

Министерство образования и науки Российской Федерации  
**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**  
(ТУСУР)

**Кафедра СВЧвысокочастотной и квантовой радиотехники**  
(СВЧиКР)

**Микроволновая техника**

**ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ ВОЛНОВОД**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к лабораторной работе для магистрантов, направления 210400.68

"Радиотехника", профиль

" Микроволновая техника и антенны"

Министерство образования и науки Российской Федерации  
**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**  
(ТУСУР)

**Кафедра Сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники**  
(СВЧиКР)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. каф. СВЧиКР

\_\_\_\_\_ Шарангович С.Н.

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2014г.

**Микроволновая техника**

**ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ ВОЛНОВОД**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к лабораторной работе для магистрантов, направления 210400.68

"Радиотехника", профиль " Микроволновая техника и антенны"

Разработчики:

проф. кафедры СВЧиКР

\_\_\_\_\_ Г.Г. Гошин

ассистент кафедры СВЧиКР

\_\_\_\_\_ А.А. Трубачев

доцент кафедры СВЧиКР

\_\_\_\_\_ А.В. Фатеев

2014

УДК 621.372.62

**Гошин Г.Г., Трубачев А.А., Фатеев А.В.**

Прямоугольный волновод: Руководство к лабораторной работе по дисциплине «Микроволновая техника». — Томск: Томский гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2013. — 28 с.

В руководстве содержится методический материал по теории распространения электромагнитных волн в прямоугольном металлическом полом волноводе. Также приводятся рекомендации по работе со средством автоматизированного проектирования, моделирования и электродинамического анализа *CST Microwave Studio*. Отмечаются основные теоретические положения, расчётные формулы.

Руководство предназначено для магистрантов технических вузов, обучающихся по направлению подготовки 210400.68 «Радиотехника», профиль «Микроволновая техника и антенны» в рамках дисциплины «Микроволновая техника».

© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2014

© Гошин Г.Г. 2014

© Трубачев А.А. 2014

© Фатеев А.В. 2014

## Оглавление

Введение.....	5
1 Краткие теоретические сведения.....	5
2 Рекомендации по выполнению работы.....	7
2.1 Содержание отчета.....	8
2.2 Контрольные вопросы .....	8
3 Работа с программным обеспечением .....	8
Список литературы .....	27

## Введение

**Цель работы:** изучение принципов работы программного обеспечения для электромагнитного моделирования устройств *CST Microwave Studio* и изучения процесса распространения волн в прямоугольном волноводе.

### 1 Краткие теоретические сведения

Рассмотрим основы теории распространения электромагнитных волн в прямоугольном волноводе из [1]. В прямоугольном металлическом волноводе (рисунок 1.1) с однородным диэлектрическим заполнением распространяются магнитные волны типа  $H_{mn}$ , у которых компоненты  $H_z \neq 0$ , а  $E_z = 0$  (направление оси  $z$  совпадает с продольной осью волновода), и электрические волны  $E_{mn}$ , у которых  $E_z \neq 0$ ,  $H_z = 0$ .

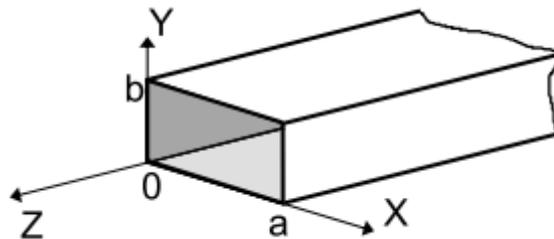


Рисунок 1.1 Прямоугольный волновод

Из бесконечного спектра типов волн с индексами  $m = 0, 1, 2, \dots$  и  $n = 0, 1, 2, \dots$  распространяться в волноводе будут лишь те, для которых выполняется соотношение

$$\lambda_{кр}^{mn} > \lambda, \quad f_{кр}^{mn} > f,$$

где  $\lambda_{кр}^{mn}$  - критическая длина волны данного типа колебания,

$$f_{кр}^{mn} = c / (\lambda_{кр}^{mn} \cdot \sqrt{\epsilon\mu}) - \text{критическая частота,}$$

$\epsilon$ ,  $\mu$  - относительная диэлектрическая и магнитная проницаемость заполняющего волновод материала,

$$f = c / \lambda - \text{частота генератора,}$$

$$\lambda = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon\mu}$$

$\lambda$  - длина волны в среде с параметрами заполняющего волновод материала,

$\lambda_0$  - длина волны в вакууме.

Критическая длина волны

$$\lambda_{\text{кр}}^{mn} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}},$$

где  $a$  и  $b$  - размеры поперечного сечения волновода по широкой и узкой стенкам. При одинаковых индексах  $m$  и  $n$  выполняется равенство

$$\lambda_{\text{кр}}^{H_{mn}} = \lambda_{\text{кр}}^{E_{mn}}$$

а волны  $H_{mn}$  и  $E_{mn}$  называются вырожденными. Следует учесть, что волны  $H_{00}$ ,  $E_{00}$ ,  $E_{0m}$  и  $E_{m0}$  не существуют.

Электромагнитное поле распространяющейся волны  $H_{mn}$  имеет компоненты:

$$\dot{H}_z = H_0^{mn} \cdot \cos \frac{m\pi}{a} x \cdot \cos \frac{n\pi}{b} y \cdot e^{-j\beta^{mn}z},$$

$$\dot{H}_x = jH_0^{mn} \cdot \frac{\beta^{mn}}{(k_{\perp}^{mn})^2} \cdot \frac{m\pi}{a} \cdot \sin \frac{m\pi}{a} x \cdot \cos \frac{n\pi}{b} y \cdot e^{-j\beta^{mn}z},$$

$$\dot{H}_y = jH_0^{mn} \cdot \frac{\beta^{mn}}{(k_{\perp}^{mn})^2} \cdot \frac{n\pi}{b} \cdot \cos \frac{m\pi}{a} x \cdot \sin \frac{n\pi}{b} y \cdot e^{-j\beta^{mn}z},$$

$$\dot{E}_x = Z_H^{mn} \cdot \dot{H}_y,$$

$$\dot{E}_y = -Z_H^{mn} \cdot \dot{H}_x$$

$$\dot{E}_z = 0,$$

где  $\beta^{mn}$  - продольное волновое число (коэффициент фазы),

$$k_{\perp}^{mn} = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{кр}}^{mn}} - \text{поперечное волновое число,}$$

$$Z_H^{mn} = \frac{Z_c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}^{mn}}\right)^2}} [\text{Ом}] - \text{характеристическое сопротивление волновода}$$

для волн типа  $H_{mn}$ ,

$$Z_c = 120\pi \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}, [\text{Ом}] - \text{характеристическое сопротивление среды,}$$

заполняющей волновод.

Электромагнитное поле распространяющейся волны  $E_{mn}$  имеет компоненты:

$$\dot{E}_z = E_0^{mn} \cdot \sin \frac{m\pi}{a} x \cdot \cos \frac{n\pi}{b} y \cdot e^{-j\beta^{mn}z},$$

$$\dot{E}_x = -jE_0^{mn} \cdot \frac{\beta^{mn}}{(k_{\perp}^{mn})^2} \cdot \frac{m\pi}{a} \cdot \cos \frac{m\pi}{a} x \cdot \sin \frac{n\pi}{b} y \cdot e^{-j\beta^{mn}z},$$

$$\dot{E}_y = -jE_0^{mn} \cdot \frac{\beta^{mn}}{(k_{\perp}^{mn})^2} \cdot \frac{n\pi}{b} \cdot \sin \frac{m\pi}{a} x \cdot \cos \frac{n\pi}{b} y \cdot e^{-j\beta^{mn}z},$$

$$\dot{H}_x = -\dot{E}_y / Z_E^{mn},$$

$$\dot{H}_y = \dot{E}_x / Z_E^{mn},$$

$$\dot{H}_z = 0,$$

где  $z_H^{mn} = z_c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}^{mn}}\right)^2}$  [Ом] - характеристическое сопротивление

волновода с волной  $E_{mn}$ .

