



Система анализа целостности сигнала

Руководство пользователя
Система анализа целостности сигналов SimPCB Lite

Май, 2026



Руководство пользователя

Внимание!

Права на данный документ в полном объёме принадлежат компании «ЭРЕМЕКС» и защищены законодательством Российской Федерации об авторском праве и международными договорами.

Использование данного документа (как полностью, так и частично) в какой-либо форме, такое как: воспроизведение, модификация (в том числе перевод на другой язык), распространение (в том числе в переводе), копирование (заимствование) в любой форме, передача форме третьим лицам, – возможны только с предварительного письменного разрешения компании «ЭРЕМЕКС».

За незаконное использование данного документа (как полностью, так и частично), включая его копирование и распространение, нарушитель несет гражданскую, административную или уголовную ответственность в соответствии с действующим законодательством.

Компания «ЭРЕМЕКС» оставляет за собой право изменить содержание данного документа в любое время без предварительного уведомления.

Последнюю версию документа можно получить в сети Интернет по ссылке:

www.eremex.ru/knowledge-base/delta-design/docs

Компания «ЭРЕМЕКС» не несёт ответственности за содержание, качество, актуальность и достоверность материалов, права на которые принадлежат другим правообладателям.

Обозначения ЭРЕМЕКС, EREMEX, Delta Design, TopoR, SimOne, SimPCB, SimPCB Lite являются товарными знаками компании «ЭРЕМЕКС».

Остальные упомянутые в документе торговые марки являются собственностью их законных владельцев.

В случае возникновения вопросов по использованию программ Delta Design, TopoR, SimOne, SimPCB, SimPCB Lite, пожалуйста, обращайтесь:

Форум компании «ЭРЕМЕКС»: www.eremex.ru/society/forum

Техническая поддержка

E-mail: support@eremex.ru

Отдел продаж

Тел. +7 (495) 232-18-64

E-mail: info@eremex.ru

E-mail: sales@eremex.ru

Содержание

Система анализа целостности сигналов SimPCB Lite

1	Термины и определения	5
2	Назначение инструмента	6
3	Рабочее пространство	7
4	Функциональная панель «Проекты»	10
4.1	Навигация и панель инструментов	10
4.2	Структура файлов	11
4.3	Проект	13
4.4	Группа	16
4.5	Модель	19
4.6	Расчет	21
5	Настройки системы	24
6	Расчет параметров линий передачи	27
6.1	Интерфейс и порядок проведения расчета параметров ЛП	27
6.2	Расчет без потерь	28
6.2.1	Общие сведения	28
6.2.2	Одиночный расчет одиночной или копланарной одиночной ЛП	30
6.2.3	Одиночный расчет дифф. пары или копланарной дифф. пары	35
6.2.4	Обратный расчет	40
6.2.5	Множественный расчет	41
6.3	Частотный анализ	46
6.3.1	Общие сведения	46
6.3.2	Общие параметры	50
6.3.3	S-параметры	55
6.3.4	Перекрестные помехи	60
6.4	Временной анализ	64
6.4.1	Общие сведения	64
6.4.2	Форма сигнала	67

6.4.3	S-параметры	70
6.4.4	Перекрестные помехи	74
7	Расчет параметров переходных отверстий	78
7.1	Интерфейс для расчета параметров ПО	78
7.2	Общие сведения	79
7.3	Одиночный расчет	80
7.4	Множественный расчет	83
8	Выгрузка результатов	86
9	Приложение А	87
9.1	Модели линий передачи	87
9.2	Модели переходных отверстий	109
10	Приложение Б - Практические примеры расчетов	111
10.1	Расчет волнового сопротивления	111
10.2	Расчет ширины проводника	115
10.3	Расчет дифференциального волнового сопротивления	119
10.4	Расчет параметров дифф. пары	122
10.5	Расчет длины ЛП при известном уровне потерь	125
10.6	Расчет S-параметров в частотном диапазоне	130
10.7	Оценка перекрестных помех	133
10.8	Расчет расстояния между линиями передачи	136
10.9	Расчет формы сигнала	139
10.10	Расчет S-параметров во временной области	142
10.11	Оценка перекрестных помех во временной области	144
10.12	Анализ уровня помехи по отношению к сигналу	148

1 Термины и определения

В настоящем документе используются термины и определения, представленные в таблице, см. [Табл. 1](#).

[Таблица 1](#) Термины и определения

№	Термин	Определение
1	Линия передачи	Система прямых и возвратных проводников, состоящая из сигнальной трассы и возвратного пути сигнала, который обычно проходит в потенциальном слое.
2	Дифференциальная пара	Два проводника, на которые подаются равные, но противоположные переменные напряжения и токи.
3	Микрополосковая линия передачи	Линия передачи, состоящая из сигнального проводника, расположенного на внешнем слое печатной платы, и ближайшего потенциального слоя, по которому пролегает возвратный путь сигнала. Сигнальный проводник и потенциальный слой разделены диэлектриком печатной платы.
4	Полосковая линия передачи	Линия передачи, состоящая из сигнального проводника, расположенного во внутреннем слое печатной платы, и одного потенциального слоя, по которому пролегает возвратный путь сигнала. В данном случае возвратных путей сигнала два.
5	Копланарная линия передачи	Линия передачи, состоящая из сигнального проводника и возвратного пути сигнала (проводников или полигонов), расположенных на одном и том же слое печатной платы.
6	Заглубленная линия передачи	Линия передачи, состоящая из сигнального проводника, расположенного во внутреннем слое печатной платы, и одного потенциального слоя, который является возвратным путем сигнала.
7	Антипад	Зазор между контактной площадкой и областью металлизации, в которой она расположена.
8	Опорный слой	Слой, используемый для размещения только областей металлизации, которые занимают все пространство слоя (как правило, используются для подключения компонентов к цепям земли и питания).
9	Четная мода	Состояние дифференциальной пары, когда напряжения на линиях одинаковы.

№	Термин	Определение
10	Нечетная мода	Состояние дифференциальной пары, когда напряжения на линиях оппозитны.

В настоящем документе используется перечень сокращений, представленный в таблице, см. [Табл. 2](#).

[Таблица 2](#) Перечень сокращений

№	Сокращение	Значение
1	ЛП	Линия передачи
2	Дифф. пара	Дифференциальная пара
3	ПП	Печатная плата
4	ПО	Переходное отверстие
5	САПР	Система автоматизированного проектирования

2 Назначение инструмента

Система анализа целостности сигналов SimPCB Lite – система инженерного анализа, предназначенная для комплексного расчета параметров линий передачи с учетом параметров межслойных переходов и контактных площадок, направленная на обеспечение надежной работы высокоскоростных и высокочастотных электронных систем.

Функциональные возможности SimPCB Lite позволяют производить расчеты параметров с высокой точностью и скоростью, при этом выполнять подбор необходимой модели линии передачи из множества вариантов (104 модели с учетом возможности переворота проводника), формировать нужную модель ПП с переходным отверстием с учетом различных вариантов расположения слоев маски и опорных слоев, учитывать толщину маски и величину технологического подтрава проводника.

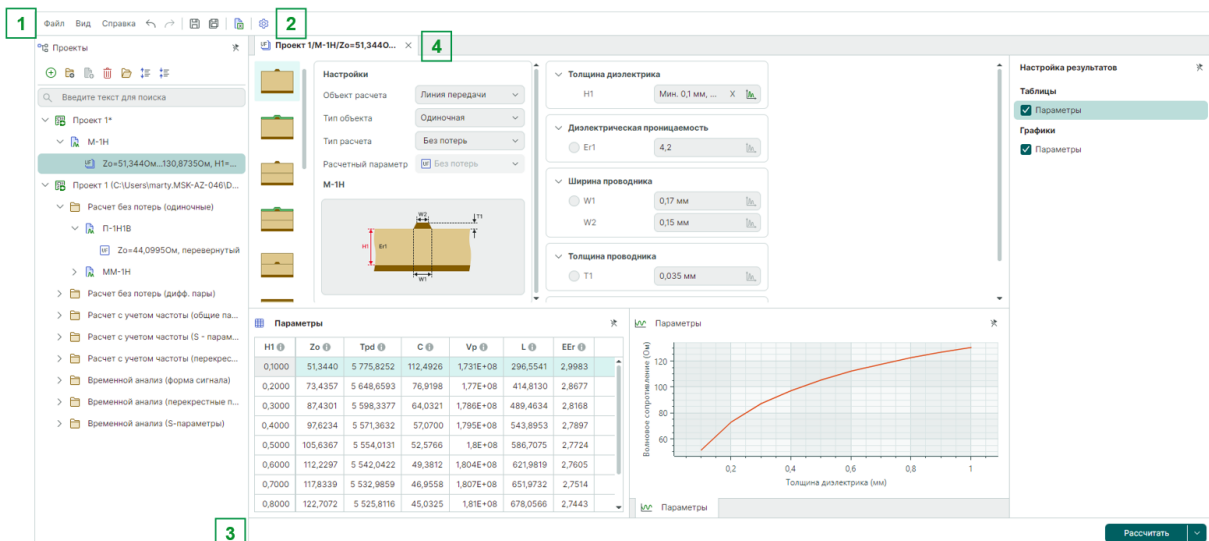
Система SimPCB Lite обеспечивает решение следующих задач:

1. Расчет первичных и вторичных параметров линий передачи, возможность выбора вычисляемого параметра (тип расчета «Без потерь»).
2. Множественный расчет параметров ЛП в диапазоне значений выбранного параметра.
3. Расчет первичных и вторичных параметров переходных отверстий с возможностью подбора необходимой модели (тип расчета «Без потерь»).

4. Множественный расчет ПО в диапазоне значений выбранного параметра.
5. Проведение «Частотного анализа» линии передачи:
 - расчет общих параметров и уровня потерь в линии передачи;
 - вычисление S-коэффициентов с учетом частоты;
 - определение перекрестных помех с учетом частоты.
6. Проведение «Временного анализа» линий передачи:
 - представление формы сигнала после прохождения линии передачи для аналоговых и цифровых сигналов;
 - расчет S-коэффициентов во временной области;
 - вычисление перекрестных помех для аналоговых и цифровых сигналов.
7. Представление результатов расчета в табличном и графическом виде.
8. Сохранение файлов проектов с созданной иерархией групп, моделей и расчетов с возможностью последующего использования.
9. Вывод результатов расчетов в файлы с расширением .XLSX.

3 Рабочее пространство

Работа с системой анализа целостности сигнала SimPCB Lite осуществляется в главном окне системы, см. [Рис. 1](#).



Н1 @	Zo @	Трд @	С @	Vp @	L @	EE @
0,1000	51,3440	5,775,8252	112,4926	1,731E+08	296,5541	2,9983
0,2000	73,4357	5,648,6593	76,9198	1,77E+08	414,8130	2,8677
0,3000	87,4301	5,598,3377	64,0321	1,786E+08	489,4634	2,8168
0,4000	97,6234	5,571,3632	57,0700	1,795E+08	543,8953	2,7897
0,5000	105,6367	5,554,0131	52,5766	1,8E+08	586,7075	2,7724
0,6000	112,2297	5,542,0422	49,3812	1,804E+08	621,9819	2,7605
0,7000	117,8339	5,532,9859	46,9558	1,807E+08	651,9732	2,7514
0,8000	122,7072	5,525,8116	45,0325	1,81E+08	678,0566	2,7443

Рис. 1 Главное окно системы SimPCB Lite



Основные элементы графического интерфейса:

1. [Главное меню программы](#);
2. [Панель инструментов](#);
3. [Панель «Проекты»](#);
4. [Вкладки открытых расчетов](#).

Главное меню системы включает разделы:

- «Файл» – обеспечивает доступ к основным командам и настройкам системы;
- «Вид» – обеспечивает вызов функциональной панели «Проекты», масштабирование рабочего окна, запуск стартовой страницы;
- «Справка» – предоставляет доступ к справочной информации.

Состав пунктов меню раздела «Файл» ([Рис. 2](#)):

- «Создать» → «Проект SimPCB» – создание нового проекта.
- «Открыть» → «Проект SimPCB» – открытие проекта, содержащего набор моделей и расчетов, в формате *.SIMP.
- «Сохранить» → «Проект SimPCB» – сохранение текущего проекта. При первом сохранении проекта потребуется указать локальное месторасположение, последующие сохранения будут автоматически производиться в сохраненный файл.
- «Сохранить все» – сохранение всех изменений в проектных данных, пункт обозначен иконкой .
- «Настройки» – доступ к «Панели управления», пункт обозначен иконкой . Подробнее о выполнении настроек системы см. раздел [Настройки системы](#).
- «Экспорт» → «Расчет SimPCB (.XLS)» – экспорт сохраненной модели и результатов анализа целостности сигналов SimPCB Lite в формате *.XLS.
- «Завершить работу» – завершение работы SimPCB Lite с закрытием всех панелей и окон («Alt+F4»).

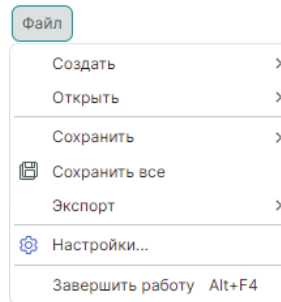


Рис. 2 Состав меню «Файл»



Панель инструментов содержит набор инструментов для сохранения и экспорта проведенных расчетов, обеспечивает доступ к «Панели управления», см. [Рис. 3](#).



Рис. 3 Панель инструментов

Подробнее инструменты описаны в [Табл. 3](#).

[Таблица 3](#) Состав инструментов

Символ	Наименование инструмента	Описание
	Отменить сохранение расчета/Сбросить изменения	Отмена сохранения расчета или сброс изменений. Кнопка становится активной в режиме «Перезаписать расчет» после внесения изменений в данные расчета.
	Восстановить последний расчет	Восстановление последнего расчета. Кнопка становится активной в режиме «Перезаписать расчет» после отмены сохранения расчета.
	Сохранить проект	Сохранение изменений в активном проекте.
	Сохранить все	Сохранение изменений всех проектных данных.
	Экспортировать расчет SimPCB в .xlsx	Экспорт расчетов SimPCB в формате *.XLSX.
	Настройка параметров SimPCB	Переход к настройкам системы.

Функциональная панель «Проекты» обеспечивает доступ к инструментам создания и редактирования проектов, моделей и расчетов, подробное описание представлено в разделе [Функциональная панель «Проекты»](#).

Вкладки открытых расчетов включают объекта расчета, определение настроек и входных параметров, отображение результатов расчета, подробнее см. разделы [Расчет параметров линий передачи](#) и [Расчет параметров переходных отверстий](#).

4 Функциональная панель «Проекты»

4.1 Навигация и панель инструментов

В панели «Проекты» существует строка поиска для быстрой навигации. Для поиска нужного элемента введите символы из имени проекта, группы, модели или расчета. Элементы, содержащие введенные символы, будут подсвечены, при этом другие элементы списка не будут отображены, см. [Рис. 4](#).

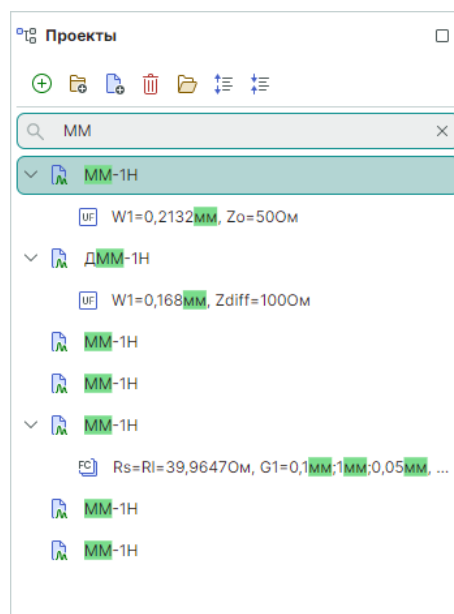


Рис. 4 Навигация в панели «Проекты»

5. Функциональная панель «Проекты» содержит ряд инструментов, см. [Рис.](#)

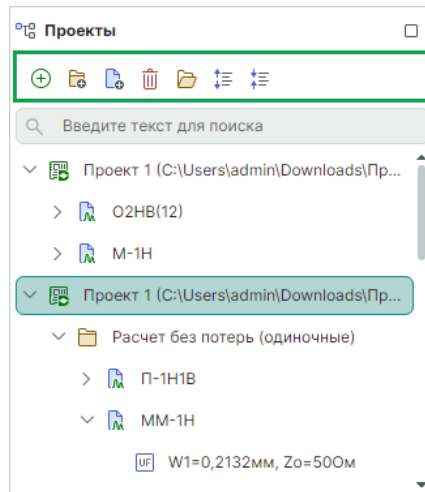


Рис. 5 Панель инструментов

Подробнее инструменты описаны в [Табл. 4](#).

[Таблица 4](#) Состав инструментов

Символ	Наименование инструмента	Описание
	Создать проект SimPCB	Создание нового проекта
	Создать группу	Создание новой группы
	Создать расчет	Создание нового расчета
	Удалить выбранный элемент	Удаление проекта, группы, модели или расчета
	Открыть проект	Переход в проводник для выбора проекта
	Развернуть все элементы	Структура всех элементов будет развернута
	Свернуть все элементы	Структура всех элементов будет свернута

4.2 Структура файлов

Функциональная панель «Проекты» содержит все созданные и открытые пользователем проекты, группы, модели и расчеты, а также осуществляет навигацию по составным частям каждого проекта, см. [Рис. 6](#).

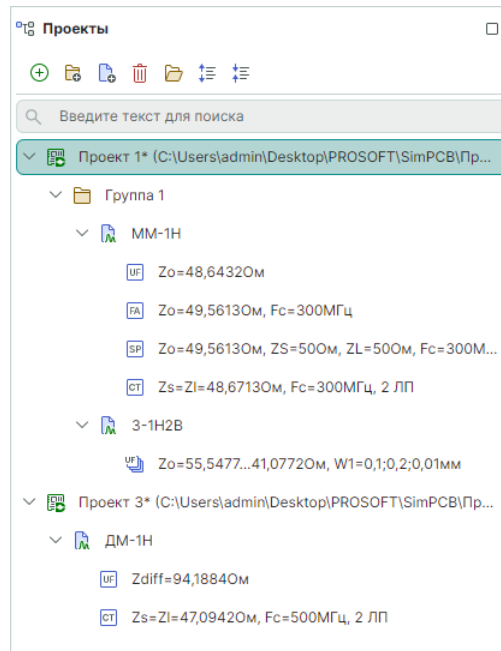





Рис. 6 Панель «Проекты»

Структура файлов в панели «Проекты» ([Рис. 7](#)):

- «[Проект](#)» – это общий файл, который может содержать группы, набор моделей и расчетов, обозначен иконкой .
- «[Группа](#)» – файл, который используется для группировки моделей, обозначен иконкой .
- «[Модель](#)» – это конкретная модель линии передачи или отверстия, которая формируется из выбранных параметров расчета: объекта расчета, типа объекта, названия модели ЛП или ПО, типа расчета. Обозначена иконкой .
- «[Расчет](#)» – это набор входных параметров и выходных данных в виде набора таблиц, графиков и их настроек. Каждый тип расчета имеет индивидуальную иконку.

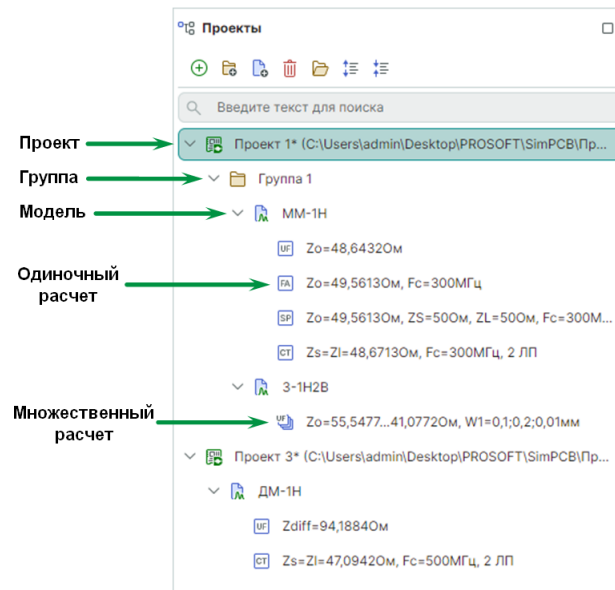


Рис. 7 Структура файлов в панели «Проекты»

4.3 Проект

Проект может быть создан ([Рис. 8](#)):

1. С помощью команды «Создать проект» панели «Проекты»;
2. С помощью команды раздела главного меню «Файл» → «Создать» → «Проект».

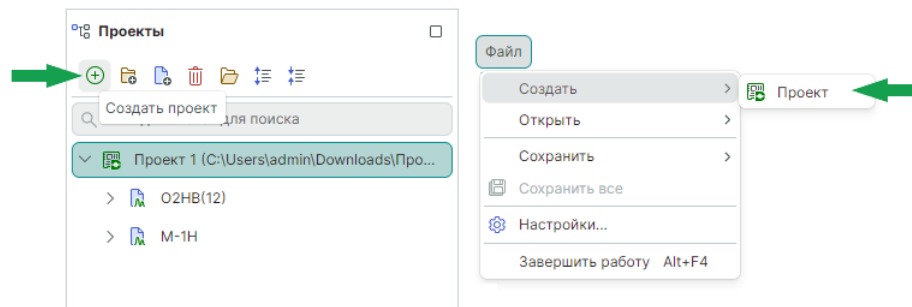


Рис. 8 Создание проекта

Ранее созданный проект может быть открыт и отредактирован ([Рис. 9](#)):

1. С помощью команды «Открыть проект» панели «Проекты»;
2. С помощью команды раздела главного меню «Файл» → «Открыть» → «Проект».

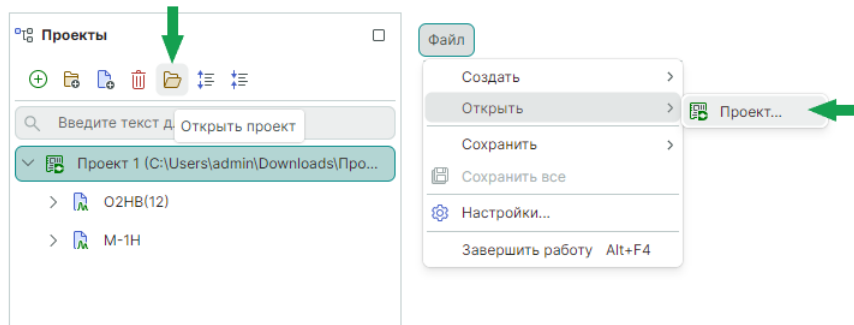


Рис. 9 Открытие ранее созданного проекта

При создании нового проекта автоматически создаются одна новая модель и один новый расчет. По умолчанию проекту будет присвоено имя в формате: «Проект N», где N – порядковый номер. Наименование модели и расчета будет сформировано после выбора модели ЛП или ПО и запуска расчета, см. [Рис. 10](#).

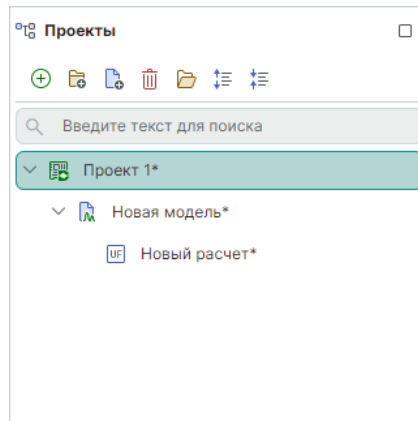


Рис. 10 Новый проект

Действия с проектом, доступные из контекстного меню ([Рис. 11](#)):

- «Переименовать» – для наименования проекта могут быть использованы любые буквы, цифры и символы. При создании и сохранении проектов в панели имя каждого должно быть уникальным (возможно открытие нескольких проектов с одинаковыми именами, если они сохранены в разных директориях);



Пример! В качестве наименования проекта для обеспечения удобства работы может быть использовано наименование платы, для которой необходимо провести расчеты, например, FPGA_IGLOO2.

- «Создать группу» – создание группы внутри выбранного проекта, подробнее см. раздел [Группа](#);
- «Создать расчет» – создание расчета внутри выбранного проекта, подробнее см. раздел [Расчет](#);

- «Удаление» – удаление проекта («Delete»).

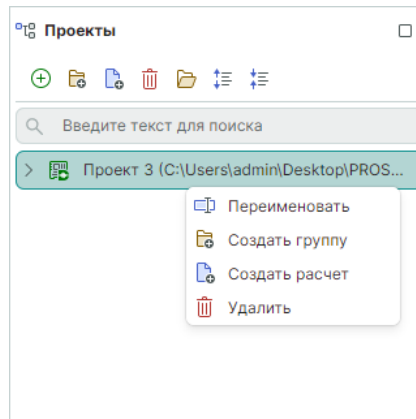


Рис. 11 Контекстное меню проекта

Сохранение проекта возможно после выбора модели ЛП или ПО и проведения расчета, сохранение производится ([Рис. 12](#)):

1. С помощью команд «Сохранить» и «Сохранить все» панели инструментов;
2. С помощью команд раздела главного меню «Файл» → «Сохранить» → «Проект» и «Файл» → «Сохранить все».

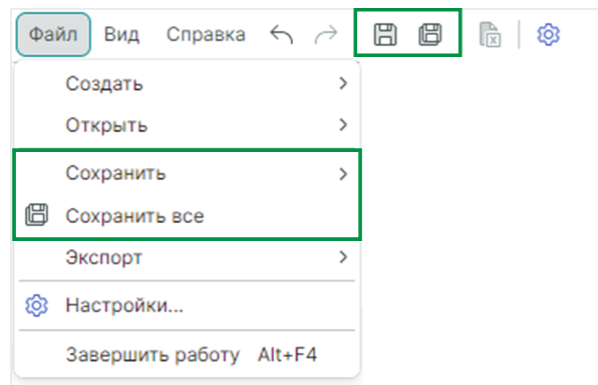


Рис. 12 Сохранение проекта

После сохранения проекта путь локального расположения будет отображен рядом с наименованием в панели «Проекты».

В процессе работы проект может иметь несколько состояний ([Рис. 13](#)):

1. Проект не сохранен локально – отсутствует отображение пути расположения, рядом с именем проекта символ «*»;
2. Проект сохранен локально, но имеет несохраненные изменения – отображается путь расположения, рядом с именем проекта символ «*»;

3. Проект сохранен локально, несохраненных изменений нет – отображается путь локального расположения.

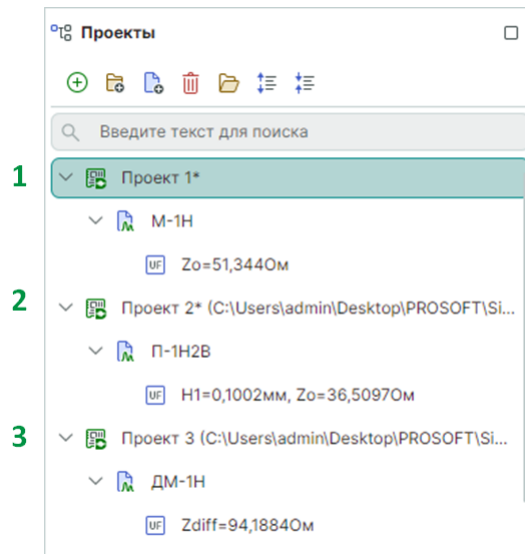


Рис. 13 Отображение проектов

Между проектами возможно перемещение групп, моделей и расчетов с помощью механизма «drag-and-drop», см. [Рис. 14](#).

