



СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Учебный пример ГАММА Диэлектрический резонатор

21 апреля, 2023



- I. Введение**
- II. Создание модели**
- III. Настройки генератора сетки**
- IV. Настройки расчета**
- V. Результаты**
- VI. Заключение**

I. Введение: Постановка задачи

Диэлектрические резонаторы (ДР) широко используются в СВЧ-схемах, поскольку имеют малые габариты и высокую добротность. Эффект резонанса в ДР обусловлен полным внутренним отражением лучей на определенных частотах. Электромагнитное поле при резонансе в основном находится в резонаторе и лишь небольшая его часть находится вне диэлектрика. Амплитуда этого поля экспоненциально убывает по мере удаления от поверхности резонатора.

Простейшая схема, включающая ДР представляет собой режекторный фильтр, в котором ДР соединен с микрополосковой линией передачи (ЛП). На резонансной частоте происходит «перекачка» СВЧ-энергии от ЛП в ДР, что обуславливает наблюдаемое затухание сигнала в ЛП.

В основе схемы лежит тефлоновая подложка толщиной 0,5 мм, шириной 10 мм и длиной 10 мм. На подложку помещен цилиндрический ДР из Рутила (TiO_2). Рядом с ДР проложена микрополосковая линия, так что их электромагнитные поля перекрываются. Радиус ДР $a = 1,9$ мм, а его высота $l = 1,4$ мм.

Микрополосок с волновым сопротивлением $Z_0 = 50$ Ом имеет ширину $w = 1,576$ мм. Центральная линия микрополоска отстоит от оси ДР на 3 мм. Нижняя сторона подложки покрыта металлизацией. Сосредоточенные прямоугольные порты с импедансом $Z_p = 50$ Ом располагались на концах микрополоска. Вся конструкция размещена внутри воздушной области, на границе которой заданы граничные условия типа электрической стенки. Модель схемы ГАММА показана на рис. 1.

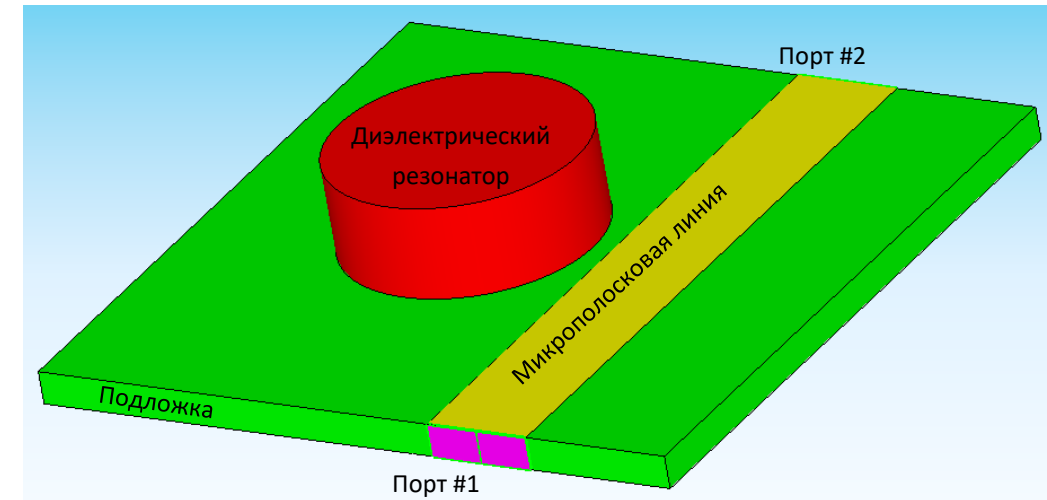


Рис. 1. Модель диэлектрического резонатора в ГАММА.
Воздушный объем не показан

Цели:

- Дать теоретическую оценку резонансной частоты ДР.
- Провести расчет (численное моделирование).
- Сравнить рассчитанные и предсказанные величины.
- Построить распределение электрического поля в рассматриваемой модели.

Задачи:

- Запустить решение в диапазоне частот от 9,8 до 10,4 ГГц с шагом по частоте 200 кГц.
- Рассчитать S-параметры.
- Построить распределение поля на характерных частотах.

Функции ГАММА, задействованные в данном примере:

- **Создание 3D модели:**
 - Примитивы: параллелепипед, прямоугольник, цилиндр.
- **Назначение возбуждения:**
 - Прямоугольный сосредоточенный порт.
- **Библиотека материалов:**
 - Металл;
 - Тефлон;
 - Рутит.
- **Настройка расчета.**
- **Настройка генератора сетки.**
- **Решение задачи с применением метода конечных элементов.**
- **Результаты:**
 - График S-параметров;
 - Распределение поля на сечении и в объеме.

Оценка резонансной частоты ДР

К сожалению, точных аналитических формул для расчета собственных частот диэлектрических резонаторов не существует. Но есть полуэмпирические формулы для конкретных резонаторов.

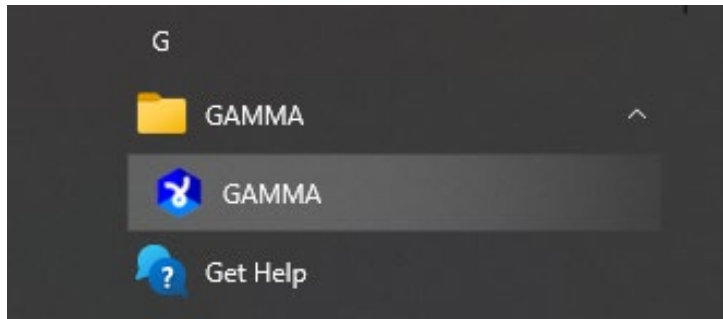
Например, собственная частота основной моды TE_{010} цилиндрического ДР может быть рассчитана следующим образом:

$$f_0 l \sqrt{\epsilon_r} = 33 + 230(l / a) - 120(l / a)^2,$$

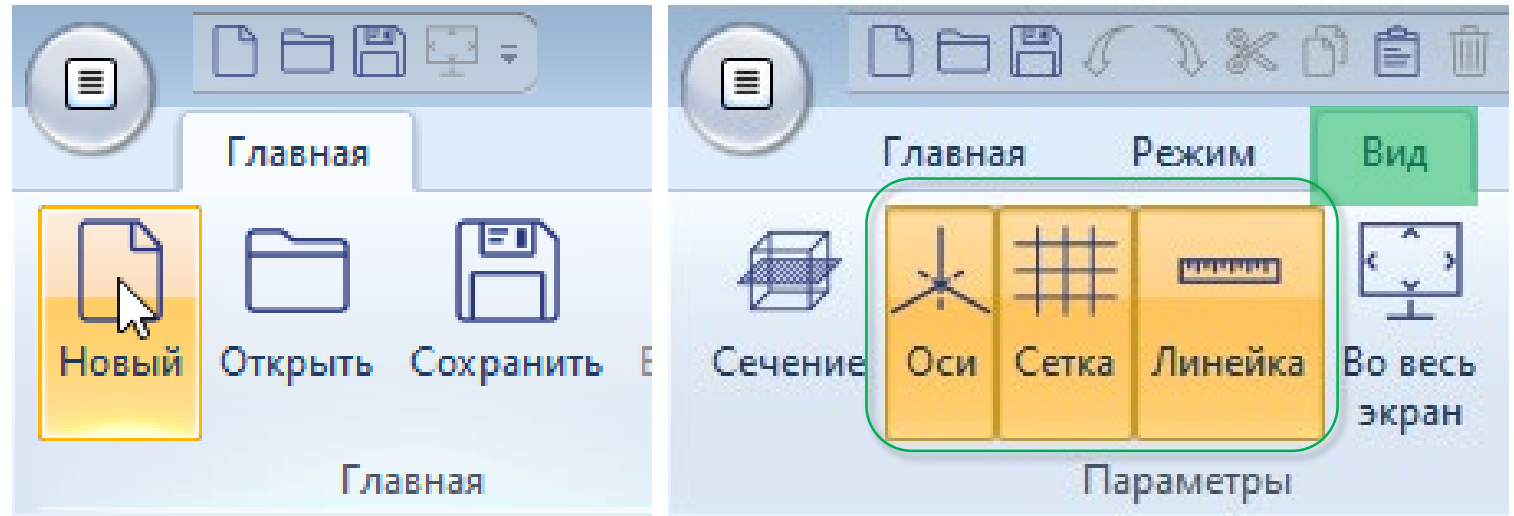
где a – радиус ДР, l – высота, ϵ_r – диэлектрическая проницаемость (все размеры в мм). Подставив данные: $a = 1,9$ мм, $l = 1,4$ мм, и $\epsilon_r = 81$, получим $f_0 = 10,397$ ГГц.

Данная формула не учитывает наличие диэлектрической подложки или соседства с микрополосковой линией передачи. Тем не менее, она может быть использована для приближенной оценки.

II. Создание модели



Стартовое меню



1. В стартовом меню или на рабочем столе найти и запустить **ГAMMA**: меню **Пуск** > **SEVSU** > **GAMMA**.
2. Создать новый проект.
3. Для удобства моделирования в меню **Вид** включить режимы **Оси**, **Сетка** и **Линейка**.

II. Создание модели

❑ Создание подложки с размерами 10×10×0,5 мм:

1. Во вкладке **Моделирование** > **Кубоид**.

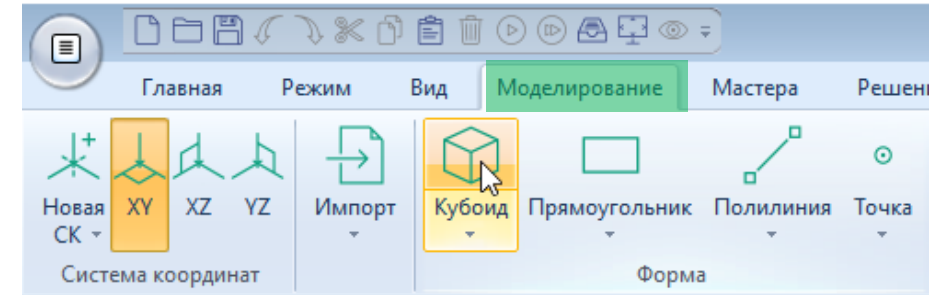
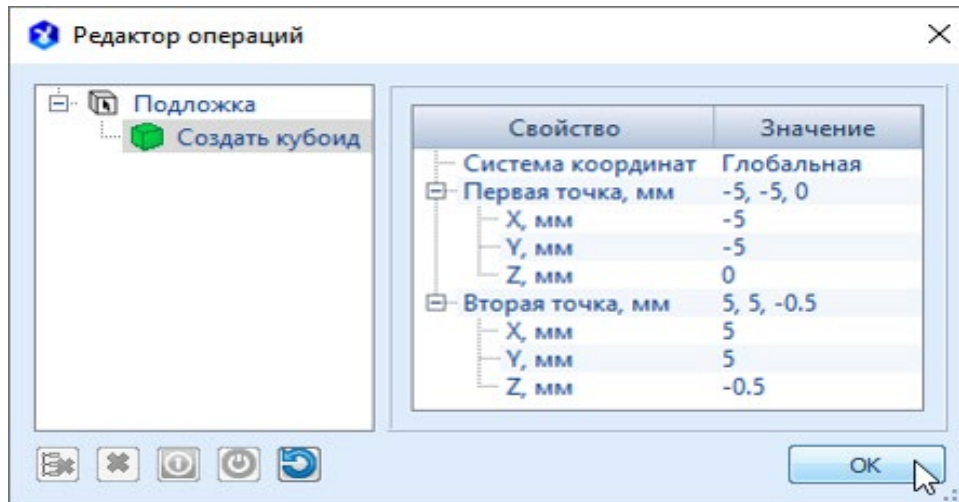
- 1) В области рисования кликните в произвольной точке для создания первой точки опорного прямоугольника.
- 2) Переместите курсор по диагонали и кликните для создания второй точки опорного прямоугольника.
- 3) Далее переместите курсор вверх для добавления толщины.

