

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ:  
ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РЕШЕНИЯ  
ДВУМЕРНЫХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ**

**Учебное пособие для студентов  
технических направлений подготовки  
и специальностей**

Томск  
Издательство ТУСУРа  
2025

УДК 621.391.823(075.8)

ББК 32.844я73

Э455

Авторы:

Куксенко С.П., Максимов А.Е., Клюкин Д.В., Жечев Е.С.,  
Квасников А.А., Суровцев Р.С.

Рецензенты:

**Гизатуллин З.М.**, д-р техн. наук, проф.  
**Ромашенко М.А.**, д-р техн. наук, доцент

Э455 **Электромагнитная совместимость: программные средства для решения двумерных задач электростатики** : учеб. пособие для студентов технических направлений подготовки и специальностей / С.П. Куксенко, А.Е. Максимов, Д.В. Клюкин [и др.]. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2025. – 154 с.

ISBN 978–5–908033–03–9

Учебное пособие составлено с учетом требований федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО). В нем рассмотрены компоненты систем автоматизированного проектирования в области электроники, различные программные средства, применяемые для решения электростатических задач и квазистатического моделирования радиоэлектронных средств. Описаны и проанализированы как отечественные программные продукты, так и программы с открытым исходным кодом. Кроме того, внимание уделено небольшим программным средствам расчета и синтеза параметров линий передачи.

Предназначено для студентов технических направлений подготовки и специальностей высших учебных заведений.

УДК 621.391.823(075.8)

ББК 32.844я73

ISBN 978–5–908033–03–9

© Куксенко С.П., Максимов А.Е.,  
Клюкин Д.В., Жечев Е.С.,  
Квасников А.А., Суровцев Р.С., 2025  
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радио-  
электроники, 2025

## Оглавление

Введение.....	5
1 ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ И КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ .....	7
1.1 Программа ELCUT.....	8
1.1.1 Описание программы.....	8
1.1.2 Пример моделирования .....	18
1.2 Система TUSUR.EMC.....	29
1.2.1 Описание системы .....	29
1.2.2 Пример моделирования .....	69
1.3 Программа FEM2D .....	74
1.3.1 Описание программы.....	74
1.3.2 Пример моделирования .....	78
1.4 Программа АРМ ЕМА.....	83
1.5 Контрольные вопросы и задания .....	93
2 ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА С ОТКРЫТЫМ ИСХОДНЫМ КОДОМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ.....	95
2.1 Программа FEMM.....	95
2.1.1 Описание программы.....	95
2.1.2 Пример моделирования .....	100
2.2 Программа FasterCap .....	117
2.2.1 Описание программы.....	117
2.2.2 Пример моделирования .....	122
2.3 Контрольные вопросы и задания .....	126
3 ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РАСЧЕТА И СИНТЕЗА ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ .....	128
3.1 Программа AppCAD .....	128
3.2 Программа AWR TXLINE .....	130
3.3 Программа CITS25 .....	132
3.4 Программа PCB Toolkit .....	136
3.5 Программа CONMTL.....	138
3.6 Программа LINPAR .....	141

3.7 Программа AlterPCB Transmission Line Simulator.....	145
3.8 Программа atlc2 .....	146
3.9 Программа Lines Modelling Toolbox.....	149
3.10 Контрольные вопросы и задания .....	150
Заключение .....	151
Литература.....	152

## Введение

*Это должно быть выкопано,  
положено в мешок, заперто в сундук ...*

М/ф «Клад»

Пособие посвящено рассмотрению программных средств, в которых применяются программные средства решения двумерных задач электростатики. Подобные программные средства часто используются в виде программных компонентов систем автоматизированного проектирования (САПР). Чтобы это подчеркнуть, отметим, что в общем виде выделяются следующие группы: САПР в области машиностроения (mechanical CAD, MCAD), САПР в области электроники (electronic CAD, ECAD или electronic design automation, EDA), САПР в области архитектуры и строительства (computer-aided architectural design, CAAD). В англоязычной литературе для САПР в области машиностроения широко используется дополнительная градация. Так, выделяют системы функционального (computer-aided manufacturing, CAM), конструкторского (computer-aided design, CAD) и инженерного анализа (computer-aided engineering, CAE).

Данное пособие посвящено рассмотрению компонентов САПР в области электроники, являющихся по сути частным случаем систем инженерного анализа. При этом отметим, что согласно ГОСТ Р 70290-2022 САПР электроники – инструментарий проектировщика, предназначенный для автоматизации проектирования электронной аппаратуры и электронной компонентной базы, включая создание их схемы, топологии и конструкции, схемотехническое и конструкторское моделирование и виртуальные испытания на внешние воздействующие факторы, создание карт рабочих режимов электронной компонентной базы, анализ показателей надежности электроники и разработку цифрового двойника электроники на конкретном предприятии на всех этапах – от

выдачи технического задания до передачи проекта заводу-изготовителю <sup>1</sup>.

Авторы благодарны своим коллегами за помощь в подготовке материалов пособия.

---

<sup>1</sup> Инструментарий проектировщика включает в себя 7 видов обеспечения: техническое, математическое, лингвистическое, программное, информационное, методическое, организационное.

# 1 ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ И КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*И, боже вас сохрани,  
не читайте до обеда советских газет.*

М. А. Булгаков. «Собачье сердце»

В данном разделе представлены результаты рассмотрения особенностей современных отечественных программных средств, применяемых при решении электростатических задач и квазистатическом моделировании элементов радиоэлектронных средств. При этом важно отметить, что рассмотренные далее программные средства не ограничиваются решением электростатических задач.

Сведения о программе ELCUT (разработчик ООО «ТОР»), известной для иностранных пользователей как QuickField (производитель Tera Analysis Ltd. [1]), систематизированы на основе открытой информации и использования ее студенческой версии, доступной для скачивания с сайта производителя [2]. Программа включена в реестр отечественного ПО № 4468 от 16.04.2018 г.

Сведения о программном продукте АРМ ЕМА, входящем в программный комплекс АРМ WinMachine (расчет и проектирование механического оборудования и конструкций в области машиностроения), разрабатываемом НТЦ «АППМ», систематизированы на основе открытой информации и использования ее пробной версии, доступной для скачивания по ссылке, получаемой по запросу на сайте производителя [3].

Сведения о системе TUSUR.EMC (ранее система TALGAT) и программе FEM2D, входящей в состав системы, разрабатываемых Томским государственным университетом систем управления и радиоэлектроники, структурированы на основе общедоступной информации и использования ее версии [4]. Система TUSUR.EMC включена в реестр отечественного ПО № 24768 от 15.11.2024 г.

## 1.1 Программа ELCUT

### 1.1.1 Описание программы

Как указано на сайте производителя, программа ELCUT – замкнутая полнофункциональная система расчета электрических, магнитных, температурных и упругодеформированных полей методом конечных элементов. Применительно к электромагнитному анализу программа позволяет решать электростатические и магнитостатические задачи, квазистационарные задачи на переменном токе в частотной области и низкочастотные переходные процессы в электрических и магнитных полях.

В начале работы с программой необходимо задать тип решаемой задачи (рисунок 1.1) и указать расположение файлов геометрии (\*.mod), свойств модели и, при необходимости, схем электрических цепей (\*.qcr). Файлы свойств моделей имеют разные структуры и расширения: электростатическое поле – \*.des, нестационарное электрическое поле – \*.dtv, электрическое поле постоянных токов – \*.dcf, электрическое поле переменных токов – \*.dec, магнитостатическое поле и нестационарное магнитное поле – \*.dms, а магнитное поле переменных токов – \*.dhe. На рисунке 1.2 приведен общий вид пользовательского интерфейса программы.

В ELCUT есть возможность построения электрических цепей с элементами с сосредоточенными параметрами (рисунок 1.3). Файл с электрической цепью может быть добавлен только для задач расчета магнитного поля переменных токов и нестационарного магнитного поля.

Электрическая цепь может содержать следующие элементы: резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, источники напряжения и источники тока. Для связи с задачей ELCUT в цепь должны быть включены специальные элементы, обозначающие блоки модели ELCUT. Они представляют в цепи проводники с током, помещенные в магнитное поле.

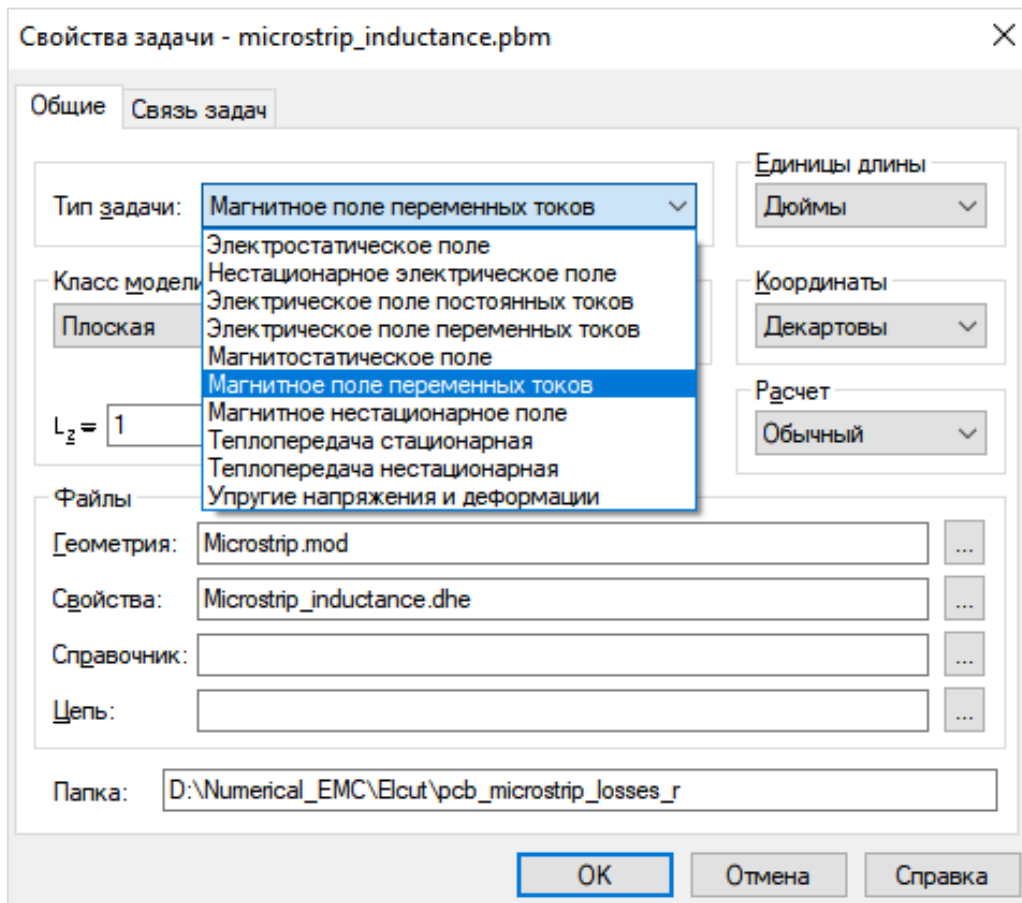


Рисунок 1.1 – ELCUT: выбор типа решаемой задачи

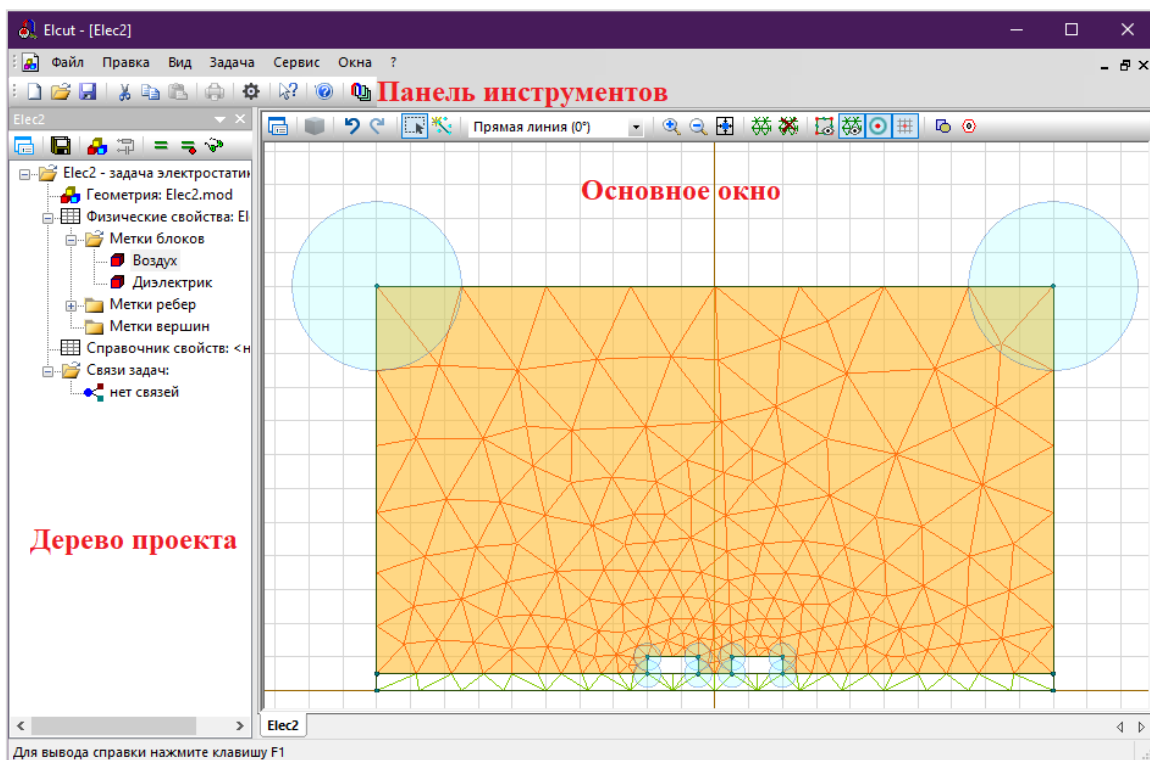


Рисунок 1.2 – ELCUT: общий вид пользовательского интерфейса программы

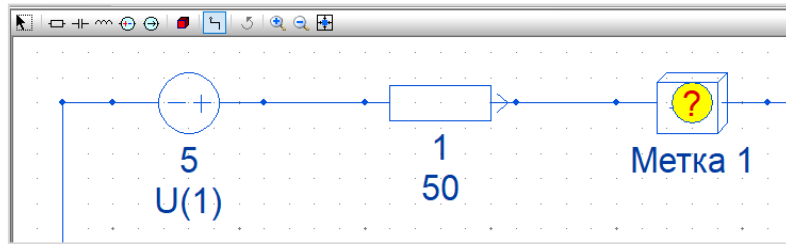


Рисунок 1.3 – ELCUT: выбор интерфейса редактора электрических цепей

Схема должна содержать все блоки модели, описывающие эти проводники, и каждый из них должен входить в схему только единожды. Если решается полевая задача с присоединенной электрической цепью, то для просмотра и анализа доступны данные о токах и напряжениях во всех ветвях. Для анализа результатов нужно выбрать команду «Электрическая цепь» в меню «Вид» картины поля. В результате появится окно (рисунок 1.4), содержащее схему электрической цепи и список ее элементов. Для всех элементов указываются ток и падение напряжения, а для пассивных элементов и источников также номинальные значения.

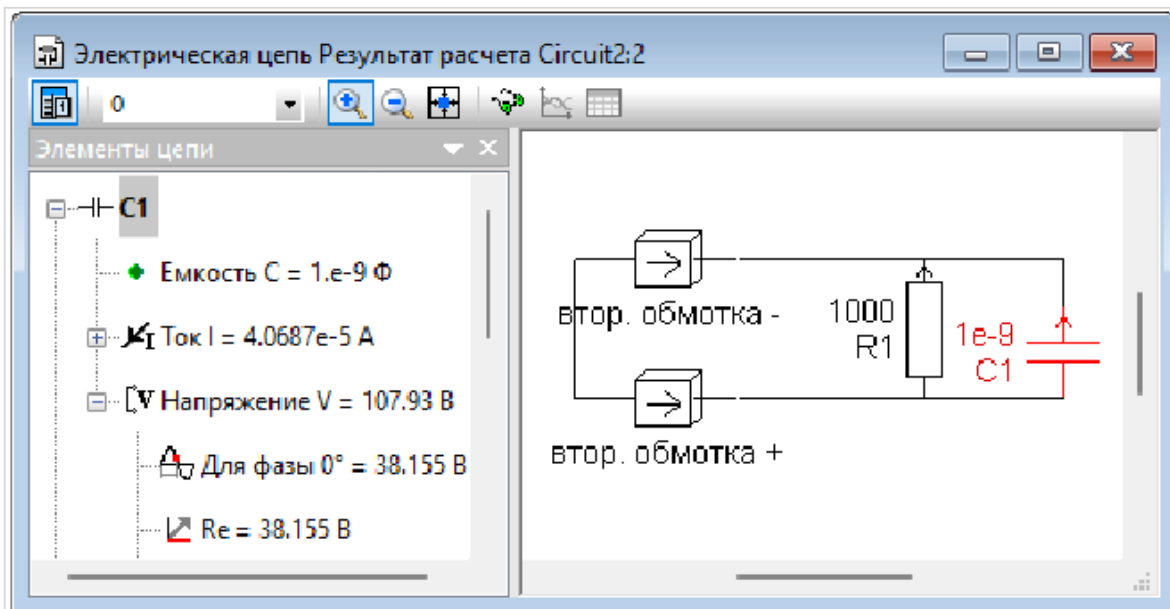
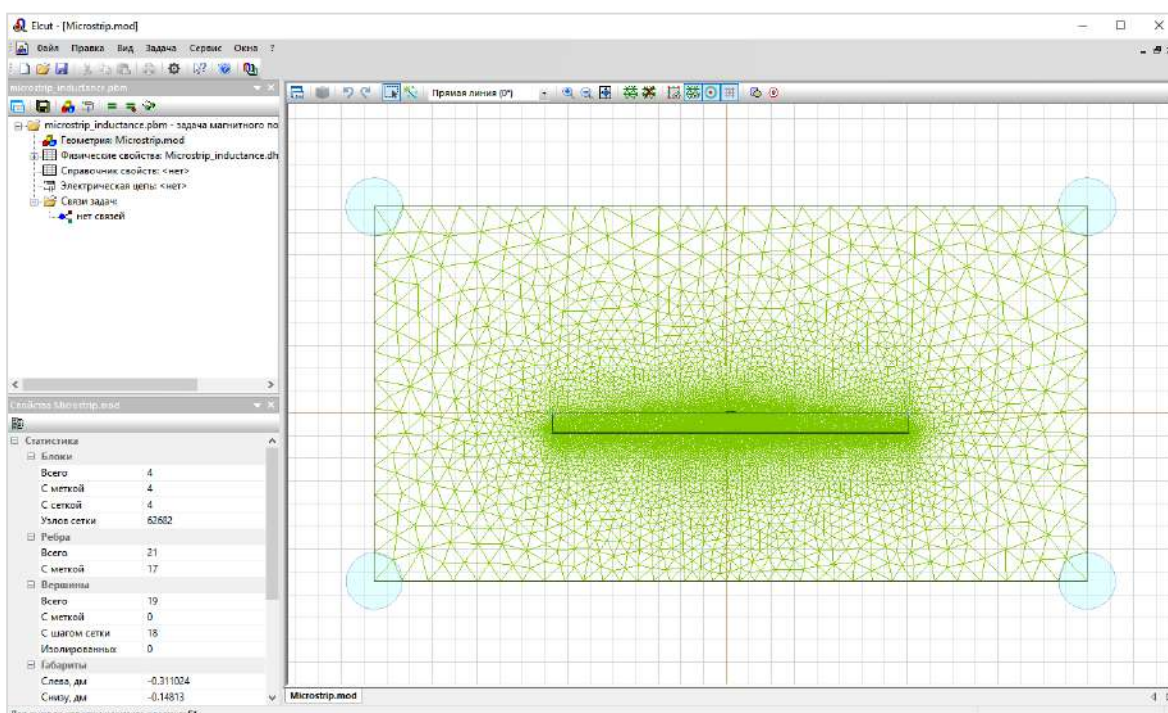


Рисунок 1.4 – ELCUT: пример окна «Электрическая цепь»

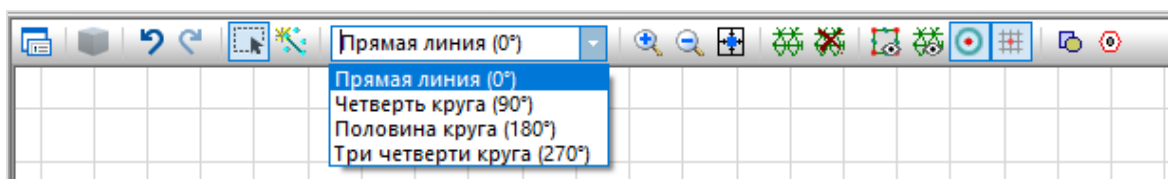
В задачах переменного магнитного поля для тока и напряжения в каждой ветви цепи отображаются действующее значение, мгновенное значение при выбранном фазовом угле и компоненты

комплексного значения в алгебраической и тригонометрической формах.

Для создания модели в ELCUT используется двумерный геометрический редактор (рисунок 1.5,а). Его основными инструментами являются прямая линия, четверть круга, половина круга и три четверти круга (рисунок 1.5,б). Трехмерная геометрическая модель в ELCUT может быть построена двумя способами: вытягиванием двумерной модели из плоскости (режим «3D-вытягивание», рисунок 1.6) либо импортом геометрии из сторонней САПР.



а



б

Рисунок 1.5 – ELCUT: общий вид геометрического редактора (а) и укрупненное изображение его инструментов (б)

Функциональная возможность, названная «3D-вытягивание», позволяет создавать 3D геометрические модели из двумерных. Так, сначала строится плоская модель, затем всем плоским

объектам присваиваются уровни, которые являются высотами соответствующих объектов по третьей оси. В результате плоские узлы становятся вертикальными гранями 3D-модели, плоские ребра становятся вертикальными поверхностями, а плоские блоки – горизонтальными гранями.

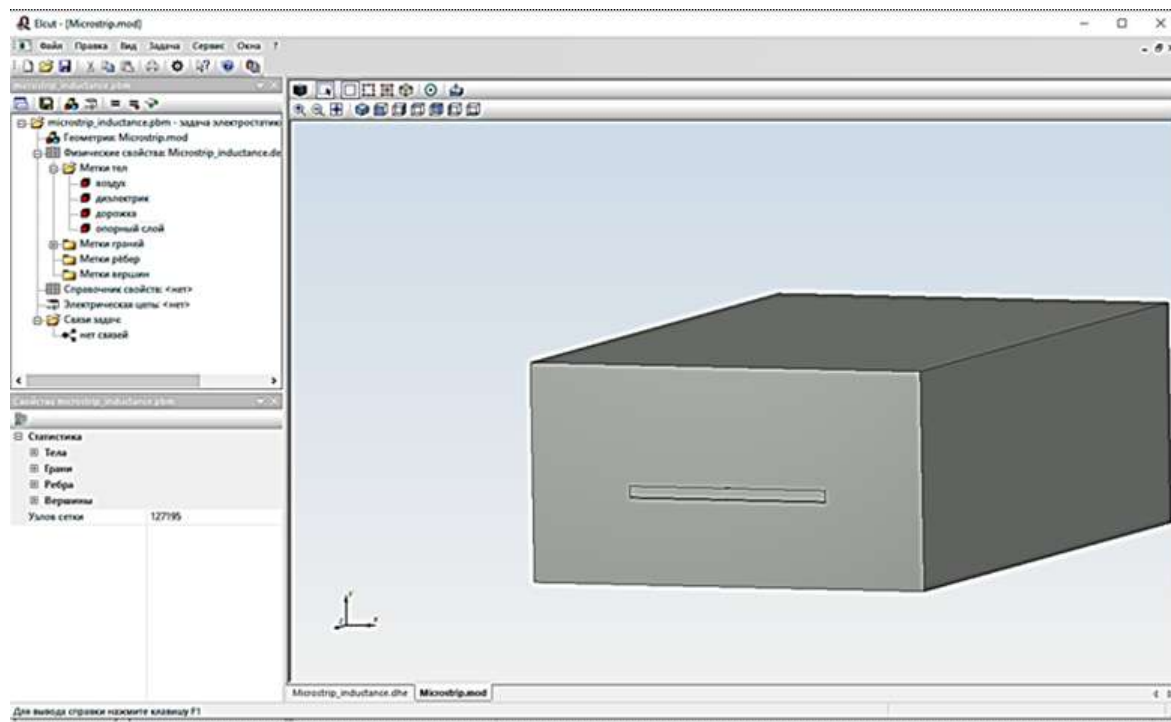


Рисунок 1.6 – ELCUT: демонстрация режима «3D-вытягивание» геометрической модели

Импорт/экспорт геометрических моделей из сторонней САПР осуществляется в формате \*.dxf (AutoCad, SolidWorks), при этом возможен импорт только геометрических объектов, состоящих из простейших фигур: вершины, линии, дуги окружности. Если импортируемая геометрия содержит сложные фигуры, например прямоугольники, то их необходимо разбить на простые фигуры, иначе импорт данных не будет осуществлен. Поэтому при построении геометрии в сторонней САПР необходимо пользоваться простейшими фигурами или использовать команду разбиения на примитивы («Explode»). Также возможен импорт в формате \*.m3d.

Дополнительно реализована возможность импортировать трехмерные модели из файла формата \*.step. Однако при импор-

те геометрической информации в ELCUT имеются некоторые ограничения. Например, импортированная геометрическая модель может содержать только одно тело. Если файл \*.step описывает несколько тел, импортировано будет только первое из них.

Экспорт сетки конечных элементов в текстовый файл из редактора модели, а также экспорт поля в узлах сетки конечных элементов выполнены так, что результат можно использовать в MATLAB.

В ELCUT имеется возможность мультифизического моделирования с передачей решения задачи одного типа в качестве источника поля для задачи другого типа.

В программе для решения электромагнитных задач используется метод конечных элементов. Вместе с тем программа позволяет строить предварительную расчетную сетку, адаптивно учащать ее, используя в том числе результаты, полученные на более редкой сетке (в литературе этот процесс известен как *h*-уточнение, от англ. *h-refinement*), а также на основе пользовательских настроек. Такая возможность практически исключает необходимость задания шага дискретизации вручную и измельчает сетку в областях с сильно неоднородными полями.

Вычисление уточненного шага в узле сетки основывается на изменении плотности энергии в окрестности этого узла, которую общепринято считать надежной оценкой локальной погрешности решения. Хотя при этом и невозможно гарантировать какую-либо конкретную точность, улучшенная сетка является оптимальной, обеспечивая наименьшую погрешность при заданном числе узлов сетки. Даже при полностью автоматическом построении первоначальной сетки одного шага адаптивного улучшения часто достаточно для большинства задач. Адаптивное улучшение сетки возможно для всех представленных в ELCUT типов задач, включая нелинейные и нестационарные задачи.

Программа ELCUT может применяться как платформа для создания различных инженерных приложений на основе готового решателя. Эти приложения могут быть написаны на языках программирования Visual Basic, Visual C, VBA, Tcl/Tk и языке MATLAB (GNU Octave). Алгоритмы, реализованные в таких

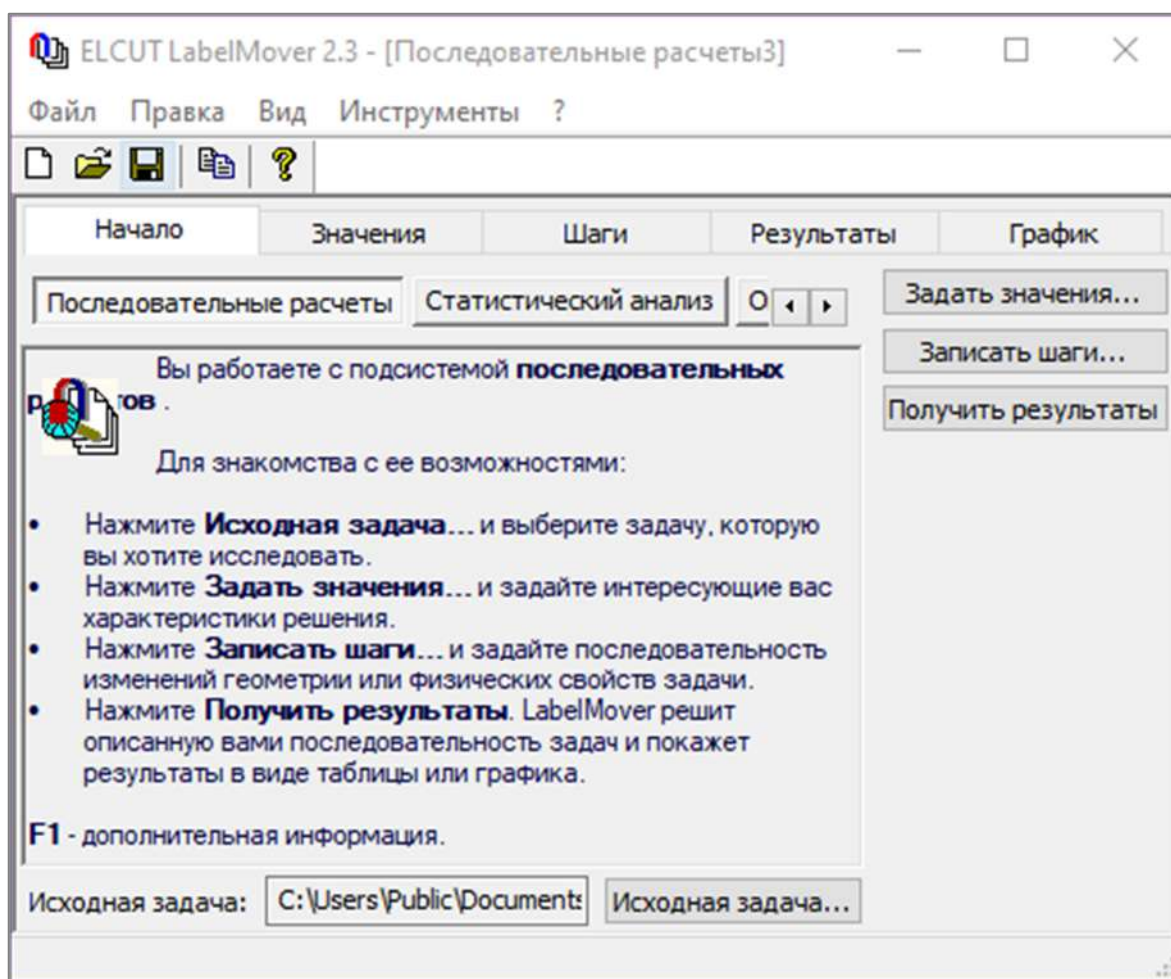
приложениях, могут создавать или модифицировать модели ELCUT и использовать результаты моделирования. Взаимодействие между ядром ELCUT и другими программами может быть реализовано двумя способами: на низком уровне через объектную модель ELCUT, названную ActiveField, и на высоком уровне через интерфейс с применением инструмента «LabelMover», предназначенного для многовариантного анализа. С помощью инструмента «LabelMover» можно исследовать зависимости интересующих параметров и характеристик от геометрических и электрофизических параметров задачи. Для этого необходимо обратиться к вкладке «Последовательные расчеты». Можно задать произвольную последовательность изменений геометрии задачи или ее электрофизических параметров, при этом генерируется последовательность задач, а результаты выдаются в табличном или графическом виде.

Во многих случаях значения параметров задачи, а также размеры и положение геометрических элементов известны только приближенно и могут отличаться от номинальных значений. Это может происходить, например, из-за ошибок измерения или возможных погрешностей технологического процесса производства деталей и т. д. В этом случае возникает задача оценить, насколько эти погрешности влияют на результаты расчета.

Подсистема статистического анализа (вкладка «Статистический анализ») позволяет оценить отклонение результатов расчета от номинала с помощью методов статистического моделирования. Инструмент «LabelMover» генерирует набор задач, в которых свойства и геометрия изменены случайным образом, решает эти задачи и вычисляет статистические оценки для отклонения результатов расчета от номинальных. Основное окно инструмента «LabelMover» представлено на рисунке 1.7,а.

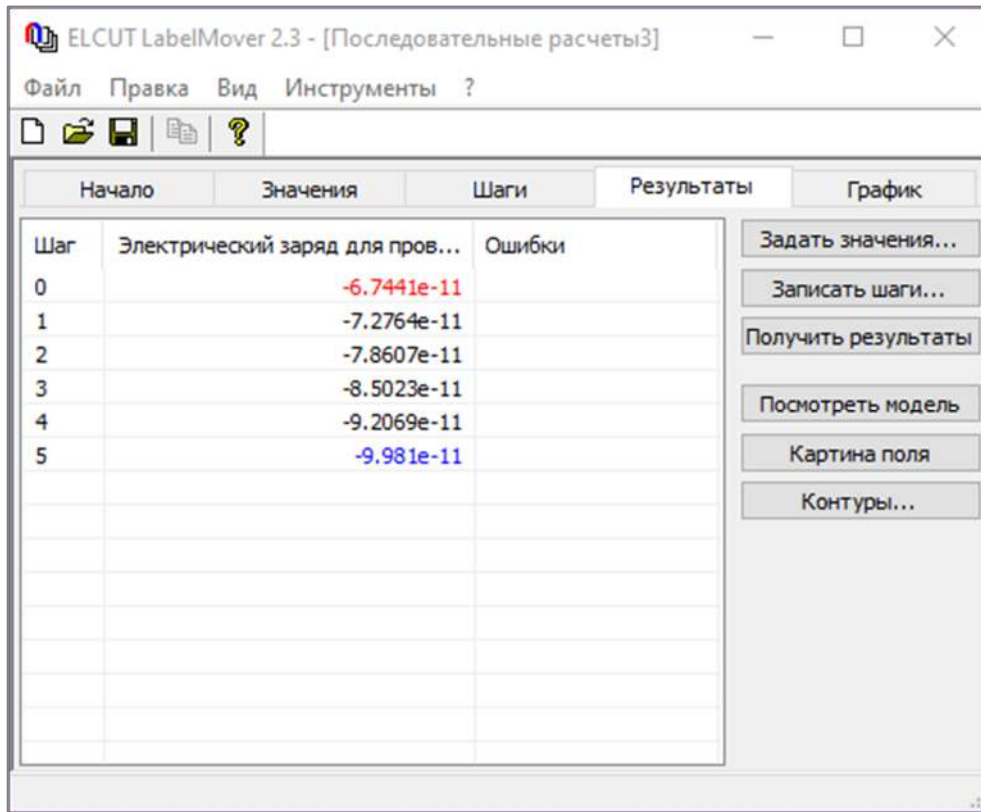
Во вкладке «Значения» необходимо выбрать, какие параметры нужно рассчитывать и записывать в память на каждом шаге. Во вкладке «Шаги» нужно вручную задать варьируемые параметры и требуемые шаги их изменения. После окончания расчетов во вкладках «Результаты» (рисунок 1.7,б) и «График» выводятся

значения выбранных параметров в численном и графическом видах соответственно. При использовании статистического анализа дополнительно отображается вкладка «Статистика» (рисунок 1.7,в), на которой приведены различные численные характеристики: математическое ожидание, стандартное и максимальное отклонение и т. д. При этом на вкладке «График» может быть показана гистограмма распределения значений случайной величины (рисунок 1.7,з).

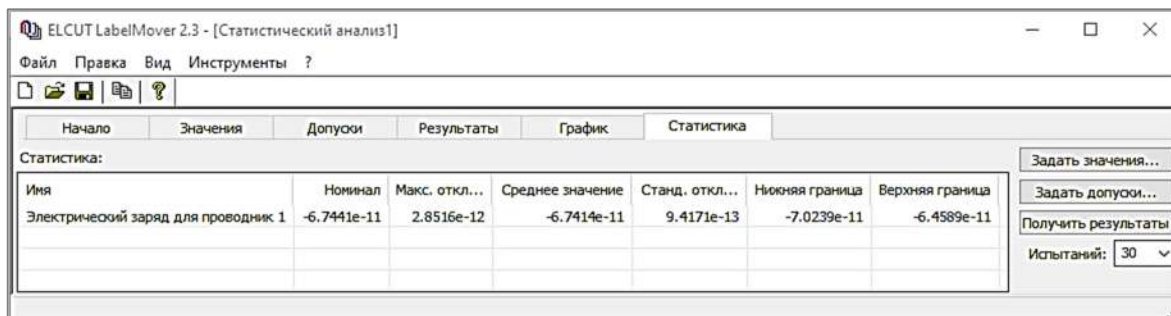


*a*

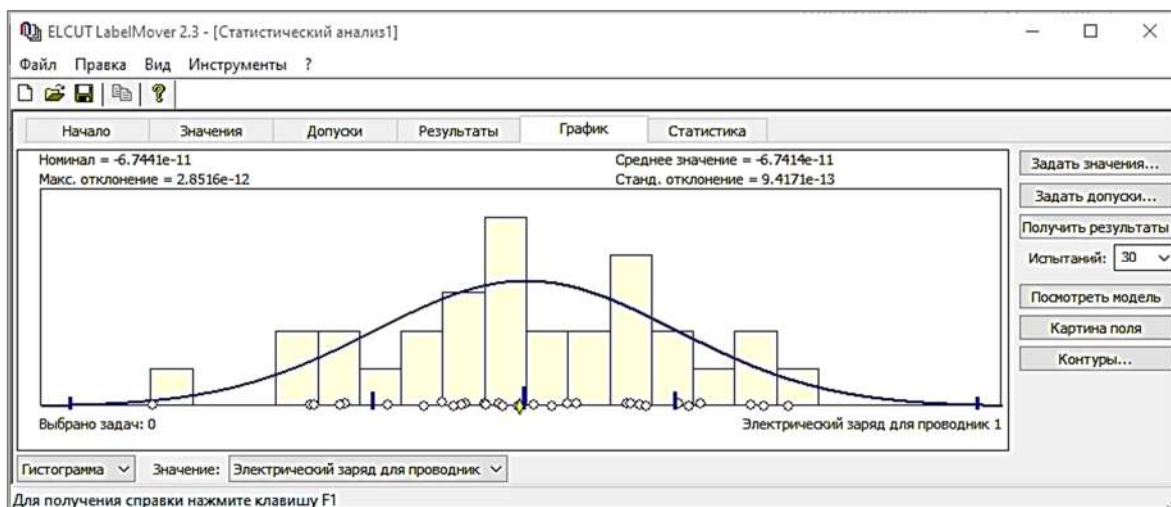
Рисунок 1.7 – ELCUT: основное окно инструмента «LabelMover» (*a*); результаты многовариантного (*б*) и статистического (*в*) анализа; гистограмма распределения значений случайной величины (*з*) (окончание см. на с. 16)



б



в



г

Рисунок 1.7 – Окончание (начало см. на с. 15)

Для параметрической оптимизации в ELCUT используется инструмент «LabelMover», где нужно задать изменяемые характеристики задачи (параметры) и указать цель оптимизации – любое значение, вычисляемое постпроцессором ELCUT. В качестве цели оптимизации можно искать максимум, минимум или значение, ближайшее к некоторому заданному. В процессе оптимизации «LabelMover» генерирует и решает последовательность задач, используя при этом встроенный или внешний алгоритм оптимизации. В «LabelMover» реализована локальная оптимизация, при которой ищется максимум или минимум целевой функции в некоторой окрестности оптимальной точки. Доступна одномерная и многомерная оптимизация. Для одномерной используется метод Брендта (Brent), а для многомерной – метод Нелдера-Мида (Nelder-Mead). Для выполнения параметрической оптимизации нужно выбрать соответствующую вкладку в инструменте «LabelMover», задать оптимизируемые параметры и цель оптимизации и нажать кнопку «Получить результаты». После этого результаты параметрической оптимизации отобразятся во вкладках «Результаты» (рисунок 1.8,*а*) и «График» (рисунок 1.8,*б*).

Шаг	Изменить Диэлектрическая проницаемость...	Электрический заряд ...
0	2	-6.7441e-11
1	3.1459	-9.7825e-11
2	3.8541	-1.1652e-10
3	4.2918	-1.2806e-10
4	4.5623	-1.3518e-10
5	4.7295	-1.3958e-10
6	4.8328	-1.423e-10
7	4.8967	-1.4398e-10
8	4.9361	-1.4502e-10
9	4.9605	-1.4567e-10
10	4.9756	-1.4606e-10
11	4.9849	-1.4631e-10
12	4.9907	-1.4646e-10
13	4.9947	-1.4656e-10

*а*

Рисунок 1.8 – ELCUT: результат параметрической оптимизации (*а*) и график поиска оптимального значения параметра (*б*) (окончание см. на с. 18)

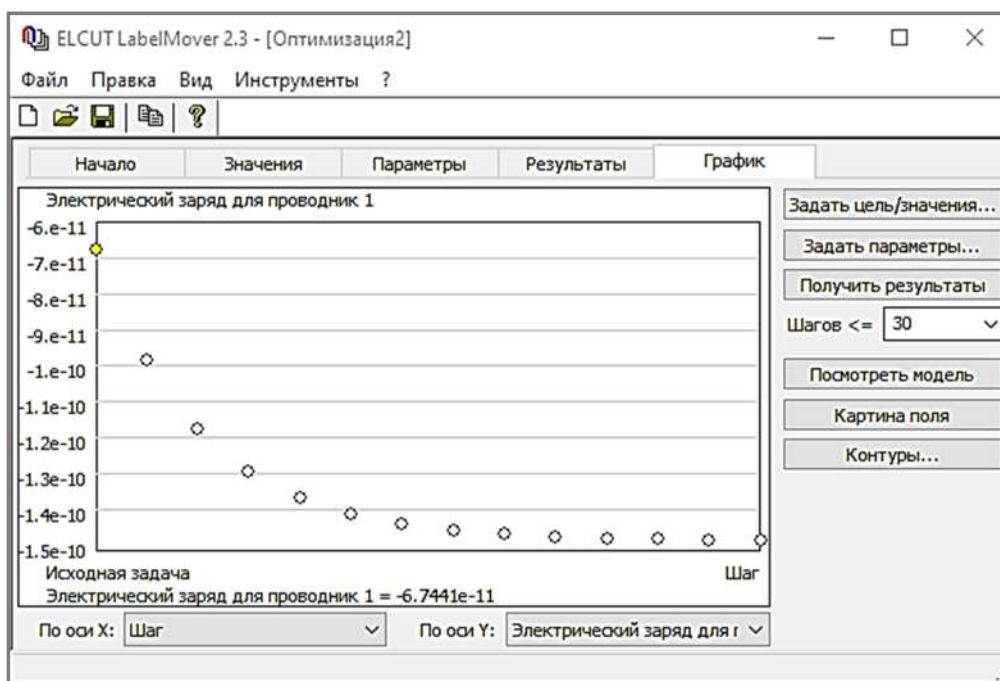


Рисунок 1.8 – Окончание (начало см. на с. 17)

## 1.1.2 Пример моделирования

Моделирование выполнено в актуальной версии программы ELCUT Студенческий 6.6.0.2591 (дата выхода – 16 февраля 2022 г.). Важно, что в студенческой версии программы существует ограничение на число элементов сетки – не более 255 узлов при моделировании в 2D и не более 4095 – в 3D.

Рассмотрим моделирование 2-проводной микрополосковой линии передачи. Для этого создадим новую задачу с типом «электростатическое поле» (рисунок 1.9).

Построим поперечное сечение микрополосковой линии передачи (рисунок 1.10) с параметрами: ширина проводников  $w = 2$  мм, толщина проводников  $t = 1$  мм, толщина диэлектрической подложки  $h = 1,5$  мм, ее относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r = 5$ , расстояние между проводниками  $s = 1$  мм,  $d = 5$  мм.

Область задачи ограничена землей снизу и бесконечна в трех других направлениях. Для решения теоретически бесконечной задачи методом конечных элементов область расчета должна быть определена как прямоугольник, достаточно большой, чтобы исключить влияние краевых эффектов.

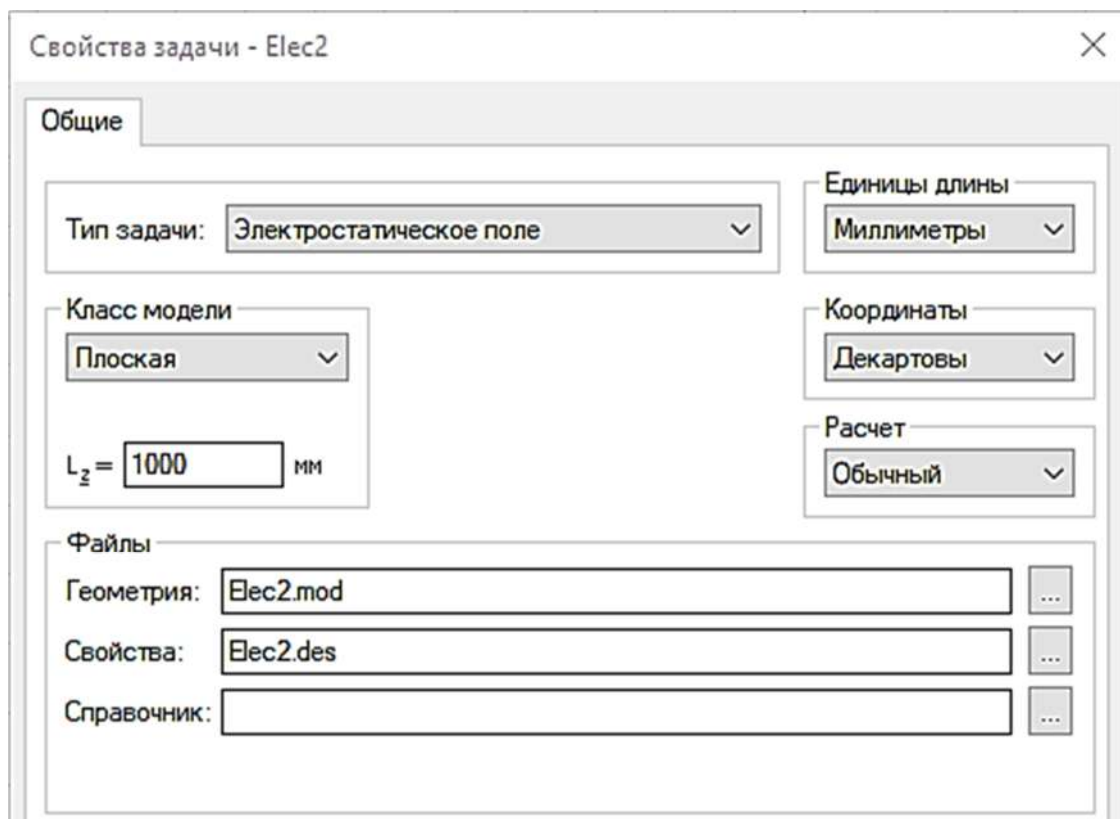


Рисунок 1.9 – ELCUT: окно свойств задачи

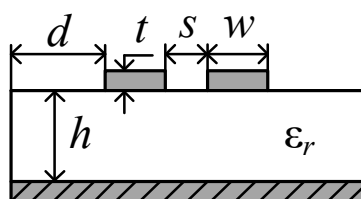



Рисунок 1.10 – Поперечное сечение микрополосковой линии передачи

Для построения поперечного сечения линии выберем в дереве проекта пункт «Геометрия» и дважды нажмем на него для открытия геометрического редактора. В меню «Вид» выберем пункт «Сетка привязки» и зададим шаг сетки равным 0,5 мм (рисунок 1.11).

Далее используем инструмент «прямая линия». Для этого выберем из выпадающего меню этот инструмент, затем – режим вставки новых объектов . После этого найдем в графическом окне точку (−7,5 мм, 0,0 мм), поставим туда курсор, зажмем левую кнопку мыши, и, не отпуская ее, передвинем курсор в точку

(7,5 мм, 0,0 мм). Координаты местоположения курсора отображаются в правом нижнем углу. Аналогичным образом построим другие линии (рисунок 1.12).

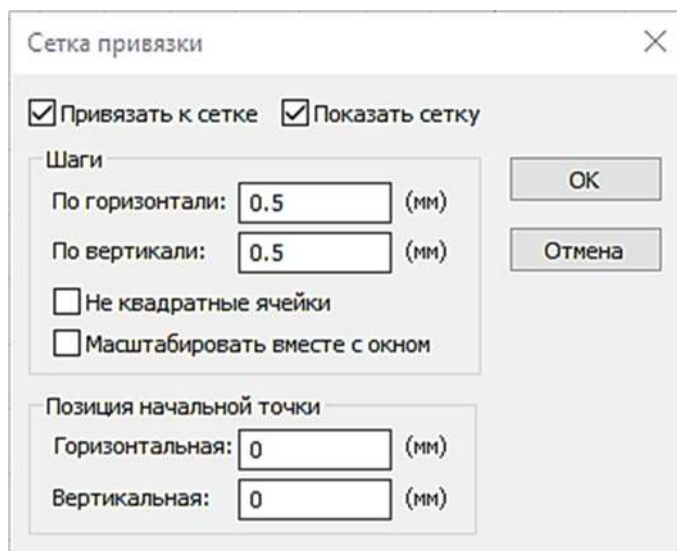


Рисунок 1.11 – ELCUT: окно «Сетка привязки»

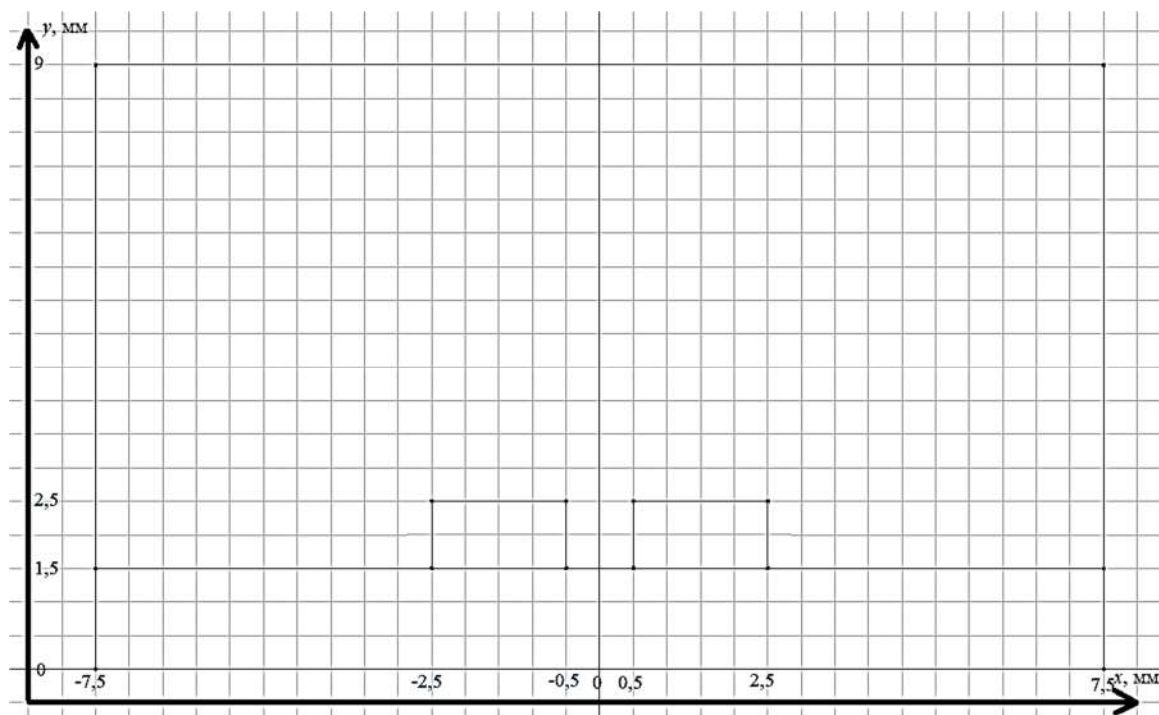


Рисунок 1.12 – Геометрические размеры поперечного сечения

На следующем шаге нужно выделить все ребра (грани) левого проводника и присвоить им метку. Для этого нужно нажать на любое из ребер левой кнопкой мыши, а затем, удерживая

клавишу «ctrl», последовательно нажать на другие ребра. Выделенные ребра будут иметь красную обводку. Далее необходимо нажать на одно из выделенных ребер правой кнопкой мыши и выбрать пункт «Свойства» (рисунок 1.13). В открывшемся окне (рисунок 1.14) нужно присвоить пользовательскую метку (например, «Пров. 1»). Аналогичные действия необходимо произвести для правого проводника и заземленного экрана (рисунок 1.15). После этого метки появятся в дереве проекта в блоке «Метки ребер».

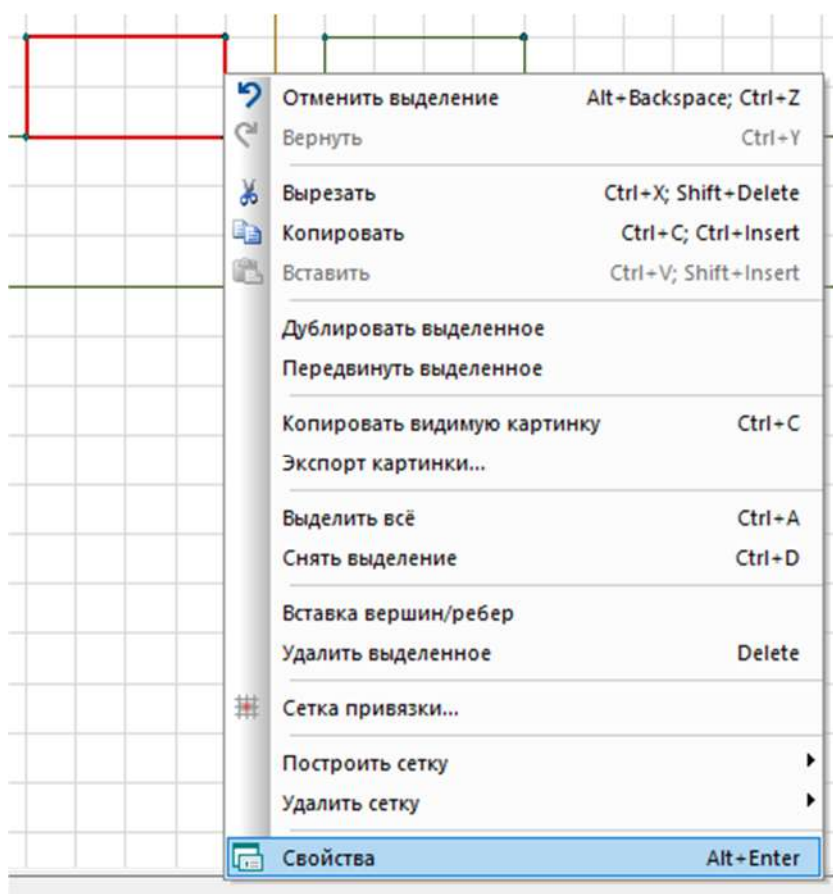


Рисунок 1.13 – ELCUT: контекстное меню выделенного объекта

Затем нужно присвоить метки диэлектрическим областям. Для этого нужно щелкнуть левой кнопкой мыши внутри области для ее выделения (желтым цветом), потом вызвать контекстное меню (правой кнопкой мыши) и через пункт «Свойства» присвоить метку (рисунок 1.16). Метки необходимо присвоить как диэлектрической подложке, так и воздушному заполнению. После этого метки появятся в дереве проекта в блоке «Метки блоков» (рисунок 1.17).

