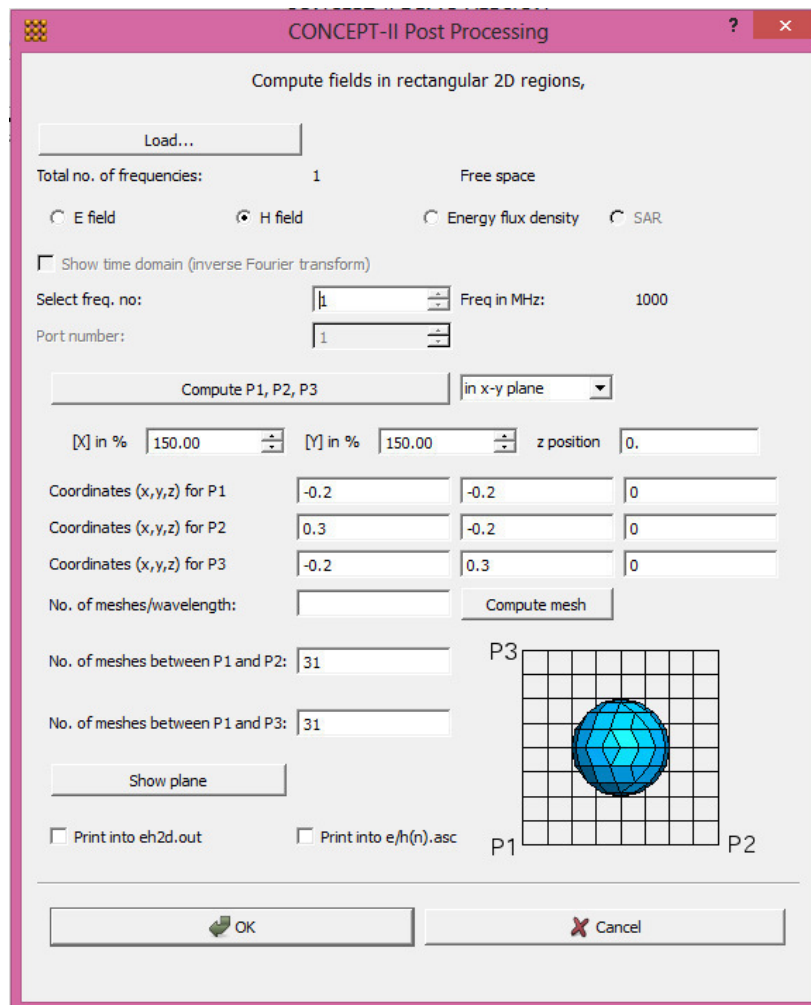


Рисунок 2.24 – Определение описываемой области

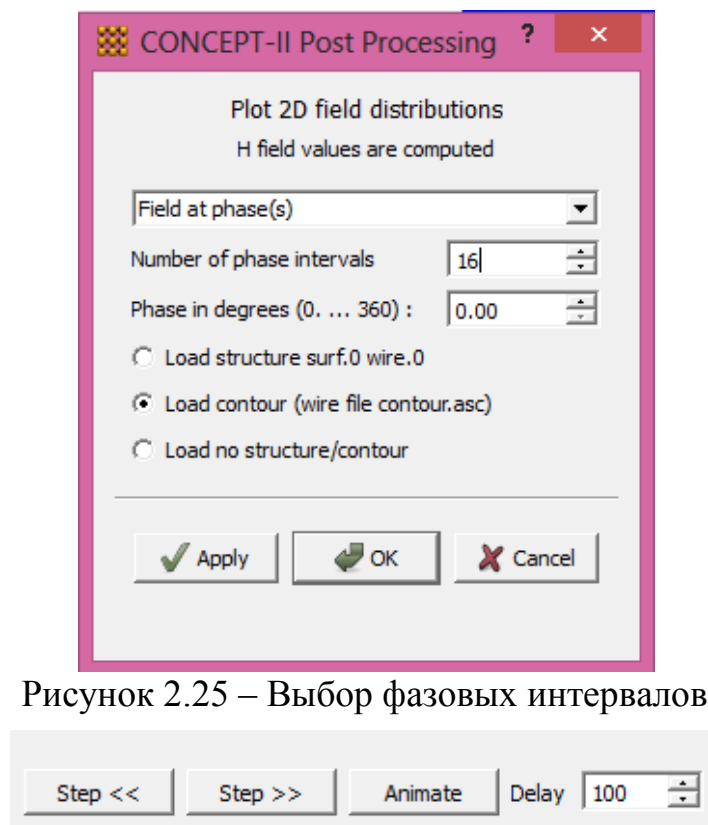


Рисунок 2.25 – Выбор фазовых интервалов

Рисунок 2.26 – Кнопки для переключения фазы

Для хорошего представления поля необходимо выполнить масштабирование, для этого на панели меню открыть вкладку *Post options* → *Arrows circles*, после чего открывается диалоговое окно, в котором нужно указать параметры в соответствии с рисунком 2.27. Далее необходимо активировать строчку «*circles*». После нажатия кнопки *OK*, на экране появляется представление поля  $H$ , как показано на рисунке 2.28. Цвета представляют величину векторов поля.