2. В дереве проекта переименуйте получившийся параллелепипед в **“Подложка”**:

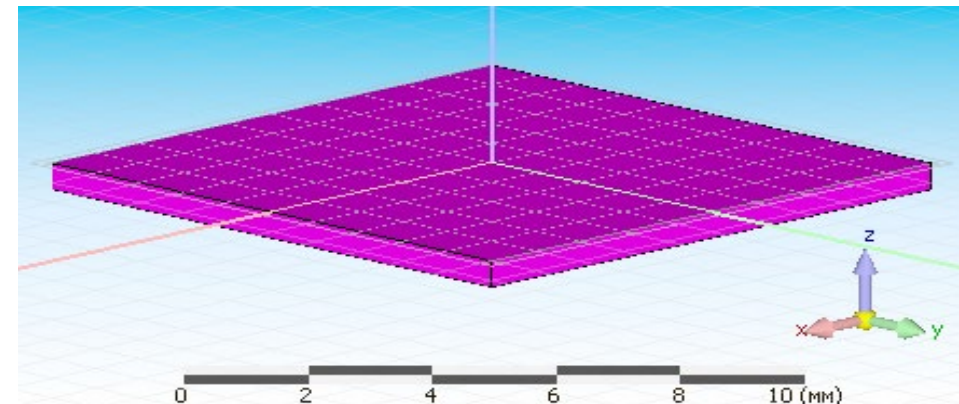
- Для этого нажмите правой кнопкой на объекте в дереве проекта и выберите пункт **Переименовать** или используйте клавишу **F2**.

3. Измените размеры объекта:

- Двойной клик на объекте в дереве проекта или окне 3D просмотра вызовет окно **Редактор операций**.
- В окне **Редактор операций** установите параметры операции **Создать кубоид** следующим образом:



Для выхода из режима
рисования нажмите **Esc**

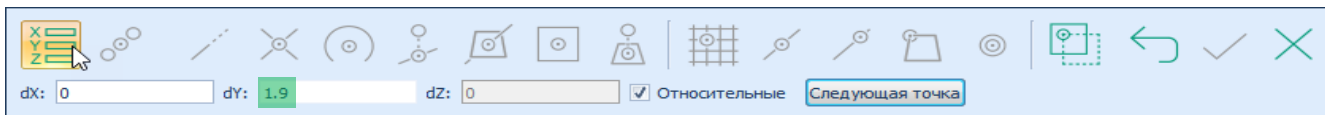


II. Создание модели

❑ Создание резонатора с радиусом 1,9 мм и высотой 1,4 мм:

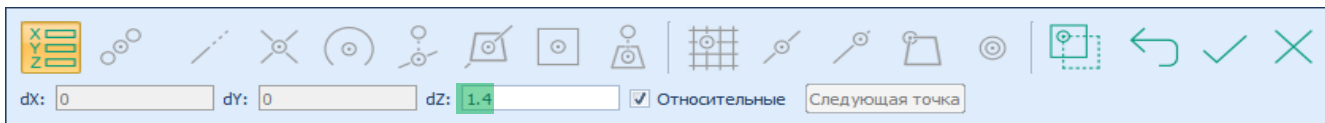
1. Во вкладке **Моделирование** > всплывающий список **Кубоид** > **Цилиндр**:

- 1) На экране выберете точку $\{0; -1; 0\}$ в качестве центра основания цилиндра.
- 2) На панели **Привязка** нажмите  для ручного ввода координат:
 - Введите координаты второй точки $\{0; 1,9; 0\}$ и нажмите **Следующая Точка** или нажмите **Enter**:



Панель Привязки: координаты 2-ой точки

- Введите координаты третьей точки $\{0; 0; 1,4\}$ и нажмите **Enter**:



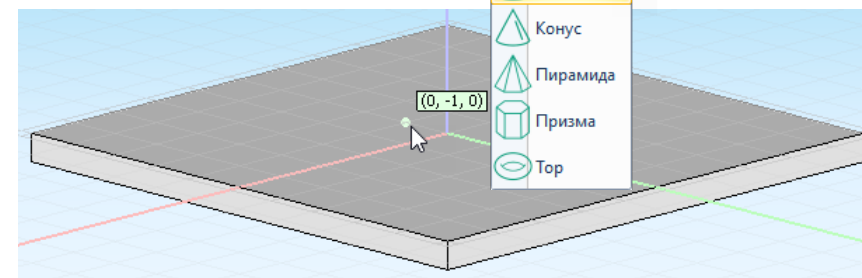
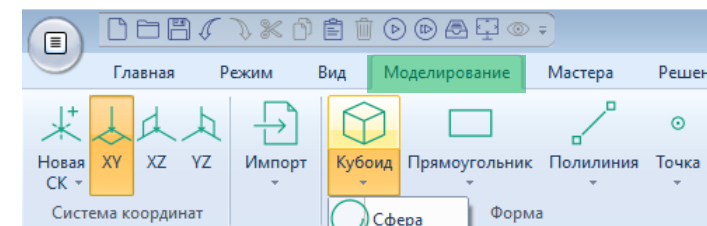
2. Переименуйте объект в “Резонатор”:

- Для этого нажмите правой кнопкой на объекте “**Цилиндр**” в дереве проекта > **Переименовать** или используйте клавишу **F2**.

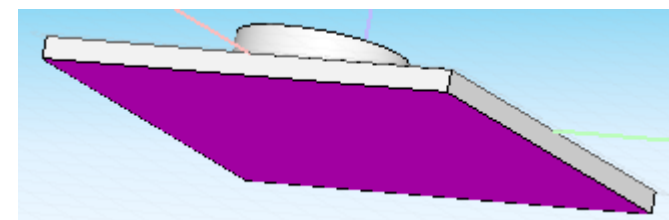
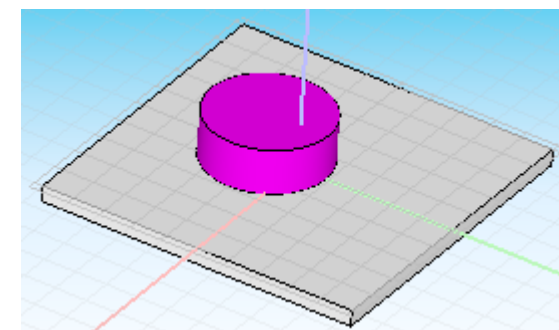
❑ Создание экрана с размерами 10×10 мм:

1. Во вкладке **Моделирование** > **Прямоугольник**:

- 1) Нарисуйте прямоугольник 10×10 под подложкой.
- 2) Переименуйте вновь созданный объект в **Экран** в дереве проекта.



Центр основания



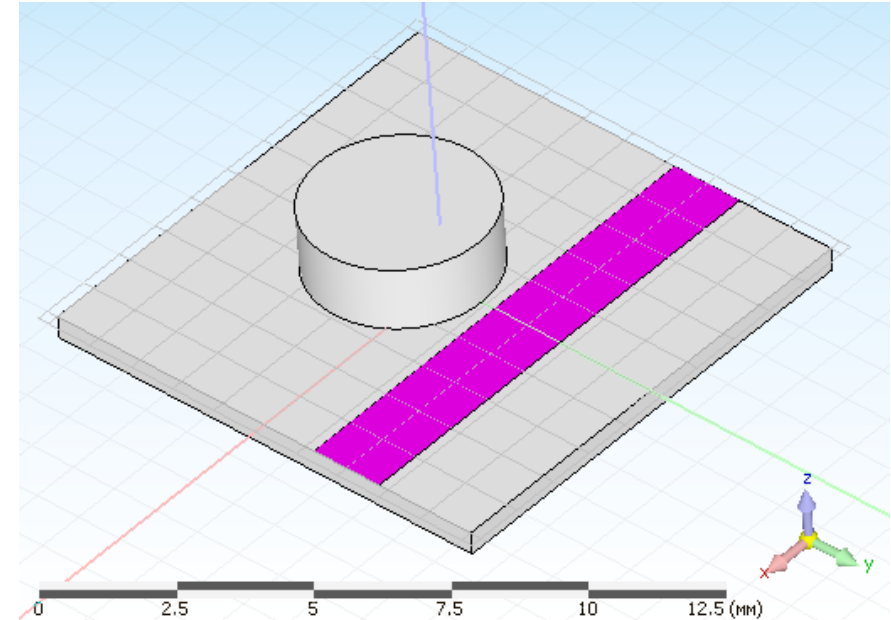
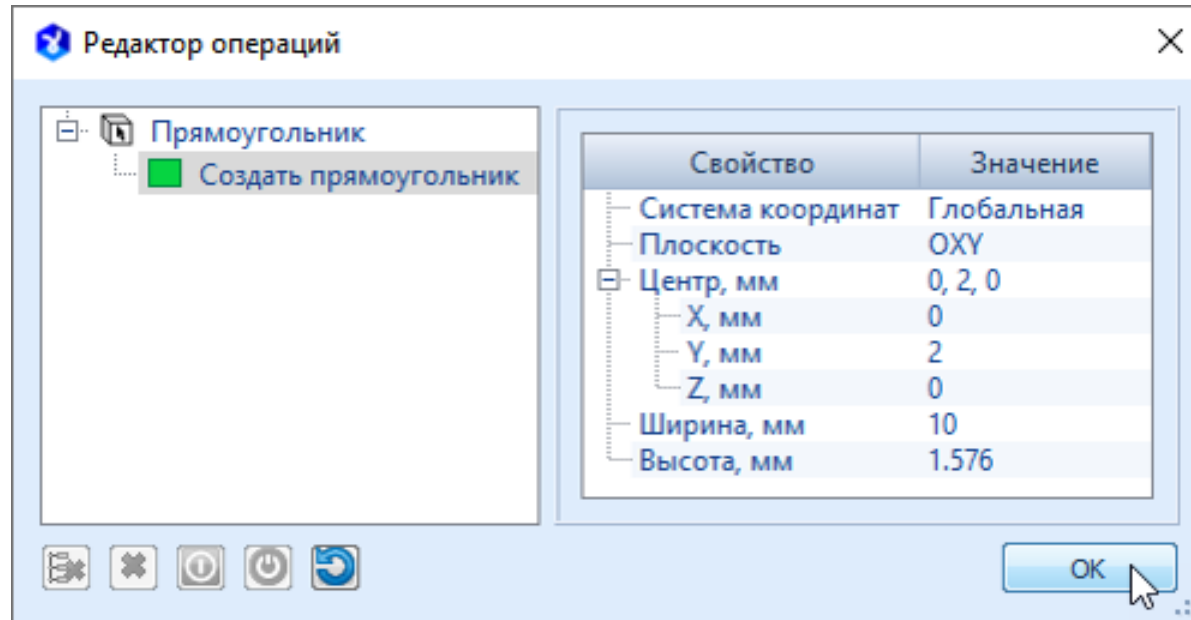
II. Создание модели

❑ Создание “Полоска” шириной 1,576 мм:

1. Во вкладке **Моделирование** > **Прямоугольник**:

1) Нарисуйте произвольный прямоугольник.

