

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 19.08.2024 14:43:15  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e94d1a4860f1e39418a

**МИНОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи



## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине  
«Электромагнитная совместимость электронных средств»  
для студентов направления подготовки бакалавров 11.03.03  
«Конструирование и технология электронных средств»

Курск 2016

УДК 621.382

Составитель: Е.М. Терещенко

Рецензент: профессор кафедры ИСиТ ЮЗГУ

Кандидат технических наук

В.А.Шлыков

**Электромагнитная совместимость электронных средств:** методические указания по выполнению практических работ по дисциплине «Электромагнитная совместимость электронных средств» / Юго-Зап. гос. унт.; сост.: Е.М. Терещенко Курск, 2016. 90с.: ил. . прил. . Библиогр. с.90.

Методические указания по выполнению практических работ содержат краткие теоретические сведения и порядок выполнения практических заданий по исследованию методов расчета электромагнитной совместимости электронных средств.

Методические указания полностью соответствуют требованиям учебного плана направления подготовки 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», а также рабочей программы дисциплины «Электромагнитная совместимость электронных средств».

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств».

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60 x 84 1/16.  
Усл. печ. л. 0,7. Уч.-изд. л. 0,64. Тираж 30 экз. Заказ . Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

# 1. Введение

## 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. ). 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) - 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>2</sup> - любое электромагнитное явление, которое может ухудшить качество функционирования технического средства<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> Часть терминов изменена и исключена. В общем, электромагнитная обстановка зависит от времени и для ее описания может требоваться статистический подход.

---

IEC 60050-161:1990 International electrotechnical vocabulary - Chapter 161: Electromagnetic compatibility (MOD)

<sup>2</sup> Электромагнитная помеха может быть электромагнитным шумом, нежелательным сигналом или изменением в среде распространения.

<sup>3</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>4</sup> - нежелательное отклонение рабочих характеристик технического средства от требуемых. Помехоустойчивость ТС, устойчивость ТС к ЭМП (immunity to a disturbance) - способность ТС сохранять заданное качество функционирования при воздействии на него внешних помех с регламентируемыми значениями параметров.

Электромагнитная восприимчивость (electromagnetic susceptibility) -Неспособность технического средства функционировать без ухудшения качества при наличии электромагнитных помех.

Электростатический разряд, ЭСР (electrostatic discharge, ESD) - перенос электростатического заряда между телами, электростатические потенциалы которых отличаются друг от друга, при их сближении или непосредственном контакте.

Эмиттер ЭМП (emitter of electromagnetic disturbance) - техническое средство, вызывающее возрастание напряжений, токов или электромагнитных полей, которые могут действовать как электромагнитные помехи.

Восприимчивое к ЭМП ТС (susceptible device) - техническое средство, функционирование которого может быть ухудшено при воздействии электромагнитной помехи.

Кондуктивная (conducted disturbance) - ЭМП, энергия которой передается по одному или нескольким проводникам. Излучаемая ЭМП (radiated disturbance) - ЭМП, энергия которой передается в пространстве в виде электромагнитных волн.

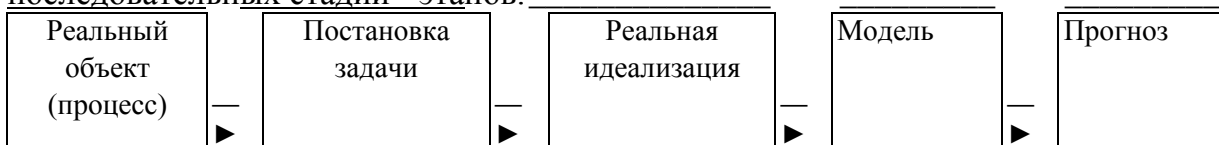
## 1.2 Моделирование электромагнитной совместимости

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

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

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

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



Проверка адекватности принимаемых решений на каждом этапе

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:

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

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

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

- Неустраняемая погрешность, возникающая на первом этапе за счет неточности исходных данных. Как показывает название, эта погрешность не может быть устранена на последующих этапах, однако она может существенно увеличиваться при решении так называемых некорректных задач.
- Погрешность математической модели, возникающая на втором этапе вследствие неполной адекватности используемой модели реальному физическому объекту или процессу.
- Погрешность метода, возникающая в результате дискретизации задачи. Вычислительная погрешность, возникающая на этапах 4 и 5 в связи с конечной точностью представления чисел и конечным числом операциями над ними.

Решение задачи компьютерного анализа сложных структур, например полосковых, линий передачи СВЧ и пр. возможно на основе следующих подходов - схемотехнического, электродинамического и квазистатического, в рамках которых применяются численные, аналитические и комбинированные методы. Схемотехнический 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 ( $\ll \lambda/10$ ). 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 двухмерной 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.