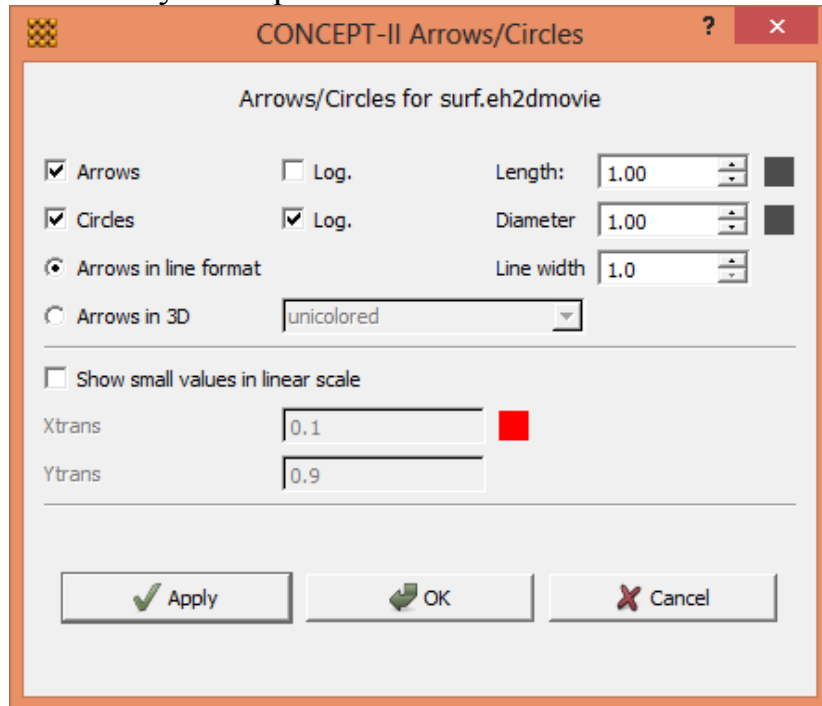


Рисунок 2.27 – Параметры для масштабирования

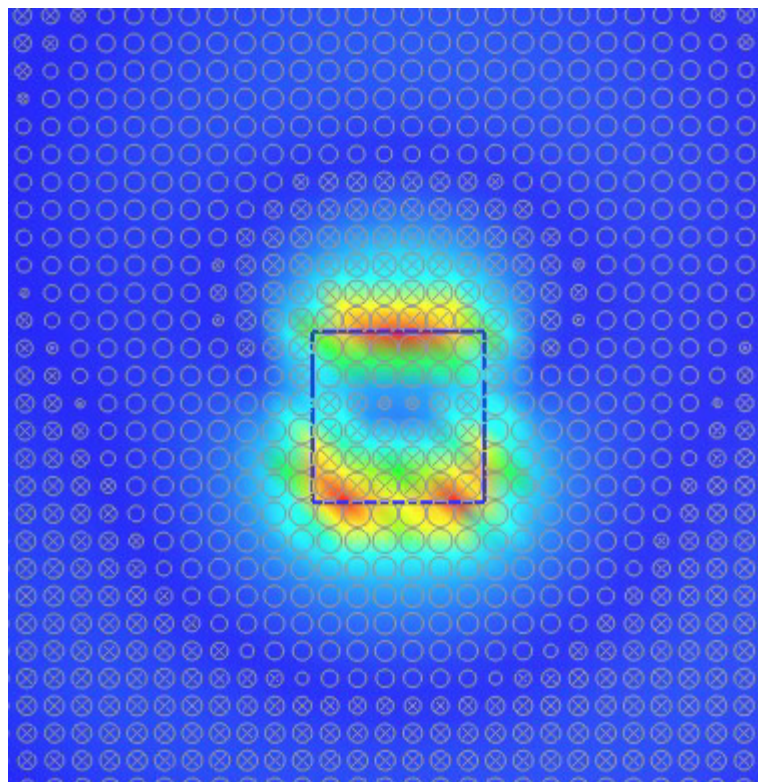


Рисунок 2.28 – Распределение поля Н на частоте 1ГГц

Необходимо активировать вкладку *Post processing* и нажать на кнопку



, после чего откроется диалоговое окно, в котором необходимо сохранить значения по умолчанию и нажать кнопку *OK* (рисунок 2.29).

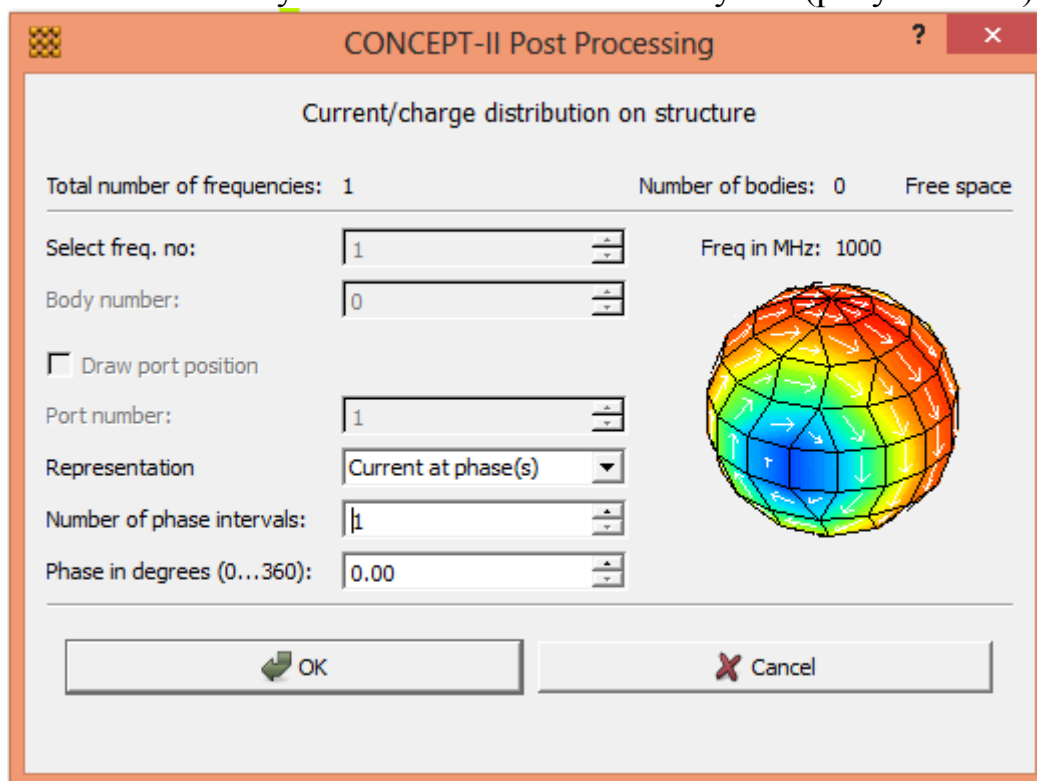


Рисунок 2.29 – Вспомогательное окно для создания графического представления распределения тока

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 (ширина равна 10). Также удобно вывести нумерацию проводов во вкладке *Post processing*, в дереве пост-обработки правой кнопкой мыши нажать на строчку *wire.0* → *Show labels*, в открывшемся окне отметить строку *Show element numbers* и нажать *OK*. В итоге на экране появится графическое представление распределения тока на частоте 1ГГц, как показано на рисунке 2.30.