Другие параметры распространяющихся  $E_{mn}$  или  $H_{mn}$  волн рассчитываются по следующим формулам:

- длина волны в волноводе  $\lambda_{\text{в}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}^{mn}}\right)^2}}$

- коэффициент фазы (или постоянная распространения)  $\beta_{\text{в}}^{mn} = \frac{2\pi}{\lambda_{кр}^{mn}}, \left[\frac{1}{\text{м}}\right]$

- фазовая скорость в волноводе

$$v_{\text{фв}} = \frac{v_{\text{ф}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}^{mn}}\right)^2}}, \text{ где } v_{\text{ф}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \left[\frac{\text{м}}{\text{с}}\right],$$

- групповая скорость волны в волноводе:

$$v_{\text{грав}} = v_{\text{ф}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}^{mn}}\right)^2}, \left[\frac{\text{м}}{\text{с}}\right].$$

## 2 Рекомендации по выполнению работы

При выполнении лабораторной работы необходимо изучить принципы работы программного обеспечения *CST Microwave Studio* для автоматизированного проектирования микроволновых устройств.

Для каждого варианта данные задаются из таблицы 2.1

Таблица 2.1

№ варианта	Размеры прямоугольного волновода $a \times b$ , мм	Диапазон рабочих частот, $f_{min}-f_{max}$ , ГГц	Длина перехода $L$ , мм
1	23x10	8-12	30
2	23x10	8-12	40
3	23x10	8-12	50
4	19x9,5	10-15	25
5	19x9,5	10-15	35
6	19x9,5	10-15	45
7	16x8	12-18	20
8	16x8	12-18	30
9	16x8	12-18	40

## 2.1 Содержание отчета

Отчет о проделанной работе должен содержать следующие разделы:

Цель работы;

Краткая теория;

Результаты работы - графики зависимостей КСВН от частоты для двух типов переходов.

Выводы по проделанной работе

## 2.2 Контрольные вопросы

1. Что называется основным типом волны?
2. Какой тип волны является основным для прямоугольного волновода?
3. Какие типы волн называют ТЕ и ТН волной?
4. Изобразите линии электрического и магнитного полей для волны типа  $H_{10}$ .

## 3 Работа с программным обеспечением

Для создания нового проекта выберем модуль *CST Microwave Studio* (используется версия 2014), который представляет собой программу для полноценного трехмерного электродинамического анализа структур. Далее выбираем создание нового проекта без использования шаблона, что позволит рассмотреть основные моменты настройки программы.

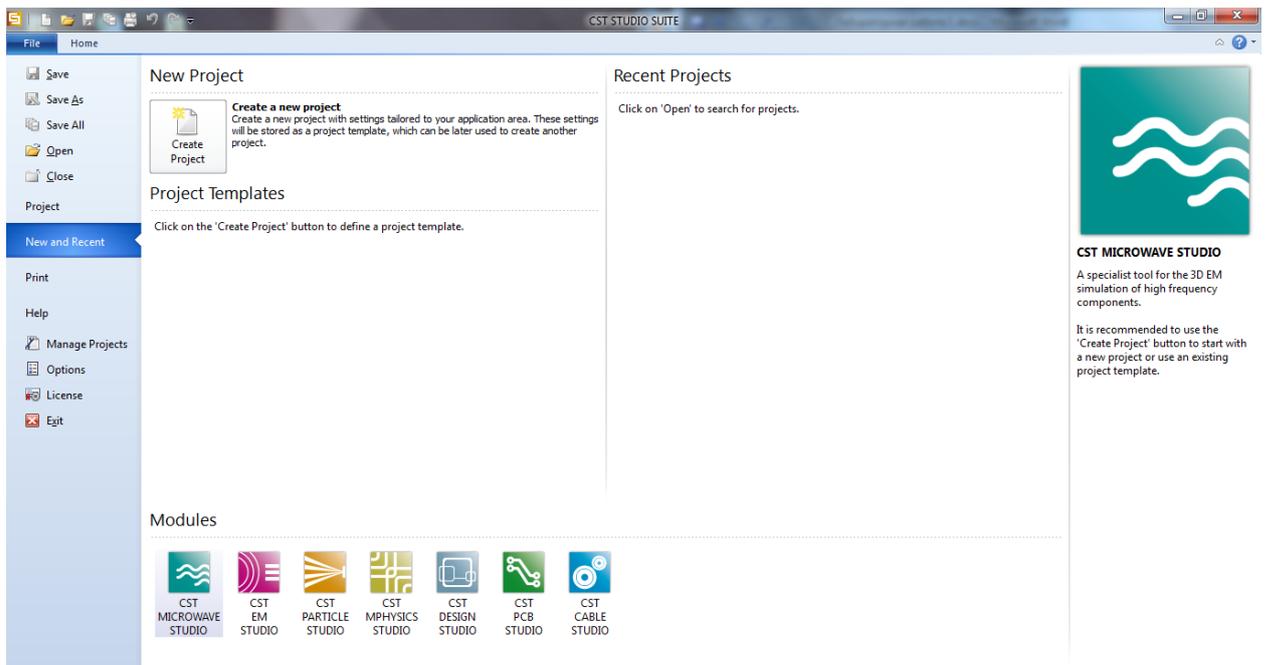


Рисунок 5.1

Основное окно программы разделено на несколько важных частей.

В верхней части расположены вкладки с настройками, и т.д.

Слева расположено дерево навигации (*Navigation Tree*), в котором расположены рисуемые структуры, их параметры а также результаты моделирования.

Нижняя часть экрана разделена на две части – слева список переменных (*Parameter List*) и окно сообщений (*Messages*).

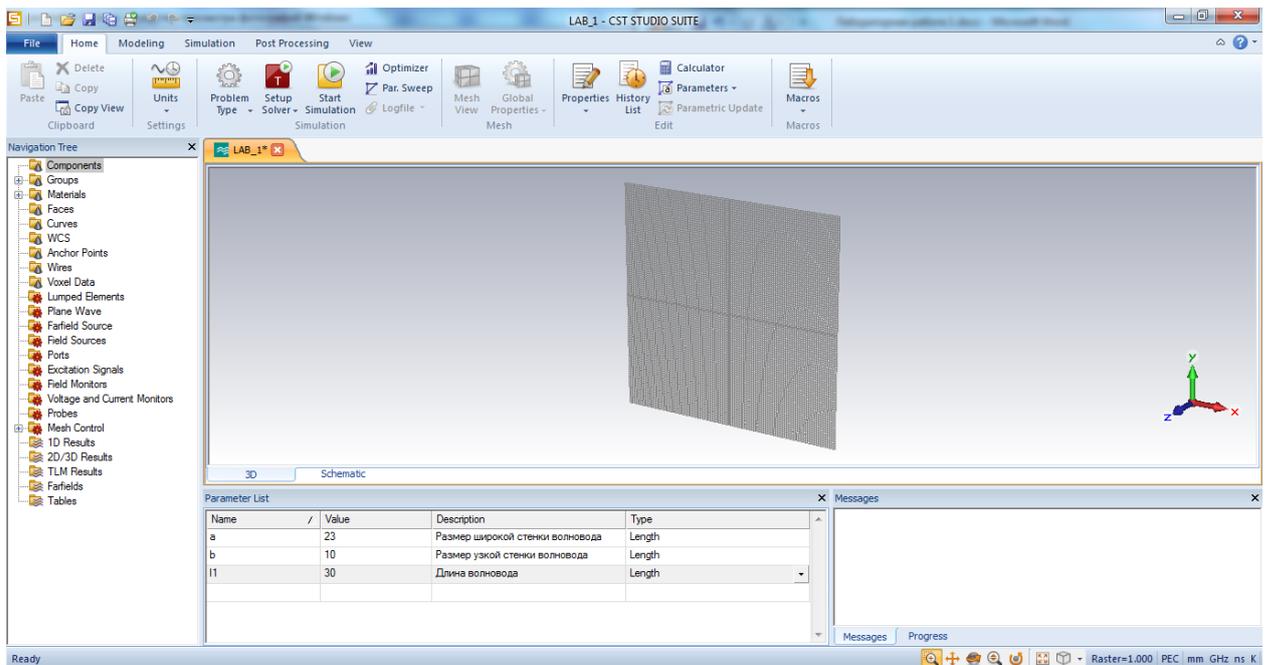


Рисунок 5.3

Цель лабораторной работы: моделирование прямоугольного волновода и исследование перехода с одного сечения волновода на другое в трехсантиметровом диапазоне длин волн.