2) Двойной клик на объекте для доступа к **Редактору Операций** и измените параметры операции **Создать прямоугольник** следующим образом:

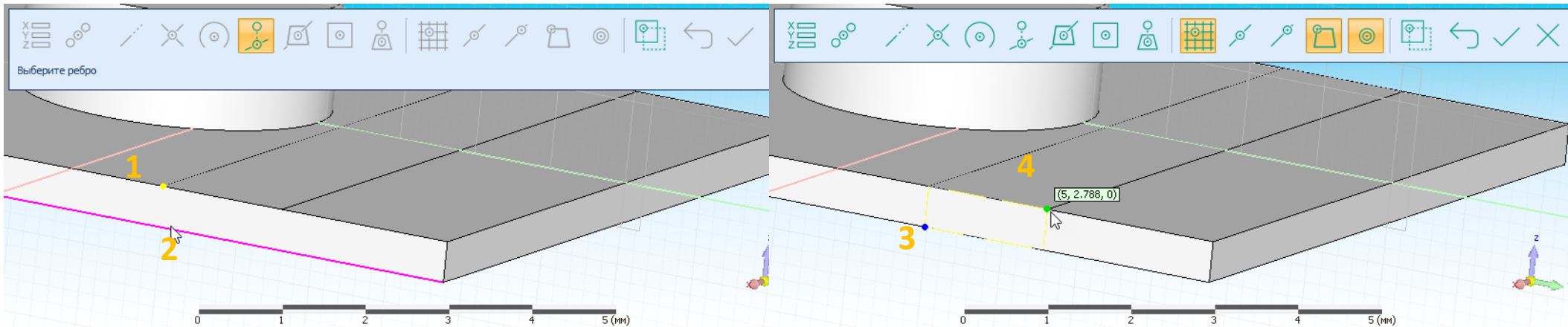
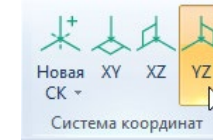


3) В дереве проекта переименуйте объект в “Полосок”.

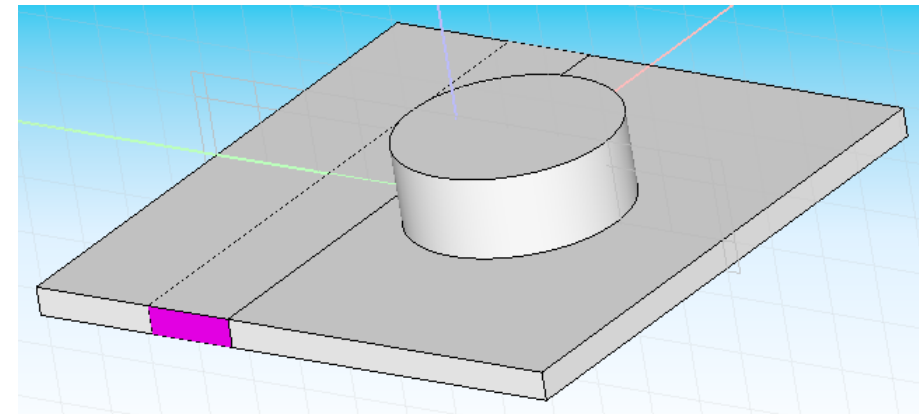
II. Создание модели

❑ Создание прямоугольников для сосредоточенных портов шириной 1,576 мм на концах микрополосковой линии передачи:

1. Во вкладке **Моделирование** > переключитесь на рабочую плоскость **YZ** :
2. Во вкладке **Моделирование**> **Прямоугольник**:
 - На панели **Привязка** активируйте  , чтобы привязаться к проекции вершины на ребро:



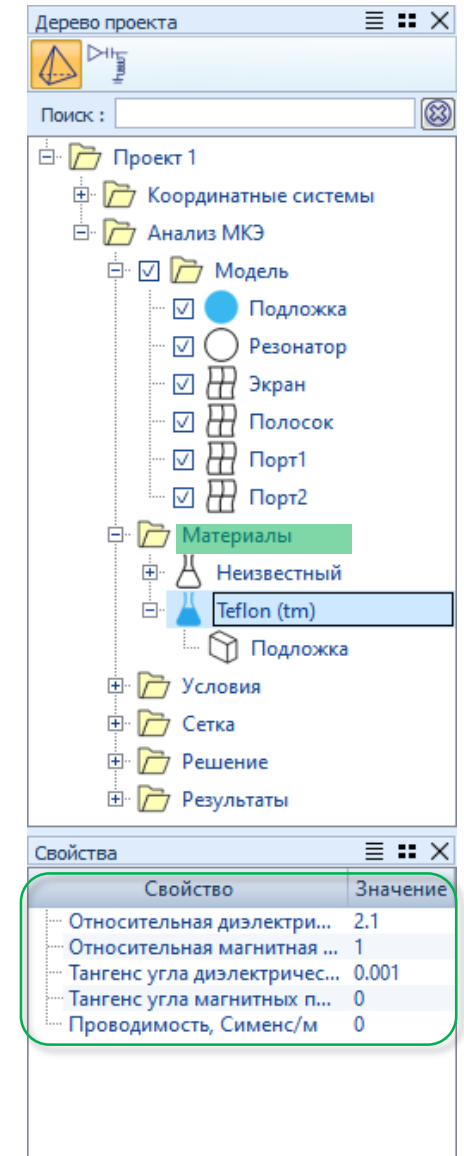
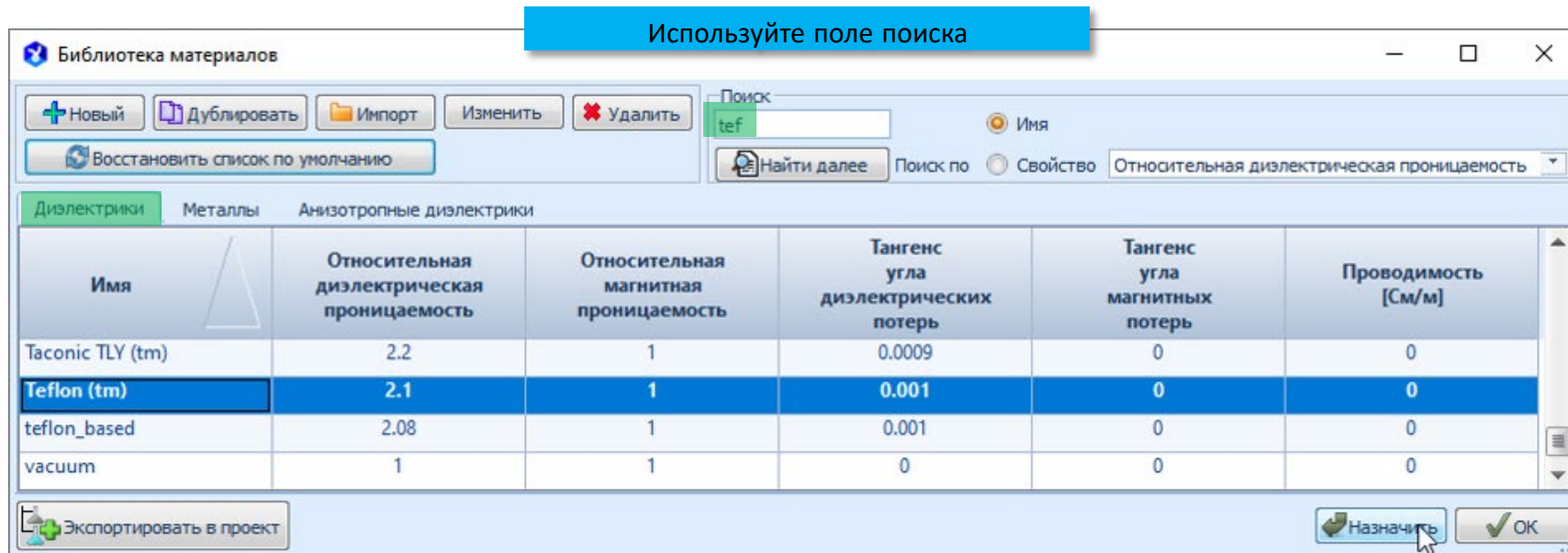
3. Повторите процедуру для второго прямоугольника порта на противоположном конце линии передачи:
4. Переименуйте прямоугольники в **“Порт1”** и **“Порт2”** в дереве проекта.