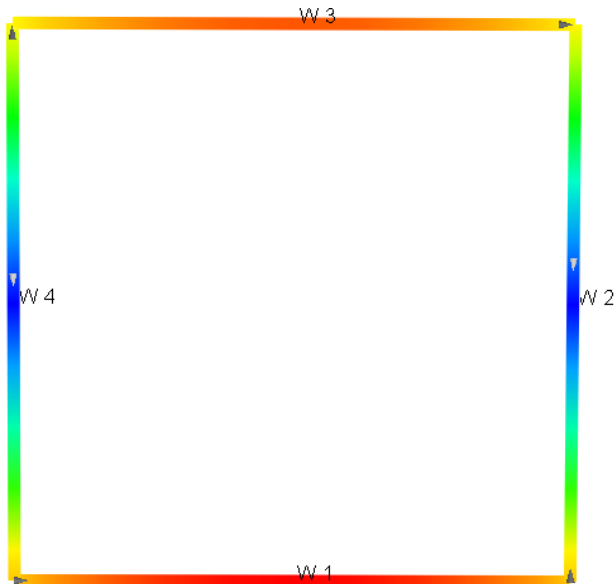


Рисунок 2.30 – Распределение тока на частоте 1ГГц

Каждый провод должен быть загружен в центре резистором в 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 2.31.

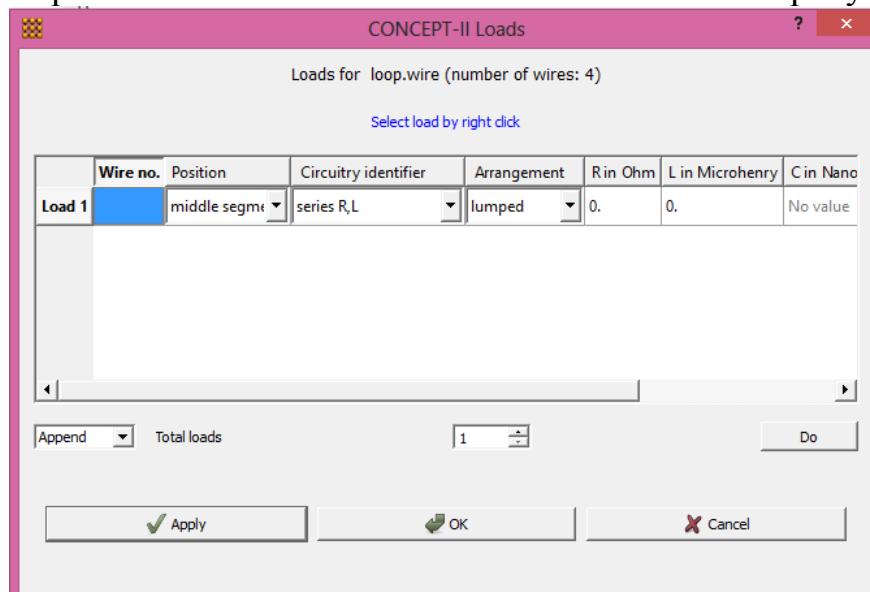


Рисунок 2.31 – Вспомогательное окно для нагрузки проводов

Для того чтобы создать нагрузку, необходимо правой кнопкой мыши нажать на провод на структуре контурной антенны, после чего в диалоговом окне появится строчка создания нагрузки, а на проводе графическое обозначение нагрузки в виде зеленого цилиндра, как показано на рисунке 2.32.

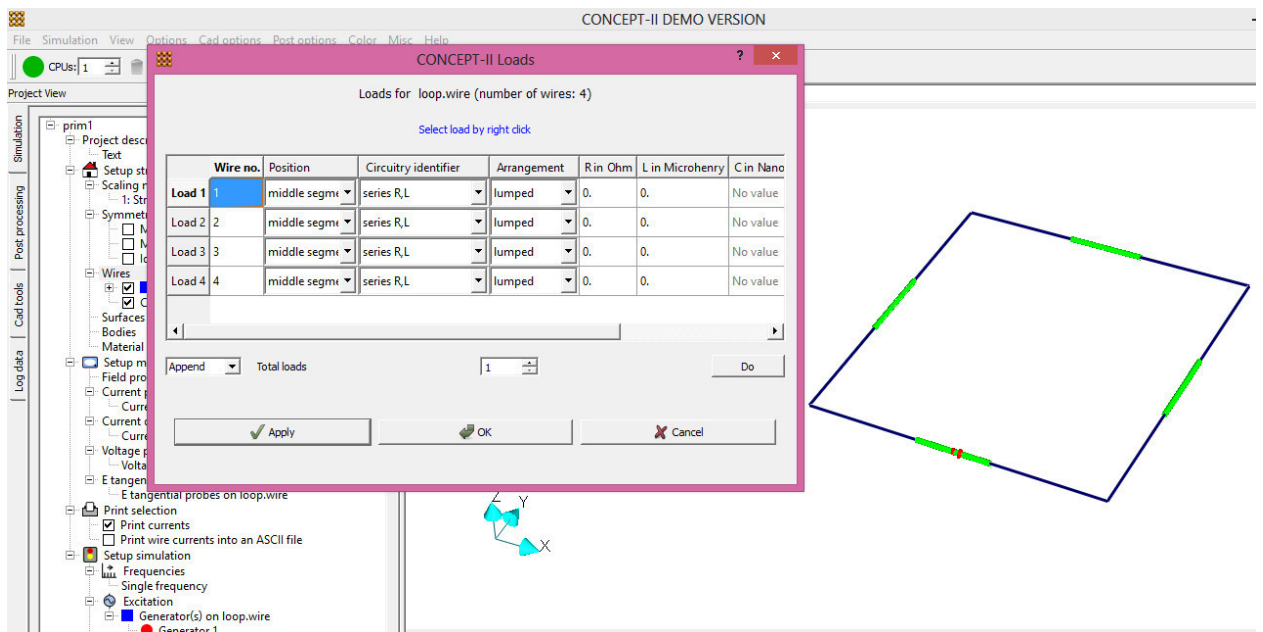


Рисунок 2.32 – Размещение сосредоточенных нагрузок на проводе

Нагрузки можно расположить не только в середине провода, но и в начале и в конце, для этого необходимо правой кнопкой мыши в окне создания нагрузок нажать на ячейку в столбце *Position* и выбрать необходимое положение, после нажать *Apply*.