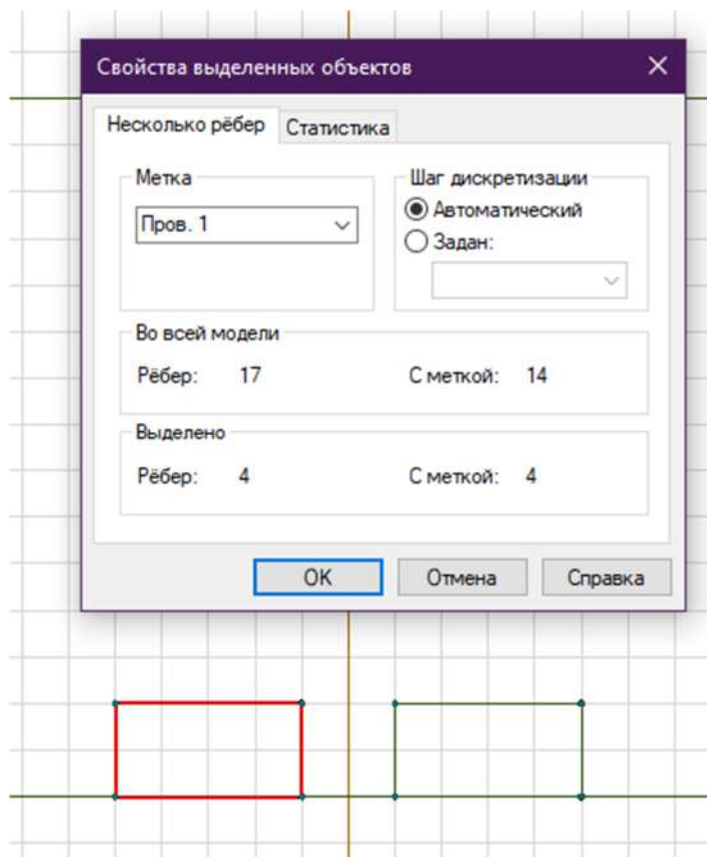


Рисунок 1.14 – ELCUT: окно свойств выделенного объекта

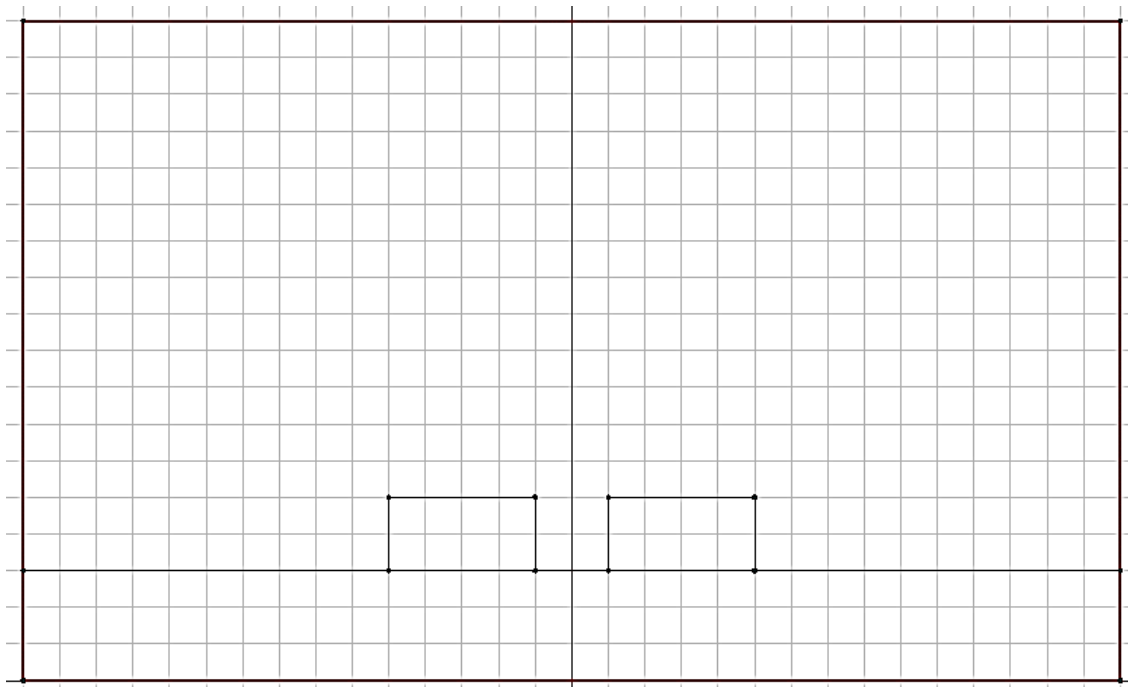


Рисунок 1.15 – Выделение опорного проводника (заземленного экрана)

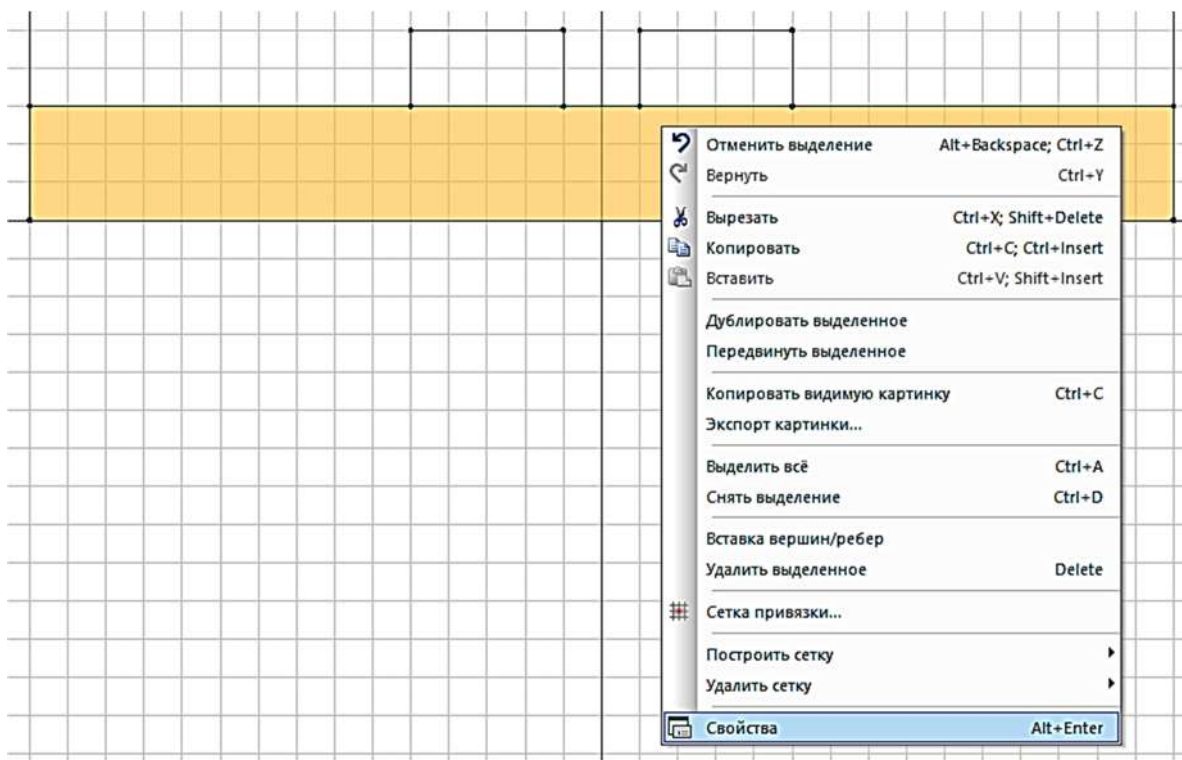


Рисунок 1.16 – ELCUT: контекстное меню выделенного объекта

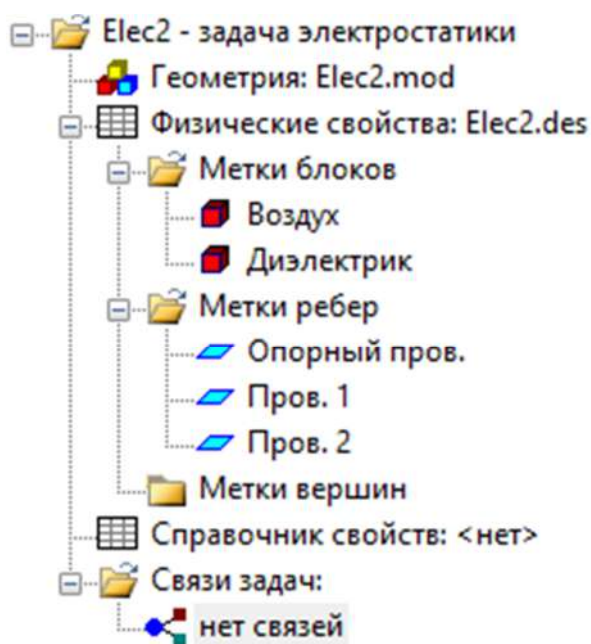
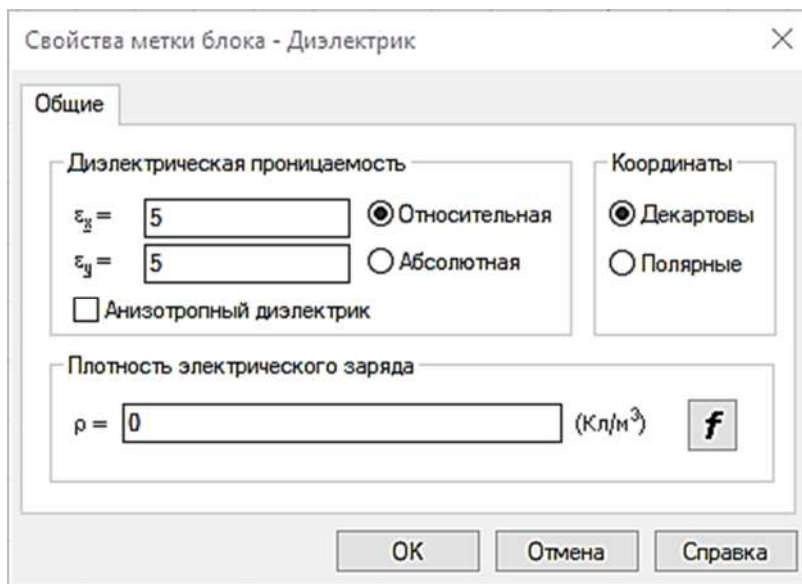


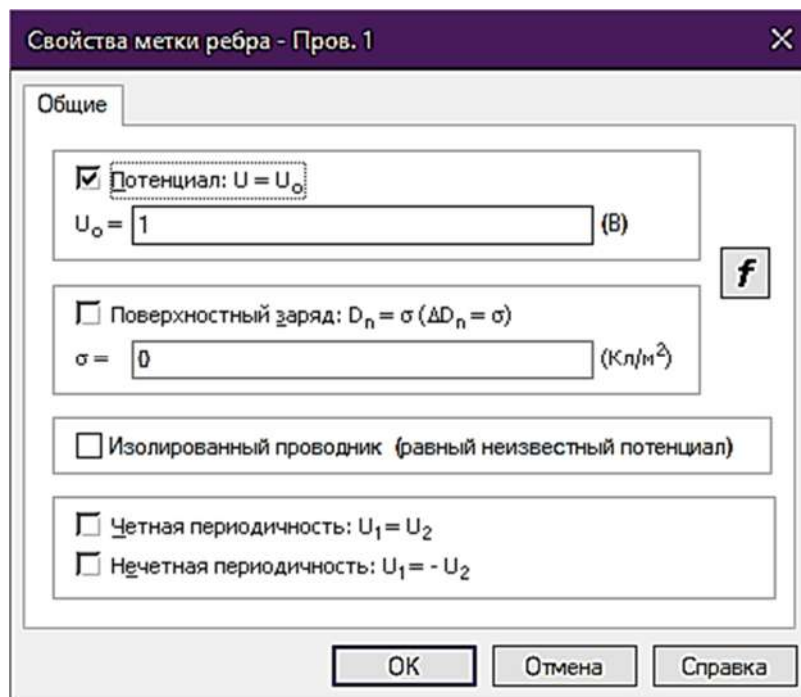
Рисунок 1.17 – ELCUT: дерево проекта

Теперь нужно задать электрические и электрофизические параметры, а именно значения потенциала на проводниках и относительной диэлектрической проницаемости в диэлектриках. Для этого нужно выбрать нужную метку в дереве проекта и дважды

нажать на нее. Относительная диэлектрическая проницаемость блока с воздушным заполнением устанавливается равной единице, а диэлектрической подложки – 5 (рисунок 1.18,а). На левом проводнике задается потенциал 1 В, а на правом и опорном – 0 В (рисунок 1.18,б).



а



б

Рисунок 1.18 – ELCUT: задание свойств диэлектрического (а) и проводникового (б) элементов структуры

На следующем шаге нужно задать шаг сетки (сегментации). Построим более частую сетку рядом с проводниками и более редкую вдали от них. Для этого дважды будем нажимать на вершины (красные точки) и устанавливать ручной шаг дискретизации (рисунок 1.19). Для внешних углов установим шаг, равный двум, а для углов проводников – 0,3. Стоит отметить, что этот этап не является обязательным, шаг дискретизации может быть подобран автоматически.

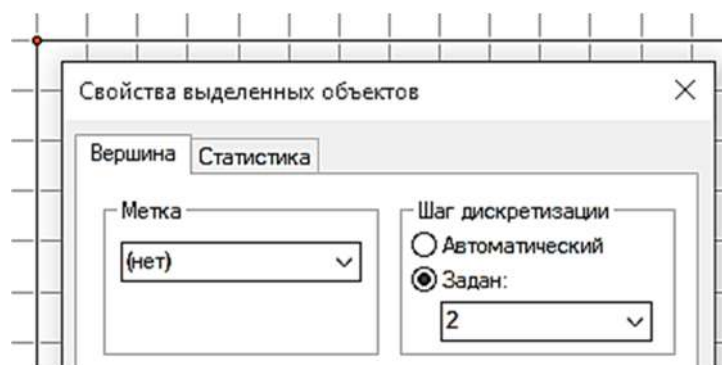



Рисунок 1.19 – ELCUT: выделение вершины и установка шага дискретизации

Вид геометрического редактора с установленными шагами дискретизации показан на рисунке 1.20,*а*. Далее при помощи кнопки  нужно построить конечно-элементную расчетную сетку (рисунок 1.20,*б*).

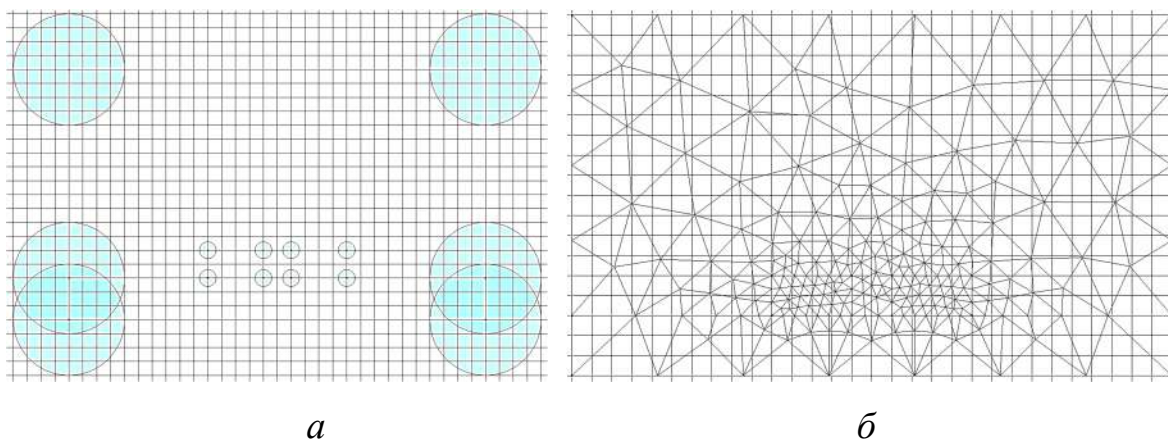




Рисунок 1.20 – ELCUT: шаги дискретизации (*а*) и конечно-элементная расчетная сетка (*б*)

На следующем этапе с помощью кнопки  запускается процесс вычислений, после чего строится картина поля (рисунок 1.21,*а*). В настройках картины поля (кнопка ) цветами могут быть отображены потенциал, напряженность и другие характеристики (рисунок 1.21,*б*).

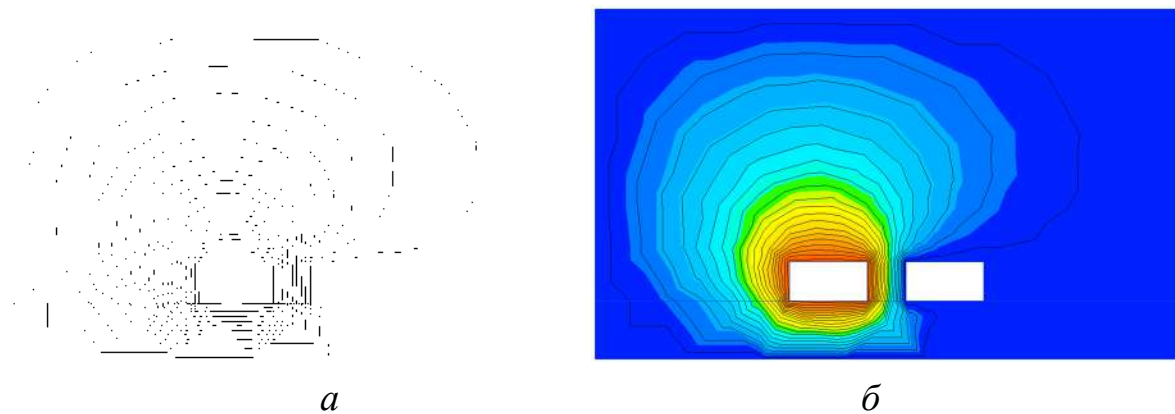




Рисунок 1.21 – ELCUT: картина поля (*а*) и визуализация потенциала (*б*)

На последнем этапе с помощью калькулятора матрицы емкостей (меню «Сервис», пункт «Матрица емкостей...») рассчитаем емкостную матрицу. Для этого снимем метку «Заземлен» со второго проводника (однократным нажатием на этой метке) и нажмем кнопку «Вычислить» (рисунок 1.22).

Также емкостная матрица может быть рассчитана с использованием интегрального калькулятора (кнопка ). Для расчета необходимо определить контур интегрирования. Контур определяется с помощью прямых линий (инструмент «добавить к контуру», кнопка ) , построенный контур изображен на рисунке 1.23 (выделен красным).

В интегральном калькуляторе после построения контура отобразятся его геометрические и физические характеристики (рисунок 1.24,*а*). В нижней части интегрального калькулятора доступен «мастер емкостей» (рисунок 1.24,*б*), с помощью которого

емкость может быть вычислена исходя из заряда контура и энергии поля (рисунок 1.25).

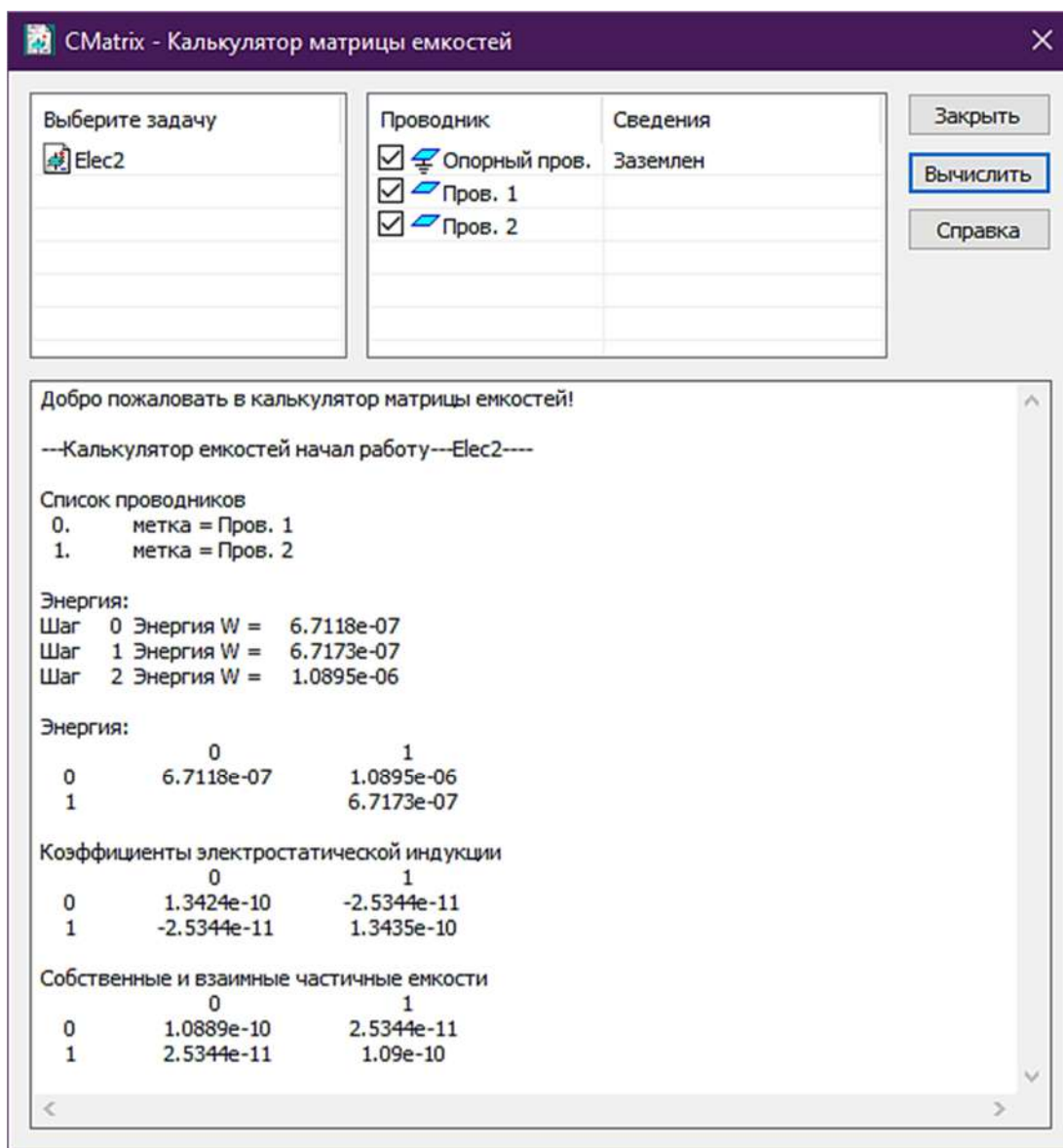


Рисунок 1.22 – ELCUT: калькулятор матрицы емкостей

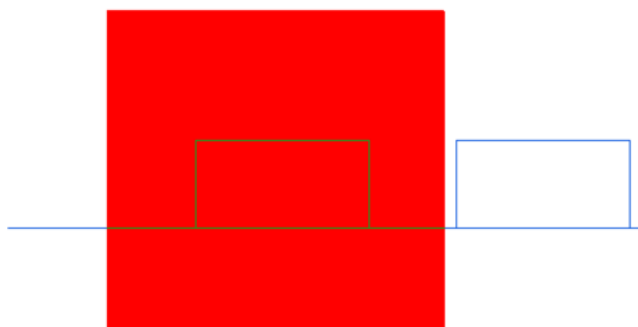


Рисунок 1.23 – ELCUT: контур интегрирования

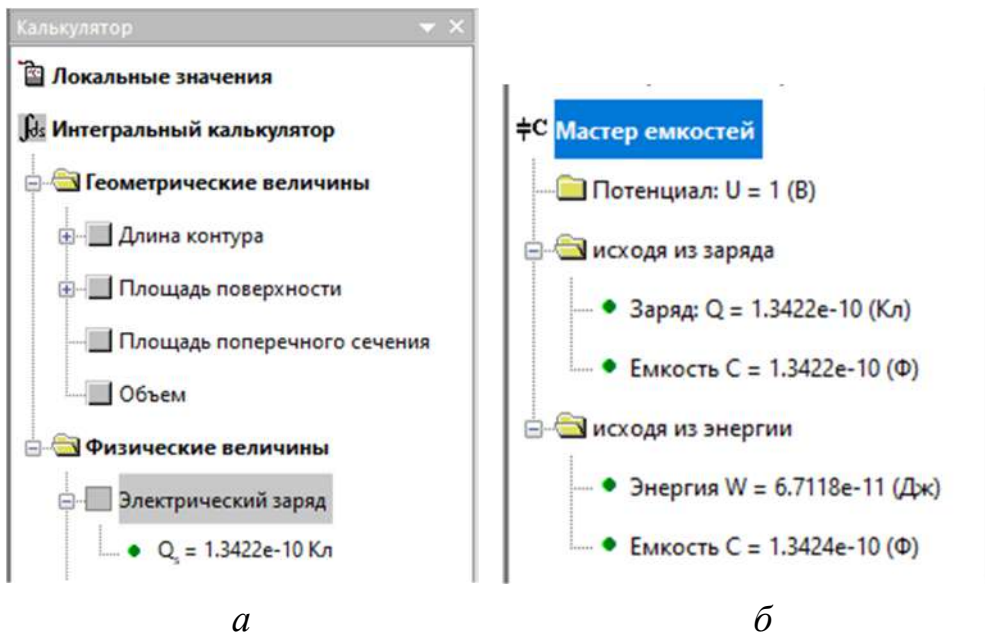


Рисунок 1.24 – ELCUT: панель интегрального калькулятора: геометрические и физические характеристики контура (а) и «мастер емкостей» (б)

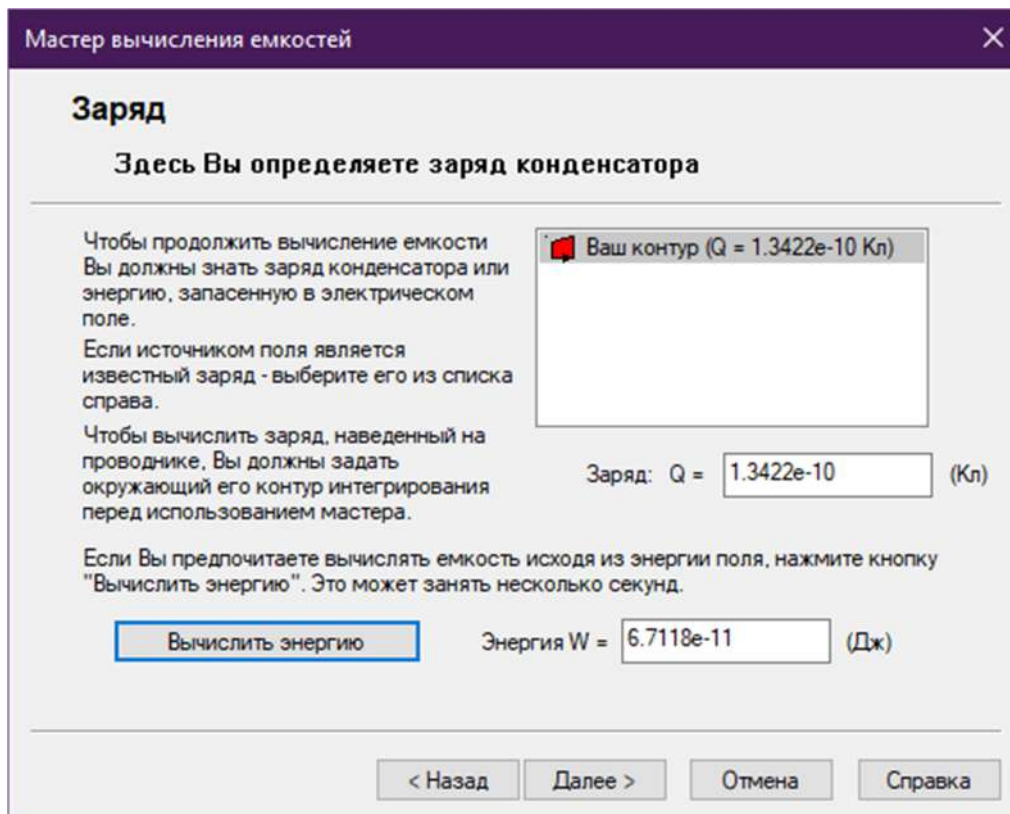
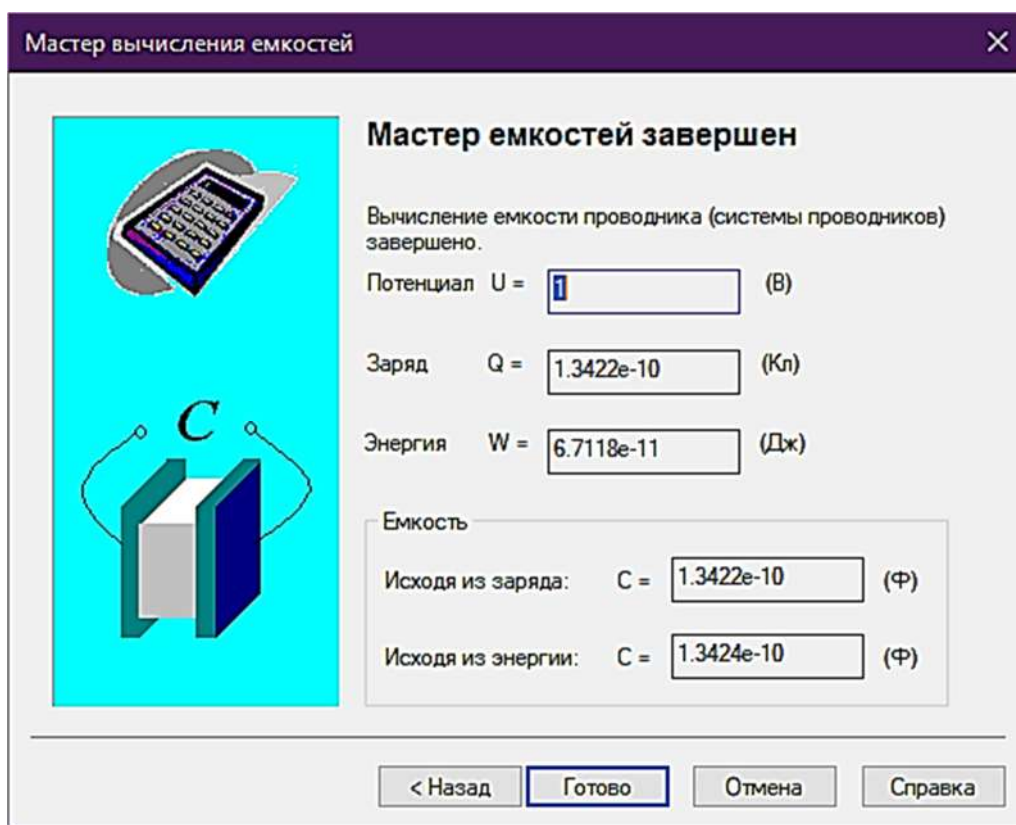


Рисунок 1.25 – ELCUT: окно мастера вычисления емкостей: выбор параметров (а) и вычисленные емкости (б) (окончание см. на с. 29)



б

Рисунок 1.25 – Окончание (начало см. на с. 28)

## 1.2 Система TUSUR.EMC

### 1.2.1 Описание системы

Система TUSUR.EMC (ранее – система TALGAT) предназначена для компьютерного моделирования задач электромагнитного поля, в том числе задач ЭМС. Система базируется на математических моделях, основанных на методе моментов (основной численный метод), что сводит практически все вычисления к матричным операциям. Программная реализация выполнена по модульному принципу.

При решении задач электростатики (квазистатическое моделирование) система обеспечивает: расчет матриц погонных параметров произвольных двумерных структур проводников и диэлектриков; расчет временного и частотного откликов произвольных схем из отрезков многопроводных линий передачи; структурно-параметрическую оптимизацию для указанных видов расчета

с помощью генетических алгоритмов, эволюционных стратегий и неявного фильтрования.

Система TUSUR.EMC включает следующие основные модули:

- вычислительных методов для двумерных структур проводников и диэлектриков с произвольными границами (MOM2D);
- расчета отклика во временной и частотной областях (RESPONSE и GODUNOV);
- оптимизации с помощью генетических алгоритмов (ГА) (модуль GA) и эволюционных стратегий (ЭС) (модуль ES);
- утилит (UTIL);
- интерпретации инфиксных выражений (INFIX);
- построения графиков (GRAPH);
- матричных операций на центральном процессоре (MATRIX).

Кроме того, реализованы модули баз данных (DataBases) и экспертных оценок (EXPERT).

Взаимодействие модулей системы обеспечивает ее ядро (TLCORE). Управление системой осуществляется с помощью графического интерфейса пользователя (VisualClient) и программы управления из командной строки (BasiClient). Для взаимодействия пользователя с системой применяется высокоуровневый язык программирования Python, а также интерпретируемый скриптовый язык TALGAT\_Script.

При работе с системой действия пользователя над элементом графического интерфейса или ввод текстовой команды преобразуются клиентом ядра. После ввода пользователем списка инструкций выполняется их построчный разбор и поиск ключевых слов, соответствующих функциям вычислительных и вспомогательных модулей системы (и их аргументов). Затем выполняется функция, принадлежащая конкретному модулю системы, а результат ее выполнения возвращается в ядро интерпретатора системы в виде экземпляра специального класса HandlerResult. Если строка содержит больше чем одну инструкцию, то промежуточный результат выполнения вложенной инструкции используется в качестве

аргумента для инструкций более высокого уровня. Сведения об именах переменных, их значениях, а также пользовательских инструкциях хранятся в рабочей памяти программы. Подобным образом происходит разбор всех оставшихся инструкций списка. Завершающим этапом является обработка результатов. Если список содержит инструкции, отвечающие за отображение результатов (например, команда ЕСНО обеспечивает вывод текстовых или числовых данных в консоль), данные в виде строк передаются в модуль графического клиента системы.

Процесс взаимодействия элементов системы на примере выполнения инструкций из вычислительного модуля MOM2D схематично представлен на рисунке 1.26 в виде UML-диаграммы.

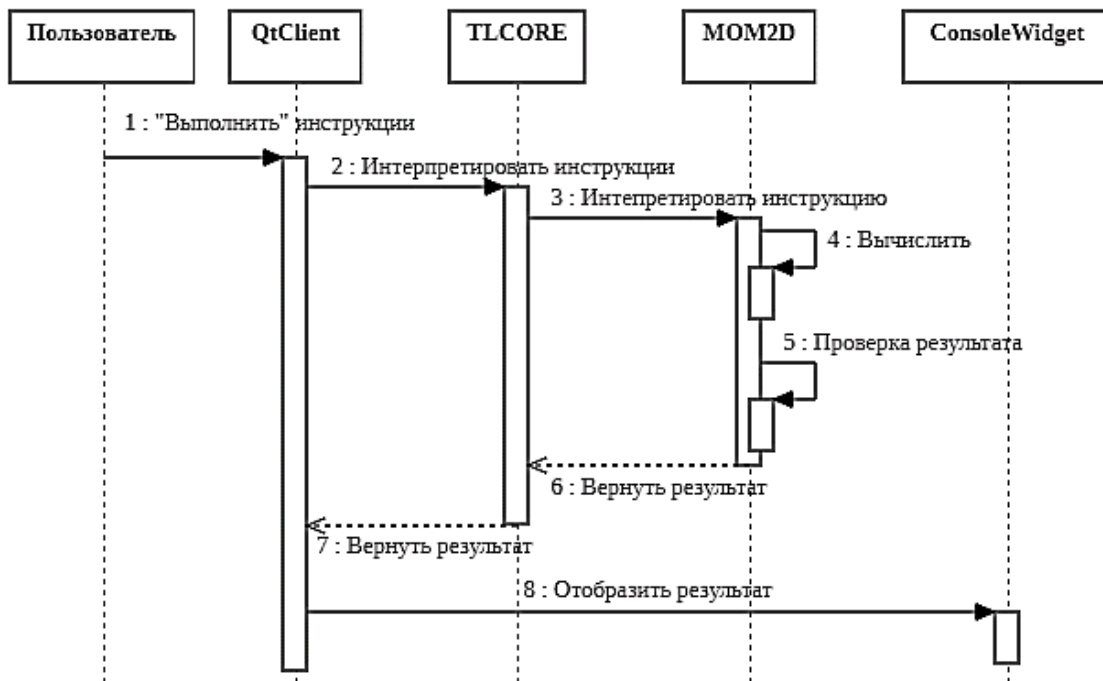


Рисунок 1.26 – TUSUR.EMC: UML-диаграмма последовательности взаимодействия модулей при инструкции из модуля MOM2D

В системе TUSUR.EMC реализовано управление схематическим и топологическим проектированием, электромагнитным моделированием, оптимизацией и отображением результатов. Графическим клиентом системы является Windows-приложение с многодокументным пользовательским интерфейсом, который показан на рисунке 1.27.

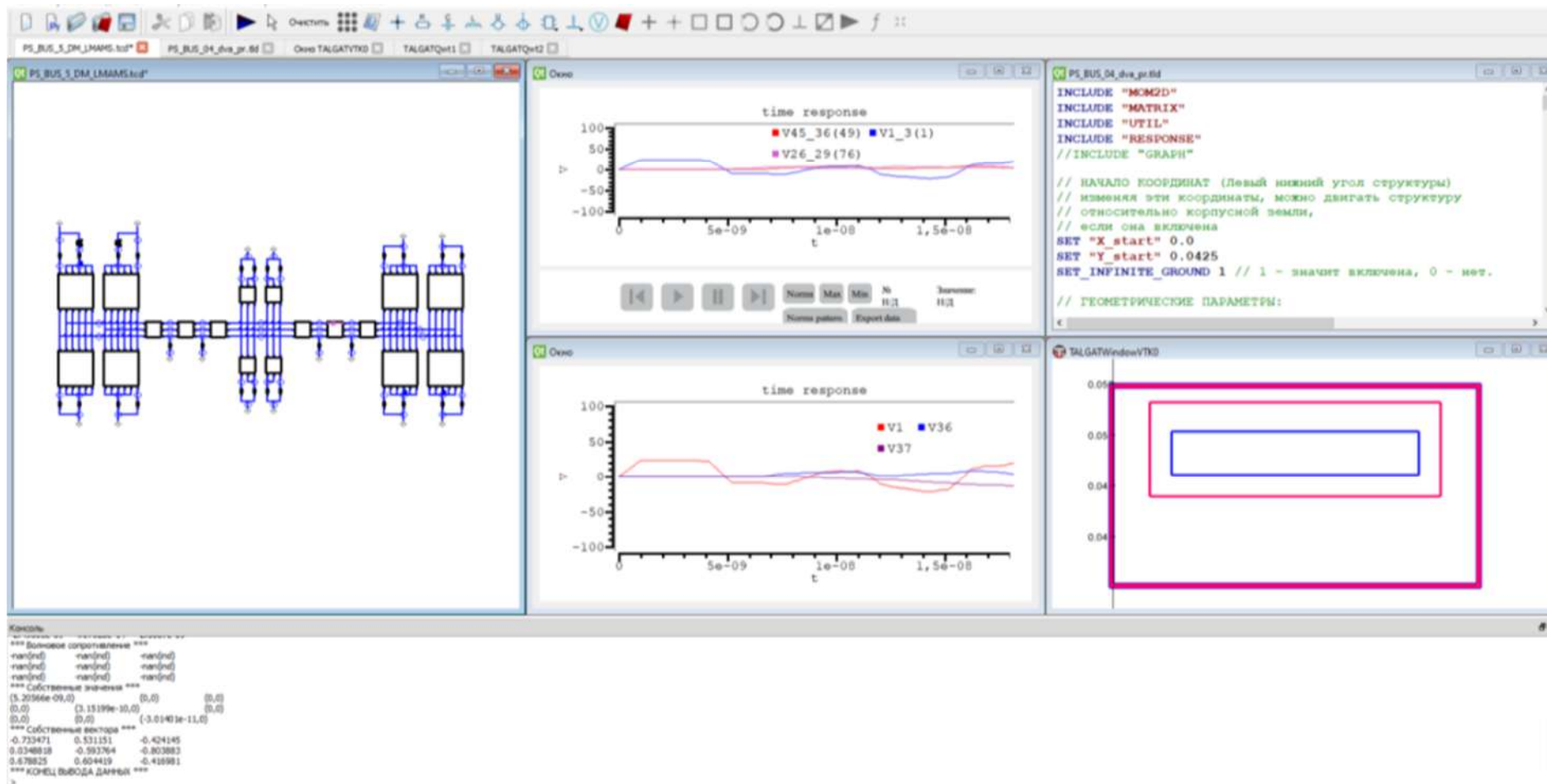


Рисунок 1.27 – TUSUR.EMC: интерфейс визуального клиента системы

Помимо отображения результатов проектирования или моделирования, визуальный клиент позволяет вызывать текстовые управляющие команды из текущего активного окна. Это дает возможность заменить вызов команд из командной строки на одно нажатие пункта «Запуск» в меню «TUSUR.EMC» или нажатие кнопки F5. После этого последовательность команд текущего активного окна обрабатываются так же, как если бы они были введены построчно в командной строке. Результат исполнения последовательности команд может выводиться в командную консоль (по умолчанию) или в новое окно, создаваемое после окончания обработки всех команд (если в меню «TUSUR.EMC» выбран пункт «Вывод в новое окно»).

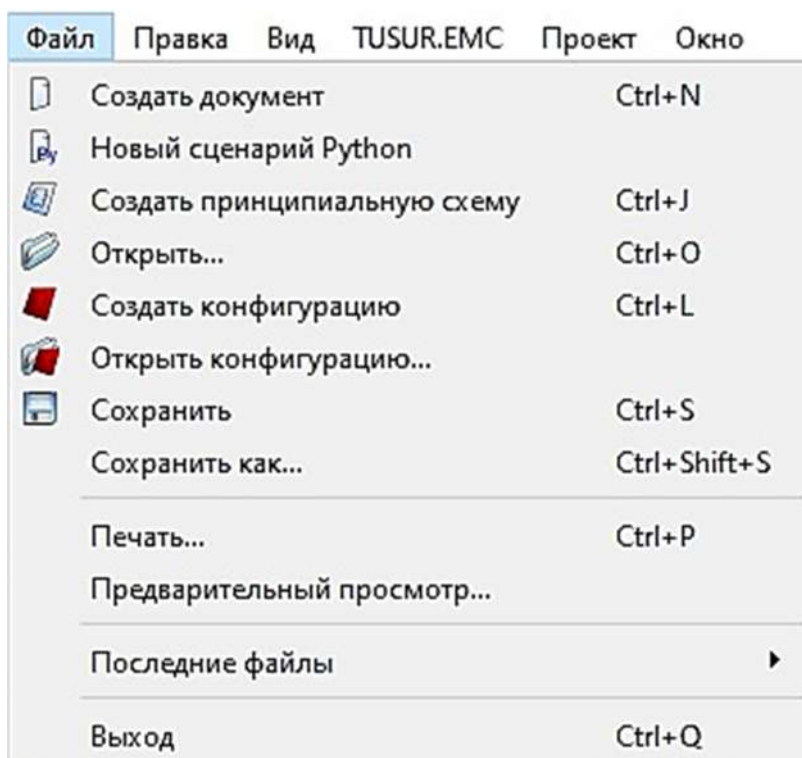
Меню «Файл» состоит из следующих пунктов (рисунок 1.28,*a*):

- создание нового документа на языке TALGAT\_Script;
- создание нового документа на языке Python;
- открытие нового окна для создания принципиальных электрических схем;
- вывод диалогового окна для открытия существующего файла скрипта;
- открытие нового окна для создания 2D-конфигурации поперечного сечения;
- вывод диалогового окна для открытия существующей 2D-конфигурации поперечного сечения;
- сохранение текущего документа;
- сохранение текущего документа под другим именем;
- отправка текущего документа на печать;
- предварительный просмотр текущего документа с учетом параметров страницы;
- список последних ранее открытых файлов;
- завершение работы с системой (если при этом ядром системы выполняются вычисления, будет выдан запрос на подтверждение выхода из программы).

Меню «Правка» состоит из следующих пунктов (рисунок 1.28,*б*):

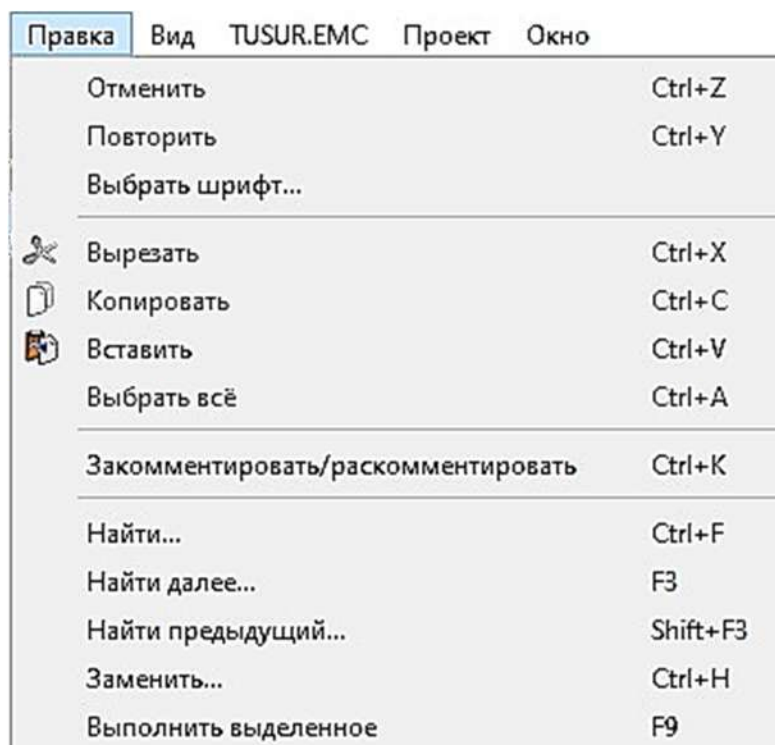
- отменить последнюю операцию редактирования;

- повторить последнюю отмененную операцию редактирования;
- вывести диалоговое окно для изменения широкого списка параметров шрифта;
- вырезать выделенный текст;
- копировать выделенный текст;
- вставить текст из буфера обмена;
- выделить весь текст в активном окне;
- закомментировать/раскомментировать выделенный текст для его учета или не учета при выполнении скрипта;
- вывести диалоговое окно поиска;
- перейти к следующему результату поиска;
- перейти к предыдущему результату поиска;
- вывести диалоговое окно замены;
- запустить выделенный участок скрипта.



*a*

Рисунок 1.28 – TUSUR.EMC:  
 виды меню «Файл» (a) и «Правка» (б)  
 (окончание см. на с. 35)



б

Рисунок 1.28 – Окончание (начало см. на с. 34)

Меню «Вид» состоит из следующих пунктов (рисунок 1.29,а):

- перейти на темную тему оформления интерфейса системы;
- показать или скрыть панель инструментов;
- показать или скрыть панель консоли;
- показать или скрыть панель состояния;
- показать или скрыть панель проектов;
- показать или скрыть панель физических/виртуальных дисков в текущей файловой системе;
- масштабировать окна файла скрипта;
- показать или скрыть панель рисования;
- показать или скрыть подписи элементов принципиальных электрических схем;
- показать или скрыть значения некоторых элементов принципиальных электрических схем;
- вывести панель, содержащую созданные переменные с возможностью их редактирования.

Меню «TUSUR.EMC» состоит из следующих пунктов (рисунок 1.29,б):

- выполнение скрипта в активном окне;
- включение и отключение подсветки синтаксиса;
- включение и отключение автозавершения команды (по нажатию сочетания клавиш CTRL + пробел);
- включение и отключение автоматического перевода кода из TALGAT\_Script в Python при выполнении скрипта в активном окне;
- переключение вывода результатов вычислений из командной панели (по умолчанию) в новое окно;
- запрет вывода окна исключений (сообщения об ошибках выводятся вместе с результатами вычислений);
- включение и отключение сохранения всех активных вкладок;
- включение и отключение сохранения исполняемого скрипта;
- выбор языка, на котором будет сформирован и выполнен скрипт (интерпретатор TALGAT\_Script или интерпретатор Python);
- выполнение очистки консольного окна.

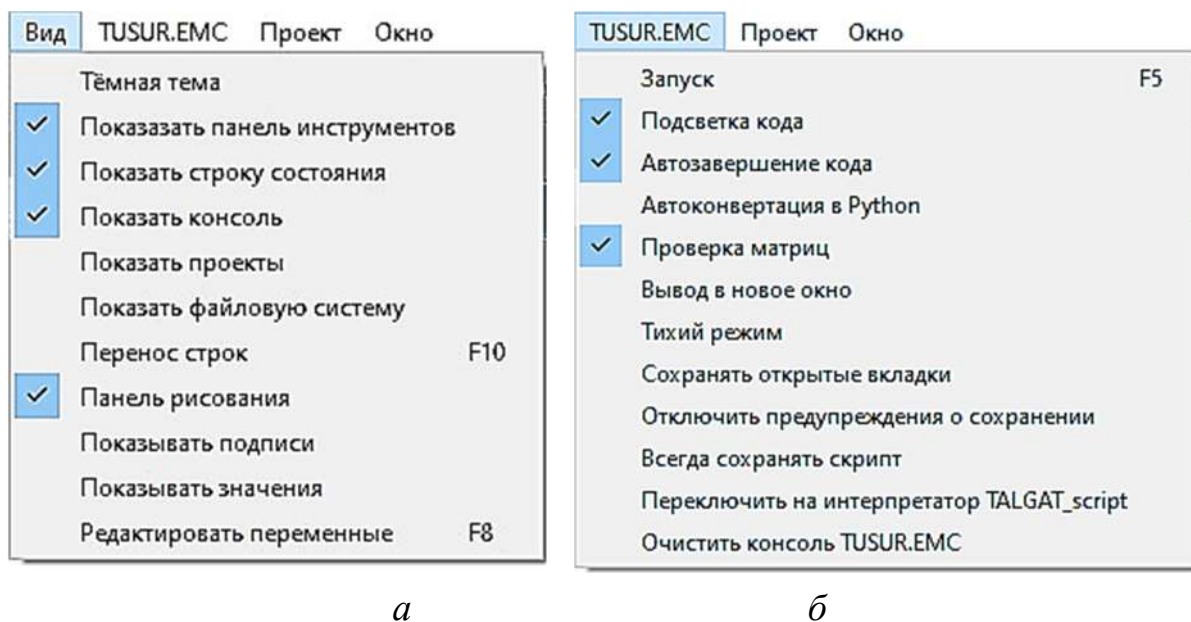


Рисунок 1.29 – TUSUR.EMC: виды меню «Вид» (а) и «TUSUR.EMC» (б)

Меню «Проект» состоит из следующих пунктов (рисунок 1.30,а):

- вывод диалогового окна для открытия нового проекта;
- открытие нового окна со списком доступных модулей для моделирования и оптимизации;
- добавление дополнительных файлов к проекту.

Меню «Окно» состоит из следующих пунктов (рисунок 1.30,б):

- закрыть текущее окно;
- закрыть все открытые окна;
- разместить все открытые окна в виде мозаики;
- разместить все открытые окна в виде каскада;
- сделать активным следующее окно;
- сделать активным предыдущее окно.

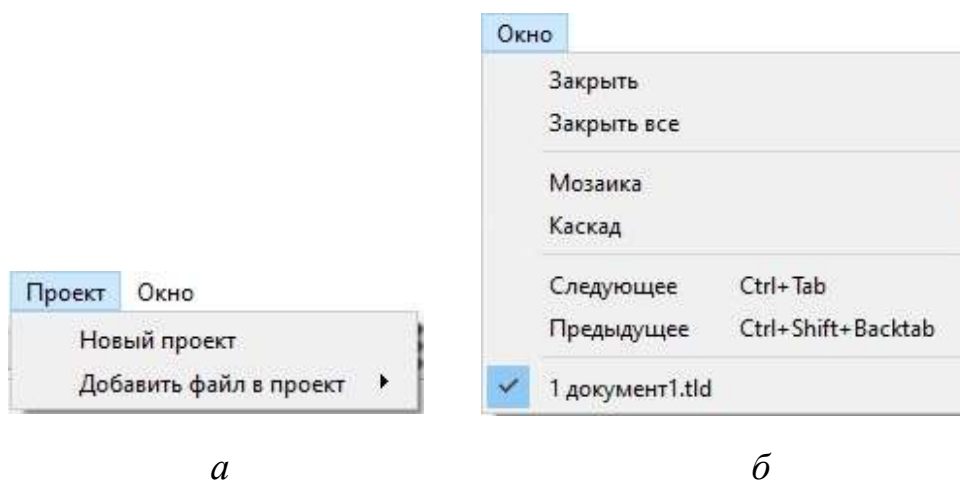


Рисунок 1.30 – TUSUR.EMC: виды меню «Проект» (а) и «Окно» (б)

Приведем наиболее важные особенности работы в системе, которые обеспечивают все этапы анализа и оптимизации двумерных конфигураций проводников и диэлектриков.

В системе TUSUR.EMC есть два способа создания топологии широкого класса элементов СВЧ-устройств и печатных плат. Первый из них состоит в графическом создании топологии. На панели инструментов системы есть блок элементов (кнопок), который дает возможность создавать топологию с применением встроенных в систему графических средств (рисунок 1.31). Данный инструментарий

включает в себя кнопки отрисовки проводников и диэлектриков по точкам с помощью отрезков линии либо создания замкнутых границ структур с помощью прямоугольников и окружностей.



Рисунок 1.31 – TUSUR.EMC:  
блок кнопок для создания 2D-топологии

Для графического создания топологии необходимо нажать на кнопку конфигуратора «NewConfiguration» в верхней части экрана, после чего станет доступна область графического редактора. С помощью блока элементов в верхней части экрана выполняется отрисовка проводников и диэлектриков отрезками линии, прямоугольниками и окружностями (для диэлектрика используются кнопки – «Dielectric», «RectangularDielectric» и «RoundDielectric», а для проводника – «Conductor», «RectangularConductor» и «RoundConductor»). Также с помощью элементов блока выполняется настройка шага сетки (с помощью кнопки «SellSize») и отрисовка границ опорного проводника (с помощью кнопки «GroundLine»). Для установки частоты, для которой производится вычисление параметров структуры, используется кнопка «SetFrequency».

После создания топологии и нажатия на кнопку «Create configuration code» появляется диалоговое окно, в котором пользователь может задать значения относительной диэлектрической проницаемости диэлектриков структуры, количество сегментов и прочие параметры. Аналогично осуществляется выбор RLCG-параметров, которые нужно вычислить ( $C_0$ ,  $C$ ,  $L_0$ ,  $L$ ,  $R$ ,  $CG$  и  $CQ$ ). Специфика их вычисления будет описана ниже. Затем генерируется код для создания данной конфигурации структуры с заданными параметрами поперечного сечения и вычисления ее погонных параметров. Полученная конфигурация может быть сохранена в одном из двух форматов: сценарий, описывающий границы конфигурации, и сценарий, описывающий конфигурацию послойно. Отметим, что при использовании графического способа модули системы,

которые необходимы для описания топологии, определяются автоматически при генерации кода.

Пример созданных при помощи данных кнопок конфигураций показан на рисунке 1.32. При создании геометрии проводника или диэлектрика также открывается окно с настройками местоположения элемента конфигурации и задания параметров диэлектриков (рисунок 1.33).

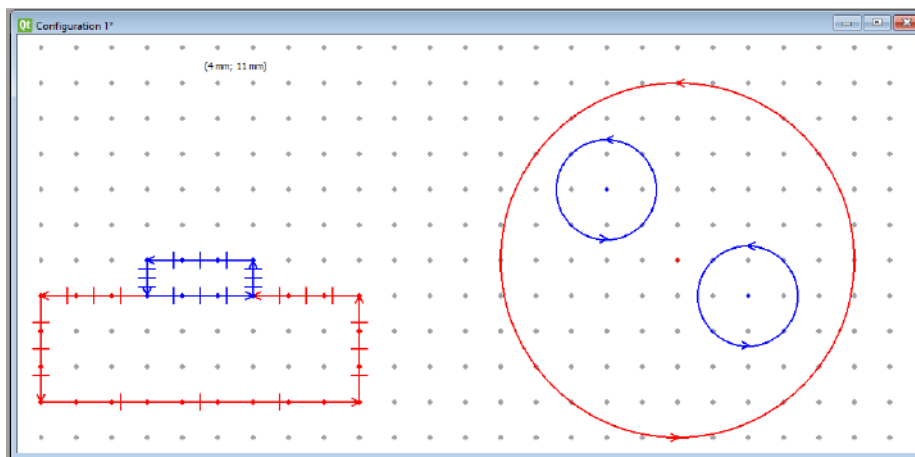


Рисунок 1.32 – TUSUR.EMC: пример созданных 2D-топологий

Для настройки параметров проводника сначала надо выбрать его в поле графического редактора. Его местоположение по горизонтали обеспечивают параметры «x1» и «x2», а по вертикали – «y1» и «y2». В полях « $\epsilon_r$ » и « $\tan$ » задаются относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика и его тангенс угла диэлектрических потерь (для пространства вокруг проводника).