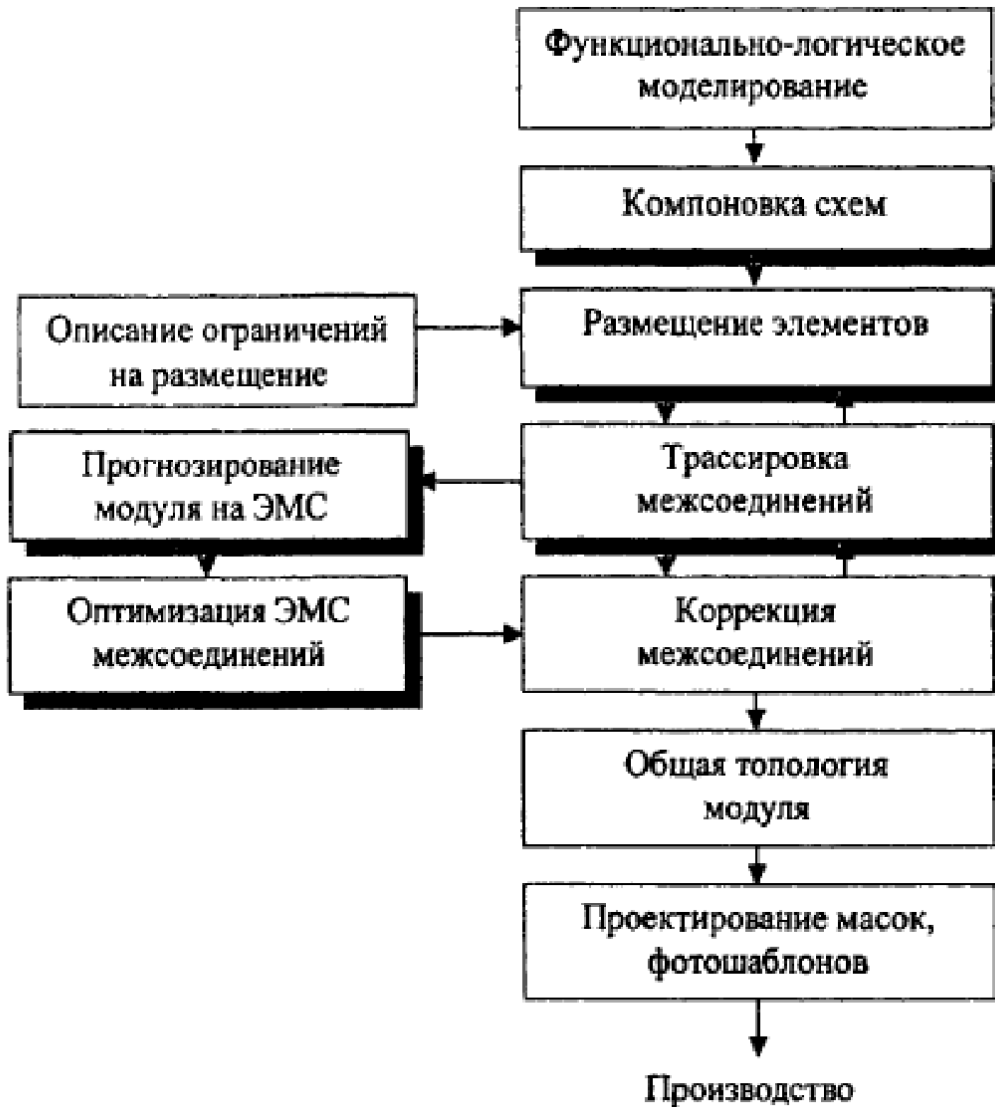


Рисунок 1.2 - Процесс проектирования электронного средства с учетом ЭМС

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2.

### 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).

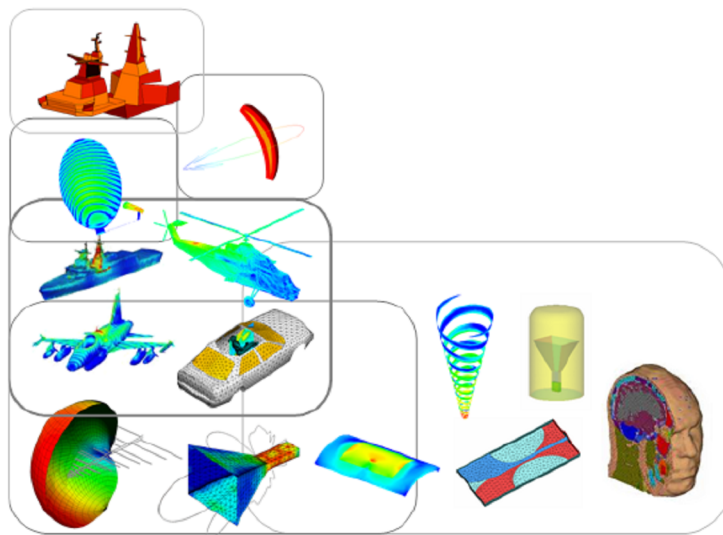


Рисунок 1.3 – Спектр задач электродинамического анализа

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 приближенны, но применимы к произвольным структурам. Кроме того, они могут выполняться с заданной точностью, что, при учёте сделанных допущений, вполне удовлетворительно в большинстве практических приложений. Один из самых известных и разработанных численных методов решения задач вычисления электромагнитного поля является метод моментов (МоМ).

Метод моментов является наиболее часто используемым методом моделирования при исследовании задач ЭМС. В частности, он удобен для внешних задач (открытых геометрий) и для нескольких различных линейных и однородных сред. Метод моментов очень подходит для гибридизации с аналитическими и численными процедурами, такими как GTD/UTD (геометрическая теория дифракции/однородная теория дифракции (ОТД)). При объединении с аналитическими методами, например на основе теорий линий передачи, можно решить много сложных задач, например точное и надёжное вычисление высоких значений эффективности экранирования или 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

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

где  $[L]$  является матрицей

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Для любого численного метода важно выяснить вопросы, связанные с его сходимостью, скоростью сходимости и точностью, которые для метода моментов зависят от оператора  $\mathbf{L}$ , базисных функций  $f_i$ , весовых функций  $w_i$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) и их числа  $N$ .

Эффективность приложения метода для получения результата с заданной точностью определяется, в конечном счёте, затратами времени и памяти компьютера. Если пока не рассматривать задачу синтеза, а ограничиться задачей одновариантного анализа, то для метода моментов решение сводится к следующим шагам:

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

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

Решение задачи возбуждения среды осуществляется с помощью аппарата тензорных функций Грина. После того как задача возбуждения решена, и электрическое поле найдено, на него накладываются граничные

условия на металлических элементах. Последнее условие используется для определения эквивалентных токов. Важным моментом решения является разбиение поверхности металла на элементарные площадки и аппроксимация электрического тока в пределах площадки. Пример разбиения приведен на рис. 1.4.

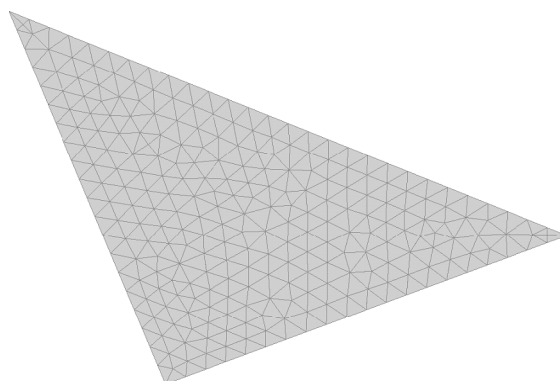


Рисунок 1.4 – Поверхность, разбитая на элементарные площадки

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.