Устанавливать общее значение нагрузок можно нажав правой кнопкой мыши на столбец *R in Ohm* → *Set global*, и в открывшемся диалоговом окне ввести необходимое значение. Так же 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 часть для каждой координаты поля.
- 2 Зафиксировать максимальные значения поля  $H$  для следующих значений частоты: 1 МГц, 10 МГц, 50 МГц, 100 МГц, 200 МГц, 500 МГц, 600 МГц. Результаты занести в табл. 2.5 и построить график зависимости максимального значения поля  $H$  от частоты генератора.

Таблица 2.5 – Зависимость максимального значения поля  $H$  от частоты генератора

$f$ , МГц	1	10	50	100	200	500	600
Max. magn.							

- 3 Установив напряжение генератора 10 В, частоту генератора 1 ГГц, в формате 2D визуально определить значение фазы, при котором распространение поля вдоль проводов максимально.
- 4 Не изменяя значение напряжения генератора на частоте 1 МГц, установить нагрузку на каждый провод номиналом в 100 Ом. Изменяя положения нагрузки вдоль провода установить, определить при каком положении будет максимальным распространение поля  $H$ .
- 5 В результате проделанной работы сделать выводы по каждому разделу и оформить отчет.

## 2.4 Диэлектрическая сфера

Цель работы: получение навыков электродинамического моделирования методом моментов на примере анализа рассеяния диэлектрической сферы в системе Concept-II.

### 2.4.1 Порядок выполнения работы

Исследуемой структурой является диэлектрическая сфера с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 4$ , радиусом  $R = 0.1$  м. Сфера облучается плоской волной с амплитудой 1 В/м на частоте 900 МГц (рисунок 2.33).

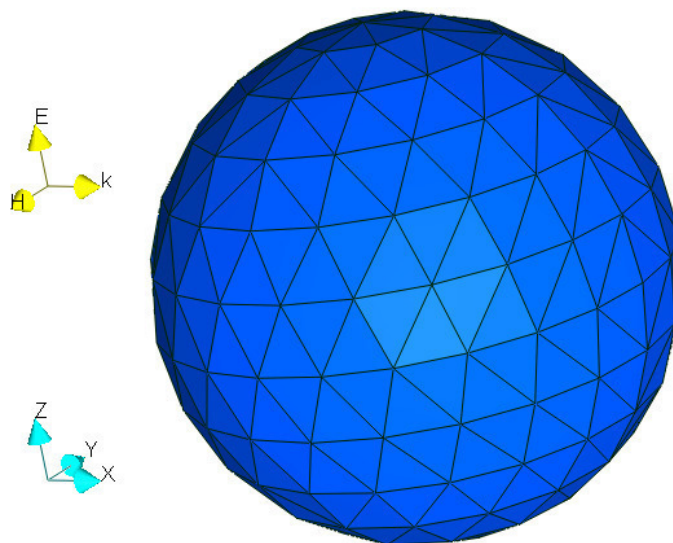



Рисунок 2.33 – Диэлектрическая сфера, помещенная в поле плоской волны

Необходимо создать электрически и геометрически симметричную фигуру, то есть, создать половину сферы, для этого необходимо открыть вкладку *Cad tools* и нажать на кнопку со значком . Откроется диалоговое окно (рисунок 2.34), в котором необходимо указать следующие параметры: радиус 0.1 м, координаты центра (0;0;0), частота 900 МГц, количество частей на длину волны 12, симметрия относительно плоскости *XZ*. Нажать кнопку ОК. На экране появится половина структуры сферы.

Открыть вкладку *Simulation*, в дереве проекта правой кнопкой мыши нажать на строку заголовка и в 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 созданной поверхности проекта (рисунок 2.35).