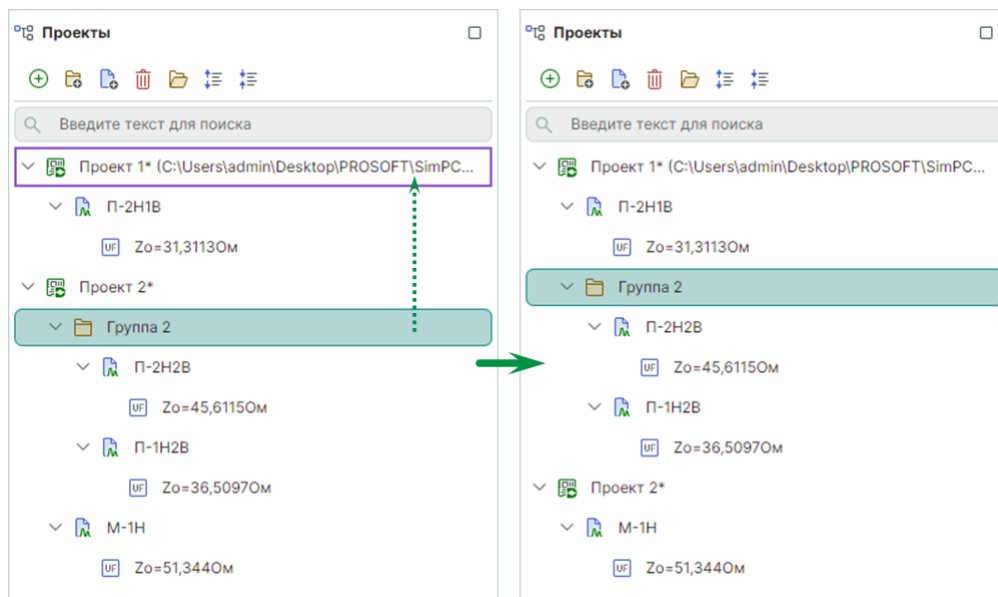


Рис. 14 Перемещение между проектами

4.4 Группа

Группа является необязательной составляющей и может быть создана только в составе проекта.

Группа создается ([Рис. 15](#)):

1. С помощью команды контекстного меню проекта «Создать группу»;
2. С помощью инструмента «Создать группу» панели «Проекты».

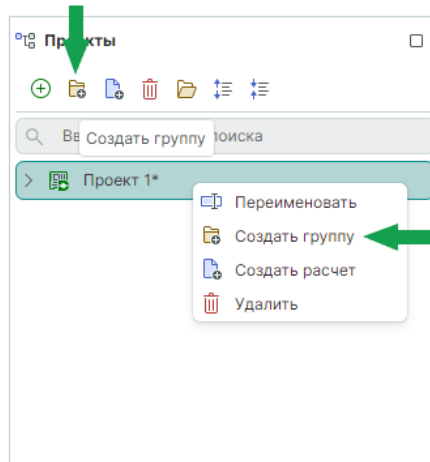


Рис. 15 Создание группы

При создании новой группы автоматически создаются одна новая модель и один новый расчет. По умолчанию группе будет присвоено имя в формате: «Группа N», где N – порядковый номер. Наименование модели и расчета будет сформировано после выбора модели ЛП или ПО и запуска расчета, см. [Рис. 16](#).

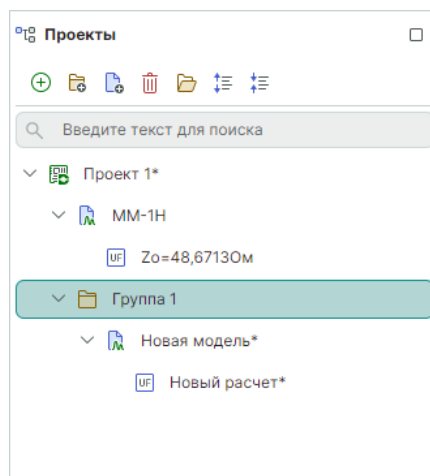


Рис. 16 Новая группа

Действия с группой, доступные из контекстного меню ([Рис. 17](#)):

- «Переименовать» – для наименования группы могут быть использованы любые буквы, цифры и символы, имя группы должно быть уникальным внутри одного проекта;



Пример! В качестве наименования группы для удобства работы может быть использовано наименование интерфейсов платы, для которой необходимо провести расчеты, например: USB top, UART123 и т.д.

- «Создать расчет» – создание расчета внутри выбранной группы, подробнее см. раздел [Расчет](#);
- «Удалить» – удаление группы («Delete»).

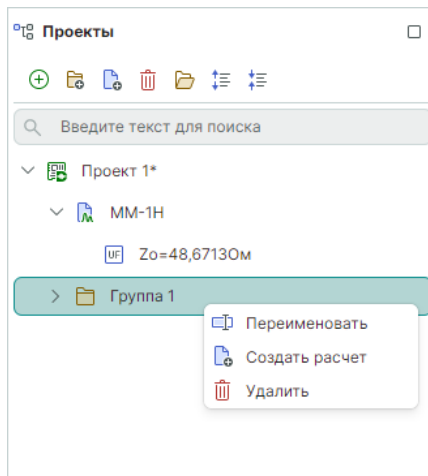


Рис. 17 Контекстное меню группы

Между группами возможно перемещение моделей и расчетов (перемещаются совместно) с помощью механизма «drag-and-drop», см. [Рис. 18](#).

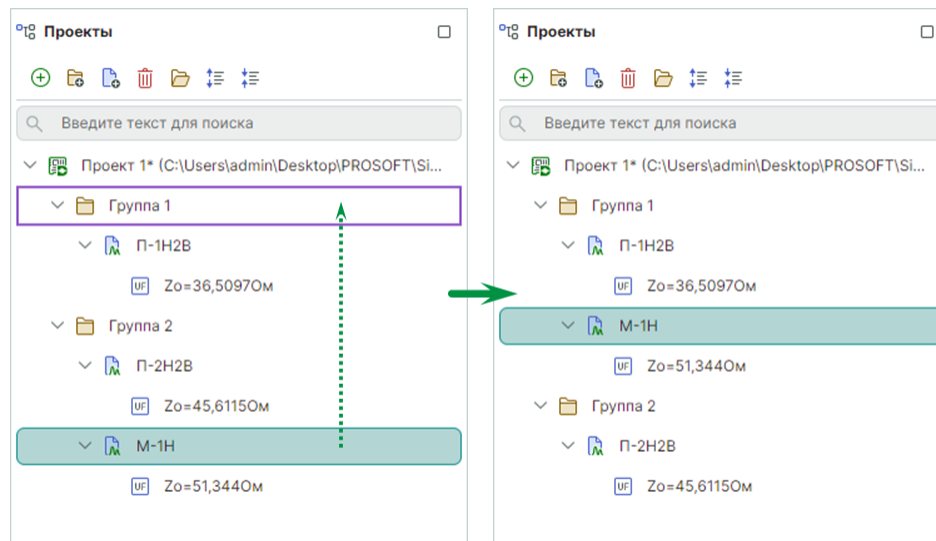


Рис. 18 Перемещение моделей и расчетов

При перемещении группы целиком модели и расчеты в ее составе будут перенесены, а сама группа – ликвидирована, см. [Рис. 19](#).

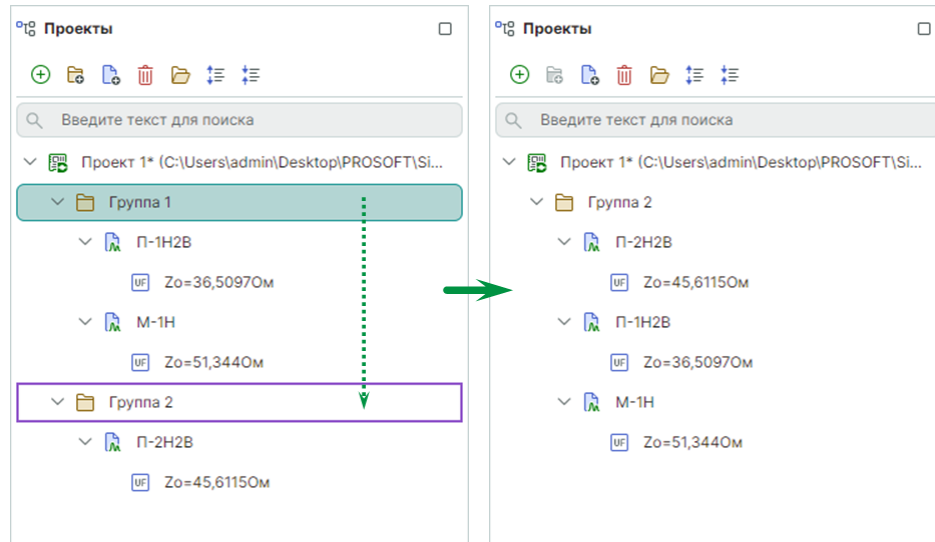


Рис. 19 Перемещение группы

Также модель и расчет можно вывести из состава группы, но оставить в текущем проекте, см. [Рис. 20](#).

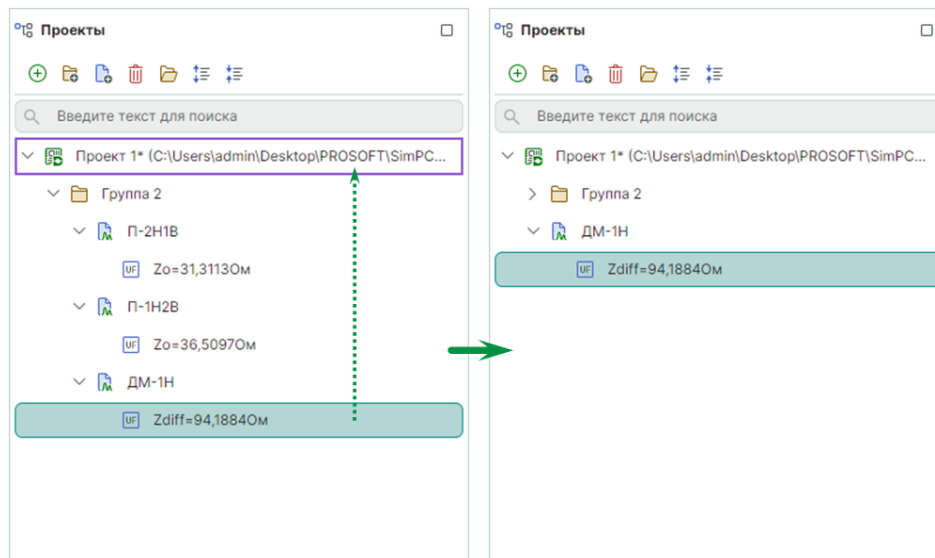


Рис. 20 Вывод из состава группы

4.5 Модель

Модель – это конкретная конструкция линии передачи или переходного отверстия, выбранная для проведения расчета.

Создание модели происходит автоматически при создании расчета.

По умолчанию модели в качестве имени присваивается кодовое обозначение выбранной модели линии передачи или переходного отверстия.

Кодовое обозначение модели ЛП состоит из аббревиатуры наименования линии передачи и количества диэлектриков сверху и снизу относительно проводника в выбранной модели. Например, кодовое обозначение КЗОС-2Н1В принято для копланарной заглубленной ЛП с опорным слоем, в модели которой два слоя диэлектрика расположены снизу от проводника и один слой диэлектрика – сверху, см. [Рис. 21](#).



Рис. 21 Модель КЗОС-2Н1В

Кодовое обозначение модели ПО складывается из аббревиатуры отверстия, обозначения количества слоев в структуре платы и расположения выбранных слоев маски и опорных слоев. Например, кодовое обозначение О4В(13) принято для модели четырехслойной печатной платы с маской на верхнем слое и опорными слоями на 1 и 3 слоях ПП, см. [Рис. 22](#).

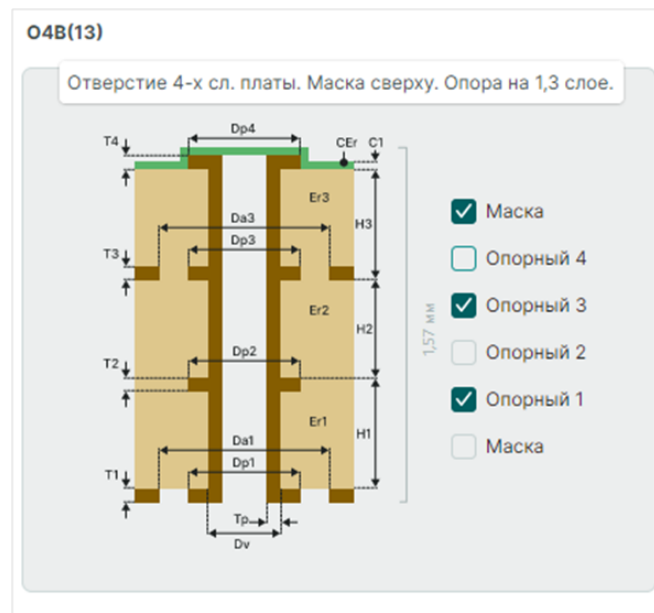


Рис. 22 Модель О4В(13)

Действия с моделью, доступные из контекстного меню ([Рис. 23](#)):

- «Переименовать» – для наименования модели могут быть использованы любые буквы, цифры и символы, имя каждой модели

должно быть уникальным. Возможно сохранение нескольких одинаковых моделей, но под разными именами.

- «Создать расчет» – создание нового расчета для выбранной модели, подробнее см. раздел [Расчет](#);
- «Удаление» – удаление модели и расчета («Delete»).

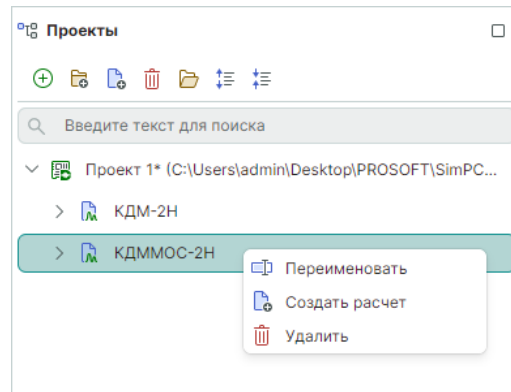


Рис. 23 Контекстное меню модели

Если после переименования модели необходимо вернуться к имени по умолчанию, используйте команду контекстного меню «Сбросить имя», см. [Рис. 24](#).

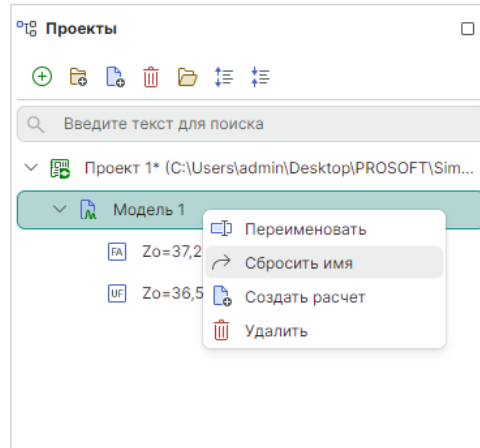


Рис. 24 Возвращение имени по умолчанию

4.6 Расчет

Расчет включает в себя выбранные входные данные (модель ЛП или ПО и их параметры, тип расчета, возможные дополнительные параметры) и результаты расчета в виде таблиц, графиков и настроек отображения результатов.

Расчет обязательно относится к какой-либо модели.

Доступные типы расчетов в системе анализа целостности сигнала SimPCB Lite представлены на [Рис. 25](#).

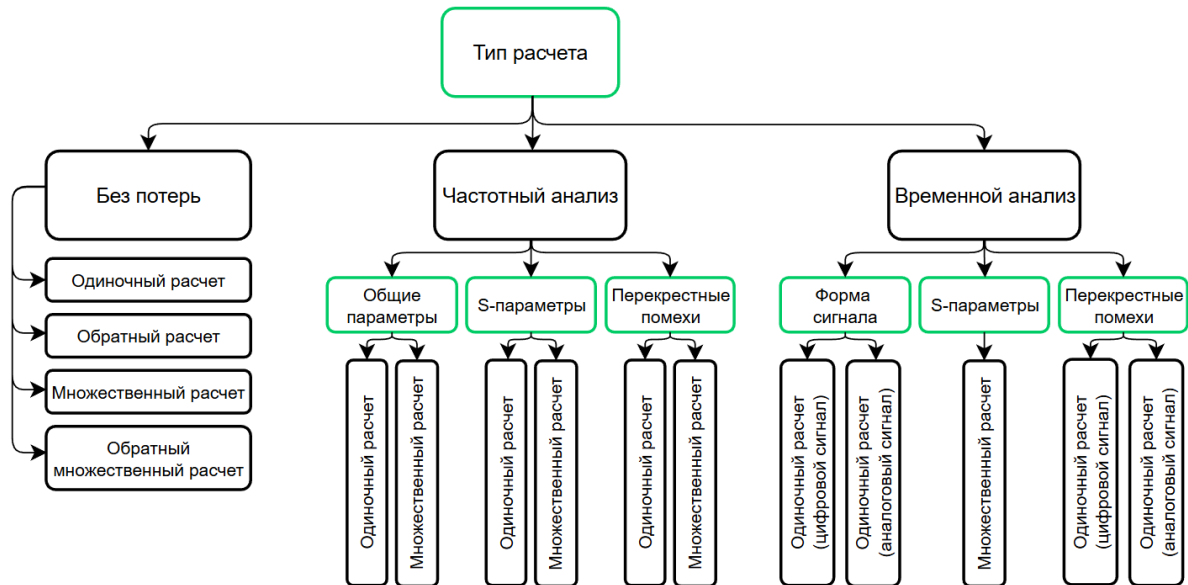


Рис. 25 Доступные типы расчетов

Создание расчета производится автоматически при создании нового проекта или группы, а также доступно с помощью команды «Создать расчет» в панели «Проекты», см. [Рис. 26](#).

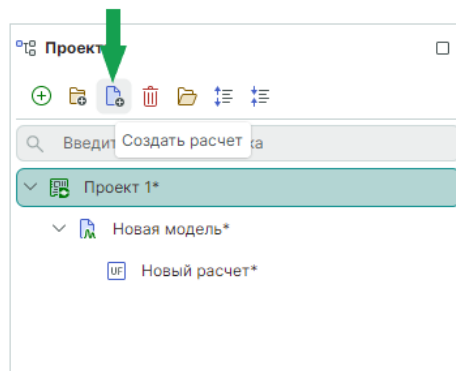


Рис. 26 Создание расчета

Действия с расчетом, доступные из контекстного меню ([Рис. 27](#)):

- «Открыть расчет» – команда открывает расчет или делает вкладку расчета активной;
- «Переименовать» – для наименования модели могут быть использованы любые буквы, цифры и символы, имя каждой модели должно быть уникальным. Возможно сохранение нескольких одинаковых расчетов под разными именами.

- «Копировать в проект» – создание копии расчета в текущий или другой проект;
- «Удаление» – удаление модели и расчета («Delete»).

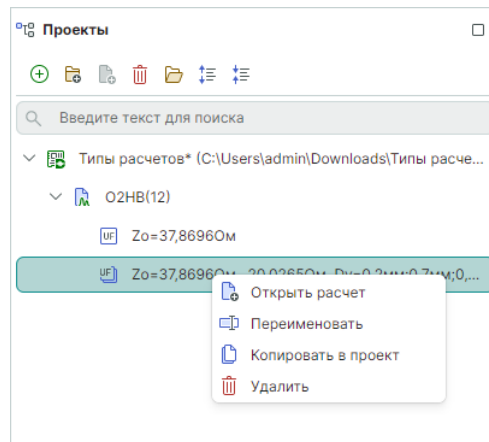


Рис. 27 Контекстное меню расчета

Если после переименования расчета необходимо вернуться к имени по умолчанию, используйте команду контекстного меню «Сбросить имя», см. [Рис. 28](#).

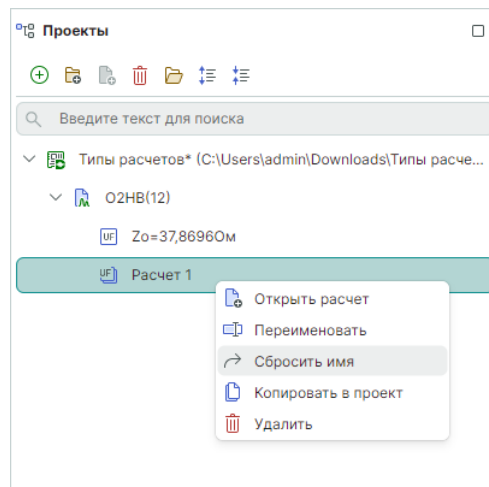










Рис. 28 Сброс имени расчета

Каждый тип расчета в панели «Проекты» и при открытии во вкладке обозначен индивидуальной иконкой ([Рис. 29](#)):




1. Тип расчета «Без потерь»:  – одиночный расчет,  – множественный расчет;

2. Тип расчета «Частотный анализ»:

- «Общие параметры»:  – одиночный расчет,  – множественный расчет;

- «S-параметры»:  – одиночный расчет,  – множественный расчет;
- «Перекрестные помехи»:  – одиночный расчет,  – множественный расчет;

3. Тип расчета «Временной анализ»:

- «Форма сигнала»:  – одиночный расчет для цифрового или аналогового сигнала;
- «S-параметры»:  – множественный расчет;
- «Перекрестные помехи»:  – одиночный расчет для цифрового или аналогового сигнала.

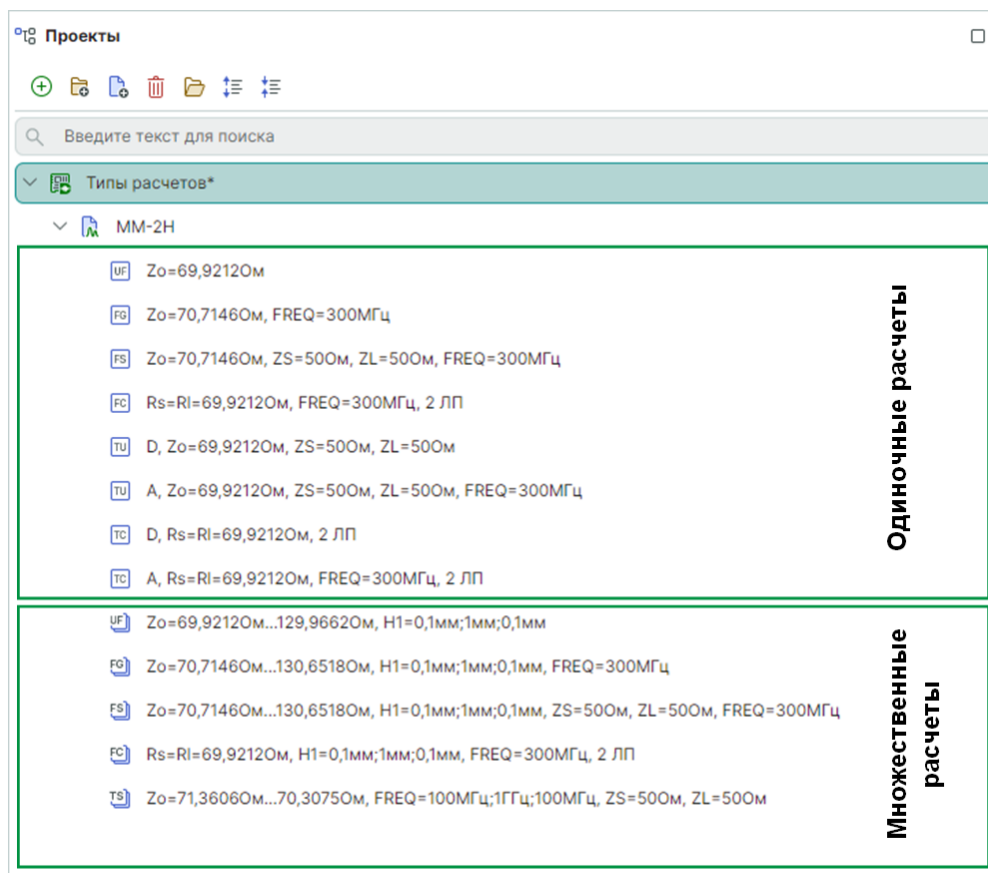


Рис. 29 Типы расчетов в панели проекты

5 Настройки системы

Доступ к настройкам системы выполняется через главное меню «Файл» → «Настройки», см. [Рис. 30](#).

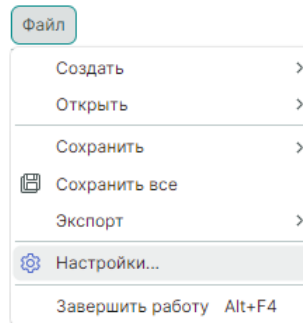


Рис. 30 Вызов настроек системы

Также переход к настройкам редактора возможен с помощью панели инструментов, для перехода нажмите кнопку «Настройка параметров...», см. [Рис. 31](#).



Рис. 31 Переход к настройкам из панели инструментов

Состав настроек отображается в отдельном окне «Панель управления». Настройки системы анализа целостности сигналов SimPCB Lite сгруппированы во вкладки: «Основные», «Линия передачи», «Отверстие», см. [Рис. 32](#).

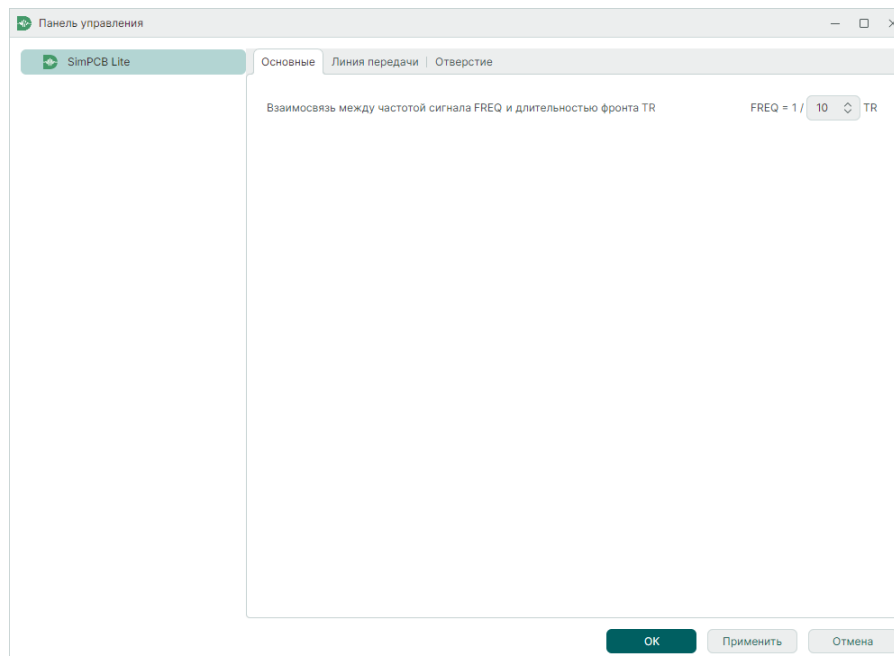


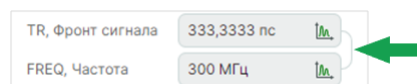
Рис. 32 Общий вид «Панели управления»

Вкладка «Основные»

Доступные настройки на вкладке «Основные» ([Рис. 32](#)):

- «Взаимосвязь между частотой сигнала (FREQ) и длительностью фронта (TR)» – определение соотношения между частотой сигнала и длительностью фронта для расчетов с учетом частоты. Данное соотношение задействовано в расчетах типа «Частотный анализ».

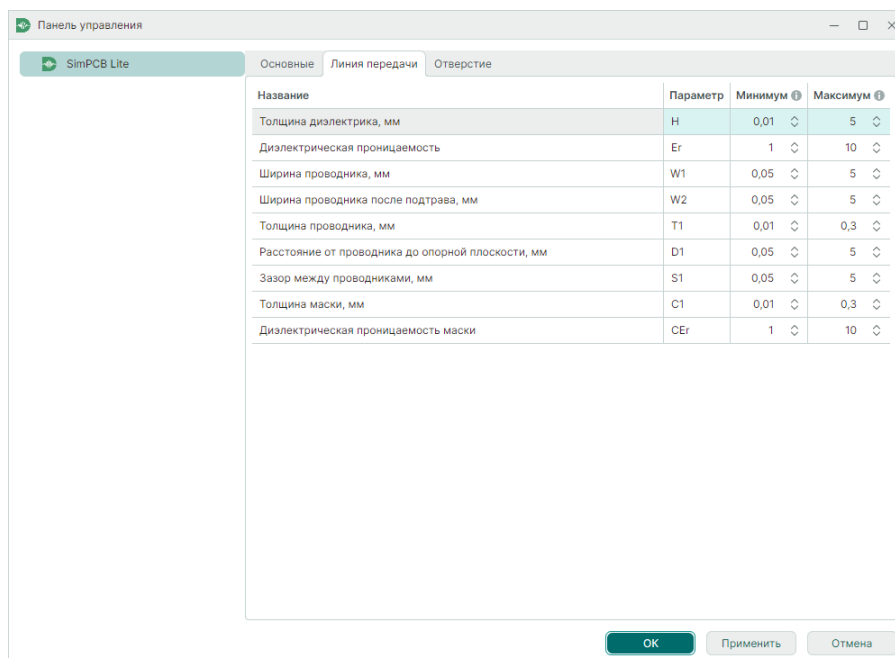
Примечание! В списке параметров частота сигнала и длительность фронта имеют графическое отображение взаимосвязи, при изменении любого из параметров второй пересчитывается автоматически, см. [Рис. 33](#).