Для начала работы необходимо задать единицы измерения величин, используемых при моделировании. Для этого необходимо на вкладке *Home* выбрать иконку *Units*.

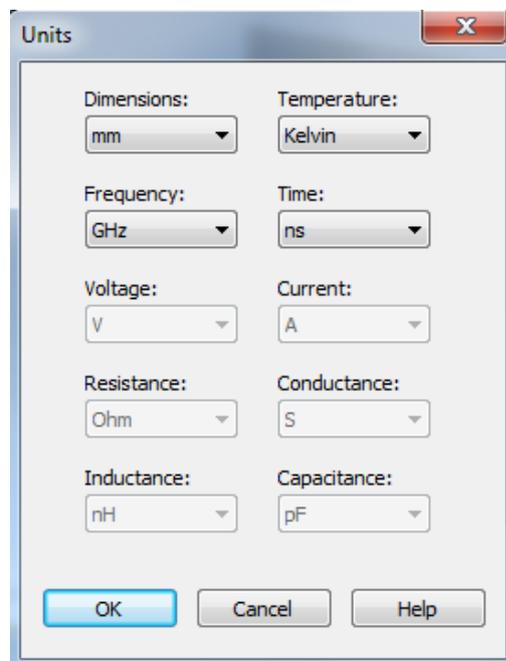
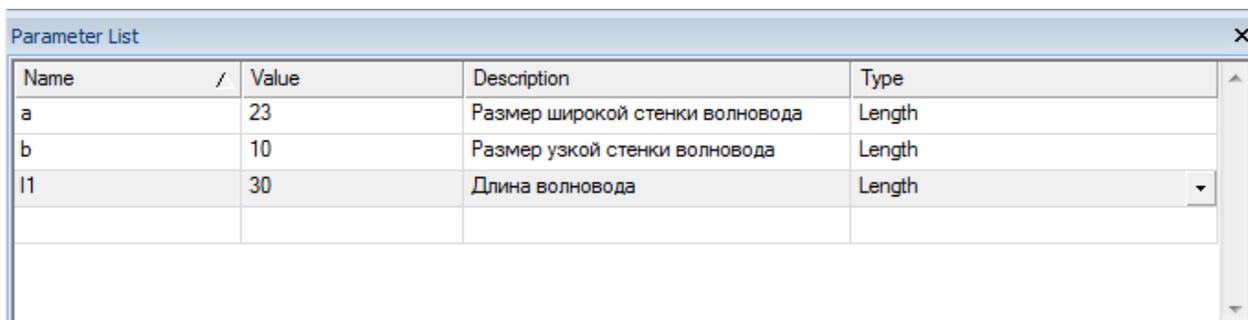


Рисунок 5.4

Важно отметить, что все выполняемые с проектом операции фиксируются в истории проекта (*History List*) на вкладке *Home*. Но к этому мы вернемся позже.

Для создания модели волновода создадим переменные  $a$ ,  $b$  – ширина и высота сечения волновода и  $l1$  – длина волновода.



Name	Value	Description	Type
a	23	Размер широкой стенки волновода	Length
b	10	Размер узкой стенки волновода	Length
l1	30	Длина волновода	Length

Рисунок 5.5

В данной работе используется волновод сечением 23x10 мм. В графу *Name* вводим название переменной, например,  $a$ . В графу *Value* вводится значение переменной 23. В графу *Description* можно ввести описание переменной, например размер широкой стенки волновода. В Графе *Type* выберем тип переменной – *Length* (переменные размеров). Таким же образом заполним остальные переменные.

Для построения модели волновода перейдем на вкладку *Modeling*. На ней сосредоточены основные элементы составления и прорисовки модели. Для моделирования волновода выберем фигуру параллелепипед (*Brick*). Для рисования можно использовать два способа – фактическое задание точек при помощи мыши и построение по координатам. Мы будем использовать второй способ, чтобы зайти в меню нажмите *Esc*.

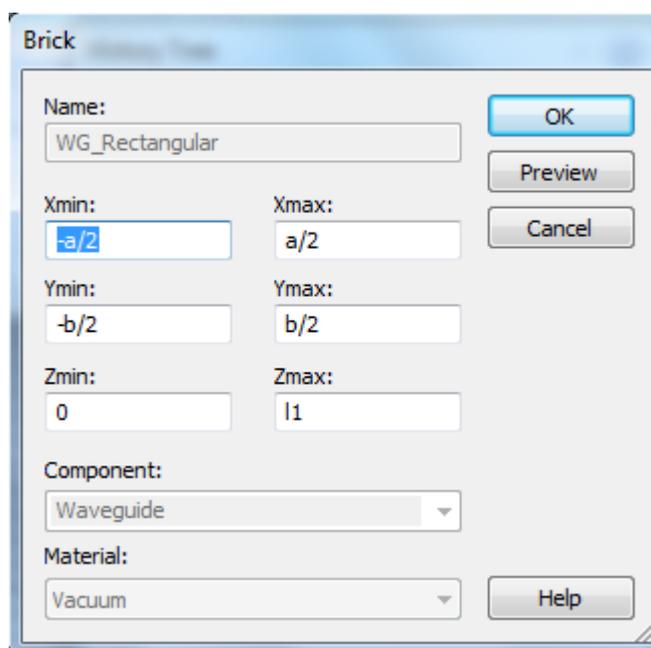


Рисунок 5.6

Зададим следующие параметры волновода:

Имя (*Name*) – *WG\_Rectangular*;

$X_{min}$ ,  $X_{max}$ ,  $Y_{min}$ ,  $Y_{max}$ ,  $Z_{min}$ ,  $Z_{max}$  – координаты вершин параллелепипеда;

Компонент (*Component*) – это подпапка в дереве навигации, в котором будет находиться данный объект, назовем его *Waveguide*;

Материал (*Material*) – материал объекта. Здесь можно выбрать из предлагаемого списка, либо создать собственный материал с требуемыми параметрами. Основными материалами являются *Vacuum* – вакуум с  $\epsilon = 1$ ,  $\mu = 1$  и *PEC* (*Perfect Electric Conductor* – идеальный проводник). Выберем тип *Vacuum*.

Для предварительного просмотра построенной фигуры нажмите кнопку *Preview*.

После нажатия кнопки *OK* в окне модели появится параллелепипед. Для начала моделирования необходимо задать интересующий диапазон частот. Для этого на вкладке *Simulation* в меню *Frequency* введем значения минимальной и максимальной частоты

$$F_{min}=6, F_{max}=14.$$

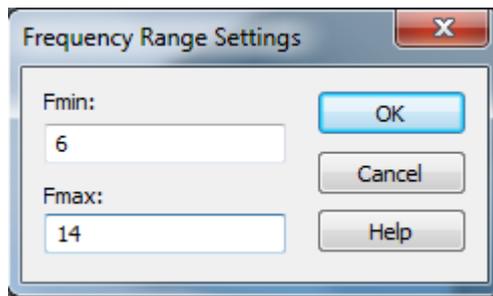


Рисунок 5.7

Далее на этой же вкладке в меню *Background* выберем тип окружающего исследуемую структуру материала. По умолчанию стоит *PEC*, т.е. проводящий материал. Нажимаем *OK*. т.е. проводящий материал. Нажимаем *OK*.