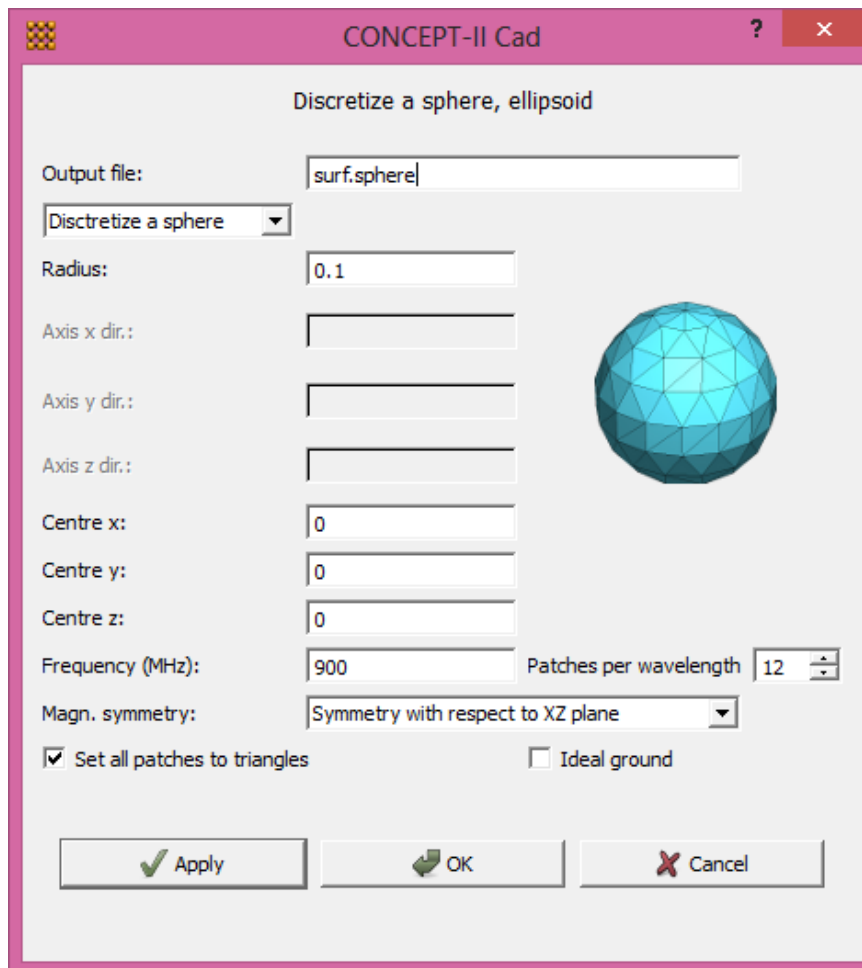


Рисунок 2.34 – Создание сферы

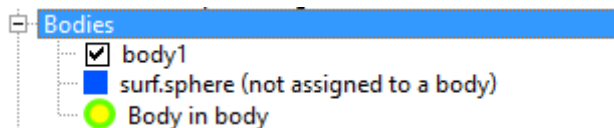


Рисунок 2.35 – Создание поверхности проекта

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*, откроется диалоговое окно, в котором необходимо ввести следующие данные: *conductivity 0*, *rel. permittivity 4*, *rel. permeability 1*. Нажать на кнопку *OK*. 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 поля плоской волны задаются нажатием правой кнопкой мыши на строку *Excitation* → *Plane wave field*, после чего откроется диалоговое окно, в котором необходимо ввести следующие параметры (рисунок 2.36):  $\theta=270^\circ$ ,  $\Phi=0^\circ$ ,  $\Psi=0$ ,  $E [V/m]: 1$ . Нажать кнопку *OK* и запустить процесс моделирования.

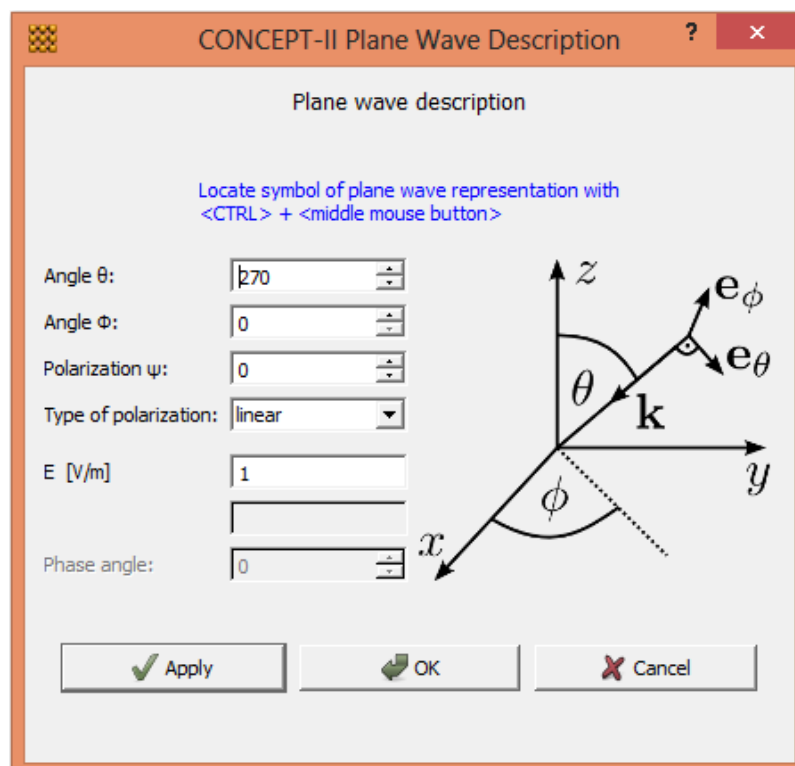



Рисунок 2.36 – Установка параметров поля плоской волны

Для просмотра распределения тока на поверхности воспользоваться инструментом со значком . В диалоговом окне использовать значения по умолчанию. Следует обратить внимание на то, что распределение тока можно наблюдать как на внешней поверхности сферы (рисунок 2.37), так и на внутренней поверхности (рисунок 2.38), изменяя номер поверхности проекта.

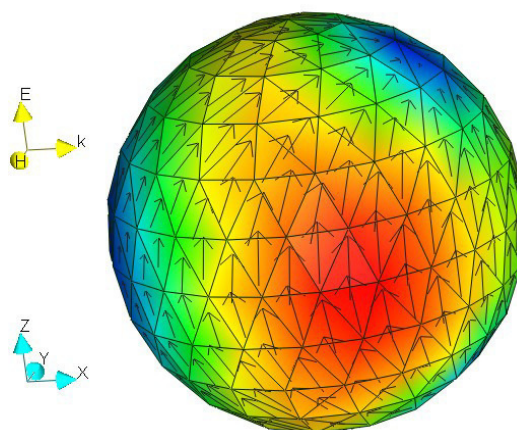


Рисунок 2.37 – Распределения поля на внешней поверхности сферы

#### 2.4.2 Задание для самостоятельного выполнения

- 1 Оценить изменение рассеяния при изменении диэлектрической проницаемости материала сферы (8–10 значений).
- 2 Отобразить графическое представление распространения поля в плоскости  $XZ$  в формате  $2D$ .



- 3 Отобразить 3D модели излучения мощности для следующих значений частоты: 300 МГц, 600 МГц, 900 МГц.
- 4 Для тех же значений частоты вывести диаграммы максимального излучения поля.
- 5 Сделать выводы по каждому разделу и оформить отчет.