Для задания параметров диэлектрика надо выбрать конкретный отрезок границы диэлектрика. В поле « $\epsilon_r^+$ » задается относительная диэлектрическая проницаемость справа от отрезка, а в поле « $\epsilon_r^-$ » – слева. Этот же принцип используется для задания тангенса угла диэлектрических потерь. То же самое нужно повторить для всех границ диэлектриков. Кроме того, в поле «Subintervals number» можно задать сетку для каждого элемента отдельно. Пример окна настройки параметров отрезка диэлектрической границы показан на рисунке 1.33.

Результат исполнения сгенерированного кода для одиночной линии из рисунка 1.32 показан на рисунке 1.34.

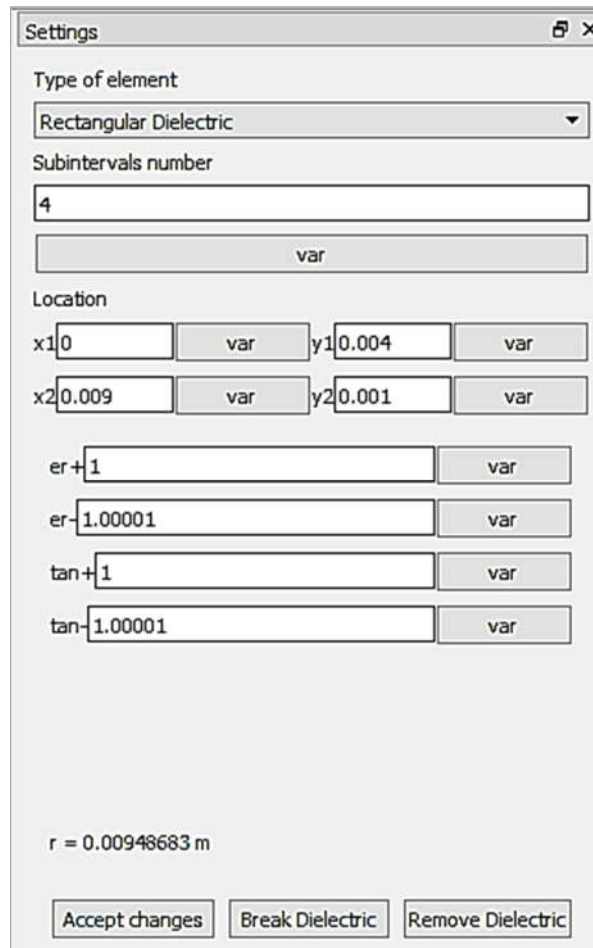


Рисунок 1.33 – TUSUR.EMC: окно настроек параметров границы диэлектрика

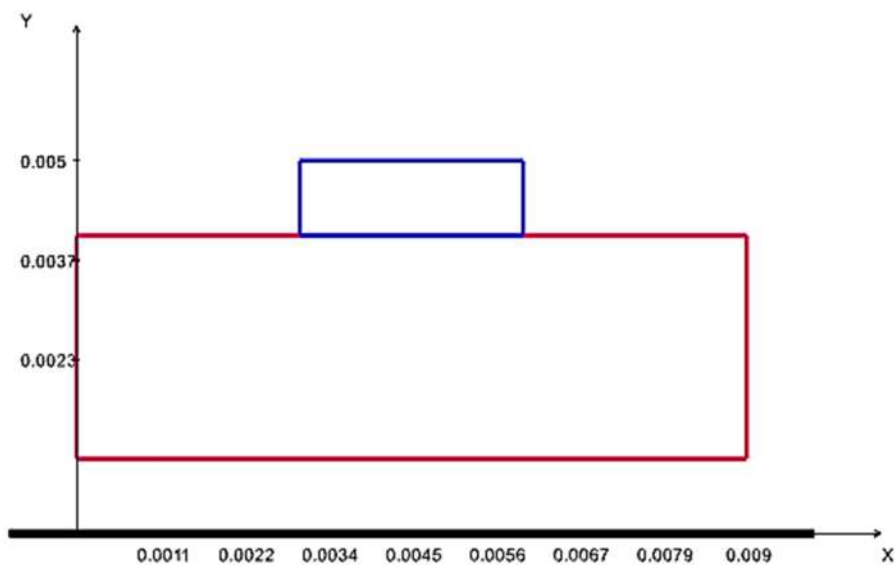


Рисунок 1.34 – TUSUR.EMC: однопроводная линия передачи, построенная в результате исполнения сгенерированного кода

Второй способ создания топологии в системе TUSUR.EMC заключается в применении графических примитивов, которые задают текстовые команды системы. Это позволяет разрабатывать модели топологий сложной формы. Для создания модели двумерной конфигурации нужно ввести текстовые команды в рабочее поле редактора (путем создания нового документа) или импортировать созданный ранее документ с расширением файла \*.tld для его редактирования.

Задание начальных условий (геометрические размеры, относительные диэлектрические и магнитные проницаемости используемых материалов и сред) выполняется в окне редактора при помощи ввода текстовых команд. Соответствующие текстовые команды вводятся после списка подключенных модулей проекта (рисунк 1.35). Значение параметра задается командой «SET».

При построении топологии структуры сначала создаются границы поперечного сечения проводника с использованием команды «CONDUCTOR» (для опорных проводников структуры – «CONDUCTOR\_GROUNDED»), а для диэлектрических – «DIELECTRIC». Этим командам не передаются какие-либо параметры. Отрисовка границ выполняется командами «LINE» и «LINETO». Для «LINE» необходимо указать координаты ( $x$ ,  $y$ ) начальной и конечной точек отрезка, а для «LINETO» достаточно указать лишь координаты конечной точки (команда продолжает отрисовку отрезка с последней точки). Для удобства многовариантного моделирования координаты могут быть заданы в виде переменных, введенных в коде ранее, или математических выражений. При построении границ необходимо учитывать, что создаваемые диэлектрические границы (отображаемые визуальным клиентом системы красным цветом) не должны накладываться (или пересекать) на уже созданные проводниковые границы (отображаемые визуальным клиентом системы синим цветом). Для любой магнитодиэлектрической границы структуры должны быть заданы по две пары значений относительных диэлектрической ( $\epsilon_r$ ) и магнитной ( $\mu_r$ ) проницаемостей с помощью команд «ER\_PLUS», «ER\_MINUS», «MU\_PLUS» и «MU\_MINUS» (MINUS для задания  $\epsilon_r$  ( $\mu_r$ ) при



обходе подынтервала от начала к концу слева, PLUS – справа). При этом не допускается равенство значений «ER\_PLUS» и «ER\_MINUS», поскольку это соответствует случаю, когда граница раздела двух сред отсутствует. Если нужно учесть потери в диэлектриках, то также необходимо задание тангенса угла диэлектрических потерь командами «SET\_TAN\_DELTA\_PLUS» и «SET\_TAN\_DELTA\_MINUS». Помимо создания опорного проводника конечных геометрических размеров с помощью команды CONDUCTOR\_GROUNDED, в системе есть возможность создания структур с бесконечной опорной плоскостью (или плоскостью земли). Под этим понимается идеально проводящая плоскость при  $y = 0$ . Для ее задания используется команда «SET\_INFINITE\_GROUND» с заданием единственного параметра равным 1. Если значение параметра равно 0, это соответствует отсутствию бесконечной плоскости земли. После того как заданы границы поперечного сечения структуры, полученную конфигурацию нужно сохранить в переменную командой «GET\_CONFIGURATION\_2D». На рисунке 1.36 приведен пример кода для создания геометрической модели двухпроводной топологии с использованием примитивов по заданным параметрам.

Для визуализации созданной структуры ее надо вызвать из переменной командой «DRAW\_CONFIGURATION». При этом границы диэлектриков будут отображаться линиями красного цвета, а проводников – синего (опорных проводников – темно-синего, а бесконечной плоскости земли – черного). На рисунке 1.37 приведен пример визуализации конфигурации двухпроводной структуры с бесконечной опорной плоскостью.

Управление параметрами визуализации осуществляется с помощью горячих клавиш после нажатия левой кнопки мыши на поле визуализации. Горячие клавиши: r – сменить текущий проводник; e – сменить режим отображения относительной диэлектрической проницаемости (6 режимов); s – показать/скрыть визуализацию подынтервалов на границах структуры; n – показать/скрыть сетку координат; l – сменить режим отображения границ (2 режима: линии переменной толщины, линии постоянной толщины); a – скрыть/показать оси координат; q – включить/выключить режим визуализации плотности заряда; c – показать/скрыть цветовую шкалу

плотности зарядов (каждому цвету соответствует значение плотности и этим цветом окрашен соответствующий участок); +/- – приблизить/отдалить визуализацию (другой способ – использовать колесо мыши); Shift и +/- – увеличить/уменьшить толщину границ поперечного сечения конфигурации.

```

SET_INFINITE_GROUND 1

CONDUCTOR
  SET_ER_PLUS ErC
  SET_MU_PLUS MuC
  SET_TAN_DELTA_PLUS TdC
  LINE d hc PLUS d w hc
  SET_ER_PLUS ErAir
  SET_MU_PLUS MuAir
  SET_TAN_DELTA_PLUS TdAir
  LINETO PLUS d w PLUS hc t
  LINETO d PLUS hc t
  LINETO d hc

CONDUCTOR
  SET_ER_PLUS ErC
  SET_MU_PLUS MuC
  SET_TAN_DELTA_PLUS TdC
  LINE PLUS PLUS d w s hc PLUS PLUS PLUS d w s w hc
  SET_ER_PLUS ErAir
  SET_MU_PLUS MuAir
  SET_TAN_DELTA_PLUS TdAir
  LINETO PLUS PLUS PLUS d w s w PLUS hc t
  LINETO PLUS PLUS d w s PLUS hc t
  LINETO PLUS PLUS d w s hc

DIELECTRIC
  SET_ER_PLUS ErC
  SET_MU_PLUS MuC
  SET_TAN_DELTA_PLUS TdC
  SET_ER_MINUS ErAir
  SET_MU_PLUS MuAir
  SET_TAN_DELTA_MINUS TdAir
  LINE 0. hc d hc
  LINE PLUS d w hc PLUS PLUS d w s hc
  LINE PLUS PLUS PLUS d w s w hc PLUS PLUS PLUS PLUS d w s w d hc

SET "conf_ig" GET_CONFIGURATION_2D

```

Рисунок 1.36 – TUSUR.EMC: пример кода для создания геометрической модели структуры с использованием примитивов

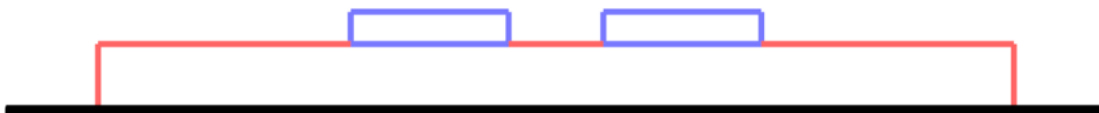


Рисунок 1.37 – TUSUR.EMC: визуализация поперечного сечения двухпроводной структуры с бесконечной плоскостью земли

На рисунке 1.38 приведены варианты визуализации модели структуры при включенном отображении сегментации (количество подынтервалов на границах) и значения относительных

диэлектрических проницаемостей диэлектриков. Они используются для оценки корректности задания параметров.

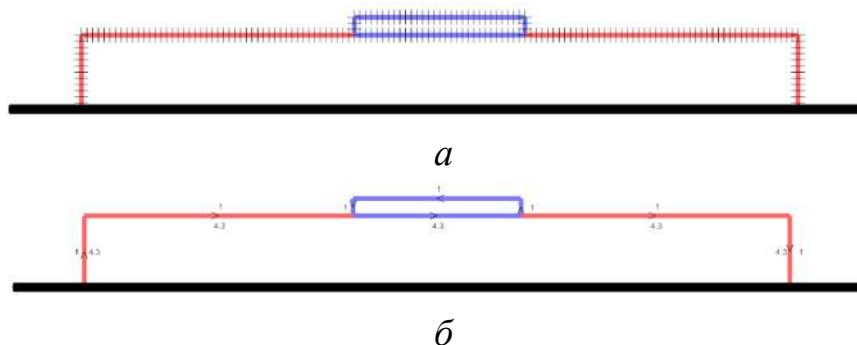


Рисунок 1.38 – TUSUR.EMC: отображение сегментации (а) и значений относительной диэлектрической проницаемости (б) модели одиночной структуры

При наведении курсора мыши на участок конфигурации информация о границе будет отображена рядом с курсором в следующем формате: номер границы (число подынтервалов на этой странице, номер подынтервала, на который указывает курсор). Для проводящих границ также будет указано, заземлен ли проводник (1 – если заземлен, 0 – если не заземлен). Если включен режим отображения распределения плотности заряда на границах, то информации отображается в следующем формате: номер подынтервала, на который указывает курсор (значение плотности заряда на этом подынтервале).

В системе TUSUR.EMC также может быть создан набор настраиваемых пользователем моделей базовых элементов для синтеза СВЧ-устройств и печатных узлов. Такие элементы можно создать с помощью текстовых команд скриптового языка системы. Важно, что созданный скрипт может быть сохранен в базе данных для дальнейшего использования.

Отметим некоторые модели связанных линий передачи, которые можно построить в системе: обращенные полосковые линии (ОПЛ), подвешенные полосковые линии (ППЛ), подвешенная и обращенная полосковые линии (ПОПЛ) на печатной плате без покрытий и с покрытиями (без лака и с лаком). Поперечные сечения линий показаны на рисунках 1.39 и 1.40, где  $t$  и  $w$  – толщина

и ширина сигнальных проводников,  $s$  – расстояние между ними,  $d = 2w$  – расстояние от проводника до края структуры,  $h_1$  и  $h_2$  – толщины диэлектрических слоев 1 и 2 соответственно,  $\epsilon_{r1}$  и  $\epsilon_{r2}$  – относительные диэлектрические проницаемости диэлектрических слоев 1 и 2,  $h_3$  и  $\epsilon_{r3}$  – толщина и относительная диэлектрическая проницаемость покрытия.

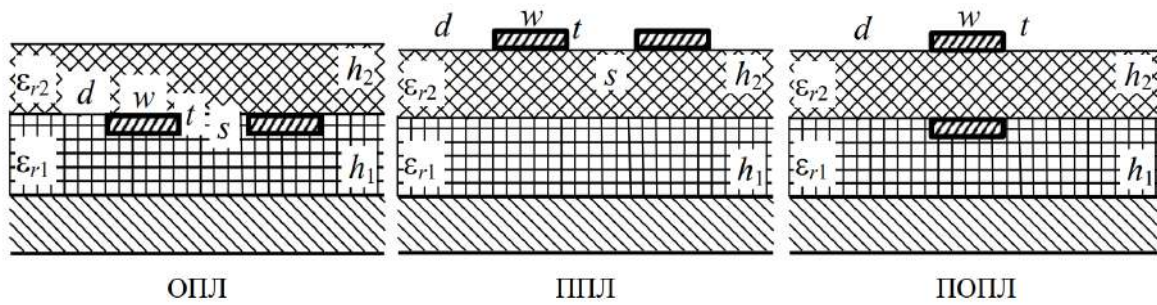


Рисунок 1.39 – Поперечные сечения ОПЛ, ППЛ и ПОПЛ без покрытия

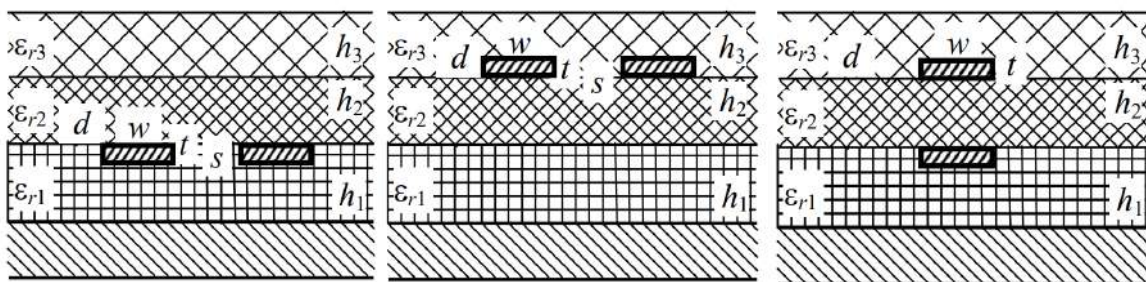
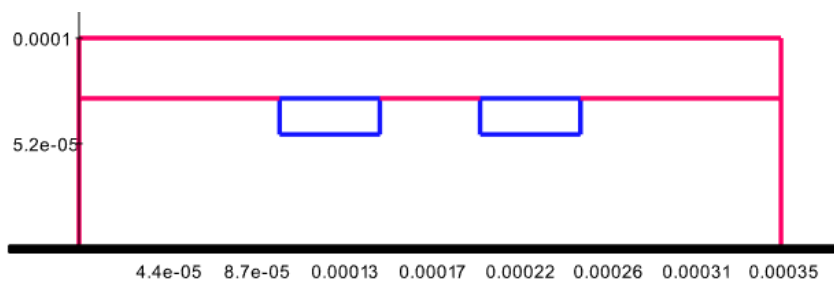


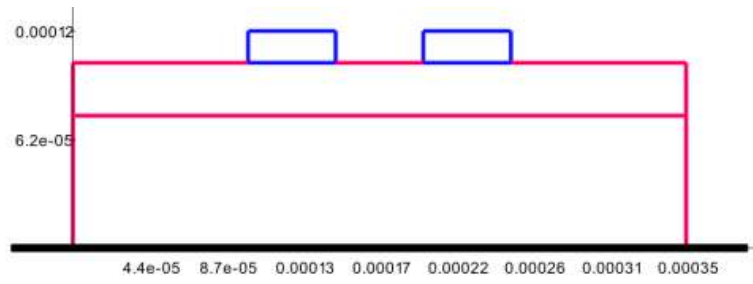
Рисунок 1.40 – Поперечные сечения ОПЛ, ППЛ и ПОПЛ с покрытием

На рисунках 1.41 и 1.42 представлены поперечные сечения этих линий передачи, построенные в системе TUSUR.EMC.

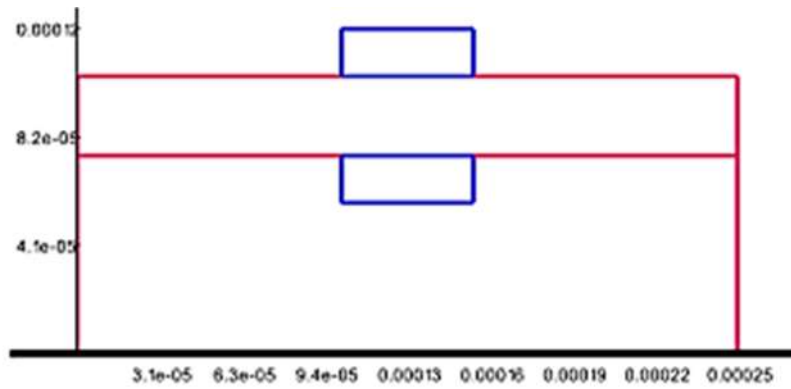


*a*

Рисунок 1.41 – TUSUR.EMC: поперечные сечения ОПЛ (*a*), ППЛ (*б*) и ПОПЛ (*в*) без покрытия (окончание см. на с. 47)

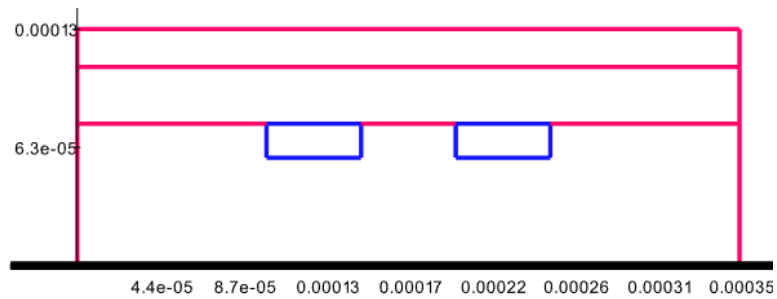


*б*

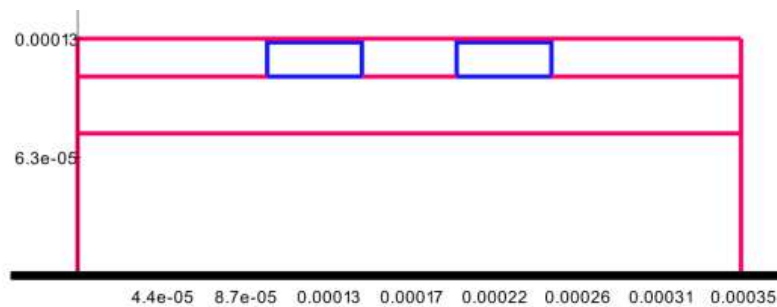


*в*

Рисунок 1.41 – Окончание (начало см. на с. 46)

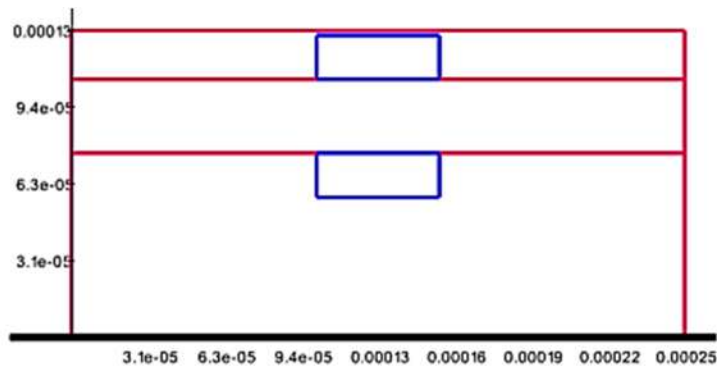


*а*



*б*

Рисунок 1.42 – TUSUR.EMC: поперечные сечения ОПЛ (а), ППЛ (б) и ПОПЛ (в) с покрытием (окончание см. на с. 48)



в

Рисунок 1.42 – Окончание (начало см. на с. 47)

Представленный инструментарий позволяет создавать конфигурации повышенной сложности, в которых границы проводников и диэлектриков могут иметь любую ориентацию. Так, на рисунке 1.43 показано поперечное сечение структуры с исполнением опорного проводника внутри диэлектрика в центре структуры.



Рисунок 1.43 – TUSUR.EMC: структура с исполнением опорного проводника внутри диэлектрика в центре структуры

На рисунке 1.44 приведено поперечное сечение структуры с опорными проводниками в виде боковых полигонов.



Рисунок 1.44 – TUSUR.EMC: структура с исполнением опорных проводников в виде боковых полигонов

На рисунке 1.45 изображено поперечное сечение структуры с опорным проводником, имитирующим внешний экран. Опорные проводники снизу и сверху структуры (они соединены по бокам).

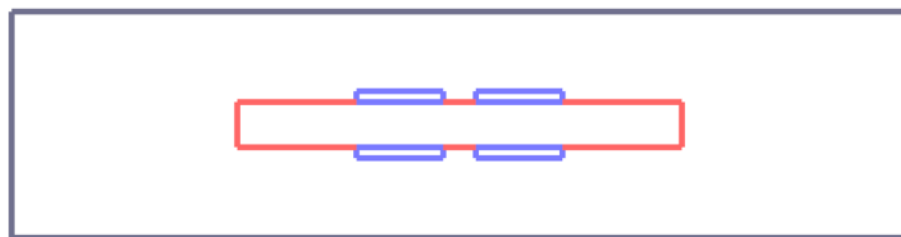


Рисунок 1.45 – TUSUR.EMC: структура с исполнением опорного проводника в виде внешнего экрана

На рисунке 1.46 представлено поперечное сечение структуры с четырьмя опорными слоями, где опорные проводники разных слоев соединяются между собой перемычкой.

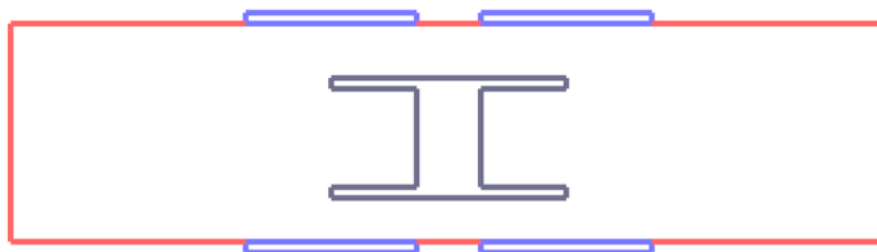


Рисунок 1.46 – TUSUR.EMC: структура с четырьмя проводящими слоями и опорными проводниками, соединенными перемычкой

На рисунке 1.47 приведено поперечное сечение структуры с четырьмя проводящими слоями, один из которых опорный.



Рисунок 1.47 – TUSUR.EMC: структура с четырьмя проводящими слоями, один из которых опорный (без перемычек)

На рисунке 1.48 показано поперечное сечение 5-проводной линии передачи с закругленными торцами проводников.

В системе TUSUR.EMC имеются команды для создания конфигураций с круговым сечением (рисунок 1.49).

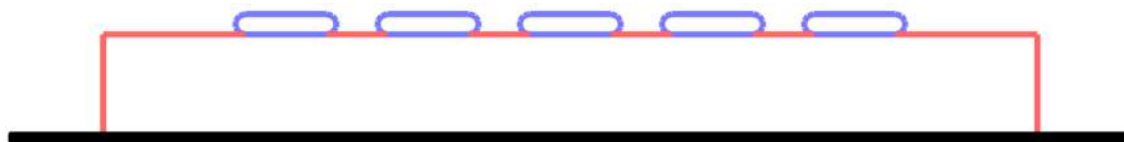


Рисунок 1.48 – TUSUR.EMC: 5-проводная линия передачи с закругленными торцами проводников

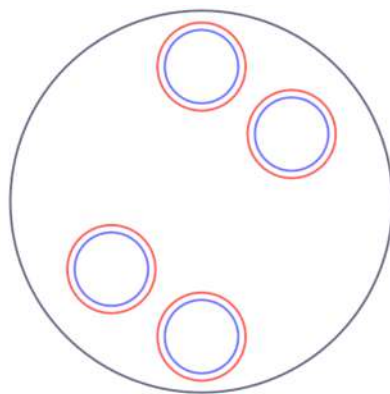


Рисунок 1.49 – TUSUR.EMC: пример кругового поперечного сечения структуры с опорным проводником снаружи

Окружность создается при помощи команды «CIRCLE». Ее первые два параметра – это координаты центра окружности ( $x, y$ ), а третий – радиус окружности. Обход окружности всегда происходит против часовой стрелки, поэтому «ER\_PLUS» и «MU\_PLUS» всегда снаружи окружности, а «ER\_MINUS» и «MU\_MINUS» – всегда внутри. Эту особенность надо учитывать при задании магнитной и диэлектрической проницаемостей, а также тангенса угла диэлектрических потерь. Затем аналогичным образом создается опорный проводник.

Для дальнейшего моделирования топологии вычисляется ее временной или частотный отклик. Для этого нужно вычислить погонные параметры. Электрические характеристики, изменяющиеся вдоль отрезка конфигурации длиной  $dx$ , характеризуют матрицы погонных параметров  $\mathbf{R}$  (Ом/м),  $\mathbf{L}$  (Гн/м),  $\mathbf{C}$  (Ф/м) и  $\mathbf{G}$  (См/м). Их вычисление также можно выполнить с помощью текстовых команд модуля «MOM2D» системы. Для вычисления матриц  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{C}$  и  $\mathbf{G}$  используется емкостной решатель, поскольку матрицы  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{G}$  рассчитываются по схожему алгоритму. Сначала вычисляется матрица  $\mathbf{C}_0$  для конфигурации с воздушным заполнением (диэлектрические

границы удалены), а после, уже на ее основе, вычисляются матрицы  $L$ ,  $C$  и  $G$ . Для вычисления матрицы  $C$  нужно сначала сформировать матричное уравнение из параметров подынтервалов (матрицу  $SMN$ ) с помощью команды « $SMN\_C$ ». Ей передается сохраненная ранее конфигурация структуры. Затем с помощью команды « $CALCULATE\_C$ » вычисляется матрица  $C$ , которая состоит из суммы векторов распределения плотности заряда на границах структуры. С помощью команды « $ECHO$ » можно вывести на печать полученную матрицу (для этого нужно ее сохранить в переменной с помощью команды « $SET$ »).

Как отмечено выше, для вычисления матриц  $L$ ,  $C$  и  $G$  нужен емкостной решатель или, другими словами, матрица  $C$  является основной, а остальные – производными от нее. Поэтому отметим ее особенности, позволяющие судить о точности расчета. Во-первых, матрица  $C$  должна быть симметричной относительно главной диагонали. Но из-за различия в базисных и тестовых функциях, дающего ошибки округления, небольшая асимметрия допустима [5]. Во-вторых, она должна быть матрицей с диагональным преобладанием, т. е. каждый диагональный элемент матрицы должен быть по абсолютному значению больше суммы всех остальных элементов соответствующей строки (столбца) [6]. Это вытекает из необходимости физического представления схемной емкостной матрицы (матрицы собственных и взаимных частичных емкостей), используемой, например, в SPICE-моделировании. В-третьих, ее диагональные элементы должны быть положительными, а внедиагональные – отрицательными [7]. В-четвертых, собственные значения матрицы должны быть положительными (матрица должна быть положительно определенной). Наконец, для многопроводных линий передачи, одинаковые проводники которых расположены над плоскостью земли, значения внедиагональных элементов, по мере удаления от диагонального, должны уменьшаться. Например, значительная асимметрия матрицы из-за неравенства внедиагональных элементов может быть вызвана некачественной расчетной сеткой [8]. Присутствие положительных элементов и отсутствие диагонального преобладания в матрице может быть следствием недостаточной точности выбранного метода расчета при наличии

в структуре комбинации сильных и слабых электростатических связей проводников. Другой причиной могут быть большие ошибки округления из-за плохой обусловленности матричного уравнения [9]. Последовательная проверка этих свойств позволяет избежать дальнейших «нефизичных» расчетов.

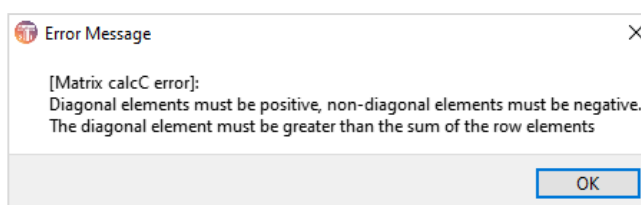
Указанные свойства характерны и для матрицы **G**, поэтому с помощью аналогичных проверок подтверждается корректность ее вычисления. Матрицы **L** и **R** имеют меньше особенностей. Проверка на симметричность матриц и неотрицательность (для **R**) или положительность (для **L**) элементов является основной.

В системе TUSUR.EMC реализованы инструменты контроля свойств вычисленных матриц. Результат их работы на примере экранированной 4-проводной полосковой линии передачи показан на рисунке 1.50. Видно, что алгоритм отработал корректно, а система сообщила пользователю об уровне асимметрии матриц.

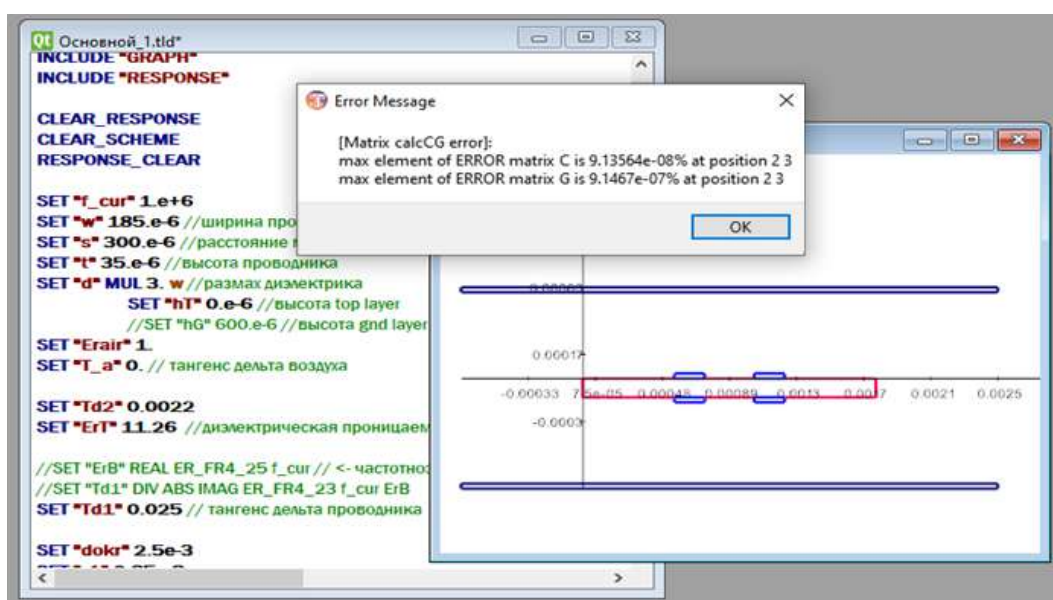
Отметим особенности вычисления временного (или частотного) отклика структуры. Прежде всего нужно задать граничные условия (рисунок 1.51). Как и прочие операции, это выполняется в окне редактора при помощи ввода текстовых команд и сводится к описанию конечных нагрузок на концах моделируемой схемы соединений структуры (например, согласованная, псевдосогласованная, произвольная, режим холостого хода, режим короткого замыкания). Для этого используется команда «RESISTOR». Ей нужно указать номера узлов, между которыми он включен, и значение сопротивления. Также могут быть заданы емкостная (команда «CAPACITOR») и индуктивная (команда «INDUCTANCE») нагрузки на концах проводников.

После ввода граничных условий осуществляется выбор и подключение источника входного воздействия к схеме. В системе TUSUR.EMC доступно задание произвольного источника воздействия, подключение встроенных источников (например, Гауссов импульс, синусоидальный, экспоненциальный и сверхкороткий импульс), а также импорт внешних воздействий в формате \*.txt. Импульсное воздействие (рисунок 1.52) 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 вторичное воздействие молнии и сверхкороткий импульс помехи. Синусоидальное воздействие прежде всего используется для имитации формы сигналов тока и напряжения, вызванных естественными резонансами. Экспоненциальное воздействие главным образом используется для имитации формы сигналов тока и напряжения электростатических разрядов. Гауссов импульс применяется для имитации формы однополярного сверхкороткого импульса.



*a*



*б*

Рисунок 1.50 – TUSUR.EMC: примеры информационного окна, содержащего сообщение об ошибке (несоответствии правилам) (*a*) и проверке точности расчета матриц (*б*)

После указания граничных условий вводятся текстовые команды, задающие схемы и узлы, с которыми соединены проводники в начале и на конце линий (рисунок 1.53). При создании элемента «Transmission line» доступен параметр – количество сегментов. Установка этого параметра осуществляется через шестой аргумент команды «TRANSMISSION\_LINE\_PARAMETERS».

**Задание резисторов в схеме и их значений**

```

RESISTOR "R1" 1 2 Rvalue
RESISTOR "R2" 0 3 Rvalue
RESISTOR "R3" 0 4 Rvalue
RESISTOR "R4" 0 5 Rvalue
  
```

TRANSIENT\_ANALYSIS\_SETUP "step\_time" 1.e-12  
 TRANSMISSION\_ANALYSIS\_SETUP "count\_degree" 14

```

RESISTOR "R1" 1 2 Rvalue
RESISTOR "R2" 0 3 Rvalue
RESISTOR "R3" 0 4 Rvalue
RESISTOR "R4" 0 5 Rvalue
  
```

```

SOURCE "V1" 0 1
SIMULATION_SOURCES_VPULSE 0. 1. 0. TDS TDS TDD 0.

TRANSMISSION_LINE "tl1" GET_MATRIX_ROWS mL 2 3 4 5
TRANSMISSION_LINE_PARAMETERS mL mC mR mG dLength

T RESPONSE f0
END_CREATE_KEYWORD //ResponseMeander

CREATE_KEYWORD "plotMeander"
ADD_XY_DATA c ts v1 COMPLEX_PLOT_REAL
SET_PLOT_COLOR 0. 0. 0.
SET_PLOT_LABEL LINE_TO_STRING Vgen

ADD_XY_DATA c ts v2 COMPLEX_PLOT_REAL
SET_PLOT_COLOR 0. 0. 1.
SET_PLOT_LABEL LINE_TO_STRING Vinut

ADD_XY_DATA c ts v3 COMPLEX_PLOT_REAL
SET_PLOT_COLOR 0. 1. 0.
SET_PLOT_LABEL LINE_TO_STRING Voutput

SET_X_TITLE LINE_TO_STRING t
SET_Y_TITLE LINE_TO_STRING v
SET_PLOT_RANGE 0. 0. 5.e-9 0.
PLOT_XY
END_CREATE_KEYWORD //plot1

calculate
ResponseMeander
plotMeander

SET "ncond" 2
  
```

Ln 88, Col 58: INS

Рисунок 1.51 – TUSUR.EMC: пример задания режима согласования моделируемой схемы соединений

The image shows a screenshot of a simulation software interface. The main window displays a code editor with the following text:

```

SOURCE "V1" 0 1
SIMULATION SOURCES VPULSE 0. 1. 0. TDS TDS TDD 0.

CLEAR SCHEME
RESPONSE CLEAR
CLEAR RESPONSE

TRANSIENT ANALYSIS SETUP "step_time" 1.e-12
TRANSIENT ANALYSIS SETUP "count_degree" 14

RESISTOR "R1" 1 2 Rvalue
RESISTOR "R2" 0 3 Rvalue
RESISTOR "R3" 0 4 Rvalue
RESISTOR "R4" 0 5 Rvalue

SOURCE "V1" 0 1
SIMULATION SOURCES VPULSE 0. 1. 0. TDS TDS TDD 0.

TRANSMISSION_LINE "t11" GET_MATRIX_ROWS mL 2 3 4 5
TRANSMISSION_LINE_PARAMETERS mL mC mR mG dLength

T_RESPONSE f0
END_CREATE_KEYWORD //ResponseMeander

CREATE_KEYWORD "plotMeander"
ADD_XY_DATA c ts V1 COMPLEX_PLOT_REAL
SET_PLOT_COLOR 0. 0. 0.
SET_PLOT_LABEL LINE_TO_STRING Vgen

ADD_XY_DATA c ts V2 COMPLEX_PLOT_REAL
SET_PLOT_COLOR 0. 0. 1.
SET_PLOT_LABEL LINE_TO_STRING Vinput

ADD_XY_DATA c ts V3 COMPLEX_PLOT_REAL
SET_PLOT_COLOR 0. 1. 0.
SET_PLOT_LABEL LINE_TO_STRING Voutput

SET_X_TITLE LINE_TO_STRING t
SET_Y_TITLE LINE_TO_STRING v
SET_PLOT_RANGE 0. 0. 5.e-9 0.
PLOT_XY
END_CREATE_KEYWORD //plot1

calculate
ResponseMeander
plotMeander

SET "ncond" 2

```

Two arrows point from the first two lines of code to a text box on the right. The text box contains the following text:

**Задание источника воздействия в схеме.**  
**Импульсный сигнал: SIMULATION SOURCES VPULSE**  
**Vin Vpv tTD tRT tFT tD Period**, где **Vin** - постоянная составляющая, В; **Vpv** - максимальное значение напряжения, В; **tTD** - время задержки, с; **tRT** - длительность переднего фронта, с; **tFT** - длительность заднего фронта, с; **tD** - длительность вершины импульса, с; **Period** - период повторения импульсов, с.

The console window on the right shows the following output:

```

*** Емкостная матрица ***
2.32055e-010 -1.38122e-010
-1.38122e-010 2.32055e-010
*** Матрица погонных индуктивностей ***
3.90343e-007 3.90276e-007
1.000238e-007 3.90276e-007
*** Сопротивление сопротивления ***
50.5516 50.7304
35.7304 50.5516
*** Итого индуктивности ***
6.10562e-009 0.000000e+000

```

Ln 88, Col 58 INS

Рисунок 1.52 – TUSUR.EMC: пример задания импульсного источника входного воздействия

```
TRANSMISSION_LINE "t11" GET_MATRIX_ROWS mL 2 3 4 5
TRANSMISSION_LINE_PARAMETERS mL mC mR mG dLength
```

```
CIRCUIT_SCREEN
RESPONSE_CLEAR
CLEAR_RESPONSE

TRANSIENT_ANALYSIS_SETUP "stop_time" 1.e-12
TRANSIENT_ANALYSIS_SETUP "count_degree" 14

RESISTOR "R1" 1 2 Rvalue
RESISTOR "R2" 0 3 Rvalue
RESISTOR "R3" 0 4 Rvalue
RESISTOR "R4" 0 5 Rvalue

SOURCE "V1" 0 1
SIMULATION_SOURCES_VPULSE 0. 1. 0. TDS TDS TDD 0.
```

```
TRANSMISSION_LINE "t11" GET_MATRIX_ROWS mL 2 3 4 5
TRANSMISSION_LINE_PARAMETERS mL mC mR mG dLength
```

```
T_RESPONSE f0
END_CREATE_KEYWORD //ResponseMeander

CREATE_KEYWORD "plotMeander"
ADD_XY_DATA c ts V1 COMPLEX_PLOT_REAL
SET_PLOT_COLOR 0. 0. 0.
SET_PLOT_LABEL LINE_TO_STRING Vgen

ADD_XY_DATA c ts V2 COMPLEX_PLOT_REAL
SET_PLOT_COLOR 0. 0. 1.
SET_PLOT_LABEL LINE_TO_STRING Vinput

ADD_XY_DATA c ts V3 COMPLEX_PLOT_REAL
SET_PLOT_COLOR 0. 1. 0.
SET_PLOT_LABEL LINE_TO_STRING Voutput

SET_X_TITLE LINE_TO_STRING t
SET_Y_TITLE LINE_TO_STRING V
SET_PLOT_RANGE 0. 0. 5.e-9 0.
PLOT_XY
END_CREATE_KEYWORD //plot1

calculate
ResponseMeander
plotMeander

SET "nocond" 2
```

**TRANSMISSION LINE "t11" N in1 out1 ... inN outN**, где N - количество проводников, а inN - номер узла, с которым соединен проводник N в начале линии и outN - номер узла, с которым соединен проводник N в конце линии. Дополнительно для задания параметров линии передачи используется команда: **TRANSMISSION LINE PARAMETERS L C R G length**, где C - матрица погонных коэффициентов электростатической индукции, L - матрица погонных коэффициентов электромагнитной индукции, G - матрица погонных проводимостей, R - матрица погонных сопротивлений, length - длина отрезка линии.

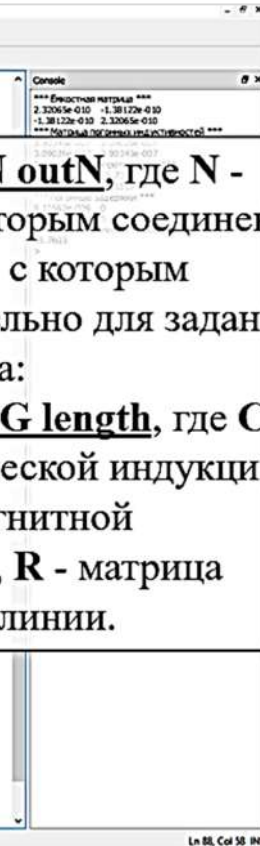


Рисунок 1.53 – TUSUR.EMC: пример задания схемы соединения линии передачи (номеров узлов и погонных параметров)

Расчет временного и частотного откликов может быть автоматизирован с помощью схмотехнического редактора. Он обеспечивает создание схемного представления пассивных СВЧ-устройств и печатных узлов, формирование списка цепей, задание типов и параметров базовых и пользовательских моделей элементов СВЧ-устройств. Данный редактор используется для построения произвольных принципиальных схем из отрезков регулярных линий передачи и эмуляции нагрузок проводников в виде схем из элементов с сосредоточенными параметрами (далее Редактор принципиальных схем). Окно редактора принципиальных схем представлено на рисунке 1.54. Меню редактора состоит из элементов, показанных на рисунке 1.55, где указаны их условно-графические обозначения (УГО).

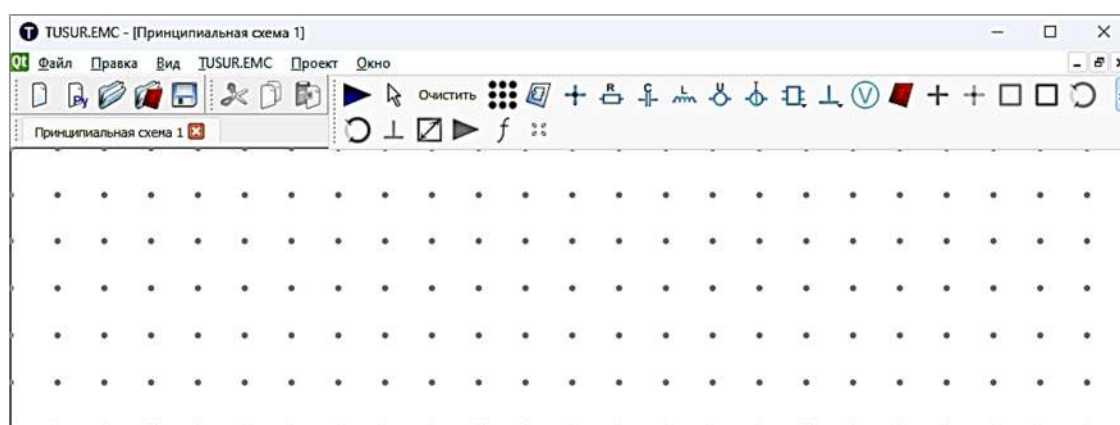


Рисунок 1.54 – TUSUR.EMC: окно редактора принципиальных схем

УГО	Назначение	УГО	Назначение
	Создание нового окна для построения принципиальной схемы		Источник тока
	Соединительная линия (соединяет элементы схемы)		Отрезок регулярной линии передачи
	Резистор		Сигнальный или схемный опорный проводник
	Конденсатор		Запуск вычисления отклика
	Катушка индуктивности		Маркер (указатель узлов схемы (A и B) для вычисления отклика)
	Источник напряжения		

Рисунок 1.55 – TUSUR.EMC: элементы редактора принципиальных схем

При построении схемы пользователь выбирает необходимый элемент из меню и размещает его в поле окна редактора, причем ему автоматически присваивается имя. Элементы схемы соединяются между собой с помощью элемента «Соединительная линия», а в местах соединения выводов элементов схемы образуются узлы, которым также присваиваются соответствующие номера. При этом опорному проводнику (сигнальному или схемному) линии передачи соответствует номер узла «0». Для задания параметров элементов (резистор, конденсатор, катушка индуктивности, источник тока, источник напряжения, отрезок линии передачи) используется дополнительное окно «Параметры». Примеры окон для ввода параметров для резистора, источника воздействия и отрезка линии передачи представлены на рисунке 1.56. Для линии передачи в соответствующие поля окна вводятся погонные параметры линии передачи. Эти параметры также можно импортировать из памяти. Для этого нужно внести переменную, в которой сохранен тот или иной параметр.

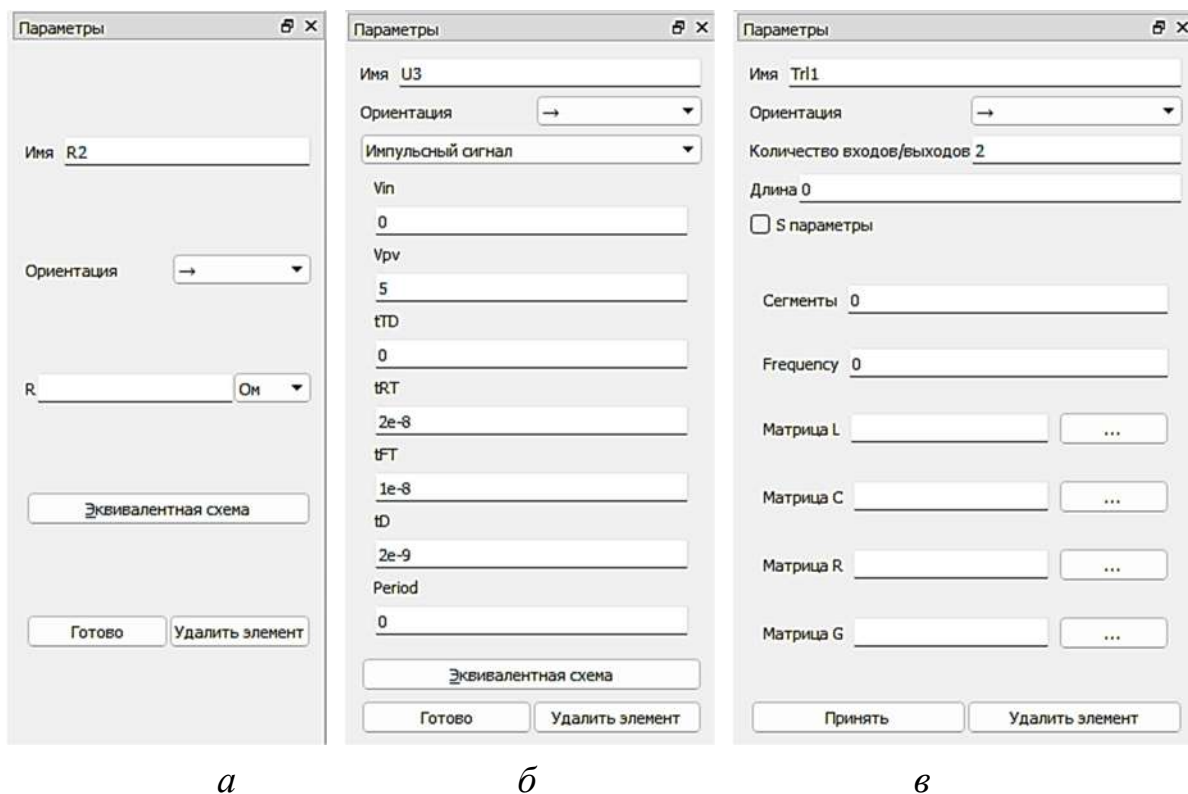


Рисунок 1.56 – TUSUR.EMC: пример окон ввода параметров резистора (а), источника воздействия (б) и отрезка линии передачи (в)

Для вычисления отклика с помощью редактора принципиальных схем используется элемент «Запуск вычисления отклика». При нажатии элемента запускается окно выбора типа переходного анализа, в котором пользователь может выбрать временной или частотный анализ схемы. После выбора типа переходного анализа запускается окно для настройки расчета и отображения отклика. Интерфейс окна показан на рисунке 1.57,*а*.

Пользователю доступно задание временного шага («Step\_time») и числа отсчетов по времени  $n$  (степень двойки в алгоритме быстрого преобразования Фурье). Также доступны настройки графического отображения отклика:

–  $V(I)_{\min}$ ,  $V(I)_{\max}$  – минимальные и максимальные значения диапазона напряжения или тока (по оси ординат);

–  $t_0_{\min}$ ,  $t_0_{\max}$  – минимальные и максимальные значения диапазона по времени (по оси абсцисс).

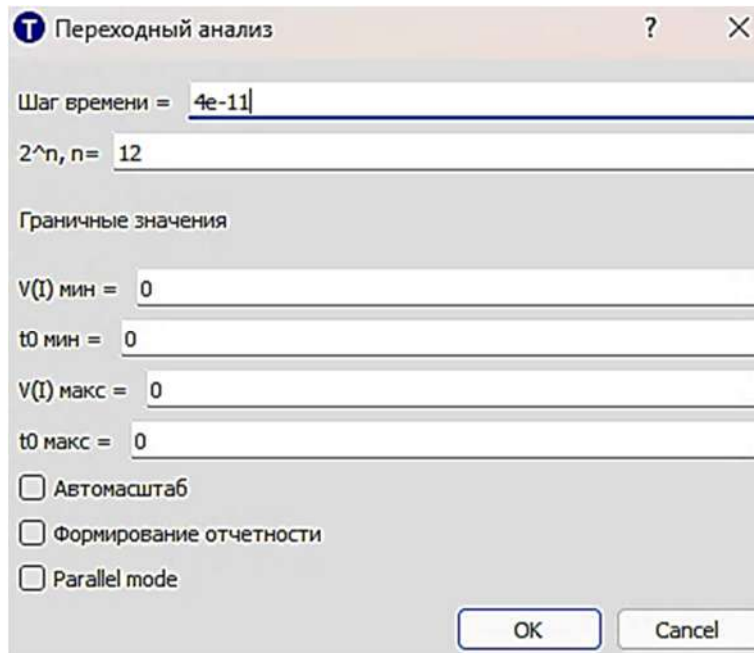
Кроме того, доступна функция автоматического масштабирования графика и формирования отчетности.

Интерфейс окна настроек анализа в частотной области представлен на рисунке 1.57,*б*. В окне доступны задание шага изменения частоты, а также настройки графического отображения отклика. По оси ординат они такие же, как описано выше, а по оси абсцисс задается минимальное и максимальное значение частоты для графического отображения частотного отклика схемы. Если параметры отображения временного или частотного отклика не будут заданы пользователем (по умолчанию равны нулю), то система рассчитает их автоматически на основании заданных параметров источника в схеме.

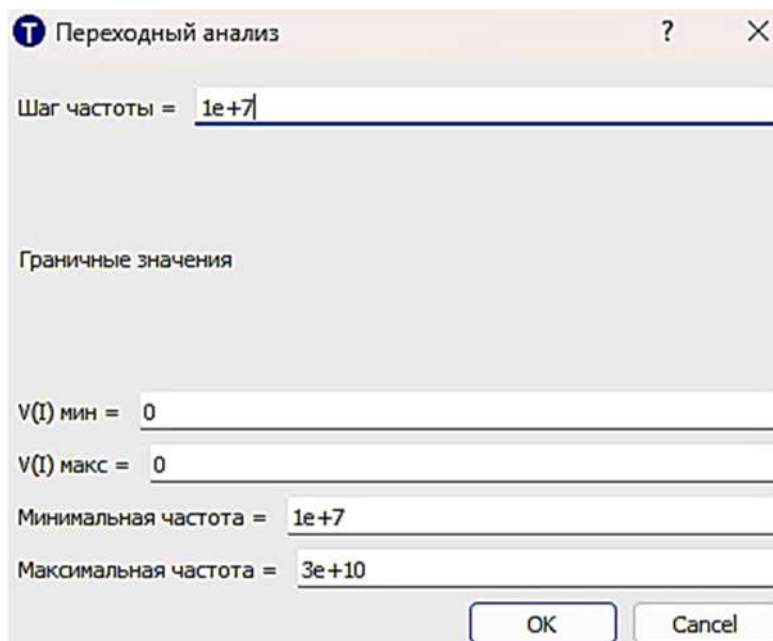
После настройки параметров расчета и отображения генерируется код, который компилируется автоматически. Затем запускается графическое окно с откликом (пример отображения временного и частотного откликов показан на рисунке 1.58).

В окне отображения отклика доступна функция его масштабирования с помощью прокрутки колеса мыши или выделением прямоугольной области с зажатой левой кнопкой мыши (возврат к исходному масштабу отображения отклика осуществляется нажатием правой кнопки мыши). При перемещении курсора по графику

рядом с курсором выводятся текущие значения по осям ординат (напряжения или тока) и абсцисс (времени или частоты). Кроме этого, доступна функция изменения положения легенды графика в удобное для пользователя место (осуществляется путем двойного нажатия на левую кнопку мыши).