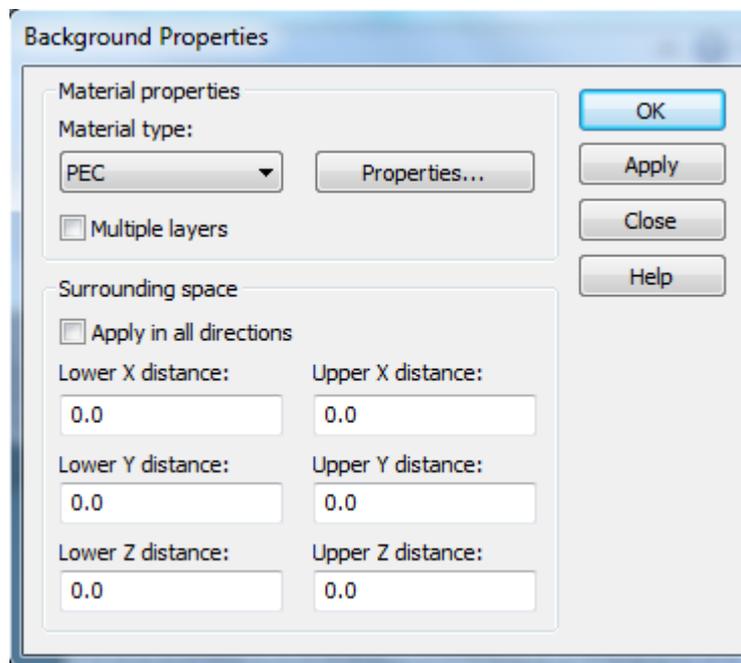


Рисунок 5.8

Следующим важнейшим элементом настройки моделирование является задание граничных условий в меню *Boundaries* на вкладке *Simulation*. Здесь можно выбрать несколько вариантов:

*Electric* - Электрическое граничное условие ( $E_{tan} = 0$ ),

*Magnetic* - Магнитное граничное условие ( $H_{tan} = 0$ ),

*Open* - Имитирует открытое пространство,

*Open (add space)* - То же, что "open", но добавляет дополнительное пространство в расчетной области,

*Periodic* - Имитирует периодическое расширение расчетной области,

*Conducting wall* - Эта граница ведет себя подобно стенке металлического материала с потерями.

Также в этом меню можно задать оси симметрии и термические параметры.

Выберем тип границ *Electric* во всех направлениях.

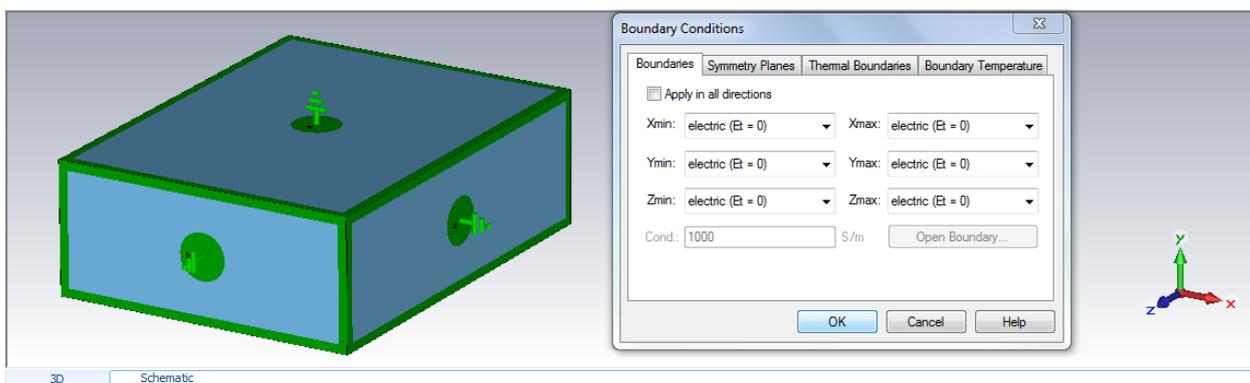


Рисунок 5.9

Для просмотра распределения полей внутри структуры необходимо добавить в проект монитор поля (*Field Monitor*). Меню настройки мониторов поля находится на вкладке *Simulation*. Добавим мониторы *E*-поля (*e-field*) и *H*-поля (*h-field*) для сигнала с частотой 10 ГГц. В дереве навигации в папке *Field Monitors* появятся выбранные мониторы.

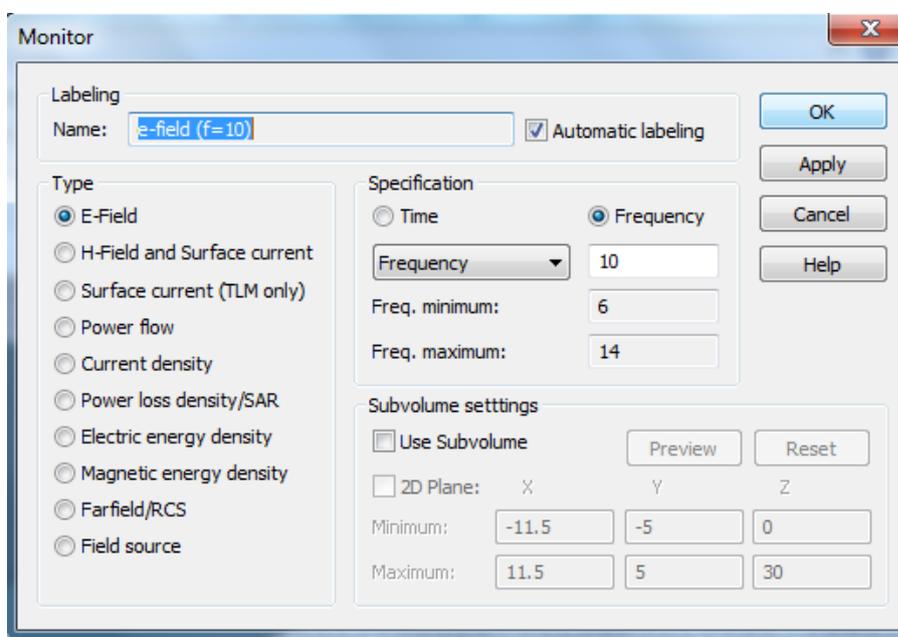


Рисунок 5.10

Следующим пунктом является установка портов ввода-вывода. Основными типами портов являются волноводный порт (*Waveguide Port*) и

дискретный порт (*Discrete Port*). Выберем Волноводный порт и установим его по оси *Z*, установив направление порта как *Negative*.

Аналогичным образом создайте второй порт, на противоположной стороне волновода.

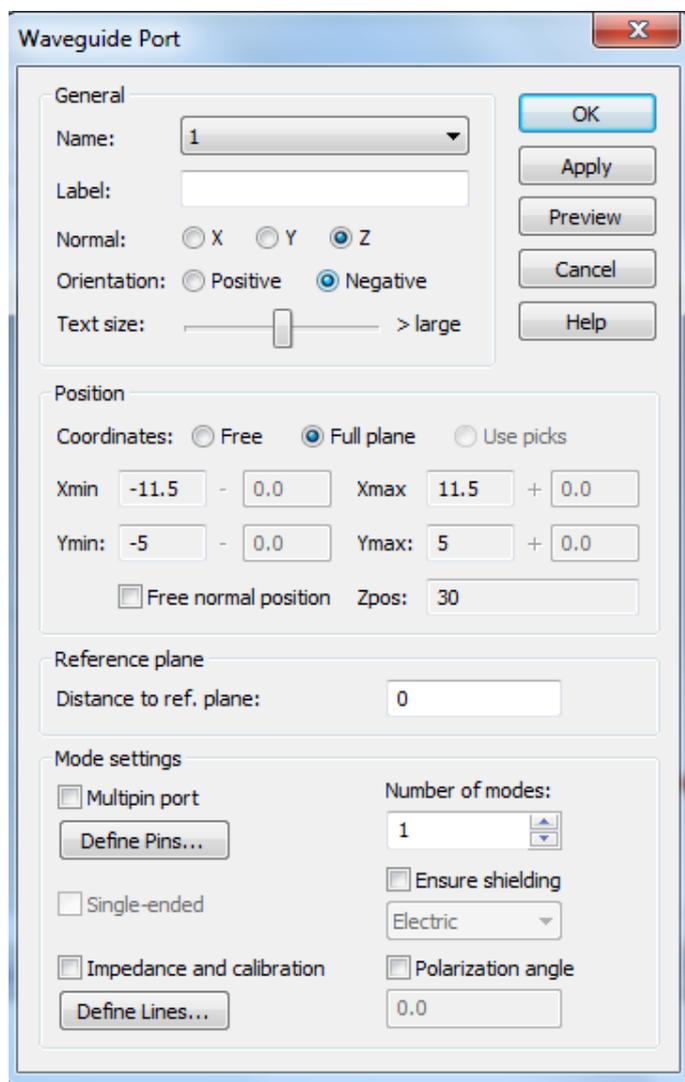


Рисунок 5.11

Для начала моделирования требуется установить параметры сетки разбиения – в меню *Global Properties* на вкладке *Home*.