## Практическое занятие №3

### 3.1 Проектирование полосковой линии

Данная работа содержит информацию, необходимую для построения конфигурации полосковой структуры (рис. 1.5) 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).

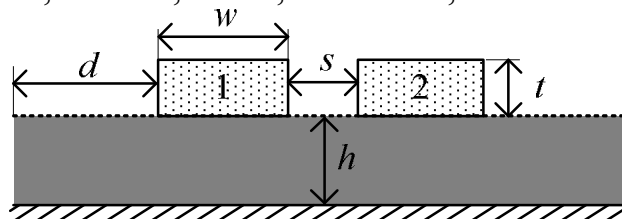


Рисунок 1.5 – Связанная микрополосковая линия  
(1, 2 – проводники)

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 двухмерных и трехмерных структур проводников и диэлектриков; электродинамического анализа произвольных трехмерных структур из проводов с RLC-нагрузками; вычисления временного и частотного откликов произвольных схем из отрезков многопроводных линий передач; структурно-параметрической оптимизации с указанными видами анализа.

Структурная схема системы приведена на рис. 1.6. Клиенты системы – модули пользовательского интерфейса. Ядро системы – TLCORE. Вычислительные модули: MOM2D – двухмерный 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.



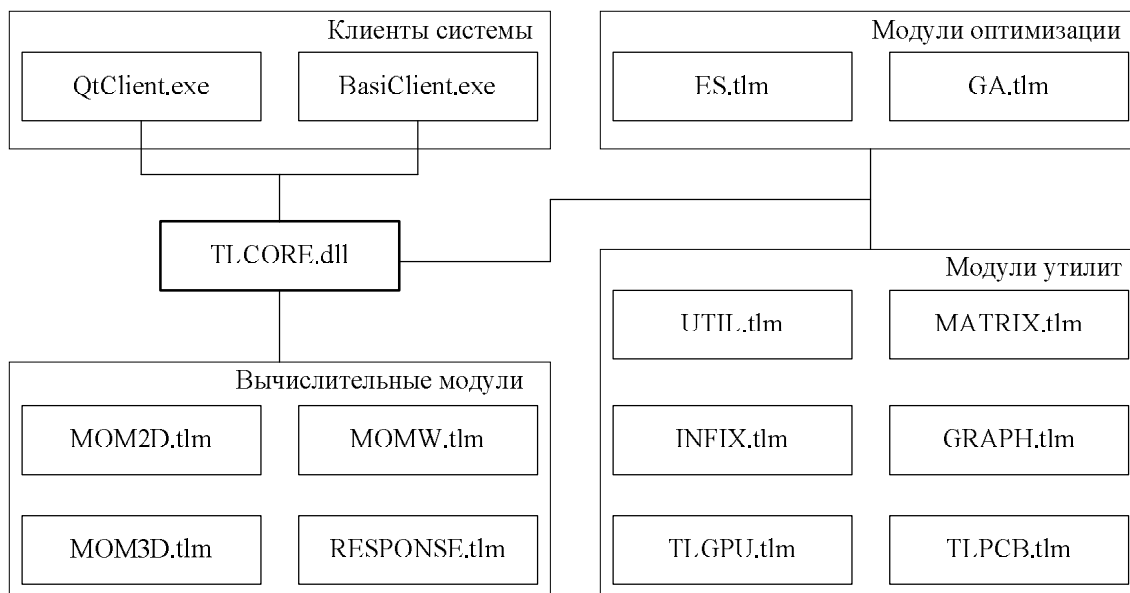


Рисунок 1.6 – Структурная схема системы TALGAT

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. 1.7).

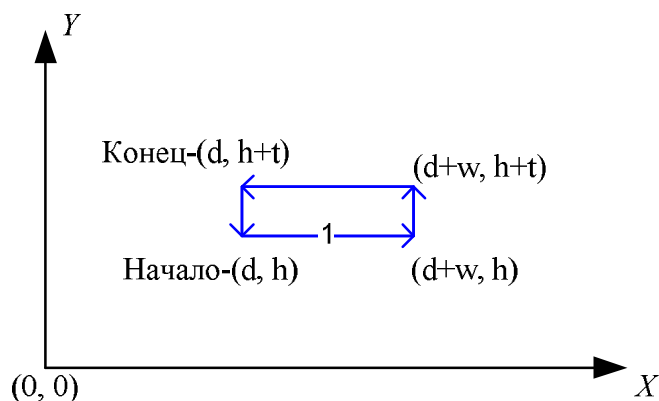


Рисунок 1.7 – Последовательность создания границ проводника с помощью линий

Поясним особенности использования арифметических операций.

Сложение:

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

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

С помощью описанных команд и рис. 1.7 создать первый проводник. Второй проводник создается аналогичным образом.

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

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

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

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

Для отображения созданной конфигурации предназначена команда:

**DRAW\_CONFIGURATION "имя конфигурации"**

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

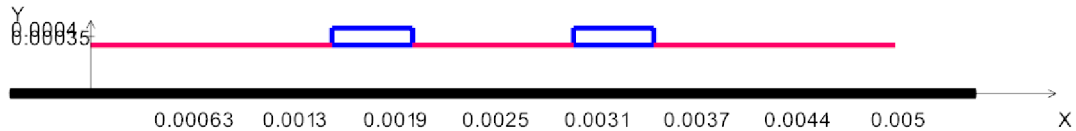


Рисунок 1.8 – Вид связанной микрополосковой линии в системе TALGAT (синий цвет – проводниковые границы, красный – диэлектрические границы)