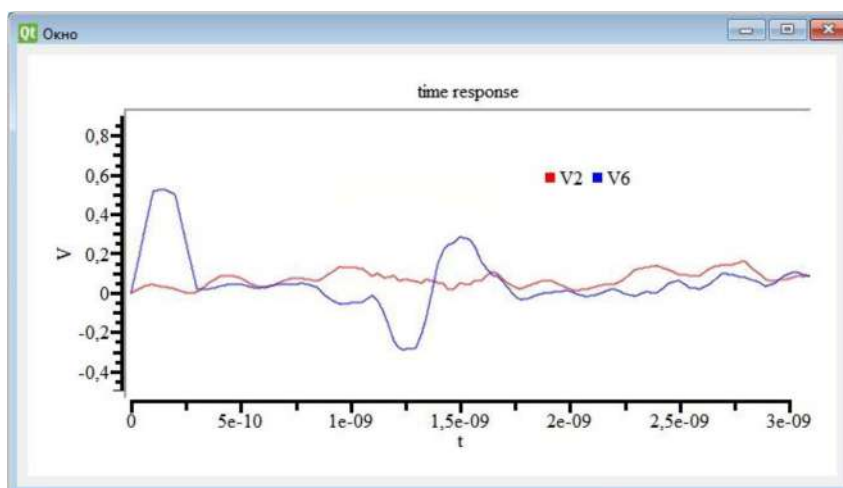


*a*

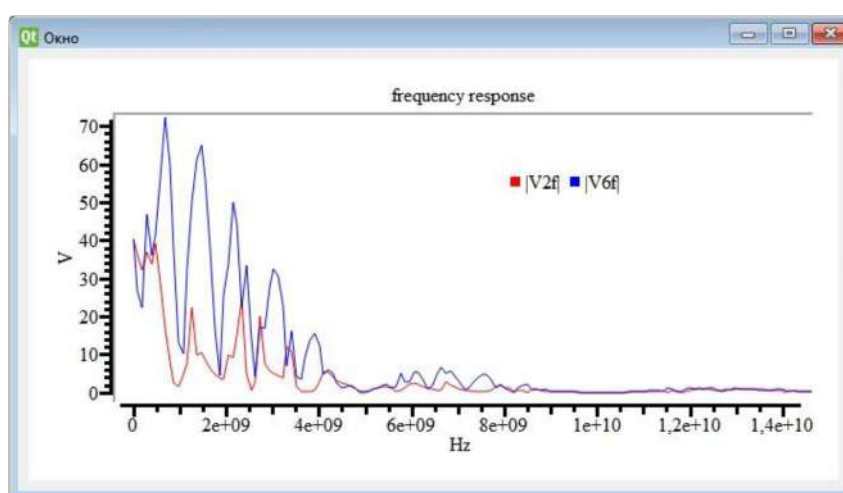


*б*

Рисунок 1.57 – TUSUR.EMC: окна настройки анализа во временной (*a*) и частотной (*б*) областях



*a*



*б*

Рисунок 1.58 – TUSUR.EMC: пример отображения временного (*a*) и частотного (*б*) откликов

При вычислении отклика также доступен дополнительный инструмент для графической визуализации изменения формы сигнала при прохождении по линии передачи – «DynaVis». В окне настройки динамической визуализации доступны задание номеров начального (*A*) и конечного (*B*) узлов (при задании этих параметров в окне со схемой в соответствующих узлах автоматически устанавливаются специальные метки) и скорость анимации (число кадров в секунду). Кроме того, доступен выбор типа отображаемых данных (ток *I* или напряжение *V*) (рисунок 1.59). Задание числа подынтервалов вдоль каждого отрезка каждого проводника анализируемой структуры, в которых отображается форма сигнала, осуществляется

на этапе построения топологии в окне задания параметров отрезка структуры графического редактора.

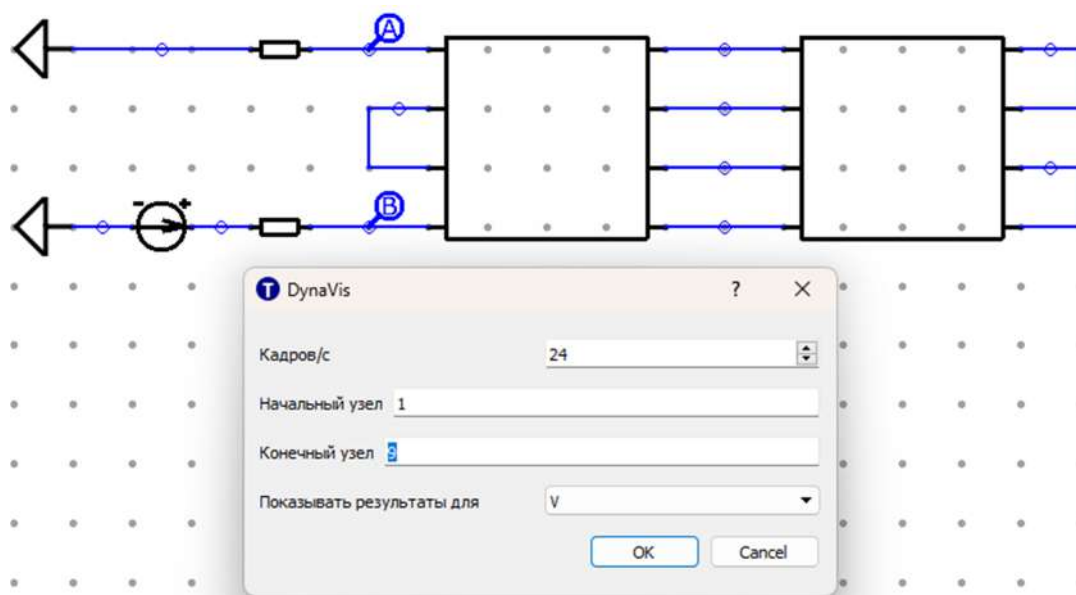


Рисунок 1.59 – TUSUR.EMC: окно настройки динамической визуализации отображения отклика схемы «DynaVis»

После подтверждения установленных пользователем параметров submodule «DynaVis» генерирует код, который компилируется автоматически и запускает окно с формой сигналов в заданных узлах схемы, а также окно динамического отображения изменения формы сигнала при распространении в анализируемой структуре (рисунок 1.60).

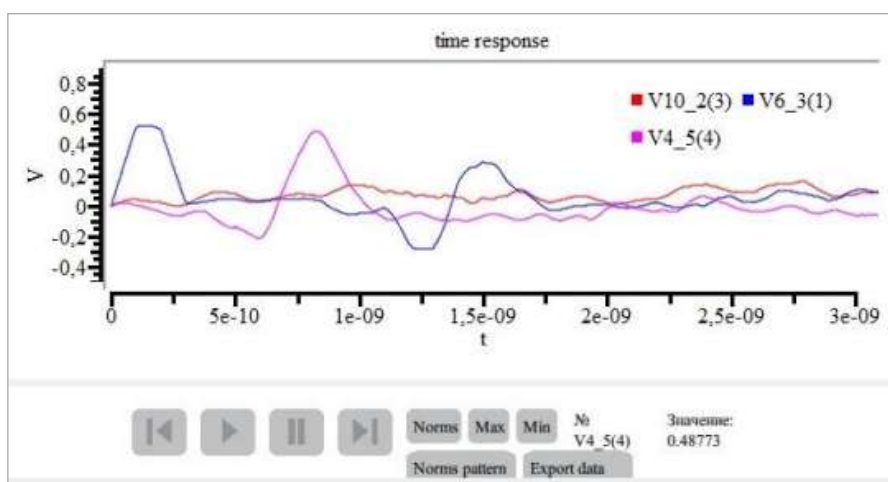


Рисунок 1.60 – TUSUR.EMC: окно динамической визуализации изменения формы сигнала при распространении в структуре

В окне отображаются формы сигнала в узлах *A* и *B* (статические) и анимированная форма сигнала, которая изменяется при переходе от узла *A* к узлу *B*. В подписи к графику отображаются узлы, между которыми располагается отрезок проводника, а в скобках указывается координата внутри этого отрезка. Пользователю доступна возможность остановить динамическое отображение, нажав кнопку «Пауза», перемещать кадры на шаг назад или вперед с помощью стрелок «Влево» и «Вправо», а также заново запустить анимацию, нажав кнопку «Старт». Кнопки «Мах» и «Мин», расположенные в окне динамической визуализации сигнала, отвечают за отображение экстремумов сигнала. При нажатии на одну из этих кнопок анимация останавливается, и в окне выводится форма сигнала с экстремумом, соответствующим нажатой кнопке. При этом в окне со схемой появляется координата вдоль проводника отрезка структуры, где локализован экстремум сигнала (пример показан на рисунке 1.61). Справа от кнопок отображения экстремумов расположено поле, в которое выводится значение максимума или минимума сигнала, а также номер отрезка линии передачи и координата вдоль проводника, в которой найден экстремум.

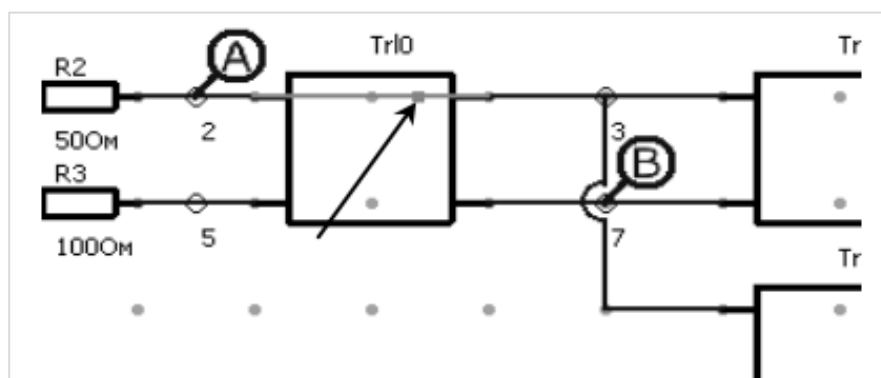


Рисунок 1.61 – TUSUR.EMC: пример локализации сигнала на схеме исследуемой структуры

В центральной части окна динамической визуализации (см. рисунок 1.60) расположена кнопка «Norms», при нажатии на которую производится расчет *N*-норм [10]. *N*-нормы позволяют количественно оценить характеристики сигнала во временной области. Они предложены для определения пределов восприимчивости

оборудования к влиянию разных воздействий. Вычисление  $N$ -норм выполняется в каждом сегменте схемы при распространении сигнала. Результаты вычисления  $N$ -норм в текущий момент времени отображается при нажатии на кнопку «Norms pattern» (нажатие знака «?» выводит всплывающее окно с информацией о том, что означает каждая норма) (рисунок 1.62).

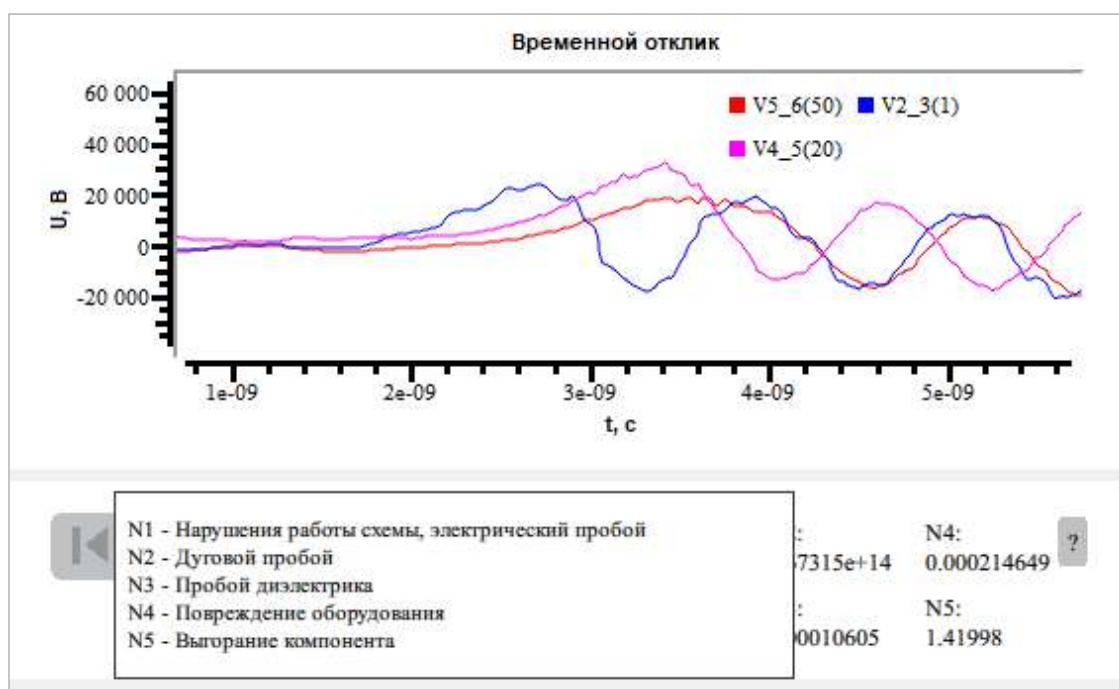


Рисунок 1.62 – TUSUR.EMC: всплывающее меню информации о значениях  $N$ -норм

Кроме того, реализована возможность вывода портрета изменения заданной нормы при распространении сигнала в схеме. Это позволяет оценить общую картину изменения нормы вдоль всей цепи и локализовать те участки, где значения нормы максимальны или минимальны (рисунок 1.63).

Для возможности оценки влияния структуры на искажение помехового воздействия в системе дополнительно реализована база данных (БД) таких помеховых воздействий в соответствии с отечественными и зарубежными нормативными документами. Содержимое БД выполнено в виде внешних файлов, интегрированных в систему. Примеры форм помеховых сигналов, хранящихся в БД системы, показаны на рисунке 1.64.

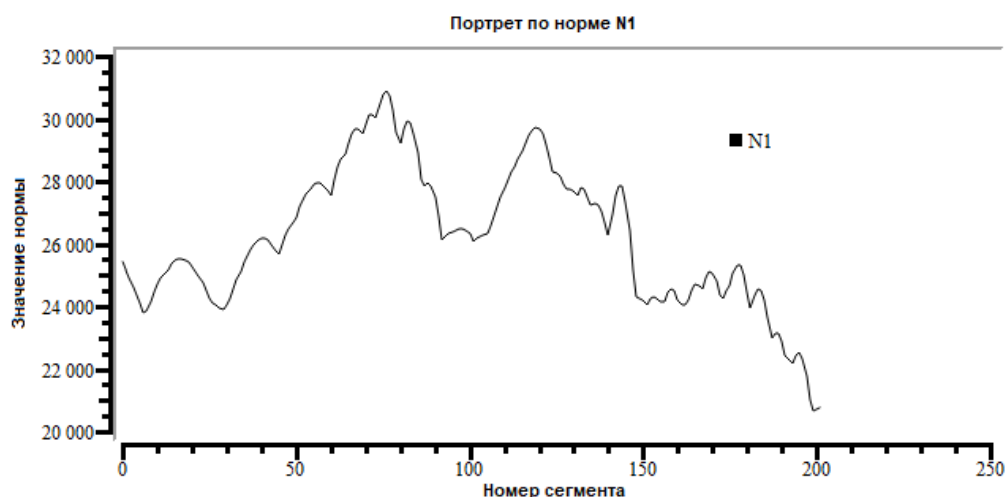


Рисунок 1.63 – TUSUR.EMC: пример портрета изменения нормы  $N_1$

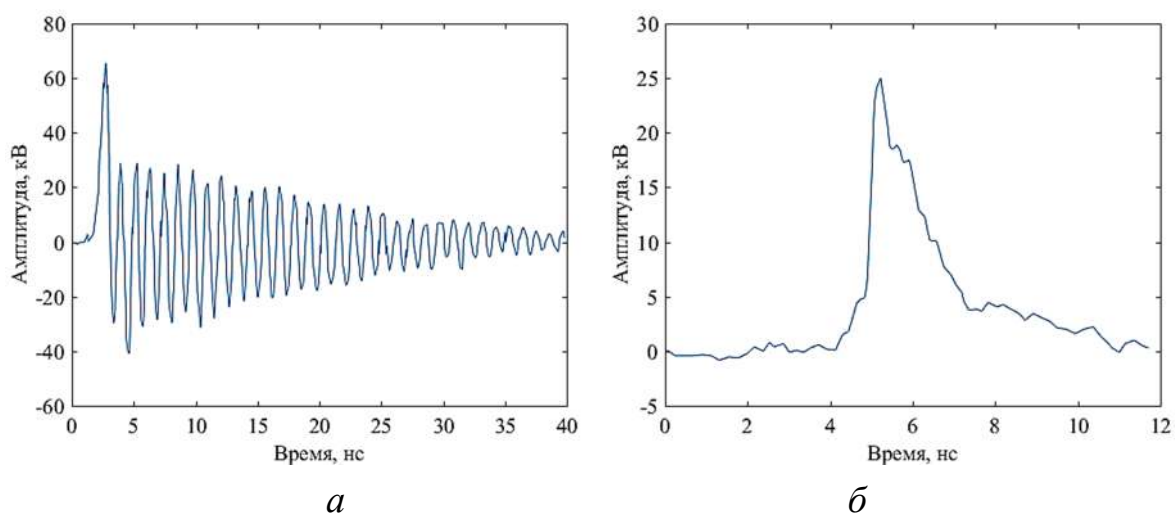


Рисунок 1.64 – TUSUR.EMC: формы помеховых воздействий ВАЕ-NLTL (а) и FID FPG30-1KM (б) согласно документу [11]

Загрузка формы сигнала помехи из БД в соответствующий элемент интерфейса редактора схем реализована за счет выбора названия помехи из выпадающего списка. После этого пользователю доступно предварительное изображение формы сигнала (рисунок 1.65).

Реализация БД помеховых сигналов и вычисления  $N$ -норм позволяют работать модулю формирования аналитической справочной информации. Он используется для выявления мест потенциальных уязвимостей моделируемой структуры из отрезков линии передачи при воздействии на нее опасных помеховых сигналов на основании расчета нормированных параметров отклика. Для анализа топо-

логии, заданной пользователем, в модуле применяются нормы  $N_1 - N_5$  и 11 сигналов из БД.

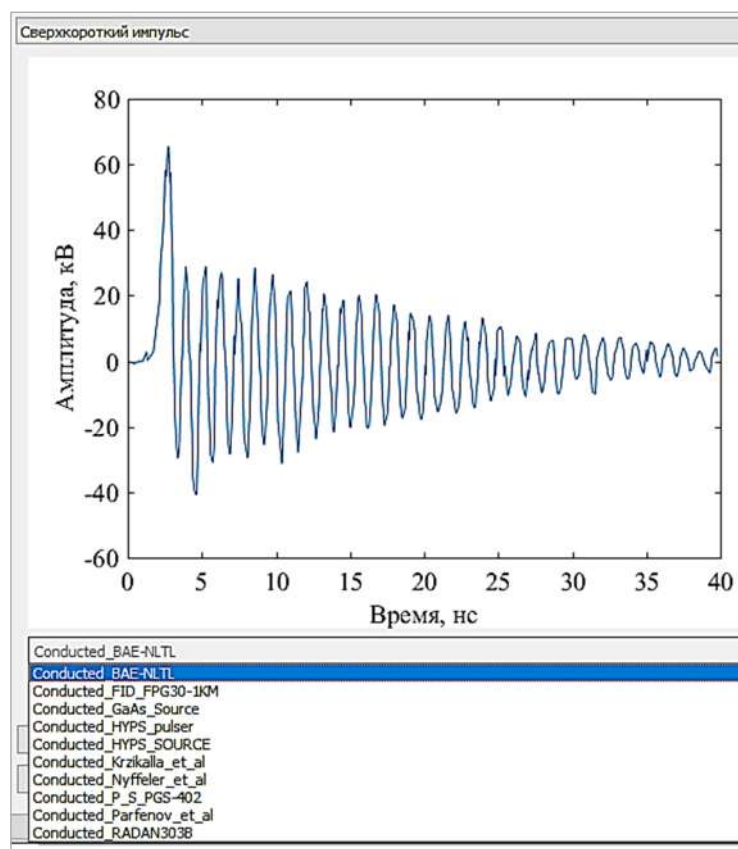


Рисунок 1.65 – Пример загрузки воздействующего сигнала помехи из БД

Работа модуля осуществляется следующим образом. В автоматическом режиме вычисляются отклики схемы на каждый из 11 помеховых сигналов. Для них в каждом сегменте схемы рассчитывается каждая из  $N$ -норм, а после определяются сегменты структуры, в которых значения норм максимальны. В отклике каждого сегмента определяется амплитуда напряжения, которая затем нормируется относительно амплитуды на входе схемы. Полученные результаты отображаются в таблицах в главном окне модуля с указанием номера отрезка линии передачи и номера сегмента отрезка, где выявлено максимальное значение каждой  $N$ -нормы (рисунок 1.66). В зависимости от нормированного максимального значения вычисленных норм изменяется цвет фона соответствующей ячейки таблицы (от зеленого к темно-красному). Это указывает

пользователю наиболее уязвимые места заданной топологии. В таблице также указывается максимальное напряжение сигнала на входе схемы, которое используется при расчете.

	Сигналы	Норма 1	Норма 2	Норма 3	Норма 4	Норма 5	входное напряж
1	BAE-NLTL	1.099V seg...	1.078V seg...	0.758V seg...	1.078V seg...	1.078V seg...	31412.2
2	FID_FPG30-1KM	1.083V seg...	1.073V seg...	0.897V seg...	0.981V seg...	1.083V seg...	11069.9
3	GaAs_Source	1.000V seg...	1.000V seg...	1.000V seg...	1.000V seg...	1.000V seg...	35262.4
4	HYP5_pulser	1.255V seg...	0.973V seg...	1.109V seg...	1.109V seg...	1.242V seg...	2018.42
5	HYP5_SOURCE	2.432V seg...	1.911V seg...	1.389V seg...	1.627V seg...	2.355V seg...	85.6429
6	Krzikalla_et_al	1.456V seg...	1.188V seg...	1.456V seg...	1.456V seg...	1.456V seg...	241.532
7	Nyffeler_et_al	1.222V seg...	1.030V seg...	1.070V seg...	1.015V seg...	1.205V seg...	498.553
8	P.S._PGS-402	0.461V seg...	0.373V seg...	0.445V seg...	0.445V seg...	0.384V seg...	423.403
9	Parfenov_et_al	1.000V seg...	1.000V seg...	1.000V seg...	1.000V seg...	1.000V seg...	112.611

Рисунок 1.66 – TUSUR.EMC: главное окно модуля формирования аналитической информации на основе расчета  $N$ -норм

При нажатии на ячейки таблицы в нижней части главного окна модуля строятся портреты  $N$ -норм, нормированные относительно значений норм  $N_1 - N_5$  для входного помехового воздействия. Это позволяет детально оценить уязвимые узлы структуры без привязки к амплитуде воздействия. Пример графического отображения зависимости нормированных значений нормы  $N_2$  от номера сегмента структуры (см. рисунок 1.59) при воздействии помехового сигнала «HYP5\_SOURCE» показан на рисунке 1.67. Если превышено пороговое значение одной из норм (указывает на высокую степень уязвимости схемы), то в нижней части экрана появляется рекомендация по его уменьшению. Помимо вычисления норм, в системе TUSUR.EMC могут быть выполнены типовые виды анализа СВЧ-устройств. Например, доступна оценка специальных характеристик устройств, в том числе на основе  $S$ -параметров.

Кроме того, в системе TUSUR.EMC возможен импорт электрических цепей. Используя функцию «Открыть» в меню «Файл», можно открывать файлы проекта с расширением \*.tld (рисунок 1.68).

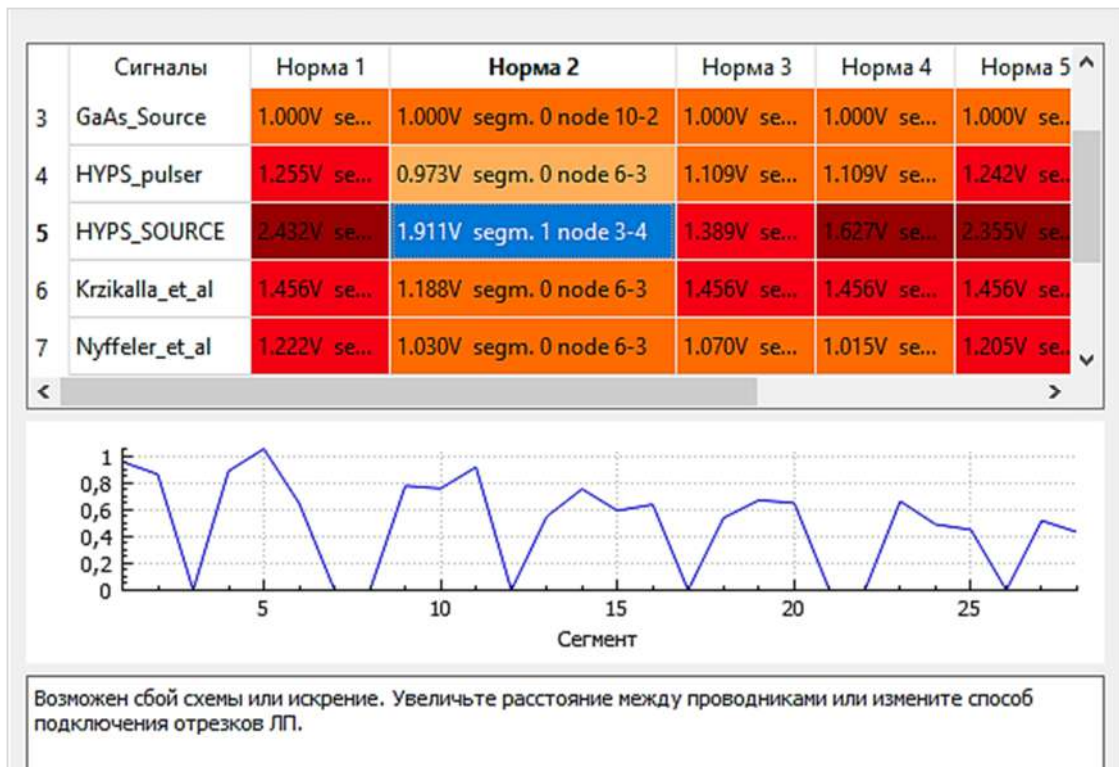


Рисунок 1.67 – TUSUR.EMC: пример графического отображения нормированных значений нормы  $N_1$

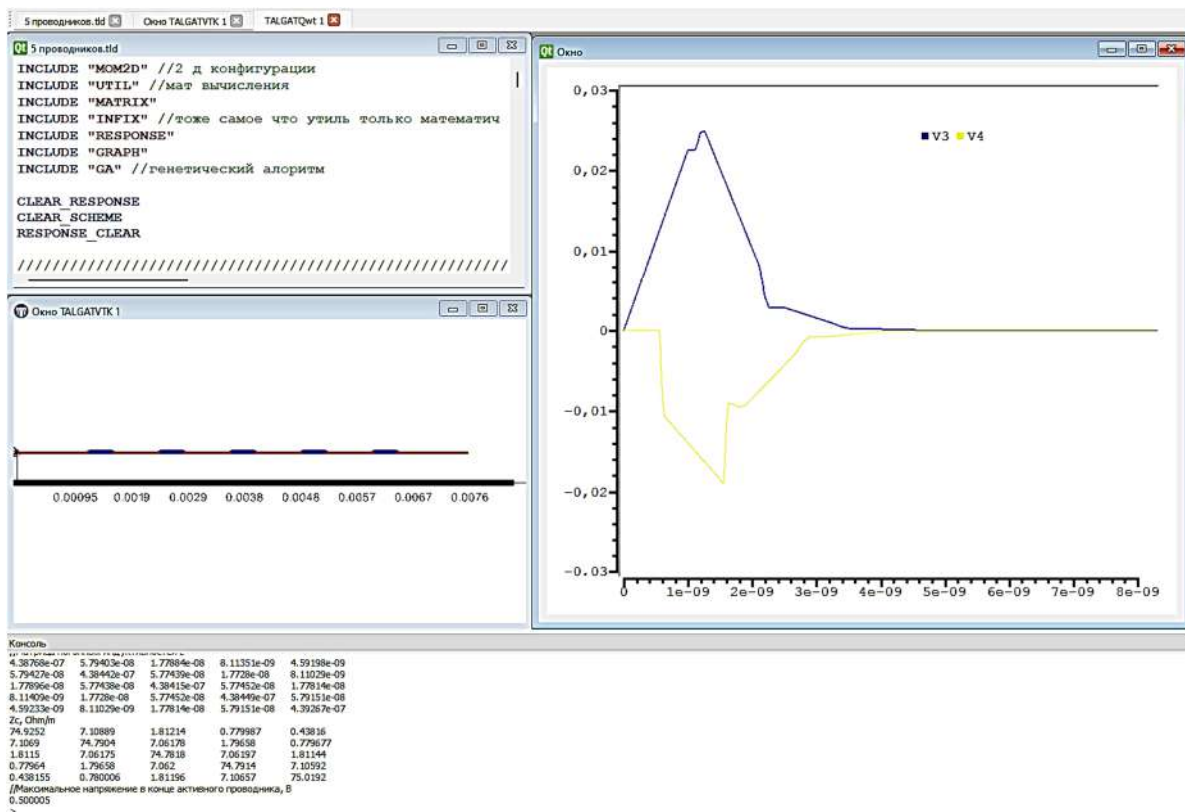


Рисунок 1.68 – TUSUR.EMC (модуль MOM2D): пример импорта цепи с двумерной моделью

Помимо этого, система позволяет выполнять оптимизацию топологии с применением генетических алгоритмов и эволюционных стратегий. Предполагается, что пользователь знаком с ГА и ЭС, принципами их работы и терминологией. Поэтому здесь описание работы с данными модулями системы не приведено.

Таким образом, система TUSUR.EMC используется для компьютерного моделирования широкого класса задач электромагнитного поля. Интерфейс пользователя обеспечивает широкий функционал построения произвольных конфигураций проводников и диэлектриков, в том числе за счет применения управляющих команд. Схемотехнический редактор обеспечивает создание схемного представления СВЧ-устройств и печатных узлов, формирование списка цепей, задание типов и параметров базовых и пользовательских моделей элементов СВЧ-устройств. База данных помеховых сигналов системы позволяет выполнить первичный анализ влияния потенциальных источников преднамеренных электромагнитных воздействий на топологию, а с помощью модуля локализации превышения допустимых уровней сигналов возможно определение экстремумов воздействия в схеме. Дополнительно реализованная подсистема формирования аналитической справочной информации позволяет выявить места потенциальных уязвимостей цепи при воздействии опасных помеховых сигналов за счет расчета нормирующих параметров отклика.

## 1.2.2 Пример моделирования

Рассмотрим моделирование 2-проводной микрополосковой линии передачи (см. рисунок 1.10) с параметрами: ширина проводников  $w = 2$  мм, толщина проводников  $t = 1$  мм, толщина диэлектрической подложки  $h = 1,5$  мм, ее относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r = 5$ , расстояние между проводниками  $s = 1$  мм,  $d = 5$  мм.

Для запуска моделирования необходимо в меню «Файл» создать или открыть файл скрипта и в меню «TUSUR.EMC» выбрать «Запуск». При описании системы TUSUR.EMC все примеры моделирования приведены с использованием языка TALGAT\_

Script, поэтому здесь покажем пример написания скрипта на языке Python.

Сначала нужно подключить библиотеки (для расчета погонных параметров будет достаточно «UTIL», «MOM2D» и «MATRIX») (рисунок 1.69). Далее объявим и инициализируем переменные, определяющие геометрические величины. Также нужно отключить режим «бесконечной земли» («SET\_INFINITE\_GROUND») и установить длину сегментов расчетной подынтервальной сетки («SET\_AUTO\_SEGMENT\_LENGTH»).

```
register_talgat_commands()

INCLUDE("UTIL")
INCLUDE("MOM2D")
INCLUDE("MATRIX")

t = 1e-3
w = 2e-3
s = 1e-3
h = 1.5e-3
d = 5e-3

Er = 5
ErAir = 1

ncond = 2 # Число проводников
l = 2 * d + ncond * w + (ncond - 1) * s # Общая ширина линии передачи

SET_INFINITE_GROUND(0)
SET_AUTO_SEGMENT_LENGTH(t / 5)
```

Рисунок 1.69 – TUSUR.EMC: задание начальных условий

Напишем функции для построения проводниковых («str\_cond») и диэлектрических («str\_diel») границ и вызовем их из цикла по числу проводников (рисунок 1.70). Первая из них строит 4 границы проводника, а вторая – диэлектрическую границу между проводниками. Так, если число проводников  $ncond = 3$ , то при вызове этих функций будет построена структура, показанная на рисунке 1.71.

На следующем шаге нужно построить заземленный проводник и недостающие диэлектрические границы (рисунок 1.72). Итоговая структура будет отображена после выполнения команды «DRAW\_CONFIGURATION» (рисунок 1.73).

```

def str_cond(i):
    CONDUCTOR()
    SET_ER_PLUS(Er)
    LINE(d + i * (w + s), h, d + (i + 1) * w + i * s, h)
    SET_ER_PLUS(ErAir)
    LINE(d + (i + 1) * w + i * s, h, d + (i + 1) * w + i * s, h + t)
    LINE(d + (i + 1) * w + i * s, h + t, d + i * (w + s), h + t)
    LINE(d + i * (w + s), h + t, d + i * (w + s), h)

def str_diel(i):
    DIELECTRIC()
    SET_ER_PLUS(Er)
    SET_ER_MINUS(ErAir)
    LINE(d + i * w + (i - 1) * s, h, d + i * (w + s), h)

for i in range(0, ncond, 1):
    str_cond(i)

for i in range(1, ncond, 1):
    str_diel(i)

```

Рисунок 1.70 – TUSUR.EMC: функции для построения проводниковых и диэлектрических границ



Рисунок 1.71 – TUSUR.EMC: пример работы функций «str\_cond» и «str\_diel»

```

CONDUCTOR_GROUNDED()
SET_ER_PLUS(ErAir)
LINE(0, 0, 0, -t)
LINETO(1, -t)
LINETO(1, 0)
SET_ER_PLUS(Er)
LINETO(0, 0)

DIELECTRIC()
SET_ER_PLUS(Er)
SET_ER_MINUS(ErAir)
LINE(0, 0, 0, h)
LINETO(d, h)
LINE(1 - d, h, 1, h)
LINETO(1, 0)

conf = GET_CONFIGURATION_2D()
DRAW_CONFIGURATION(conf)

```

Рисунок 1.72 – TUSUR.EMC: построение опорного проводника и диэлектрических границ



Рисунок 1.73 – TUSUR.EMC: отображение итогового поперечного сечения структуры

Наконец, добавим вызов функций для расчета матриц погонных параметров **C** и **L** (рисунок 1.74) и выполним скрипт. После его выполнения проверим корректность построения поперечного сечения и корректность задания величин относительной диэлектрической проницаемости (рисунок 1.75). Рассчитанные матрицы погонных параметров будут показаны в окне команд (рисунок 1.76).

```
mC = CALCULATE_C(SMN_C(conf), conf)
mL = CALCULATE_L(SMN_L(conf), conf)
ECHO("----C----")
ECHO(mC)
ECHO("----L----")
ECHO(mL)
```

Рисунок 1.74 – TUSUR.EMC:  
расчет матриц погонных параметров **C** и **L**

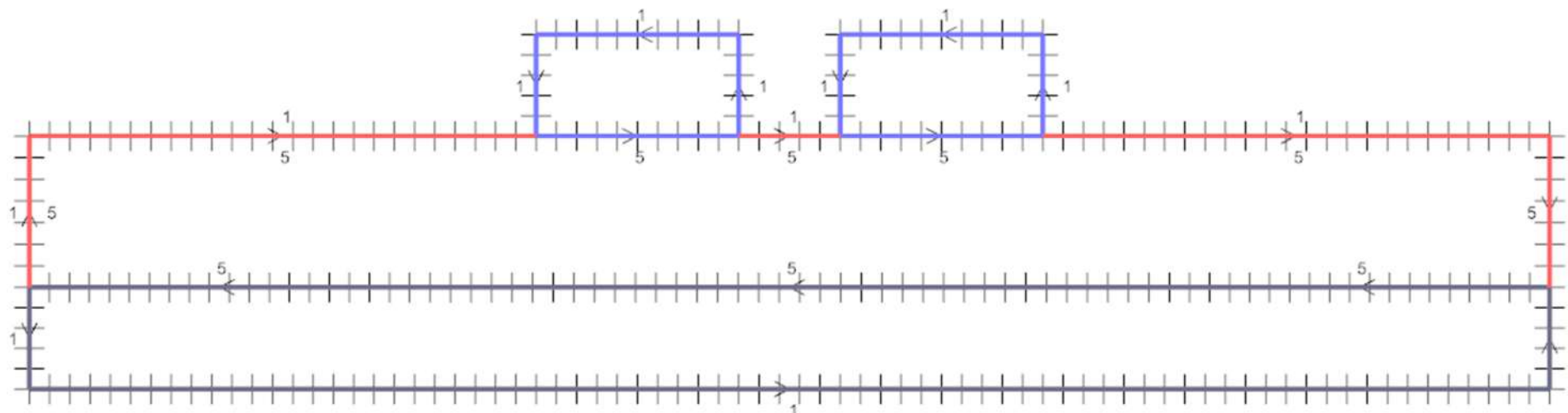


Рисунок 1.75 – TUSUR.EMC: отображение сегментации и величин относительной диэлектрической проницаемости

```

> ---C---
1.24108e-10  -2.39865e-11
-2.39865e-11  1.24108e-10
---L---
2.94263e-07  1.13553e-07
1.13553e-07  2.94263e-07

```

Рисунок 1.76 – TUSUR.EMC:  
матрицы погонных параметров  $C$  и  $L$

## 1.3 Программа FEM2D

### 1.3.1 Описание программы

Программа FEM2D предназначена для двумерного электростатического анализа линий передачи с произвольным поперечным сечением и кабелей на основе расчета их матриц первичных погонных параметров  $C$  и  $L$  методом конечных элементов [12]. Графический интерфейс (рисунок 1.77), а также некоторые вспомогательные процедуры для работы программного модуля реализованы с применением фреймворка Qt [13].

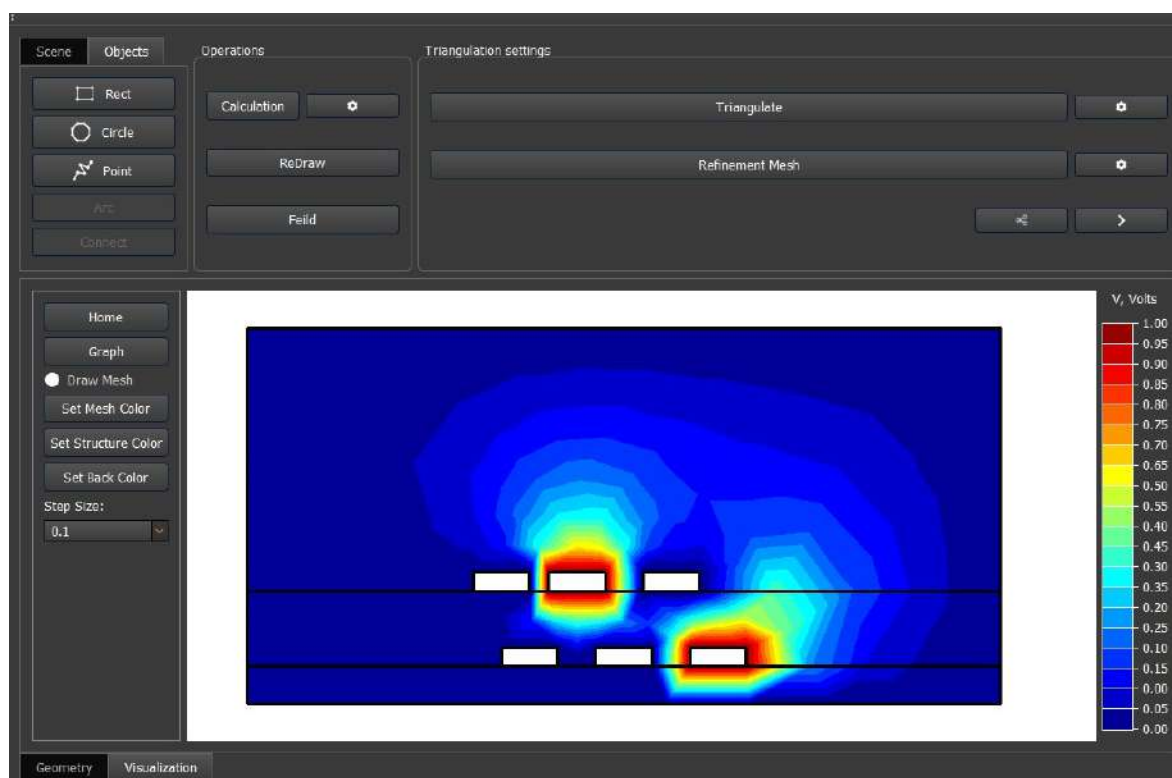


Рисунок 1.77 – FEM2D: графический интерфейс пользователя

FEM2D включает в себя редактор геометрической модели и модули управления, дискретизации, вычислений и визуализации. Модуль управления синхронизирует работу программы, обеспечивая ввод данных, необходимых для настройки остальных модулей. Так, для настройки модуля дискретизации задаются параметры триангуляции: максимальная длина ребра, максимальный и минимальный углы в треугольниках расчетной сетки. Для модуля вычисления задается степень аппроксимирующих полиномов, а для модуля визуализации выбираются данные для отображения в отдельном графическом окне.

При построении геометрической модели линии передачи используется модуль редактора геометрической модели, в котором при помощи геометрических примитивов выполняется построение поперечного сечения линии (рисунок 1.78). Для этого используются: прямоугольник, окружность, дуга и полилиния, строящаяся по набору заданных точек. При построении любого геометрического объекта также вводятся его электрофизические параметры и граничные условия.

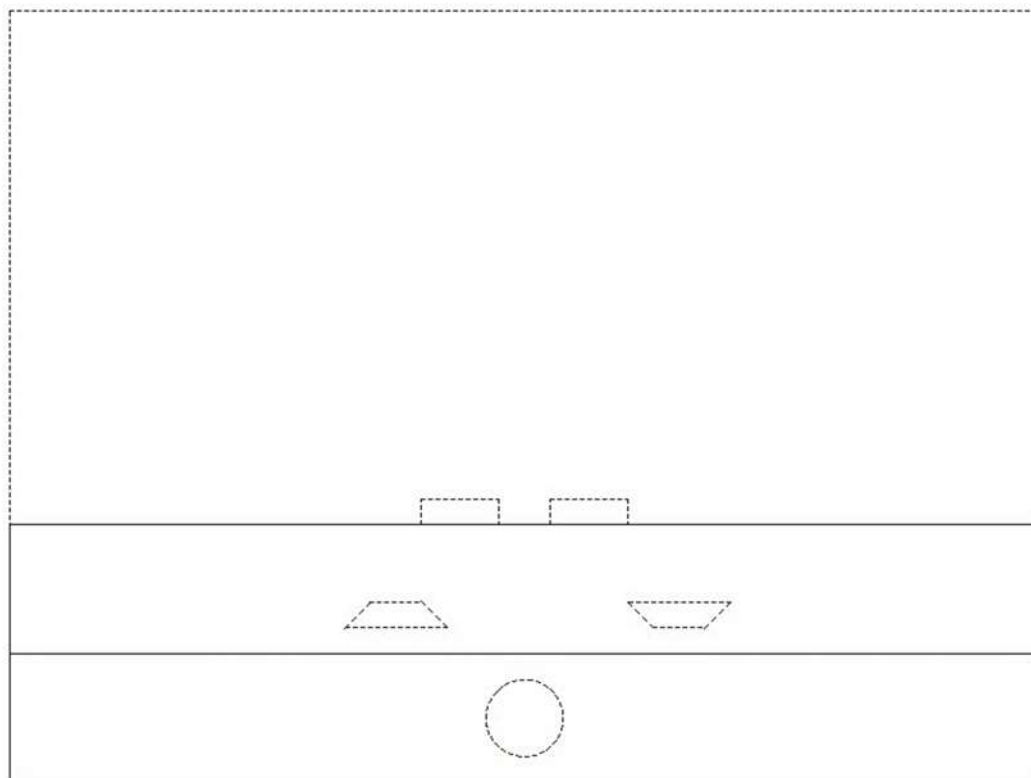
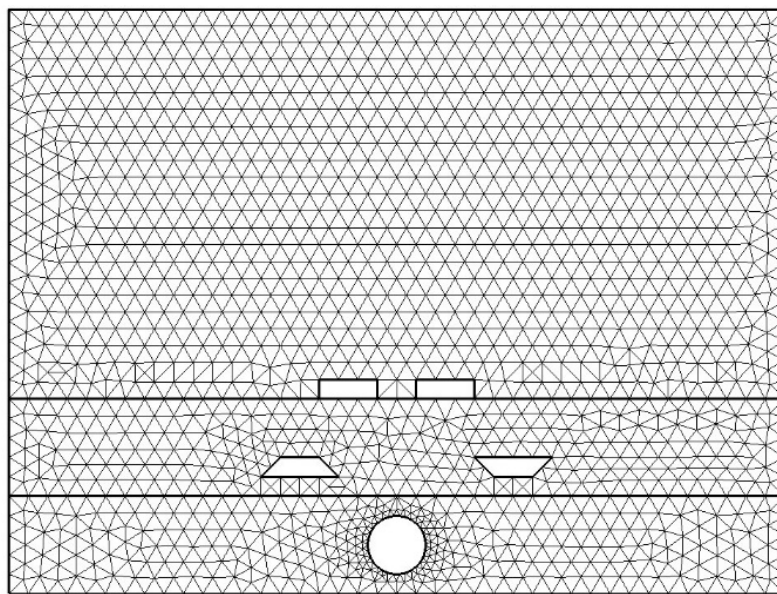
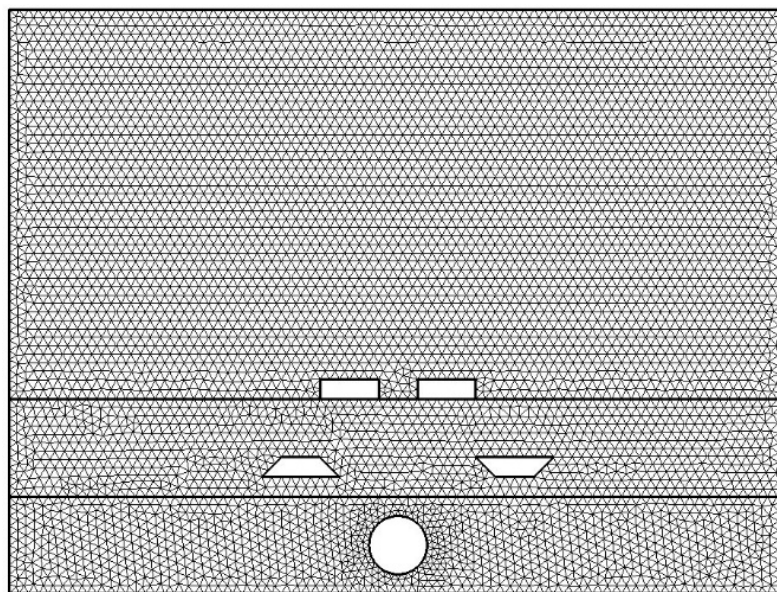


Рисунок 1.78 – FEM2D: пример геометрической модели поперечного сечения 5-проводной линии передачи

Модуль дискретизации служит для формирования треугольной расчетной сетки на основе построенной геометрической модели и заданных пользователем параметров. Для этого применяют алгоритм триангуляции Делоне из программной библиотеки GMSH. Во время построения расчетной сетки происходит нумерация узлов и треугольников и их сопоставление с требуемыми электрофизическими параметрами. Полученная расчетная сетка отображается с помощью модуля визуализации (рисунок 1.79).



*a*



*б*

Рисунок 1.79 – FEM2D: пример «грубой» (*a*) и «учащенной» (*б*) расчетных сеток для 5-проводной линии передачи

Модуль вычислений на основе построенной расчетной сетки формирует и решает матричное уравнение с использованием библиотеки Armadillo [14]. Результатом вычислений являются потенциалы в узлах расчетной треугольной сетки. Полученная матрица потенциалов необходима для вычисления матриц погонных параметров.

Модуль визуализации служит для отображения результатов вычислений. Для вывода доступны матрицы погонных параметров (в текстовом виде, рисунок 1.80) и картины электрического поля и распределения потенциалов (рисунок 1.81). Визуализация картин производится при помощи библиотеки OpenGL.

```

*** Результаты вычисления ***

Кoeffициенты электростатической индукции [пФ/м]:
122.268   -4.9479   -5.64774  -20.0272  -14.1356
-4.9479   62.5553  -21.0219  -24.7168  -3.14816
-5.64774  -21.0219  62.4904   -3.97946  -23.9914
-20.0272  -24.7168  -3.97946  82.8052   -2.12551
-14.1356  -3.14816  -23.9914  -2.12551  78.4804

Собственные и взаимные частичные емкости [пФ/м]:
77.5099   4.9479   5.64774   20.0272   14.1356
4.9479    8.72056  21.0219   24.7168   3.14816
5.64774   21.0219  7.8498    3.97946   23.9914
20.0272   24.7168  3.97946   31.9563   2.12551
14.1356   3.14816  23.9914   2.12551   35.0797

Погонная индуктивность [нГн/м]:
211.593   58.9074  57.9017   75.1985   59.9717
58.9074   483.543  235.013   149.525   93.5699
57.9017   235.013  483.853   96.8541   150.625
75.1985   149.525  96.8541   384.149   52.845
59.9717   93.5699  150.625   52.845    399.141

Энергия :
2.93825e-11  4.37845e-11  4.3523e-11  3.73744e-11  3.92953e-11
4.37845e-11  1.63709e-11  1.92016e-11  2.48788e-11  3.14716e-11
4.3523e-11   1.92016e-11  1.63978e-11  3.23409e-11  2.39176e-11
3.73744e-11  2.48788e-11  3.23409e-11  1.72953e-11  3.2881e-11
3.92953e-11  3.14716e-11  2.39176e-11  3.2881e-11  1.61972e-11

Волновое сопротивление [Ом]:
53.1405   61.5918  61.263    55.2377   52.4454
60.4921   125.618  111.571   91.1732   80.411
59.9701   111.547  125.756   81.2896   91.3278
54.0641   90.5491  82.2272   90.9588   62.0673
50.9723   80.8355  90.0682   61.6483   92.167

```

Рисунок 1.80 – FEM2D: отображение вычисленных матриц погонных параметров 5-проводной линии передачи

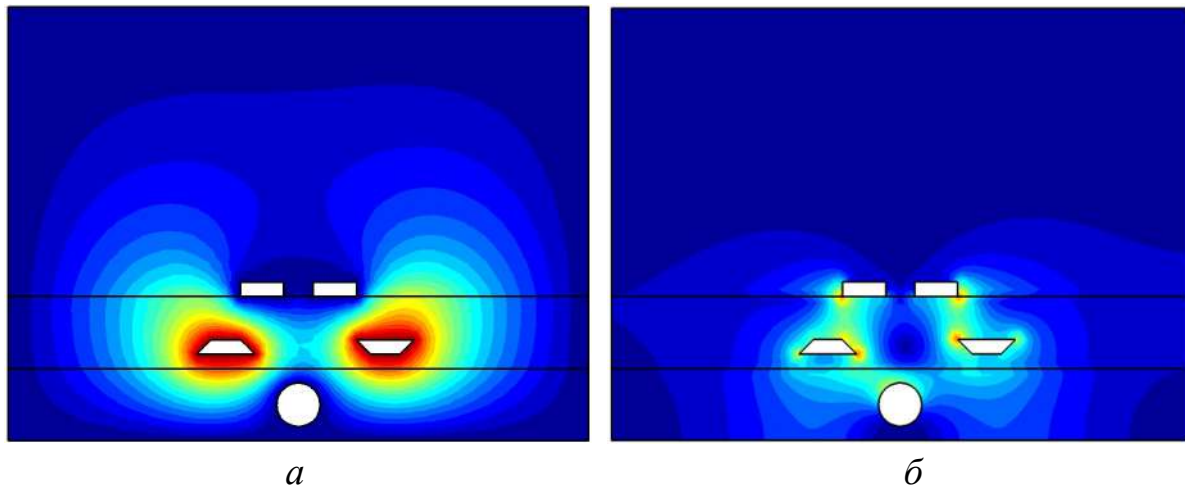


Рисунок 1.81 – FEM2D: распределение потенциала (*а*) и напряженности электрического поля (*б*) 5-проводной линии передачи при возбуждении двух центральных проводников

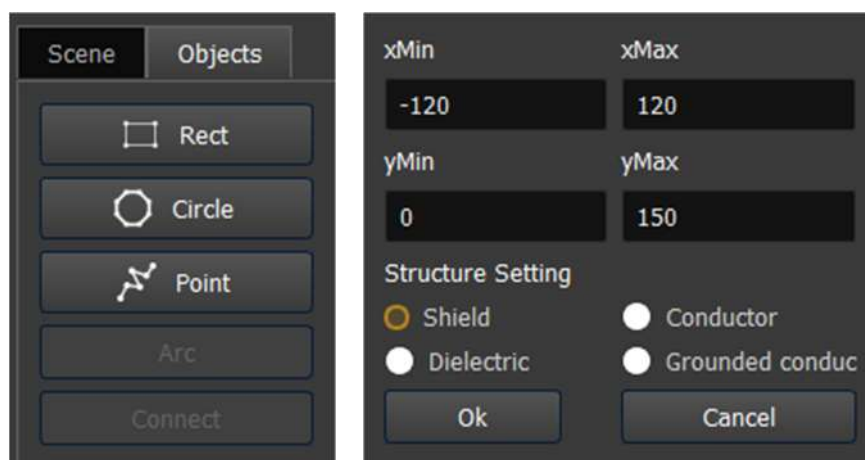
### 1.3.2 Пример моделирования

Рассмотрим моделирование 2-проводной микрополосковой линии передачи. Параметры поперечного сечения линии (см. рисунок 1.10): ширина проводников  $w = 2$  мм, толщина проводников  $t = 1$  мм, толщина диэлектрической подложки  $h = 1,5$  мм, ее относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r = 5$ , расстояние между проводниками  $s = 1$  мм,  $d = 5$  мм.

Работа с программой начинается с построения поперечного сечения линии передачи, для этого доступны три режима построения геометрических объектов из вкладки «Objects» (рисунок 1.82,*а*): «Rect» (прямоугольник), «Circle» (окружность) и «Point» (построение по точкам). После выбора одного из режимов пользователь может с помощью мыши создавать объекты на графической сцене. Сразу после построения открывается окно параметров (рисунок 1.82,*б*), где можно уточнить координаты объекта и указать его тип, выбрав один из следующих вариантов: «Shield» (экран), «Conductor» (проводник), «Dielectric» (диэлектрик) или «Grounded conductor» (заземленный проводник).

При использовании метода конечных элементов область решения должна быть ограничена во всех направлениях. Исходя из этого, модель строится в прямоугольной области размером  $9 \times 15$  мм,

которая выступает в роли экрана. Используя инструмент «Rect», создадим четыре объекта, представляющие собой экран, диэлектрик и два проводника (рисунок 1.83).