Последним пунктом является настройка «солвера» – метода анализа структуры. В *CST Microwave Studio* существует несколько методов анализа:

- *Time Domain Solver* - Метод решения во временной области, эффективный для анализа разъемов, линий электропередачи, фильтров, антенн и т.д.,

- *Frequency Domain Solver* - Метод решения в частотной области, проводит анализ на каждой конкретной частоте. Используется:

расчет матрицы рассеяния ( $S$ -параметров)

распределения электромагнитного поля на различных частотах (см мониторы)

диаграммы направленности антенны и соответствующие параметры антенны

экстракции *SPICE* модели цепи

бесконечных массивов элементарных ячеек с периодическими граничными условиями (например, для имитации бесконечных фазированных антенных решеток и частотно-селективных поверхностей) моделирование дисперсионных материалов (см обзор материала)

• *Eigenmode Solver* - Метод собственных мод, используется для расчета частоты и соответствующей электромагнитной модели поля (мод), где не применяется возбуждение.

• *Integral Equation Solver* - Метод интегральных уравнений, представляет особый интерес для электрически больших моделей. Дискретизация расчетной области сводится к границам объекта и, таким образом, приводит к линейной системе уравнений с меньшим количеством неизвестных, чем в методах объема.

• *Asymptotic solver* - Асимптотический метод это анализ в частотной области на основе так называемого трассировки лучей. Лучи могут быть либо независимыми, либо в комплекте вместе в так называемых лучевыми трубками. Этот метод, как правило, используется для расчетов электрически очень крупных объектов, которые трудно обрабатывать с помощью других методов ЭМ решений.

• *Multilayer solver* - это 3D планарный электромагнитный метод для плоского моделирования и анализа. Он основан на методе моментов (*MoM*) и позволяет пользователям моделировать многослойные геометрии точно и эффективно.

Выберем *Frequency Domain Solver*, и установим гексаэдральный (*Hexahedral*) тип сетки разбиения. Далее начинаем расчет, нажав кнопку старт [2].

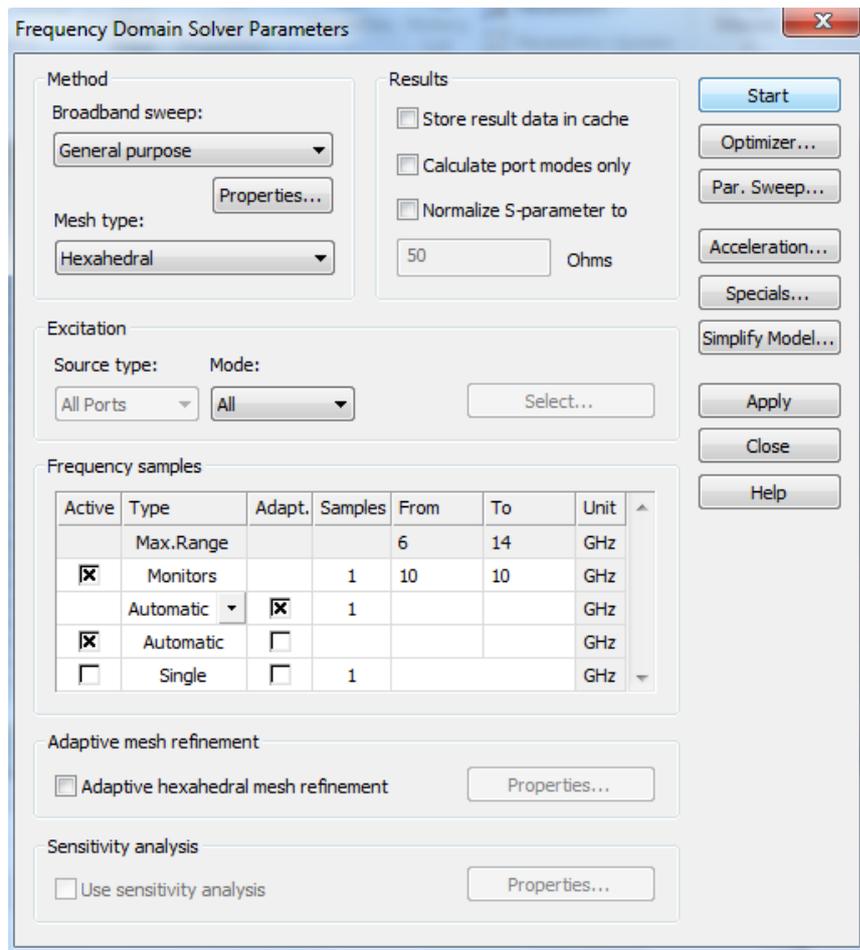


Рисунок 5.12

После окончания расчета в дереве навигации в папках *1D Results* и *2D/3D Results* появятся результаты анализа.

Рассмотрим результаты в папке *2D/3D Results* подкаталог *Port Modes*. При выборе в подкаталоге *Port1* папки e1 увидим распределение *E*-поля первой моды ( $H_{10}$ ) в порту 1 и характеристики порта.

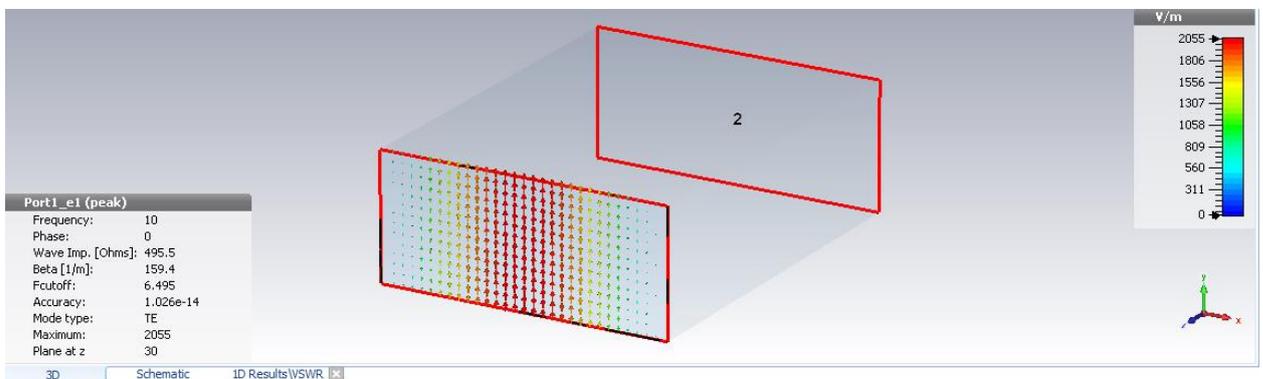


Рисунок 5.13

Остановимся на них поподробнее:

*Frequency*: 10 – частота на которой рассчитаны параметры порта – центральная частота исследуемого диапазона 10 ГГц.

*Phase*: 0 – фаза колебаний равна нулю.

*Wave Imp. [Ohms]*: 495,5 – волновое сопротивление линии.

*Beta [1/m]*: 159.4 – постоянная распространения волны.

*Fcutoff*: 6,495 – критическая частота для данного сечения 6,495 ГГц.

*Accuracy*: 1,026e-14 – точность анализа структуры

*Mode type*: *TE* – тип волны поперечная *E*-волна.

*Maximum*: 2055 – максимум напряженности электрического поля.

Аналогично можно просмотреть линии *H*-поля первого порта при выборе папки *h1*.

Возможные параметры порта:

- Тип(*Type*): *E*-поле или *H*-поле
- Максимум(*Maximum*): В случае векторного участка, значения максимальной стрелки.
- Компонент(*Component*): В случае скалярного участка, этот параметр определяет, какая из компонент изображена.
- Тип моды(*Mode type*): тип нарисованной режима: *TEM*, квази-*TEM*, *TE*, *TM* или Неизвестный
- Точность(*Accuracy*): точность расчета по построенной режима.
- Критическая частота (*Fcutoff*): В случае *TE*-моды или *TM*, это критическая частота.
- Бета(*Beta*): значение бета моды.
- Альфа(*Alpha*): В случае неизвестного типа моды или моды *TE / TM*, это значение альфа.
- Расстояние -40 дБ (*Dist.-40 dB*): расстояние, на котором значения полей запредельной моды затухают до -40 дБ.
- Волновое сопротивление (*Wave Imp.*): волновое сопротивление, Ом. См волноводного порта.
- Сопротивление линии (*Line Imp.*): Для типа волн *TEM* или квази-*TEM*, это сопротивление линии, Ом. См. В случае комплексного сопротивления линии, отображается его модуль.
- Сопротивление *ZPV* Реальное/мнимое(*Imp. ZPV Re/Im*): Это сопротивление в Ом, которое определяется рассчитанным напряжением вдоль линии и комплексной мощности моды..