### 3.2 Расчет полосковой линии

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

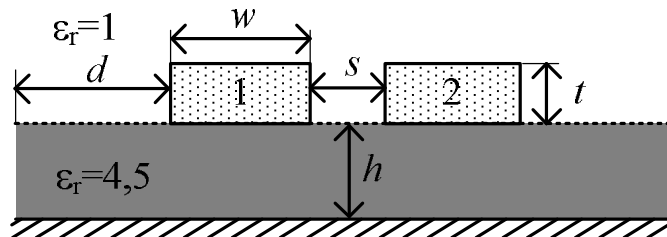


Рисунок 1.9 – Связанная линия и её параметры

Для задания автоматической сегментации необходимо воспользоваться командой (команду ввести до создания проводников и диэлектриков): **SET\_AUTO\_SEGMENT\_LENGTH** длина подынтервала или с помощью уже заданных параметров структуры, например **SET\_AUTO\_SEGMENT\_LENGTH DIV t 2**. (Второй вариант предпочтителен, поскольку 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. 1.10. Так, **SET\_ER\_PLUS** находится справа по направлению стрелки, **SET\_ER\_MINUS** слева.

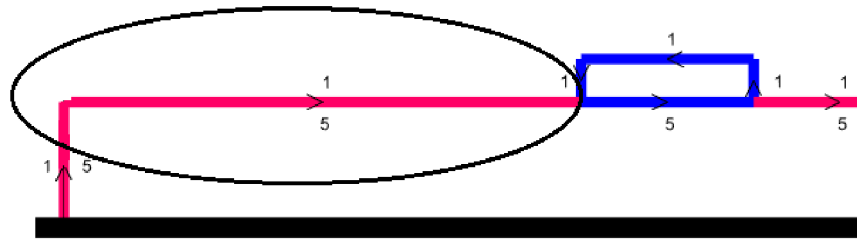


Рисунок 1.10 – Для задания относительной диэлектрической проницаемости  
 Чтобы отобразить значения относительной диэлектрической проницаемости в открывшемся окне с построенной структурой необходимо нажать клавишу E. Пример создания слоя диэлектрика выглядит следующим образом:

```
DIELECTRIC
SET_ER_PLUS 5.
SET_ER_MINUS 1.
LINE 0. h MUL 3. w h
LINE MUL 4. w h PLUS s MUL 4. w h
LINE PLUS s MUL 5. w h PLUS MUL 8. w s h
```

Аналогичным образом прорисовываются все линии.

После выполнения скрипта в новом окне отобразится структура, показанная на рис. 1.11.

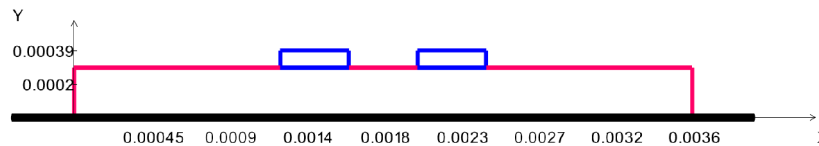


Рисунок 1.11 – Вид связанной полосковой линии в системе TALGAT

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

Для того чтобы вычислить значение матриц используются команды:

```
ECHO Cmn
SET "smn" SMN_C conf_ig
ECHO TO_STRING CALCULATE_C smn conf_ig
ECHO Lmn
SET "smn" SMN_L conf_ig
ECHO TO_STRING CALCULATE_L smn conf_ig
```

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

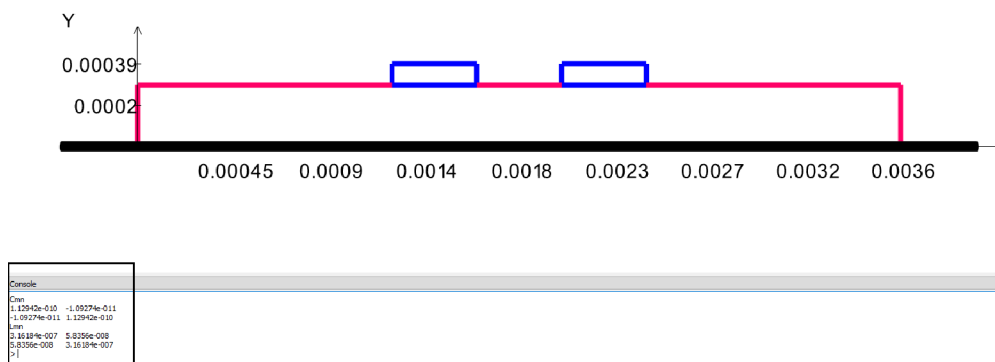



Рисунок 1.12 – Вывод результатов расчета

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. 1.13).

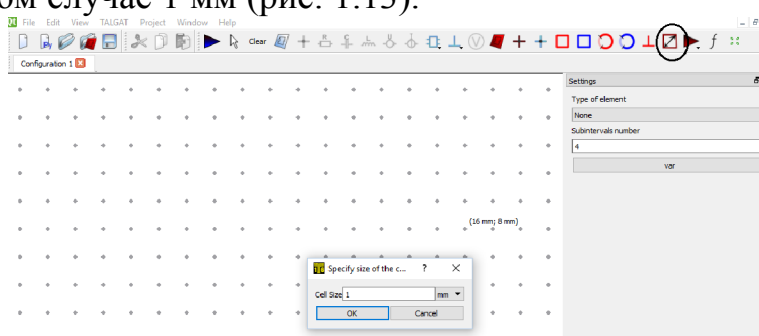



Рисунок 1.13 – Задание размера ячеек для рисования

Далее нужно задать бесконечную землю с помощью инструмента . После этого с помощью специальных инструментов, представленных на панели, создается требуемая конфигурация. Пример показан на рис. 1.14.

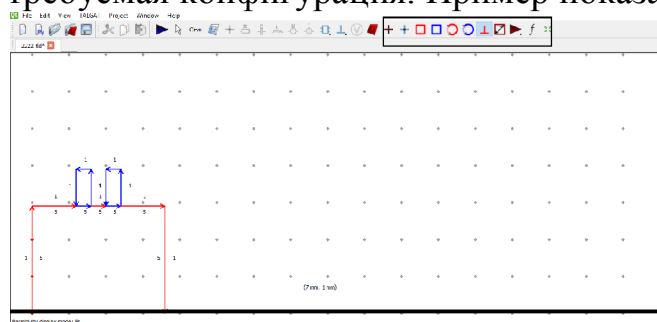


Рисунок 1.14 – Создание структуры с помощью «Конфигуратора»

Если нужно изменить размеры структуры, для этого требуется выделить отрезок и задать координаты по x, y и указать относительную диэлектрическую проницаемость (рис. 1.15).