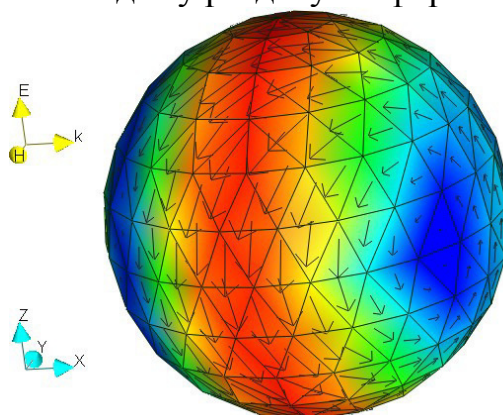


Рисунок 2.38 – Распределения поля на внутренней поверхности сферы

## 2.5 Методики анализа ЭМС печатных узлов

### 2.5.1 Методика предварительного анализа электромагнитной совместимости

Под предварительным анализом понимается качественный, а не количественный (без каких-либо оценок, имитационного моделирования или измерений) анализ.

#### 1. Выявление и уменьшение площади контуров протекания тока.

При идеальном варианте, если выделены источник и нагрузка, соединенные двумя проводниками (по которым протекают прямой и обратный токи), то эти проводники должны быть равной длины, и расположены максимально близко друг к другу, так чтобы в каждом сегменте линии из прямого и обратного проводников участок прямого тока был параллелен участку обратного тока. Примечательно, что в этом случае лучше вести обе трассы рядом на одном слое, синхронно выводя их на слой ортогональной трассировки, а в особых случаях применять печатные витые пары. Данный подход может использоваться при рассмотрении контура тока через обмотку реле и шунтирующий диод, цепи датчиков, цепи коммутации нагрузок.

#### 2. Уменьшение связи через общий импеданс.

Трассировка выводов земля-питание активных компонентов должна осуществляться так, чтобы протекание токов (как правило, больших и быстроизменяющихся) через эти выводы приводило к наименьшему изменению потенциала точек подключения других компонентов к этим цепям (рис. 2.39).

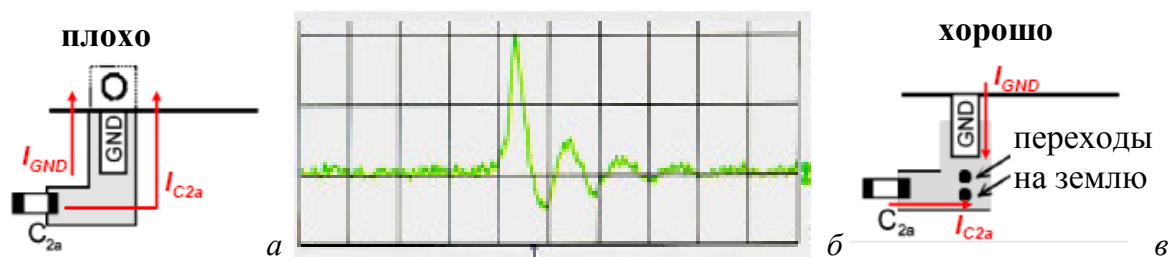


Рисунок 2.39 – Трассировка схемной земли: *а* – плохая из-за влияния тока через контакт GND полупроводникового прибора на потенциал земли (*б* – форма потенциала земли); *в* – хорошая из-за отдельных путей на схемную землю высокочастотных токов через конденсатор  $C_{2a}$  и через полупроводниковый прибор (больше сквозных металлизированных отверстий – меньше сопротивление постоянному току и индуктивность)

Общие участки схемной земли различных напряжений питания, а также аналоговых и цифровых цепей желательно минимизировать, поскольку они могут привести к неконтролируемым связям между цепями с различным питанием через общий импеданс.

**3. Выявление источников, управляемых напряжением.** Такие источники возникают, когда между двумя частями возможной антенны появляется напряжение сигнала, приводя к излучаемым эмиссиям. Например, сигнальная трасса, имеющая взаимную связь с тепловым радиатором, может возбуждать его относительно плоскости земли и всех соединенных с ней кабелей (рис. 2.40*а*). Такой процесс называют механизмом, управляемым напряжением, поскольку уровень излучаемых эмиссий прямо пропорционален напряжению сигнала. Данные проблемы устраняются лучше всего посредством создания таких условий, при которых сигнальные трассы и компоненты не могут эффективно наводить помехи на «части» антенны значительного электрического размера. Сама сигнальная трасса (даже если она электрически длинная) не будет эффективной частью антенны, пока она расположена над или под сплошной сигнальной плоскостью земли.

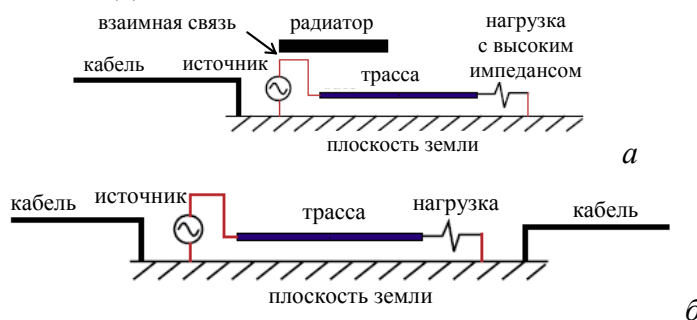


Рисунок 2.40 – Источники, управляемые напряжением (*а*) и током (*б*)

**4. Выявление источников, управляемых током.** Такие источники возникают, когда на печатной плате быстродействующие цепи расположены между двумя частями антенны (рис. 2.40*б*). Ток сигнала, протекающий в контуре «трасса-плоскость», создает напряжение между любыми двумя кабелями, соединенными с противоположными частями плоскости. Это напряжение мало по отношению к напряжению сигнала, однако всего

нескольких милливольт между двумя кабелями бывает достаточно для превышения требований к излучаемым эмиссиям. Такой процесс называют механизмом, управляемым током, поскольку уровень излучаемых эмиссий прямо пропорционален току сигнала. Если это событие произошло, то в большинстве случаев отсутствует экономичный выход из сложившейся ситуации. В основном у разработчика есть 3 варианта: уменьшить ток сигнала и/или площадь контура тока сигнала; переместить кабели или цепь так, чтобы цепь не была между кабелями; поместить плату в металлическую конструкцию и соединить экраны кабеля с этой конструкцией. Первый вариант предполагает новую трассировку, второй – новую компоновку. Третий вариант затратен, но принят к рассмотрению из-за проблемы с исходной компоновкой. Доминирующее влияние источников, управляемых током, – основная причина того, почему желательно располагать все кабельные соединители с одного края или угла печатной платы.