- Плоскость  $X / Y / Z$  (*Plane at X, Y, Z*): координата плоскости порта в определенной ориентации ( $X / Y / Z$ ).
- Частота (*Frequency*): Частота, для которой были рассчитаны моды и их параметры. Это центральная частота из диапазона частот, приведенного в настройках диапазоне частот.
- Фаза (*Phase*): Фаза, для которой построена мода.
- Максимум-2D (*Maximum 2D*): Отображает значение и место максимального значения напряженности поля, в зависимости от выбранного типа.

Для просмотра распространения полей внутри всей структуры необходимо перейти в папку *E-field* и *H-field* соответственно. Для удобства просмотра при выборе соответствующего поля на вкладке *2D/3D Plot* в меню *3D Fields on 2D Plane* выберете в пункте *Select Cross Section* пункт *Cross Section B*, что соответствует сечению фигуры по плоскости  $Y$ , и *Activate Cross Section* пункты *Cross Section B* и *Cross Section A*.

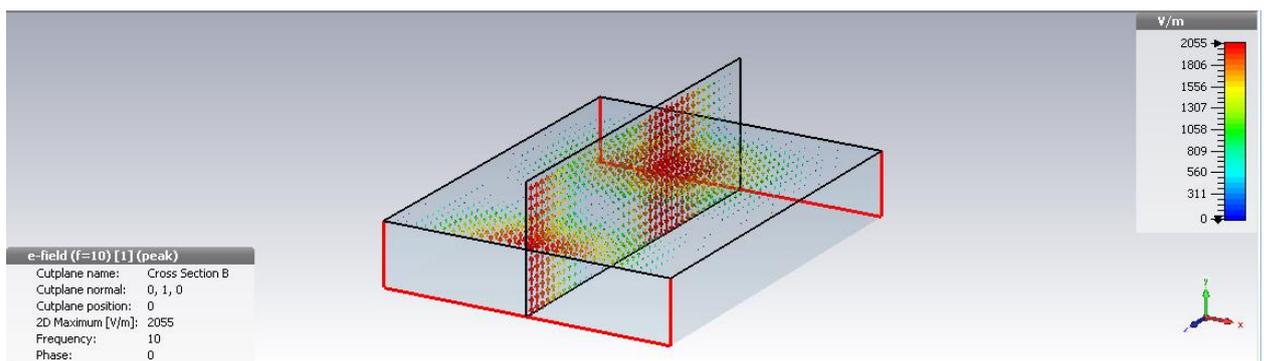


Рисунок 5.14

В папке *1D Results* рассмотрим  $S$ -параметры волновода, а конкретнее  $S_{2,1}$ . Т.к. в волноводе распространяется основной тип волны  $H_{10}$ , рассчитайте критическую длину волны и частоту для данного типа колебания. Сравните ее с графиком  $S_{2,1}$ . Для добавления маркера на нужной частоте нажмите на поле графика правой кнопкой мыши и выберете (Осевой Маркер) *Axis Marker*.

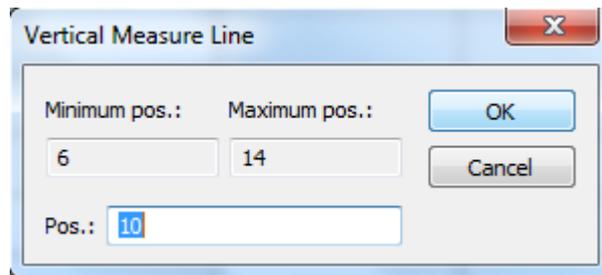


Рисунок 5.15

Также возможно посмотреть распространение поля в плоскости и анимации. Для этого в папке *E-field* (либо *H-field*) выберите график *Abs* что соответствует значению модуля напряженности электрического (или магнитного) поля. В меню *Properties* на вкладке *2D/3D Plot* уберите галочку *3D* и нажмите *Start*. Вы увидите анимированное распределение поля в структуре на выбранной вами плоскости в зависимости от фазы.

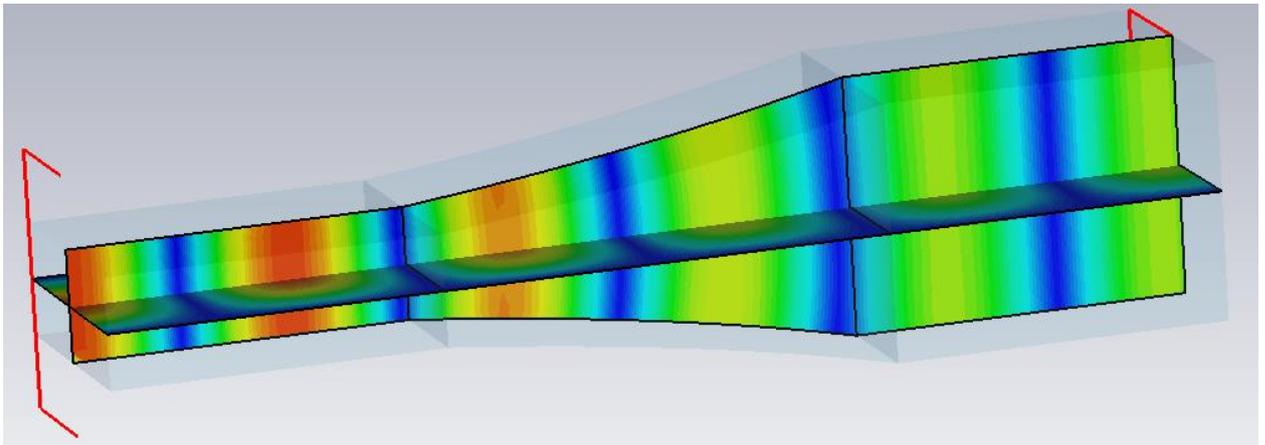


Рисунок 5.16

Для дополнительного расчета КСВН (*VSWR*) по входу порта на вкладке *Post Processing* в меню *S-Parameter Calculations* выберите пункт *Calculate VSWR*. После этого в папке *1D Results* добавится подкаталог *VSWR*.

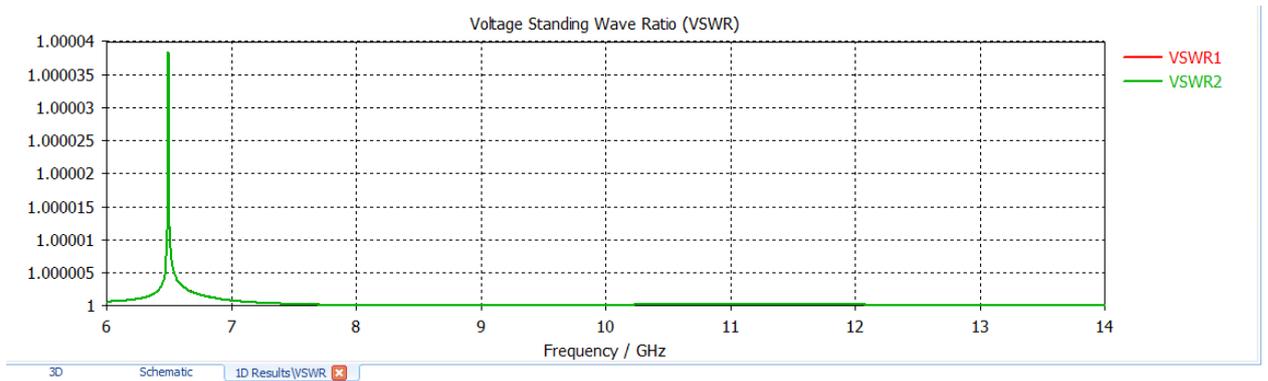


Рисунок 5.17

Далее создайте аналогичным образом переменные  $l_2=40\text{мм}$  и  $l_3=30\text{мм}$ .

Создайте второй волновод длиной  $l_3$  на расстоянии  $l_2$  по оси  $Z$  от первого и сечением  $a \times a$ .

Назовите второй волновод  $WG\_Square$  и поместите его в папку *Waveguide*.