Вкладка «Линия передачи»

На вкладке «Линия передачи» в табличном виде представлены ([Рис. 34](#)):

- параметры линии передачи;
- условные обозначения параметров линии передачи;
- диапазон (минимум, максимум), в котором производится поиск решения при обратном расчете, может быть отредактирован.



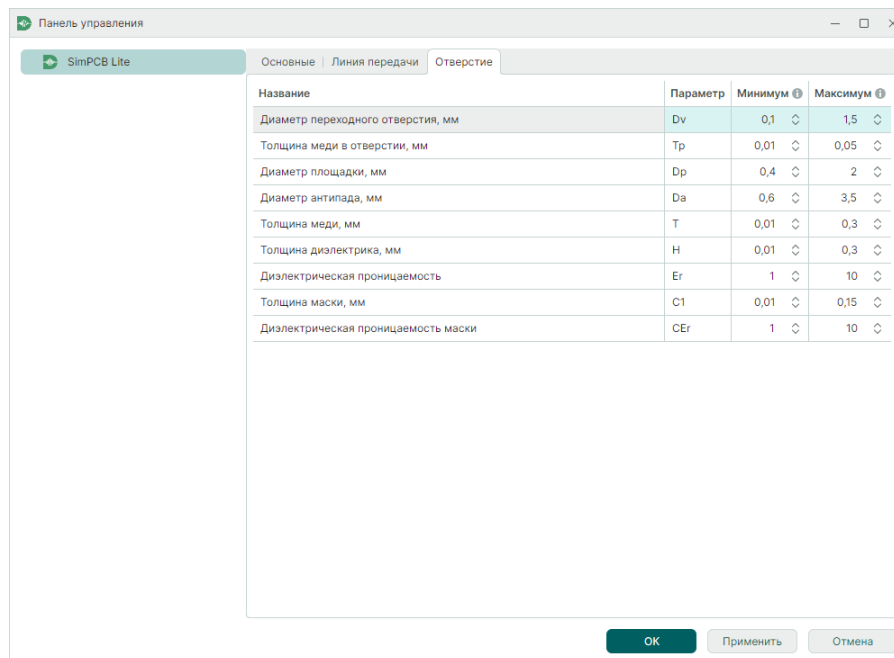
Название	Параметр	Минимум	Максимум
Толщина диэлектрика, мм	H	0,01	5
Диэлектрическая проницаемость	Eg	1	10
Ширина проводника, мм	W1	0,05	5
Ширина проводника после подтравы, мм	W2	0,05	5
Толщина проводника, мм	T1	0,01	0,3
Расстояние от проводника до опорной плоскости, мм	D1	0,05	5
Зазор между проводниками, мм	S1	0,05	5
Толщина маски, мм	C1	0,01	0,3
Диэлектрическая проницаемость маски	CEg	1	10

Рис. 34 Вкладка «Линия передачи»

Вкладка «Отверстие»

На вкладке «Отверстие» в табличном виде представлены ([Рис. 35](#)):

- параметры отверстия;
- условные обозначения параметров;
- диапазон (минимум, максимум), в котором производится поиск решения при обратном расчете, может быть отредактирован.



Название	Параметр	Минимум	Максимум
Диаметр переходного отверстия, мм	Dv	0,1	1,5
Толщина меди в отверстии, мм	Tr	0,01	0,05
Диаметр площадки, мм	Dp	0,4	2
Диаметр антипада, мм	Da	0,6	3,5
Толщина меди, мм	T	0,01	0,3
Толщина диэлектрика, мм	H	0,01	0,3
Диэлектрическая проницаемость	Er	1	10
Толщина маски, мм	C1	0,01	0,15
Диэлектрическая проницаемость маски	CEr	1	10

Рис. 35 Вкладка «Отверстие»



Важно! Определение диапазона значений изменения параметров линии передачи и переходного отверстия необходимо для проведения обратных расчетов и обеспечения высокой скорости математических операций.

6 Расчет параметров линий передачи

6.1 Интерфейс и порядок проведения расчета параметров ЛП

Рабочая область SimPCB Lite для расчета параметров ЛП разделена на несколько областей, каждая из которых отвечает за определенные функции, см. [Рис. 36](#).

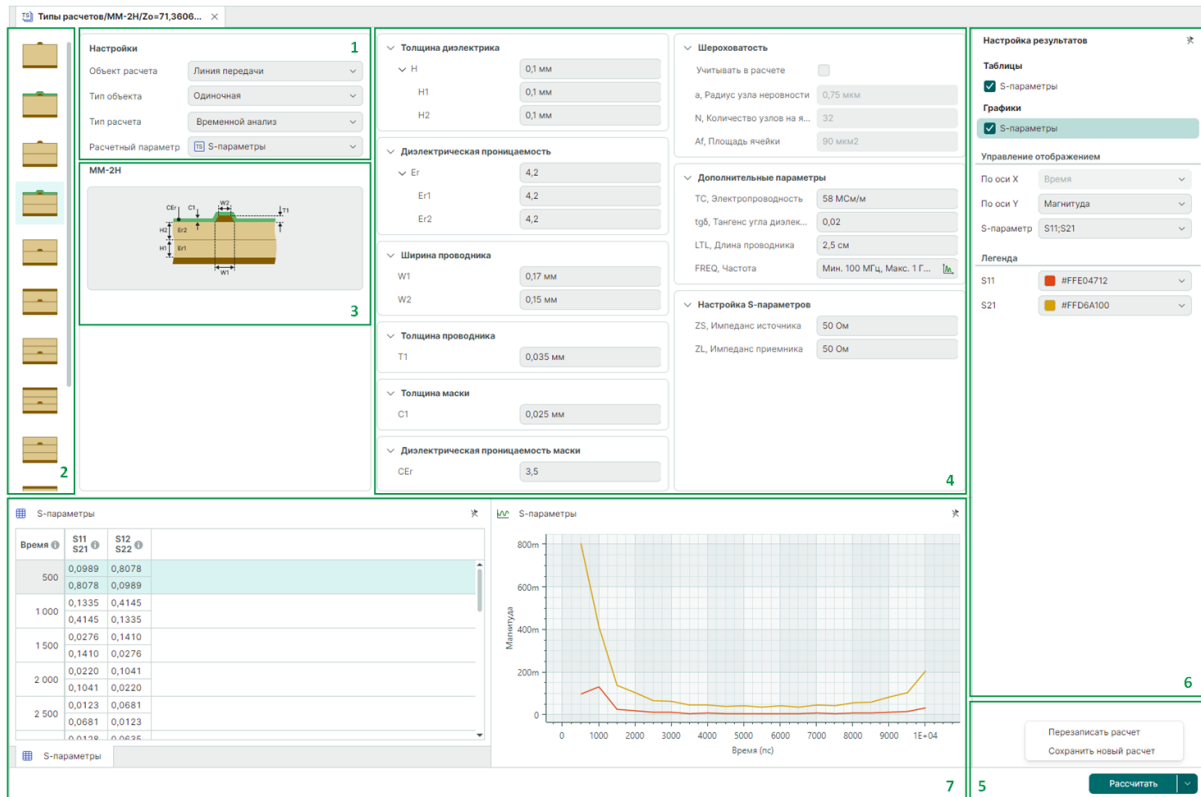


Рис. 36 Интерфейс для расчета параметров ЛП

Для проведения любого расчета параметров линии передачи необходимо выполнить типовую последовательность действий. Выполнение каждого действия соответствует отдельной функциональной области (Рис. 37):

1. Выбор объекта и типа расчета;
2. Выбор модели линии передачи;
3. Просмотр выбранной линии передачи;
4. Определение входных параметров ЛП;
5. Запуск и сохранение расчета;
6. Настройки отображения результатов расчета;
7. Анализ результатов расчета.

6.2 Расчет без потерь

6.2.1 Общие сведения

Расчет «Без потерь» предназначен для решения следующих задач (Рис. 38):

1. Вычисление волнового сопротивления линии передачи по известным геометрическим и электрофизическим параметрам;

2. Определение геометрических параметров линии передачи под заданное волновое сопротивление при условии, что структура печатной платы известна;

3. Расчет вторичных параметров линии передачи (зачастую интерес представляет не только волновое сопротивление, но и погонная задержка и другие параметры).



Рис. 38 Расчет «Без потерь» линии передачи



Примечание! Рекомендуется начинать анализ целостности сигналов с расчета «Без потерь», т.к. при проектировании высокоскоростных и высокочастотных печатных плат, обозначенные выше задачи, как правило, решаются в первую очередь.

В рамках типа расчета «Без потерь» могут быть проведены следующие типы расчетов:

- Одиночный расчет – расчет волнового сопротивления или дифференциального волнового сопротивления и вторичных параметров линии передачи;
- Обратный расчет – расчет одного из параметров ЛП и вторичных параметров ЛП при заданном волновом сопротивлении или дифференциальном волновом сопротивлении;
- Множественный расчет – расчет параметров ЛП, когда для одного из параметров задан диапазон значений и шаг изменения;
- Обратный множественный расчет – расчет одного из параметров ЛП и вторичных параметров ЛП при заданном волновом сопротивлении или дифференциальном волновом сопротивлении, когда для одного из параметров задан диапазон значений и шаг изменения.

Наименования расчетов формируются по следующим шаблонам ([Рис. 39](#)):

а) Одиночный расчет: рассчитанное значение волнового сопротивления (Z_0) или дифференциального волнового сопротивления (Z_{diff}). Пример: $Z_0=51,344\text{Ом}$.

б) Обратный расчет: рассчитанное значение искомого параметра, заданное значение волнового сопротивления или дифференциального волнового сопротивления. Пример: $H1=0,0956\text{мм}$, $Zo=50\text{Ом}$.

в) Множественный расчет: диапазон рассчитанных значений волнового сопротивления или дифференциального волнового сопротивления, диапазон заданных значений и шаг изменяемого параметра. Пример: $Zo=64,7438\dots45,6891\text{Ом}$, $W1=0,1;0,2;0,01\text{мм}$.

г) Обратный множественный расчет: диапазон рассчитанных значений искомого параметра, заданное значение волнового сопротивления или дифференциального волнового сопротивления, диапазон значений и шаг изменяемого параметра. Пример: $H1=0,0588\dots0,1112\text{мм}$, $Zo=50\text{Ом}$, $W1=0,1;0,2;0,01\text{мм}$.

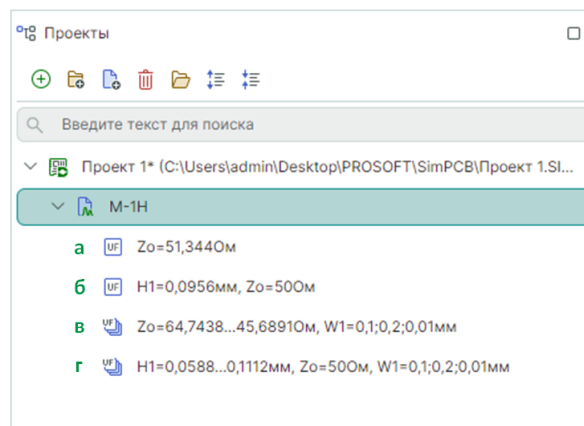


Рис. 39 Наименования расчетов для типа «Без потерь»

6.2.2 Одиночный расчет одиночной или копланарной одиночной ЛП

Под одиночным расчетом одиночной и копланарной одиночной линии передачи подразумевается расчет волнового сопротивления и вторичных параметров линии передачи с заданными геометрическими и электрофизическими параметрами ЛП.

Для проведения одиночного расчета выполните следующие действия:

1. Определите стартовые настройки расчета ([Рис. 40](#)):

- «Объект расчета» – «Линия передачи»;
- «Тип объекта» – «Одиночная» или «Копланарная одиночная»;
- «Тип расчета» – «Без потерь».

2. Выберите модель линии передачи. При наведении курсора мыши на одну из моделей доступны всплывающие подсказки с наименованием и кодовым обозначением модели.

3. Область просмотра предоставляет подробное описание выбранной модели линии передачи: наименование модели (при наведении курсора), кодовое обозначение, изображение модели с условными обозначениями ключевых при моделировании параметров.

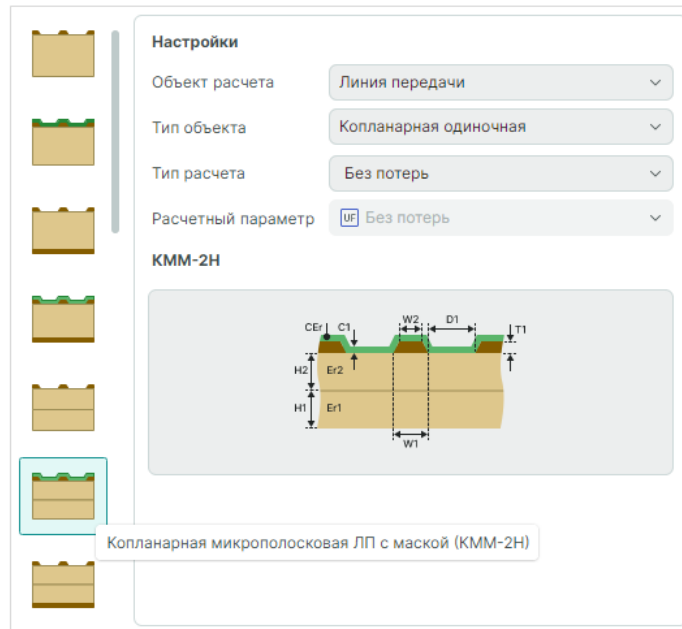


Рис. 40 Стартовые настройки расчета

Для моделей линий передачи с проводниками во внутренних слоях доступна опция «Перевернуть проводник». Применение данной опции производится при установке флага в чек-боксе и позволяет определить положение ядра (основания диэлектрика) в модели печатной платы, см. [Рис. 41](#).

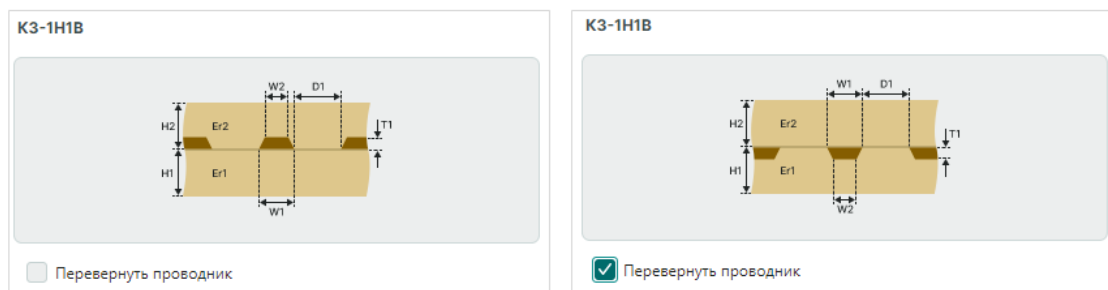


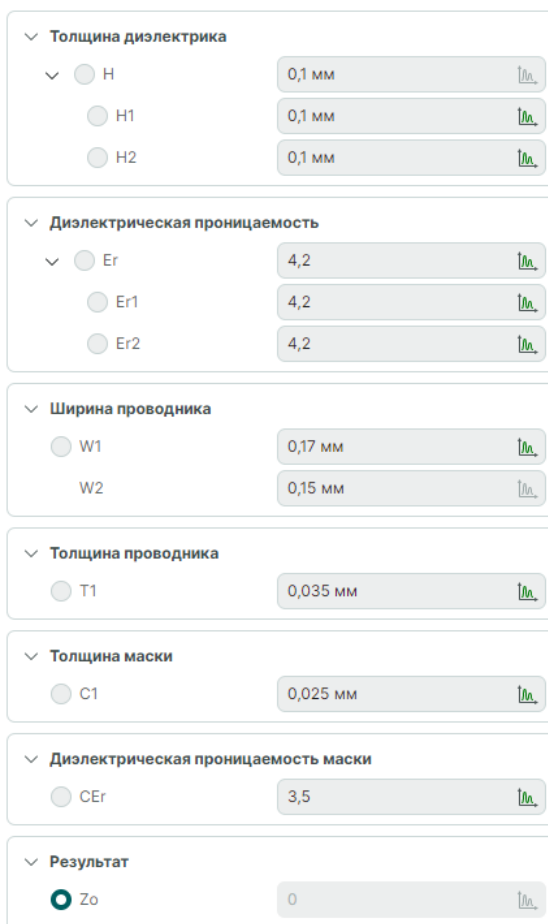
Рис. 41 Пример модели с опцией «Перевернуть проводник»

4. Определите входные параметры линии передачи. Набор параметров может изменяться в зависимости от выбранной модели ЛП.

Для одиночной линии передачи полный набор параметров ([Рис. 42](#)):

- Н – толщина диэлектрика. Количество параметров Н (Н1, Н2, Н3 и т.д.) зависит от количества диэлектриков в выбранной модели.

- ϵ_r – диэлектрическая проницаемость. Количество параметров ϵ_r (ϵ_{r1} , ϵ_{r2} , ϵ_{r3} и т.д.) зависит от количества диэлектриков в выбранной модели.
- $W1$ – ширина проводника.
- $W2$ – ширина проводника после подтравы.
- $T1$ – толщина проводника.
- $C1$ – толщина маски.
- ϵ_{cr} – диэлектрическая проницаемость маски.



Параметр	Значение
Толщина диэлектрика	
<input checked="" type="radio"/> H	0,1 мм
<input type="radio"/> H1	0,1 мм
<input type="radio"/> H2	0,1 мм
Диэлектрическая проницаемость	
<input checked="" type="radio"/> ϵ_r	4,2
<input type="radio"/> ϵ_{r1}	4,2
<input type="radio"/> ϵ_{r2}	4,2
Ширина проводника	
<input checked="" type="radio"/> $W1$	0,17 мм
<input type="radio"/> $W2$	0,15 мм
Толщина проводника	
<input checked="" type="radio"/> $T1$	0,035 мм
Толщина маски	
<input checked="" type="radio"/> $C1$	0,025 мм
Диэлектрическая проницаемость маски	
<input checked="" type="radio"/> ϵ_{cr}	3,5
Результат	
<input checked="" type="radio"/> Z_0	0

Рис. 42 Параметры одиночной ЛП

Для копланарной одиночной линии передачи аналогичный набор параметров дополняется параметром (Рис. 43):

- $D1$ – расстояние от проводника до опорной плоскости.

Толщина диэлектрика	<input type="radio"/> H1	0,1 мм	
Диэлектрическая проницаемость	<input type="radio"/> Er1	4,2	
Ширина проводника	<input type="radio"/> W1	0,17 мм	
	W2	0,15 мм	
Расстояние от проводника до опорной плоскости	<input type="radio"/> D1	0,2 мм	
Толщина проводника	<input type="radio"/> T1	0,035 мм	
Толщина маски	<input type="radio"/> C1	0,025 мм	
Диэлектрическая проницаемость маски	<input type="radio"/> CEr	3,5	
Результат	<input checked="" type="radio"/> Zo	0	

Рис. 43 Параметры копланарной одиночной ЛП

Единицы измерения присутствуют в каждом поле входных параметров, кроме безразмерных величин (диэлектрическая проницаемость, диэлектрическая проницаемость маски и т.д.). Ввод значений доступен как в единицах измерения по умолчанию, так в других удобных единицах измерения. Пересчет значений производится автоматически, см. [Рис. 44](#).

Толщина диэлектрика	<input type="radio"/> H1	100 мкм		→	Толщина диэлектрика	<input type="radio"/> H1	0,1 мм	
---------------------	--------------------------	---------	--	---	---------------------	--------------------------	--------	--

Рис. 44 Автоматический пересчет единиц измерения

В случае если введенное значение параметра не попадает в диапазон значений, установленный в [Настройках системы](#), будет получено предупреждение о необходимости изменить значение, см. [Рис. 45](#).

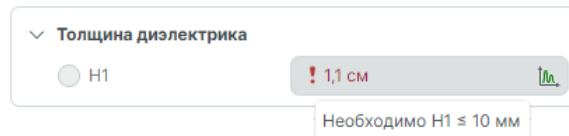


Рис. 45 Предупреждение о несоответствии значения параметра диапазону

При редактировании параметра условное обозначение параметра на модели в области просмотра будет выделено красным цветом, см. [Рис. 46](#).

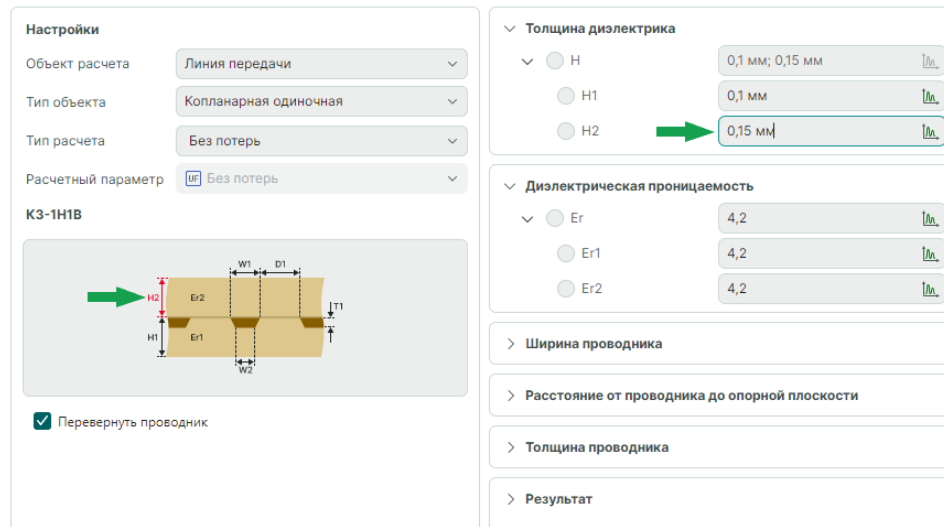


Рис. 46 Область просмотра и параметры ЛП

5. Запустите расчет волнового сопротивления и вторичных параметров линии передачи с помощью кнопки «Рассчитать» в правом нижнем углу вкладки расчета.

При необходимости выберите вариант сохранения, выбранный вариант «запоминается» до следующего изменения ([Рис. 47](#)):

- «Переписать расчет» – существующий расчет при изменении модели или параметров ЛП будет перезаписан;
- «Сохранить новый расчет» – существующий расчет не будет изменен, новый расчет с измененной моделью или параметрами ЛП будет отображен в панели «Проекты».

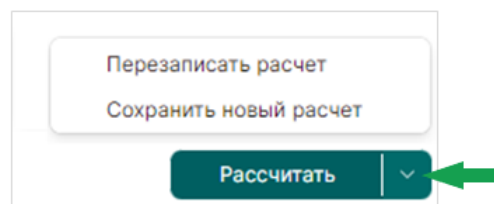
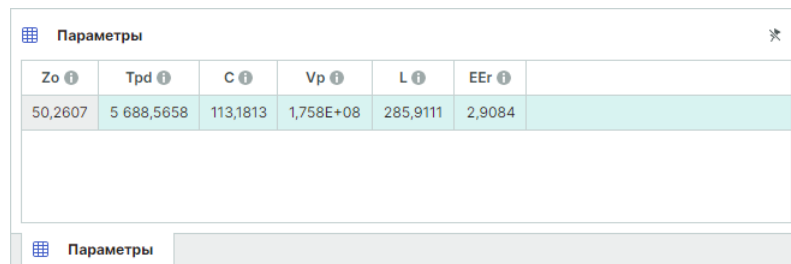


Рис. 47 Варианты сохранения расчета

6. Для одиночного расчета одиночной или копланарных одиночной линии передачи настройка результатов расчета не требуется, рассчитанные параметры представляются в виде таблицы в нижней области вкладки ([Рис. 48](#)):

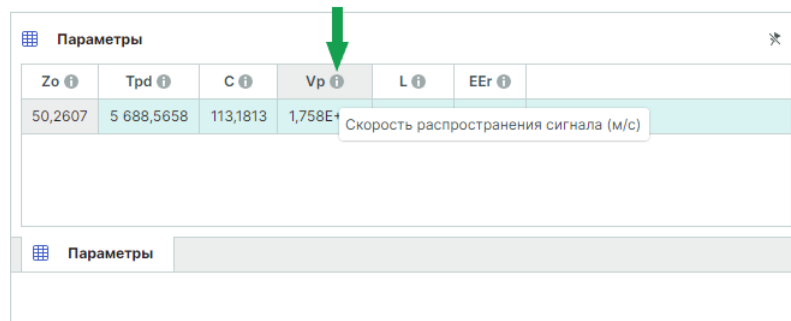
- Z_0 – волновое сопротивление (Ом);
- T_{pd} – задержка в проводнике (пс/м);
- C – погонная емкость (пФ/м);
- V_p – скорость распространения сигнала (м/с);
- L – погонная индуктивность (нГн/м);
- E_{Er} – эффективная диэлектрическая проницаемость.



Z_0	T_{pd}	C	V_p	L	E_{Er}
50,2607	5 688,5658	113,1813	1,758E+08	285,9111	2,9084

Рис. 48 Результаты одиночного расчета

При наведении курсора мыши на условные обозначения рассчитанных параметров доступны всплывающие подсказки с описанием, см. [Рис. 49](#).



Z_0	T_{pd}	C	V_p	L	E_{Er}
50,2607	5 688,5658	113,1813	1,758E+08	285,9111	2,9084

Скорость распространения сигнала (м/с)

Рис. 49 Всплывающие подсказки для параметров

Пример расчета волнового сопротивления и вторичных параметров линии передачи с помощью одиночного расчета приведен в разделе Расчет волнового сопротивления.

6.2.3 Одиночный расчет дифф. пары или копланарной дифф. пары

Под одиночным расчетом дифференциальной пары и копланарной дифференциальной пары подразумевается расчет дифференциального

волнового сопротивления и вторичных параметров линии передачи с заданными геометрическими и электрофизическими параметрами.

Для проведения одиночного расчета выполните следующие действия:

1. Определите стартовые настройки расчета ([Рис. 50](#)):

- «Объект расчета» – «Линия передачи»;
- «Тип объекта» – «Дифф. пара» или «Копланарная дифф. пара»;
- «Тип расчета» – «Без потерь».

2. Выберите модель линии передачи и ознакомьтесь с описанием выбранной модели в области просмотра.