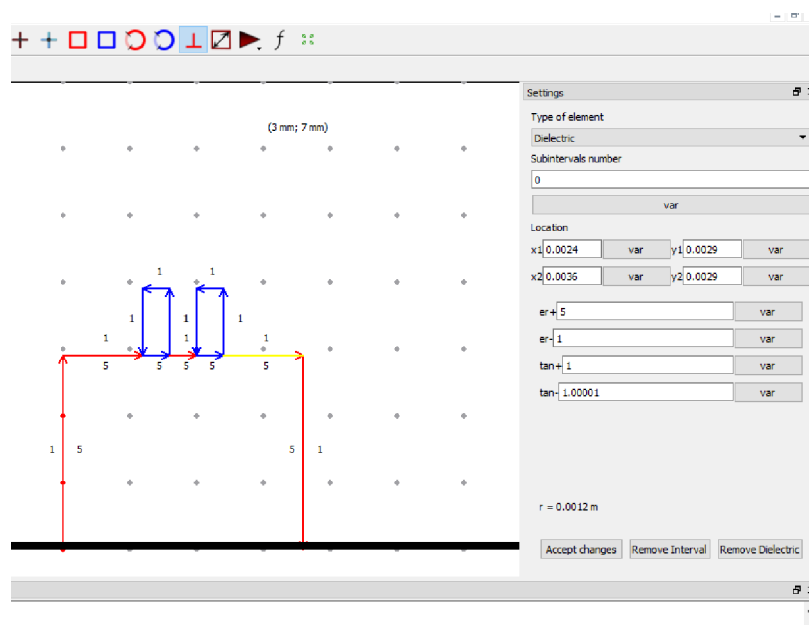


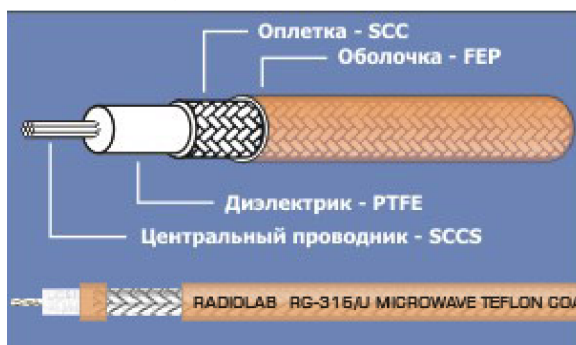
Рисунок 1.15 – Редактирование структуры

Далее необходимо запустить программу, после чего можно проанализировать результаты.

### 3.3 Расчет волнового сопротивления коаксиального кабеля

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

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



SCCS – посеребренная омедненная сталь.

PTFE – фторопласт.

SCC – посеребренная медь.

FEP – экструдированный тефлон.

Рисунок 1.16 – Конструкция RG-316U

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

## Практическое занятие №4

### 4.1 Оценка влияния сегментации структуры на точность вычислений

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

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

На рис. 1.20 приведено поперечное сечение микрополосковой линии.

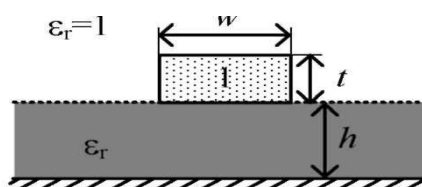


Рисунок 1.20 - Поперечное сечение микрополосковой линии

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

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

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

Для реализации вычислений, 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. Подпрограмма-функция должна содержать заголовок и оператор окончания. Заголовок идет в первой строке, начинается оператором *function*, затем указываются имена выходных переменных перечисляя их в квадратных скобках. Затем, после знака равенства и имени функции 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 мантиссой и порядком при вводе могут служить символы `e`, `E`, `d`, `D`. Разделителем между целой и дробной частями числа служит символ «точка». Запись -5,2 соответствует двум выражениям (-5 и 2). В среде Scilab не делается различия между целыми и вещественными числами, поэтому при создании переменных нет необходимости указывать их тип, как принято, например в C/C++.

С помощью описанного выше синтаксиса Scilab необходимо реализовать функцию `microstrip`, вычисляющую волновое сопротивление микрополосковой линии. После чего требуется реализовать аналогичное вычисления волнового сопротивления микрополосковой линии в системе TALGAT, с теми же параметрами. Затем учащая сегментацию, начиная от самой грубой (длина подынтервала равна ширине проводника), оценить ее влияние на точность вычислений, сравнивая с результатами согласно формулы (1).

## 1.8 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 приближенны, но применимы к произвольным структурам. Кроме того, они могут выполняться с заданной точностью, что,



при учёте сделанных допущений, вполне удовлетворительно в большинстве практических приложений.

Следует отметить большое разнообразие математических методов, которые используются в программах электродинамического моделирования. Среди них имеются прямые методы решения граничных задач, например, 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. 1.21). 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. 1.22).