II. Создание модели

❑ Назначение стандартного материала **Тефлон** ($\epsilon_r = 2,1$, $\text{tg}\delta = 0,001$) на подложку:

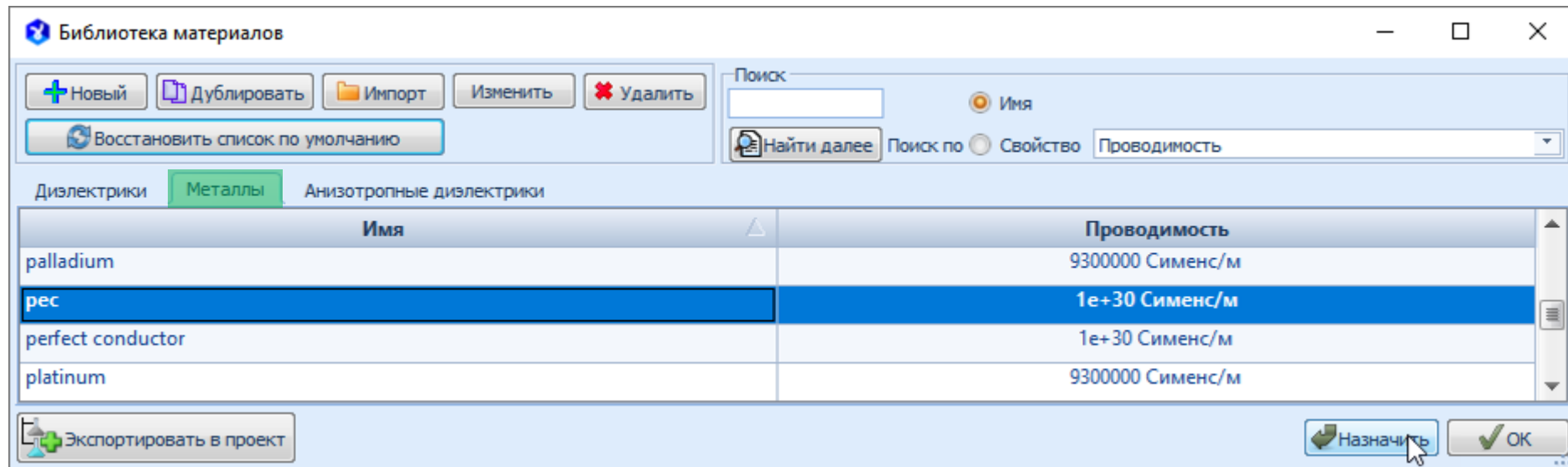
1. Нажмите правой кнопкой на объекте “Подложка” (в дереве проекта или окне 3D просмотра) > **Назначить материал** > **Библиотека материалов...**
2. В окне **Библиотека материалов**:
 - 1) Во вкладке **Диэлектрики** воспользуйтесь функцией **Поиск** для поиска **Тефлона** > выделите материал > нажмите **Назначить** и закройте диалог.
 - 2) Назначенные материалы перечислены в папке **Материалы** в дереве проекта. Свойства материалов доступны в окне **Свойства** для выбранного материала:



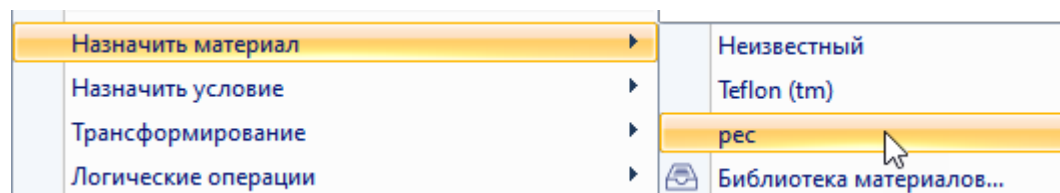
II. Создание модели

❑ Назначение материала *рес* на экран и «Полосок»:

1. Нажмите правой кнопкой на объекте “Экран” > **Назначить материал** > **Библиотека материалов...**
2. В окне **Библиотека материалов**:
 - Во вкладке **Металлы** найдите *рес* > выделите его > нажмите **Назначить** и закройте диалог:



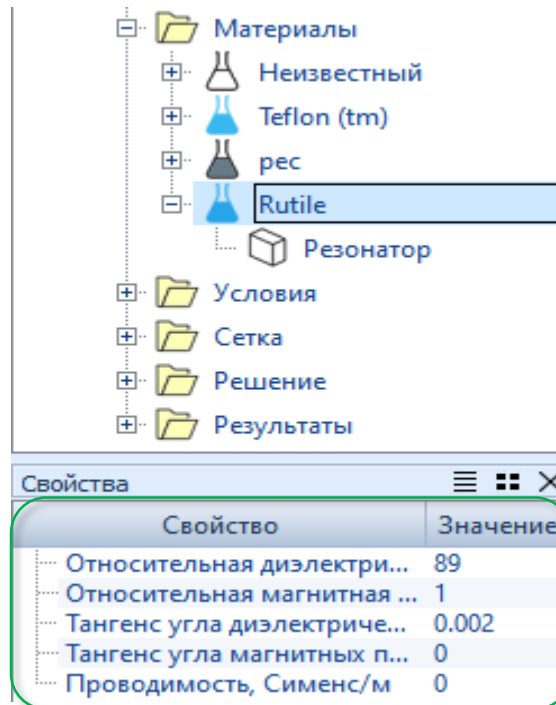
3. Нажмите правой кнопкой на объекте "Полосок" > **Назначить материал** > *рес* (ранее назначенные материалы доступны в меню для быстрого доступа/использования):



II. Создание модели

❑ Назначение *Рутила* (новый материал, отсутствующий в Библиотеке материалов) на резонатор:

1. Нажмите правой кнопкой на объекте “Резонатор” > **Назначить материал** > **Библиотека материалов...**
2. В окне **Библиотека материалов** назначьте любой материал из вкладки **Диэлектрики** (например, **Плексиглас**) и закройте диалог.
3. В дереве проекта найдите добавленный материал в папке **Материалы** и переименуйте **Плексиглас** в **Рутил**.
4. Измените свойства материала в окне **Свойства** на следующие:

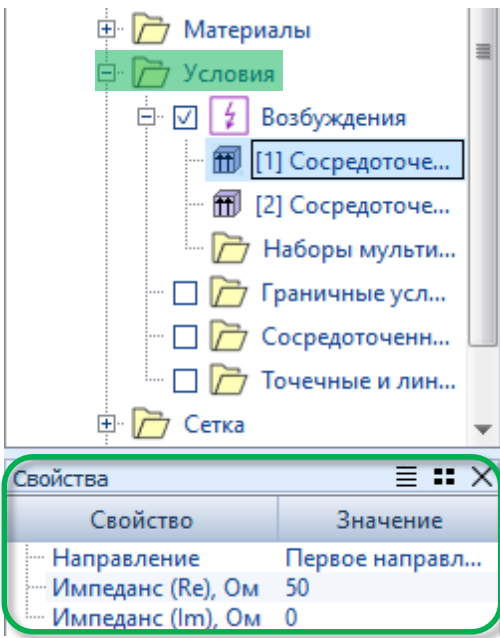
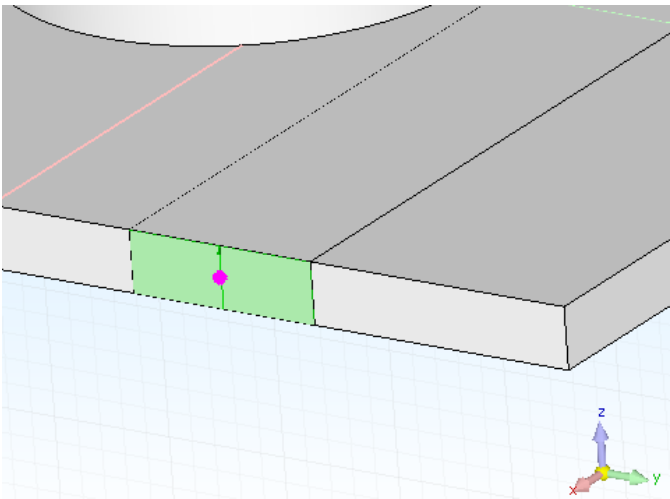
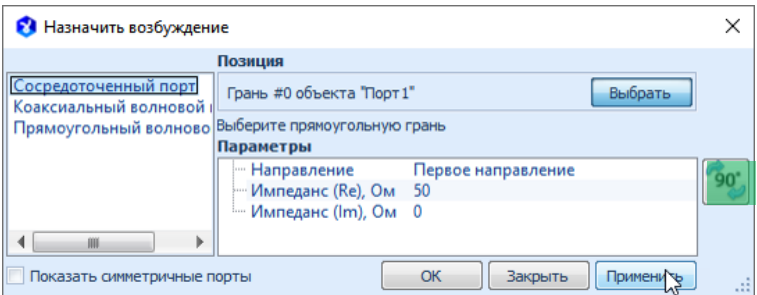
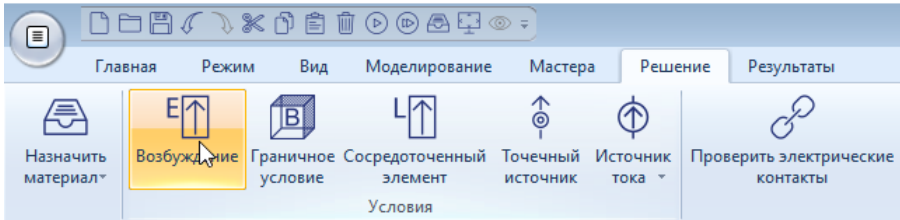




II. Создание модели

□ Назначение сосредоточенных портов:

1. Во вкладке **Решение** > **Возбуждение**.
2. В окне **Назначить возбуждение**:
 - 1) Выберете прямоугольник порта **#1**,
нажмите, если требуется, на кнопку **Направление вращения** для задания
направления возбуждающего поля вдоль оси **Z** и нажмите **Применить**.
 - 2) Повторите для порта **#2** и закройте диалог.
3. Созданные порты можно найти в папке **Условия** > **Возбуждение** в дереве проекта.
 - Свойства выбранного порта доступны в окне **Свойства**:

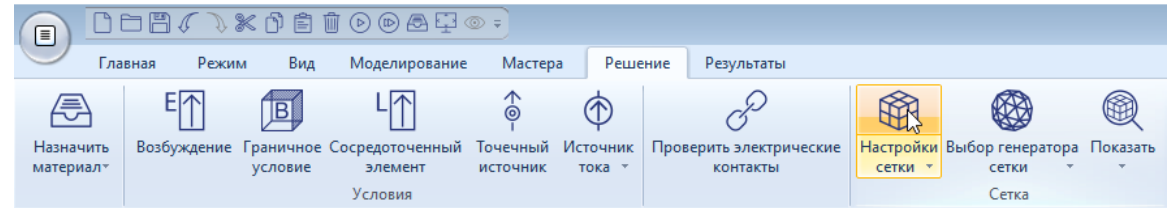


III. Настройка генератора сетки

Цилиндрический резонатор требует более высокой точности аппроксимации геометрии при построении сетки. Поэтому нам нужно повысить качество аппроксимации геометрии относительно настроек по умолчанию.