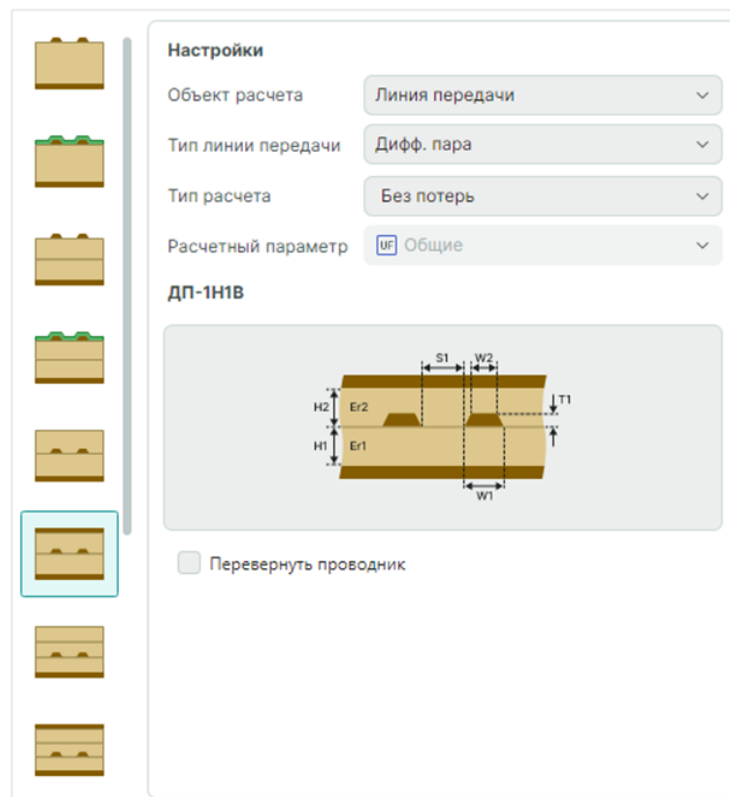


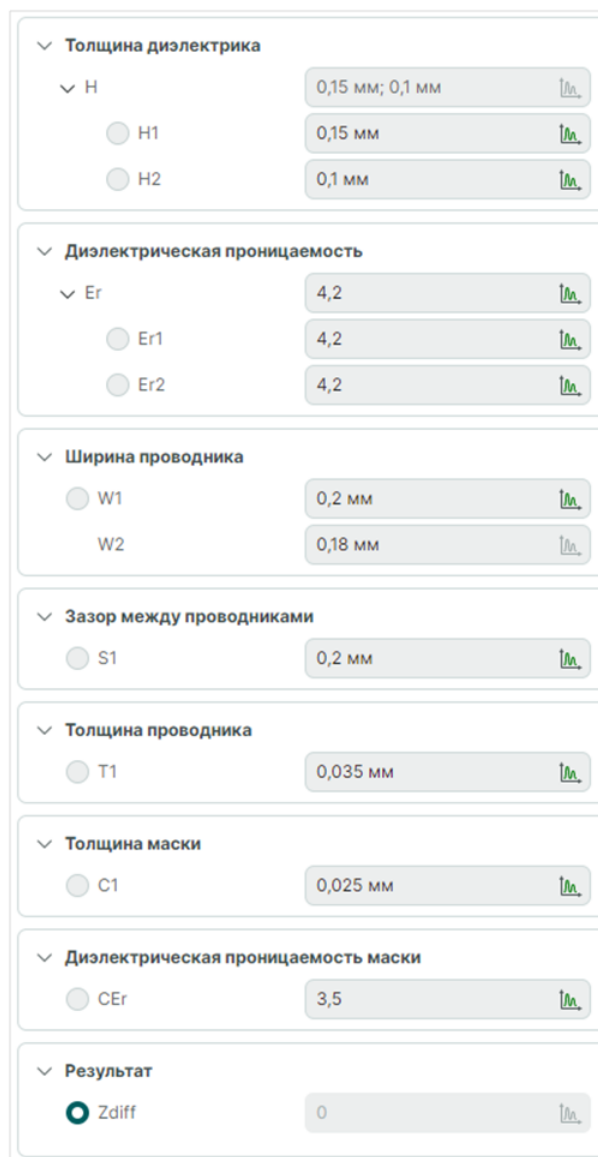
Рис. 50 Стартовые настройки расчета

4. Определите входные параметры линии передачи. Набор параметров может изменяться в зависимости от выбранной модели ЛП.

Для дифф. пары полный набор параметров ([Рис. 51](#)):

- Н – толщина диэлектрика. Количество параметров Н (Н1, Н2, Н3 и т.д.) зависит от количества диэлектриков в выбранной модели.

- Er – диэлектрическая проницаемость. Количество параметров Er (Er1, Er2, Er3 и т.д.) зависит от количества диэлектриков в выбранной модели.
- W1 – ширина проводника.
- W2 – ширина проводника после подтравы.
- S1 – зазор между проводниками.
- T1 – толщина проводника.
- C1 – толщина маски.
- CEr – диэлектрическая проницаемость маски.

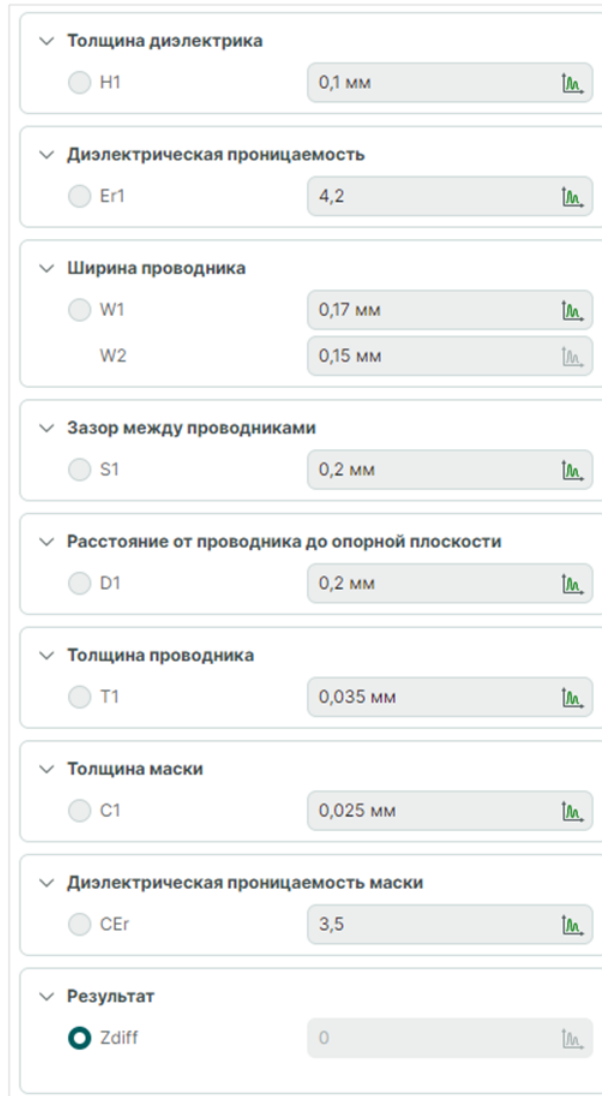


Параметр	Значение
Толщина диэлектрика	
Н	0,15 мм; 0,1 мм
H1	0,15 мм
H2	0,1 мм
Диэлектрическая проницаемость	
Er	4,2
Er1	4,2
Er2	4,2
Ширина проводника	
W1	0,2 мм
W2	0,18 мм
Зазор между проводниками	
S1	0,2 мм
Толщина проводника	
T1	0,035 мм
Толщина маски	
C1	0,025 мм
Диэлектрическая проницаемость маски	
CEr	3,5
Результат	
Zdiff	0

Рис. 51 Параметры дифф. пары

Для копланарной дифф. пары аналогичный набор параметров дополняется параметром (Рис. 52):

- D1 – расстояние от проводника до опорной плоскости.



Толщина диэлектрика	H1	0,1 мм
Диэлектрическая проницаемость	Er1	4,2
Ширина проводника	W1	0,17 мм
	W2	0,15 мм
Зазор между проводниками	S1	0,2 мм
Расстояние от проводника до опорной плоскости	D1	0,2 мм
Толщина проводника	T1	0,035 мм
Толщина маски	C1	0,025 мм
Диэлектрическая проницаемость маски	CEr	3,5
Результат	Zdiff	0

Рис. 52 Параметры копланарной дифф. пары

5. Запустите расчет дифференциального волнового сопротивления и вторичных параметров линии передачи с помощью кнопки «Рассчитать».

6. Для одиночного расчета дифф. пар или копланарных дифф. пар доступен выбор отображения рассчитанного волнового сопротивления в панели «Настройка результатов» (Рис. 53):

- «Дифференциальный» – отображение дифференциального волнового сопротивления (Zdiff);

- «Общий» – отображение волнового сопротивления дифференциальной пары в режиме сигнала общего вида (Z_{comm});
- «Нечетная мода» – отображение волнового сопротивления линии, запитанной нечетной модой (Z_{odd});
- «Четная мода» – отображение волнового сопротивления линии, запитанной четной модой (Z_{even}).

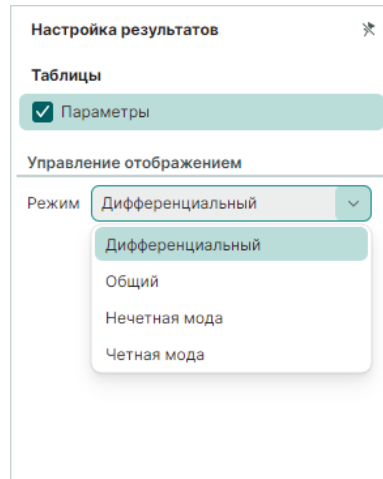
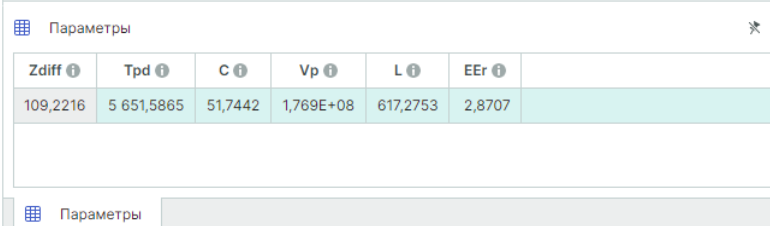


Рис. 53 Режимы отображения рассчитанных параметров

7. Волновое сопротивление и вторичные параметры ЛП будут отображены в нижней области вкладки в соответствии с выбранным режимом отображения ([Рис. 54](#)):

- $Z_{diff}/Z_{comm}/Z_{odd}/Z_{even}$ – волновое сопротивление (Ом);
- T_{pd} – задержка в проводнике (пс/м);
- C – погонная емкость (пФ/м);
- V_p – скорость распространения сигнала (м/с);
- L – погонная индуктивность (нГн/м);
- E_{Er} – эффективная диэлектрическая проницаемость.



Zdiff	Tpd	C	Vp	L	EEr
109,2216	5 651,5865	51,7442	1,769E+08	617,2753	2,8707

Рис. 54 Результаты одиночного расчета дифф. пары

Пример расчета волнового сопротивления и вторичных параметров дифф. пары приведен в разделе [Расчет дифференциального волнового сопротивления](#).

6.2.4 Обратный расчет

Под обратным расчетом линии передачи подразумевается расчет одного из параметров ЛП и вторичных параметров ЛП при заданном волновом сопротивлении или дифференциальном волновом сопротивлении. Проведение обратного расчета доступно для любой модели линии передачи.

Для проведения обратного расчета выполните следующие действия:

1. Определите стартовые настройки расчета:

- «Объект расчета» – «Линия передачи»;
- «Тип объекта» – «Одиночная», «Дифф. пара», «Копланарная одиночная» или «Копланарная дифф. пара»;
- «Тип расчета» – «Без потерь».

2. Выберите модель линии передачи и ознакомьтесь с описанием модели в области просмотра.

3. Выберите параметр, значение которого необходимо рассчитать, и установите переключатель напротив. Определите остальные входные параметры линии передачи, в том числе и значение волнового сопротивления, см. [Рис. 55](#).

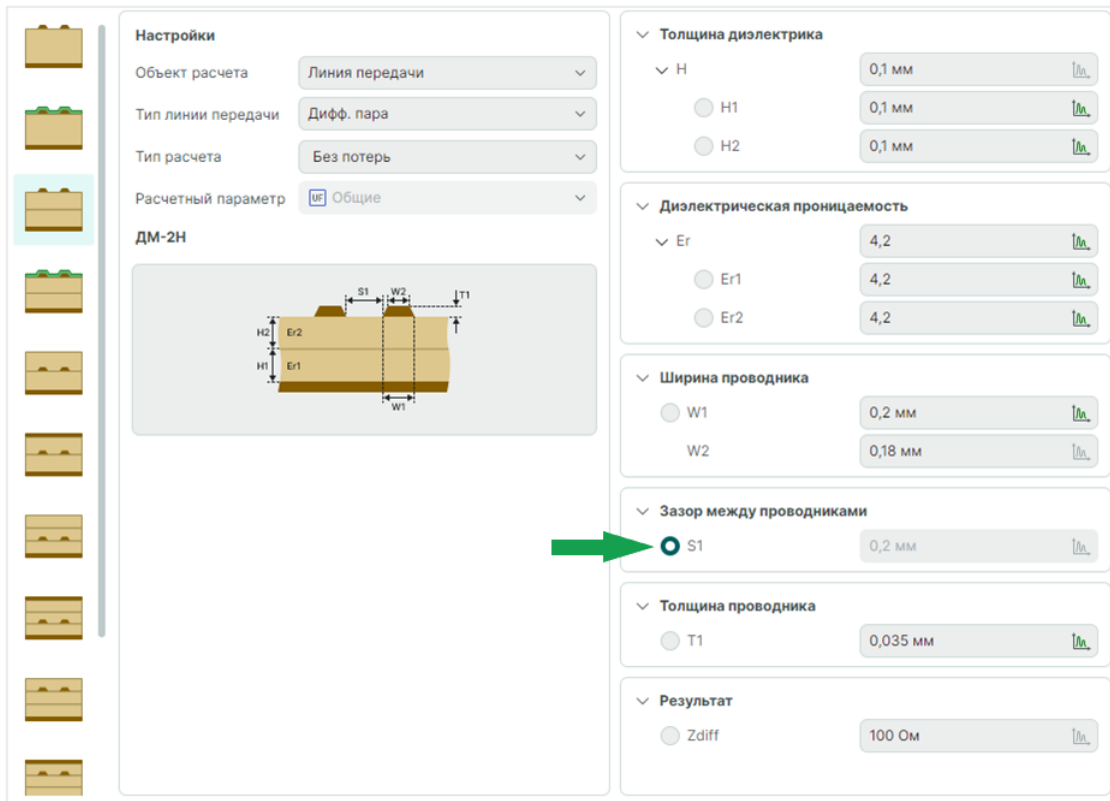


Рис. 55 Расчет зазора между проводниками

4. Запустите расчет выбранного параметра и вторичных параметров ЛП с помощью кнопки «Рассчитать».

5. В таблице с результатами первый столбец будет отображать параметр, выбранный для расчета, см. [Рис. 56](#).

Параметры	Zdiff	Tpd	C	Vp	L	EEr
S1	100,0434	5 249,9908	52,4771	1,905E+08	525,2269	2,4772

Рис. 56 Результаты обратного расчета

Пример практического применения обратного расчета для одиночной линии передачи см. в разделе [Расчет ширины проводника](#), для дифф. пары — [Расчет параметров дифф. пары](#).

6.2.5 Множественный расчет

Под множественным расчетом линии передачи подразумевается расчет волнового сопротивления или дифференциального волнового сопротивления и

вторичных параметров ЛП, геометрических параметров ЛП при заданном волновом сопротивлении или дифференциальном волновом сопротивлении, когда один из входных параметров задан в виде диапазона значений с установленным шагом изменения.

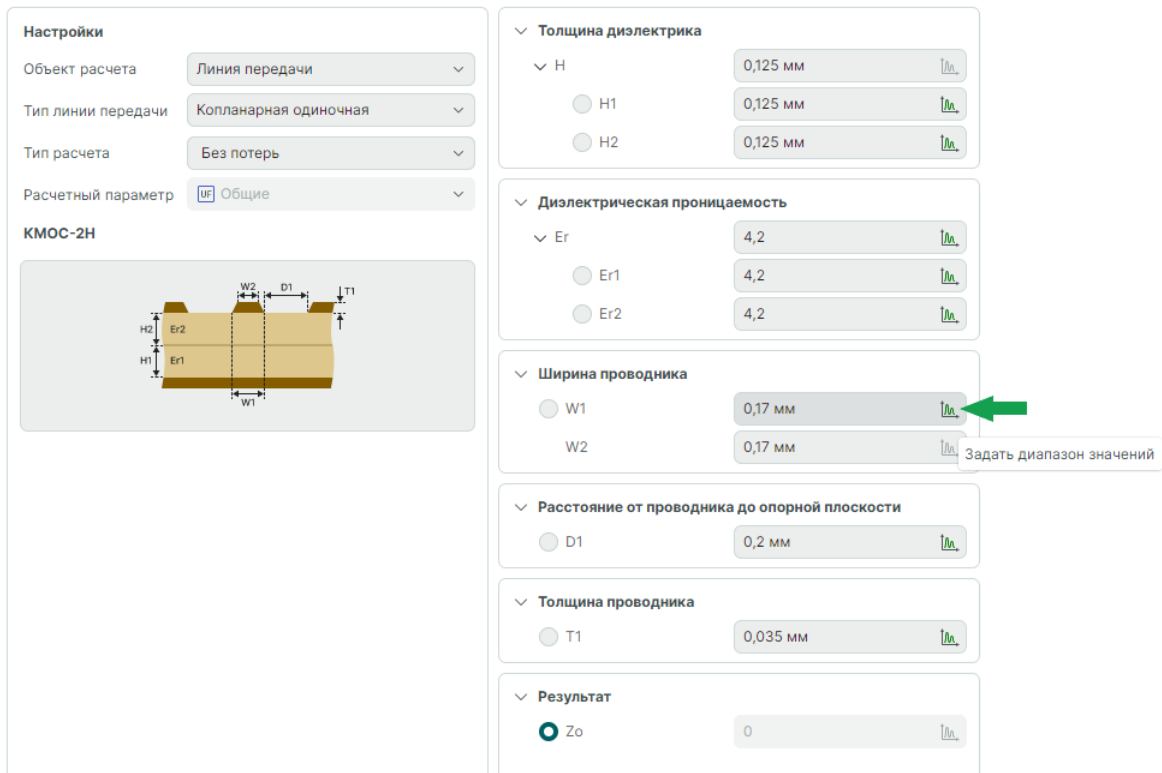
Для проведения множественного расчета выполните следующие действия:

1. Определите стартовые настройки расчета:

- «Объект расчета» – «Линия передачи»;
- «Тип объекта» – «Одиночная», «Дифф. пара», «Копланарная одиночная» или «Копланарная дифф. пара»;
- «Тип расчета» – «Без потерь».

2. Выберите модель линии передачи и ознакомьтесь с описанием модели в области просмотра.

3. Определите входные параметры линии передачи. Выберите параметр, значение которого при расчете будет изменяться в установленном диапазоне, см. [Рис. 57](#).



Настройки

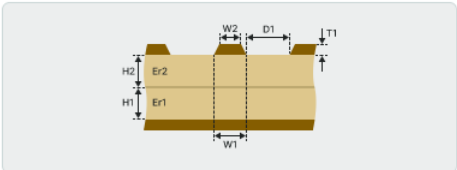
Объект расчета: Линия передачи

Тип линии передачи: Копланарная одиночная

Тип расчета: Без потерь

Расчетный параметр: **W1** Общие

КМОС-2H



Толщина диэлектрика

- H: 0,125 мм
- H1: 0,125 мм
- H2: 0,125 мм

Диэлектрическая проницаемость

- Er: 4,2
- Er1: 4,2
- Er2: 4,2

Ширина проводника

- W1: 0,17 мм
- W2: 0,17 мм

Расстояние от проводника до опорной плоскости

- D1: 0,2 мм

Толщина проводника



- T1: 0,035 мм


Результат

- Zo: 0

Рис. 57 Выбор изменяемого параметра



Примечание! Для параметров, значение которых можно задать в диапазоне, в поле значения отображена кнопка , а для параметров, значение которых нельзя задать в диапазоне, кнопка  неактивна и отображается серым цветом.

Для определения диапазона значения параметра нажмите на кнопку , в окне «Диапазон значения» установите минимальное и максимальное значения диапазона, а также шаг изменения значения параметра, и нажмите «Применить», см. [Рис. 58](#).

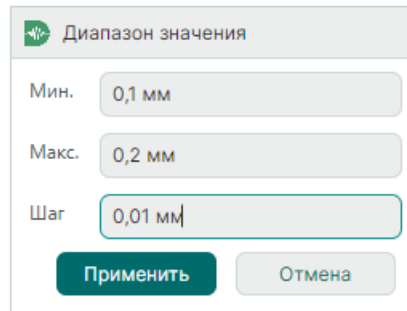


Рис. 58 Диапазон значения

Установленный диапазон будет отображен в поле значения параметра, остальные кнопки диапазонов станут недоступными, также данный параметр станет недоступным для выбора при обратном расчете, см. [Рис. 59](#).

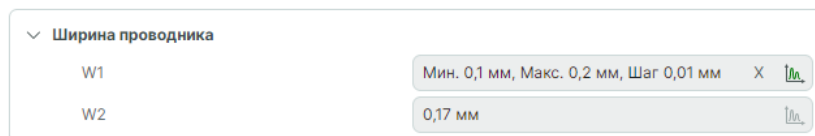


Рис. 59 Отображение диапазона значения

Сброс диапазона производится с помощью кнопки X, см. [Рис. 60](#).

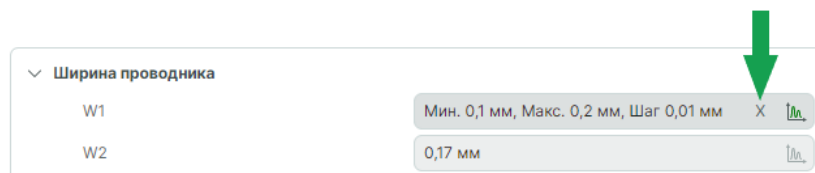


Рис. 60 Сброс диапазона

4. Запустите расчет выбранного параметра, волнового сопротивления и вторичных параметров ЛП с помощью кнопки «Рассчитать».

5. Результаты для множественного расчета имеют представление в табличном виде и в виде графиков:

- В таблице с результатами первый столбец будет содержать диапазон значений, для каждого значения диапазона приведено значение рассчитываемого параметра, волнового сопротивления и вторичных параметров линии передачи, см. [Рис. 61](#).

W1	W2	Zo	Trd	C	Vp	L	Eεr
0,1000	0,1000	84,8161	5 238,3989	61,7618	1,909E+08	444,3007	2,4663
0,1100	0,1100	82,4519	5 255,0407	63,7346	1,903E+08	433,2882	2,4820
0,1200	0,1200	80,2692	5 271,0550	65,6672	1,897E+08	423,1033	2,4971
0,1300	0,1300	78,2532	5 285,9204	67,5489	1,892E+08	413,6402	2,5112
0,1400	0,1400	76,3667	5 300,3827	69,4070	1,887E+08	404,7727	2,5250
0,1500	0,1500	74,6240	5 313,1060	71,1983	1,882E+08	396,4853	2,5371
0,1600	0,1600	72,9682	5 326,3116	72,9949	1,877E+08	388,6516	2,5497
0,1700	0,1700	71,4127	5 339,1826	74,7651	1,873E+08	381,2856	2,5621
0,1800	0,1800	69,9387	5 351,4767	76,5167	1,869E+08	374,2754	2,5739
0,1900	0,1900	68,5496	5 363,4913	78,2425	1,864E+08	367,6650	2,5855
0,2000	0,2000	67,2225	5 375,0914	79,9598	1,86E+08	361,3269	2,5966

Рис. 61 Результаты множественного расчета в виде таблицы

- Графики доступны в отдельной вкладке, расположение которой можно изменять при помощи навигационных кнопок, см. [Рис. 62](#).

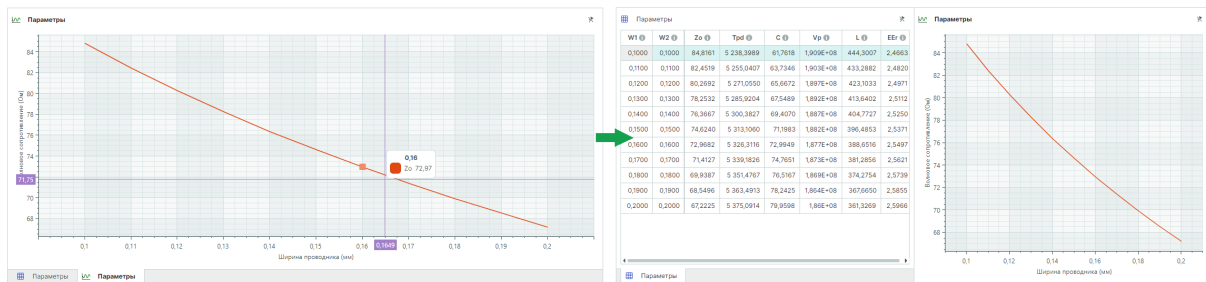


Рис. 62 Пример расположения вкладки

По оси X графика отображается параметр, значение которого задано в диапазоне для множественного расчета. Параметр по оси Y может быть изменен в панели «Настройка результатов», см. [Рис. 63](#).

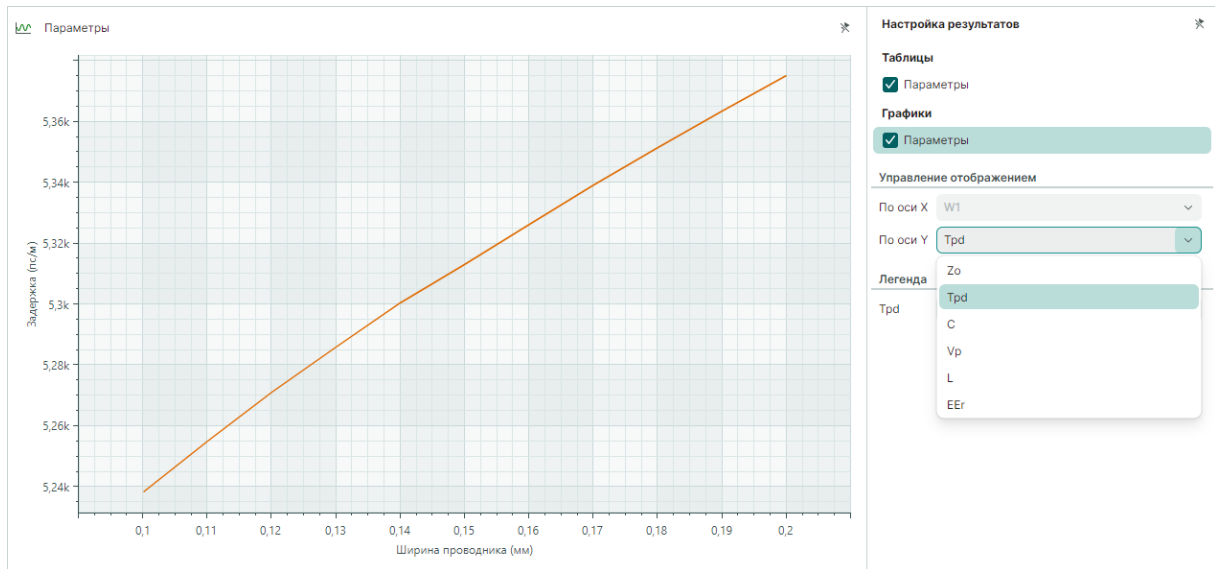


Рис. 63 Выбор параметра для отображения

При перемещении по графику курсор «привязывается» к одному из значений параметра по оси X, отображается виджет с информацией о значении параметров по оси X и Y. Направляющие линии позволяют отследить более точные значения параметров, см. [Рис. 64](#).