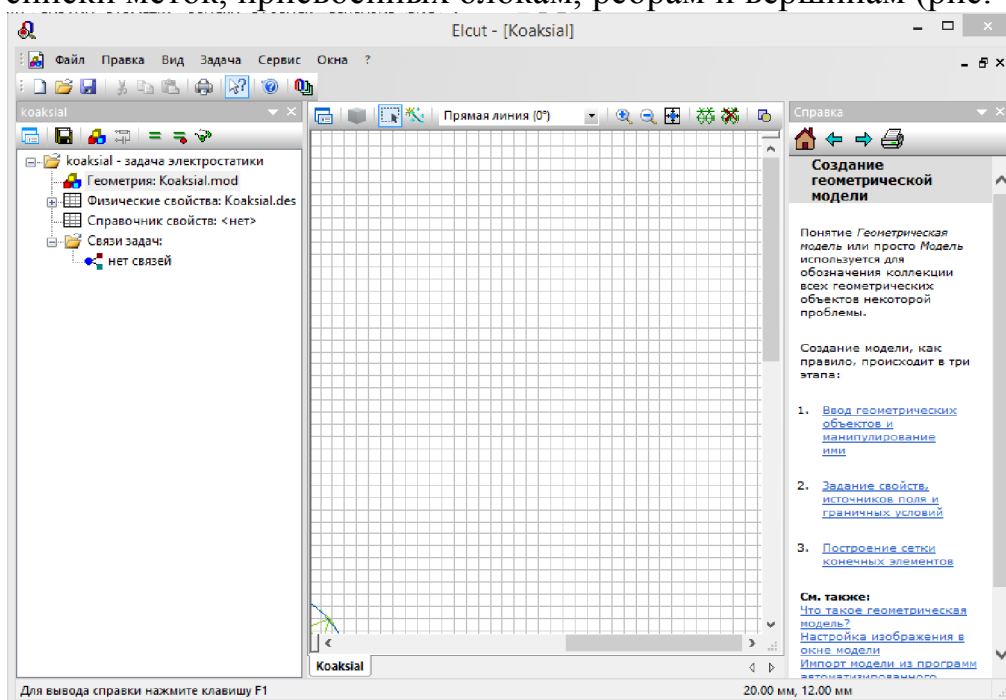










Рисунок 1.21 - Главное меню и панель инструментов Elcut

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.

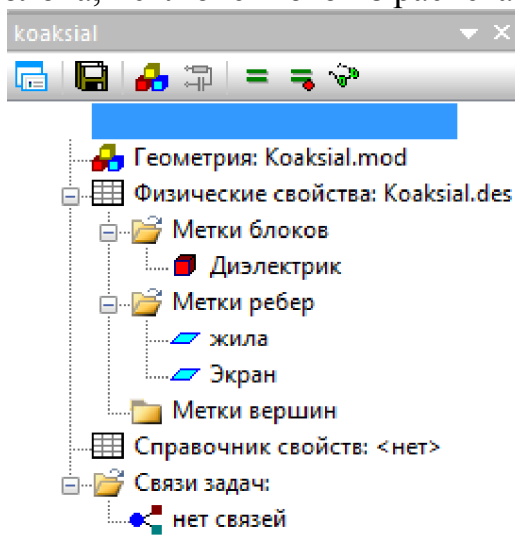


Рисунок 1.22 – Дерево задачи

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. 1.23).

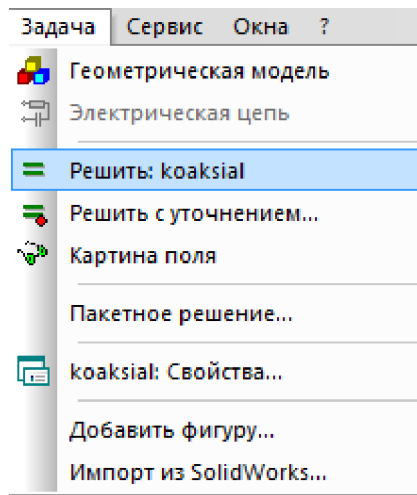


Рисунок 1.23 – Вкладка задача

Программа дает возможность представить решение задачи несколькими способами:

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

## 4.2 Микрополосковая линия

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. 1.24.

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  $U=0В$ . Остальные размеры (в миллиметрах) приведены на рис. 1.24.



Рисунок 1.24 – 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. 1.25). Ребро AD необходимо при этом совместить с вертикальной осью.

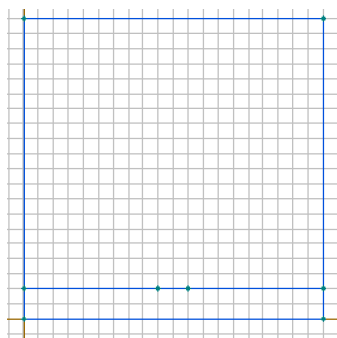


Рисунок 1.25 - Геометрическая модель структуры.

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


Также второму блоку необходимо присвоить метку Воздух. Аналогичным образом метки присваиваются ребрам. Для одновременного выделения ребер, образованных вершинами А, В, С, 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. 1.26).

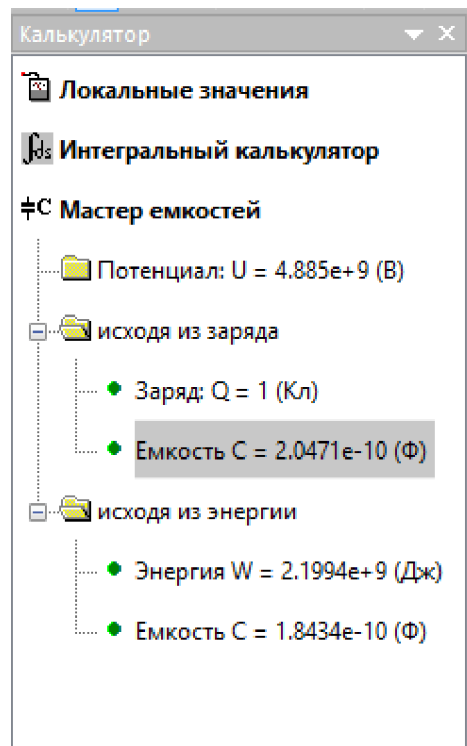


Рисунок 1.26 – Окно калькулятора

### 4.3 Двухпроводная линия передачи

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

Расчеты выполнить в системах Elcut и TALGAT. Структура линии приведена на рис. 1.27.

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: 10x30 мм. Расстояние между проводниками: 20 мм. Толщина диэлектрика: 10 мм. Относительная диэлектрическая проницаемость воздуха  $\epsilon_0=1$ . Относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика  $\epsilon=2$ .