**5. Контроль резонансов корпуса.** В неправильно сконструированном корпусе проблемы с электромагнитными помехами могут быть связаны с резонансами, которые возникают внутри корпуса. Например, на высоких частотах гармоники сигнала могут совпадать с объемными резонансами внутри корпуса. Когда это происходит, внутри него могут создаваться большие поля и энергия может излучаться через щели и апертуры корпуса. На уровне печатных плат лучший путь устранения проблемы такого типа – пытаться ограничить поля, связанные с сигналами, которые имеют значительные гармонические составляющие выше нескольких сотен мегагерц.

**6. Влияние сигналов на вход-выход.** Компонент на плате, связанный с компонентом вне платы через соединитель, должен размещаться как можно ближе к этому соединителю. Компоненты, не подсоединенные к цепям входа-выхода, должны размещаться, по крайней мере, в 2 сантиметрах от цепей входа-выхода и соединителей. Все внеплатные связи от одного компонента должны разводиться через один и тот же соединитель. Сигнальные токи могут создавать наводки на трассы, соединенные с проводниками кабеля. Поэтому трассы к соединителям неэкранированных кабелей должны быть довольно короткими и проходить как можно дальше от высокочастотных источников. Трассы, не относящиеся к входу-выходу, не должны находиться между входными-выходными соединителями и компонентами, передающими и принимающими сигналы через данный соединитель. Трассы сигналов с высокочастотным составом не должны проходить под компонентами, используемыми для входа-выхода платы.

**7. Контроль паразитных параметров контактных площадок компонентов.** Паразитную индуктивность трассировки выводов конденсаторов и резисторов желательно уменьшать. В общем случае это можно сделать за счет уменьшения длины и увеличения ширины трасс к выводам за счет увеличения числа параллельных переходных отверстий при переходе по слоям (рис. 2.41а), а также за счет увеличения взаимной

индукции трасс с прямым и обратным токами, например за счет их сближения, причем как в участках трасс, так и в сквозных металлизированных отверстиях (рис. 2.41б).

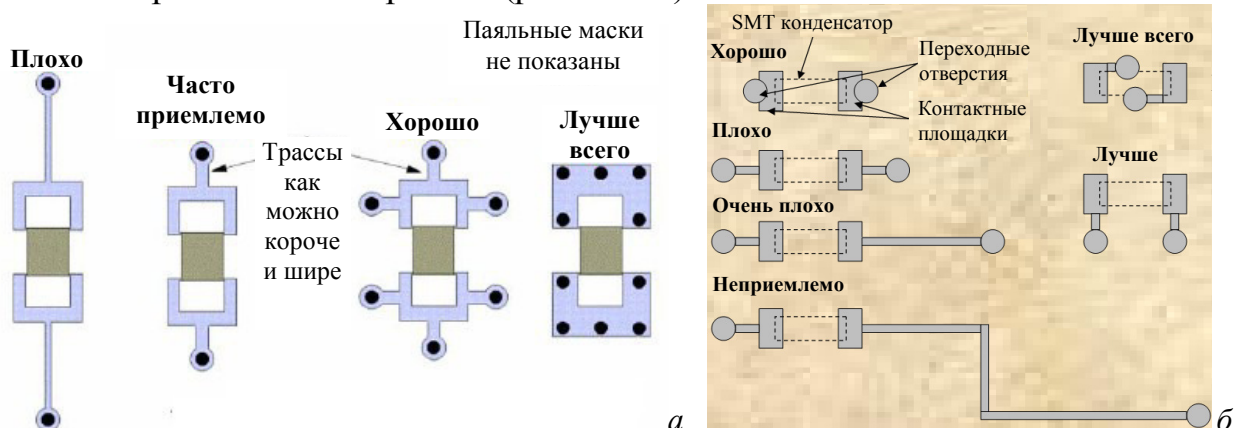


Рисунок 2.41 – Трассировка и переходные отверстия конденсаторов с акцентом на уменьшение паразитной индуктивности за счет длины (а) и расположения трасс и отверстий (б)

Паразитные емкости, всегда существующие между выходом и входом усилительных компонентов, не должны значительно увеличиваться за счет контактных площадок и трассировки на печатных платах.

**8. Цепи земля-питание.** Разводка системы земля-питание – сложная задача. Качественные рекомендации сводятся к обеспечению ее максимальной эквипотенциальности, достигающейся конструкторскими средствами, как правило, за счет уменьшения длины и индуктивности цепи земля-питание. Наилучшим вариантом для шин питания является их расширение и расположение (где это возможно) друг под другом на соседних слоях или рядом на одном слое, причем на как можно более близком к металлическому основанию слое (минимальная погонная индуктивность).

**9. Перекрестные наводки в проводниках.** Сигналы в длинных параллельных линиях различных цепей, близко расположенных друг к другу, могут создавать перекрестные наводки, причем как в начале, так и в конце линий (по отношению к источнику сигнала). Уменьшение длины линий уменьшает наводки. Наводка значительно зависит от расположения проводников, по которым протекают обратные токи, и требует моделирования конкретных конфигураций. Приближение к металлическому основанию уменьшает электромагнитные связи. Качественный анализ позволяет утверждать следующее. Расположение проводников друг под другом на соседних слоях (лицевая связь), как правило, дает самую большую наводку. При расположении проводников на одном слое (боковая связь) наводка, как правило, меньше, чем в первом случае, и уменьшается с ростом расстояния между проводниками. Причем это уменьшение тем сильнее, чем ближе трассы к плоскости земли.