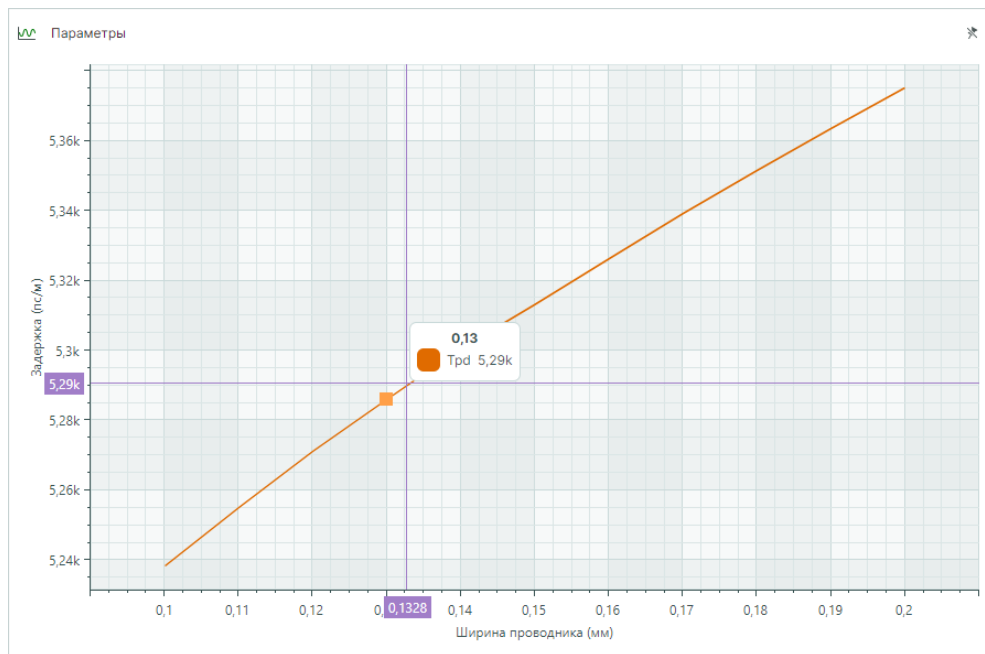


Рис. 64 Виджет и направляющие на графике

Цвет любого графика может быть изменен с помощью выпадающего меню в разделе «Легенда», см. [Рис. 65](#).

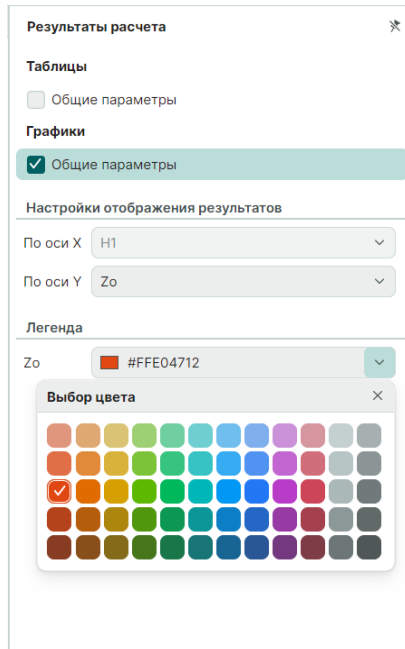


Рис. 65 Выбор цвета графика

6.3 Частотный анализ

6.3.1 Общие сведения

«Частотный анализ» включает в себя целый комплекс вычислений:

1. Расчет «Общие параметры» доступен для всех типов линий передачи в SimPCB Lite и позволяет вычислить волновое сопротивление и ряд вторичных параметров линии передачи, определить уровень потерь в линии передачи, рассчитать длину ЛП при заданном уровне потерь, см. [Рис. 66](#).



Рис. 66 Расчет «Общие параметры»

В рамках типа расчета «[Общие параметры](#)» могут быть проведены одиночные и множественные расчеты параметров ЛП с учетом частоты.

Наименования расчетов формируются по следующим шаблонам ([Рис. 67](#)):

а) Одиночный расчет: рассчитанное значение волнового сопротивления (Z_0) или дифференциального волнового сопротивления (Z_{diff}), значение частоты, используемое в расчете (FREQ). Пример: $Z_0=49,5613\text{Ом}$, FREQ=300МГц.

б) Множественный расчет: диапазон рассчитанных значений волнового сопротивления или дифференциального волнового сопротивления, диапазон значений и шаг изменяемого параметра, значение частоты, используемое в расчете. Пример: $Z_0=49,5613\dots127,2094\text{Ом}$, $H1=0,1;1;0,1\text{мм}$, FREQ=300МГц.



Примечание! Если изменяемым параметром является длина проводника (LTL), то рассчитанное значение волнового сопротивления или дифференциального волнового сопротивления одно для всего диапазона LTL. Пример: $Z_{diff}=95,8612\text{Ом}$, LTL=10;100;10мм, FREQ=300МГц.

в) Множественный расчет, когда изменяемым параметром является частота: диапазон рассчитанных значений волнового сопротивления или дифференциального волнового сопротивления, диапазон значений частоты. Пример: $Z_0=50,2759\dots49,1237\text{Ом}$, FREQ=100;1 000;100МГц.

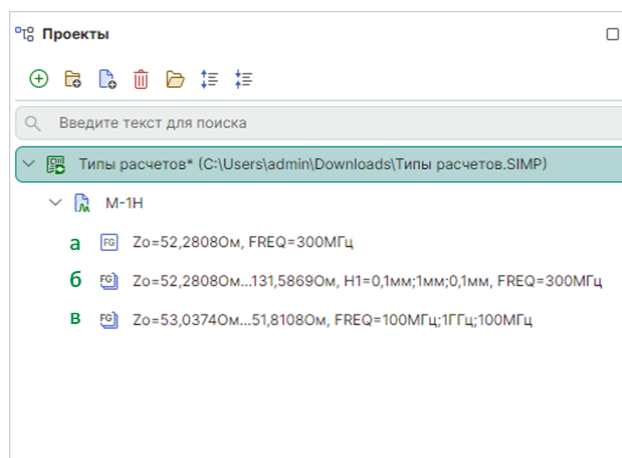


Рис. 67 Наименования расчетов для типа «Общие параметры»

2. Расчет «[S-параметры](#)» доступен для всех типов линий передачи в SimPCB Lite и позволяет оценить энергетическую эффективность линии передачи, определить уровень отраженных волн, см. [Рис. 68](#).

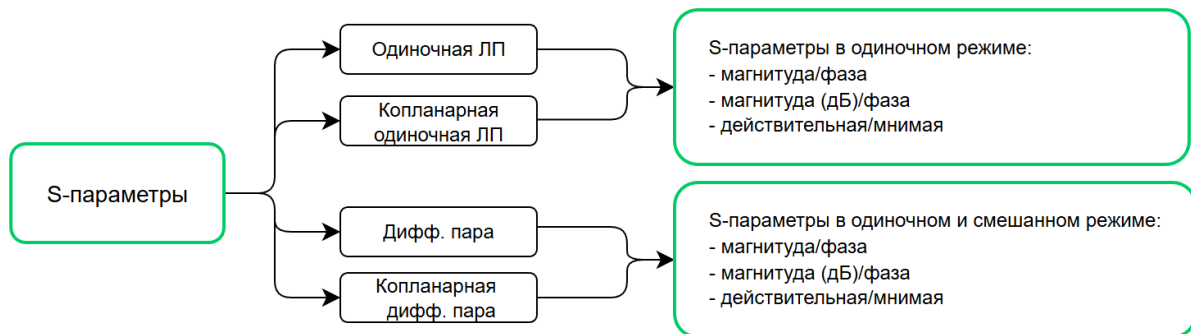


Рис. 68 Расчет «S-параметры»

В рамках типа расчета «S-параметры» могут быть проведены одиночные и множественные расчеты.

Наименования расчетов формируются по следующим шаблонам ([Рис. 69](#)):

а) Одиночный расчет: рассчитанное значение волнового сопротивления (Z_0) или дифференциального волнового сопротивления (Z_{diff}), сопротивление источника (Z_S), сопротивление приемника (Z_L), значение частоты, используемое в расчете (FREQ). Пример: $Z_0=46,5567\text{Ом}$, $Z_S=50\text{Ом}$, $Z_L=50\text{Ом}$, FREQ=300МГц.

б) Множественный расчет: диапазон рассчитанных значений волнового сопротивления или дифференциального волнового сопротивления, диапазон значений и шаг изменяемого параметра, сопротивление источника, сопротивление приемника, значение частоты, используемое в расчете. Пример: $Z_0=48,6805...45,087\text{Ом}$, $T1=0,015;0,055;0,005\text{мм}$, $Z_S=50\text{Ом}$, $Z_L=50\text{Ом}$, FREQ=300МГц.



Примечание! Если изменяемым параметром является длина проводника (LTL), сопротивление источника (Z_S) или сопротивление приемника (Z_L), то рассчитанное значение волнового сопротивления или дифференциального волнового сопротивления одно для всего диапазона параметров LTL, Z_S , Z_L . Пример: $Z_0=46,5567\text{Ом}$, $Z_S=40;60;2\text{Ом}$, $Z_L=50\text{Ом}$, FREQ=300МГц.

в) Множественный расчет, когда изменяемым параметром является частота: диапазон рассчитанных значений волнового сопротивления или дифференциального волнового сопротивления, диапазон значений частоты, сопротивление источника, сопротивление приемника. Пример: $Z_0=47,2281...46,1457\text{Ом}$, FREQ=100;1 000;100МГц, $Z_S=50\text{Ом}$, $Z_L=50\text{Ом}$.

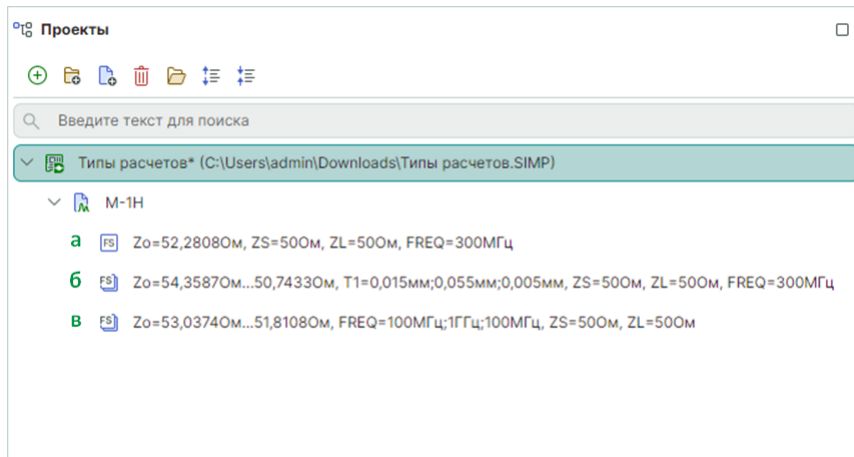


Рис. 69 Наименования расчетов для типа «S-параметры»

3. Расчет «[Перекрестные помехи](#)» доступен для одиночных линий передачи и дифференциальных пар и позволяет рассчитать перекрестные помехи (напряжение и фазу) на конкретных частотах в начале и конце согласованных линий передачи, определить минимальный зазор между проводниками для обеспечения допустимого уровня уровня перекрестных помех, см. [Рис. 70](#).

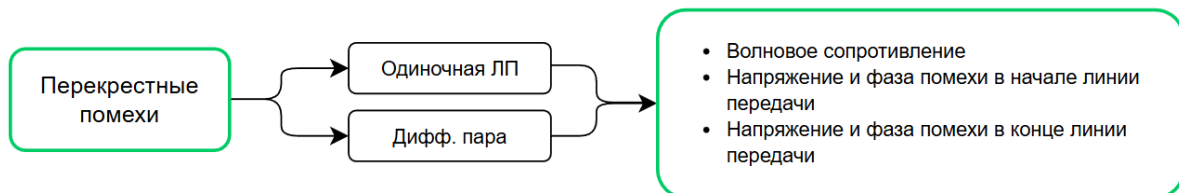


Рис. 70 Расчет «Перекрестные помехи»

В рамках типа расчета «Перекрестные помехи» могут быть проведены одиночные и множественные расчеты.

Наименования расчетов формируются по следующим шаблонам ([Рис. 71](#)):

а) Одиночный расчет: рассчитанное значение волнового сопротивления ($RS=RL=Z_0$) или волнового сопротивления линии, запитанной нечетной модой ($RS=RL=Z_{odd}$), значение частоты, используемое в расчете (FREQ), количество ЛП. Пример: $Rs=Rl=51,344\text{Ом}$, $FREQ=300\text{МГц}$, 2 ЛП.

б) Множественный расчет: рассчитанное значение волнового сопротивления или волнового сопротивления линии, запитанной нечетной модой, диапазон значений и шаг изменяемого параметра, значение частоты, используемое в расчете, количество ЛП. Пример: $Rs=Rl=51,344\text{Ом}$, $H1=0,1;1;0,1\text{мм}$, $FREQ=300\text{МГц}$, 2 ЛП.

в) Множественный расчет, когда изменяемым параметром является частота: рассчитанное значение волнового сопротивления или волнового

сопротивления линии, запитанной нечетной модой, диапазон значений частоты, количество ЛП. Пример: $R_s=R_l=51,344\text{Ом}$, $FREQ=100;1\ 000;100\text{МГц}$, 2 ЛП.

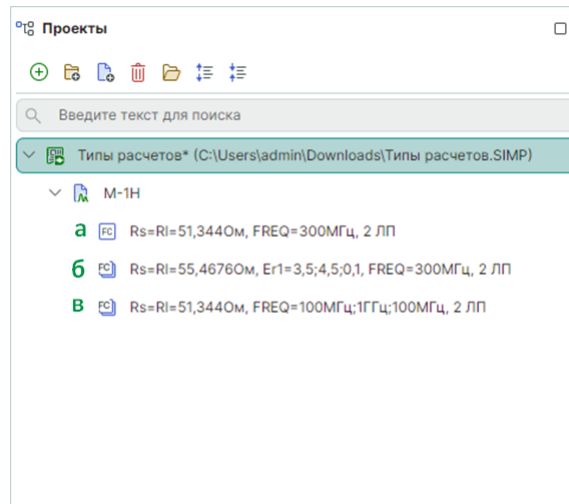


Рис. 71 Наименования расчетов для типа «Перекрестные помехи»

6.3.2 Общие параметры

Для расчета общих параметров линии передачи с учетом частоты выполните следующие действия:

1. Определите стартовые настройки расчета ([Рис. 72](#)):

- «Объект расчета» – «Линия передачи»;
- «Тип объекта» – «Одиночная», «Дифф. пара», «Копланарная одиночная» или «Копланарная дифф. пара»;
- «Тип расчета» – «Частотный анализ»;
- «Расчетный параметр» – «Общие».

2. Выберите модель линии передачи и ознакомьтесь с описанием выбранной модели в области просмотра.

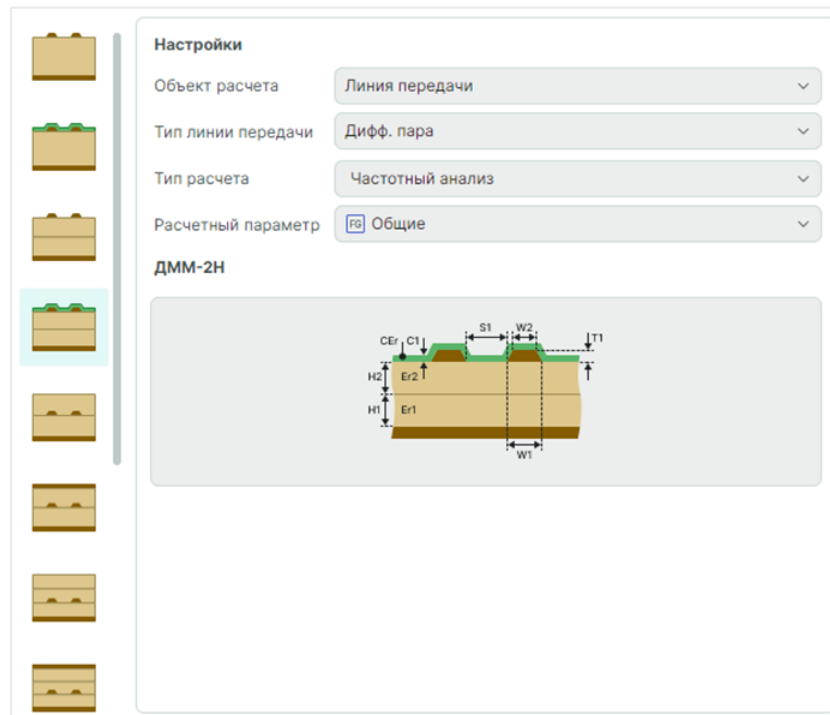


Рис. 72 Настройки расчета «Общие»

3. Определите входные параметры линии передачи, подробное описание входных параметров линии передачи представлено в разделах [Одиночный расчет одиночной или копланарной одиночной ЛП](#) и [Одиночный расчет дифф. пары или копланарной дифф. пары](#).

Для расчета «Частотный анализ» → «Общие» доступно определение дополнительных параметров ([Рис. 73](#)):

- TC – электропроводность материала проводника (См/м);
- $\text{tg}\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь;
- LTL – длина проводника (мм);
- TR – фронт сигнала (пс);
- FREQ – частота (МГц).

▼ **Дополнительные параметры**

TC, Электропроводность	58 МСм/м	↑ ↓
tgδ, Тангенс угла диэлектрических потерь	0,02	↑ ↓
LTL, Длина проводника	2,5 см	↑ ↓
TR, Фронт сигнала	333,3333 пс	↑ ↓
FREQ, Частота	300 МГц	↑ ↓

Рис. 73 Дополнительные параметры

Ввод и учет в расчете параметров шероховатости доступен после установки флага в чек-бокс «Шероховатость» ([Рис. 74](#)):

- a – радиус узла неровности (мкм);
- N – количество узлов на ячейку;
- A_f – площадь ячейки (мм²).

▼ **Шероховатость**

Учитывать в расчете	<input checked="" type="checkbox"/>	
a , Радиус узла неровности	0,75 мкм	↑ ↓
N , Количество узлов на ячейку	32	↑ ↓
A_f , Площадь ячейки	0,0001 мм ²	↑ ↓

Рис. 74 Параметры шероховатости

4. Запустите расчет с помощью кнопки «Рассчитать» в правом нижнем углу вкладки расчета.

5. Для одиночных и копланарных одиночных ЛП рассчитываются следующие параметры ([Рис. 75](#)):

- Z_0 – волновое сопротивление (Ом);
- R – сопротивление (Ом);
- L – индуктивность (нГн);
- C – емкость (пФ);
- G – проводимость диэлектрика (См);
- $\alpha_{db,R}$ – ослабление в проводнике (Дб);
- $\alpha_{db,D}$ – ослабление в диэлектрике (Дб);
- α_{db} – общее ослабление (Дб);
- T_{pd} – задержка (пс);

- V_p – скорость распространения сигнала (м/с);
- E_{Er} – эффективная диэлектрическая проницаемость;
- ϕ – фаза (рад);
- V_ϕ – скорость фазы (м/с).

Z_0	R	L	C	G	$\alpha_{db,R}$	$\alpha_{db,D}$	α_{db}	Tpd	V_p	E_{Er}	ϕ	V_ϕ
48,3763	0,5516	7,4092	3,1679	0,0001075	-0,0495	-0,0226	-0,0721	153,2046	1,632E+08	3,2561	0,2888	1,632E+08

Рис. 75 Общие параметры одиночной и копланарной одиночной ЛП

Для дифференциальных и копланарных дифференциальных линий передачи параметры рассчитывается в нескольких режимах, изменение отображения доступно в панели «Настройка результатов» ([Рис. 76](#)):

- Z_{diff} – дифференциальное волновое сопротивление (Ом);
- Z_{comm} – волновое сопротивление дифференциальной пары в режиме сигнала общего вида (Ом);
- Z_{odd} – волновое сопротивление линии, запитанной нечетной модой (Ом);
- Z_{even} – волновое сопротивление линии, запитанной четной модой (Ом).

Z_{comm}	R	L	C	G	$\alpha_{db,R}$	$\alpha_{db,D}$	α_{db}	Tpd	V_p	E_{Er}	ϕ	V_ϕ
80,2842	1,2958	8,7146	1,3562	2,507E-05	-0,0701	-0,0087	-0,0788	108,7127	2,3E+08	1,6689	0,2050	2,298E+08

Рис. 76 Общие параметры дифференциальной и копланарной дифференциальной ЛП

Множественный расчет при определении общих параметров с учетом частоты выполняется аналогично [множественному расчету типа «Без потерь»](#), т.е. один из входных параметров линии передачи задается в виде диапазона значений с установленным шагом изменения.

Для одиночных и копланарных одиночных ЛП для отображения по оси Y доступны все рассчитанные параметры, отображаемые в табличном виде (Z_0 , R , L , C , G , $\alpha_{db,R}$, $\alpha_{db,D}$, α_{db} , Tpd , V_p , E_{Er} , ϕ , V_ϕ), см. [Рис. 77](#).

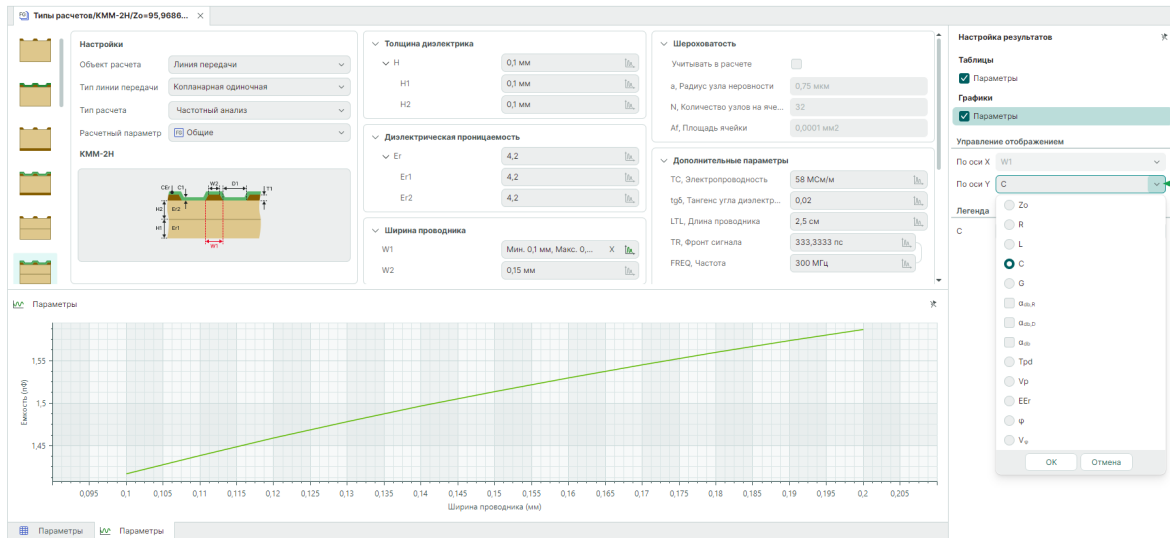


Рис. 77 Множественный расчет общих параметров одиночной или одиночной копланарной ЛП

Параметры ослабления ($\alpha_{db,R}$, $\alpha_{db,D}$, α_{db}) доступны для совместного отображения на графике, см. [Рис. 78](#).

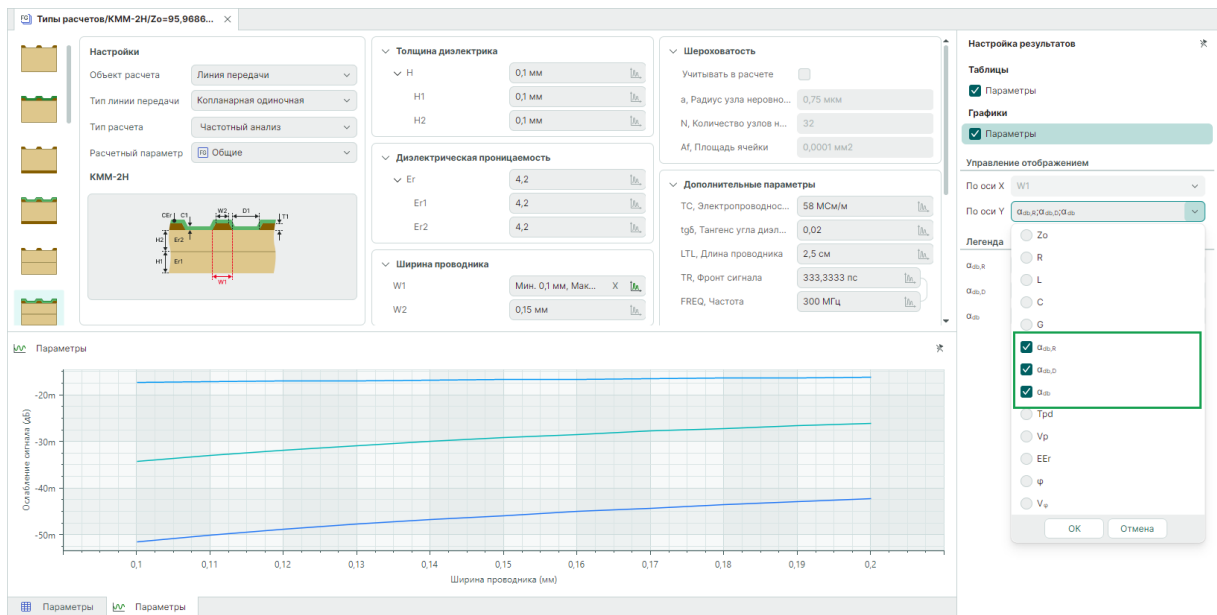


Рис. 78 Параметры ослабления на графике

Для дифференциальных и копланарных дифференциальных ЛП дополнительно доступен выбор режима отображения рассчитанных параметров: «Дифференциальный», «Общий», «Нечетная мода», «Четная мода», см. [Рис. 79](#).

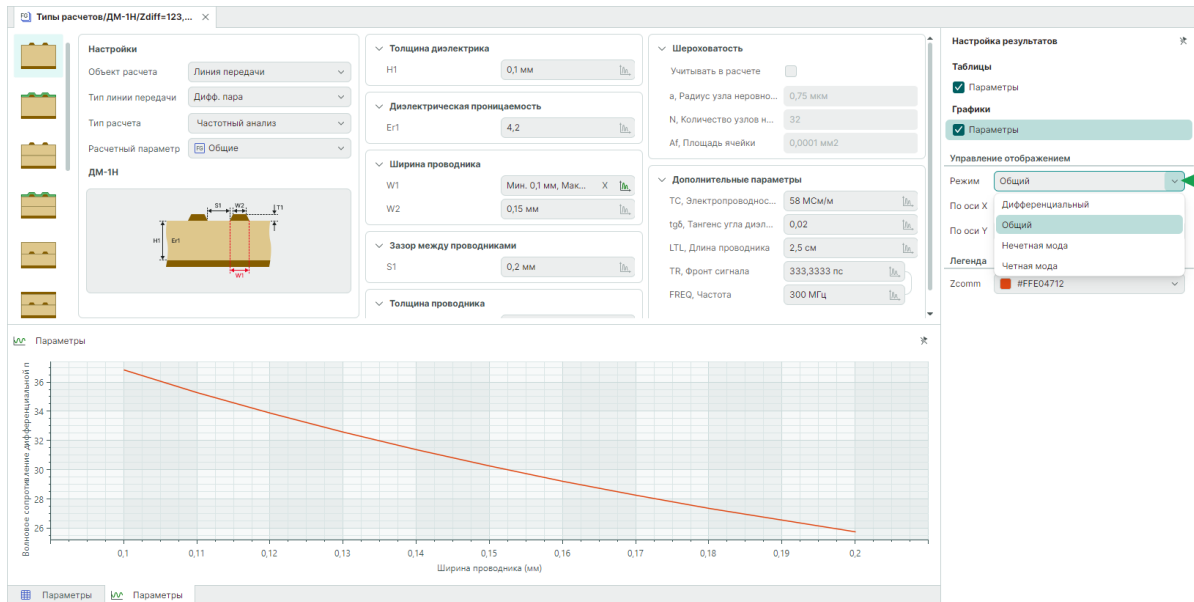


Рис. 79 Множественный расчет общих параметров дифференциальной или копланарной дифференциальной ЛП

Пример множественного расчета общих параметров представлен в разделе [Расчет длины ЛП при известном уровне потерь](#).

6.3.3 S-параметры

Для расчета S-параметров линии передачи с учетом частоты выполните следующие действия:

1. Определите стартовые настройки расчета ([Рис. 80](#)):

- «Объект расчета» – «Линия передачи»;
- «Тип объекта» – «Одиночная», «Дифф. пара», «Копланарная одиночная» или «Копланарная дифф. пара»;
- «Тип расчета» – «Частотный анализ»;
- «Расчетный параметр» – «S-параметры».

2. Выберите модель линии передачи и ознакомьтесь с описанием выбранной модели в области просмотра.