*a*

*б*

Рисунок 1.82 – FEM2D: вкладка «Objects» (*a*)  
и окно параметров объекта (*б*)

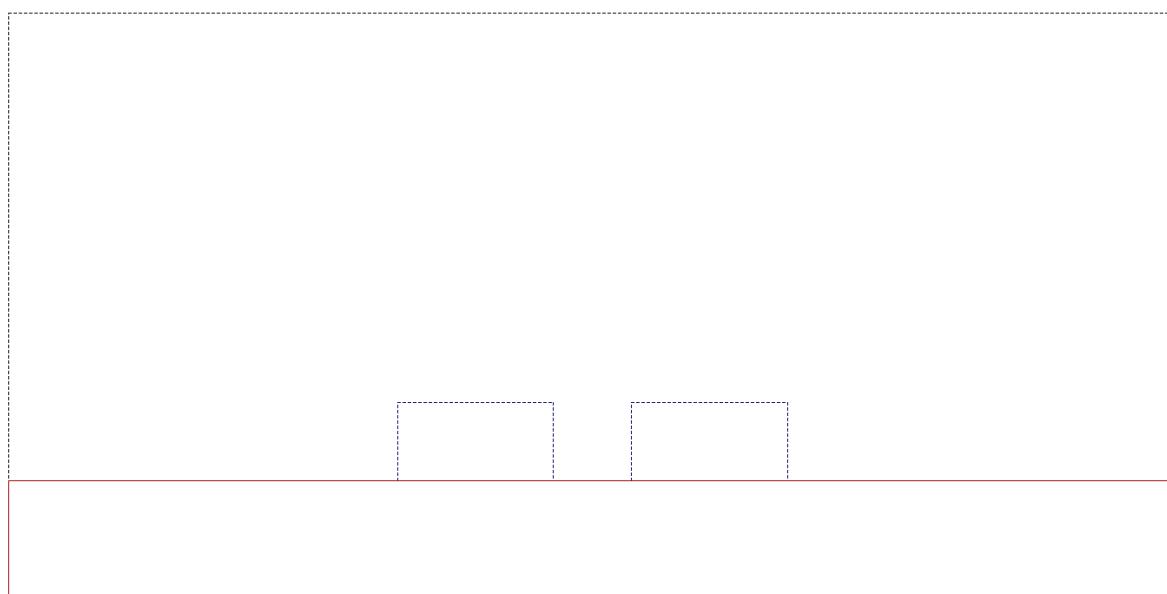


Рисунок 1.83 – FEM2D: результат построения поперечного сечения

Все созданные геометрические объекты отображаются в дереве объектов, открыть которое можно при нажатии на кнопку, показанную на рисунке 1.84. Настройка диэлектрической проницаемости объектов также производится в этом дереве – необходимо раскрыть вкладку «Dielectric objects», выбрать нужный диэлектрик и вписать в поле «Permittivity» необходимое значение.

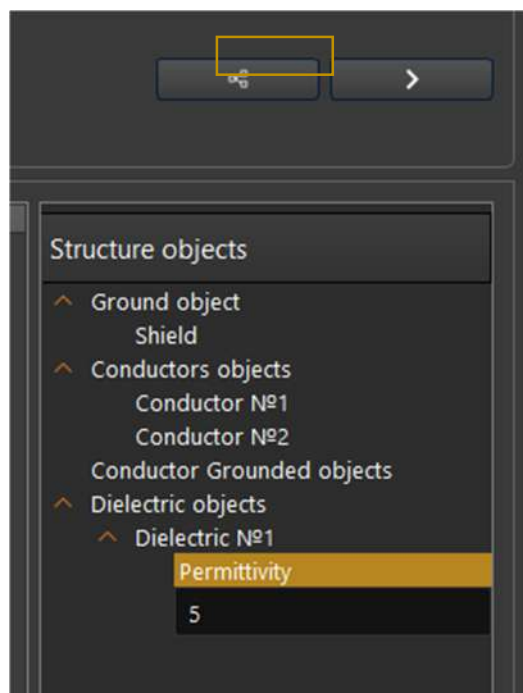
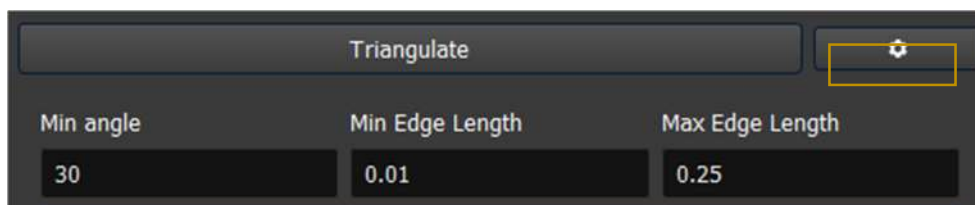


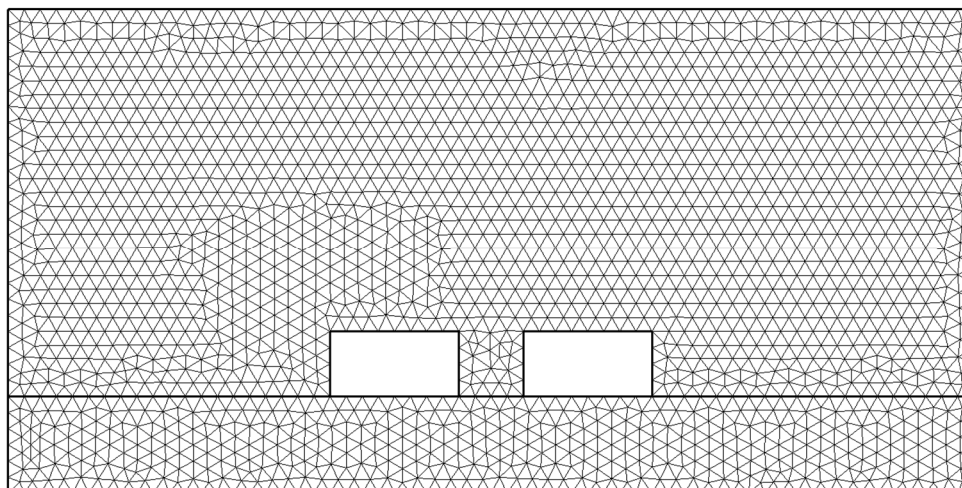
Рисунок 1.84 – FEM2D: дерево объектов

После построения поперечного сечения линии передачи необходимо перейти к следующему этапу – созданию расчётной сетки. Для этого необходимо нажать кнопку «Triangulate» из раздела «Triangulation settings». Чтобы настроить параметры построения сетки необходимо нажать на кнопку с шестерёнкой рядом с кнопкой построения сетки (рисунок 1.85,а). Для настройки доступны следующие параметры: «Min angle» (минимальный доступный угол в треугольниках сетки), «Min Edge Length» и «Max Edge Length» (минимальная и максимальная доступная длина ребра в треугольниках сетки соответственно). Зададим максимально доступную длину ребра треугольников 0,25 и выполним построение сетки (рисунок 1.85,б).

Следующий этап – непосредственно решение задачи. Для его выполнения необходимо нажать кнопку «Calculation» из раздела «Operations» – запускается решатель конечных элементов и производит расчет структуры, по завершении работы которого откроется окно с результатами (рисунок 1.86). В данном окне отображаются полученные матрицы погонных параметров, удельная энергия при различных режимах возбуждения, скорость распространения мод и время вычисления.



*a*



*б*

Рисунок 1.85 – FEM2D: вкладка настроек (*a*) и результат построения расчетной сетки (*б*)

```

*** Результаты вычисления ***

Коэффициенты электростатической индукции [пФ/м]:
132.807   -25.8149
-25.8149   132.627

Собственные и взаимные частичные емкости [пФ/м]:
106.992   25.8149
25.8149   106.812

Погонная индуктивность [нГн/м]:
263.059   89.4454
89.4454   263.149

Энергия :
2.38788e-11  3.15164e-11
3.15164e-11  2.38707e-11

Волновое сопротивление [Ом]:
46.8498   33.1786
33.1909   46.8871

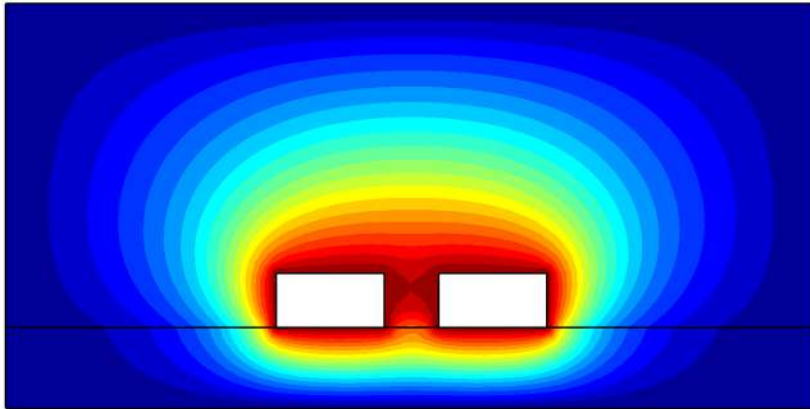
Скорость распространения мод:
beta1= 1.62891e8
beta2= 1.90587e8

Time: 994

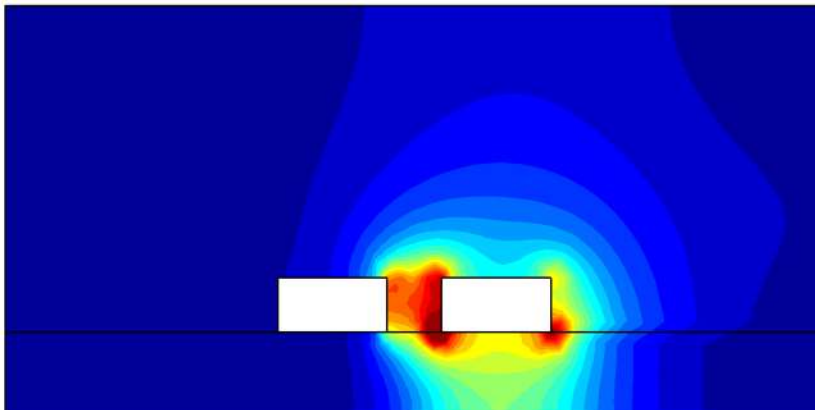
```

Рисунок 1.86 – FEM2D: окно результатов вычисления

После выполнения расчётов становится доступна визуализация электрического поля и распределения потенциалов (рисунок 1.87). Для их построения необходимо нажать на кнопку «Fields» в разделе «Operations», после чего в открывшемся окне выбрать режим возбуждения и указать, что нужно отобразить – потенциалы или электрическое поле.



*a*



*б*

Рисунок 1.87 – FEM2D: распределения потенциала при 1 В на обоих проводниках (*a*) и напряженность электрического поля при 0 В на первом проводнике и 1 В на втором (*б*)

## 1.4 Программа АРМ ЕМА

Как указано на сайте производителя, программный продукт АРМ ЕМА (ElectroMagnetic Analysis) предназначен для анализа электростатических, магнитостатических, а также электромагнитных низкочастотных и высокочастотных процессов, поэтому доступны следующие виды анализа: электростатика; поле постоянных токов; магнитостатика; нестационарное электромагнитное поле (низкочастотная область); электромагнитные волны и их излучение (высокочастотная область) [15]. В АРМ ЕМА используется соответствующая конечно-элементная формулировка для решения уравнений Максвелла и частных от них уравнений [16].

На рисунке 1.88 приведен общий вид пользовательского интерфейса АРМ ЕМА.

Используя пользовательский интерфейс, пользователь взаимодействует с рабочей областью в виде окна с трехмерной графической информацией (рисунок 1.89,а), деревом проекта для отображения информации о проекте (рисунок 1.89,б) и панелью меню, в котором отображаются доступные действия (рисунок 1.89,в).

В АРМ ЕМА интегрированы инструменты для создания и редактирования геометрической модели анализируемой структуры с применением различных тонких и объемных примитивов (рисунок 1.91), а также импорта моделей из сторонних САПР и проприетарной САПР АРМ Structure3D.

Для решения задач электростатики пользователю необходимо задать границы расчетной области. Геометрическая модель и расчетная область дискредитируются с использованием объемных конечных элементов первого порядка: тетраэдров, треугольных призм или гексаэдров. При этом важно, чтобы модель не содержала никаких других конечных элементов и была связанной, то есть была единым целым и не имела отдельно отстоящих узлов.

Перед запуском моделирования элементам модели необходимо задать материал. Для этого в АРМ ЕМА интегрирована библиотека материалов, свойства которых могут быть изменены или созданы новые материалы с требуемыми свойствами (см. рисунок 1.91).

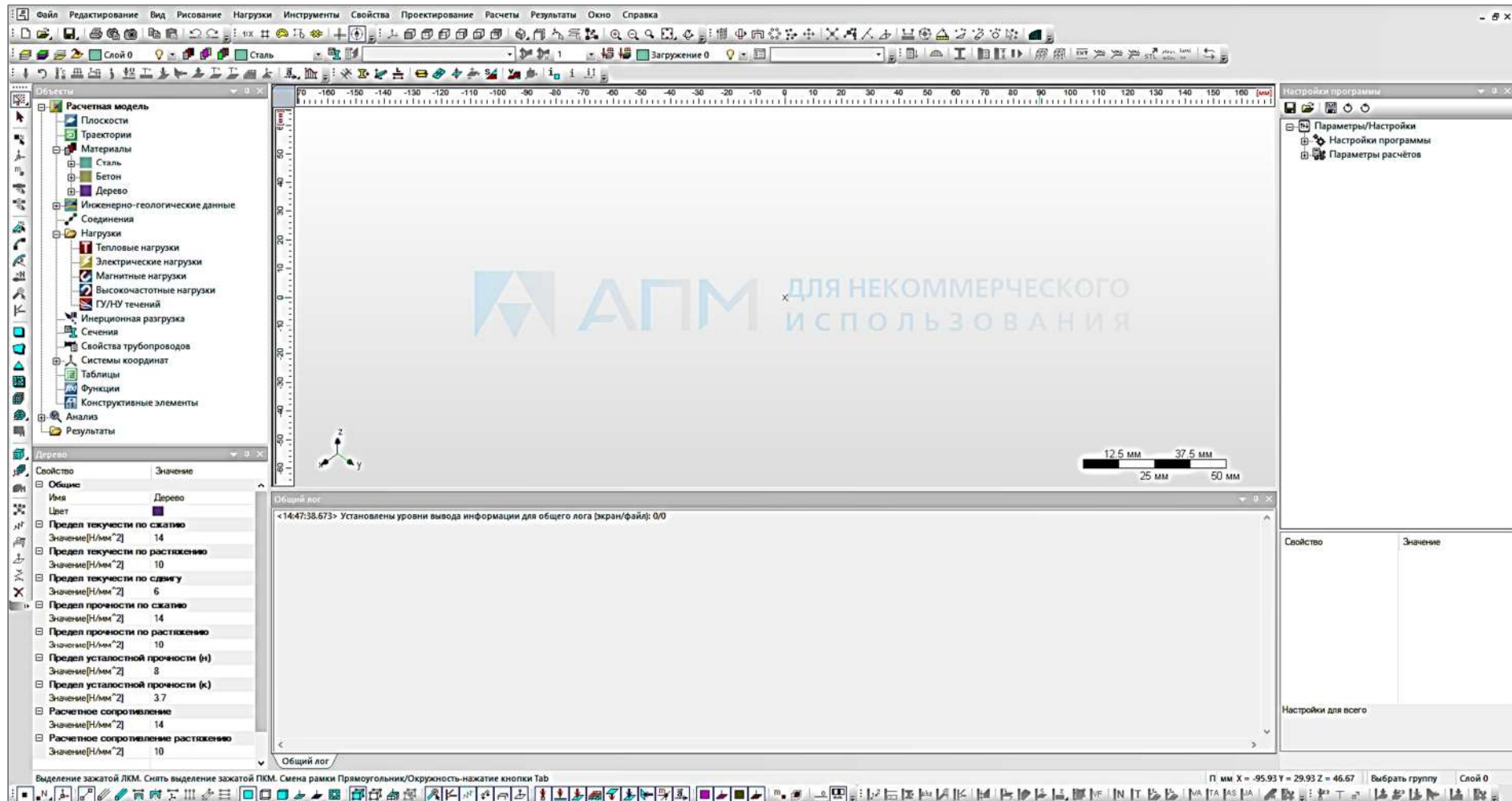
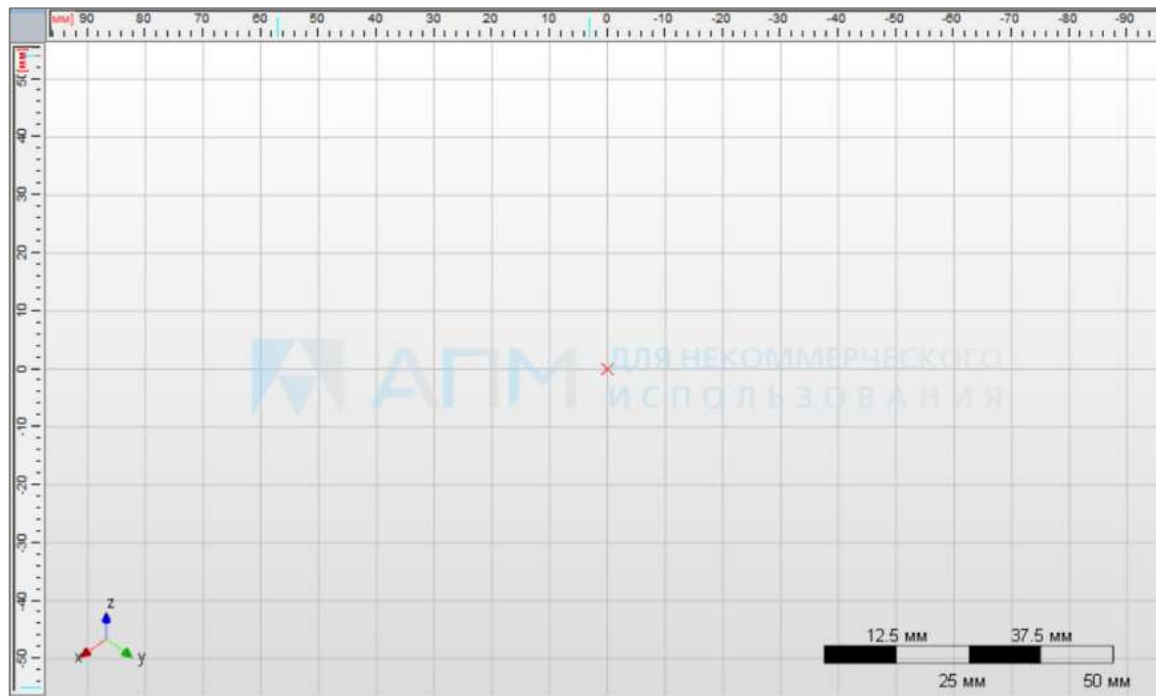
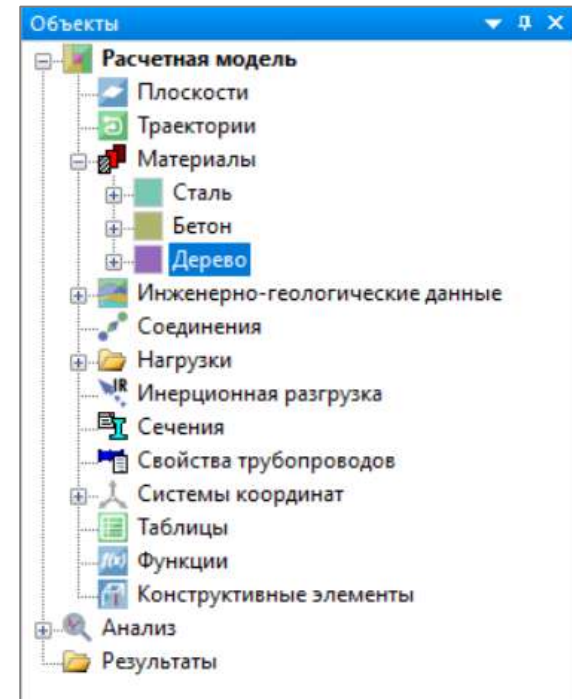


Рисунок 1.88 – АРМ ЕМА: общий вид пользовательского интерфейса [15]



*а*

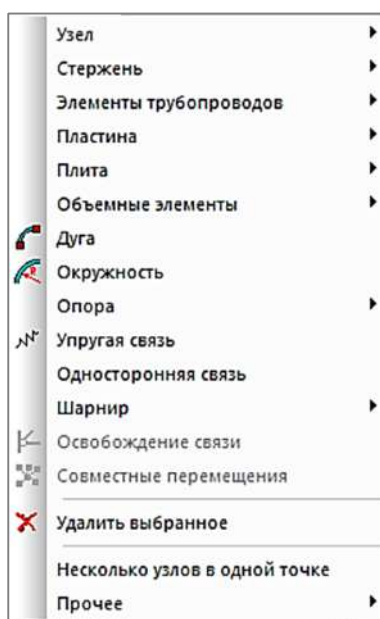


*б*

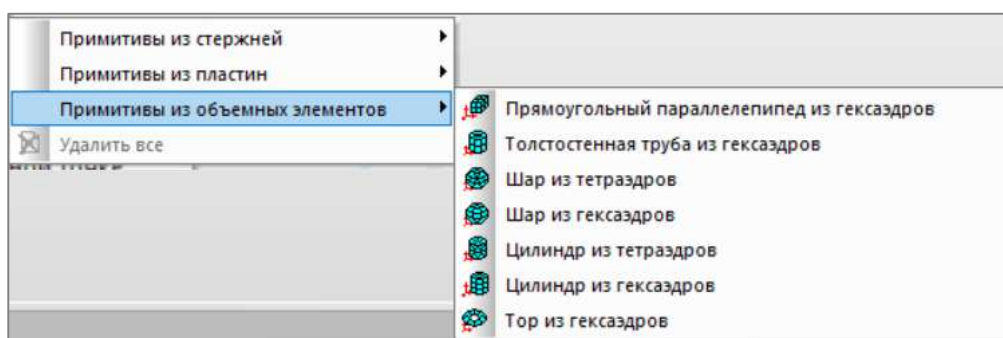


*в*

Рисунок 1.89 – АРМ ЕМА: рабочая область (*а*),  
дерево проекта (*б*) и панель меню (*в*)

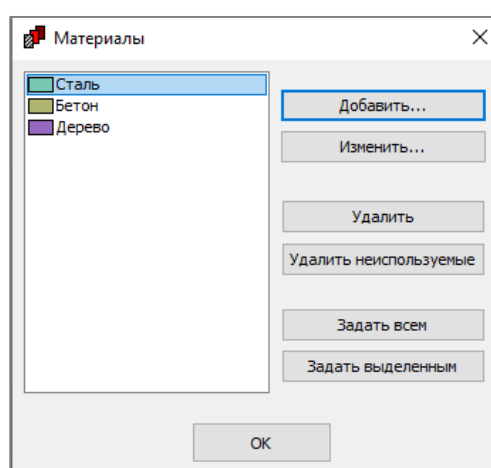


*a*



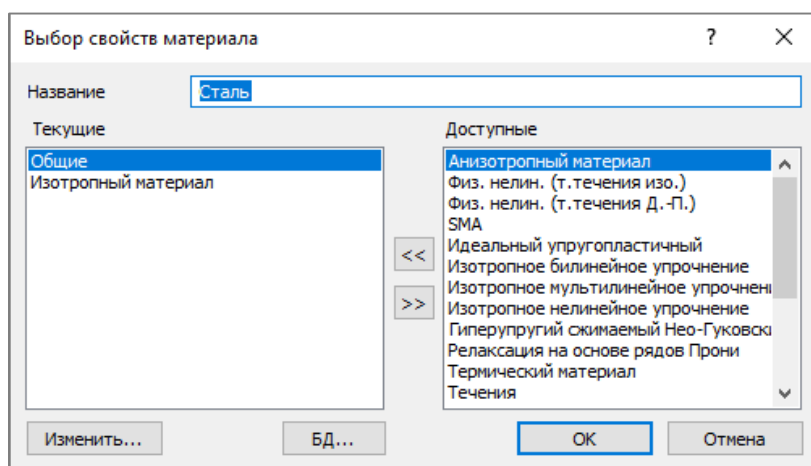
*б*

Рисунок 1.90 – АРМ ЕМА: подменю «Рисование» панели меню (*a*), примеры примитивов из объемных элементов (*б*)

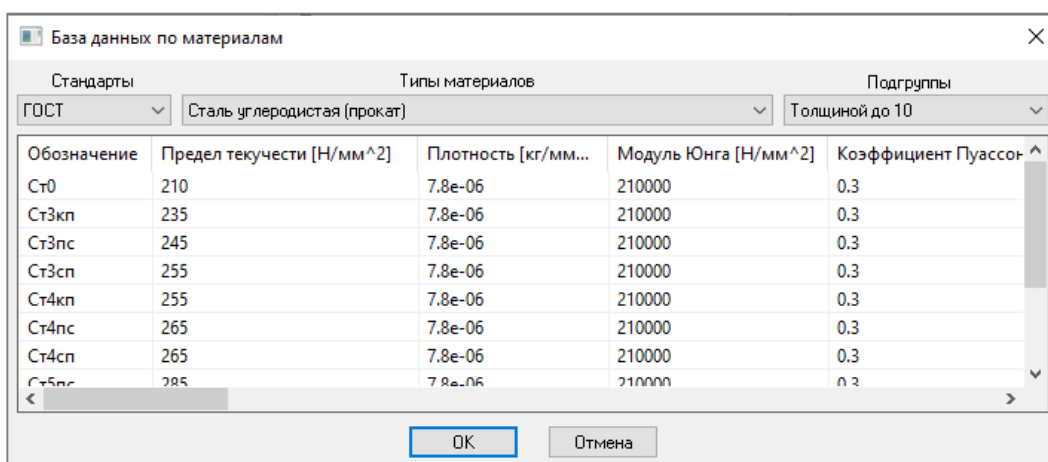


*a*

Рисунок 1.91 – АРМ ЕМА: меню выбора материалов (*a*), меню добавления нового материала (*б*), содержимое библиотеки материалов (*в*) (окончание см. на с. 87)



б

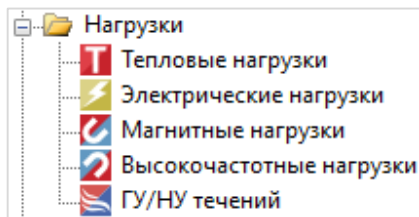


б

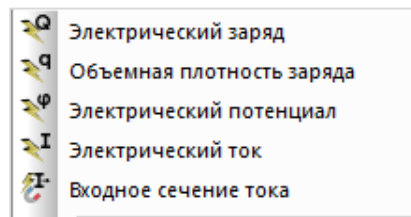
Рисунок 1.91 – Окончание (начало см. на с. 86)

При решении задач электростатики пользователю для задания доступны нагрузки и граничные условия, такие как электрический заряд, объемная плотность заряда и электрический потенциал. Все описанные типы нагрузок могут быть добавлены в проект путем выбора соответствующего пункта контекстного меню для узла «Электрические нагрузки» на панели «Объекты» (рисунок 1.92).

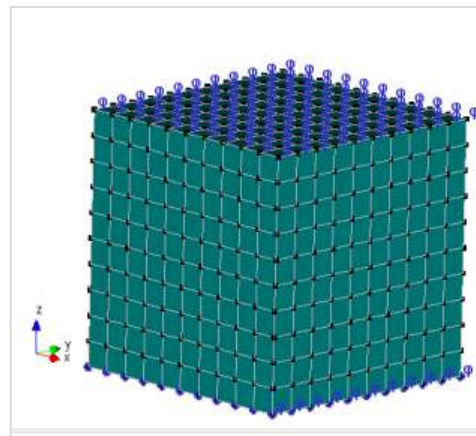
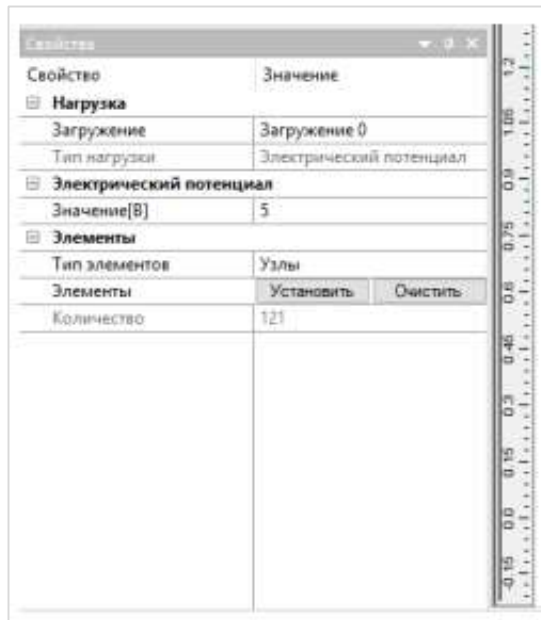
Для проведения электростатического расчета необходимо в диалоговом окне «Расчет» отметить пункт «Электростатический расчет», а в выпадающем списке «Метод» выбрать метод решения СЛАУ (рисунок 1.93). Поскольку СЛАУ при использовании метода конечных элементов является разреженной, доступны прямые и итерационные методы с несколькими видами предобуславливания.



*a*



*б*



*в*

Рисунок 1.92 – АРМ ЕМА: узел выбора нагрузок (*a*), контекстное меню «Электрические нагрузки» (*б*), задание электрического потенциала (*в*)

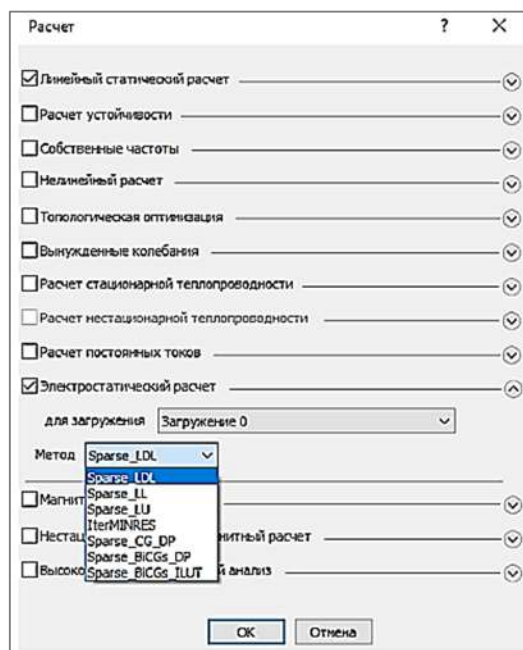


Рисунок 1.93 – АРМ ЕМА: настройки электростатического расчета

После настройки параметров вывода результатов (рисунок 1.94) пользователю доступны для отображения картины распределения электрического потенциала, напряженности электрического поля и электрической индукции (рисунок 1.95).

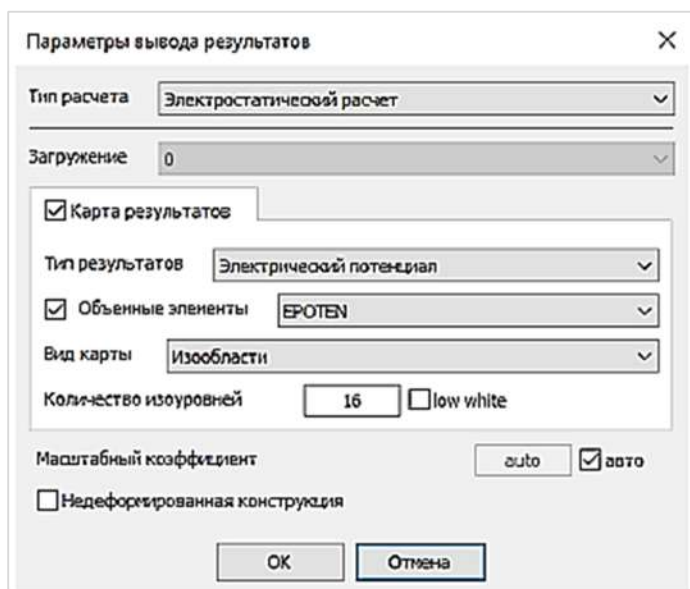


Рисунок 1.94 – АРМ ЕМА:  
настройка вывода результатов для отображения

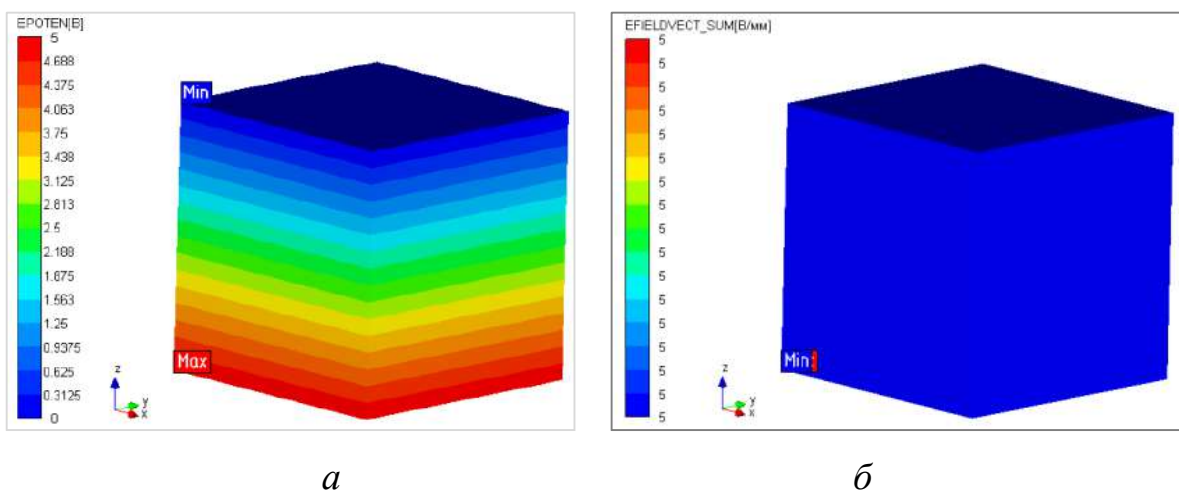


Рисунок 1.95 – АРМ ЕМА: результаты электростатического расчета:  
картины распределения электрического потенциала (а)  
и напряженности электрического поля (б)

Для общности изложения кратко рассмотрим особенности решения других смежных задач в АРМ ЕМА.

При решении задач магнитостатики пользователю доступны другие нагрузки и граничные условия: плотность электрического тока, вектор остаточной намагниченности, векторный магнитный потенциал (рисунок 1.96).

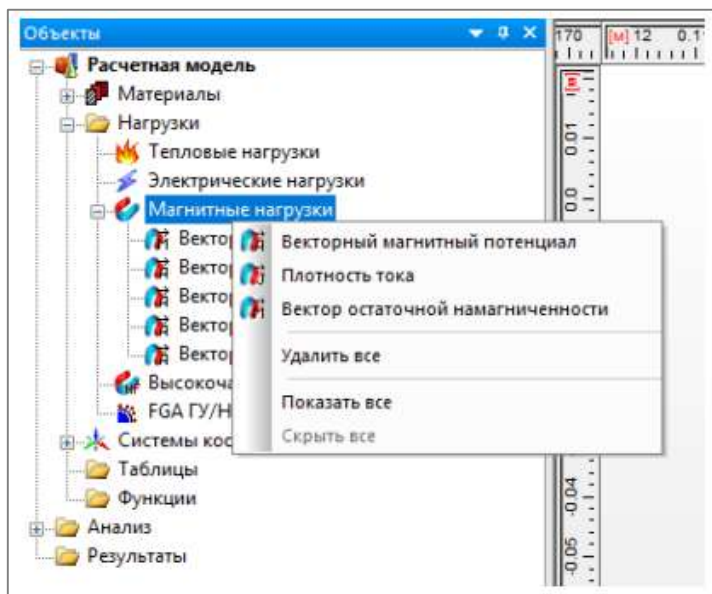


Рисунок 1.96 – АРМ ЕМА: настройка магнитостатической нагрузки

Смена типа расчета осуществляется в окне запуска расчета (см. рисунок 1.93). Пользователю для просмотра доступны три вида результатов: магнитный потенциал, магнитная индукция и напряженность магнитного поля (рисунок 1.97).

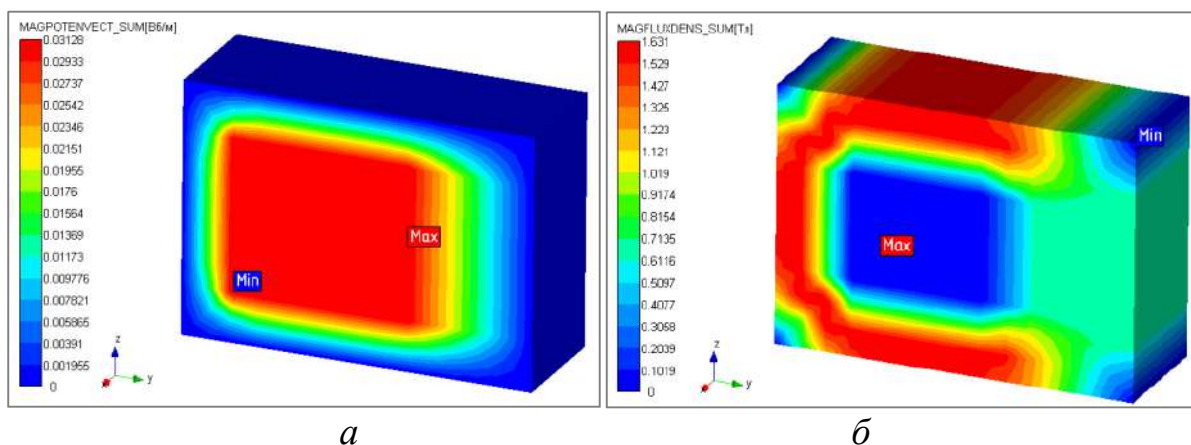
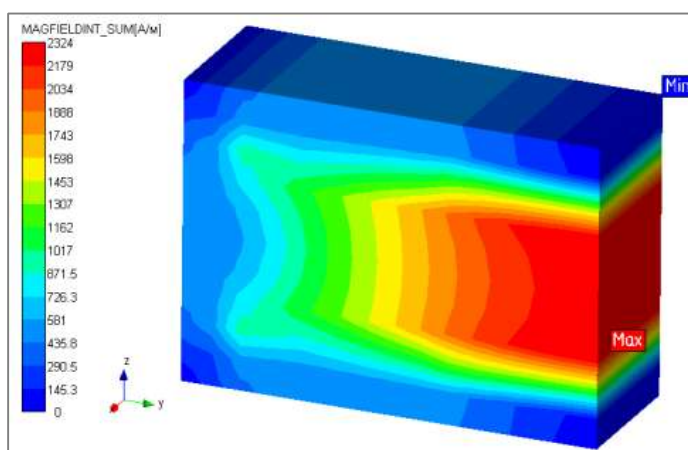


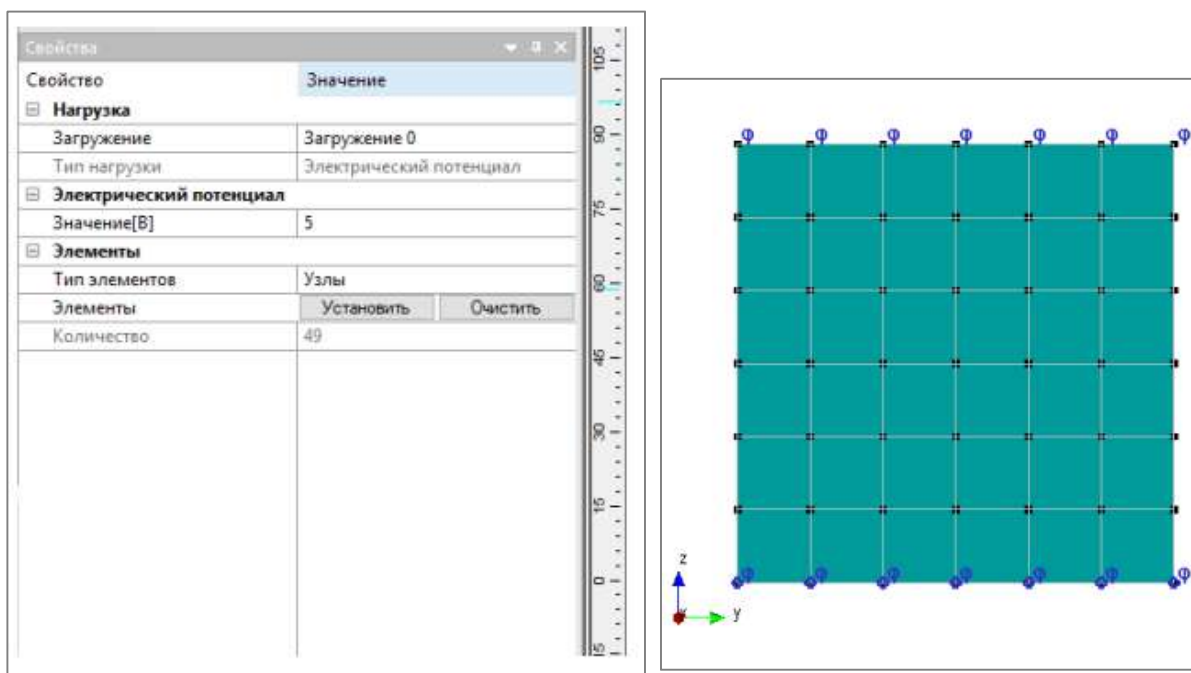
Рисунок 1.97 – АРМ ЕМА: результаты магнитостатического расчета: картины распределения магнитного потенциала (а), магнитной индукции (б) и напряженности магнитного поля (в) (окончание см. на с. 91)



б

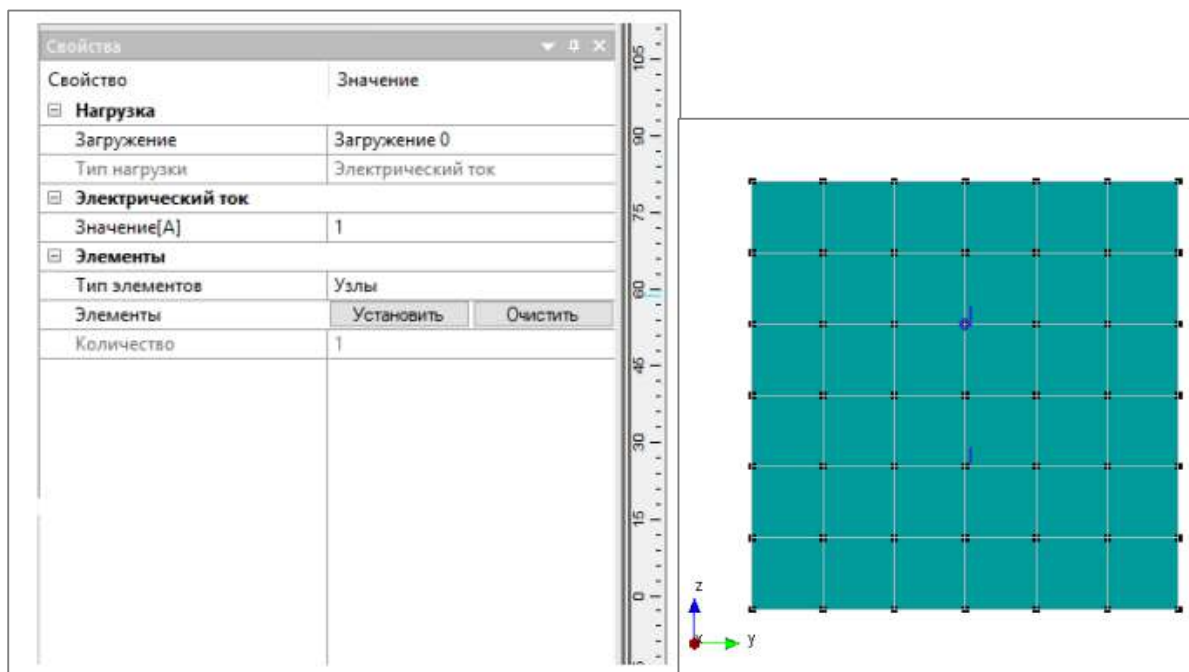
Рисунок 1.97 – Окончание (начало см. на с. 90)

Для моделирования задач расчета поля постоянных токов используются другие виды нагрузок и граничных условий: электрический ток и электрический потенциал (рисунок 1.98).



а

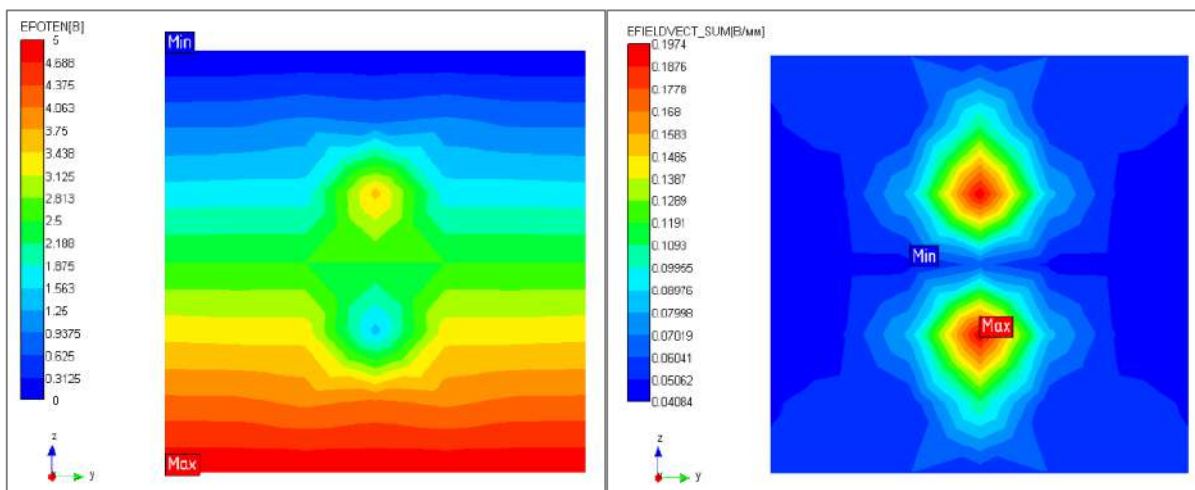
Рисунок 1.98 – АРМ ЕМА: задание электрического потенциала (а) и электрического тока (б) в узлах модели (окончание см. на с. 92)



б

Рисунок 1.98 – Окончание (начало см. на с. 91)

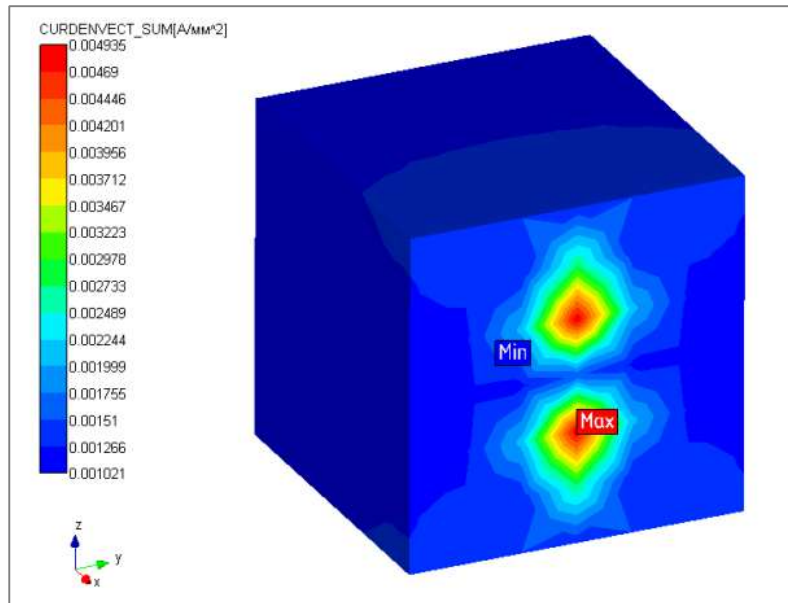
Смена типа расчета также осуществляется в окне запуска расчетов (см. рисунок 1.93), после для просмотра доступны три типа результатов: электрический потенциал, напряженность электрического поля, плотность тока (рисунок 1.99).



а

б

Рисунок 1.99 – АРМ ЕМА: результаты расчета поля постоянных токов: картины распределения электрического потенциала (а), напряженности электрического поля (б) и плотности тока (в) (окончание см. на с. 93)



6

Рисунок 1.99 – Окончание (начало см. на с. 92)

## 1.5 Контрольные вопросы и задания

1. Укажите, какие численные методы используются в отечественных программных средствах.

2. Перечислите типы решаемых задач в отечественных программных средствах.

3. Приведите общие характерные особенности отечественных программных средств.

4. Выполните расчет емкостной матрицы связанной микрополосковой линии передачи в отечественных программных средствах ELCUT, TUSUR.EMC, FEM2D и сравните результаты. Параметры линии передачи выбрать следующие: ширина проводников  $w = 3$  мм, толщина проводников  $t = 0,2$  мм, толщина диэлектрической подложки  $h = 1$  мм, ее относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r = 5,5$ , расстояние между проводниками  $s = 5$  мм.

5. Выполните расчет емкости коаксиального кабеля в отечественных программных средствах ELCUT, TUSUR.EMC, FEM2D и сравните результаты. Поперечное сечение кабеля приведено

на рисунке 1.100. Параметры кабеля:  $r_1 = 5$  мм,  $r_2 = 20$  мм,  $\epsilon_r = 2$ . Дополнительно в программе ELCUT постройте эквипотенциальные линии, а в TUSUR.EMC отобразите плотность распределения заряда.

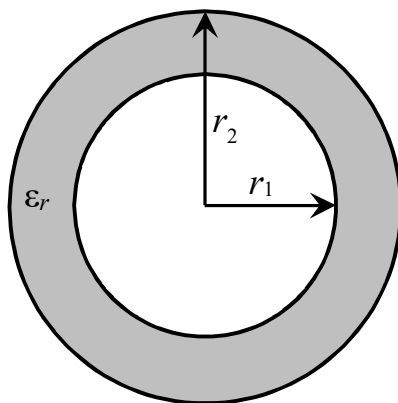


Рисунок 1.100 – Поперечное сечение коаксиального кабеля

# 2 ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА С ОТКРЫТЫМ ИСХОДНЫМ КОДОМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

*Дело помощи утопающим –  
дело рук самих утопающих.*

И. Ильф, Е. Петров «Двенадцать стульев»

## 2.1 Программа FEMM

### 2.1.1 Описание программы

Программа FEMM (finite element method magnetics) позволяет проводить моделирование асимметричных, плоскопараллельных стационарных/квазистационарных магнитных и стационарных электростатических полей [17]. На рисунке 2.1 приведен общий вид пользовательского интерфейса программы.

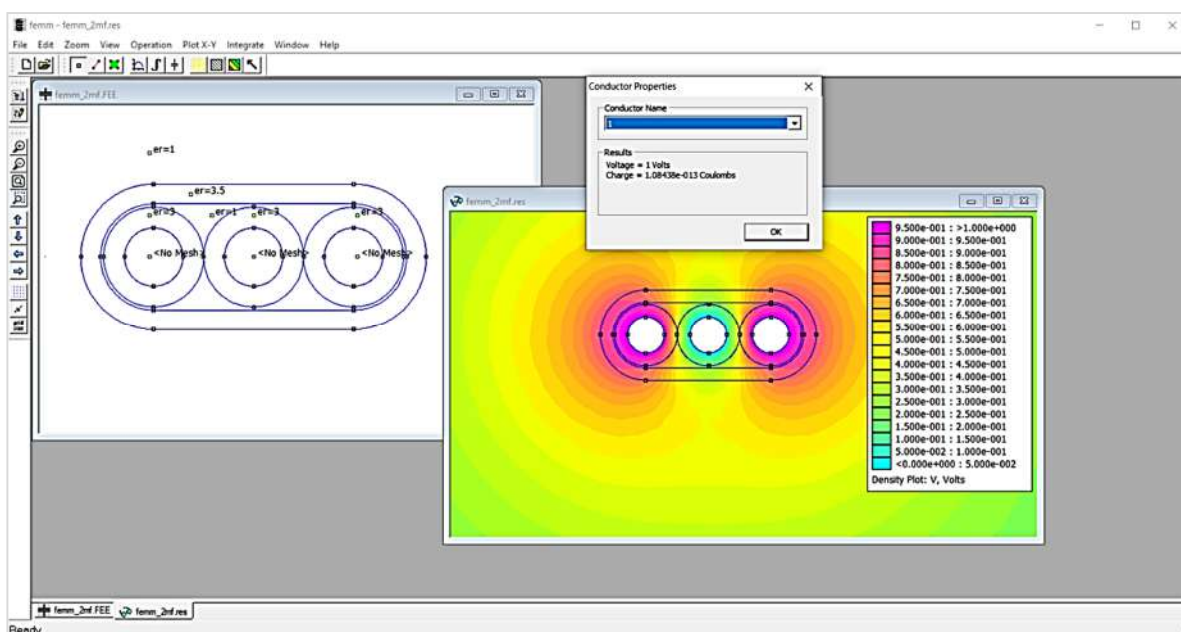


Рисунок 2.1 – FEMM: интерфейс пользователя

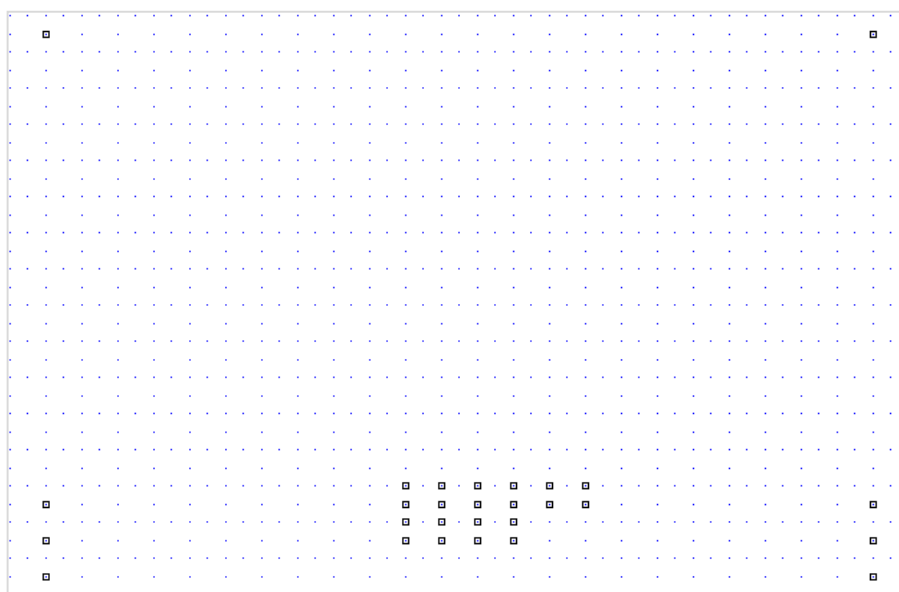
FEMM дает возможность решать следующие типы задач: магнитоэлектростатические, квазистатические задачи переменного тока, электростатические и теплопроводные. Магнитоэлектростатические задачи включают анализ магнитных полей постоянных магнитов

и электромагнитов, расчет распределения магнитной индукции, напряженности магнитного поля, силовых воздействий и энергии магнитного поля. Квазистатические задачи переменного тока позволяют моделировать электромагнитные поля при синусоидальном возбуждении, учитывать вихревые токи и анализировать импеданс систем. Электростатические задачи предназначены для расчета электрических полей, распределения потенциалов и емкости проводников. Решение задач теплопроводности дает возможность анализировать температурные поля, тепловые потоки и распределение температуры в материалах.