Для соединения двух секций волновода с различным сечением создайте новый компонент *Junction*.

Сравним два варианта соединения – линейное расширение размера сечения и экспоненциальное.

Рассмотрим новый способ формирования фигур. Для этого перейдем на вкладку *Modeling* и в меню *Curves* выберем пункт *3D Polygon*.

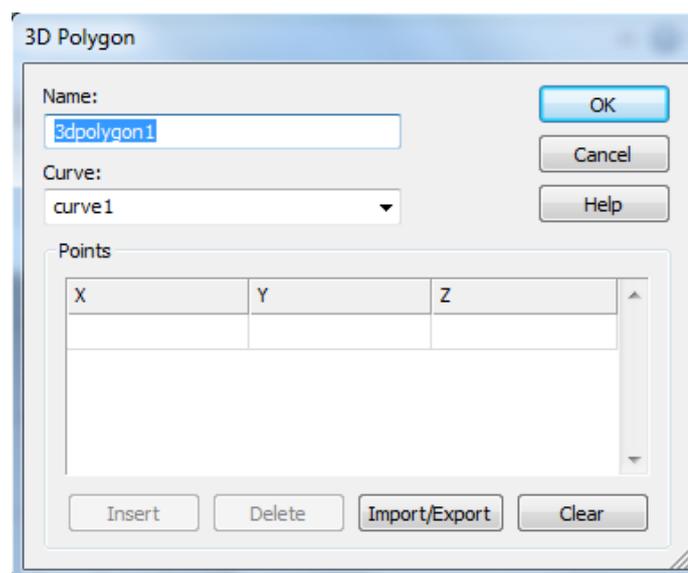


Рисунок 5.18

Аналогично созданию параллелепипеда введем координаты точек – вершин соединяемых волноводов, как показано на рисунке.

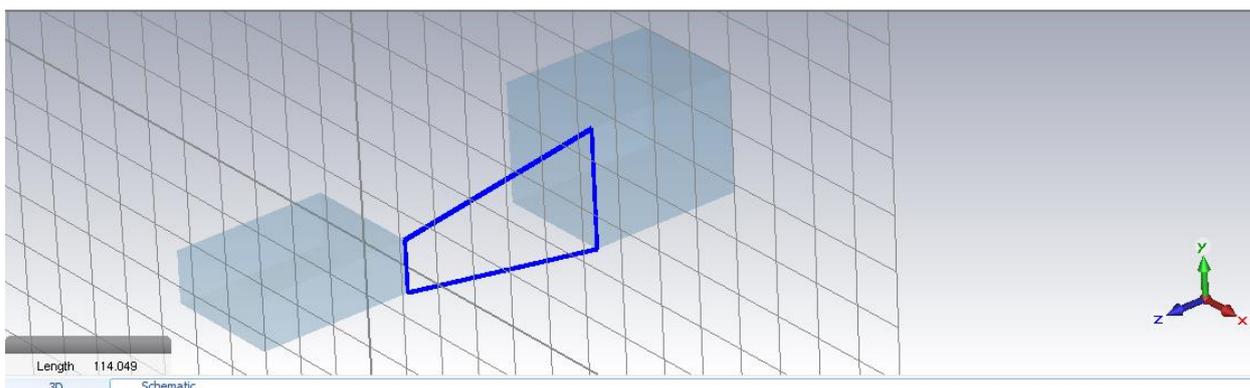


Рисунок 5.19

Для преобразования кривой в объемную фигуру на вкладке *Modeling* в меню *Curve Tools* выберем пункт *Extrude Curve* (Выдавить кривую), после этого будет предложено выбрать кривую для выдавливания и нажать *Enter*. В появившемся меню *Extrude Planar Curve* введите свойства новой фигуры – Имя: *Linear*, Толщина (*Thickness*): *a*, Компонент: *Junction*.

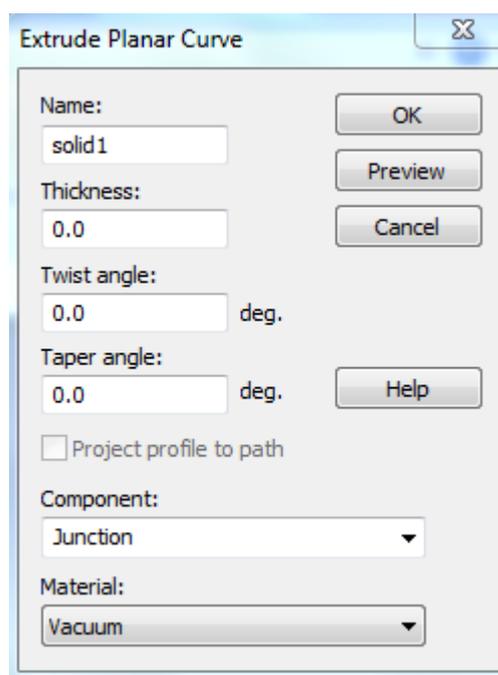


Рисунок 5.20

Рассчитайте *S*-параметры и КСВН полученной структуры. Для сохранения графиков КСВН на вкладке *Post Processing* в меню *Import/Export* выберете пункт *Export Plot Data ASCII* и сохраните файл в выбранную вами папку.

Экспоненциальным называется переход, у которого волновое сопротивление изменяется вдоль координаты  $X$  по экспоненциальному закону. В волноводном варианте при плавном изменении боковой стенки расчетная формула имеет вид:

$$b(x) = b(0) \cdot e^{\left\{ \frac{\ln \frac{b(l) \cdot x}{b(0) \cdot l}}{l} \right\}} \quad (1.1)$$

где  $b(x)$  – высота узкой стенки прямоугольного волновода [3].

Для построения второго типа перехода – экспоненциального выберем на вкладке *Modeling* в меню *Curves* выберем пункт *Analytical Curve*.

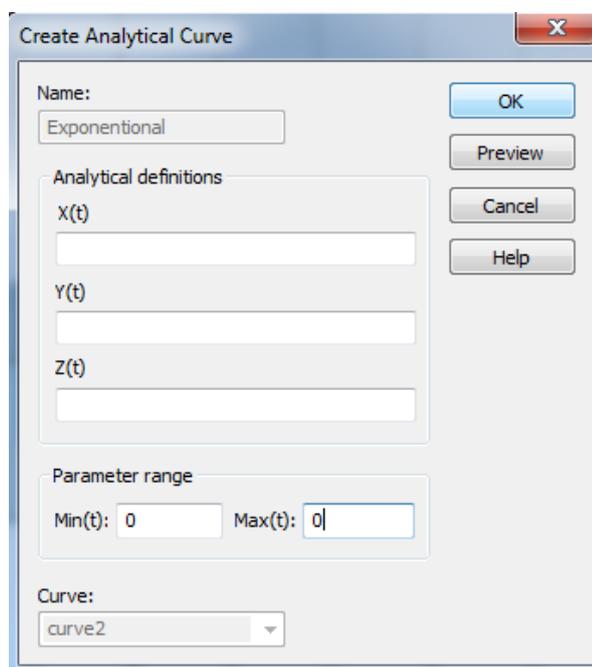


Рисунок 5.21

Рассмотрим появившееся меню подробнее. В графу *Name* вносится имя кривой. Далее представлены три ячейки  $X(t)$ ,  $Y(t)$ ,  $Z(t)$  в которых описывается функция изменения соответствующей координаты в зависимости от значения аргумента  $t$ , диапазон значений которого задается ниже.

Введите параметры согласно (1.1). В нашем случае изменяющееся значение функции это высота узкой стенки волновода ( $Y$ ), которая изменяется вдоль оси  $Z$ , при неизменной координате  $X$ . Обратите внимание, что здесь задается только одна кривая, то есть только одна половина узкой стенки волновода.

Название кривой – *Exponential*, *Curve: New Curve*. При правильном вводе выражения получим следующую кривую.