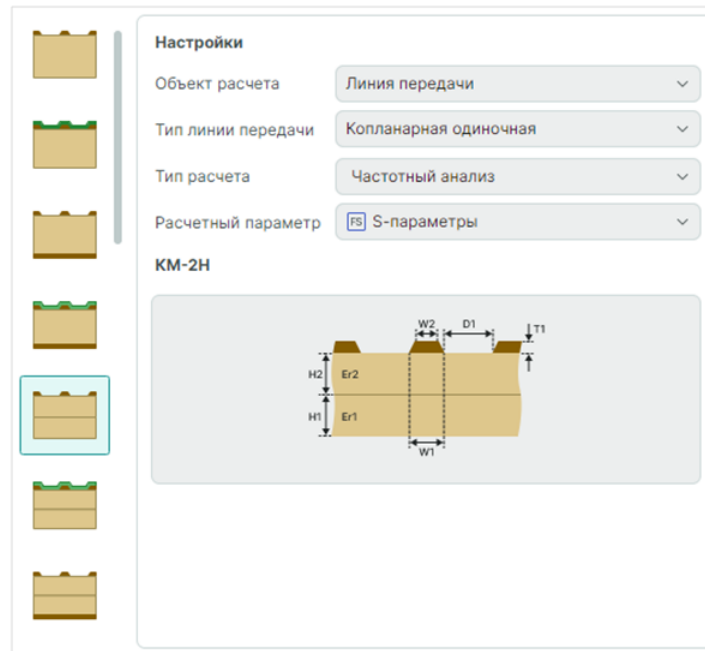


Рис. 80 Настройки расчета «S-параметры»

3. Определите входные параметры линии передачи, подробное описание параметров линии передачи представлено в разделах [Одиночный расчет одиночной или копланарной одиночной ЛП](#) и [Одиночный расчет дифф. пары или копланарной дифф. пары](#), описание дополнительных параметров и параметров шероховатости – в разделе [Общие параметры \(Частотный анализ\)](#).

Дополнительно при расчете S-параметров должны быть определены ([Рис. 81](#)):

- ZS – сопротивление источника (Ом);
- ZL – сопротивление приемника (Ом).

Толщина диэлектрика

H: 0,1 мм

H1: 0,1 мм

H2: 0,1 мм

Шероховатость

Учитывать в расчете:

а, Радиус узла неровности: 0,75 мкм

N, Количество узлов на яче...: 32

Af, Площадь ячейки: 0,0001 мм²

Диэлектрическая проницаемость

Er: 4,2

Er1: 4,2

Er2: 4,2

Дополнительные параметры

ТС, Электропроводность: 58 МСм/м

tgδ, Тангенс угла диэлектри...: 0,02

LTL, Длина проводника: 2,5 см

TR, Фронт сигнала: 333,3333 пс

FREQ, Частота: 300 МГц

Ширина проводника

W1: 0,17 мм

W2: 0,15 мм

Сопротивление

ZS, Источник: 40 Ом

ZL, Приемник: 60 Ом

Расстояние от проводника до опорной плоскости

D1: 0,2 мм

Толщина проводника

T1: 0,035 мм

Рис. 81 Параметры ЛП и дополнительные параметры

4. Запустите расчет с помощью кнопки «Рассчитать» в правом нижнем углу вкладки расчета.

5. Для одиночных и копланарных одиночных ЛП рассчитываются (Рис. 82):

- S11 – коэффициент отражения от входа;
- S21 – коэффициент передачи;
- S12 – коэффициент обратной передачи;
- S22 – коэффициент отражения от выхода.

S11		S12	
S21		S22	
Mag=0,2488	Deg=22,0806	Mag=0,9623	Deg=-15,6782
Mag=0,9623	Deg=-15,6782	Mag=0,2398	Deg=125,0247

Рис. 82 S-параметры одиночной и копланарной одиночной ЛП

Для дифференциальных и копланарных дифференциальных ЛП S-параметры рассчитываются в одиночном и смешанном режимах.

83. Параметры ЛП при расчете в одиночном режиме представлены на [Рис.](#)

S-параметры							
S11 S21 S31 S41		S12 S22 S32 S42		S13 S23 S33 S43		S14 S24 S34 S44	
Mag=0,0051	Deg=-70,5530	Mag=0,9915	Deg=-16,7626	Mag=0,0253	Deg=72,1069	Mag=0,0081	Deg=-108,7220
Mag=0,9915	Deg=-16,7626	Mag=0,0051	Deg=-70,5530	Mag=0,0081	Deg=-108,7220	Mag=0,0253	Deg=72,1069
Mag=0,0253	Deg=72,1069	Mag=0,0081	Deg=-108,7220	Mag=0,0051	Deg=-70,5530	Mag=0,9915	Deg=-16,7626
Mag=0,0081	Deg=-108,7220	Mag=0,0253	Deg=72,1069	Mag=0,9915	Deg=-16,7626	Mag=0,0051	Deg=-70,5530

Рис. 83 Параметры ЛП при расчете в одиночном режиме

84. Параметры ЛП при расчете в смешанном режиме представлены на [Рис.](#)

S-параметры (смешанный режим)							
SDD11 SDD21 SCD11 SCD21		SDD12 SDD22 SCD12 SCD22		SDC11 SDC21 SCC11 SCC21		SDC12 SDC22 SCC12 SCC22	
Mag=0,0295	Deg=-101,9119	Mag=0,9918	Deg=-16,2960	Mag=0,0000	Deg=0,0000	Mag=0,0000	Deg=0,0000
Mag=0,9918	Deg=-16,2960	Mag=0,0295	Deg=-101,9119	Mag=0,0000	Deg=0,0000	Mag=0,0000	Deg=0,0000
Mag=0,0000	Deg=0,0000	Mag=0,0000	Deg=0,0000	Mag=0,0215	Deg=63,8876	Mag=0,9912	Deg=-17,2295
Mag=0,0000	Deg=0,0000	Mag=0,0000	Deg=0,0000	Mag=0,9912	Deg=-17,2295	Mag=0,0215	Deg=63,8876

Рис. 84 Параметры ЛП при расчете в смешанном режиме

Для результатов расчета S-параметров в табличном виде доступен выбор режима представления ([Рис. 85](#)):

- «Магнитуда/фаза»;
- «Магнитуда (дБ)/фаза»;
- «Действительная/мнимая».

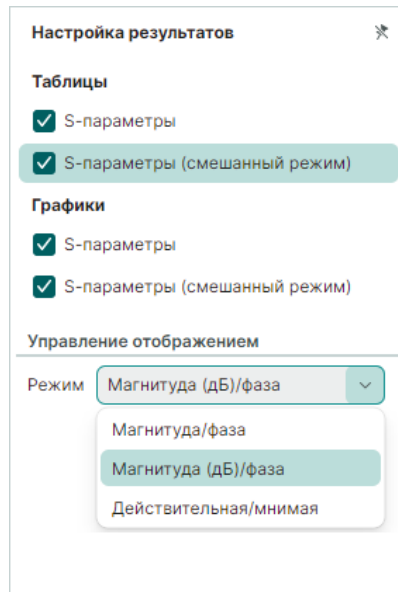


Рис. 85 Режимы представления S-параметров

Множественный расчет при определении S-параметров с учетом частоты выполняется аналогично другим множественным расчетам системы, т.е. один из входных или дополнительных параметров линии передачи задается в виде диапазона значений с установленным шагом изменения.

Рассчитанные S-параметры доступны для одновременного отображения на графиках с помощью установки флагов в чек-боксы нужных параметров в режимах: «Магнитуда», «Магнитуда (дБ)», «Фаза», см. [Рис. 86](#).

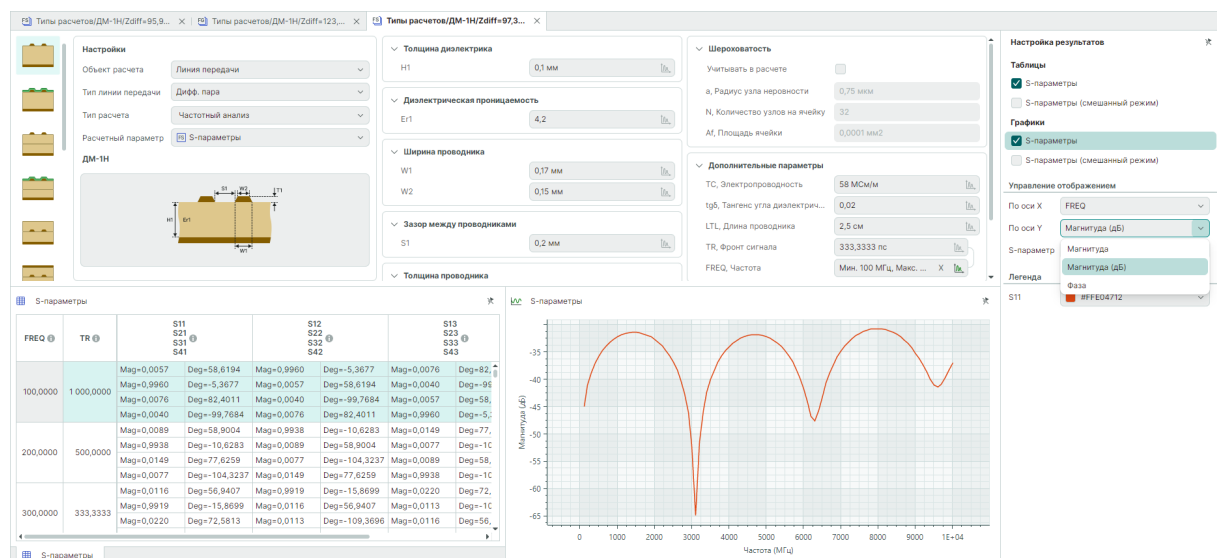


Рис. 86 Множественный расчет при определении S-параметров

Пример расчета S-параметров линии передачи приведен в разделе [Расчет S-параметров в частотном диапазоне](#).

6.3.4 Перекрестные помехи

Для расчета перекрестных помех линии передачи выполните следующие действия:

1. Определите стартовые настройки расчета ([Рис. 87](#)):

- «Объект расчета» – «Линия передачи»;
- «Тип объекта» – «Одиночная» или «Дифф. пара»;
- «Тип расчета» – «Частотный анализ»;
- «Расчетный параметр» – «Перекрестные помехи».

2. Выберите модель линии передачи и ознакомьтесь с описанием выбранной модели в области просмотра.

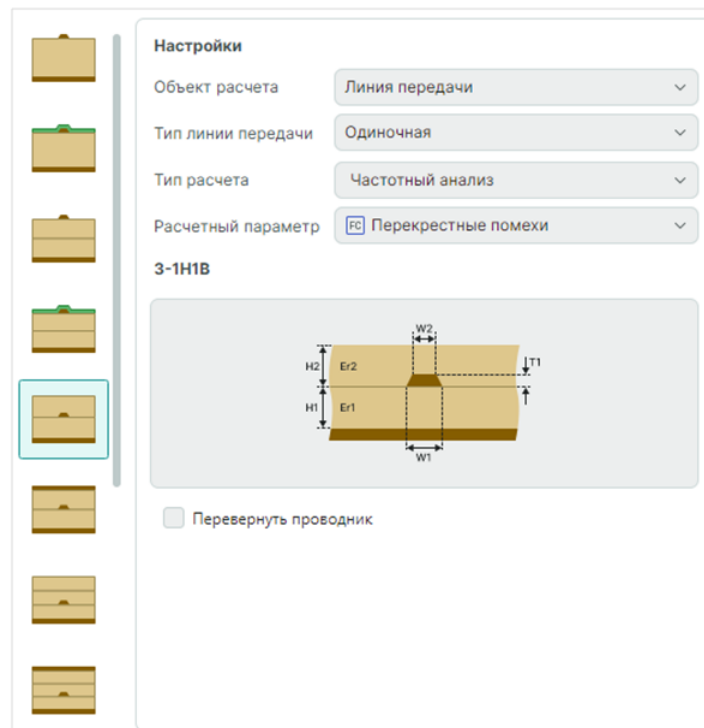


Рис. 87 Настройки расчета «Перекрестные помехи»

3. Определите входные параметры линии передачи, подробное описание параметров линии передачи представлено в разделах [Одиночный расчет одиночной или копланарной одиночной ЛП](#) и [Одиночный расчет дифф. пары или копланарной дифф. пары](#).

Для расчета «Частотный анализ» → «Перекрестные помехи» доступно определение дополнительных параметров ([Рис. 88](#)):

- Количество линий передач – 2 или 3;

- V – напряжение (Порт 1, 3 и т.д.). Количество параметров V ($V1$, $V3$ и т.д.) зависит от количества проводников в выбранной модели;

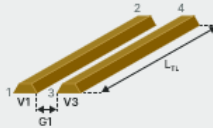


Примечание! Для определения уровня напряжения на портах могут быть выбраны только фиксированные значения из выпадающих меню: «+1 В», «0 В», «-1 В». Хотя бы один порт линии передачи должен иметь ненулевое значение напряжения, т.к. уровень перекрестных помех пропорционален установленному напряжению.

- LTL – длина проводника (мм);
- G1 – зазор между проводниками (мм);
- TR – фронт сигнала (пс);
- FREQ – частота (МГц).

▼ **Дополнительные параметры**

Кол-во линий передач

$R_s = R_L = Z_0$


V1, Напряжение (Порт 1)

V3, Напряжение (Порт 3)

LTL, Длина проводника

G1, Зазор между проводниками

TR, Фронт сигнала

FREQ, Частота

Рис. 88 Дополнительные параметры

4. Запустите расчет с помощью кнопки «Рассчитать» в правом нижнем углу вкладки расчета.

5. Для одиночных ЛП рассчитываются ([Рис. 89](#)):

- Z_0 – волновое сопротивление (Ом);
- U_{NEXT} – напряжение в начале линии (В);

- ϕ_{NEXT} – фаза в начале линии ($^{\circ}$);
- U_{FEXT} – напряжение в конце линии (В);
- ϕ_{FEXT} – фаза в конце линии ($^{\circ}$).

Zo	$U_{\text{NEXT}1}$	$\phi_{\text{NEXT}1}$	$U_{\text{FEXT}2}$	$\phi_{\text{FEXT}2}$	$U_{\text{NEXT}3}$	$\phi_{\text{NEXT}3}$	$U_{\text{FEXT}4}$	$\phi_{\text{FEXT}4}$
45.7227	2.8091e-003	-106.0584	9.9944e-001	-17.6015	3.3267e-002	72.4095	2.2744e-003	-105.2469

Рис. 89 Параметры одиночных линий передачи

Для дифференциальных ЛП рассчитываются Zodd – волновое сопротивление линии, запитанной нечетной модой (Ом) и аналогичные параметры – напряжение и фаза в начале и конце каждой линии, см. [Рис. 90](#).

Zodd	$U_{\text{NEXT}1}$	$\phi_{\text{NEXT}1}$	$U_{\text{FEXT}2}$	$\phi_{\text{FEXT}2}$	$U_{\text{NEXT}3}$	$\phi_{\text{NEXT}3}$	$U_{\text{FEXT}4}$	$\phi_{\text{FEXT}4}$	$U_{\text{NEXT}5}$	$\phi_{\text{NEXT}5}$	$U_{\text{FEXT}6}$	$\phi_{\text{FEXT}6}$	$U_{\text{NEXT}7}$	$\phi_{\text{NEXT}7}$	$U_{\text{FEXT}8}$	$\phi_{\text{FEXT}8}$
47.0942	1.9080e-004	-92.6564	1.0001e+000	165.0643	8.7498e-004	-92.8575	9.9974e-001	-14.9197	1.6836e-002	74.3282	8.0353e-003	-106.8870	2.9282e-003	70.6106	2.2872e-003	-112.2405

Рис. 90 Параметры дифференциальных линий передачи



Примечание! Количество рассчитываемых параметров U_{NEXT} , ϕ_{NEXT} , U_{FEXT} , ϕ_{FEXT} зависит от выбранной модели и количества линий передачи.

Результаты расчета перекрестных помех для дифференциальных ЛП могут быть отображены в трех режимах ([Рис. 91](#)):

- «Одиночный»;
- «Нечетная мода»;
- «Четная мода».

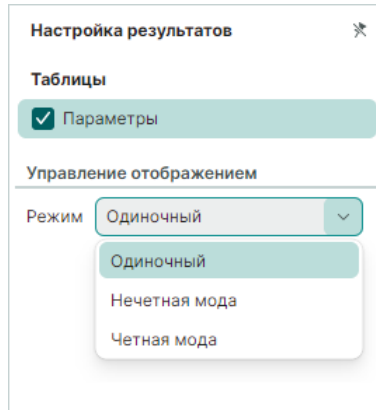


Рис. 91 Режимы представления расчета

Множественный расчет при определении перекрестных помех выполняется аналогично другим множественным расчетам системы, т.е. один из входных или дополнительных параметров линии передачи задается в виде диапазона значений с установленным шагом изменения.

Для отображения на графиках при множественном расчете доступны полученные значения (Рис. 92):

- $U_{NEXT/FEXT}$ – напряжение помехи на выбранном порте (ближнем/дальнем);
- $F_{NEXT/FEXT}$ – фаза помехи на выбранном порте (ближнем/дальнем).

Рассчитанные параметры доступны для одновременного отображения на графике, в выпадающем меню «Порт» установите флаги в чек-боксы нужных портов и нажмите «ОК».

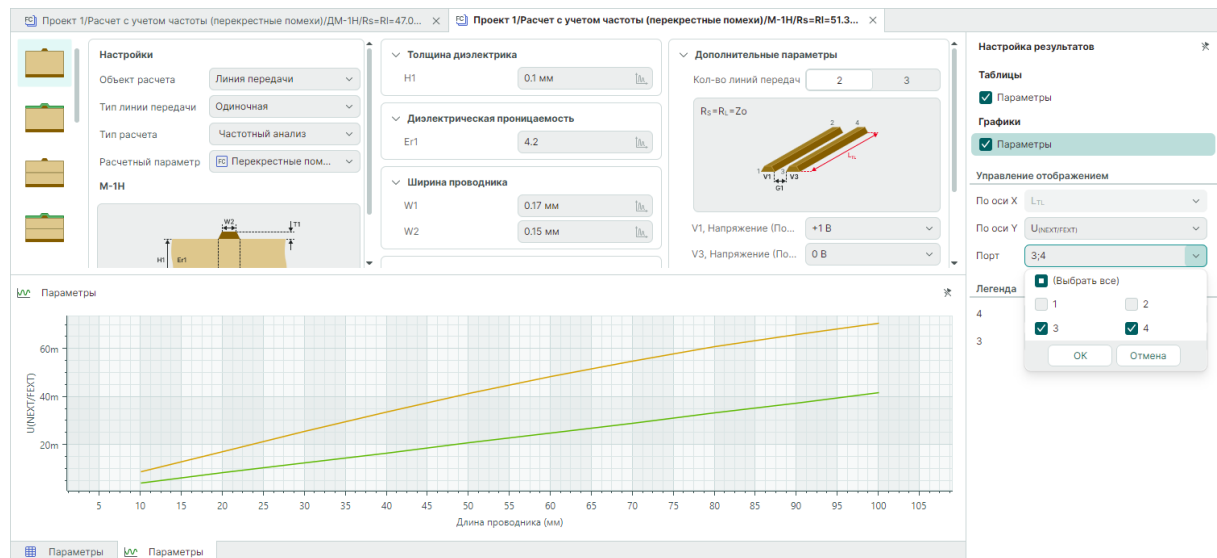


Рис. 92 Множественный расчет перекрестных помех

Для дифференциальных линий передачи также доступен выбор режима отображения рассчитанных параметров: «Одиночный», «Нечетная мода», «Четная мода».

Примеры использования расчета перекрестных помех приведены в разделах [Оценка перекрестных помех](#) и [Расчет расстояния между линиями передачи](#).

6.4 Временной анализ

6.4.1 Общие сведения

«Временной анализ» включает в себя комплекс расчетов во временной области:

1. Расчет «[Форма сигнала](#)» доступен для всех типов линий передачи в SimPCB Lite и позволяет вычислить и наглядно представить в графическом виде форму аналогового и цифрового сигнала после прохождения через линию передачи, см. [Рис. 93](#).

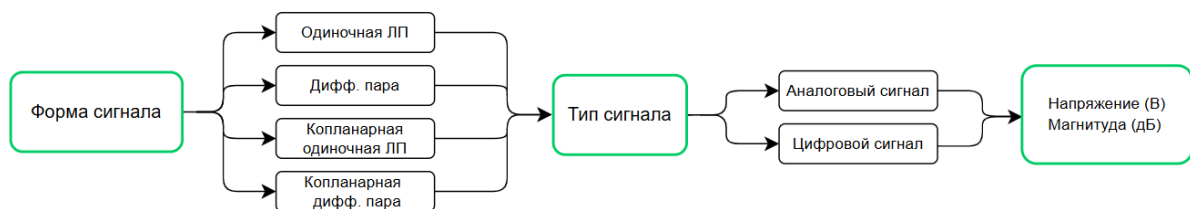


Рис. 93 Расчет «Форма сигнала»

В рамках типа расчета «Форма сигнала» могут быть проведены только одиночные расчеты.

Наименования расчетов формируются по следующим шаблонам ([Рис. 94](#)):

а) Цифровой сигнал: буква D – обозначение цифрового сигнала, рассчитанное значение волнового сопротивления (Z_0) или дифференциального волнового сопротивления (Z_{diff}), сопротивление источника (Z_S), сопротивление приемника (Z_L). Пример: D, $Z_0=49,5613\text{Ом}$, $Z_S=50\text{Ом}$, $Z_L=50\text{Ом}$.

б) Аналоговый сигнал: буква A – обозначение аналогового сигнала, рассчитанное значение волнового сопротивления (Z_0) или дифференциального волнового сопротивления (Z_{diff}), сопротивление источника (Z_S), сопротивление приемника (Z_L), значение частоты, используемое в расчете (FREQ). Пример: A, $Z_0=49,5613\text{Ом}$, $Z_S=50\text{Ом}$, $Z_L=50\text{Ом}$, FREQ=300МГц.

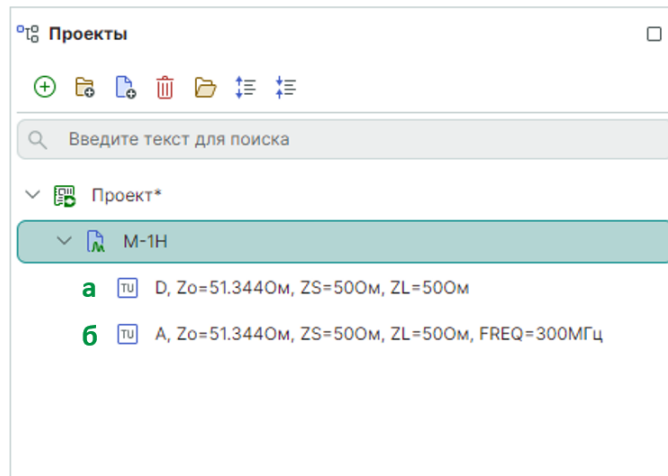


Рис. 94 Наименования расчетов для типа «Форма сигнала»

2. Расчет «[S-параметров](#)» доступен для всех типов линий передачи в SimPCB Lite и позволяет оценить временную зависимость S-параметров линии передачи, см. [Рис. 95](#).

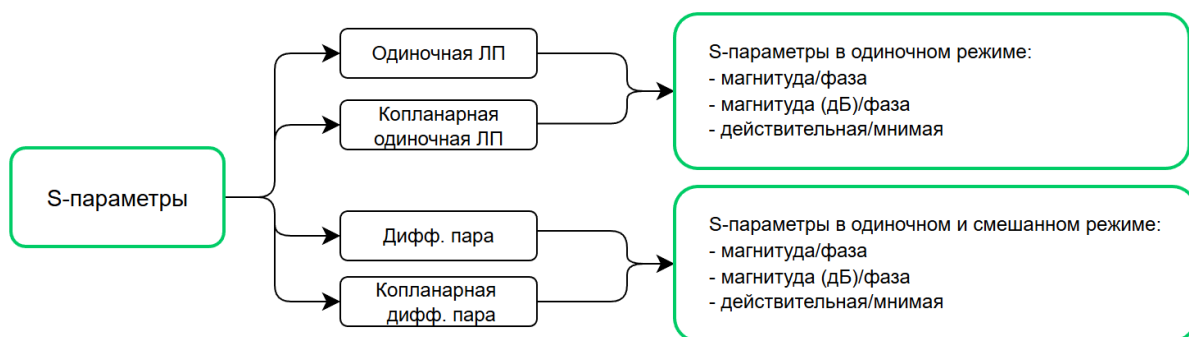


Рис. 95 Расчет «S-параметры»

В рамках типа расчета «S-параметры» следует проводить только множественные расчеты с указанием частоты в виде диапазона, проведение одиночных расчетов не имеет практического смысла, а также не предоставляет результаты расчета в виде графиков.

Наименование расчетов формируется по следующему шаблону: диапазон рассчитанных значений волнового сопротивления (Z_o) или дифференциального волнового сопротивления (Z_{diff}), диапазон значений частоты (FREQ), сопротивление источника (ZS), сопротивление приемника (ZL). Пример: $Z_o=47,2281...46,1457\text{Ом}$, $FREQ=100\text{МГц};1\text{ГГц};100\text{МГц}$, $ZS=50\text{Ом}$, $ZL=50\text{Ом}$, см. [Рис. 96](#).

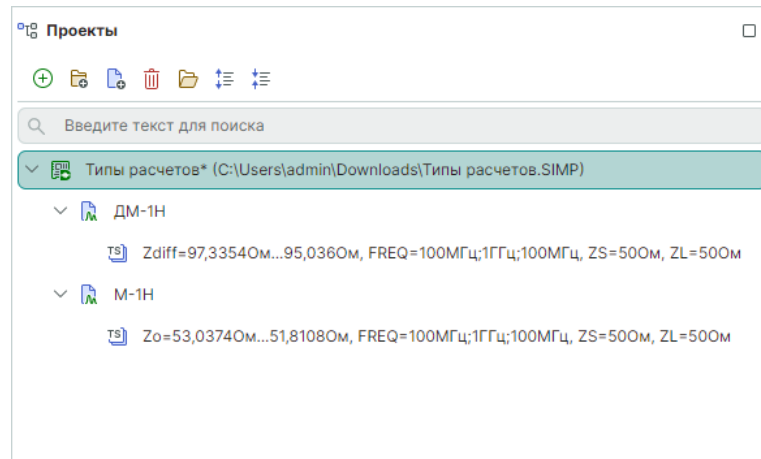


Рис. 96 Наименования расчетов для типа «S-параметры»

3. Расчет «[Перекрестные помехи](#)» доступен для одиночных линий передачи и дифференциальных пар и позволяет рассчитать уровень перекрестных помех (напряжение) в начале и конце линий передачи и наглядно представить в графическом виде форму помехи, см. [Рис. 97](#).

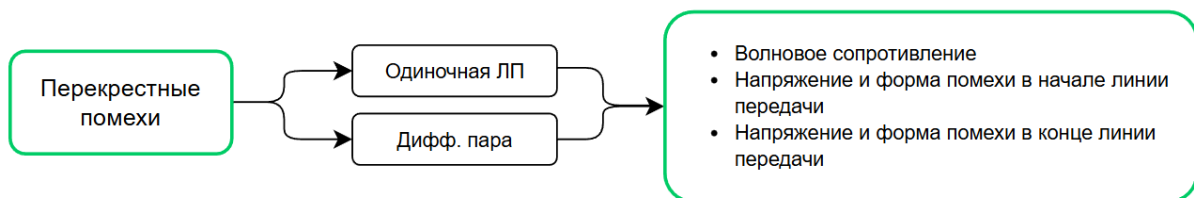


Рис. 97 Расчет «Перекрестные помехи»

В рамках типа расчета «Перекрестные помехи» могут быть проведены одиночные расчеты для цифрового и аналогового сигналов.

Наименования расчетов формируются по следующим шаблонам ([Рис. 98](#)):

а) Цифровой сигнал: буква D – обозначение цифрового сигнала, рассчитанное значение волнового сопротивления ($RS=RL=Z_0$) или волнового сопротивления линии, запитанной нечетной модой ($RS=RL=Z_{odd}$), количество ЛП. Пример: $Rs=Rl=51,344\text{Ом}$, 2 ЛП.