**10. Распределение контактов соединителей.** Соединители в ЭМС всегда рассматриваются как место возможной эмиссии помех от платы или наоборот. Связано это, как правило, с нарушением близкого расположения

проводников прямого и обратного токов (для нечетной моды), а также с несоблюдением симметрии их расположения по отношению к корпусной земле (для четной моды).

## 2.5.2 Методика анализа целостности сигнала печатной платы в системе TALGAT

1. Выполнить импорт печатной платы в TALGAT.
  - 1.1. Сохранить ПП в формате Altium/Protel 99.
  - 1.2. На основе команд модуля TLPCB выполнить импорт ПП в TALGAT.
2. Выполнить моделирование распространения электрических сигналов в межсоединениях ПП на основе квазистатического подхода.
  - 2.1. Вычислить матрицы погонных параметров отрезков многопроводных линий передачи.
    - 2.1.1. Построить поперечные сечения фрагмента ПП, используя команды модуля MOM2D.
    - 2.1.2. Выполнить сегментацию поперечного сечения по критерию, чтобы на торце проводников было не менее 3-х подынтервалов.
    - 2.1.3. Вычислить матрицы погонных параметров **L**, **R**, **C**, **G**.
    - 2.1.4. Для получения более точных (с учетом дисперсии) результатов вычислить матрицы **C** и **G** с учетом частотной зависимости параметров материалов диэлектриков.
    - 2.1.5. Для рассматриваемого фрагмента на основе полученных матриц **L**, **C**, **G**, **R** вычислить: матрицу характеристических импедансов; погонные задержки мод; коэффициенты ёмкостной и индуктивной связей.
  - 2.2. Вычислить параметры трехмерных неоднородностей.
    - 2.2.1. Построить модели неоднородности, используя команды модуля MOM3D.
      - 2.2.1.1. Аппроксимировать неоднородность прямоугольниками, ориентированными ортогонально осям декартовых координат.
      - 2.2.1.2. Выполнить сегментацию модели.
      - 2.2.1.3. Вычислить емкость неоднородности для контактных площадок и посадочных мест компонентов, переходных отверстий.
  - 2.3. Вычислить отклик схемы многопроводной линии передачи на заданное воздействие.
    - 2.3.1. Задать параметры: временной шаг (TRANSIENT\_ANALYSIS\_SETUP "step\_time"); число отчетов на период повторения импульсов для алгоритмов БПФ (TRANSIENT\_ANALYSIS\_SETUP "count\_degree").
    - 2.3.2. Построить эквивалентную схему, используя команды модуля RESPONSE.
    - 2.3.3. Задать параметры входных воздействий.

- 2.3.4. Используя команду T\_RESPONSE, вычислить временные и частотные отклики.
- 2.4. Вывести полученные результаты, используя команды модуля GRAPH.

## 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, №2, p.136–149.
- 3 Учебный центр компании «Родник» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.rodnik.ru/htmls/f\\_1\\_7.htm](http://www.rodnik.ru/htmls/f_1_7.htm). (дата обращения 01.06.2016).
- 4 Геворкян, В.М. Электромагнитная совместимость электронных информационных систем. В 2 ч. Ч.2. Электромагнитная совместимость систем цифровой обработки и передачи данных : учебное пособие по курсу "Электромагнитная совместимость информационных систем" по направлению "Информатика и вычислительная техника", специализации "Системы цифровой обработки сигналов" / В. М. Геворкян ; Ред. Ю. А. Казанцев ; Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ) . – М. : Издательский дом МЭИ, 2007 . – 308 с.
- 5 Demo-Version| Institut [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tet.tuhh.de/concept/demo-version/> (дата обращения 01.06.2016).
- 6 Gnuplot homepage [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gnuplot.info/>(дата обращения 01.06.2016).
- 7 Жобава Р.Г. Адаптивная схема Метода Моментов в применении к задачам электромагнитной совместимости. // EDA Express, №12, 2005, с. 14–19.
- 8 Газизов, Т.Р. Итерационные методы решения системы линейных алгебраических уравнений с плотной матрицей. / С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов // – Томск: Томский государственный университет, 2007.
- 9 [http://elcut.ru/publications/publications\\_index.php](http://elcut.ru/publications/publications_index.php).
- 10 Гончаров В.А. Методы моделирования электромагнитных полей в вычислительных средах. // Научный электронный архив. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://econf.rae.ru/article/5166> (дата обращения: 17.06.2016).
- 11 ELCUT. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. //Санкт-Петербург, 2015.
- 12 Воронин А.В. Применение программного пакета Elcut для моделирования потенциальных электрических полей: учебно-методическое пособие // Гомель: БелГУТ, 2010 – 70с.
- 13 Djordjevic A.R. Analysis of time response of lossy multiconductor transmission line networks / A.R. Djordjevic, T.K. Sarkar // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1987. – Vol. MTT-35. – P. 898–908.
- 14 Tesche F.M. Application of multiconductor transmission line network

- analysis to internal interaction problems / F.M. Tesche, T.K. Liu // *Electromagnetics*. – 1986. – Vol. 6, № 1. – P. 1–20.
- 15 Achar R. Simulation of high-speed interconnects / R. Achar, M.S. Nakhla // *Proceedings of the IEEE*. – 2001. – Vol. 89, № 5. – P. 693–728.
  - 16 Djordjevic A.R. Time-domain response of multiconductor transmission lines / A.R. Djordjevic, T.K. Sarkar, R.F. Harrington // *IEEE Proceedings*. – 1987. – Vol. 75, No. 6. – P. 743–764.
  - 17 Джонсон Г. Высокоскоростная передача цифровых данных: высший курс черной магии. Пер. с англ. / Г. Джонсон, М. Грэхем. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 1024 с.
  - 18 Wideband Frequency-Domain Characterization of FR-4 and Time-Domain Causality / A.R. Djordjevic, M.B. Radivoje, D.L. Vladana, T.K. Sarkar // *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* – 2001. – Vol. 43, №4. – P. 662–667.
  - 19 MIL-STD-461F, Department of Defence Interface Standard, Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. 10 December 2007.
  - 20 Archambeault B. The Ground Myth / B. Archambeault // *Workshop Proc. IEEE EMC 2012 Symp.* – P. 1–85.