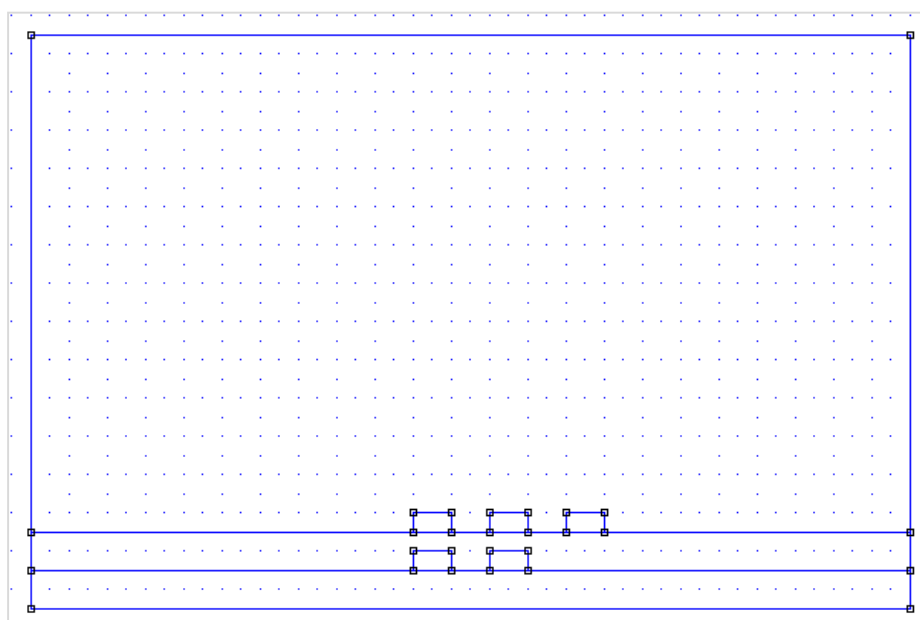
FEMM относится к открытому программному обеспечению и распространяется на условиях лицензии Aladdin free public license. Данная лицензия не совпадает ни с одной из лицензий GNU, опубликованных фондом свободного программного обеспечения. Aladdin enterprises предоставляет любому лицу разрешение на применение к собственному произведению при условии копирования всей лицензии без каких-либо изменений, дополнений или удалений, за исключением первого раздела, включающего соответствующее описание произведения, к которому применяется лицензия, и физического или юридического лица, которому принадлежит авторское право на произведение.

Программа состоит из следующих модулей: препроцессора, генератора сетки (конечных элементов), решателя и постпроцессора. В препроцессоре осуществляется подготовка геометрии, присвоение расчетной области свойств сред и задание граничных условий. Геометрическая конфигурация задачи определяется как набор подобластей из блоков, представляющих собой криволинейные многоугольники в плоскости модели, не пересекающиеся между собой. Каждому блоку соответствует определенный набор физических свойств. Линии, отделяющие расчетную область от остальной части плоскости, составляют внешнюю границу расчетной области. Создание геометрической модели исследуемого объекта осуществляется путем построения вершин, ребер и блоков. Каждая вершина представляет собой точку на плоскости, координаты которой устанавливаются пользователем (рисунок 2.2,*a*). Отрезок прямой или дуги, соединяющий две вершины, образует ребро, а связанная

подобласть плоскости модели, внешняя граница которой состоит из последовательности ребер, образует блок (рисунок 2.2,б). Задание граничных условий и свойств сред осуществляется путем задания меток для каждого блока, ребра и вершины (рисунок 2.2,в). Метки позволяют ассоциировать геометрические объекты модели с численными значениями физических свойств реального объекта.

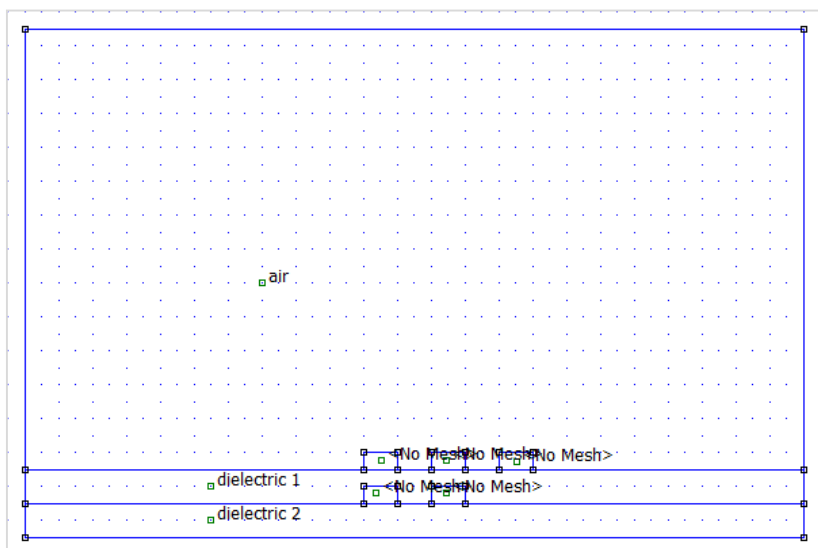


*а*



*б*

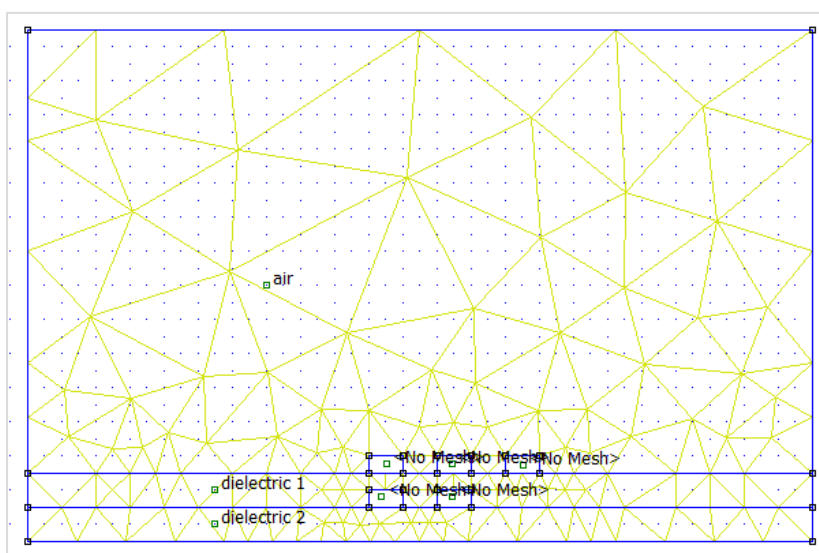
Рисунок 2.2 – FEMM: создание геометрической модели: построение вершин (*а*), ребер (*б*) задание меток блоков (*в*) (окончание см. на с. 98)



б

Рисунок 2.2 – Окончание (начало см. на с. 97)

Построение расчетной сетки осуществляется с помощью библиотеки Trinagle [18]. Шаг сетки может быть задан локально в каждом блоке модели (рисунок 2.3,а) или рассчитан автоматически с использованием адаптивного построения («Smart mesh»), при активации которого размер элементов сетки определяется автоматически, после чего производится ее локальное утащение у вершин геометрии (рисунок 2.3,б).



а

Рисунок 2.3 – FEMM: построение расчетной сетки без «Smart mesh» (а) и с ним (б) (окончание см. на с. 99)

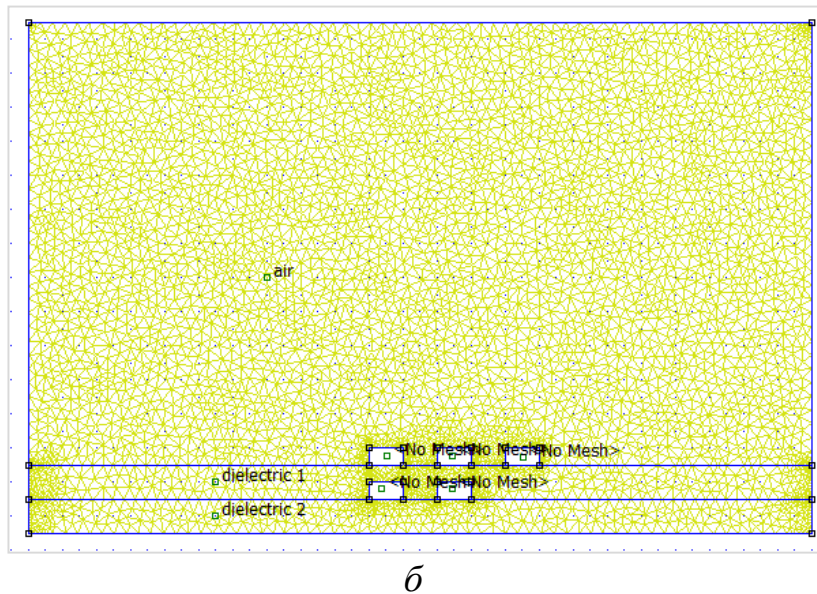


Рисунок 2.3 – Окончание (начало см. на с. 98)

Решатель основан на методе конечных элементов. Обработка результатов вычислений и их визуализация выполняются в пост-процессоре. Для обработки результатов используется интегральный калькулятор, позволяющий вычислять напряженность поля и связанные с ней величины в зависимости от типа задачи. Так, для вывода доступны локальные значения в точке, вдоль прямой или в области. Также доступна визуализация полей (рисунок 2.4).

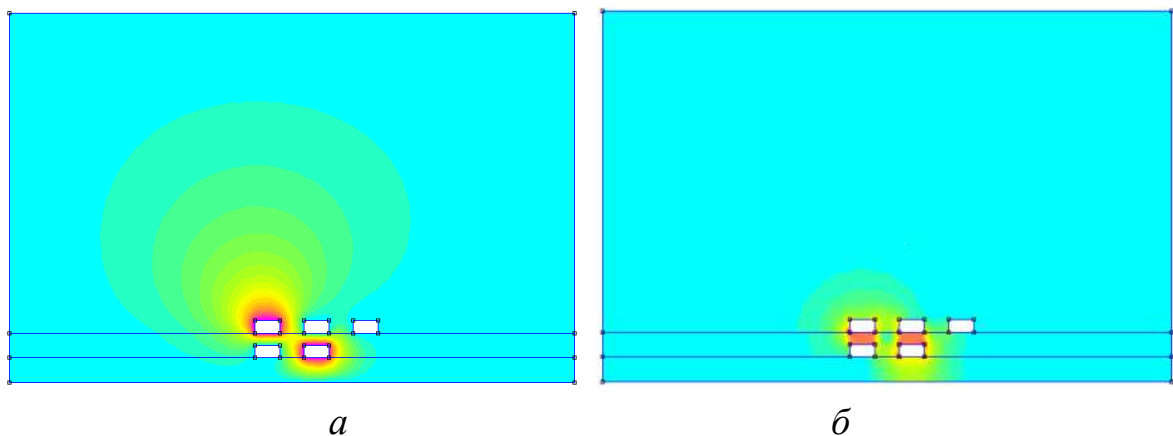
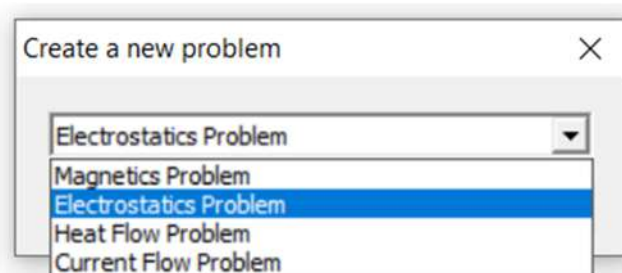


Рисунок 2.4 – FEMM: визуализация распределения потенциала (а) и напряженности электрического поля (б)

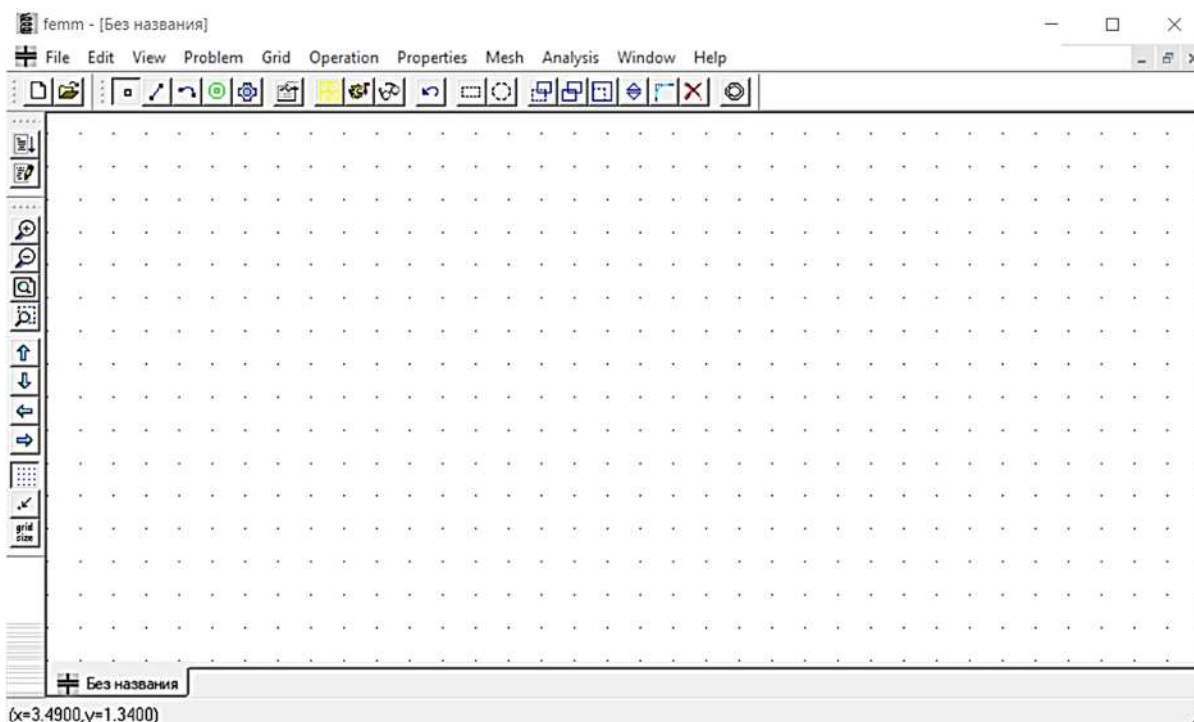
## 2.1.2 Пример моделирования

Рассмотрим моделирование 2-проводной микрополосковой линии передачи. Параметры поперечного сечения линии: ширина проводников  $w = 2$  мм, толщина проводников  $t = 1$  мм, толщина диэлектрической подложки  $h = 1,5$  мм, ее относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r = 5$ , расстояние между проводниками  $s = 1$  мм,  $d = 5$  мм (см. рисунок 1.10).

Для этого создадим новую задачу с типом «электростатическое поле» (рисунок 2.5,*а*). После чего откроется окно с препроцессором (рисунок 2.5,*б*), в котором нужно построить геометрическую модель линии, задать материалы и граничные условия.



*а*



*б*

Рисунок 2.5 – FEMM: окна создания задачи (*а*) и препроцессинга (*б*)

Вначале необходимо задать общие параметры задачи. Для этого необходимо открыть окно настройки задачи (вкладка «Problem»). В данном окне задаются:

- тип задачи («Problem Type»): плоская (декартова система координат) или осесимметричная (цилиндрическая система координат);
- единицы измерения («Length Units»);
- длина модели («Depth»);
- точность итерационного решателя («Solver Precision»);
- минимально возможный угол в треугольнике при построении расчетной сетки («Min Angle»);
- адаптивная сетка («Smart Mesh»): включает и отключает функцию построения адаптивной сетки.

Установим единицы измерения – миллиметры («Millimeters» в секции «Length Units»), и длину линии – 1000 мм (секция «Depth»), как показано на рисунке 2.6.

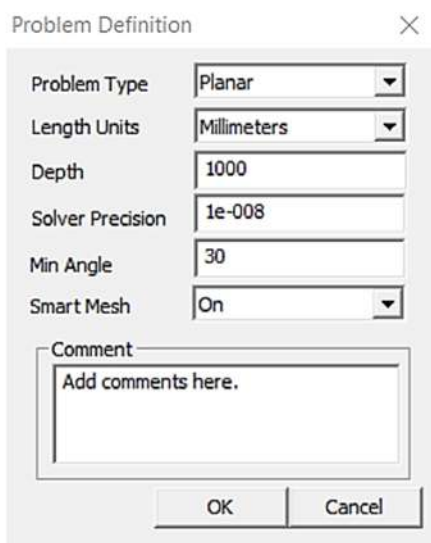


Рисунок 2.6 – FEMM: окно настройки задачи

Далее нужно перейти к построению поперечного сечения линии, используя инструменты, представленные на рисунке 2.7.

Для настройки масштаба области используются (рисунок 2.7,а):

- кнопки «+» и «-» – увеличивают и уменьшают масштаб области построения соответственно;

– кнопка «blank page» – автоматически устанавливает масштаб, чтобы отобразить геометрическую модель в минимально возможном размере;

– кнопка «page with magnifying glass» – увеличивает выбранный пользователем участок области построения.

Для изменения положения области построения предусмотрены кнопки «arrows» (рисунок 2.7,б), которые сдвигают область в указанном направлении на половину ее текущего размера.

Еще одним важным инструментом взаимодействия с областью построения является сетка привязки (рисунок 2.7,в), которая включается с помощью кнопки «show grid points». Для активации привязки используется кнопка «snap to grid». Последняя кнопка из этой группы («grid size») вызывает диалоговое окно настройки шага сетки, в котором можно задать расстояние между точками привязки и систему координат, используемую для построения сетки (рисунок 2.8).

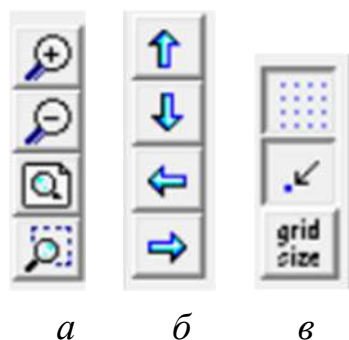


Рисунок 2.7 – FEMM: инструменты масштабирования (а), изменения положения (б) и построения сетки привязки (в) при настройке области построения

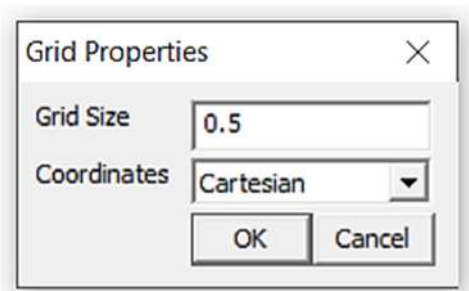


Рисунок 2.8 – FEMM: инструменты настройки области построения

Для создания геометрической модели применяются (рисунок 2.9): опорные точки («Point mode»), прямые («Segment mode»), дуги («Arc Segment mode»), блоки («Block mode») и группы («Group mode»). Так, вначале устанавливаются опорные точки модели, затем они соединяются прямыми или дугами, образуя блоки, для которых в дальнейшем задаются электрофизические свойства.



Рисунок 2.9 – FEMM: панель выбора режима построения

Построение поперечного сечения линии начинается с выставления опорных точек с помощью режима «Point mode», как показано на рисунке 2.10,*а*. Согласно методу конечных элементов область решения должна быть ограничена во всех направлениях. Исходя из этого, модель строится в прямоугольной области размером 9×15 мм, которая выступает в роли экрана. Для удобства расставления опорных точек шаг сетки выбран 0,5 с активной функцией привязки. Далее, используя режим «Segment mode», можно соединить опорные точки, создавая контур поперечного сечения, как показано на рисунке 2.10,*б*.

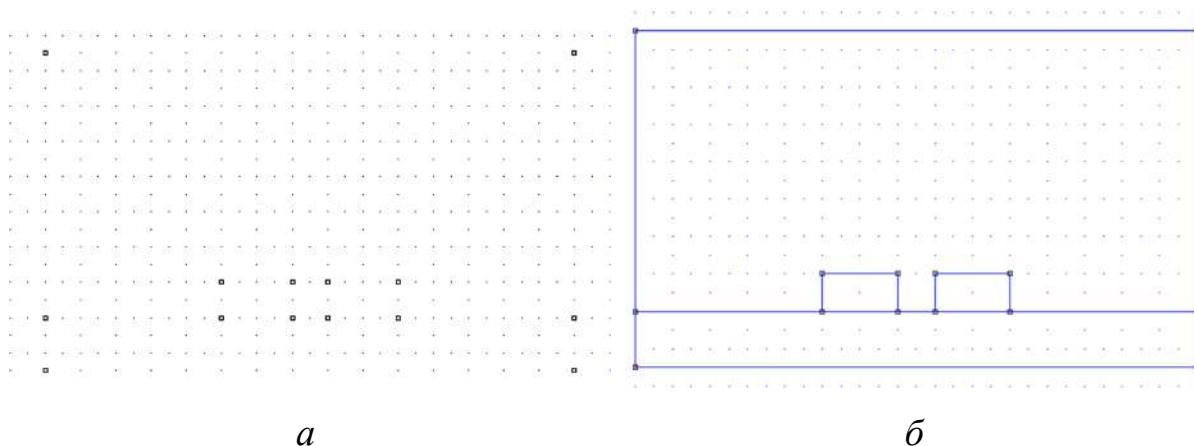


Рисунок 2.10 – FEMM: пример построения опорных точек (*а*) и контура поперечного сечения (*б*) линии

Затем необходимо указать электрофизические свойства, которые задаются в разделе «Properties». В подразделе «Properties →

Materials» (рисунок 2.11,*a*) можно управлять списком материалов: создавать, редактировать или удалять их. При выборе опции создания нового материала «Add Property» открывается диалоговое окно (рисунок 2.11,*б*), в котором требуется указать название материала, его относительную диэлектрическую проницаемость вдоль различных осей и плотность заряда. После сохранения данных материал автоматически добавляется в список.

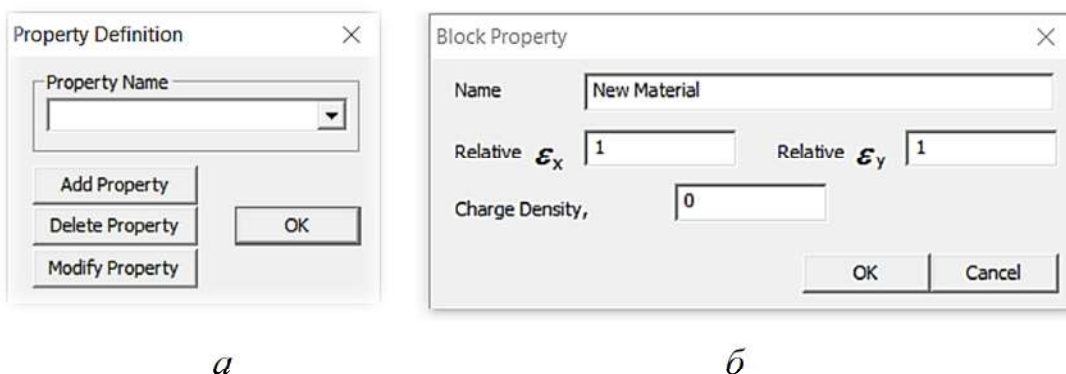


Рисунок 2.11 – FEMM: окно списка материалов (*a*)  
и окно создания нового диэлектрика (*б*)

В подразделе «Properties → Conductors» (рисунок 2.12) аналогичным образом задаются параметры проводников. При создании нового проводника («Add Property») необходимо указать его имя, значение напряжения (в вольтах) или заряда (в кулонах). Сохраненный проводник сразу становится доступным для работы в проекте.

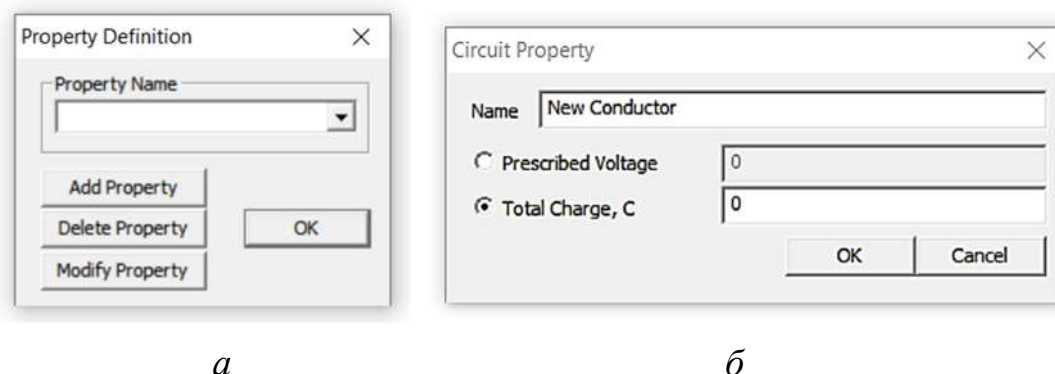


Рисунок 2.12 – FEMM: окно списка проводников (*a*)  
и окно создания нового проводника (*б*)

Создадим два материала: свободное пространство («free space»,  $\epsilon_x = 1$ ,  $\epsilon_y = 1$ ) и подложка («substrate»,  $\epsilon_x = 5$ ,  $\epsilon_y = 5$ ), и три проводника: активный («active», напряжение 1 В), пассивный («passive», напряжение 0 В) и земля («ground», напряжение 0 В).

Материалы к блокам модели привязываются с использованием меток, режим «Block mode». Для открытия режима настройки блока необходимо выделить построенную метку (правая кнопка мыши) и нажать пробел, появится окно настройки блока (рисунок 2.13). В этом окне можно настроить: тип блока, шаг расчетной сетки внутри блока и номер группы, к которой будет относиться блок (для работы в режиме «Group mode»).

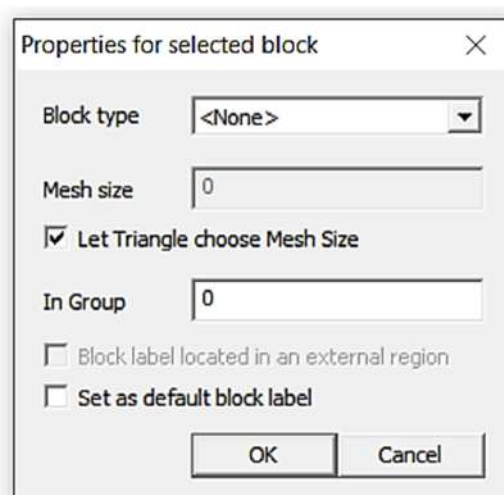


Рисунок 2.13 – FEMM: окно настройки свойств блока

Для каждой области устанавливается метка и ей задается соответствующий материал, как показано на рисунке 2.14. Так, для области над проводниками устанавливается «free space», для подложки – «substrate», а для проводников – «No mesh» (специальная метка для блоков, не участвующих в расчетах).

Далее указываются параметры проводников, которые применяются к граням модели. Для этого нужно перейти в режим «Segments mode» и, выделяя соответствующие грани, установить следующие типы проводников: для первого проводника – «active», второго – «passive», экрана – «ground».

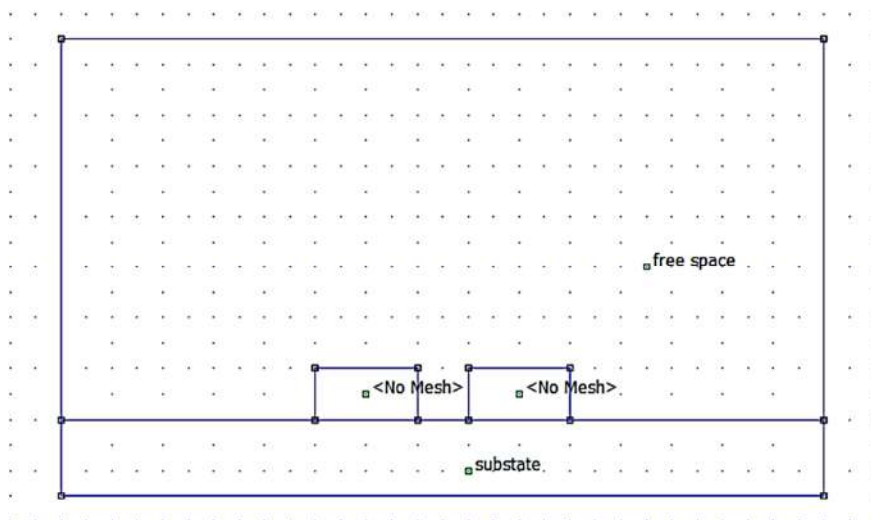


Рисунок 2.14 – FEMM: пример задания меток блоков

После этого можно перейти непосредственно к решению задачи, применяя инструменты из блока запуска расчетных задач (рисунок 2.15). Этот блок содержит следующие инструменты:

- генератор расчетной сетки (кнопка с желтой сеткой). После нажатия на эту кнопку программа выполнит построение расчетной сетки и отобразит ее на экране в виде набора желтых линий. Шаг сетки настраивается локально для каждой грани или блока либо определяется автоматически, если выбрана опция «Smart mesh» в окне настройки задачи (см. рисунок 2.6);

- решатель (кнопка с шестеренкой). После нажатия на эту кнопку запускается решатель, который выполняет основные вычисления. Откроется консольное окно, в котором отобразится статус выполнения, а по завершении работы оно автоматически закроется. Время, необходимое для выполнения расчета, варьируется в зависимости от сложности и размера задачи;

- постпроцессинг (кнопка с очками). После нажатия на эту кнопку программа переключится на окно постпроцессинга.



Рисунок 2.15 – FEMM:  
блок запуска расчетных задач

Сначала строится расчетная сетка (рисунок 2.16), затем запускается решение задачи. После завершения расчетов нужно переключиться в режим постпроцессинга (рисунок 2.17).

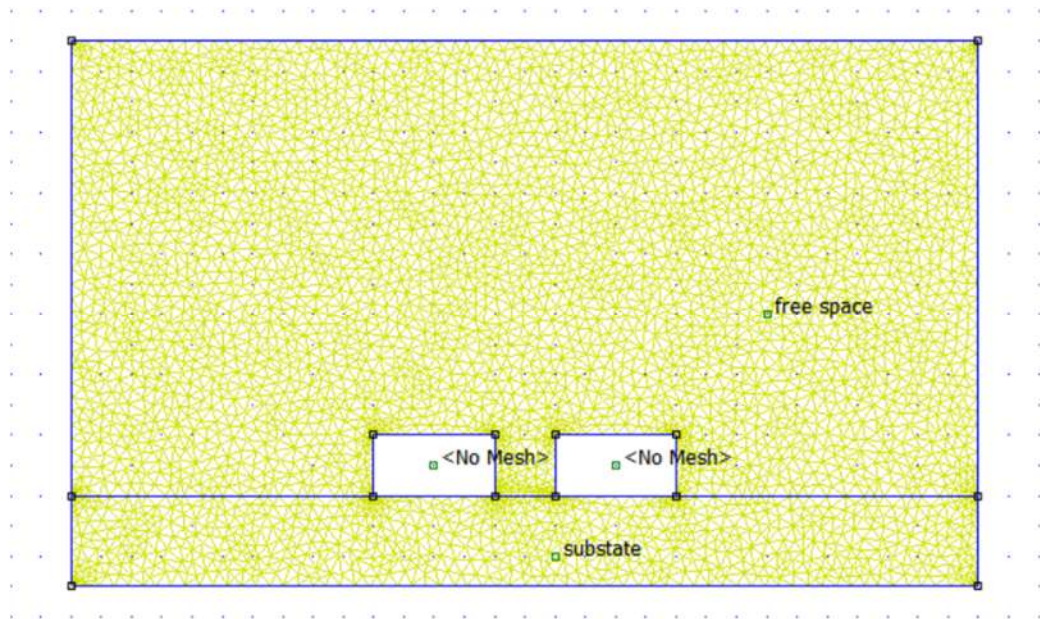


Рисунок 2.16 – FEMM: расчетная сетка

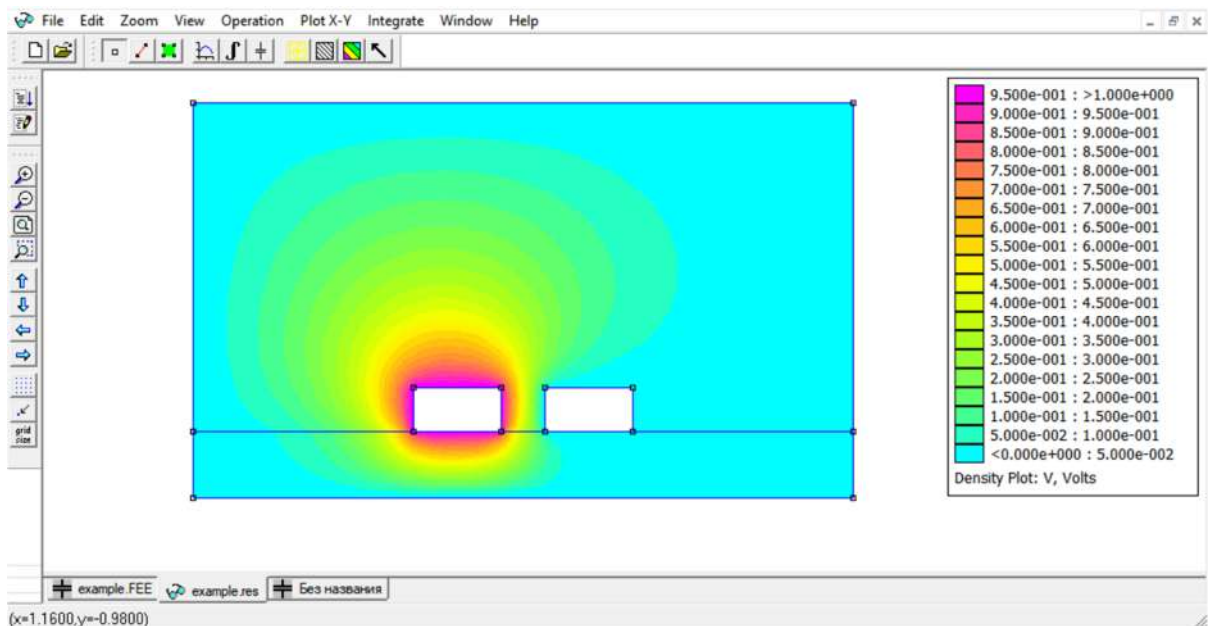


Рисунок 2.17 – FEMM: окно постпроцессинга

Постпроцессор предназначен для анализа и просмотра полученного решения. Основные элементы работы с постпроцессингом представлены на рисунке 2.18.

На рисунке 2.18,*а* представлены кнопки, позволяющие переключаться между различными режимами взаимодействия с областью решения:

– точка (Point Values Mode). Данный режим позволяет выбирать произвольные точки в расчетной области и получать локальные значения электрических полей и потенциалов;

– контур (Contour Mode). Этот режим используется для построения произвольных контуров в области решения. После задания контура можно построить графики величин вдоль него или вычислить различные линейные интегралы;

– блоки (Block Mode). Данный режим позволяет выделить подобласть внутри области решения для вычисления в ней различных величин, описываемых объемными и поверхностными интегралами.

На рисунке 2.18,*б* представлены кнопки для выполнения расчетов и анализа результатов. Первая кнопка предназначена для построения графиков вдоль контура. При ее нажатии открывается диалоговое окно, в котором можно выбрать требуемую величину из раскрывающегося списка (рисунок 2.19,*а*): потенциал, напряженность электрического поля, электрическое смещение, а также их компоненты. В этом окне дополнительно можно задать число точек для построения графика.

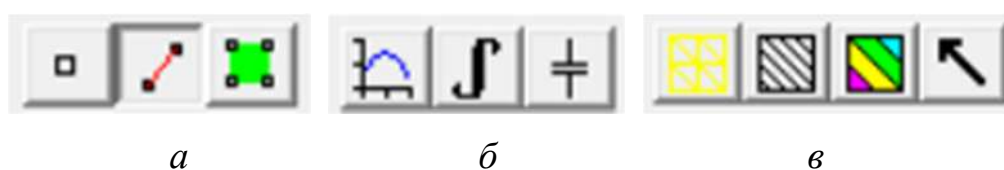
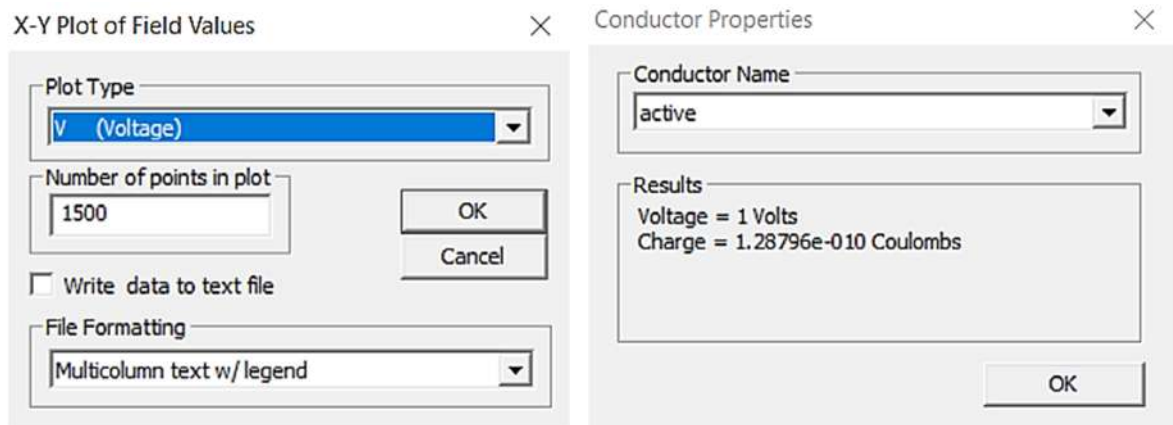


Рисунок 2.18 – FEMM: инструменты переключения режимов взаимодействия с областью решения (*а*), выполнения расчетов (*б*) и визуализации (*в*)

Вторая кнопка служит для вычисления различных интегралов. Например, если построен контур, то доступно вычисление разности потенциалов вдоль контура или если контур замкнут – полного электрического потока через него. Если выбран блок, то можно вычислить запасенную энергию, среднюю величину потока вектора

электрического смещения, среднее значение напряженности электрического поля и др.



*a*

*б*

Рисунок 2.19 – FEMM: окна настройки построения графиков (*a*) и калькулятора проводников (*б*)

Последняя кнопка предназначена для вызова калькулятора проводников. При ее нажатии появляется окно (см. рисунок 2.19,б), в котором необходимо выбрать имя проводника. Напряжение на нем и его заряд будут указаны в секции «Results».

Последняя группа кнопок отвечает за визуализацию (см. рисунок 2.18,в). Первая из них отвечает за построение расчетной сетки, вторая – построение эквипотенциальных линий, третья – отображение распределения напряженности электрического поля, потенциалов или вектора смещения, а четвертая – визуализацию векторов.

Для вычисления емкостной матрицы можно воспользоваться калькулятором проводников. При его открытии появится окно, представленное на рисунке 2.19,б. В этом окне рассчитываются напряжение на проводнике и его заряд, зная которые можно определить элементы емкостной матрицы. Связь между погонной емкостью и зарядом определяется как

$$q = CV, \quad (2.1)$$

где  $q$  – заряд;  $C$  – погонная емкость;  $V$  – разность потенциалов между проводниками. Выбирая в калькуляторе активный проводник, можно определить элемент  $C_{11}$ , а при выборе пассивного

проводника – элемент  $C_{12}$ . Для получения элементов  $C_{21}$  и  $C_{22}$  необходимо повторить процесс моделирования, поменяв местами метки активного и пассивного проводников. Итоговая емкостная матрица имеет вид

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1,2880e-10 & -2,4524e-11 \\ -2,4524e-11 & 1,2889e-10 \end{bmatrix}.$$

Другим способом определения емкостной матрицы является расчет через электростатическую энергию системы. При этом для многопроводных линий передач энергия считается несколько раз, исходя из числа проводников. Так, элементы на главной диагонали вычисляются как

$$C_{ii} = 2W_{ii}, \quad (2.2)$$

где  $W_{ii}$  – энергия, рассчитанная при установленном на  $i$ -м проводнике потенциале в 1 В и заземленных остальных проводниках. Внедиагональные элементы матрицы  $C_{ij}$  ( $i \neq j$ ) вычисляются как

$$C_{ij} = W_{ij} - \frac{C_{ii} + C_{jj}}{2}, \quad (2.3)$$

где энергия  $W_{ij}$  вычисляется при задании потенциала 1 В на  $i$ -м и  $j$ -м проводниках.

Для вычисления энергии необходимо воспользоваться интегральным калькулятором. Сначала нужно перейти в режим «Блоки» и выделить всю область решения. Затем выбрать интегральный калькулятор и в выпадающем списке выбрать «Stored energy» (запасенная энергия). В этом случае итоговая матрица энергии имеет вид

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 6,4398e-11 & 1,0432e-11 \\ 1,0432e-11 & 6,4443e-10 \end{bmatrix}.$$

Воспользовавшись формулами (2.2) и (2.3), получим

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1,2880e-10 & -2,4524e-11 \\ -2,4524e-11 & 1,2889e-10 \end{bmatrix}.$$

Матрица погонной индуктивности связана с емкостной матрицей как

$$\mathbf{L} = \mu_0 \varepsilon_0 \mathbf{C}_0^{-1}, \quad (2.4)$$

где  $\mathbf{C}_0^{-1}$  – обратная емкостная матрица, вычисленная при относительных диэлектрических проницаемостях материалов, равных 1. Для вычисления матрицы  $\mathbf{C}_0$  необходимо еще раз повторить процесс моделирования, заменив метку блока подложки («substrate») на метку свободного пространства («free space»), и вычислить емкостную матрицу, используя формулы (2.1) или (2.2) и (2.3). В результате получим

$$\mathbf{C}_0 = \begin{bmatrix} 4,6669e-11 & -1,6145e-11 \\ -1,6145e-11 & 4,6677e-11 \end{bmatrix},$$

а итоговая матрица погонной индуктивности будет иметь вид

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 2,7081e-7 & 9,3672e-8 \\ 9,3672e-8 & 2,7077e-7 \end{bmatrix}.$$

Рассмотрим моделирование той же линии передачи с типом задачи «магнитостатическое поле». Процесс моделирования аналогичен задаче электростатического поля, поэтому укажем только основные отличия в настройках программы.

В окне настройки задачи (рисунок 2.20) появились два новых параметра – поле ввода частоты и поле выбора решателя для переменных токов. Частота определяет учет переменных магнитных полей и вихревых токов. Если она равна нулю, решается стационарная магнитостатическая задача без учета индуктивных эффектов. При ненулевой частоте в расчет включаются переменные магнитные поля, скин-эффект и возможные потери в проводниках. Приведем решения на частотах 0 Гц, 1 Гц и 1 ГГц.

В магнитостатическом препроцессоре необходимо указать свойства, которые задаются в разделе «Properties». К ним относятся граничные условия, материалы и свойства блоков. Подраздел «Properties → Points» позволяет определять метки для точек с заданным векторным магнитным потенциалом или током (рисунок 2.21,а). В «Properties → Boundary» определяются метки для граничных условий (рисунок 2.21,б), а в «Properties → Materials» задаются метки для электромагнитных свойств материалов:

линейные и нелинейные зависимости **В-Н**, относительная магнитная проницаемость, коэрцитивная сила, электропроводность и плотность тока (рисунок 2.21,в). В «Properties → Circuit» определяются метки для задания тока в проводниках (рисунок 2.21,з). При этом указывается значение тока и выбирается параллельное или последовательное подключение.

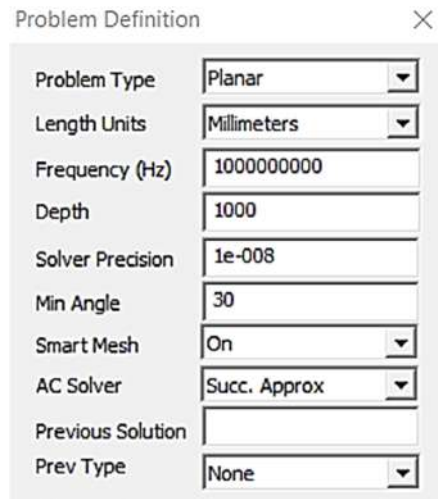
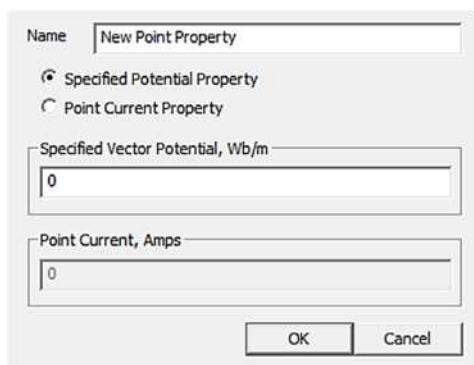
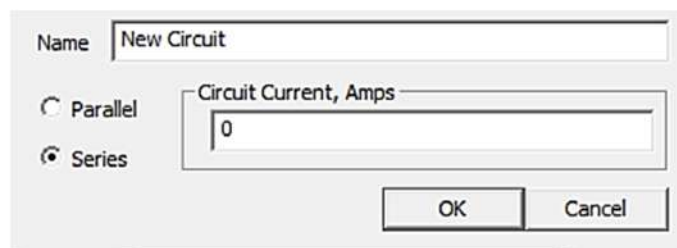


Рисунок 2.20 – FEMM: окно настройки задачи



*a*



*б*

Рисунок 2.21 – FEMM: окна создания меток точки (*a*), электрических цепей (*б*), материалов (*в*) и граничных условий (*з*) (окончание см. на с. 113)

Name:

B-H Curve:

Linear Material Properties

Relative  $\mu_x$ :       Relative  $\mu_y$ :

$\phi_{hx}$ , deg:        $\phi_{hy}$ , deg:

Nonlinear Material Properties

      $\phi_{hmax}$ , deg:

Coercivity

$H_c$ , A/m:

Electrical Conductivity

$\sigma$ , MS/m:

Source Current Density

$J$ , MA/m<sup>2</sup>:

Special Attributes: Lamination & Wire Type

Lam thickness, mm:       Lam fill factor:

Number of strands:       Strand dia, mm:

6

Name:      

BC Type:      

Small skin depth parameters

$\mu$ , relative:

$\sigma$ , MS/m:

Mixed BC parameters

$c_0$  coefficient:

$c_1$  coefficient:

Air Gap parameters

Inner Angle, Deg:

Outer Angle, Deg:

Prescribed A parameters

$A_0$ :

$A_1$ :

$A_2$ :

$\phi$ , deg:

2

Рисунок 2.21 – Окончание (начало см. на с. 112)

Создадим два материала – свободное пространство («free space»,  $\mu_x = 1$ ,  $\mu_y = 1$ ) и медь («Cu»,  $\mu_x = 1$ ,  $\mu_y = 1$ ,  $\sigma = 5,8e7$ ), и два типа проводников – активный («active», ток 1 А, подключение параллельное) и пассивный («passive», ток 0 А, подключение

параллельное), а также одно граничное условие для экрана («ground»,  $A_0 = A_1 = A_2 = 0$ ).

Для каждой области поставим метку и зададим соответствующий материал, как показано на рисунке 2.22. Для области над проводниками и для подложки укажем «free space», а для проводников – «Cu». Обозначим принадлежность к электрическим цепям: для первого проводника – «active», для второго – «passive». Для граней заземляющего экрана зададим соответствующую метку граничного условия.

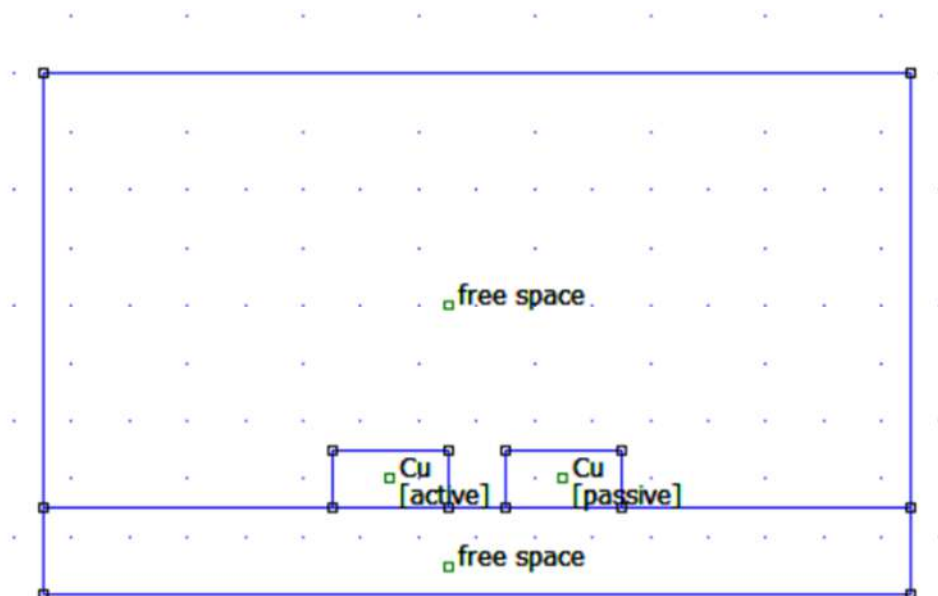


Рисунок 2.22 – FEMM: пример задания меток блоков

После этого можно переходить к решению задачи. Блок запуска расчетных задач аналогичен электростатике. Поочередно выполним все этапы расчета и перейдем в окно постпроцессинга (рисунок 2.23), основные элементы работы которого схожи с постпроцессором электростатики, но ключевое отличие заключается в вычисляемых величинах: вместо электрического потенциала и напряженности поля здесь рассматриваются магнитная индукция, напряженность магнитного поля, плотность тока и силовые воздействия. Постпроцессор позволяет визуализировать распределение магнитного поля, исследовать вихревые токи, рассчитывать силы и моменты, а также строить графики для дальнейшего анализа.

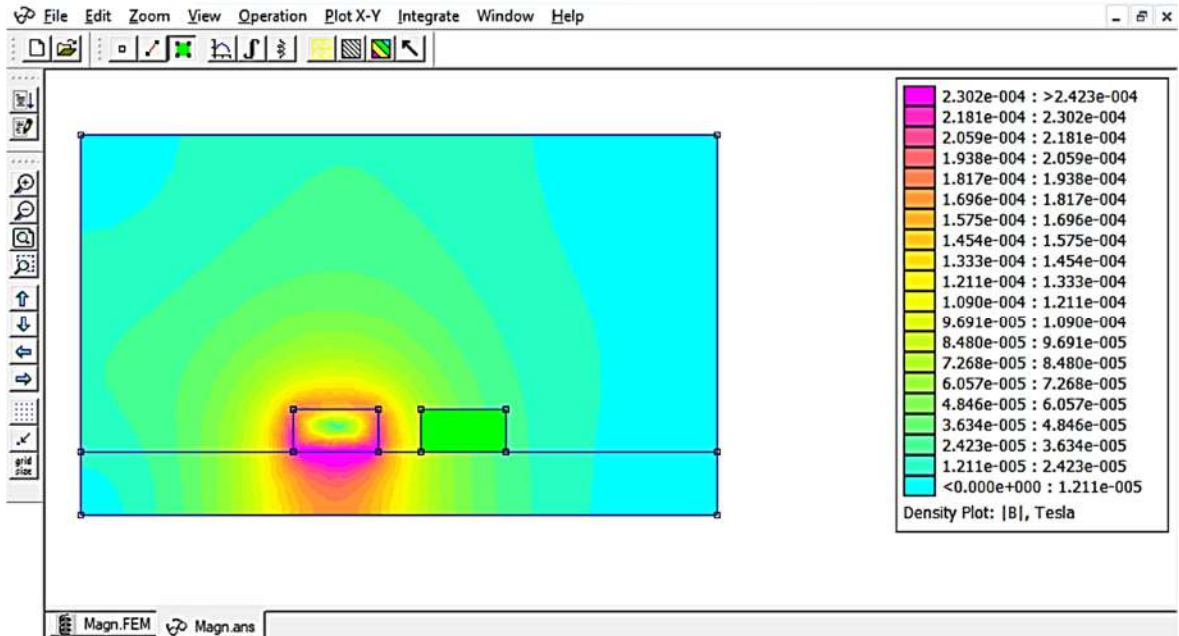


Рисунок 2.23 – FEMM: окно постпроцессинга

Индуктивные параметры МПЛ могут быть вычислены, исходя из потокосцепления между проводниками, как

$$L = \frac{\Psi}{I}, \quad (2.5)$$

где  $L$  – индуктивность;  $I$  – ток в проводнике;  $\Psi$  – потокосцепление, определяемое как

$$\Psi = \int_S \mathbf{A} \, dS, \quad (2.6)$$

где  $S$  – площадь проводника;  $\mathbf{A}$  – векторный магнитный потенциал, который связан с плотностью электрического тока выражением

$$\nabla^2 \mathbf{A} - j\omega\sigma \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J}, \quad (2.7)$$

где  $\mathbf{J}$  – плотность электрического тока;  $\sigma$  – проводимость материала;  $\omega$  – круговая частота.

При постоянном токе ( $f = 0$ ) уравнение упрощается, так как член  $j\omega\sigma \mathbf{A}$  обнуляется. В этом случае векторный потенциал  $\mathbf{A}$  и потокосцепление  $\Psi$  остаются вещественными, что приводит к вещественному значению индуктивности  $L$ . Однако при переменном токе ( $f > 0$ ) векторный потенциал становится комплексным. В результате интеграл потокосцепления  $\Psi$  тоже становится

комплексным, что означает появление мнимой составляющей индуктивности, которая отражает потери, вызванные вихревыми токами и скин-эффектом, т. е.

$$L = L' - jL'', \quad (2.8)$$

где  $L'$  – погонная индуктивность;  $L''$  – параметр, обусловленный потерями.

Для многопроводной линии, как и в электростатическом решателе, моделирование производят несколько раз, поочередно меняя активный проводник. Так, при  $i$ -м активном проводнике элементы матрицы  $\mathbf{L}$  вычисляются как

$$L^{i,j} = \frac{\Psi_j}{I_i}, \quad (2.9)$$

где  $j = 1, \dots, n$ ,  $n$  – число проводников. Применяя формулу (2.9), вычислим матрицы  $\mathbf{L}$  для рассматриваемой линии передачи. Используя режим «Блоки» нужно выделить область активного проводника, затем открыть интегральный решатель и вычислить потокосцепление. Потокосцепление обозначено как «Integral of A / selected area» (рисунок 2.24).

```
Integral of A over selection:
5.41432e-013-I*1.61582e-015 Henry Amp meter^2
Integral of A / selected area:
2.70716e-007-I*8.0791e-010 Henry Amp
```

Рисунок 2.24 – FEMM: окно интегрального калькулятора

Аналогичным образом вычисляется потокосцепление пассивного проводника. После чего необходимо повторить процесс моделирования, поменяв местами метки активного и пассивного проводников. Итоговые матрицы  $\mathbf{L}$  для разных частот приведены на рисунке 2.25.

$$\begin{array}{ll}
 f = 0 \text{ Гц} & \mathbf{L} = \begin{bmatrix} 3,394e-7 & 9,126e-8 \\ 9,126e-8 & 3,394e-7 \end{bmatrix} \\
 f = 1 \text{ Гц} & \mathbf{L} = \begin{bmatrix} 2,723e-7 & 9,349e-8 \\ 9,349e-8 & 2,723e-7 \end{bmatrix} \\
 f = 1 \text{ ГГц} & \mathbf{L} = \begin{bmatrix} 2,708e-7 & 9,362e-8 \\ 9,370e-8 & 2,708e-7 \end{bmatrix}
 \end{array}$$

Рисунок 2.25 – Результаты вычисления матрицы  $\mathbf{L}$

## 2.2 Программа FasterCap

### 2.2.1 Описание программы

Пакет программ FastFieldSolvers относится к свободному программному обеспечению и включает в себя программные средства FastHenry2, FastCap2 и FasterCap. Исходный код программных средств открыт и доступен на сайте пакета программ и в веб-сервисе GitHub. Для скачивания доступны только 64-разрядные версии программных средств, однако из открытого исходного кода могут быть собраны и 32-разрядные версии.