б) Аналоговый сигнал: буква A – обозначение аналогового сигнала, рассчитанное значение волнового сопротивления ($RS=RL=Z_0$) или волнового сопротивления линии, запитанной нечетной модой ($RS=RL=Z_{odd}$), значение частоты, используемое в расчете (FREQ), количество ЛП. Пример: $Rs=Rl=51,344\text{Ом}$, 2 ЛП. Пример: A, $Rs=Rl=94,1884\text{Ом}$, FREQ=300МГц, 2 ЛП.

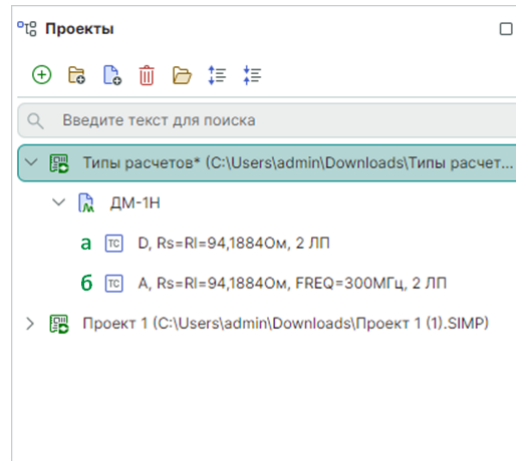


Рис. 98 Наименования расчетов для типа «Перекрестные помехи»

6.4.2 Форма сигнала

Для расчета формы сигнала после прохождения линии передачи выполните следующие действия:

1. Определите стартовые настройки расчета ([Рис. 99](#)):

- «Объект расчета» – «Линия передачи»;
- «Тип объекта» – «Одиночная», «Дифф. пара», «Копланарная одиночная» или «Копланарная дифф. пара»;
- «Тип расчета» – «Временной анализ»;
- «Расчетный параметр» – «Форма сигнала»;
- «Тип сигнала» – «Цифровой» или «Аналоговый».

2. Выберите модель линии передачи и ознакомьтесь с описанием выбранной модели в области просмотра.

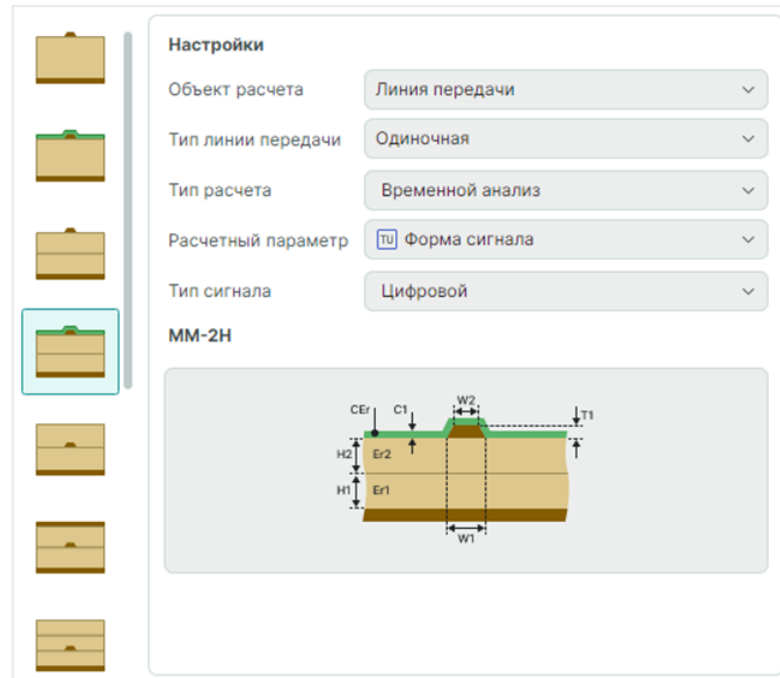


Рис. 99 Настройки расчета «Форма сигнала»

3. Определите входные параметры линии передачи. Подробное описание входных параметров линии передачи представлено в разделах [Одиночный расчет одиночной или копланарной одиночной ЛП](#) и [Одиночный расчет дифф. пары или копланарной дифф. пары](#), описание дополнительных параметров и параметров шероховатости – в разделе [Общие параметры \(Частотный анализ\)](#).

Для расчета формы цифрового сигнала после прохождения линии передачи необходимо определить параметры сигнала ([Рис. 100](#)):

- $Y2$ – амплитуда сигнала (В);
- TR – длительность нарастания сигнала, передний фронт (нс);
- TF – длительность спада сигнала, задний фронт (нс);
- RW – длительность верхнего уровня сигнала, плоская часть импульса (нс);
- PER – период повторения (нс).

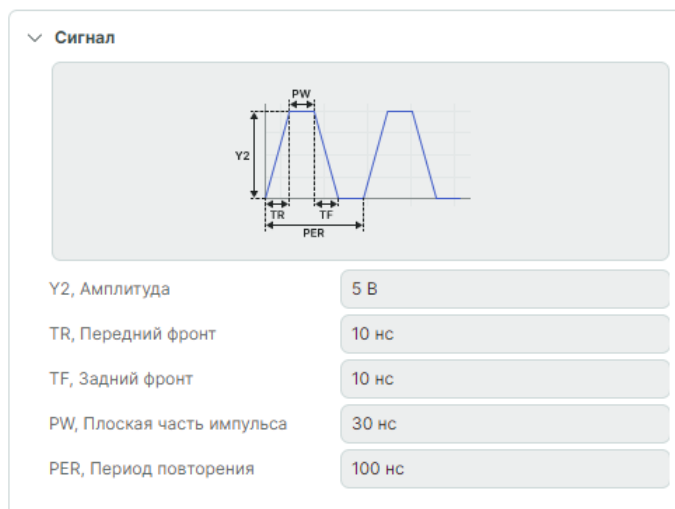


Рис. 100 Параметры цифрового сигнала

Для расчета формы аналогового сигнала необходимо определить параметры ([Рис. 101](#)):

- YAMPL – амплитуда сигнала (В);
- PHASE – фаза сигнала ($^{\circ}$).

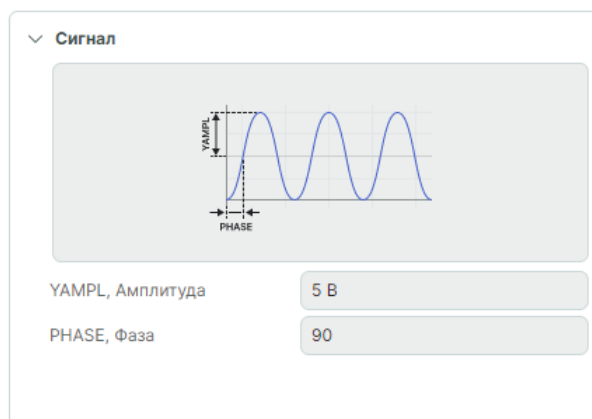


Рис. 101 Параметры аналогового сигнала

4. Запустите расчет формы сигнала с помощью кнопки «Рассчитать» в правом нижнем углу вкладки расчета.

5. Для одиночных и копланарных одиночных ЛП относительно времени рассчитываются ([Рис. 102](#)):

- Напряжение (В);
- Магнитуда (дБ).

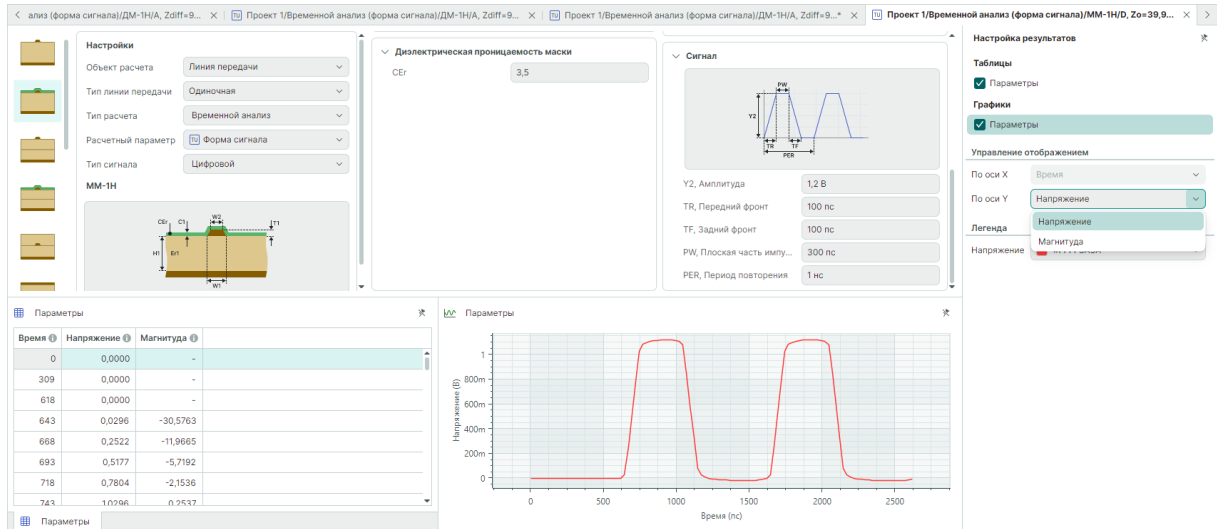


Рис. 102 Форма сигнала после прохождения одиночной и копланарной одиночной ЛП

Для дифференциальных и копланарных дифференциальных параметры рассчитываются в нескольких режимах: «Дифференциальный», «Общий». Изменение отображения доступно в панели «Настройка результатов», см. [Рис. 103](#).

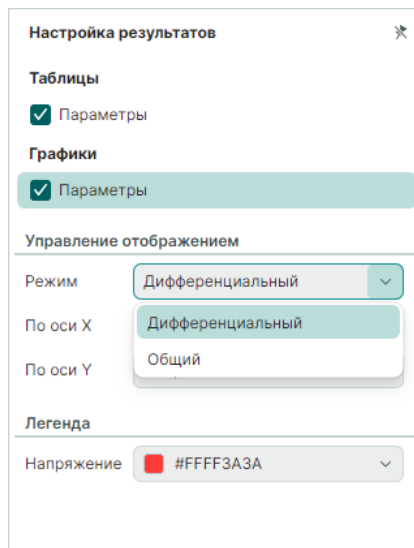


Рис. 103 Режим отображения

Пример описанного расчета приведен в разделе [Расчет формы сигнала](#).

6.4.3 S-параметры

Для расчета S-параметров линии передачи в зависимости от времени выполните следующие действия:

1. Определите стартовые настройки расчета ([Рис. 104](#)):

- «Объект расчета» – «Линия передачи»;
- «Тип объекта» – «Одиночная», «Дифф. пара», «Копланарная одиночная» или «Копланарная дифф. пара»;
- «Тип расчета» – «Временной анализ»;
- «Расчетный параметр» – «S-параметры».

2. Выберите модель линии передачи и ознакомьтесь с описанием выбранной модели в области просмотра.

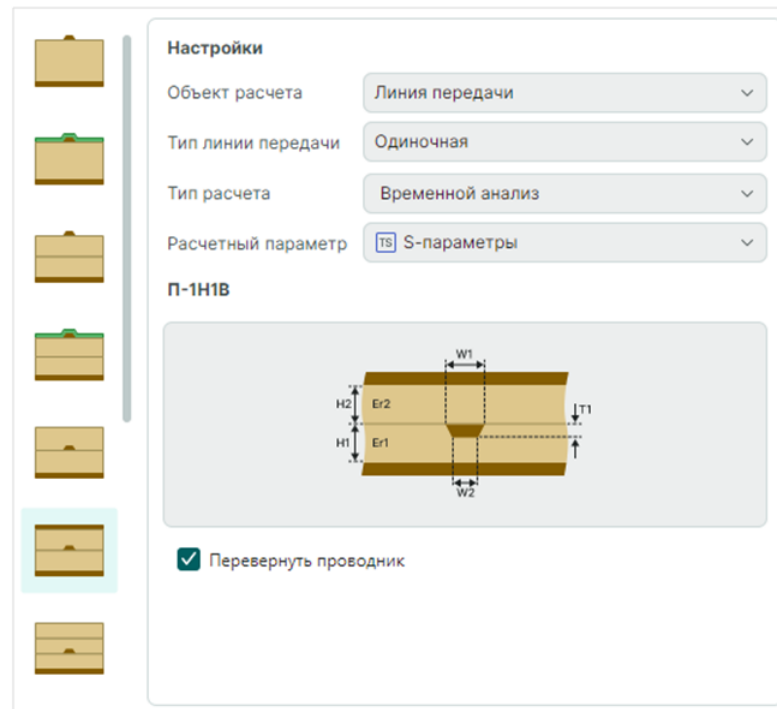


Рис. 104 Настройки расчета «S-параметры»

3. Определите входные параметры линии передачи, сопротивление источника и приемника. Подробное описание параметров линии передачи представлено в разделах [Одиночный расчет одиночной или копланарной одиночной ЛП](#) и [Одиночный расчет дифф. пары или копланарной дифф. пары](#), описание дополнительных параметров и параметров шероховатости – в разделе [Общие параметры \(Частотный анализ\)](#).

По умолчанию для частоты (FREQ) уже задан диапазон значений, при необходимости измените значения диапазона или шага, но не отключайте множественный расчет, т.к. проведение одиночных расчетов не имеет практического смысла, см. [Рис. 105](#).

Рис. 105 Параметры ЛП и дополнительные параметры

4. Запустите расчет с помощью кнопки «Рассчитать» в правом нижнем углу вкладки расчета.

5. Для одиночных и копланарных одиночных ЛП рассчитываются (Рис. 106):

- S11 – коэффициент отражения от входа;
- S21 – коэффициент передачи;
- S12 – коэффициент обратной передачи;
- S22 – коэффициент отражения от выхода.

Время	S11 S21	S12 S22
500	0,0048 0,7779	0,7779 0,0048
1 000	0,0031 0,4647	0,4647 0,0031
1 500	0,0003 0,1606	0,1606 0,0003
2 000	0,0007 0,1168	0,1168 0,0007

Рис. 106 S-параметры одиночной и копланарной одиночной ЛП

Для дифференциальных и копланарных дифференциальных ЛП рассчитываются в одиночном и смешанном режимах, см. Рис. 107.

S-параметры						S-параметры (смешанный режим)					
Время	S11	S12	S13	S14		Время	SDD11	SDD12	SDC11	SDC12	
	S21	S22	S23	S24			SDD21	SDD22	SDC21	SDC22	
	S31	S32	S33	S34			SCD11	SCD12	SCC11	SCC12	
	S41	S42	S43	S44			SCD21	SCD22	SCC21	SCC22	
500	0,1036	0,8158	0,0555	0,0390		0,0481	0,8549	0,0000	0,0000		
	0,8158	0,1036	0,0390	0,0555		0,8549	0,0481	0,0000	0,0000		
	0,0555	0,0390	0,1036	0,8158		0,0000	0,0000	0,1592	0,7768		
	0,0390	0,0555	0,8158	0,1036		0,0000	0,0000	0,7768	0,1592		
1000	0,1388	0,3958	0,0687	0,0366		0,0701	0,3591	0,0000	0,0000		
	0,3958	0,1388	0,0366	0,0687		0,3591	0,0701	0,0000	0,0000		
	0,0687	0,0366	0,1388	0,3958		0,0000	0,0000	0,2075	0,4324		
	0,0366	0,0687	0,3958	0,1388		0,0000	0,0000	0,4324	0,2075		

Рис. 107 S-параметры дифференциальной и копланарной дифференциальной ЛП

Для результатов расчета S-параметров в табличном виде доступен выбор режима представления (Рис. 108):

- «Магнитуда/фаза»;
- «Магнитуда (дБ)/фаза»;
- «Действительная/мнимая».

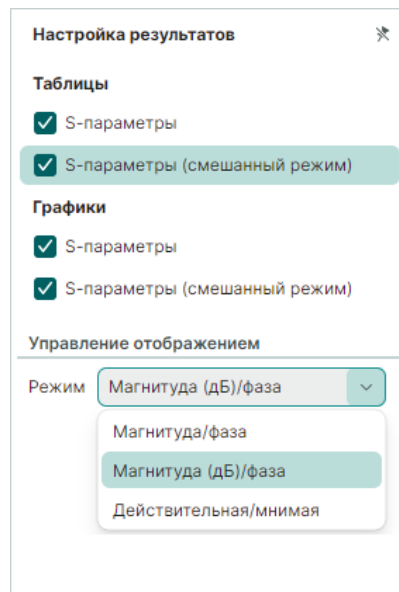


Рис. 108 Режимы представления S-параметров

Рассчитанные S-параметры доступны для одновременного отображения на графиках с помощью установки флагов в чек-боксы нужных коэффициентов в режимах: «Магнитуда», «Магнитуда (дБ)», см. Рис. 109.

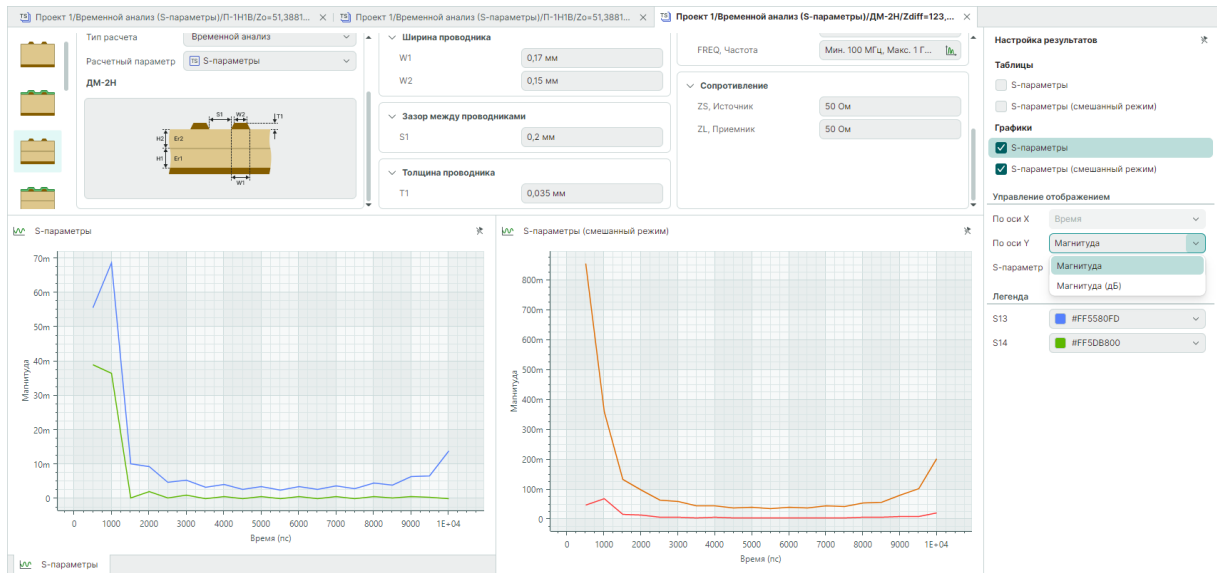


Рис. 109 Множественный расчет при определении S-параметров

Пример описанного расчета приведен в разделе [Расчет S-параметров во временной области](#).

6.4.4 Перекрестные помехи

Для расчета перекрестных помех линии передачи выполните следующие действия:

1. Определите стартовые настройки расчета ([Рис. 110](#)):

- «Объект расчета» – «Линия передачи»;
- «Тип объекта» – «Одиночная» или «Дифф. пара»;
- «Тип расчета» – «Временной анализ»;
- «Расчетный параметр» – «Перекрестные помехи»;
- «Тип сигнала» – «Цифровой» или «Аналоговый».

2. Выберите модель линии передачи и ознакомьтесь с описанием выбранной модели в области просмотра.

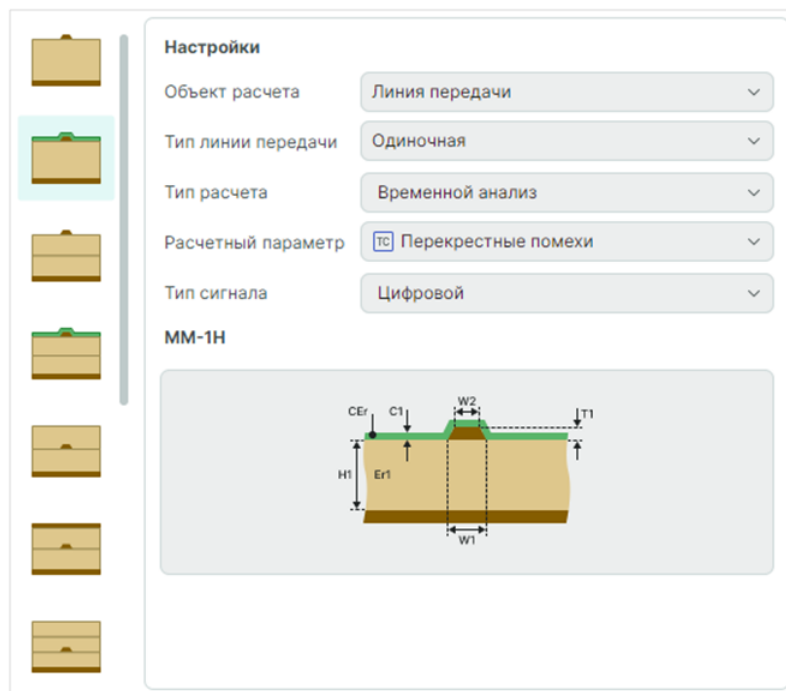


Рис. 110 Настройки расчета «Перекрестные помехи»

3. Определите входные параметры линии передачи, см. [Рис. 111](#).

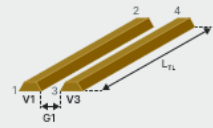
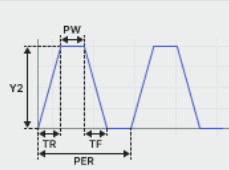
<p>Толщина диэлектрика</p> <p>H1 <input type="text" value="0,125 мм"/></p>	<p>Дополнительные параметры</p> <p>Кол-во линий передач <input type="text" value="2"/> <input type="text" value="3"/></p> <p>$R_S=R_L=Z_0$</p> 
<p>Диэлектрическая проницаемость</p> <p>Er1 <input type="text" value="4,2"/></p>	<p>V1, Напряжение (Порт 1) <input type="text" value="Сигнал"/></p> <p>V3, Напряжение (Порт 3) <input type="text" value="0 В"/></p> <p>LTL, Длина проводника <input type="text" value="1 дм"/></p> <p>G1, Зазор между проводник... <input type="text" value="0,2 мм"/></p>
<p>Ширина проводника</p> <p>W1 <input type="text" value="0,3174 мм"/></p> <p>W2 <input type="text" value="0,3174 мм"/></p>	<p>Сигнал</p> 
<p>Толщина проводника</p> <p>T1 <input type="text" value="0,018 мм"/></p>	<p>Y2, Амплитуда <input type="text" value="1,2 В"/></p> <p>TR, Передний фронт <input type="text" value="100 пс"/></p> <p>TF, Задний фронт <input type="text" value="100 пс"/></p> <p>PW, Плоская часть импульса <input type="text" value="300 пс"/></p> <p>PER, Период повторения <input type="text" value="1 нс"/></p>
<p>Толщина маски</p> <p>C1 <input type="text" value="0,025 мм"/></p>	
<p>Диэлектрическая проницаемость маски</p> <p>CEr <input type="text" value="3,5"/></p>	

Рис. 111 Дополнительные параметры

Подробное описание параметров линии передачи представлено в разделах [Одиночный расчет одиночной или копланарной одиночной ЛП](#) и [Одиночный расчет дифф. пары или копланарной дифф. пары](#).

Дополнительные параметры описаны в разделе [Перекрестные помехи \(Частотный анализ\)](#), параметры сигналов в разделе [Форма сигнала](#).



Примечание! Для определения уровня напряжения на портах могут быть выбраны только фиксированные значения из выпадающего меню: «Сигнал» и «0 В». Хотя бы один порт линии передачи должен иметь значение «Сигнал» и хотя бы на одной линии должен отсутствовать входной сигнал.

4. Запустите расчет с помощью кнопки «Рассчитать» в правом нижнем углу вкладки расчета.

5. Для одиночных ЛП рассчитываются ([Рис. 112](#)):

- Z_0 – волновое сопротивление (Ом);
- U_{NEXT} – напряжение в начале линии (В);

- $U_{\text{ФЕХТ}}$ – напряжение в конце линии (В).

Рассчитанные параметры доступны для одновременного отображения на графике, в выпадающем меню «Порт» установите флаги в чек-боксы нужных портов и нажмите «ОК».

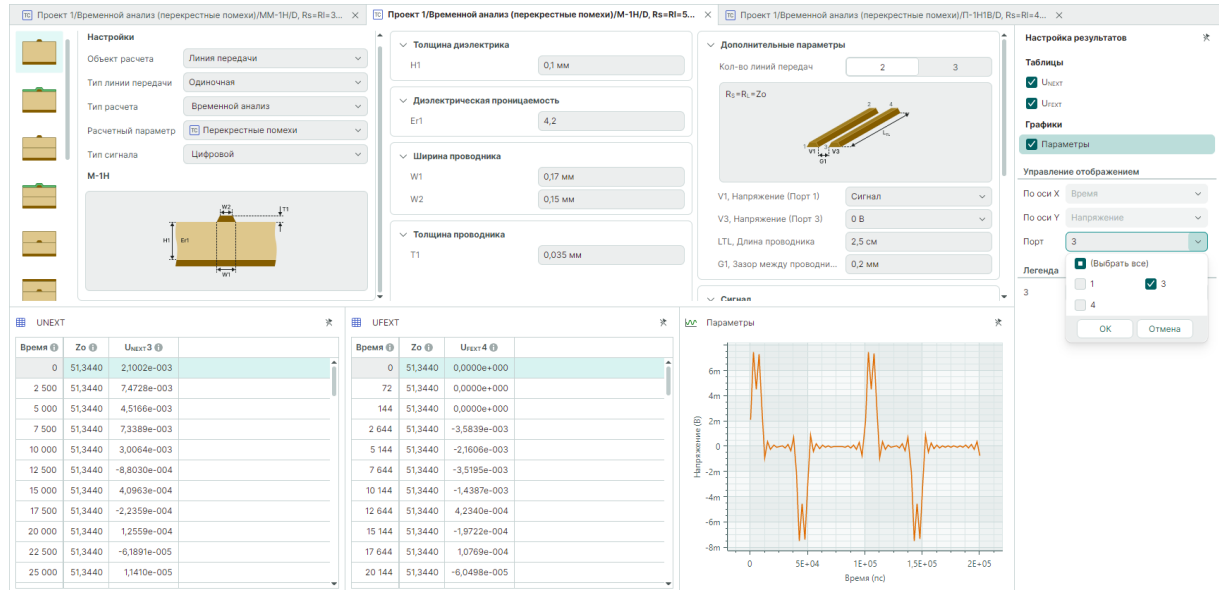


Рис. 112 Параметры одиночных ЛП при расчете «Перекрестные помехи»

Для дифференциальных ЛП рассчитываются Z_{odd} – волновое сопротивление линии, запитанной нечетной модой (Ом) и аналогичные параметры – напряжения в начале и конце каждой линии. Результаты расчета перекрестных помех для дифференциальных ЛП могут быть отображены в режимах: «Нечетная мода» и «Четная мода», см. [Рис. 113](#).