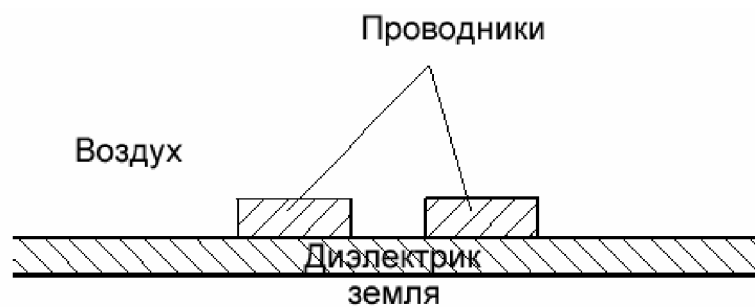



Рисунок 1.27 – Двухпроводная линия передачи

Для решения теоретически бесконечной задачи удобно определить область расчета как прямоугольник, достаточно большой (например, 24x40 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 (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**). 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.

#### 4.4 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-

## Практическое занятия 5

### 5.1 Электродинамическое моделирование ЭМС 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. 1.28).

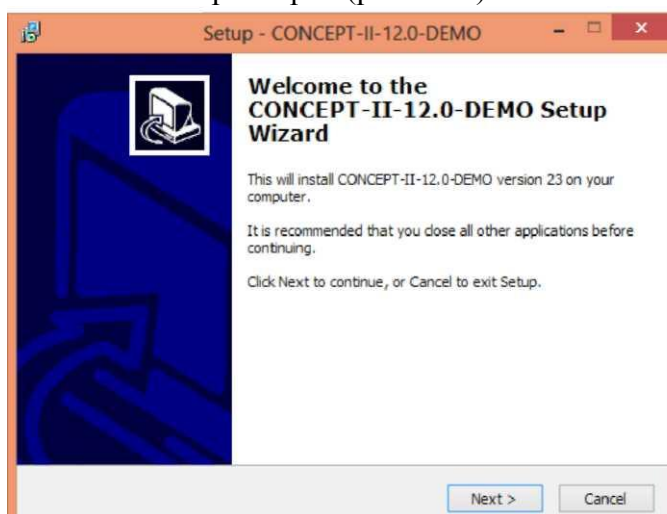


Рисунок 1.28 - Окно установки программы Следующим этапом является расширение пути, для этого необходимо открыть папку «Мой компьютер», правой кнопкой мыши открыть свойства. Открываем вкладку «Дополнительные параметры системы» — «Переменные среды». Далее выбрать пункт "Path" в системных переменных и нажать «Изменить». Путь необходимо продлить символом «;» и прописать путь нахождения программы CONCEPT-II «C:\Program Files (x86)\gnuplot\bin»

(рис. 1.29). Нажать ОК.

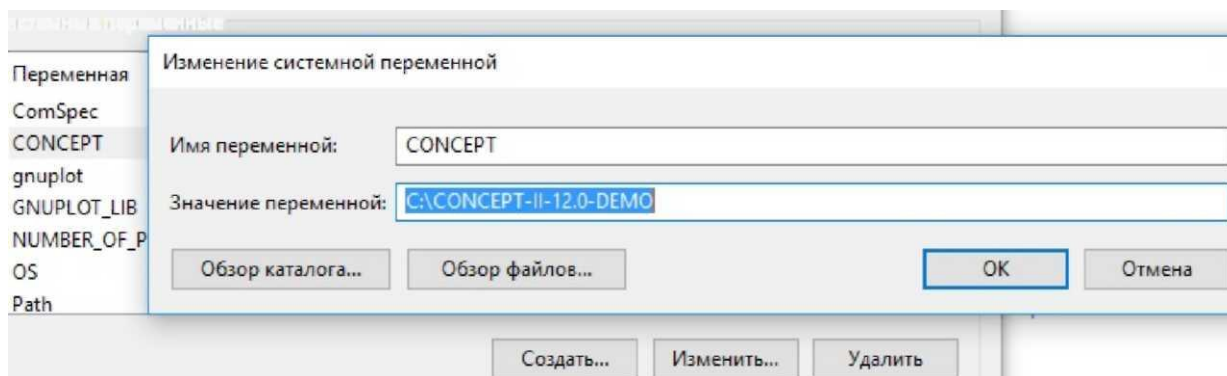


Рисунок 1.29 - Расширение пути Для графического представления кривых потребуется расширение «Gnuplot». Для установки необходимо скачать файл «gnuplot.exe» с официального сайта разработчиков программы. Запустить установку и после завершения расширить путь в соответствии с пунктом 0 (рис. 1.30).