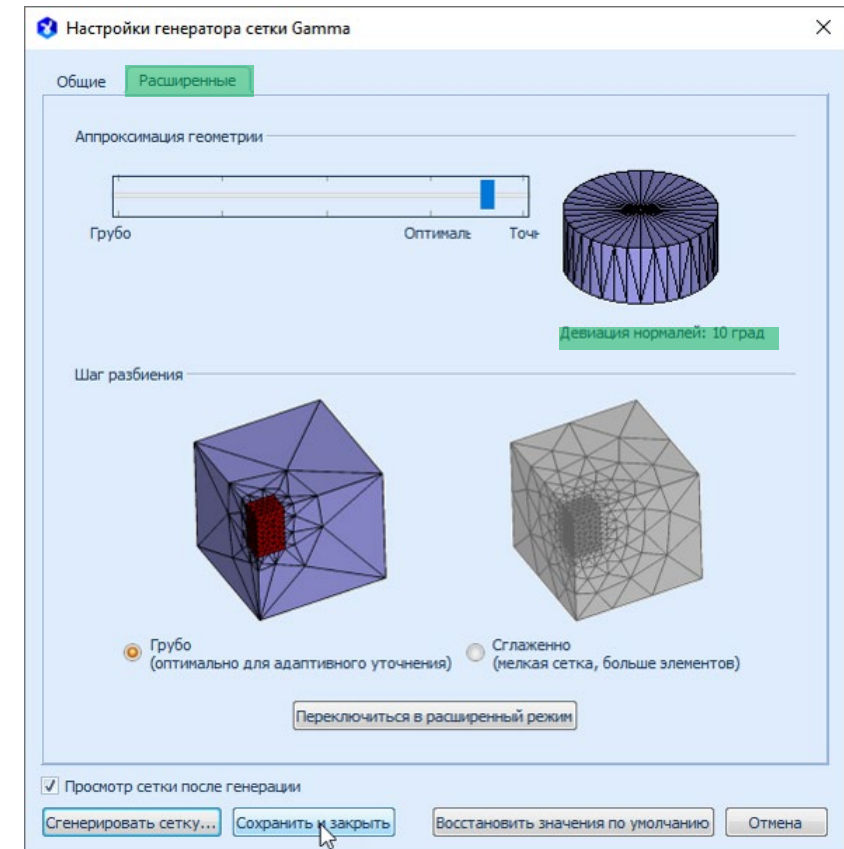
❑ Настройка параметров генерации сетки:

1. Во вкладке *Решение* > *Настройки сетки*.



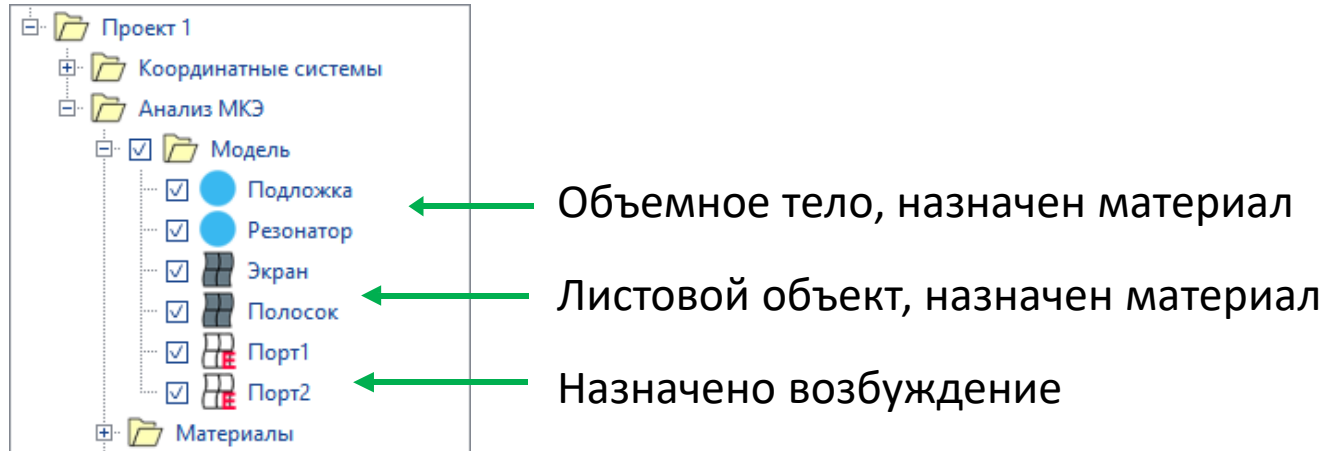
2. В окне *Настройки генератора сетки Gamma* > вкладка *Расширенные*:

- 1) На слайдере *Аппроксимация геометрии* выставьте **Девияция нормалей = 10** градусов.
- 2) Нажмите **Сохранить и закрыть**.



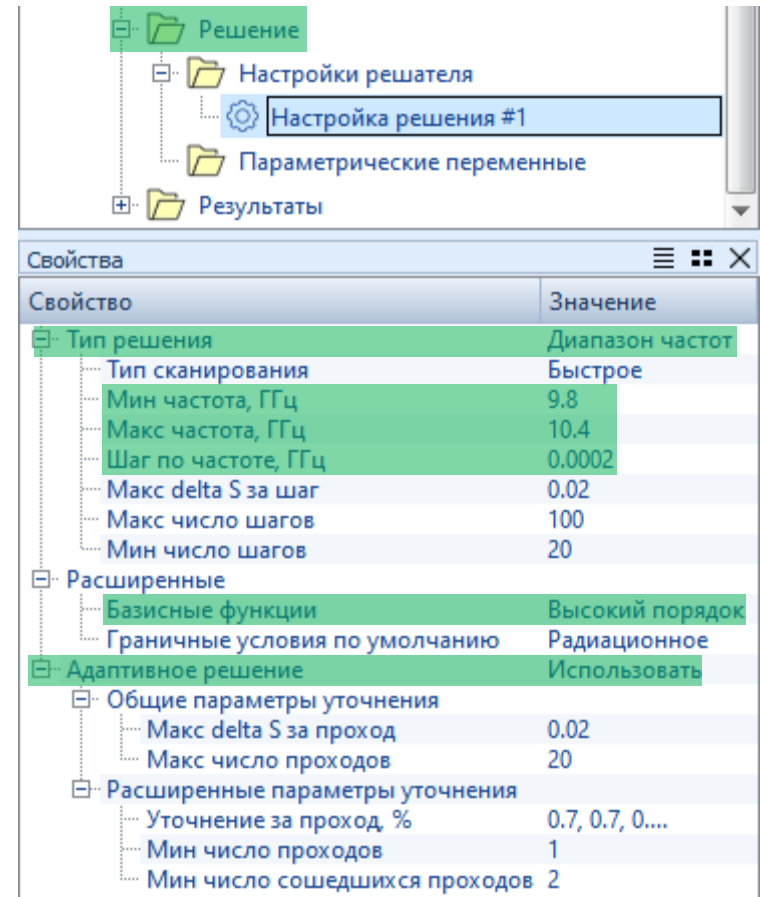
IV. Настройка расчета

❑ Проверка дерева проекта, чтобы убедиться, что материалы и условия назначены там, где это необходимо:



❑ Установка параметров решения:

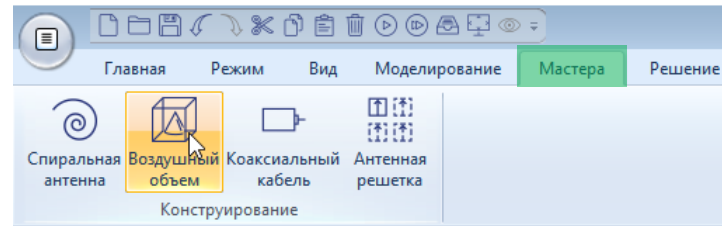
1. В дереве проекта > **Решение** > **Настройки решателя** > **Настройка решения #1**.
2. В окне **Свойства** измените значения следующих полей:
 - 1) Тип решения: Диапазон частот;
 - 2) Макс частота = 10,4 ГГц;
 - 3) Мин частота = 9,8 ГГц;
 - 4) Шаг по частоте = 0,0002 ГГц;
 - 5) Базисные функции: Высокого порядка;
 - 6) Адаптивное решение: Использовать;
 - 7) Для остальных параметров оставьте значения по умолчанию.



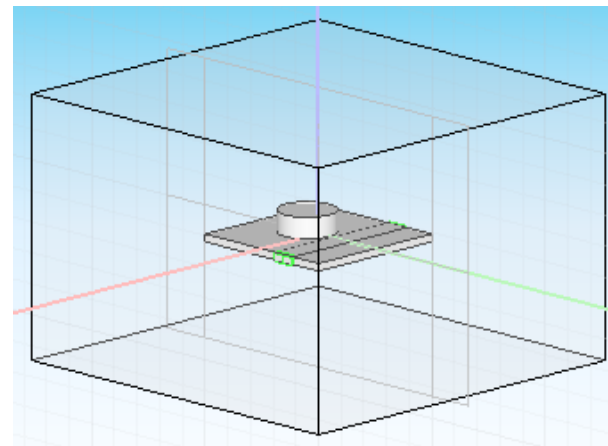
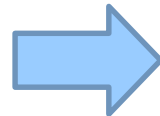
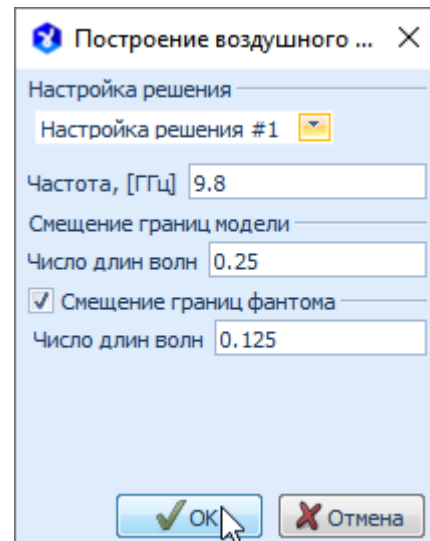
IV. Настройка расчета

☐ Создание воздушного объема:

1. Во вкладке **Мастера** > **Воздушный объем**:



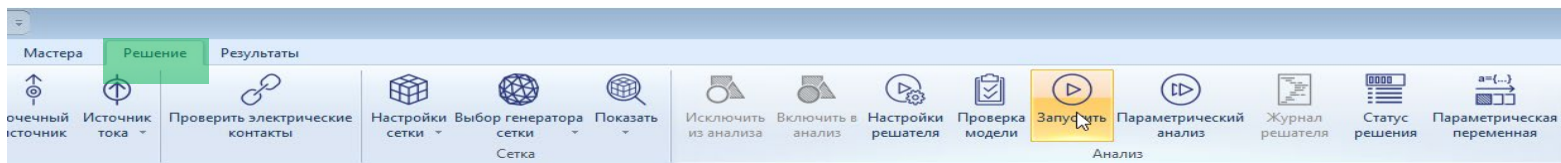
2. В окне **Построение воздушного объема** > оставьте все значения по умолчанию нажмите **ОК**:



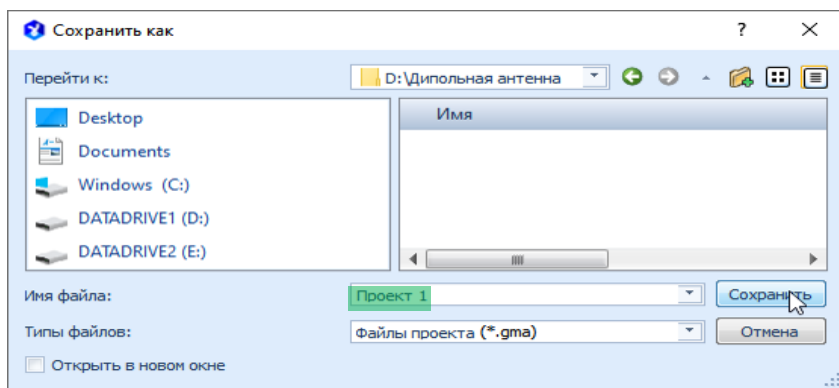
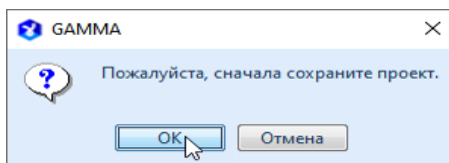
IV. Настройка расчета

❑ Запустите расчет:

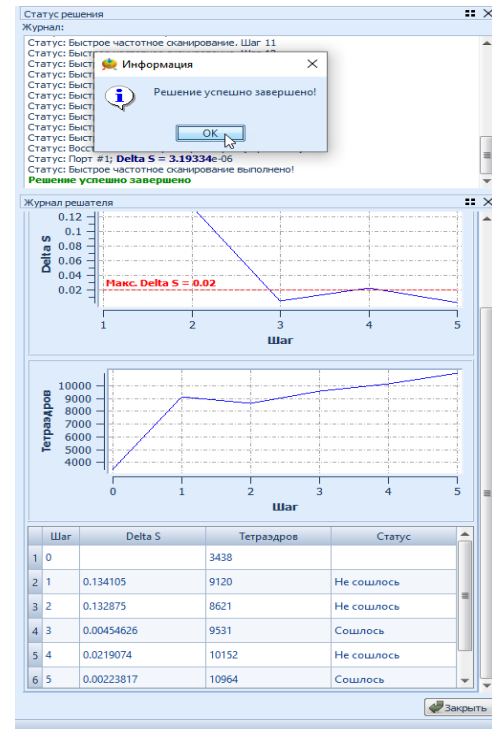
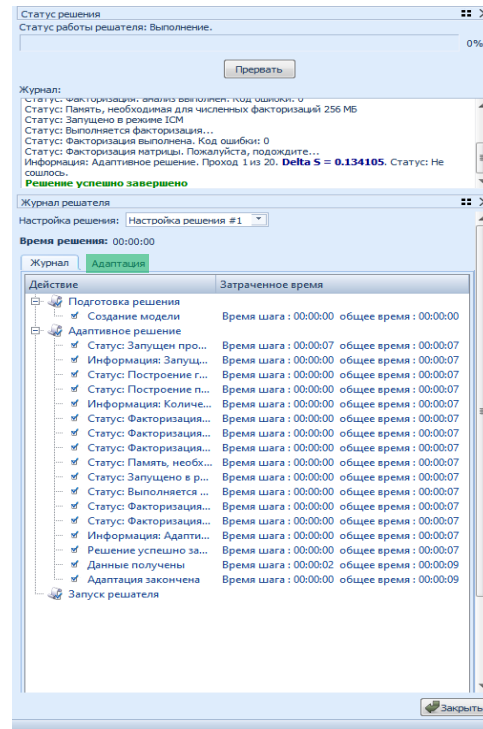
1. Во вкладке **Решение** > **Запустить**.



2. В появившемся окне необходимо согласиться сохранить проект: нажмите **OK**, далее выберите расположение на жестком диске, введите имя файла и нажмите **Сохранить**:



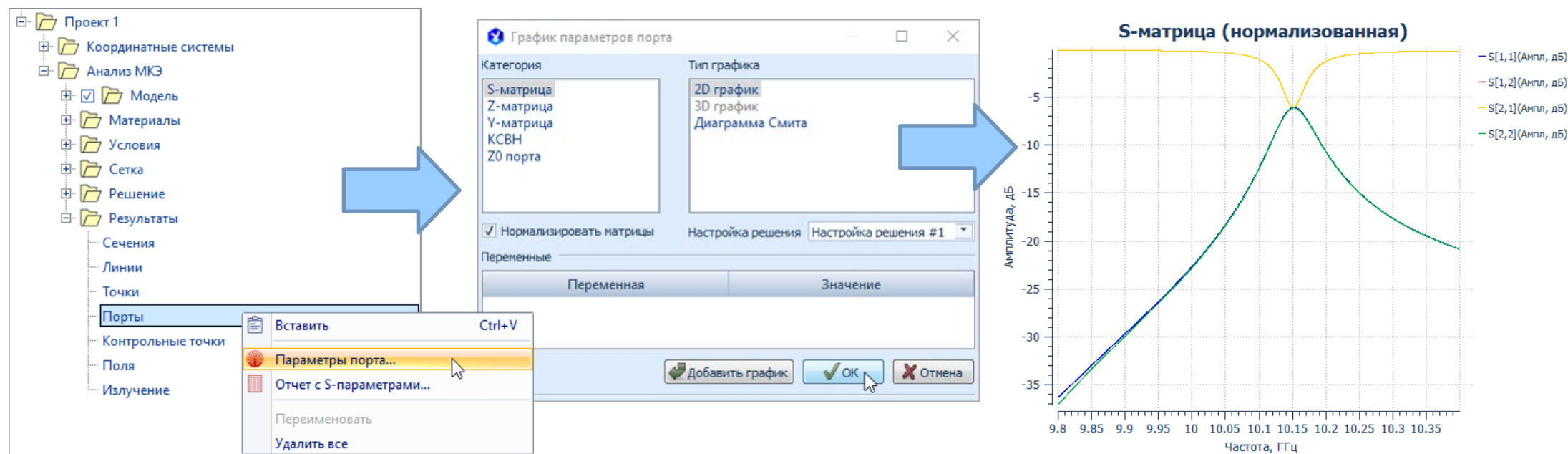
3. Рекомендуется контролировать процесс решения в автоматически открывающемся окне **Статус Решения**. Процесс сходимости доступен во вкладке **Адаптация**:



❑ После завершения расчета результаты доступны в папке *Результаты* в дереве проекта:

Для построения графика *S*-параметров:

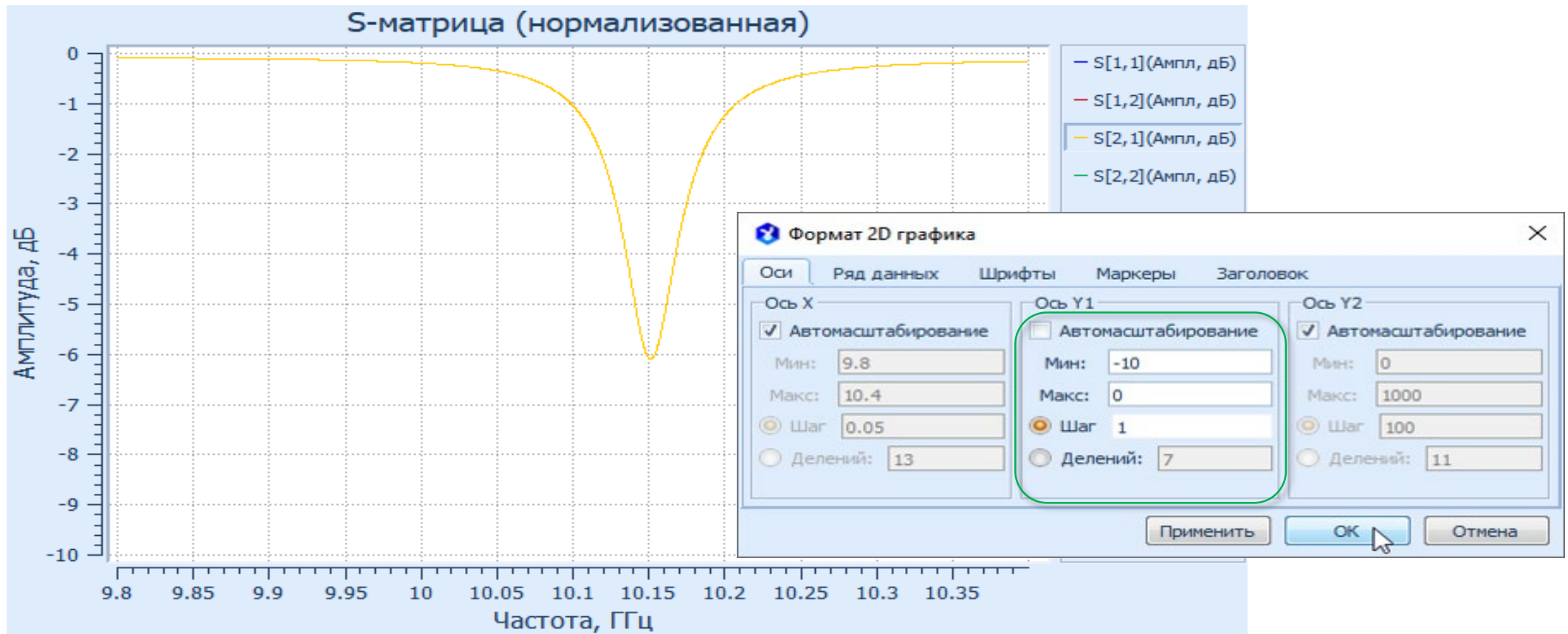
1. В папке *Результаты* > нажмите правой кнопкой на *Порты* > *Параметры порта...*
2. В окне *График параметров портов* > нажмите *ОК* :



V. Результаты

❑ Настройка графика *S*-матрица:

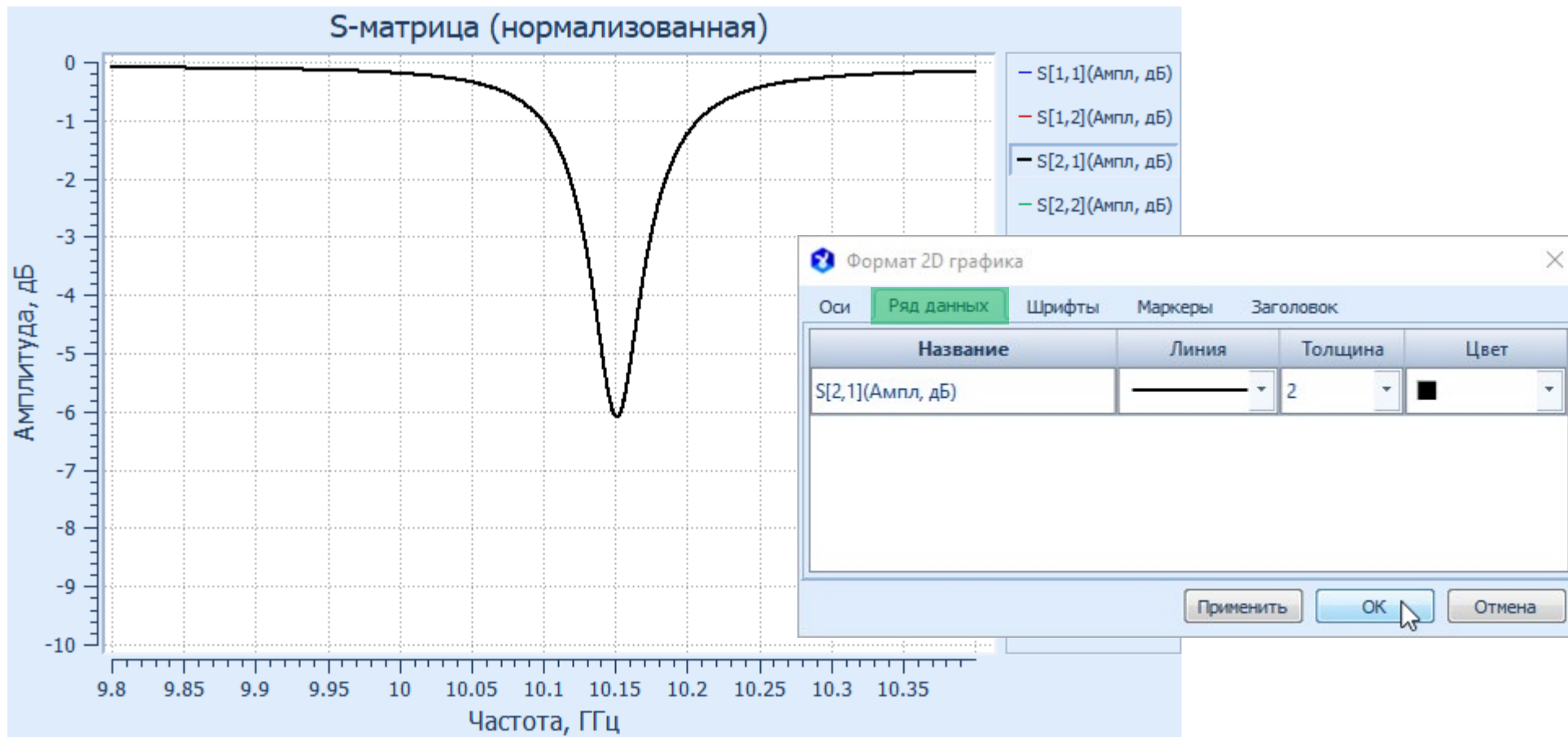
1. В правой части графика снимите выделение с кривых S_{11} , S_{12} и S_{22} .
2. Нажмите правой кнопкой в поле графика > **Формат**.
3. В окне **Формат 2D графика** > отключите **Автомасштабирование** Оси Y1, установите Мин -10, Макс 0, Шаг 1 и нажмите **ОК** :



V. Результаты

❑ Форматирование графика:

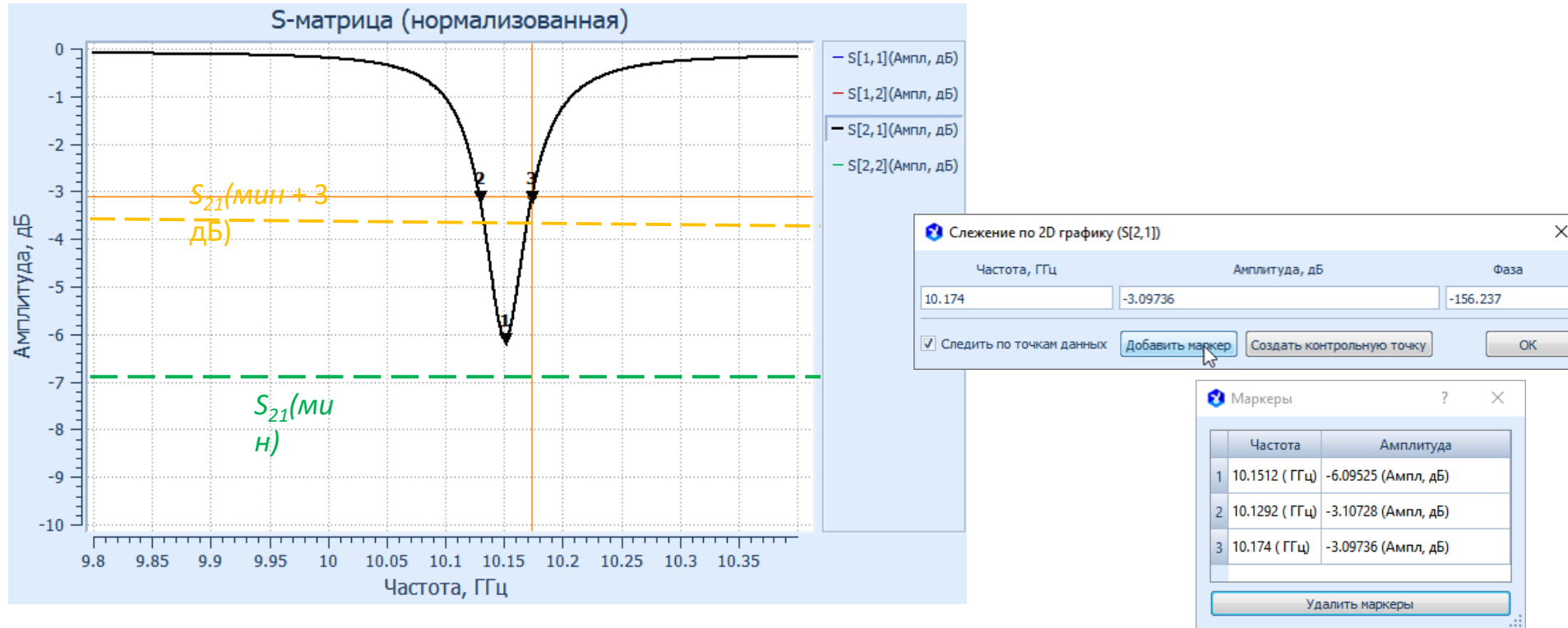
1. Нажмите правой кнопкой в поле графика > **Формат**.
2. В окне **Формат 2D графика** переключитесь во вкладку **Ряд данных**:
 - Настройте толщину линии и цвет по усмотрению:



V. Результаты

□ Анализ графика:

1. Нажмите правой кнопкой в поле графика > **Слежение**.
2. Курсором в виде перекрестия и далее с помощью кнопки **Добавить маркер** добавьте маркеры **(1)** наилучшего согласования, **(2)** и **(3)** – уровни **+3 дБ** от наилучшего согласования:



➤ Обратите внимание, что добротность, рассчитанная по трем выделенным точкам с помощью формулы

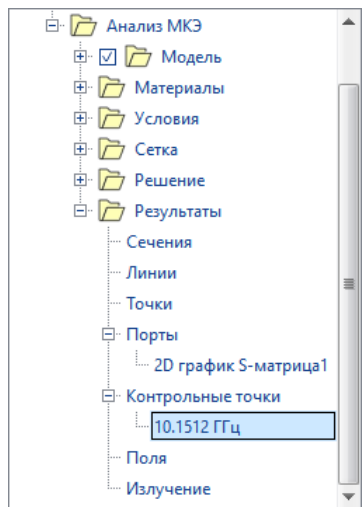
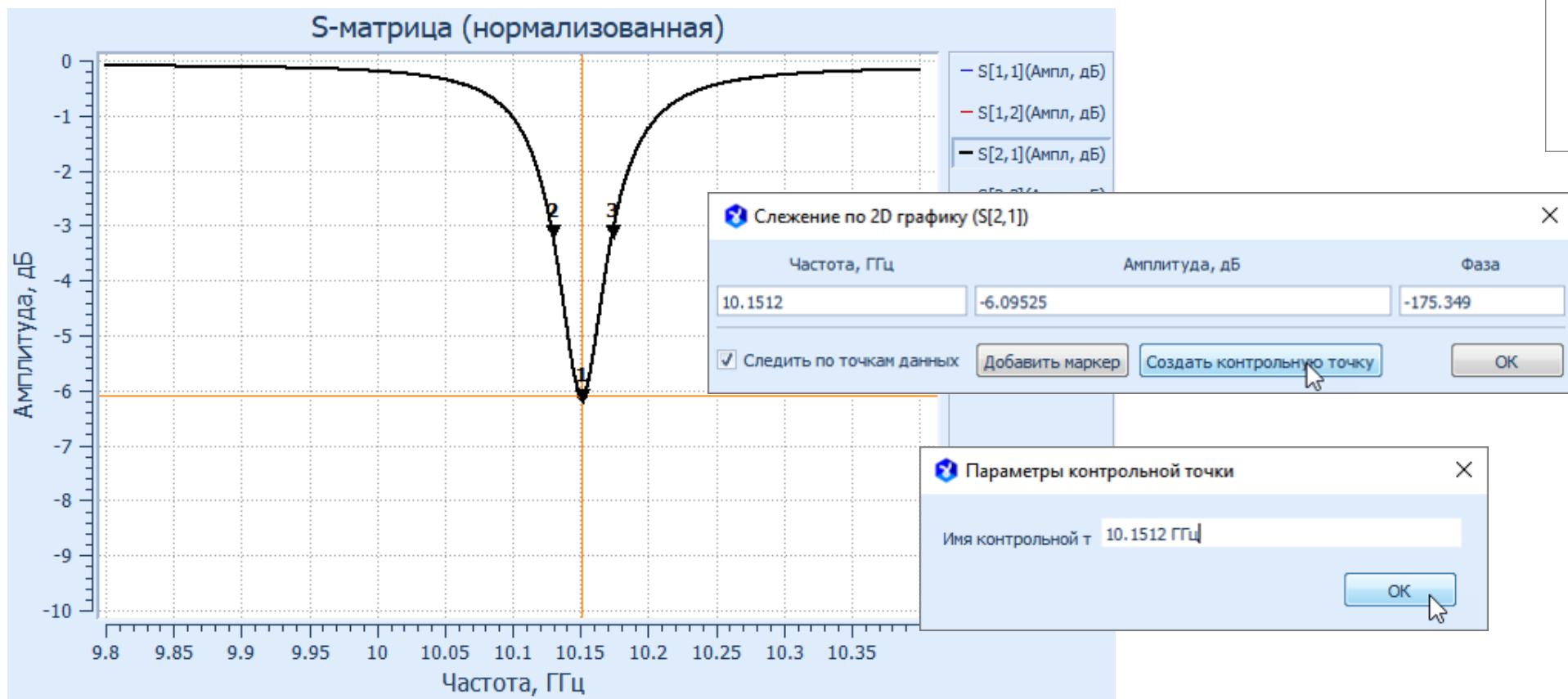
$$Q = \frac{f(\text{мин})}{\Delta f(\text{мин} + 3 \text{ дБ})}$$

имеет значение, равное $10,1512/(10,174-10,1292) = 227$.