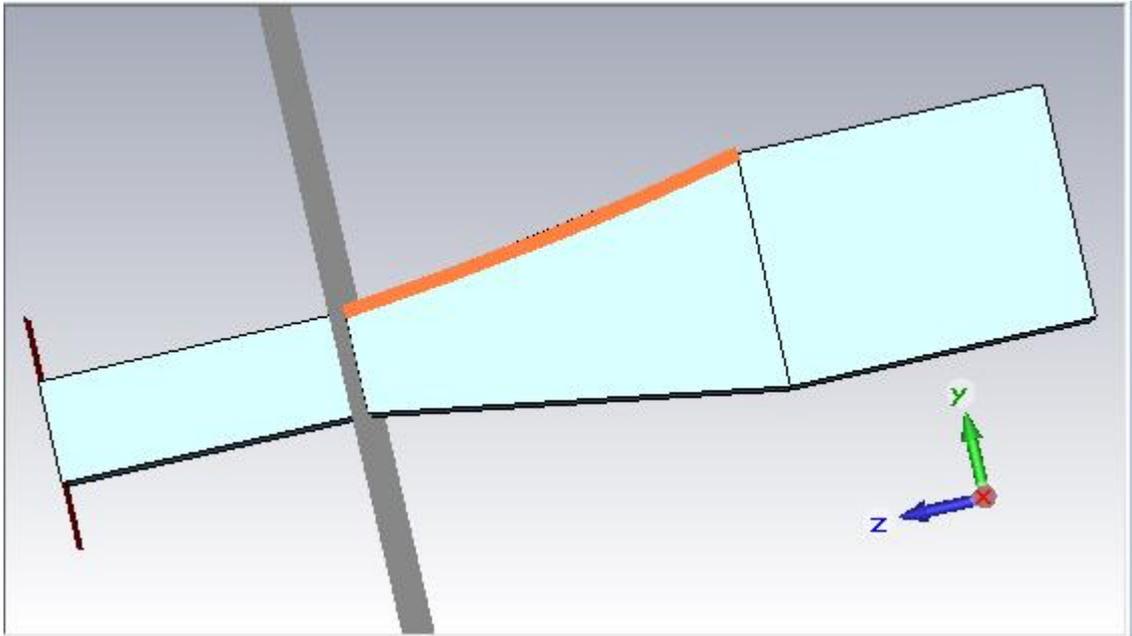


Рисунок 5.22

Чтобы создать вторую кривую по противоположной стороне необходимо создать зеркальную копию кривой. Для этого выбрав кривую в дереве навигации выберете на вкладке *Modeling* меню *Transform* и в нем пункт *Mirror*. В окне *Transform Selected Object* поставьте галочку *Copy*, чтобы сохранить оригинальную кривую на своем месте и выберете ось, относительно которой происходит отражение, а также коэффициент пропорциональности.

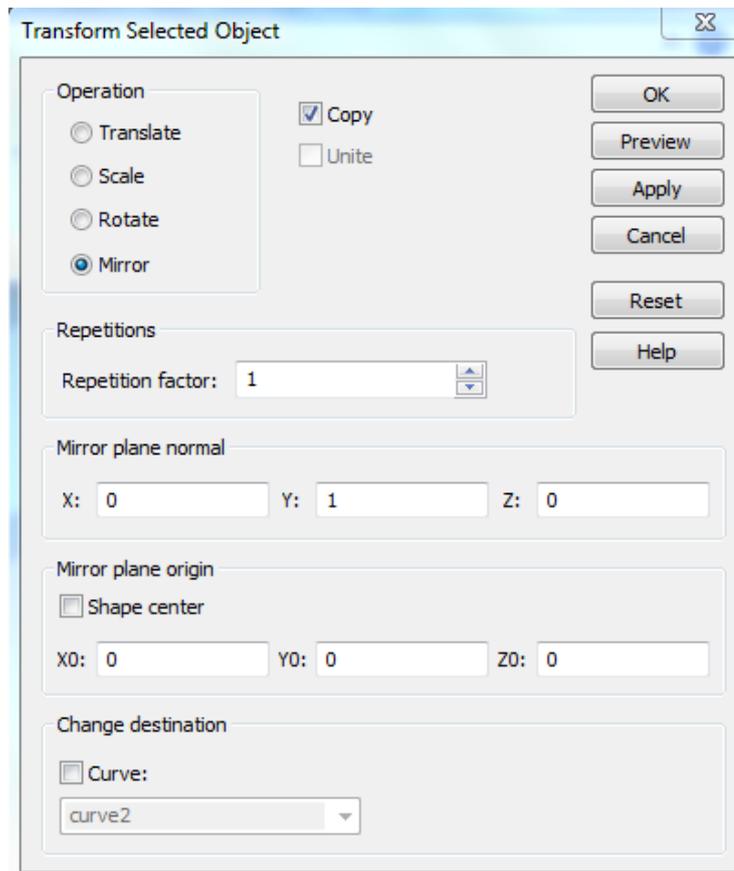


Рисунок 5.23

Чтобы преобразовать кривую в объект необходимо, чтобы она была замкнута. Создайте две недостающие кривые при помощи инструмента *3D Polygon* в меню *Curve* и поместите их в подкаталог *Curve 2*. После завершения создайте объемную фигуру

*Exponential* в подкаталоге *Junction*.

Для исключения из расчета перехода *Linear* необходимо перейти в *History List* и скрыть операцию выдавливания *3D* полигона *Define extrudeprofile: Junction: Linear*. После этого провести анализ при помощи частотного метода и гексаэдральной сетки, добавить расчет КСВН.

При просмотре результатов расчета КСВН, чтобы добавить к сравнению сохраненный ранее график необходимо в меню *Import/Export* выбрать *Import Result Curve* и выбрать сохраненный файл с данными.

Как известно, рабочий диапазон частот для волновода с сечением 23x10мм от 8 до 12 ГГц [справочник по элементам волноводной техники]. Для изменения диапазонов на графике необходимо на вкладке *1D Plot* зайти в меню *Properties* и выставить необходимые значения. Выставим диапазон частот 8-12 ГГц, а значения КСВН от 1 до 1,3.

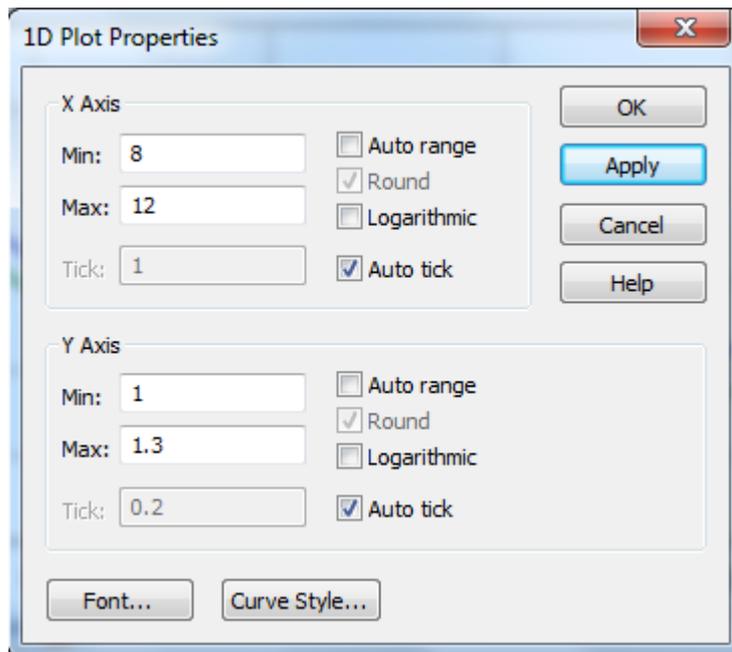


Рисунок 5.24

Сделайте выводы о сравнении двух видов переходов.

## Список литературы

1. Волноводы и объемные резонаторы. Методические указания к решению задач по курсу “Электродинамика и распространение радиоволн”/ И.П. Соловьянова, С.Н. Шабунин. Екатеринбург: УГТУ, 1999. - 40 С.
2. CST Studio 2014 [Электронный ресурс]. – Computer Simulation Technology, 2014. 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM).
3. Справочник по элементам волноводной техники / А. Л. Фельдштейн, Л. Р. Явич, В. П. Смирнов . – 2-е изд., перераб. и доп . – М. : Советское радио, 1967 . – 651 с.

**Учебное издание**

**Гошин Геннадий Георгиевич**  
**Трубачев Анатолий Андреевич**  
**Фатеев Алексей Викторович**

**ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ ВОЛНОВОД**

Руководство к лабораторной работе

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л.-----.

Тираж экз. Заказ-----.

Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники.

634050, Томск, пр. Ленина, 40.

Тел. (3822) 533018.