Для операционной системы Windows программные средства поставляются единым пакетом, содержащим FastHenry2, FastCap2, FasterCap и программу отображения 3D-моделей FastModel в виде исполняемого файла с расширением \*.exe. Каждая программа после установки имеет свой единый исполняемый файл. Программа FasterCap дополнительно имеет подключаемую библиотеку «libgomp\_64-1.dll». Для операционных систем семейства GNU/Linux доступно только программное обеспечение FasterCap. Дистрибутив распространяется в виде tar.gz архива как для Debian Ubuntu (необходимо установить libwxgtk3.0), так и для RedHat.

Программа FastCap2 предназначена для расчета емкости структур в 3D. Расчет производится методом моментов (граничных элементов). В результате дискретизации граничных элементов формируется СЛАУ, которая решается с помощью обобщенного метода сопряженных градиентов (от англ. generalized minimal residual, GMRES) в сочетании с методом быстрых мультиполей (FMM).

Программа FastHenry2 предназначена для расчета индуктивности структур в 3D. В основе FastHenry2 используется метод эквивалентных схем из частичных элементов (от англ. partial element equivalent circuit, ПЕЕС) для расчета частотно-зависимого сопротивления и индуктивности.

Программа FasterCap предназначена для расчета собственных и взаимных емкостей. FasterCap может работать как с 3D-моделями, так и с 2D-моделями для ускорения моделирования, когда используется только поперечное сечение структуры.

Дополнительно к пакету FastFieldSolvers на сайте производителя распространяются программа FastImp и набор скриптов VoxHenry.

Программа FastImp предназначена для вычисления волнового сопротивления линий передачи. Она позволяет проводить магнито-квазистатический, электромагнито-квазистатический и полноволновой анализ трехмерных проводников общего вида, помещенных в однородный диэлектрический материал. FastImp использует сторонний решатель интегральных уравнений на основе быстрого преобразования Фурье с предварительной коррекцией «pfft++». Для задания входной геометрии поддерживаются файлы PATRAN. Графический интерфейс у программы отсутствует, поэтому она может быть вызвана только из командной строки. FastImp доступен для операционных систем семейства GNU/Linux (только для RedHat) и Windows (только при использовании оболочки DOS).

VoxHenry – это магнито-квазистатический симулятор для расчета индуктивности и сопротивления 3D-структуры. В отличие от FastHenry2 симулятор представляет собой набор скриптов MATLAB, а вместо разбиения структур на филаменты используется разбиение на воксели (кубические элементы 3D-объекта). VoxHenry имеет преимущество перед FastHenry при работе с проводящими структурами, которые по своей сути не являются длинными и тонкими. VoxHenry распространяется под лицензией GPL 2.0 и может быть запущен в MATLAB или GNU Octave.

Поскольку в двумерном пространстве работает только программа FasterCap, рассмотрим ее подробнее.

В программе реализовано вычисление собственных и взаимных емкостей заданного набора проводников. FasterCap также поддерживает диэлектрики любой формы и размера, состоящие из любого числа однородных областей (с постоянной относительной диэлектрической проницаемостью). Задавая комплексные значения диэлектрической проницаемости, можно моделировать наличие диэлектриков с потерями.

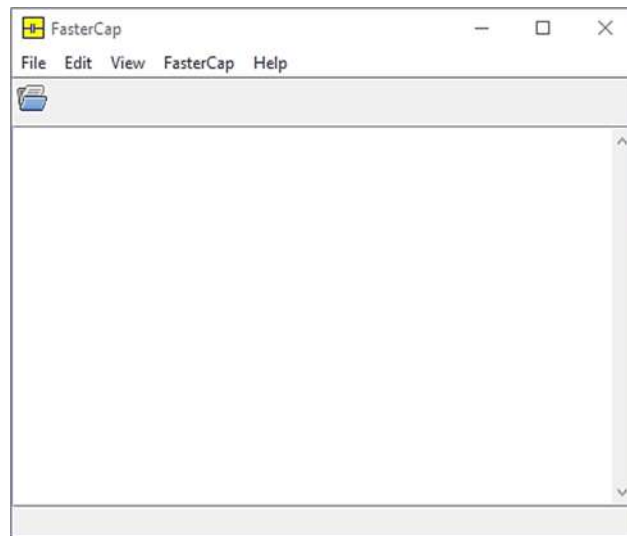
При открытии программы отображается ее основное окно (рисунок 2.26,а), в котором впоследствии выводится результат ее работы. Для запуска процесса моделирования нужно подготовить файл, описывающий геометрию проводников и диэлектриков через описание их контуров, моделируемых в виде прямолинейных отрезков. После подготовки файла необходимо нажать на пиктограмму с открывающейся папкой, это приведет к запуску меню параметров (рисунок 2.26,б). В поле «Input File» нужно указать путь к подготовленному файлу, выбрать необходимые параметры моделирования и нажать кнопку «Run».

Синтаксис входных файлов для FasterCap совместим с проприетарным форматом файлов для FastCap2. Входной файл должен содержать первую строку «2D» или «3D». Эта строка используется FasterCap для переключения режимов 2D- и 3D-решателей соответственно. По умолчанию FasterCap предполагает, что он находится в режиме 3D-решателя, поэтому определение 2D-файлов без строки «2D» приведет к ошибкам парсера (разбора) входных данных.

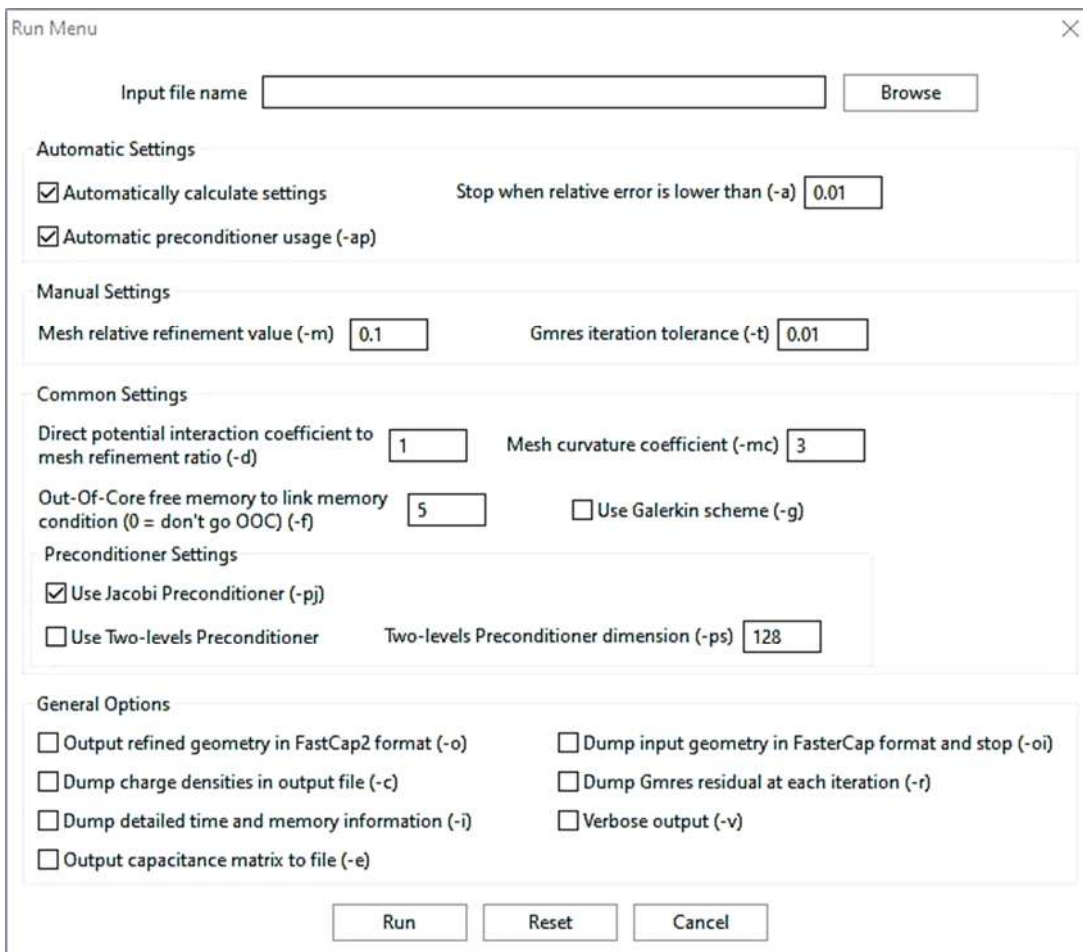
3D-входной файл представляет собой последовательный список проводников (C) и диэлектриков (D), а также описаний геометрических панелей: треугольных (T) или четырехугольных (Q) патчей. 2D-входной файл вместо элементов T и Q содержит описания сегментов границ (S). В файлах допускаются комментарии (строки, начинающиеся со «\*»).

FasterCap способен автоматически уточнять геометрию, поэтому лучше всего работать с максимально грубой входной сеткой. В этом заключается основное отличие от FastCap2, которому для получения точных результатов необходима тщательно проработанная входная сетка. FasterCap автоматически уточняет входную

геометрическую сетку до достижения сходимости результатов в пределах требуемой точности.



*a*



*б*

Рисунок 2.26 – FasterCap: основное окно программы (*a*) и меню параметров запуска (*б*)

После запуска программы в основном окне отобразятся основные выбранные параметры моделирования и его результат (емкостная матрица). Результат разбит по итерациям, на каждой итерации происходит учащение расчетной сетки. Также выводятся затраты времени и оперативной памяти.

Изменив параметры по умолчанию перед началом моделирования, можно изменить поведение программы и достичь компромисса между точностью, использованием памяти и скоростью. Время, необходимое для вычисления собственных и взаимных емкостей входного набора проводников, линейно увеличивается с ростом общего числа панелей  $N$ . Это гарантируется сложностью алгоритма  $O(N)$ , используемого в FasterCap, независимо от формы, ориентации и размеров геометрии проводников и диэлектриков.

Параметр «-a» определяет желаемую точность вычислений как норму Фробениуса взвешенной разности матриц емкостей. Так, значение 0,01 означает максимальную ошибку в 1%. Этот параметр является решающим при выборе автоматического расчета остальных параметров.

Параметр «-m» управляет максимальным уточнением, допустимым для входной геометрии. Чем меньше значение, тем точнее результат, но время моделирования при этом соответственно увеличивается.

Параметр «-t» контролирует ошибку, ниже которой итерационный процесс прервется. Это изменяет относительную погрешность решения, однако точность значения емкости, которую можно получить с помощью этого параметра, ограничена уровнем детализации сетки. Если сетка слишком грубая, то уменьшение этого параметра не даст никакого эффекта.

Параметр «-d» управляет «степенью сжатия» матрицы. Меньшее значение параметра означает в среднем большее число связей на панель и более точный результат, однако время моделирования при этом соответственно увеличивается.

Параметр «-g» определяет использование метода Галеркина вместо метода коллокаций, который за счет увеличения времени вычислений может привести к повышению точности вычисляемых значений емкости на той же сетке, при этом не требуется больше

машинной памяти. Важно, что этот параметр не поддерживается для 2D-решателя.

По заверению разработчиков пакета программ FastField Solvers, требования к памяти в большей степени, чем время решения, являются узким местом современных программных средств для моделирования, ограничивая максимальную размерность решаемой задачи. Для преодоления ограничений объема оперативной памяти FasterCap способен выходить за ее пределы, используя объем жесткого диска или твердотельного накопителя (управляется параметром «-f»). В этом случае результаты промежуточных расчетов записываются в постоянную память компьютера, освобождая оперативную для текущих вычислений. Кроме того, FasterCap использует возможности многоядерного параллельного исполнения кода, что также обеспечивает прирост скорости.

Программа имеет открытый исходный код и может быть доработана для применения в качестве модуля в других программных средствах. Вместо использования графического интерфейса программа может быть вызвана из командной строки с необходимыми аргументами (параметрами моделирования).

## 2.2.2 Пример моделирования

Для моделирования поперечного сечения линии передачи в FasterCap нужно подготовить скрипт, содержащий геометрические размеры и взаимное расположение проводников и диэлектриков в виде прямолинейных отрезков. Скрипт может быть записан в один файл (с расширением \*.lst) или распределен по нескольким файлам (по одному файлу на каждый геометрический объект). Рассмотрим сначала второй вариант. Напишем скрипт для линии передачи, поперечное сечение которой представлено на рисунке 1.10.

Сначала опишем опорный проводник. Для этого создадим файл «ground.txt» (рисунок 2.27). Важно – файлы должны заканчиваться пустой строкой.

```
S ground_1 0.0 0.0 15.0 0.0
```

Рисунок 2.27 – FasterCap: файл «ground.txt»

Каждая строка характеризует один прямолинейный отрезок. Строка всегда начинается с «S», чтобы показать, что описывается геометрический сегмент (Segment), затем указывается имя объекта (например, «ground\_1»). Далее через пробел задаются точки начала  $(x_1 \ y_1)$  и конца  $(x_2 \ y_2)$  отрезка (фиолетовая линия на рисунке 2.28). Так, в файле описан бесконечно-тонкий опорный проводник с размером (шириной в поперечном сечении) 15 мм.

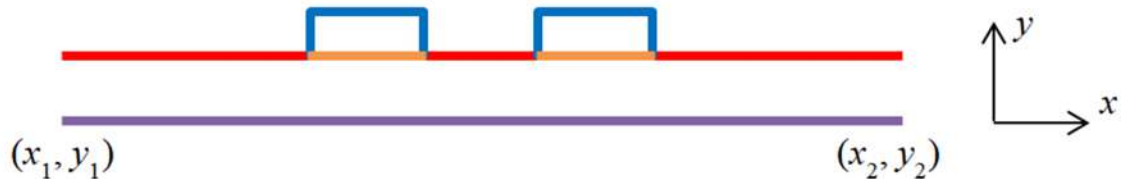


Рисунок 2.28 – Поперечное сечение линии передачи

Затем опишем диэлектрическую подложку. Для этого создадим файл «dielectric.txt» (рисунок 2.29).

```
S dielectric_1 0.0 1.5 5.0 1.5
S dielectric_1 7.0 1.5 8.0 1.5
S dielectric_1 10.0 1.5 15.0 1.5
```

Рисунок 2.29 – FasterCap: файл «dielectric.txt»

Отметим, что все строки, описывающие границы одного и того же объекта, должны содержать одинаковые имена (в данном случае «dielectric\_1»). Синтаксис строк полностью аналогичен синтаксису для опорного проводника. Так, в файле задаются три отрезка (красные линии на рисунке 2.28), расположенные на расстоянии 1,5 мм от опорного проводника ( $h = 1,5$  мм).

Далее в файлах «microstrip\_top.txt» (рисунок 2.30) и «microstrip\_bottom.txt» (рисунок 2.31) опишем верхнюю и нижнюю части левого проводника соответственно (синие и оранжевая линии на рисунке 2.28).

```
S microstrip_1 5.0 1.5 5.0 2.5
S microstrip_1 5.0 2.5 7.0 2.5
S microstrip_1 7.0 2.5 7.0 1.5
```

Рисунок 2.30 – FasterCap: файл «microstrip\_top.txt»

Рисунок 2.31 – FasterCap: файл «microstrip\_bottom.txt»

Разделение на два файла необходимо, т. к. эти границы соприкасаются с диэлектриками с разными относительными диэлектрическими проницаемостями (синие границы соприкасаются с воздухом,  $\epsilon_r = 1$ , а оранжевая – с диэлектрической подложкой,  $\epsilon_r = 5$ ). При этом имена объектов («microstrip\_1») в обоих файлах будут одинаковыми. В этих файлах задается проводник с шириной  $w = 2$  мм и толщиной  $t = 1$  мм.

Наконец, создадим основной файл с произвольным именем (например, «script.lst», рисунок 2.32). Первая строка скрипта должна содержать команду «\*2D», чтобы показать программе, что отрезки будут построены только в двух плоскостях (поперечное сечение линии передачи).

```
*2D
C microstrip_top.txt 1.0 0.0 0.0 +
C microstrip_bottom.txt 5.0 0.0 0.0
C microstrip_top.txt 1.0 3.0 0.0 +
C microstrip_bottom.txt 5.0 3.0 0.0
C ground.txt 1.0 0.0 0.0
D dielectric.txt 1.0 5.0 0.0 0.0 0.0 0.0 -
```

Рисунок 2.32 – FasterCap: файл «script.lst»

Затем указываются проводники (такие строки начинаются с «C») и диэлектрики («D»). Далее в каждой строке следует имя файла, который задает геометрию соответствующего объекта. После этого для проводников задается внешняя относительная диэлектрическая проницаемость (одно число), а для диэлектриков – внешняя и внутренняя (два числа).

Для проводников, кроме того, задается смещение (два числа, сначала по оси  $x$ , затем по оси  $y$ ). Это позволяет для одинаковых по размерам проводников иметь всего один определяющий файл. Так, в скрипте (см. рисунок 2.32) левый проводник задается без смещения, а правый берется из того же файла, однако смещен по оси  $x$  на 3 мм вправо (расстояние между проводниками  $s = 1$  мм). Также

стоит заметить, что верхняя и нижняя части проводников объединяются в единый объект при помощи знака «+». Опорным проводником считается последний.

Для диэлектриков после диэлектрических проницаемостей также указываются смещения (при необходимости) по осям  $x$  и  $y$ , а затем – координаты точки, относительно которой будет определено, какая из сторон линии диэлектрика будет внешней, а какая – внутренней. По умолчанию здесь задается точка начала координатной плоскости  $(0, 0)$  и предполагается, что точка отсчета лежит на внешней стороне всех диэлектриков структуры. Если же точка лежит на внутренней стороне, дополнительно нужно добавить знак «-» в конец строки.

При расположении всего скрипта в одном файле используется синтаксис, приведенный на рисунке 2.33.

```
*2D
C microstrip_top.txt 1.0 0.0 0.0 +
C microstrip_bottom.txt 5.0 0.0 0.0

C microstrip_top.txt 1.0 3.0 0.0 +
C microstrip_bottom.txt 5.0 3.0 0.0

C ground.txt 1.0 0.0 0.0

D dielectric.txt 1.0 5.0 0.0 0.0 0.0 0.0 -

F microstrip_top.txt
S microstrip_1 5.0 1.5 5.0 2.5
S microstrip_1 5.0 2.5 7.0 2.5
S microstrip_1 7.0 2.5 7.0 1.5

F microstrip_bottom.txt
S microstrip_1 5.0 1.5 7.0 1.5

F dielectric.txt
S dielectric_1 0.0 1.5 5.0 1.5
S dielectric_1 7.0 1.5 8.0 1.5
S dielectric_1 10.0 1.5 15.0 1.5

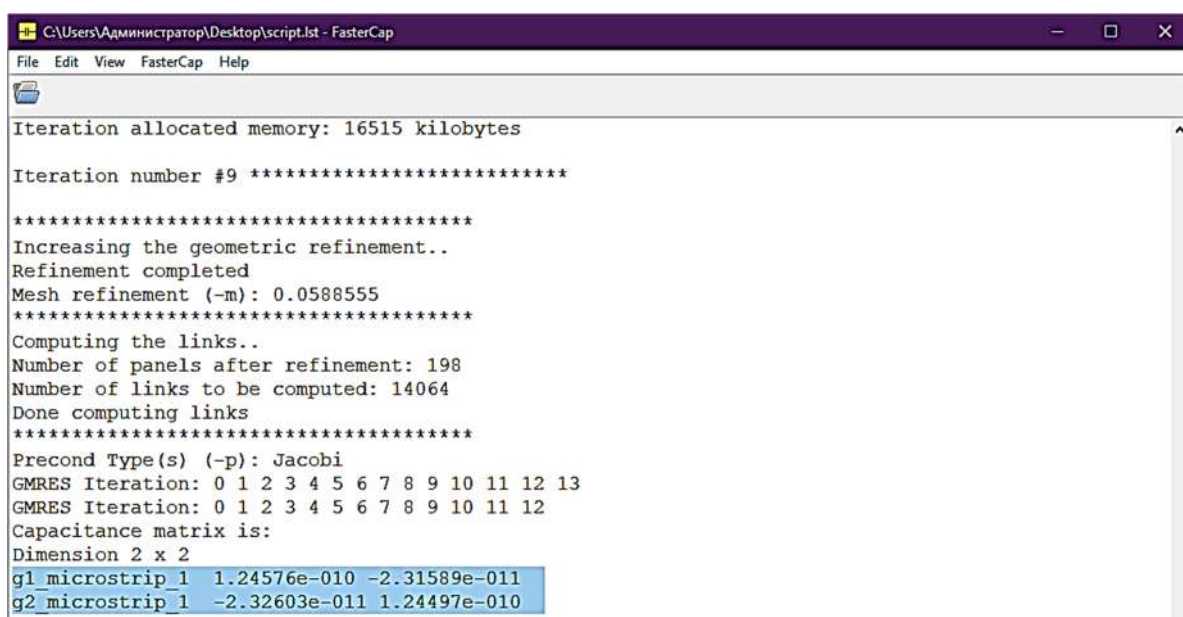
F ground.txt
S ground_1 0.0 0.0 15.0 0.0

E
```

Рисунок 2.33 – FasterCap: общий файл

Единый файл всегда должен оканчиваться строкой, содержащей «E», а затем пустой строкой, как сказано выше. Первая часть скрипта остается неизменной, далее вставляются строки, содержащие «F», и затем имя файла. Последующие строки содержат команды соответствующего файла.

Наконец, запустим программу FasterCap, и, оставив параметры запуска по умолчанию, нажмем кнопку «Run» для начала расчета. Вывод результатов работы представлен на рисунке 2.34.



```
Iteration allocated memory: 16515 kilobytes

Iteration number #9 *****

*****
Increasing the geometric refinement..
Refinement completed
Mesh refinement (-m): 0.0588555
*****
Computing the links..
Number of panels after refinement: 198
Number of links to be computed: 14064
Done computing links
*****
Precond Type(s) (-p): Jacobi
GMRES Iteration: 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13
GMRES Iteration: 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
Capacitance matrix is:
Dimension 2 x 2
g1_microstrip_1 1.24576e-010 -2.31589e-011
g2_microstrip_1 -2.32603e-011 1.24497e-010
```

Рисунок 2.34 – FasterCap: пример вывода результата работы

## 2.3 Контрольные вопросы и задания

1. Укажите, какие численные методы используются в программных средствах с открытым исходным кодом.
2. Перечислите типы решаемых задач в программных средствах с открытым исходным кодом.
3. Приведите общие характерные особенности программных средств с открытым исходным кодом.
4. Выполните расчет емкостной матрицы связанной микрополосковой линии передачи в программных средствах с открытым исходным кодом FEMM, FasterCap и сравните результаты. Параметры линии передачи выбрать следующие: ширина проводников

$w = 3$  мм, толщина проводников  $t = 0,2$  мм, толщина диэлектрической подложки  $h = 1$  мм, ее относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_r = 5,5$ , расстояние между проводниками  $s = 5$  мм.

5. Выполните расчет емкости коаксиального кабеля в программных средствах с открытым исходным кодом FEMM, FasterCap и сравните результаты. Поперечное сечение кабеля приведено на рисунке 1.100. Параметры кабеля:  $r_1 = 5$  мм,  $r_2 = 20$  мм,  $\varepsilon_r = 2$ . Дополнительно в программе FEMM постройте эквипотенциальные линии.

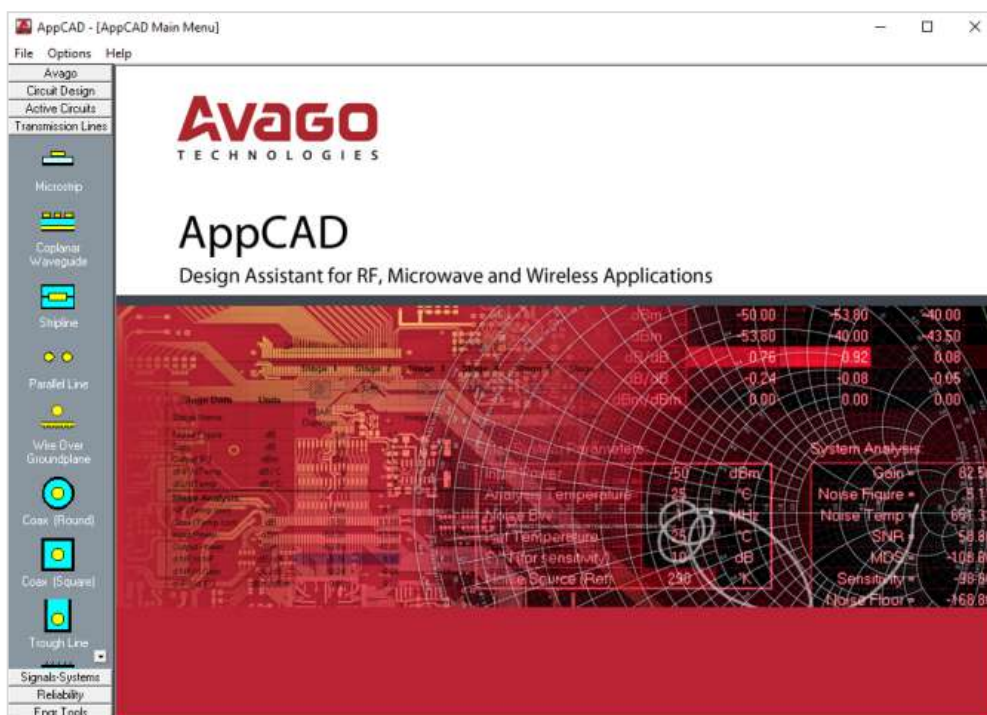
## 3 ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РАСЧЕТА И СИНТЕЗА ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

*Я вам помогу, ребята.  
Я буду командовать!*

М/ф «Смешарики»

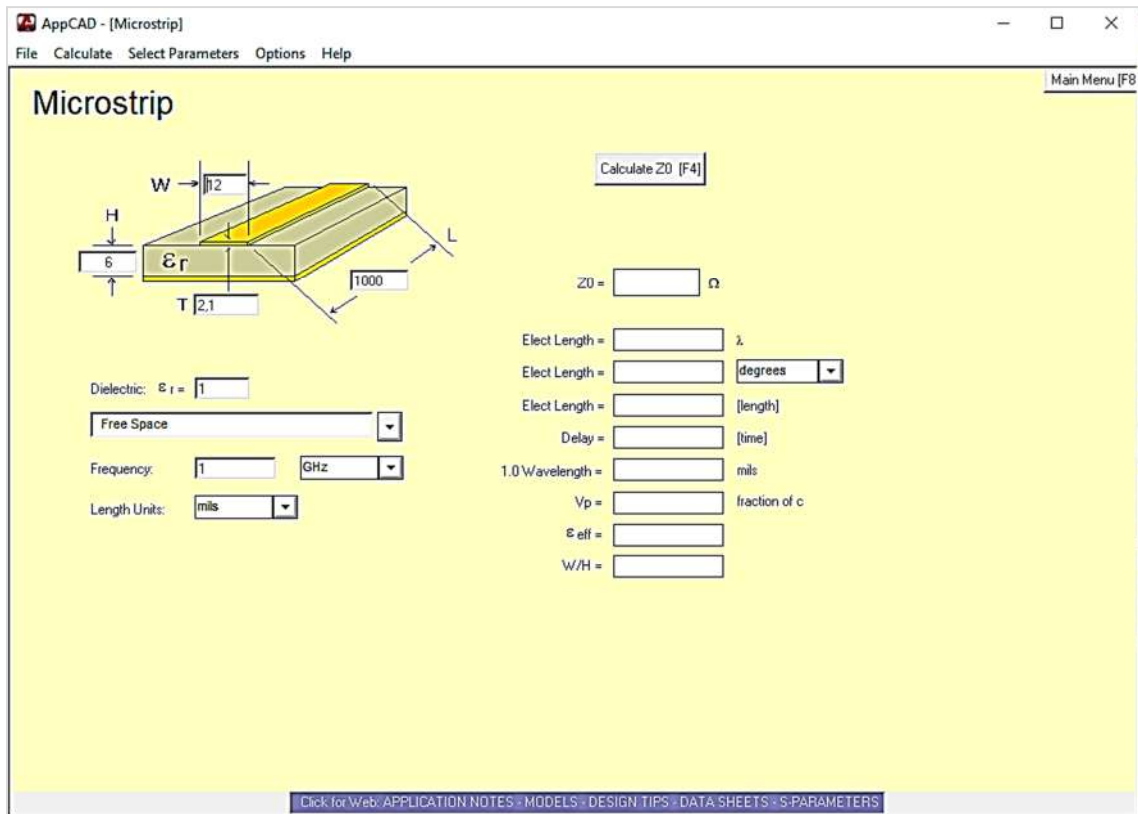
### 3.1 Программа AppCAD

Главное окно программного инструмента AppCAD [19] показано на рисунке 3.1. Возможен расчет параметров микрополосковой, копланарной с плоскостью земли, полосковой линий передачи и некоторых нетиповых линий. Кроме того, в утилиту входит еще ряд калькуляторов, таких как оценка коэффициента отражения, оценка интермодуляции и пр. Судя по скорости проведения анализа, в утилите используются аналитические выражения. Сведения о программной архитектуре и средствах разработки в свободном доступе отсутствуют.

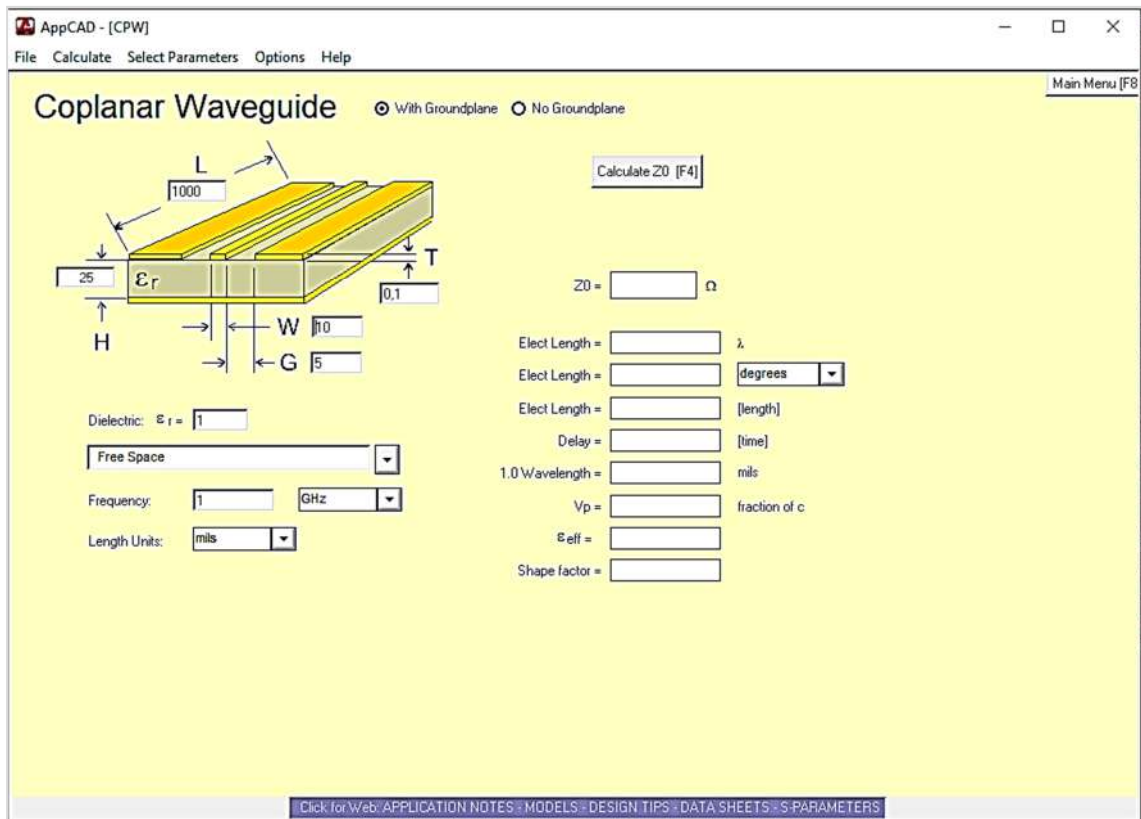


*a*

Рисунок 3.1 – AppCAD: общий вид (*a*) и настройки для расчета параметров микрополосковой (*b*), копланарной (*в*) и полосковой (*г*) линий передачи (продолжение см. на с. 129)

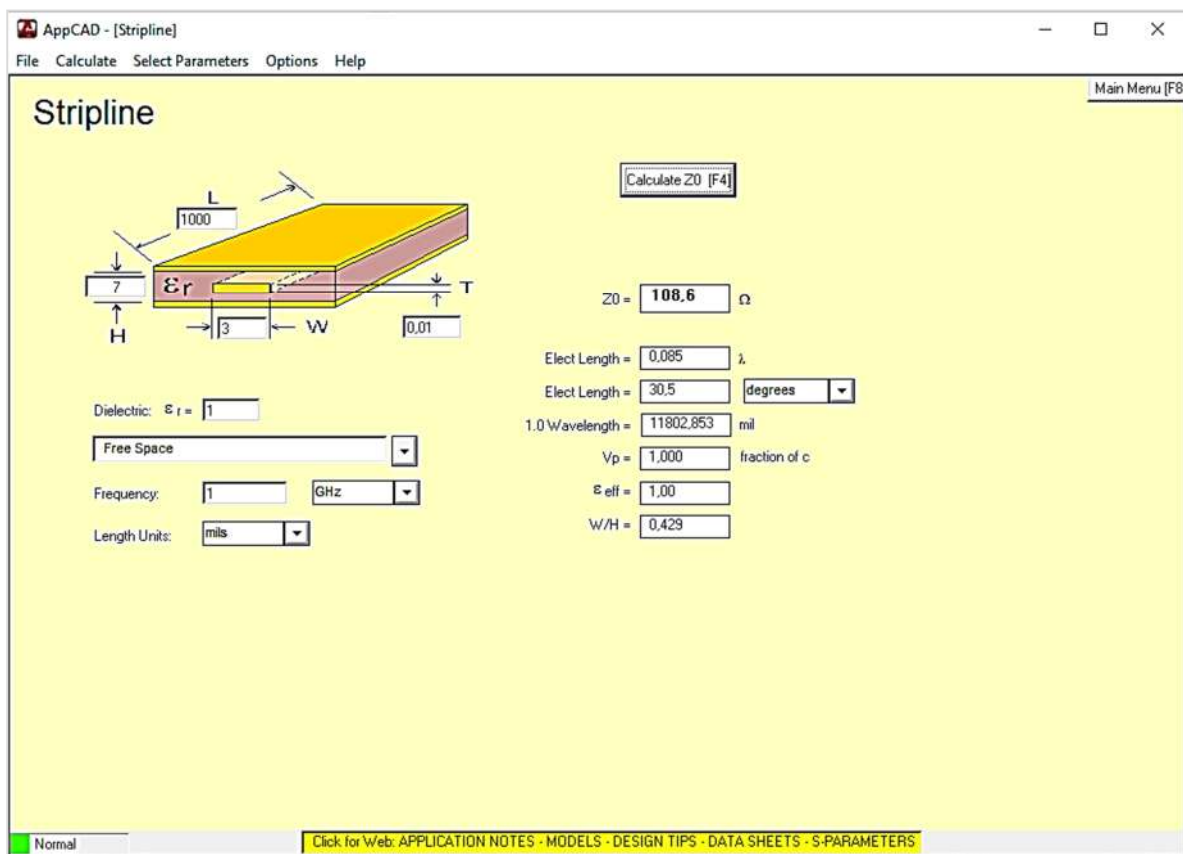


б



б

Рисунок 3.1 – Продолжение  
(начало см. на с. 128, окончание – на с. 130)

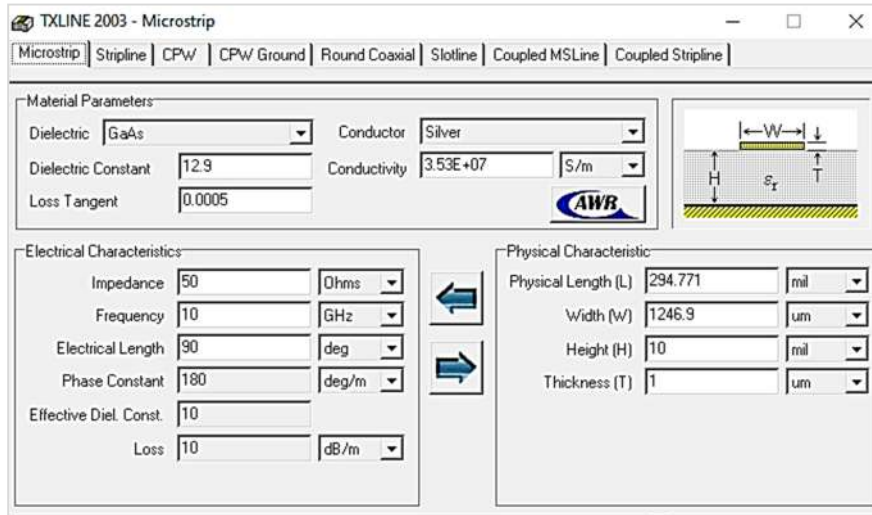


2

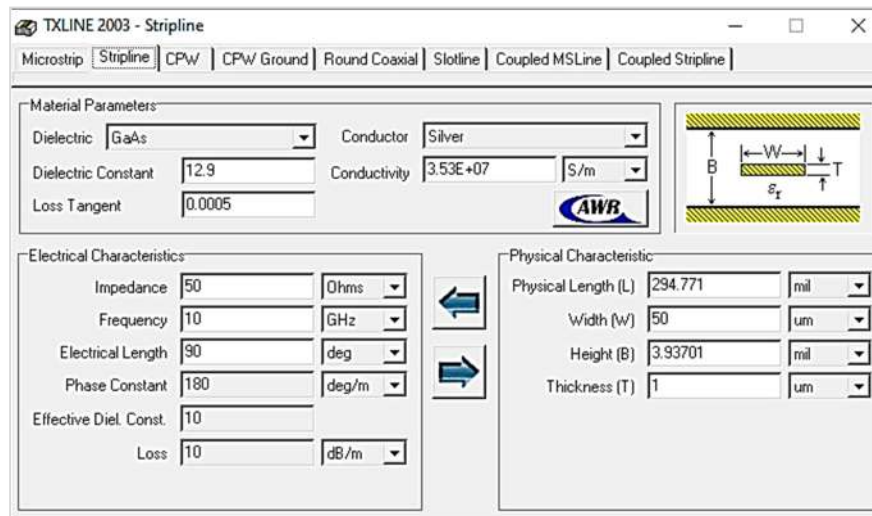
Рисунок 3.1 – Окончание (начало см. на с. 128)

## 3.2 Программа AWR TXLINE

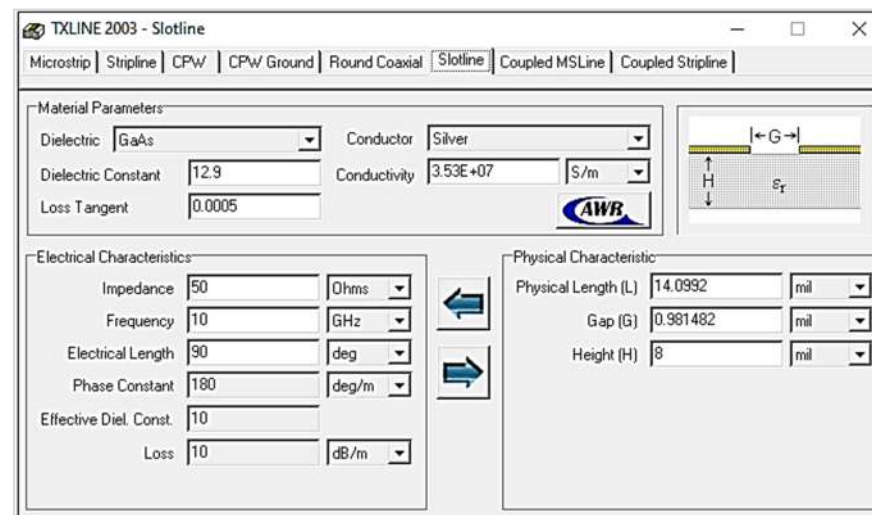
Программный инструмент TXLINE, встроенный в САПР AWR MWO, позволяет производить анализ и синтез 6 однопроводных линий передачи: микрополосковой, полосковой, копланарной, копланарной с плоскостью земли, коаксиальной, щелевой (рисунок 3.2), а также только анализ 2 двухпроводных линий передачи: связанной микрополосковой и связанной полосковой (рисунок 3.3). Судя по скорости проведения анализа и синтеза, в утилите используются аналитические выражения. Сведения о программной архитектуре и средствах разработки в свободном доступе отсутствуют.



*a*

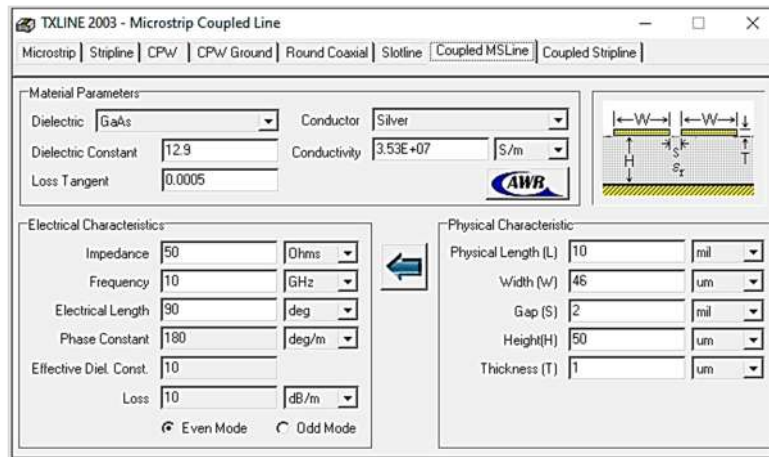


*б*

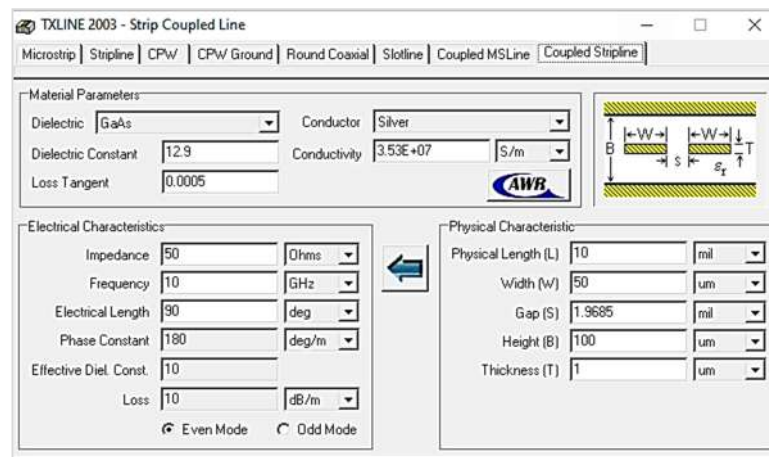


*в*

Рисунок 3.2 – AWR TXLINE: настройки для анализа и синтеза однопроводных микрополосковой (*a*), полосковой (*б*) и щелевой (*в*) линий передачи



*a*



*б*

Рисунок 3.3 – AWR TXLINE: настройки для анализа двухпроводных микрополосковой (*a*) и полосковой (*б*) линий передачи

### 3.3 Программа CITS25

Программный инструмент CITS25 предназначен для расчета характеристического сопротивления и времени задержки одиночных и связанных линий передачи с применением метода моментов. Отметим, что в настоящее время разработчик (компании Polar Instruments) прекратил поддержку данной программы. Существуют более мощные ее аналоги – Si9000e и Si8000m (рисунок 3.4) [20].

Поскольку для вычисления используется численный метод, а не аналитические выражения, скорость выполнения расчетов можно оценить визуально, ориентируясь по полосе прогресса, расположенной в нижней части окна программы (рисунок 3.5). Однако стоит отметить, что скорость вычислений в данной программе

остаётся достаточно высокой. Предположительно, высокую скорость вычислений можно объяснить хорошей оптимизацией алгоритмов, выполняющих вычисления характеристического сопротивления и времени задержки для ограниченного числа структур поперечных сечений линий передачи, представленных в данной программе.

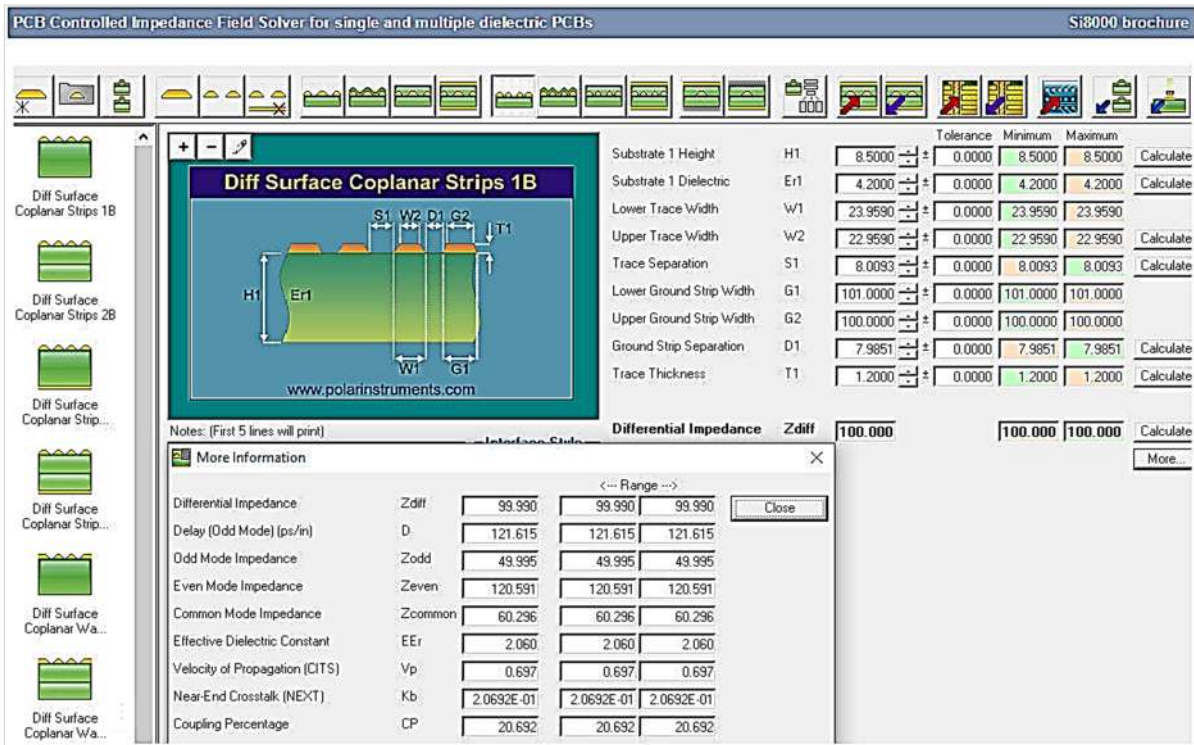


Рисунок 3.4 – Polar Si8000m: общий вид программы [20]

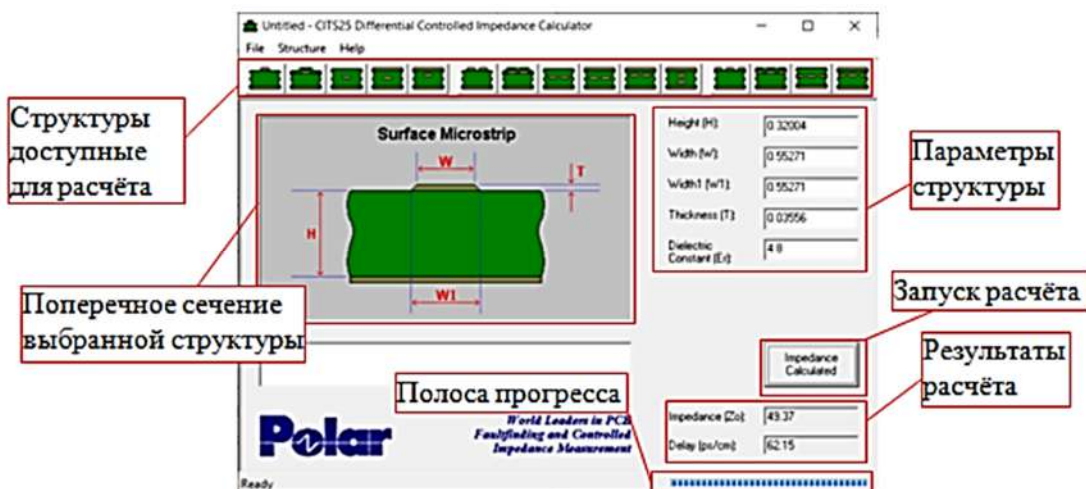
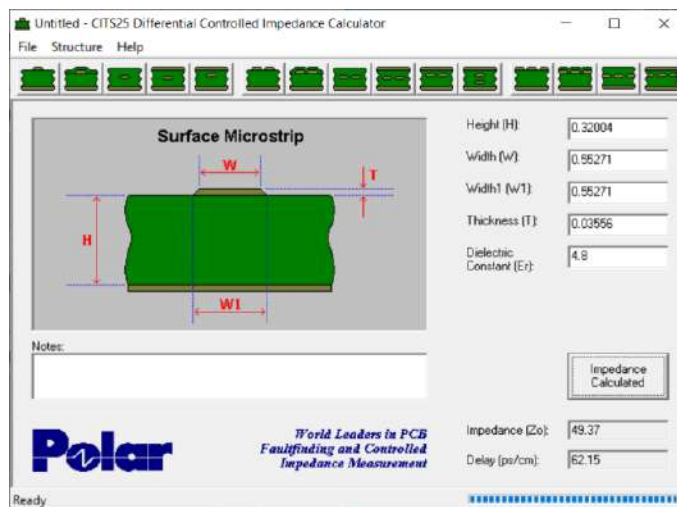
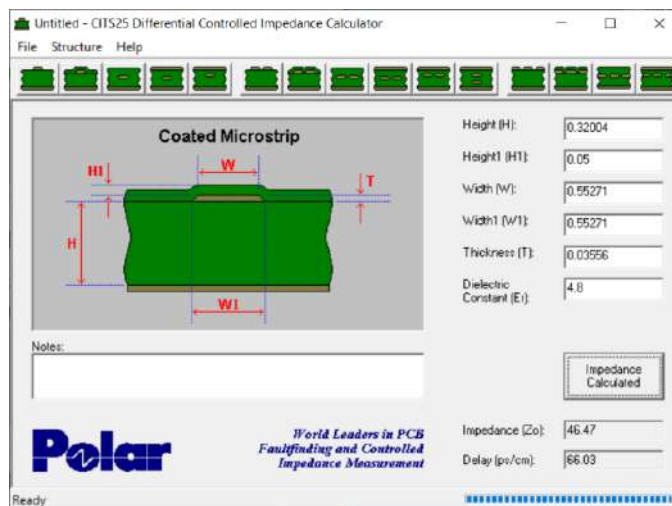


Рисунок 3.5 – CITS25: графический интерфейс пользователя

В программе CITS25 возможен расчет для ряда стандартных типов линий передачи: микрополосковой, полосковой в диэлектрике, симметричной полосковой, несимметричной полосковой, связанной двухпроводной, симметричной связанной двухпроводной, несимметричной связанной двухпроводной, связанной двухпроводной с лицевой связью, копланарной, симметричной копланарной и несимметричной копланарной. Поперечные сечения некоторых из них показаны на рисунке 3.6.

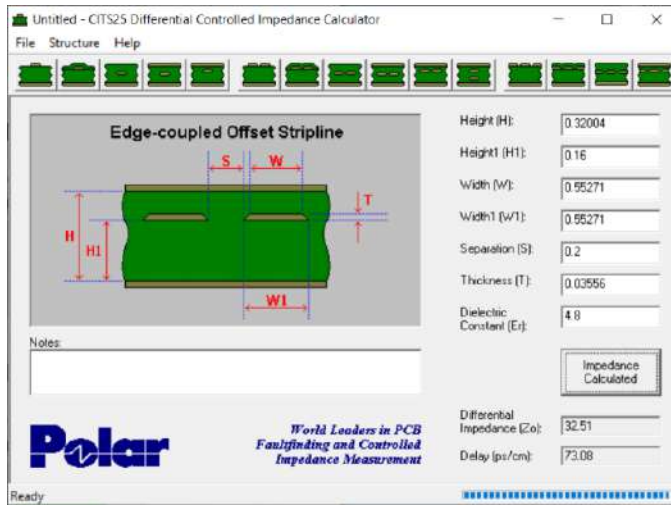


*a*

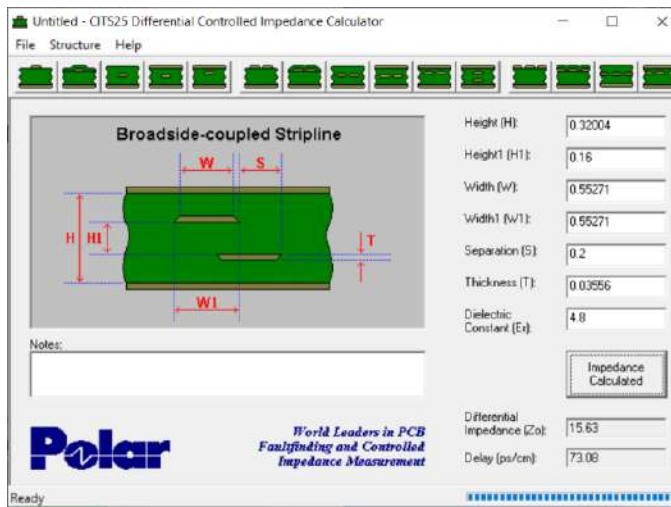


*б*

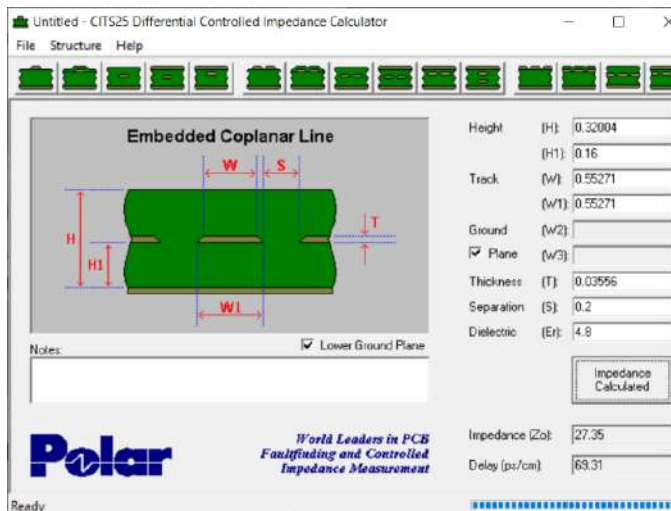
Рисунок 3.6 – CITS25: примеры расчетов для микрополосковой (*a*), микрополосковой с нанесенным слоем паяльной маски (*б*), несимметричной связанной двухпроводной (*в*), связанной двухпроводной с лицевой связью (*г*), копланарной в диэлектрике (*д*), копланарной с нанесенным слоем паяльной маски (*е*) линий передачи (продолжение см. на с. 135)



6

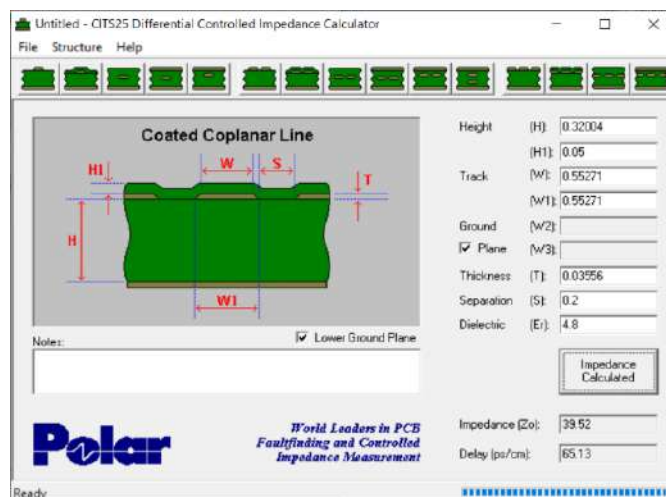


2



0

Рисунок 3.6 – Продолжение  
 (начало см. на с. 134, окончание – на с. 136)



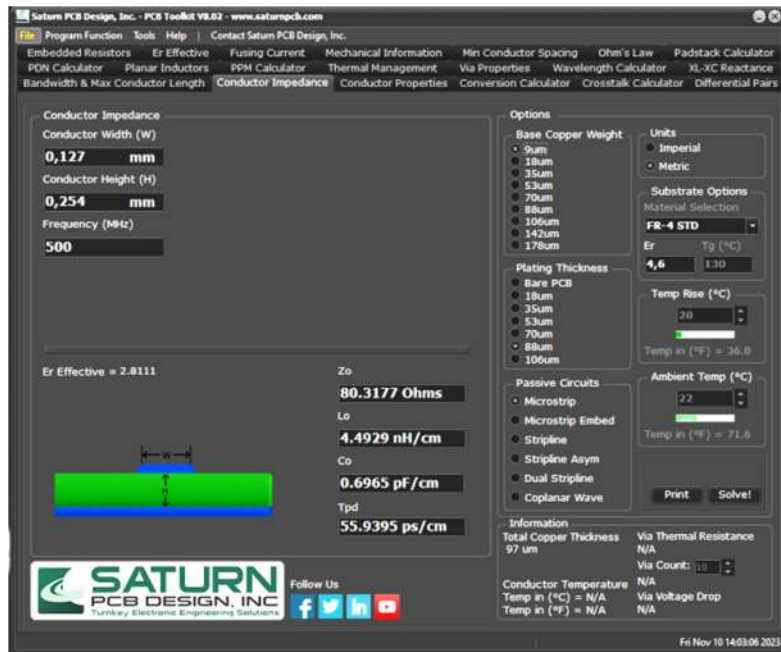
e

Рисунок 3.6 – Окончание (начало см. на с. 134)

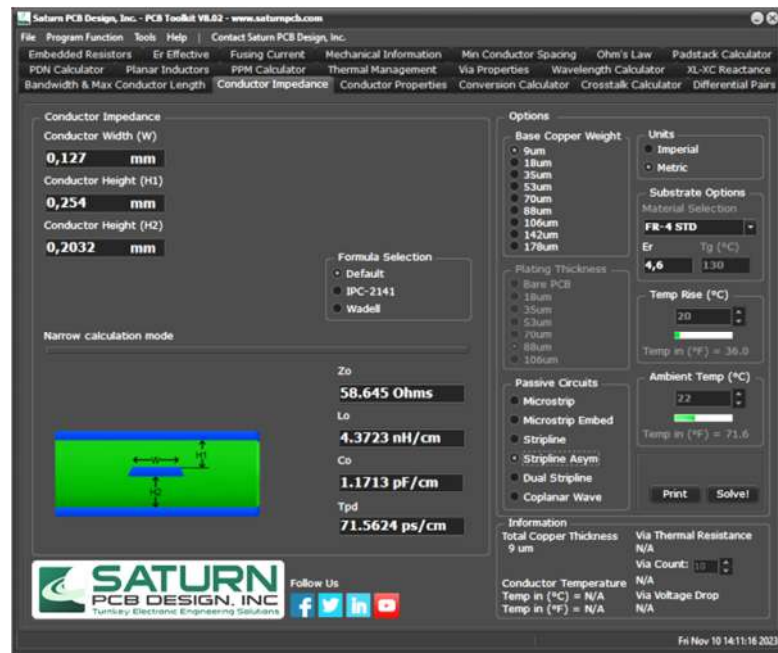
При расчетах характеристического сопротивления выбранной линии передачи можно также учитывать дефекты печатных проводников, которые возникают в процессе их изготовления вследствие излишнего травления верхнего медного слоя. Данный дефект проявляется в виде трапецеидальной формы проводника в его поперечном сечении и может влиять на электрические характеристики линии передачи.