V. Результаты

❑ Создание контрольной точки:

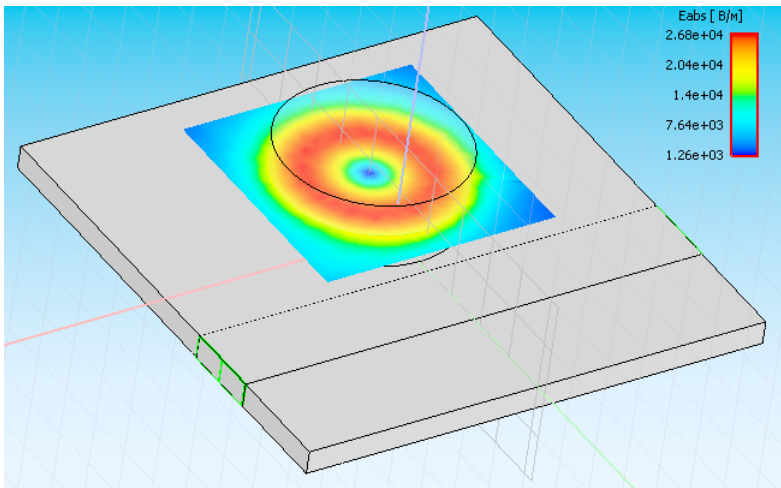
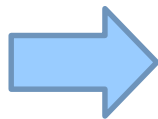
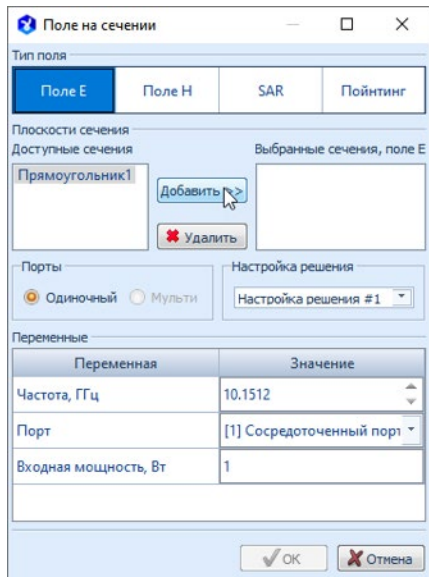
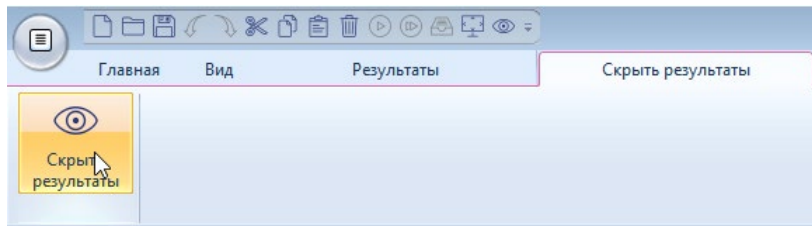
1. Нажмите правой кнопкой в поле графика > **Слежение**.
2. Выберите точку резонанса (минимума коэффициента отражения) и нажмите кнопку **Создать контрольную точку**.
3. В окне **Параметры контрольной точки** > введите имя контрольной точки и нажмите **ОК**:
 - Контрольная точка появится в папке **Результаты** в дереве проекта:



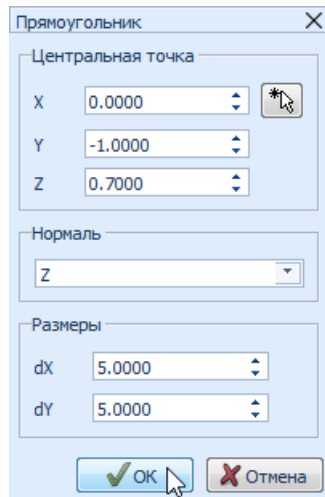
V. Результаты

❑ Построение распределения электрического поля на сечении:

- Для того, чтобы вернуться к работе с моделью, во вкладке **Заккрыть результаты** > нажмите **Скрыть результат**:
- Снимите выделение с объекта **“Воздушный объем”** в папке **Модель** в дереве проекта, чтобы скрыть его.
- Сделайте резонатор прозрачным: выделите объект **Резонатор** > окно **Свойства** > двойное нажатие на **Прозрачность** и используя слайдер или вручную введите значение прозрачности **90%**.
- В папке **Результаты** > нажмите правой кнопкой на **Сечения** > **Прямоугольник...**:
 - Используйте инструмент **Прямоугольник** для создания **XY** сечения по центру резонатора.
 - Введите значения **Центральная точка** = {0; -1; 0,7} и **Размер** = 5×5 мм (см. рисунок ниже) и нажмите **ОК**.
- В папке **Результаты** > **Контрольные точки** > нажмите правой кнопкой на точке **10,1512 ГГц** > **Поле на сечении...**:
 - Выберете **Прямоугольник1** в **Доступные сечения** и нажмите **Добавить**, затем **ОК**:



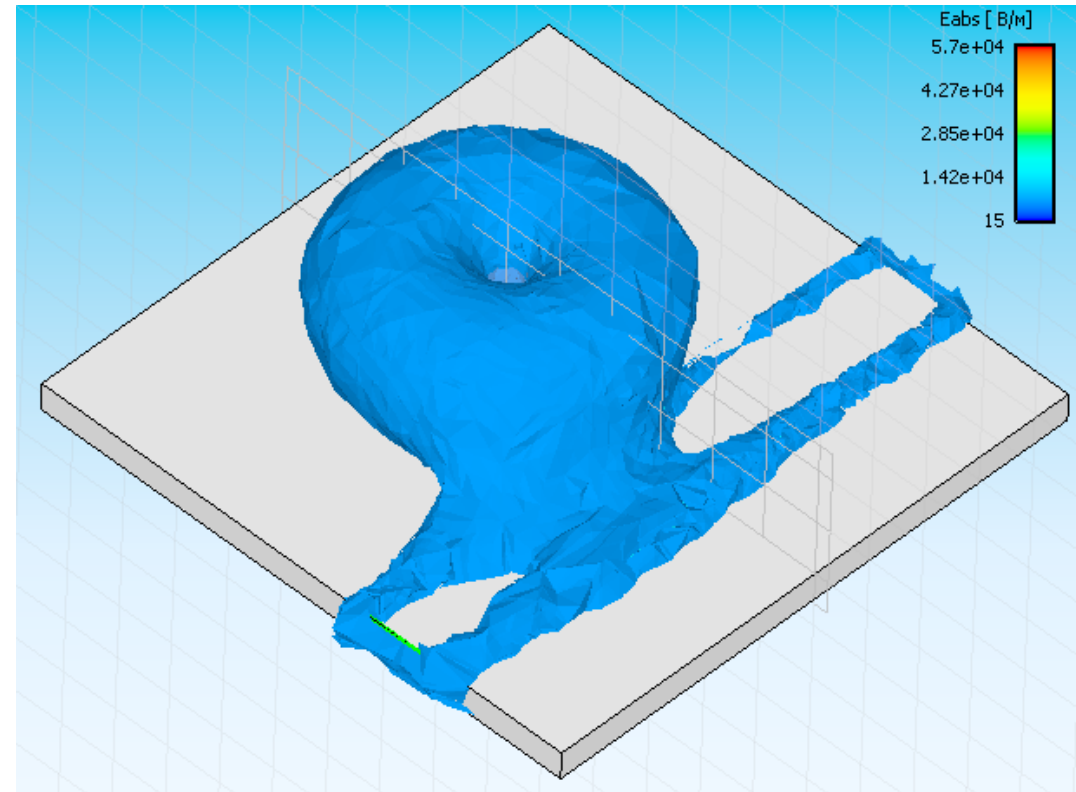
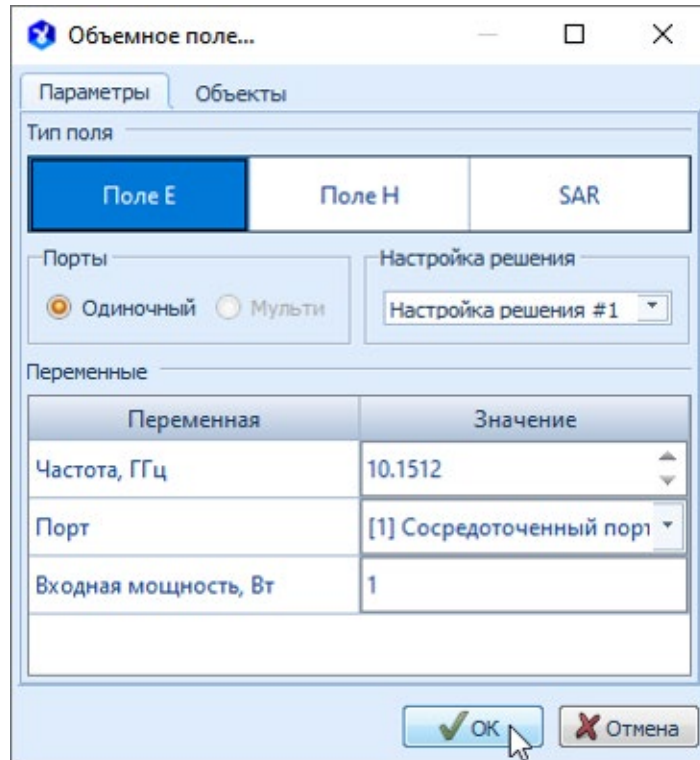
Поле однородно по азимуту и его максимальное значение находится внутри резонатора.



V. Результаты

❑ Построение объемного распределения электрического поля:

1. В папке **Результаты** > **Контрольные точки** > нажмите правой кнопкой на точке **10,1512 ГГц** > **Объемное поле...**
2. В окне **Объемное поле** > оставьте все значения по умолчанию и нажмите **ОК**.



Поле в окрестности микрополосковой ЛП
и поле резонатора перекрываются.
Кроме того, поле ограничено областью
резонатора и не распространяется за его пределы.

Сравнение резонансной частоты диэлектрического резонатора: предсказанной и рассчитанной численным методом

№	Резонансная частота, ГГц		Добротность	
	Теория	Расчет	Теория	Расчет
1	10,3972	10,1512	-	227

Аналитическая и расчетная собственные частоты довольно хорошо согласуются, несмотря на очень приблизительную аналитическую формулу. Добротность нельзя рассчитать аналитически.