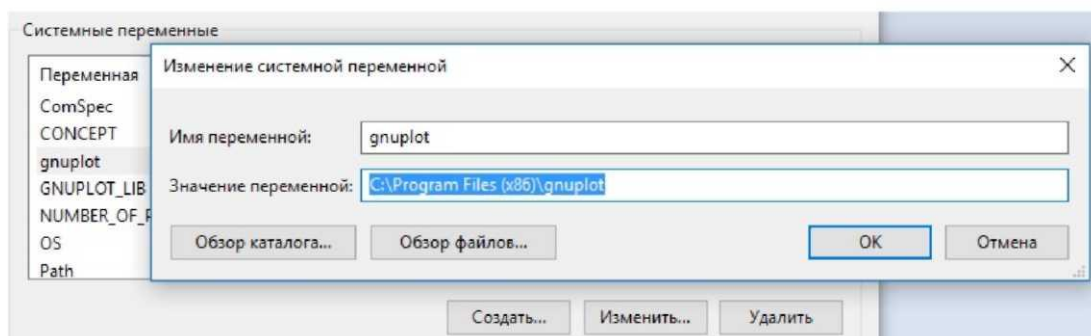


Рисунок 1.30 - Расширение пути для программы Gnuplot

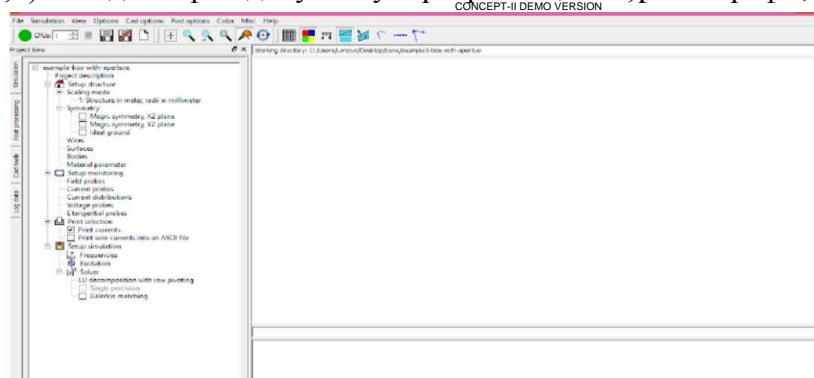


Рисунок 1.31 - Графический интерфейс программы CONCEPT-II Моделирование в CONCEPT-II состоит из следующих этапов: препроцессинг; ввод входных данных; проверка входной геометрии; вычисление; визуализация результатов. Далее рассмотрим их подробнее.

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. 1.32 а) и *Cad tools 2* (рис. 1.32 б).

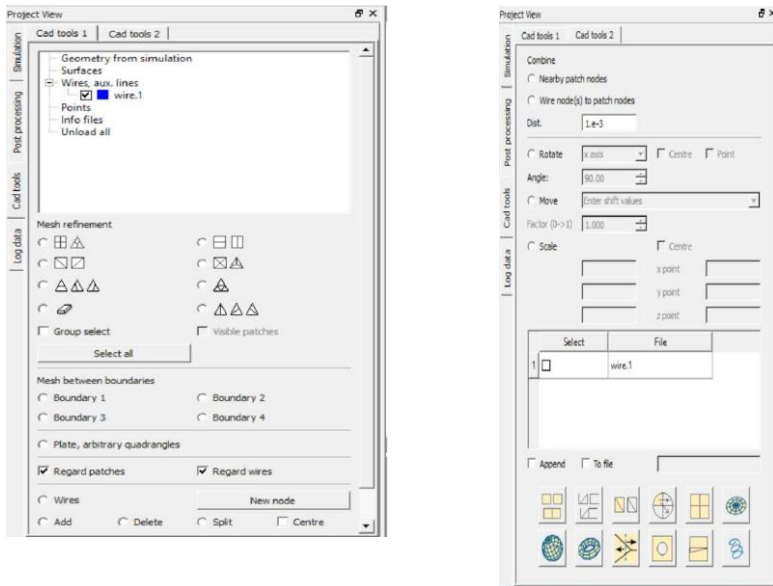


Рисунок 1.32 - Вкладки Cad tools 1 (а) и Cad tools 2 (б)

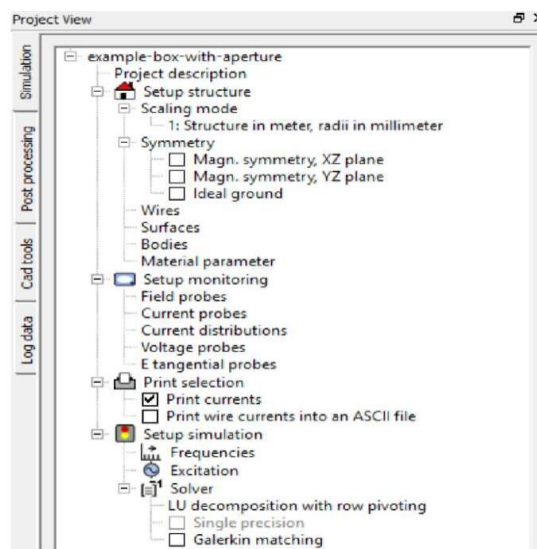


Рисунок 1.33 – Дерево проекта

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. 1.33). 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).

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

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

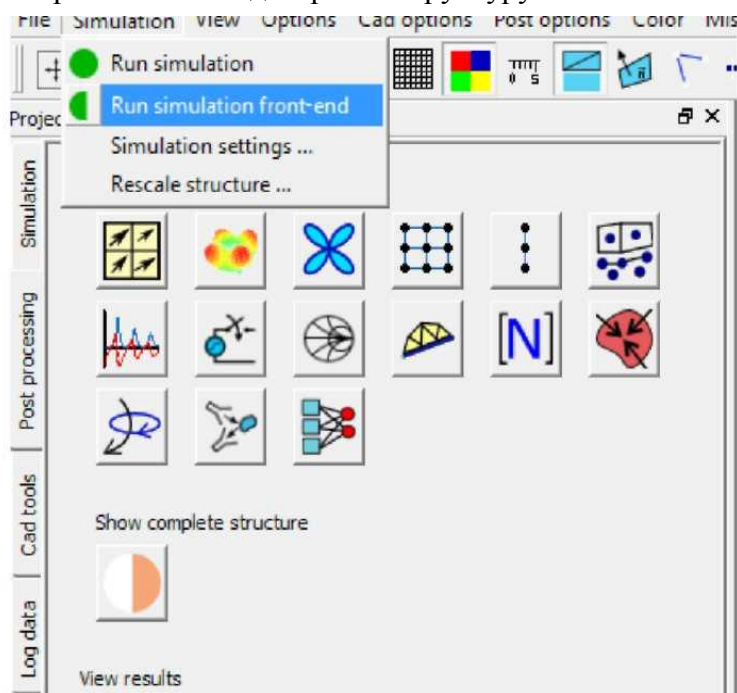


Рисунок 1.35 - Окно для вывода системных сообщений

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

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

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

**Список использованных источников.**

1. Куксенко С.П. Теория электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств и систем: учеб. метод. пособие. – Томск: Томск. Гос. Ун-т упр. И радиоэлектроники, 2016. – 72 с.
2. Гончаров В.А. Методы моделирования электромагнитных полей в вычислительных средах. // Научный электронный архив. [Электронный ресурс ]. – Режим доступа : <http://econf.rae.ru/article/5166>
3. Воронин А.В. Применение программного пакета Elcut для моделирования потенциальных электрических полей: учеб. метод. пособие. – // Гомель: БелГУТ, 2010 – 70 с.