### 3.4 Программа PCB Toolkit

Программный инструмент PCB Toolkit – набор калькуляторов [21]. В его состав входит калькулятор волнового сопротивления линий передачи: микрополосковой, углубленной микрополосковой, симметричной полосковой, асимметричной полосковой, связанной полосковой, копланарной (рисунок 3.7). Судя по скорости проведения анализа, в PCB Toolkit используются аналитические выражения. Сведения о программной архитектуре и средствах разработки в свободном доступе отсутствуют.



*a*



*b*

Рисунок 3.7 – PCB Toolkit: настройки для расчета параметров микрополосковой (а) и асимметричной полосковой (б) линий передачи

### 3.5 Программа CONMTL

Программный инструмент CONMTL [22] предназначен для расчета RLCG-параметров с использованием метода моментов. Он поддерживает свиппирование по частоте, построение электрических полей и расчет S-параметров. Основное окно программы приведено на рисунке 3.8. В левой части окна можно выбрать для моделирования одну из типовых структур. Важно, что моделирование структур с иной геометрией не предусмотрено. При нажатии на проводнике или диэлектрике правой кнопкой мыши открывается окно свойств (рисунок 3.9). Для начала моделирования необходимо задать частоту (диапазон частот) и нажать на первую круглую кнопку на панели инструментов.

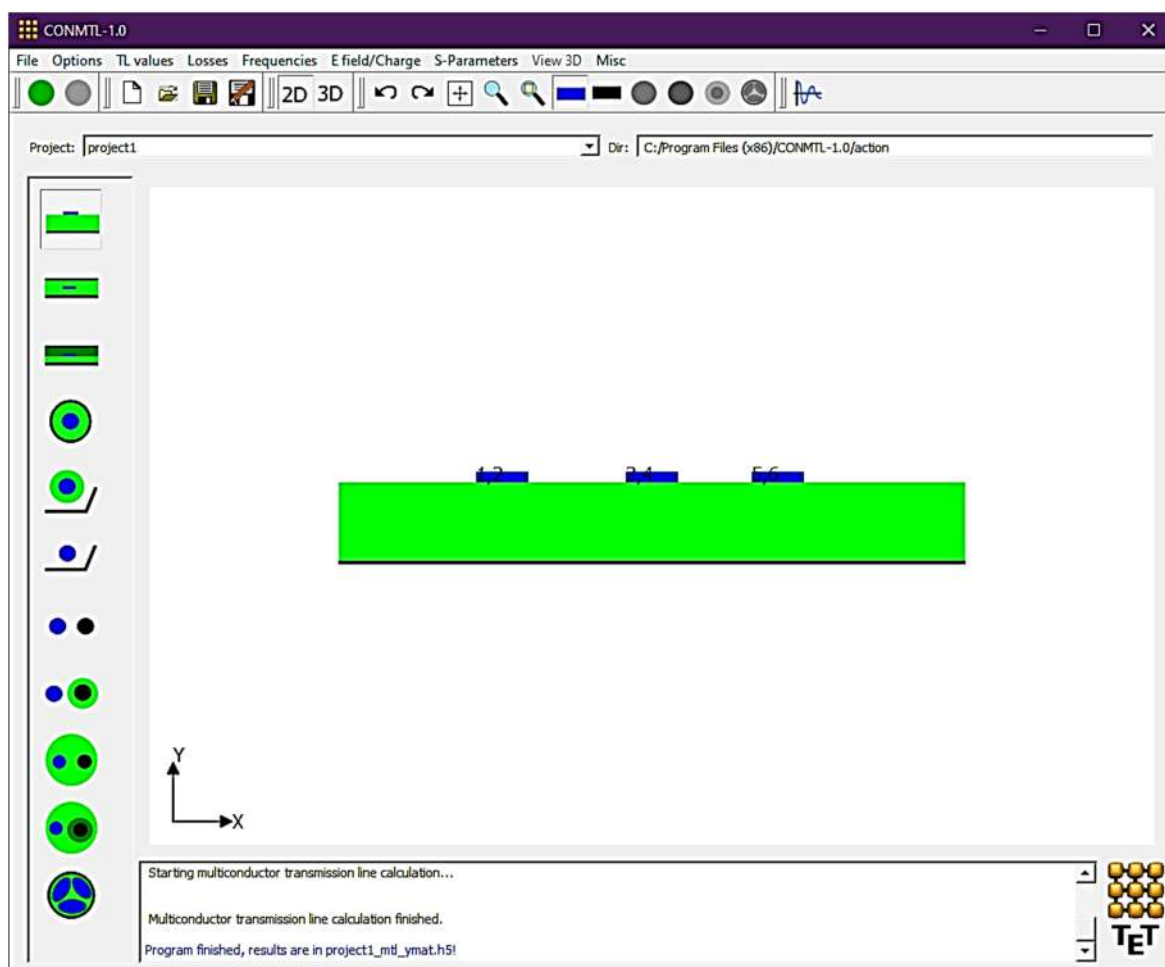
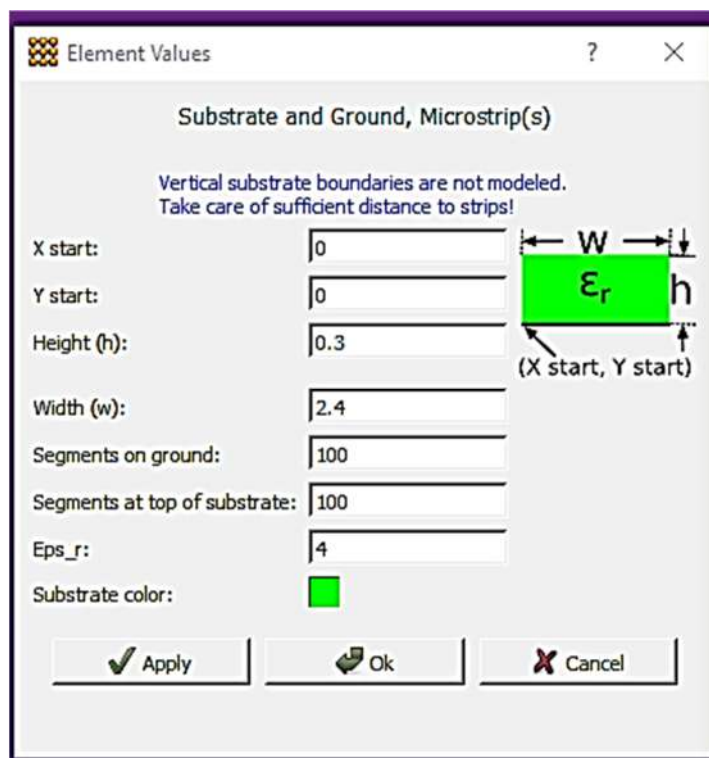
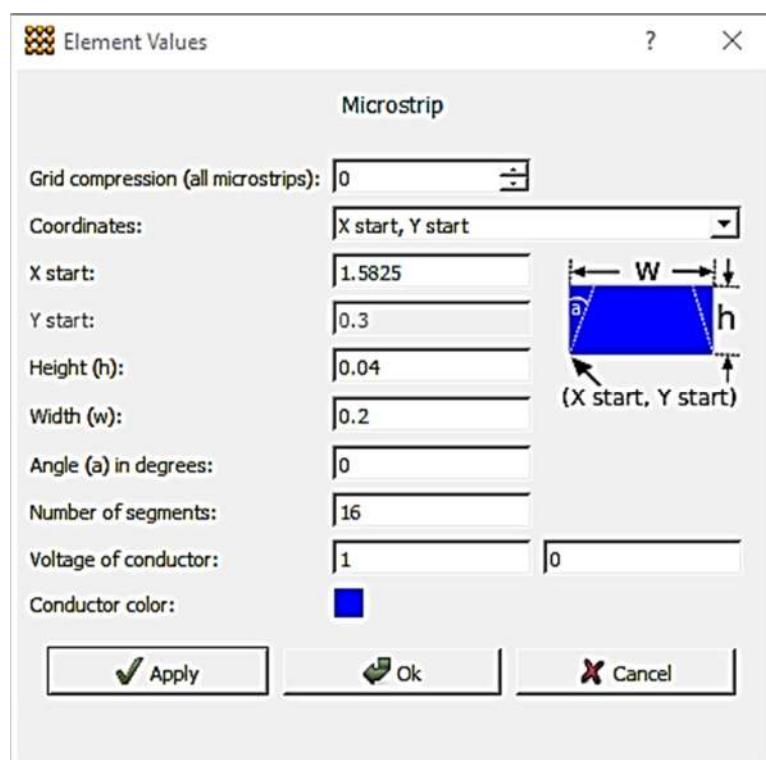


Рисунок 3.8 – CONMTL: основное окно



*a*



*б*

Рисунок 3.9 – CONMTL: задание свойств проводника (*a*) и диэлектрика (*б*)

Все результаты моделирования записываются в отдельные файлы \*.asc (рисунок 3.10), геометрия структуры сохраняется в файл \*.mtl. Также создается файл с результатами моделирования \*.h5, который может быть считан программным средством MATLAB. Кроме того, в CONMTL присутствует дополнительный модуль – калькулятор импедансов типовых структур, где возможен расчет для микрополосковой, полосковой, связанной и коаксиальной линий передачи (рисунок 3.11).

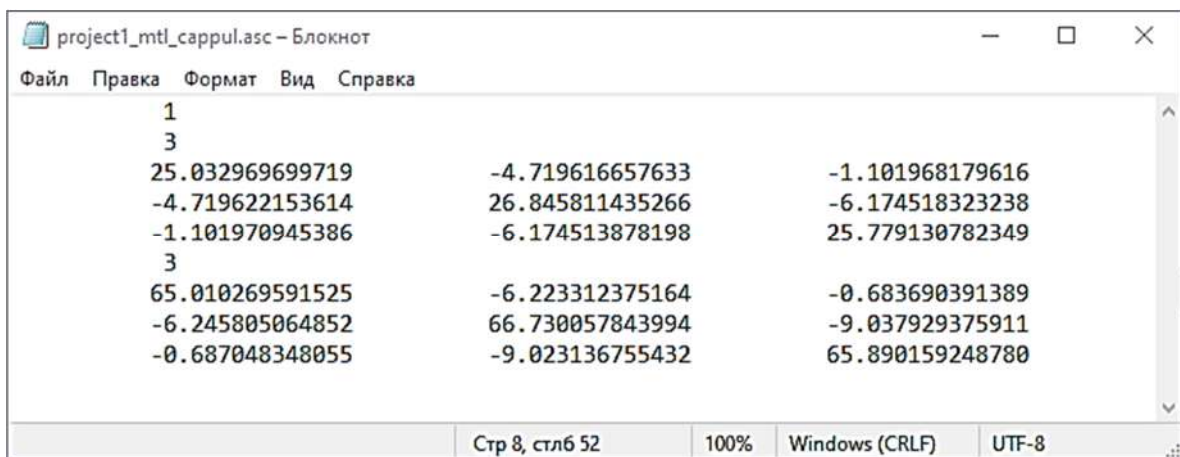


Рисунок 3.10 – CONMTL: результаты моделирования (матрица C)

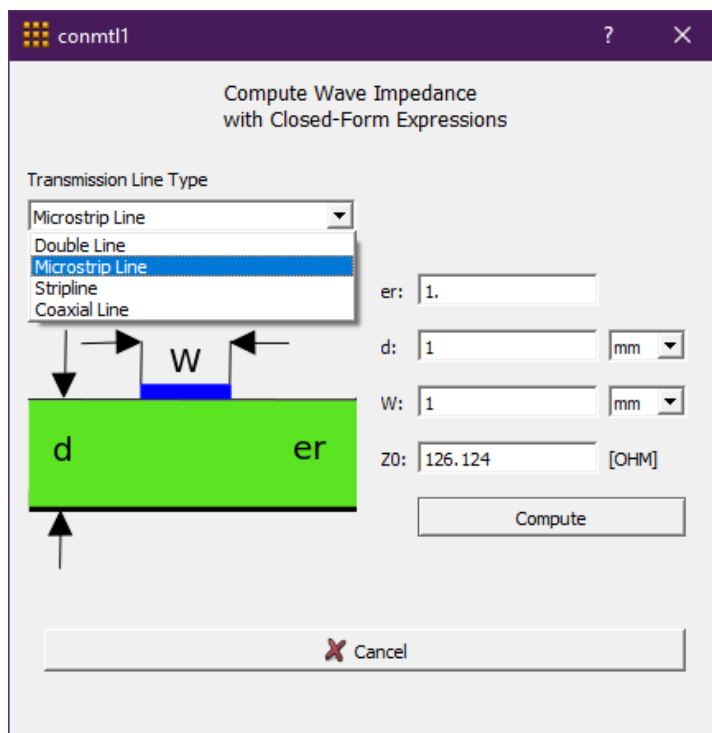


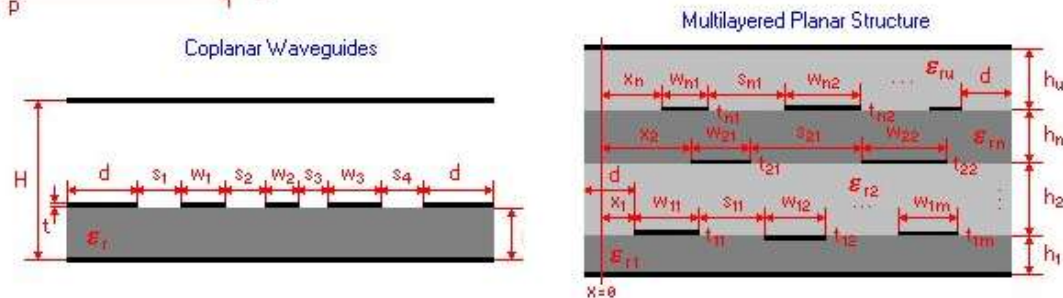
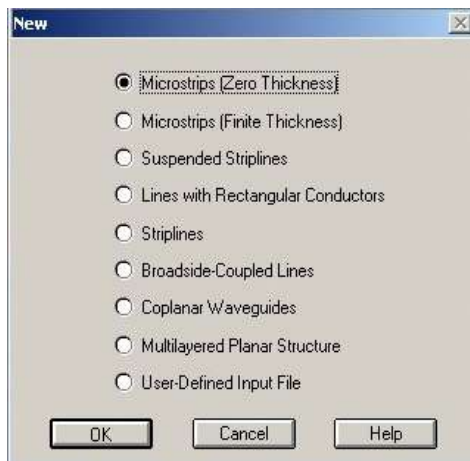
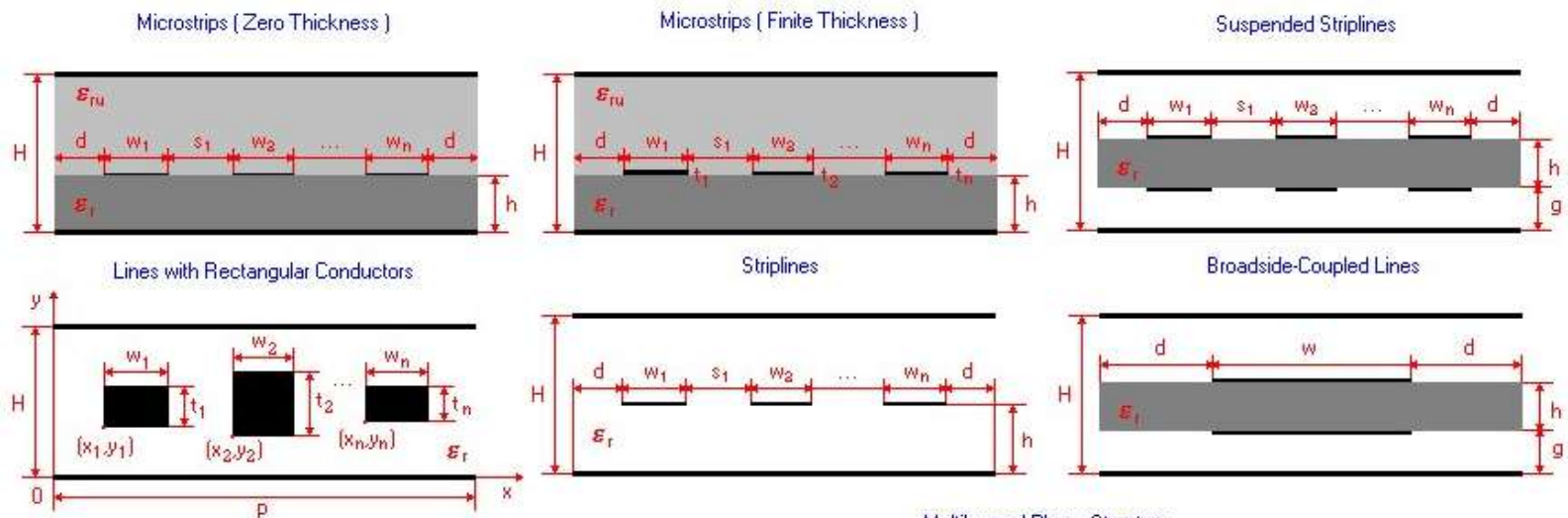
Рисунок 3.11 – CONMTL: калькулятор импеданса

### 3.6 Программа LINPAR

Программный инструмент LINPAR предназначен для расчета RLCG- и S-параметров типовых линий передачи с использованием метода моментов. Последняя доступная версия программы датирована 1995 г. и поддерживается только операционной системой Windows XP. Основное окно программы представлено на рисунке 3.12. На рисунке 3.13 приведено окно для выбора шаблонов типовых линий передачи и доступные шаблоны. После выбора одного из шаблонов в основном окне необходимо задать его геометрические и электрофизические параметры (рисунок 3.14,а). Сегментация выбранного поперечного сечения может быть выполнена как вручную (путем задания числа сегментов для каждой границы), так и полностью автоматически. Сегментация отображается в отдельном окне при нажатии кнопки «View» (рисунок 3.14,б). После нажатия кнопки «Run» осуществляется расчет заданных параметров, результат расчета также отображается в отдельном окне (рисунок 3.14,в).



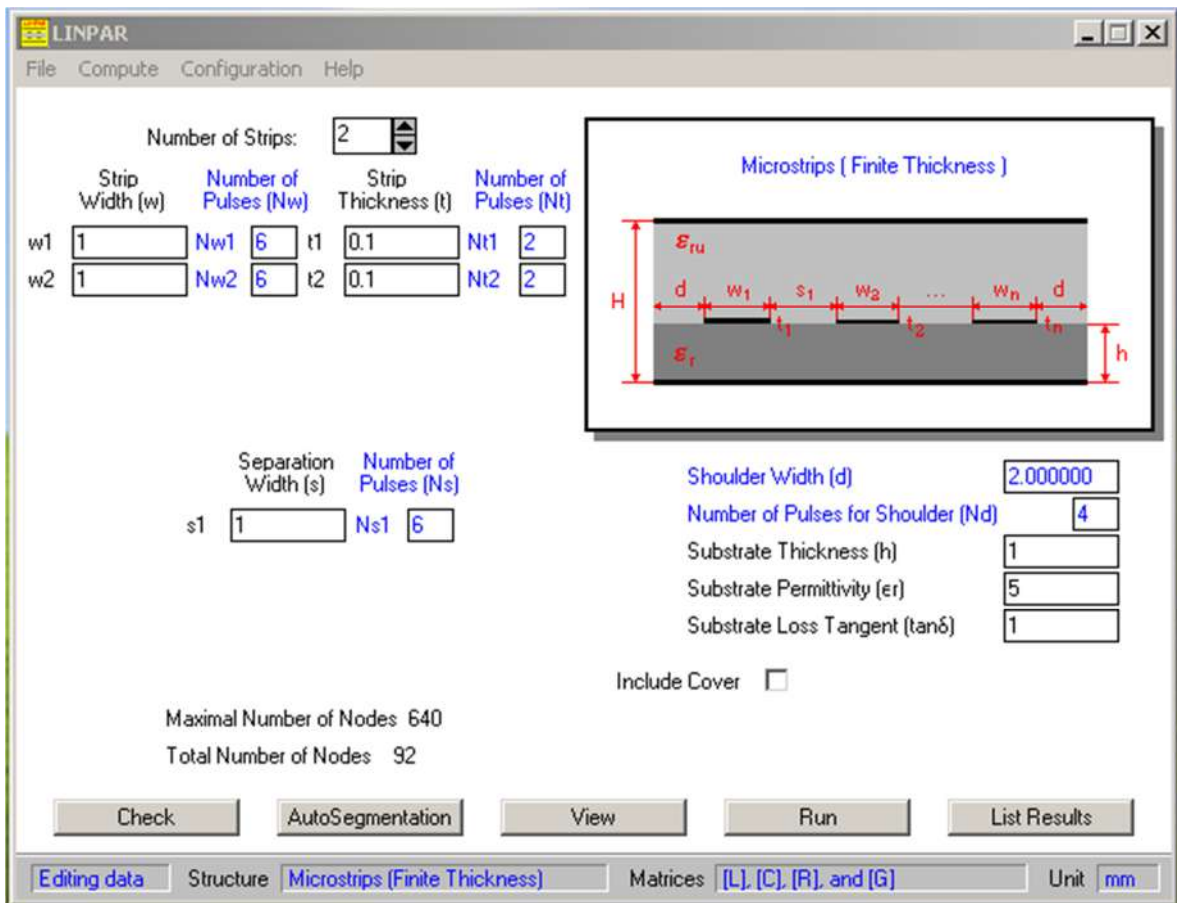
Рисунок 3.12 – LINPAR: основное окно



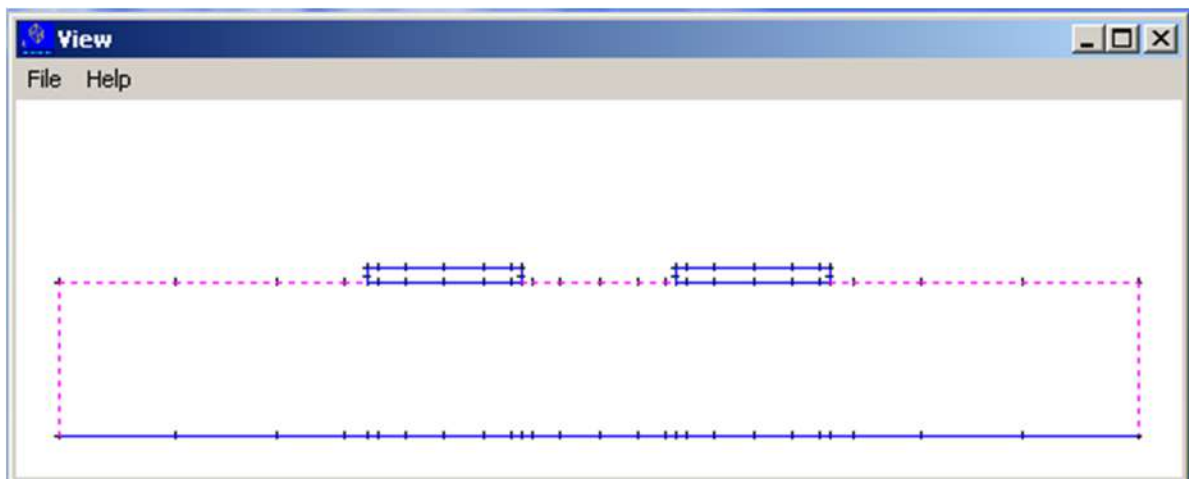
б

а

Рисунок 3.13 – LINPAR: выбор шаблона (а) и коллаж из их общих видов (б)



*a*



*б*

Рисунок 3.14 – LINPAR: задание параметров (*a*), сегментация поперечного сечения выбранной линии передачи (*б*) и окно отображения результатов моделирования (*в*) (окончание см. на с. 144)

```

List: C:\DOCUME~1\9335~1\0016~1\LINPAR\lparout.dat
File Search Options Help

Matrices [L], [C], [R], and [G] for finite-thickness coupled microstrips
above finite ground plane

Number of strips 2

Strip #      Width (m)      Number of pulses      Thickness (m)      Number of pulses
  1          1.000E-03          6                    1.000E-04          2
  2          1.000E-03          6                    1.000E-04          2

Separation #  Width (m)      Number of pulses
  1          1.000E-03          6

Substrate thickness 1.000E-03 m
Shoulder width 2.000E-03 m, number of pulses 4
Substrate relative permittivity 5.000E+00
Substrate loss tangent 1.000E+00

No cover present

Frequency 1.000E+10 Hz
Conductivity 5.800E+07 S/m
Surface resistance 2.609E-02  $\Omega$ 

Matrix [L] (H/m)
  4.037E-07  9.105E-08
  9.105E-08  4.037E-07

Matrix [C] (F/m)
  9.645E-11 -1.041E-11
 -1.041E-11  9.645E-11

Matrix [R] ( $\Omega$ /m)
  2.025E+01  2.543E+00
  2.543E+00  2.025E+01

Matrix [G] (S/m)
  5.183E+00 -3.418E-01
 -3.418E-01  5.183E+00

Characteristic impedance matrix ( $\Omega$ )
< 5.296E+01, 1.969E+01 > < 8.197E+00, 3.665E+00 >
< 8.197E+00, 3.665E+00 > < 5.296E+01, 1.969E+01 >

Modal propagation coefficients (1/m)
< 1.397E+02, 3.891E+02 > < 1.698E+02, 4.437E+02 >

Modal phase velocities (m/s) and effective permittivities
1.615E+08 < 3.447E+00 > 1.416E+08 < 4.483E+00 >

Modal voltage matrix (U)
< 7.071E-01, 0.000E+00 > < 7.071E-01, 3.147E-07 >
< -7.071E-01, -2.201E-07 > < 7.071E-01, 1.172E-14 >

Modal current matrix (A)
< 1.400E-02, -5.013E-03 > < 1.009E-02, -3.853E-03 >
< -1.400E-02, 5.013E-03 > < 1.009E-02, -3.853E-03 >

```

Рисунок 3.14 – Окончание (начало см. на с. 143)

### 3.7 Программа AlterPCB Transmission Line Simulator

Программный инструмент AlterPCB Transmission Line Simulator (AlterPCB-TLineSim) [23] предназначен для расчета RLСG-параметров и визуализации электромагнитных полей типовых линий передачи с использованием метода конечных элементов. Основное окно программы представлено на рисунке 3.15, она имеет открытый исходный код и работает корректно только при размещении в директории, не имеющей кириллических символов в пути.

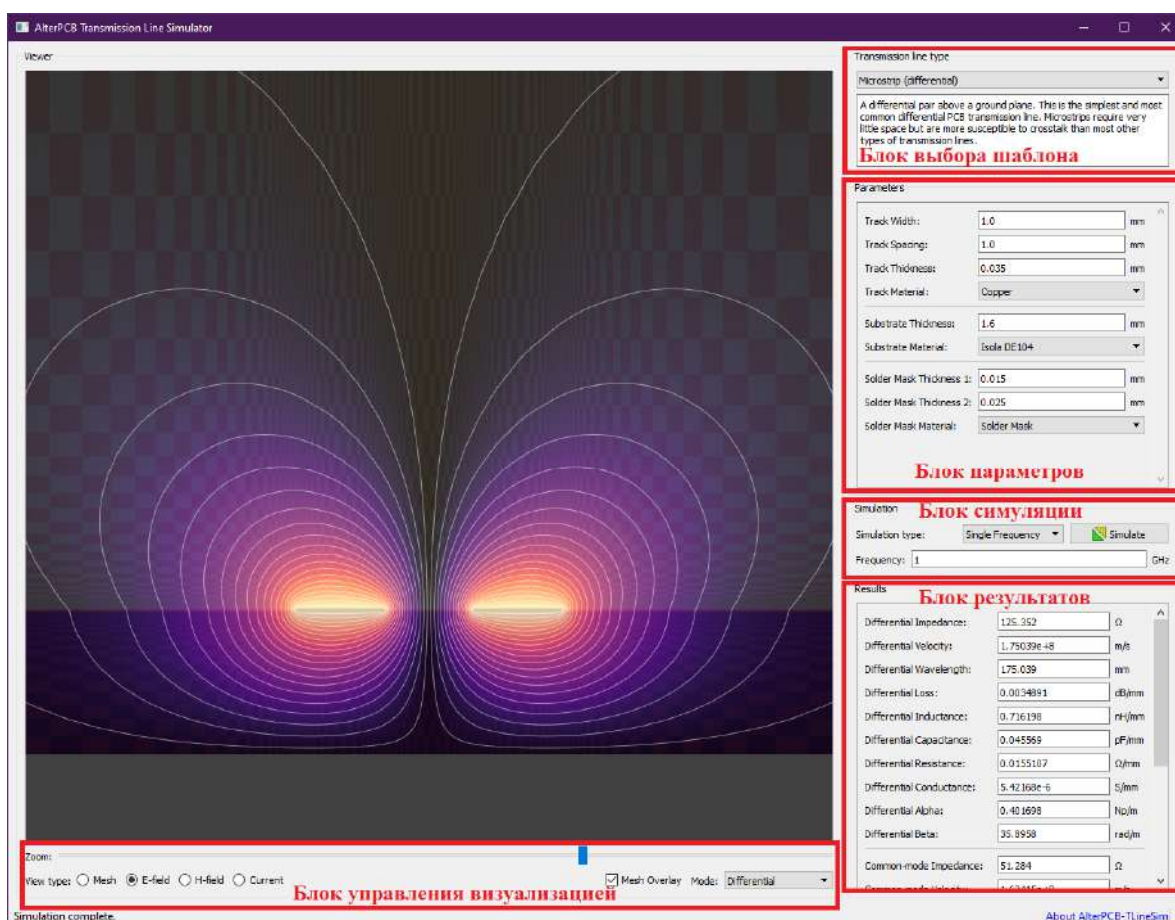
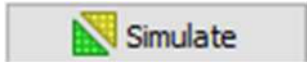


Рисунок 3.15 – AlterPCB-TLineSim: основное окно

В правом верхнем углу расположен блок для выбора типовых шаблонов линий передачи (доступны микрополосковые и полосковые одиночная и связанная линии передачи, а также копланарный волновод). После выбора одного из шаблонов в блоке параметров необходимо задать геометрические и электрофизические параметры линии. Далее в блоке симуляции нужно выбрать тип

моделирования и нажать кнопку . Доступно моделирование на одной частоте, а также свиппирование по частоте и геометрическим параметрам (многовариантный анализ).

После выполнения моделирования в блоке результатов отобразятся рассчитанные RLCG-параметры, импеданс, скорость распространения сигнала и ряд других параметров. Одновременно с этим в левой части окна появится визуализация расчетной сетки, поля или токов (в зависимости от параметра, выбранного в блоке управления визуализацией).

### 3.8 Программа atlc2

Программный инструмент atlc2 [24] предназначен для расчета RLCG-параметров и визуализации электрического поля (рисунок 3.16) произвольных линий передачи. Программа состоит из основного окна (рисунок 3.17,а) и панели управления (рисунок 3.17,б). Для работы программы нужно подготовить чертеж – изображение в формате \*.bmp размером 3200×3200 пикселей. Цвет пикселей на изображении определяет их тип (диэлектрик или проводник), материал, напряжение и другие характеристики (рисунок 3.18). Эти цвета могут быть переопределены в файле «MoreColors.txt», находящемся в той же директории, что и исполняемый файл программы. Характеристики основных цветов могут быть изменены на вкладке «materials» панели управления.

Все размеры являются относительными, при подготовке изображения необходимо соблюдать соотношение сторон и другие соотношения в структуре (в пикселях). Для привязки размеров к физическим в панели управления необходимо указать ширину пикселя с единицей измерения. В программе доступны три шаблона: коаксиальный кабель и связанные проводники круглого и прямоугольного сечения. Их можно моделировать без подготовки файла с изображением (в этом случае их геометрические размеры задаются в панели управления в соответствующих вкладках).

После подготовки изображения его нужно загрузить в программу, выбрав в основном окне команду File -> Open. Затем

в выпадающем меню команды Solve указать необходимые для расчета матрицы погонных параметров и ожидать завершения выполнения программы. Результаты будут выведены во вкладке «results» панели управления или в файл «atlc2 log.txt», если выполнение программы займет более 1 минуты.

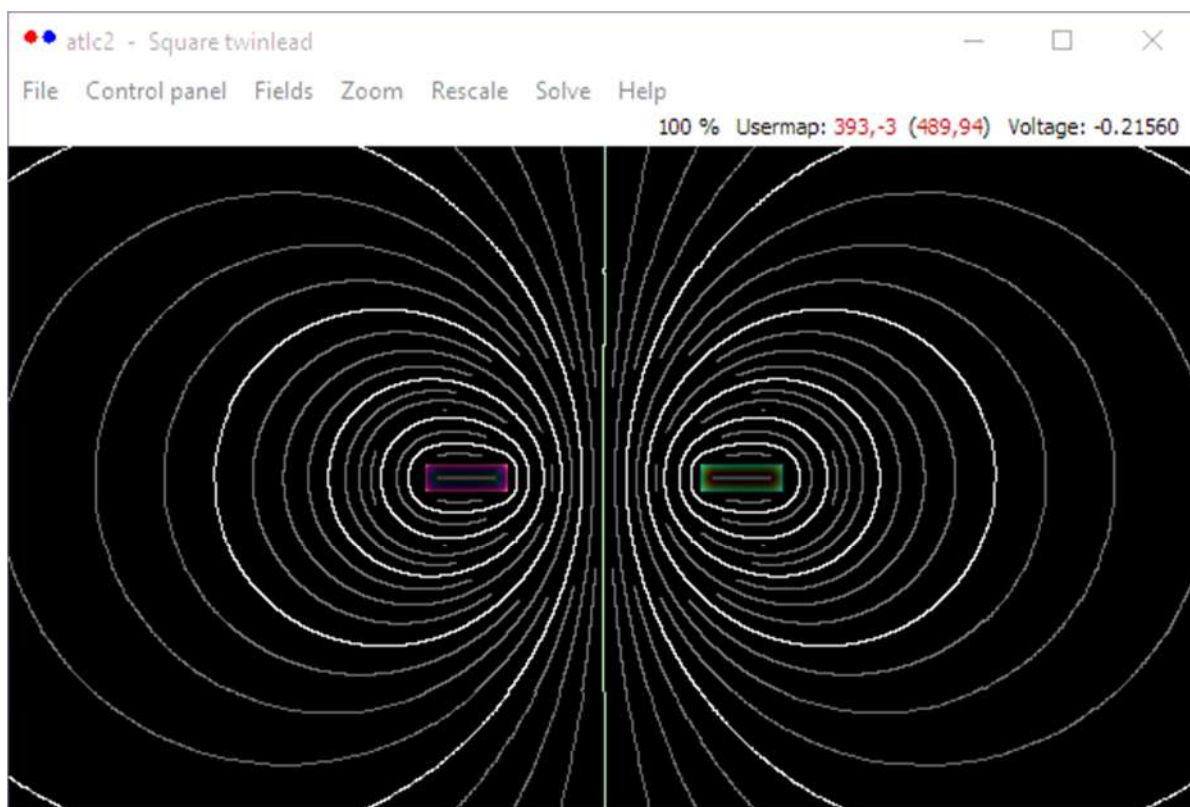
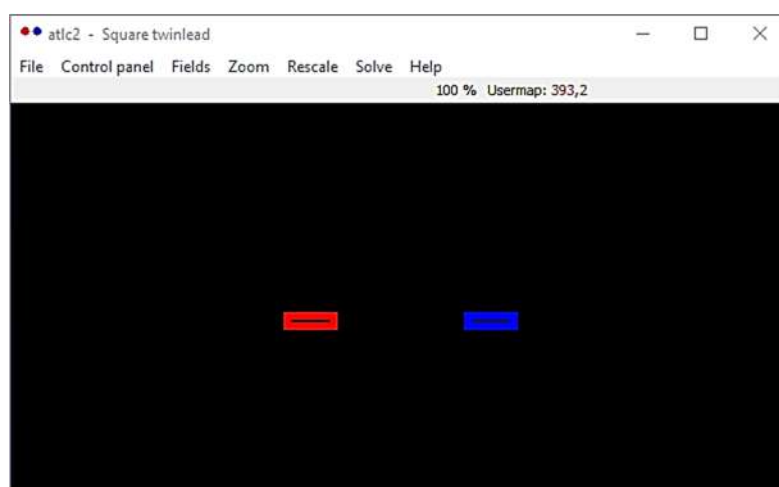
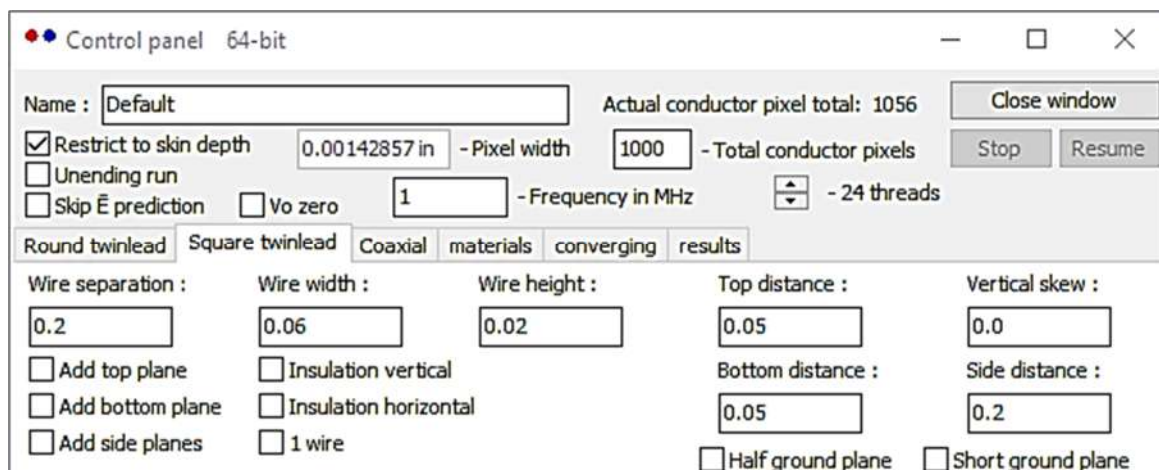


Рисунок 3.16 – atlc2: визуализация электрического поля



*a*

Рисунок 3.17 – atlc2: основное окно (а) и панель управления (б)  
(окончание см. на с. 148)



б

Рисунок 3.17 – Окончание (начало см. на с. 147)

	Red	Green	Blue	use	resistivity	permittivity	tanδ	permeability	name
	255	0	0	x0000FF	+1	1.7241	1	1	copper
	0	255	0	x00FF00	0	1.7241	1	1	copper
	0	0	255	xFF0000	-1	1.7241	1	1	copper
	0	255	255	xFFFF00	float	1.7241	1	1	copper
	224	31	31	x1F1FE0	+1	2.62	1	1	aluminum
	31	224	31	x1FE01F	0	2.62	1	1	aluminum
	31	31	224	xE01F1F	-1	2.62	1	1	aluminum
	31	224	224	xEOE01F	float	2.62	1	1	aluminum
	224	31	0	x001FE0	+1	1.62	1	1	silver
	31	224	0	x00E01F	0	1.62	1	1	silver
	31	0	224	xEO001F	-1	1.62	1	1	silver
	31	255	224	xEOFF1F	float	1.62	1	1	silver
	224	0	31	x1F00E0	+1	2.44	1	1	gold
	0	224	31	x1FE000	0	2.44	1	1	gold
	0	31	224	xEO1F00	-1	2.44	1	1	gold
	0	224	224	xEOE000	float	2.44	1	1	gold
	224	63	63	x3F3FE0	+1	9.71	1	1	* steel
	63	224	63	x3FE03F	0	9.71	1	1	* steel
	63	63	224	xEO3F3F	-1	9.71	1	1	* steel
	63	224	224	xEOE03F	float	9.71	1	1	* steel
	224	0	63	x3F00E0	+1	11.4	1	1	tin
	0	224	63	x3FE000	0	11.4	1	1	tin
	0	63	224	xEO3F00	-1	11.4	1	1	tin
	0	255	224	xEOFF00	float	11.4	1	1	tin
	24	63	0	x003FE0	+1	14.5	1	1	60/40 PbSn solder
	63	224	0	x00E03F	0	14.5	1	1	60/40 PbSn solder
	63	0	224	xEO003F	-1	14.5	1	1	60/40 PbSn solder
	63	255	224	xEOFF3F	float	14.5	1	1	60/40 PbSn solder
	0	0	0	x000000	insul	1000000	1	0	vacuum
	255	255	255	xFFFFFFFF	insul	1000000	1	0	vacuum
	255	202	202	xCACAFF	insul	1000000	1.0006	0	air
	130	53	239	xEF3582	insul	1000000	2.07	0.00020	teflon
	255	0	255	xFF00FF	insul	1000000	2.26	0.00064	polyethylene
	255	255	0	x00FFFF	insul	1000000	2.5	0.00033	polystyrene
	239	204	26	x1ACCEF	insul	1000000	4.5	0.011	polyvinylchloride
	188	127	96	x607FBC	insul	1000000	3.3350	0.03	epoxy resin
	26	239	179	xB3EF1A	insul	1000000	4.8	0.018	fiberglass/epoxy PCB
	223	247	136	x88F7DF	insul	1000000	3.7	0.018	FR4 PCB
	142	142	142	x8E8E8E	insul	1000000	2.2	0.00090	duroid 5880
	105	105	105	x696969	insul	1000000	6.15	0.00270	duroid 6006
	220	220	220	xDCDCDC	insul	1000000	10.2	0.00230	duroid 6010
	213	160	77	x4DA0D5	insul	1000000	100	0	Er=100
	100	200	255	xFFC864	insul	1000000	75	0.157	distilled water
	176	224	200	xC8E0B0	insul	1000000	3.78	0.00006	quartz
	153	255	153	x99FF99	insul	1000000	5.0	0.00540	glass (varies a lot)

Рисунок 3.18 – atlc2: характеристики материала в зависимости от цвета

### 3.9 Программа Lines Modelling Toolbox

Программный инструмент Lines Modelling Toolbox (LTT) предназначен для моделирования различных типов линий передачи, как одиночных, так и многопроводных, позволяет выполнять расчет структур сложного поперечного сечения с однородным и неоднородным диэлектрическим заполнением. Первый шаг анализа состоит в расчете погонных (индуктивность, емкость) и модальных (импеданс и др.) параметров структуры линии передачи по заданным физическим параметрам (геометрии и свойствам материалов). На втором шаге задаются длина отрезка линии передачи, его схема включения, конечные нагрузки и диапазон рабочих частот, после чего выполняется вычисление частотных зависимостей S-параметров с построением графиков. Особенности программы:

- графический интерфейс пользователя реализован на платформе Windows Presentation Foundation на языке программирования C# в среде Microsoft .NET. Реализация математических моделей выполнена на языке программирования Fortran с использованием пакета SCPACK с открытым исходным кодом;

- вычисления выполняются в квазистатическом приближении с применением метода конформных отображений и интеграла Кристоффеля – Шварца;

- полосковые проводники рассчитываются с учетом их толщины. Сечение круглых проводников в сложных структурах аппроксимируется многоугольной границей;

- три режима отображения результатов (электрических параметров): численные значения первичных (погонных) и вторичных (модальных) параметров, графики погонных и модальных параметров в зависимости от одного из физических (геометрических и диэлектрических) параметров, графики параметров рассеяния (АЧХ и ФЧХ S-параметров) произвольно нагруженного отрезка линии передачи в заданном диапазоне частот (рисунок 3.19).

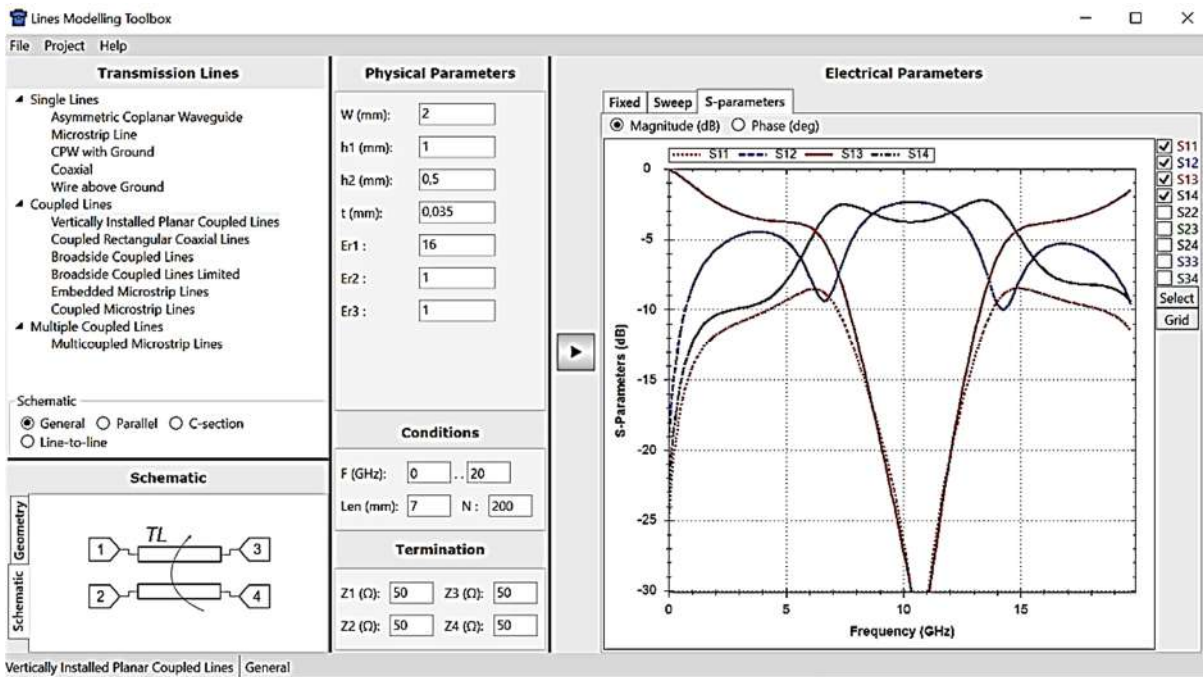


Рисунок 3.19 – LTT: отображение S-параметров

### 3.10 Контрольные вопросы и задания

1. Укажите, в чем главные отличительные особенности представленных в данном разделе программ.

2. Выполните расчет параметров одиночной микрополосковой линии передачи в представленных в данном разделе программах и сравните результаты. Параметры линии передачи выбрать следующие: ширина проводника  $w = 2$  мм, толщина проводника  $t = 0,1$  мм, толщина диэлектрической подложки  $h = 1$  мм, ее относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r = 4,5$ .

3. Выполните расчет параметров связанной микрополосковой линии передачи в представленных в данном разделе программах и сравните результаты. Параметры линии передачи выбрать следующие: ширина проводников  $w = 3$  мм, толщина проводников  $t = 0,2$  мм, толщина диэлектрической подложки  $h = 1$  мм, ее относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r = 5,5$ , расстояние между проводниками  $s = 5$  мм.

## Заключение

В данном пособии рассмотрены различные программные средства, применяемые для решения электростатических задач и квазистатического моделирования радиоэлектронных средств. Эти программные средства позволяют проводить анализ и синтез параметров линий передачи, а также моделировать и оптимизировать их параметры.

Подробно описаны и проанализированы как отечественные программные продукты, такие как ELCUT, TUSUR.EMC, FEM2D, АРМ ЕМА, так и программы с открытым исходным кодом – FEMM и FasterCap. Кроме того, уделено внимание небольшим программным средствам расчета и синтеза параметров линий передачи, включая AppCAD, AWR TXLINE, CITS25 и другие. Приведены примеры практического использования указанных программ, что позволяет лучше понять и освоить методы численного моделирования и анализа элементов радиоэлектронных средств.

## Литература

1. QuickField : официальный сайт. URL: <http://quickfield.com/index.htm> (дата обращения: 17.03.2025).
2. ELCUT – программа моделирования : официальный сайт. URL: <http://elcut.ru/index.htm> (дата обращения: 17.03.2025).
3. APM : официальный сайт. URL: <http://apm.ru/analysis-of-electromagnetic-fields> (дата обращения: 17.03.2025).
4. Система TUSUR.EMC – программный комплекс для моделирования задач электромагнитной совместимости : официальный сайт. URL: <http://emc.tusur.ru> (дата обращения: 17.03.2025).
5. Analysis of arbitrarily oriented microstrip transmission lines in arbitrarily shaped dielectric media over a finite ground plane / J. Venkataraman, S.M. Rao, A.R. Djordjevic, T.K. Sarkar, Y. Naiheng // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. 1985. Vol. 33, no. 10. P. 952–960.
6. Paul C.R. Analysis of multiconductor transmission lines. Hoboken/New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. 803 p.
7. Ховратович В.С. Параметры многопроводных передающих линий // Радиотехника и электроника. 1975. № 3. С. 469–473.
8. Yang Z., Wang Z. A virtual 3-D fast extractor for interconnect capacitance of multiple dielectrics // Microelectronic engineering. 2003. Vol. 65. P. 133–144.
9. Pan G.W., Wang G., Gilbert B.K. Edge effect enforced boundary element analysis of multilayered transmission lines // IEEE Transactions on circuits and systems I: fundamental theory and applications. 1992. Vol. 39, no. 11. P. 955–963.
10. Baum C.E. Norms and eigenvector norms // Mathematics Notes. 1979. Vol. 63. P. 1–42.
11. Study and classification of potential IEMI sources / N. Mora, F. Vega, G. Lugrin [et al.] // System and assessment notes. 2014. no. 41. 92 p.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021660469, Российская Федерация. FEM2D 2021 : № 2021619672 : заявл. 23.06.2021 : опубл. 25.06.2021 / Ключ-

кин Д.В., Квасников А.А., Куксенко С.П. [и др.] ; заявитель Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

13. Qt | Cross-platform software development for embedded & desktop : сайт. URL: <http://www.qt.io> (дата обращения: 17.03.2025).

14. Armadillo C++ library for linear algebra & scientific computing : сайт. URL: <http://arma.sourceforge.net> (дата обращения: 17.03.2025).

15. АРМ ЕМА – расчет электромагнитных полей : официальный сайт. URL: <http://apm.ru/apm-ema> (дата обращения: 17.03.2025).

16. АРМ ЕМА – руководство пользователя : официальный сайт. URL: <http://apm.ru/downloads/188/APM-EMA.pdf> (дата обращения: 17.03.2025).

17. Finite Element Method Magnetics : официальный сайт. URL: <http://www.femm.info/wiki/HomePage> (дата обращения: 17.03.2025).

18. Triangle : официальный сайт. – URL: <http://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html> (дата обращения: 17.03.2025).

19. Broadcom – AppCAD Design Assistant : официальный сайт. URL: <http://www.broadcom.com/info/wireless/appcad> (дата обращения: 17.03.2025).

20. Polar Instruments : официальный сайт. URL: <http://www.polarinstruments.com/products/products.html> (дата обращения: 17.03.2025).

21. Saturn PCB Design Toolkit : сайт. URL: <http://saturnpcb.com/saturn-pcb-toolkit/> (дата обращения: 17.03.2025).

22. Hamburg University of Technology (TUHH) – The CONCEPT-II Family : официальный сайт. URL: <http://www.tet.tuhh.de/en/concept-ii-family> (дата обращения: 17.03.2025).

23. Maarten Baert's website – TlineSim : сайт. URL: <http://www.maartenbaert.be/alterpcb/tlinesim> (дата обращения: 17.03.2025).

24. Arbitrary Transmission Line Calculator : сайт. URL: <http://www.hdtvprimer.com/kq6qv/atlc2.html> (дата обращения: 17.03.2025).

Учебное издание

**Куксенко** Сергей Петрович  
**Максимов** Александр Евгеньевич  
**Клюкин** Дмитрий Владимирович  
**Жечев** Евгений Сергеевич  
**Квасников** Алексей Андреевич  
**Суровцев** Роман Сергеевич

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ:  
ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РЕШЕНИЯ  
ДВУМЕРНЫХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ**

Учебное пособие

Подписано в печать 2025. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 9.07. Заказ № . Тираж 100 экз.

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования «Томский государственный  
университет систем управления и радиоэлектроники»

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.  
Тел. (3822) 533018.