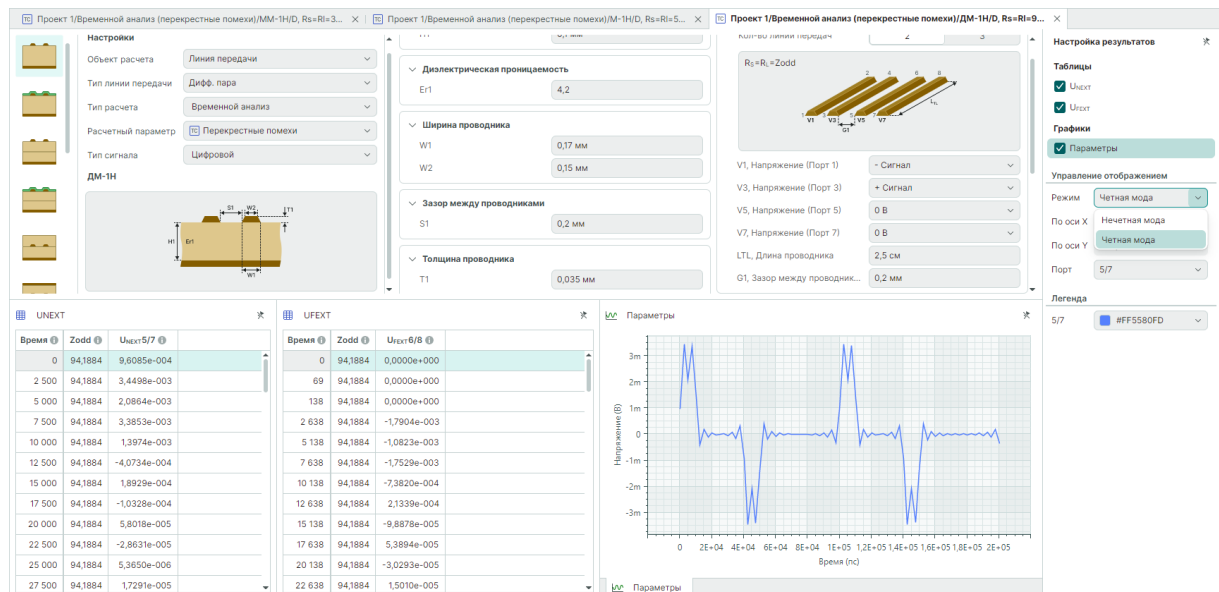


Рис. 113 Параметры дифференциальных ЛП при расчете «Перекрестные помехи»

Примеры расчета перекрестных помех приведены в разделах [Оценка перекрестных помех](#) и [Расчет расстояния между линиями передачи](#).

7 Расчет параметров переходных отверстий

7.1 Интерфейс для расчета параметров ПО

Рабочая область SimPCB Lite для расчета параметров переходных отверстий разделена на несколько областей, каждая из которых отвечает за определенные функции, см. [Рис. 114](#).

The screenshot shows the 'Types of calculations' window for a microvia (O2HB(12)). It includes a 3D model of the via, a table of calculated parameters, and a graph of characteristic impedance vs. diameter.

Dv (mm)	Dr1 (mm)	Dr2 (mm)	Da1 (mm)	Da2 (mm)	Zo (mm)	Trd (mm)	C (mm)	Vp (mm)	L (mm)	Eer (mm)
0.2000	0.5000	0.5000	0.9000	0.9000	37.8696	9.3159	0.2460	1.685E+08	0.3528	3.1644
0.2500	0.5500	0.5500	0.9500	0.9500	34.6047	9.2941	0.2686	1.689E+08	0.3216	3.1496
0.3000	0.6000	0.6000	1.0000	1.0000	31.9162	9.2721	0.2905	1.693E+08	0.2959	3.1347
0.3500	0.6500	0.6500	1.0500	1.0500	29.6514	9.2504	0.3120	1.697E+08	0.2743	3.1200
0.4000	0.7000	0.7000	1.1000	1.1000	27.7106	9.2293	0.3331	1.701E+08	0.2557	3.1058
0.4500	0.7500	0.7500	1.1500	1.1500	26.0241	9.2091	0.3539	1.705E+08	0.2397	3.0923
0.5000	0.8000	0.8000	1.2000	1.2000	24.5392	9.1901	0.3745	1.708E+08	0.2255	3.0795
0.5500	0.8500	0.8500	1.2500	1.2500	23.2221	9.1719	0.3950	1.712E+08	0.2130	3.0673
0.6000	0.9000	0.9000	1.3000	1.3000	22.0472	9.1543	0.4152	1.715E+08	0.2018	3.0556
0.6500	0.9500	0.9500	1.3500	1.3500	20.9867	9.1380	0.4354	1.718E+08	0.1918	3.0447
0.7000	1.0000	1.0000	1.4000	1.4000	20.0265	9.1222	0.4555	1.721E+08	0.1827	3.0342

Рис. 114 Интерфейс для расчета параметров ПО

Для проведения расчета параметров переходного отверстия необходимо выполнить типовую последовательность действий.

Выполнение каждого действия соответствует отдельной функциональной области ([Рис. 115](#)):

1. Выбор объекта и типа расчета;
2. Выбор модели переходного отверстия;
3. Просмотр модели, выбор маски и опорных слоев;
4. Определение входных параметров ПО;
5. Запуск и сохранение расчета;

6. Настройки отображения результатов расчета;
7. Анализ результатов расчета.

7.2 Общие сведения

Расчет «Без потерь» параметров переходного отверстия предназначен для вычисления волнового сопротивления и вторичных параметров ПО по известным геометрическим и электрофизическим параметрам ([Рис. 116](#)):

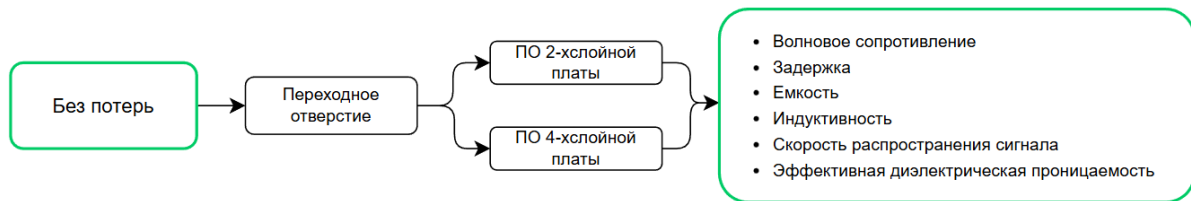


Рис. 116 Расчет «Без потерь» переходного отверстия

В рамках типа расчета «Без потерь» могут быть проведены следующие типы расчетов:

- Одиночный расчет – расчет волнового сопротивления и вторичных параметров переходного отверстия;
- Множественный расчет – расчет параметров ПО, когда для одного из параметров задан диапазон значений и шаг изменения.

Наименования расчетов формируются по следующим шаблонам ([Рис. 117](#)):

а) Одиночный расчет: рассчитанное значение волнового сопротивления (Z_0). Пример: $Z_0=51,344\text{Ом}$.

б) Множественный расчет: диапазон рассчитанных значений волнового сопротивления, диапазон заданных значений и шаг изменяемого параметра. Пример: $Z_0=64,7438\dots45,6891\text{Ом}$, $Dv=0,1;0,2;0,01\text{мм}$.

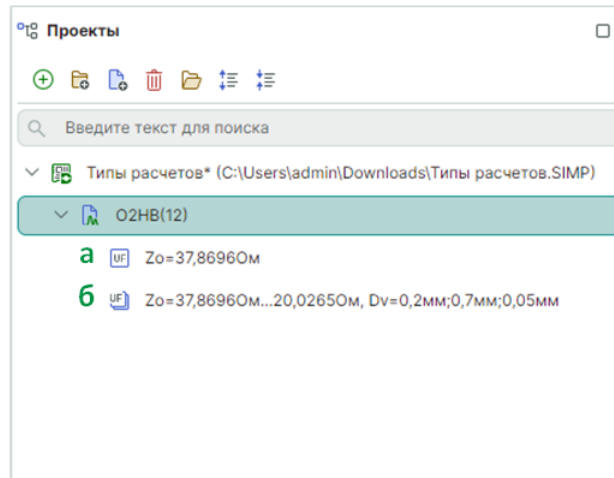


Рис. 117 Наименования расчетов для типа «Без потерь»

7.3 Одиночный расчет

Под одиночным расчетом переходного отверстия подразумевается расчет волнового сопротивления и вторичных параметров ПО с заданными геометрическими параметрами и электрофизическими параметрами.

Для проведения одиночного расчета выполните следующие действия:

1. Определите стартовые настройки расчета ([Рис. 118](#)):

- «Объект расчета» – «Переходное отверстие»;
- «Тип расчета» – «Без потерь».

2. Выберите модель переходного отверстия. При наведении курсора мыши на одну из моделей доступны всплывающие подсказки с наименованием и кодовым обозначением модели.

3. Модель переходного отверстия настраивается с помощью установки и снятия флагов в чек-боксах «Маска» и «Опорный 1...4» в области просмотра.

Область просмотра предоставляет подробное описание выбранной модели ПО: наименование модели, кодовое обозначение, изображение модели с условными обозначениями ключевых при моделировании параметров и пояснения к ним.

При редактировании параметра или выборе его в качестве изменяемой величины во множественном расчете условное обозначение параметра на модели будет выделено красным цветом, см. [Рис. 119](#).

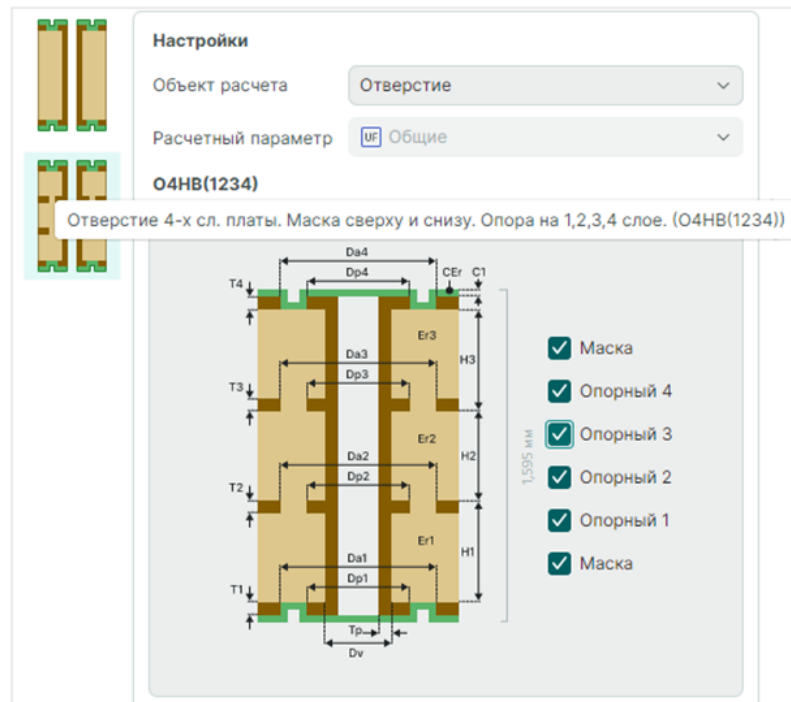


Рис. 119 Стартовые настройки расчета

4. Определите входные параметры переходного отверстия и параметры материала ПП (Рис. 120):

- D_v – диаметр переходного отверстия.
- T_r – толщина меди в отверстии.
- D_p – диаметр площадки. Количество параметров D_p (D_{p1} , D_{p2} и т.д.) зависит от количества проводящих слоев в выбранной модели.
- D_a – диаметр антипада. Количество параметров D_a (D_{a1} , D_{a2} и т.д.) зависит от количества проводящих слоев в выбранной модели.
- T – толщина меди. Количество параметров T (T_1 , T_2 и т.д.) зависит от количества проводящих слоев в выбранной модели.
- H – толщина диэлектрика. Количество параметров H (H_1 , H_2 и т.д.) зависит от количества диэлектриков в выбранной модели.
- E_r – диэлектрическая проницаемость. Количество параметров E_r (E_{r1} , E_{r2} и т.д.) зависит от количества диэлектриков в выбранной модели.
- C_1 – толщина маски.
- C_{Er} – диэлектрическая проницаемость маски.
















Диаметр переходного отверстия	Dv	0,2 мм	
Толщина меди в отверстии	Tr	0,025 мм	
Диаметр площадки	Dp	0,5 мм	
	Dp1	0,5 мм	
	Dp2	0,5 мм	
Диаметр антипада	Da	0,9 мм	
	Da1	0,9 мм	
	Da2	0,9 мм	
Толщина проводника	T	0,035 мм	
	T1	0,035 мм	
	T2	0,035 мм	
Толщина диэлектрика	H1	1,5 мм	
Диэлектрическая проницаемость	Er1	4,2	
Толщина маски	C1	0,025 мм	
Диэлектрическая проницаемость маски	CEr	3,5	

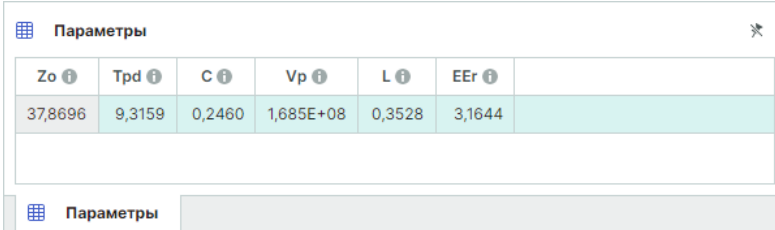
Рис. 120 Параметры ПО и материала ПП

5. Запустите расчет волнового сопротивления и вторичных параметров переходного отверстия с помощью кнопки «Рассчитать» в правом нижнем углу вкладки расчета.

6. Для одиночного расчета переходного отверстия настройка результатов расчета не требуется, рассчитанные параметры представляются в виде таблицы в нижней области вкладки ([Рис. 121](#)):

- Z_0 – волновое сопротивление (Ом);

- T_{pd} – задержка в переходном отверстии (пс);
- C – емкость переходного отверстия (пФ);
- V_p – скорость распространения сигнала (м/с);
- L – индуктивность переходного отверстия (нГн);
- EEr – эффективная диэлектрическая проницаемость.



Zo	T_{pd}	C	V_p	L	EEr
37,8696	9,3159	0,2460	1,685E+08	0,3528	3,1644

Рис. 121 Рассчитанные параметры ПО

7.4 Множественный расчет

Под множественным расчетом параметров переходного отверстия подразумевается расчет волнового сопротивления и вторичных параметров ПО, когда один из входных параметров задан в виде диапазона значений с установленным шагом изменения.

Для проведения множественного расчета выполните следующие действия:

1. Определите стартовые настройки расчета ([Рис. 122](#)):

- «Объект расчета» – «Переходное отверстие»;
- «Тип расчета» – «Без потерь».

2. Выберите модель переходного отверстия и настройте ее с помощью установки и снятия флагов в чек-боксах «Маска» и «Опорный 1...4» в области просмотра.

3. Определите входные параметры переходного отверстия. Выберите параметр, значение которого при расчете будет изменяться в установленном диапазоне.

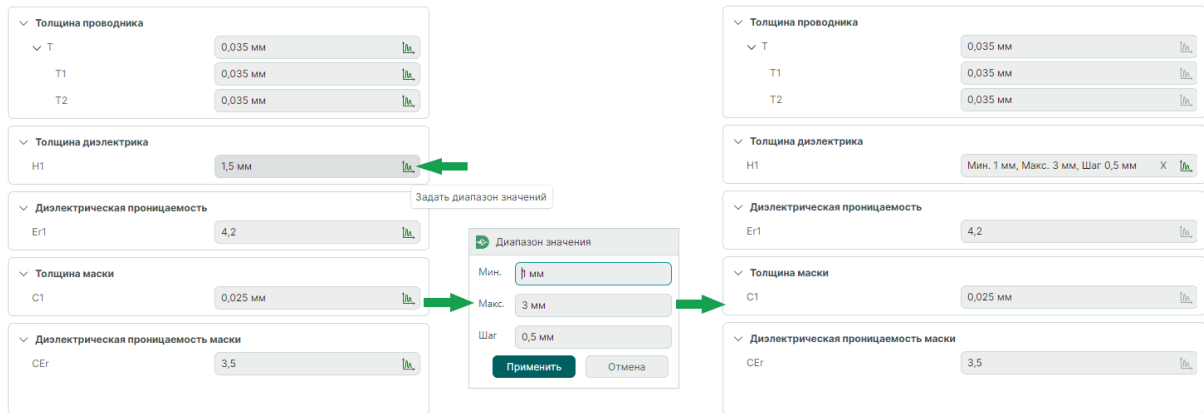




Рис. 122 Настройки множественного расчета



Примечание! Для параметров, значение которых можно задать в диапазоне, в поле значения отображена кнопка , а для параметров, значение которых нельзя задать в диапазоне, кнопка  неактивна и отображается серым цветом.

4. Запустите расчет выбранного параметра и вторичных параметров ПО с помощью кнопки «Рассчитать».

5. Результаты множественного расчета имеют представление в табличном виде и в виде графиков:

- В таблице с результатами первый столбец будет содержать диапазон значений изменяемого параметра, для каждого значения диапазона приведено значение волнового сопротивления и вторичных параметров переходного отверстия, см. [Рис. 123](#).

H1	Zo	Tpd	C	Vp	L	EEr
1,0000	31,7818	6,0148	0,1893	1,779E+08	0,1912	2,8400
1,5000	38,6777	9,1213	0,2358	1,721E+08	0,3528	3,0336
2,0000	44,1594	12,2889	0,2783	1,684E+08	0,5427	3,1676
2,5000	48,7568	15,4957	0,3178	1,659E+08	0,7555	3,2674
3,0000	52,7365	18,7303	0,3552	1,639E+08	0,9878	3,3454

Рис. 123 Результаты множественного расчета в виде таблицы

Если изменяемым параметром является диаметр переходного отверстия (Dv), то при расчетах будет сохранена заданная разница между диаметрами отверстия, площадки (Dp) и антипада (Da), см. [Рис. 124](#).

Dv	Dp1	Dp2	Da1	Da2	Zo	Tpd	C	Vp	L	EEr
0,2000	0,5000	0,5000	0,9000	0,9000	38,6777	9,1213	0,2358	1,721E+08	0,3528	3,0336
0,2500	0,5500	0,5500	0,9500	0,9500	35,3305	9,1032	0,2577	1,725E+08	0,3216	3,0215
0,3000	0,6000	0,6000	1,0000	1,0000	32,5778	9,0838	0,2788	1,728E+08	0,2959	3,0087
0,3500	0,6500	0,6500	1,0500	1,0500	30,2610	9,0640	0,2995	1,732E+08	0,2743	2,9956
0,4000	0,7000	0,7000	1,1000	1,1000	28,2769	9,0444	0,3199	1,736E+08	0,2557	2,9827
0,4500	0,7500	0,7500	1,1500	1,1500	26,5537	9,0254	0,3399	1,74E+08	0,2397	2,9701
0,5000	0,8000	0,8000	1,2000	1,2000	25,0372	9,0073	0,3598	1,743E+08	0,2255	2,9582
0,5500	0,8500	0,8500	1,2500	1,2500	23,6927	8,9897	0,3794	1,746E+08	0,2130	2,9467
0,6000	0,9000	0,9000	1,3000	1,3000	22,4929	8,9730	0,3989	1,75E+08	0,2018	2,9357
0,6500	0,9500	0,9500	1,3500	1,3500	21,4110	8,9569	0,4183	1,753E+08	0,1918	2,9252
0,7000	1,0000	1,0000	1,4000	1,4000	20,4313	8,9414	0,4376	1,756E+08	0,1827	2,9151

Рис. 124 Диаметры отверстия, площадки, антипада

- Графики доступны в отдельной вкладке (расположение вкладки может быть изменено), см. [Рис. 125](#).

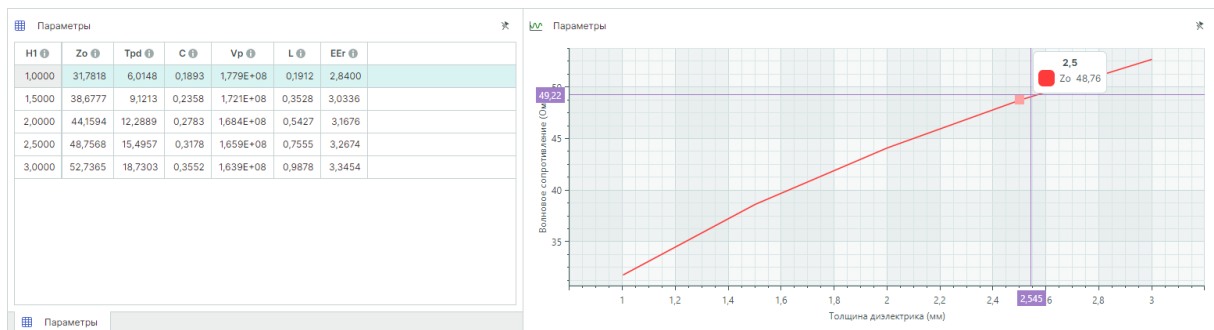


Рис. 125 Пример расположения вкладки

По оси X графика отображается параметр, значение которого задано в диапазоне для множественного расчета. Параметр по оси Y может быть изменен.

Для отображения по оси Y доступны все рассчитанные параметры, отображаемые в табличном виде (Zo, Tpd, C, Vp, L, EEr), см. [Рис. 126](#).

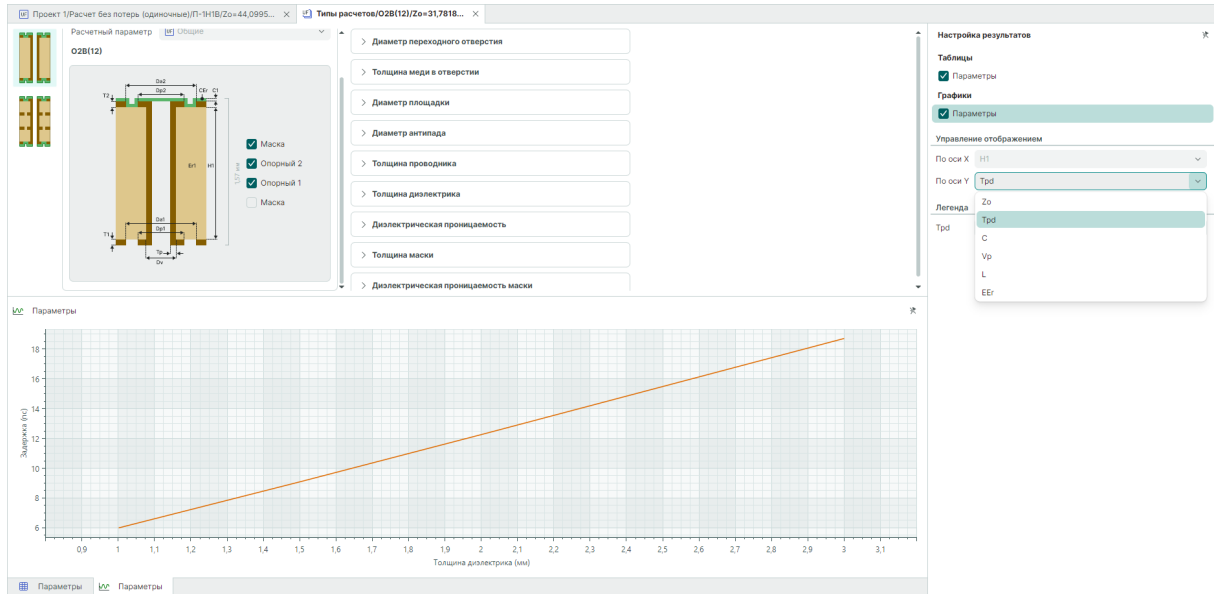


Рис. 126 Параметры по оси Y

8 Выгрузка результатов

В системе SimPCB Lite существует возможность сохранения результатов расчетов в файлы формата .XLSX.

Вывод результатов открытого расчета в файлы формата .XLSX производится с помощью иконки панели инструментов. В окне проводника укажите место для сохранения файла.

Имя файла по умолчанию будет соответствовать имени расчета в панели «Проекты», см. [Рис. 127](#).

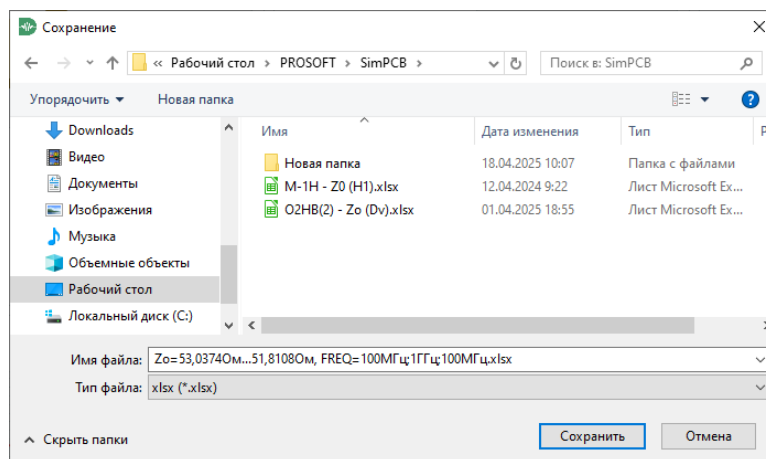


Рис. 127 Сохранение расчета в файлы формата .XLSX

Пример файла с рассчитанными общими параметрами микрополосковой ЛП представлен на [Рис. 128](#).

28 апреля 2026 г. 15:48:54
 SimPCB - 4.2.1.417-dev+8b615d1a65c50a10c1847fc341001821a3c87f9b
 Микрорисковая ЛП (М-1Н)

Единицы измерения

H1	Er1	W1	W2	T1	UseRougha	N	Af	TC	tgδ	LTL	
0,1	4,2	0,17	0,15	0,035	0	0,00075	32	0,00009	58000000	0,02	25

FREQ	TR	Zo	R	L	C	G	αdb,R	αdb,D	αdb	Tpd	Vp	EEr	φ	Vφ
1E+08	1E-09	53,03736	0,321451	7,895567	2,812325	3,03E-05	-0,02632	-0,00698	-0,0333	149,0131	1,68E+08	2,998271	0,093654	1,68E+08
2E+08	5E-10	52,51274	0,45127	7,748055	2,812325	6,06E-05	-0,03732	-0,01382	-0,05114	147,6145	1,69E+08	2,998271	0,185518	1,69E+08
3E+08	3,33E-10	52,28078	0,550459	7,682453	2,812325	9,09E-05	-0,04573	-0,02064	-0,06637	146,9883	1,7E+08	2,998271	0,277081	1,7E+08
4E+08	2,5E-10	52,14461	0,634422	7,643838	2,812325	0,000121	-0,05284	-0,02745	-0,08029	146,6184	1,71E+08	2,998271	0,368504	1,71E+08
5E+08	2E-10	52,04911	0,708495	7,616678	2,812325	0,000152	-0,05912	-0,03425	-0,09337	146,3577	1,71E+08	2,998271	0,459805	1,71E+08
6E+08	1,67E-10	51,97819	0,775466	7,596481	2,812325	0,000182	-0,06479	-0,04104	-0,10584	146,1635	1,71E+08	2,998271	0,55103	1,71E+08
7E+08	1,43E-10	51,92405	0,836935	7,581055	2,812325	0,000212	-0,07	-0,04783	-0,11784	146,015	1,71E+08	2,998271	0,642213	1,71E+08
8E+08	1,25E-10	51,87942	0,894264	7,568322	2,812325	0,000242	-0,07486	-0,05462	-0,12948	145,8924	1,71E+08	2,998271	0,733339	1,71E+08
9E+08	1,11E-10	51,84217	0,948078	7,557686	2,812325	0,000273	-0,07942	-0,0614	-0,14083	145,7898	1,71E+08	2,998271	0,824425	1,71E+08
1E+09	1E-10	51,8108	0,998985	7,548725	2,812325	0,000303	-0,08374	-0,06818	-0,15192	145,7033	1,72E+08	2,998271	0,915483	1,72E+08

Рис. 128 Пример файла с результатами расчета

9 Приложение А

9.1 Модели линий передачи

Полный список моделей линий передачи:

а) Одиночные линии передачи:

- Микрорисковая ЛП (М-1Н), см. [Рис. 129](#).

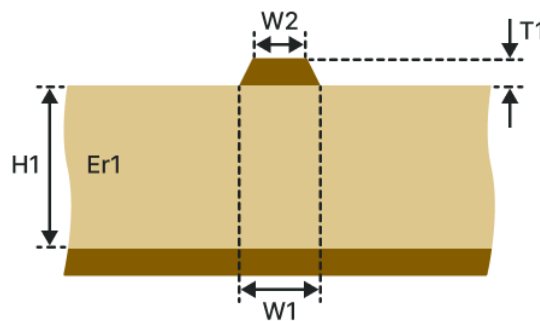


Рис. 129 Микрорисковая ЛП (М-1Н)

- Микрорисковая ЛП с маской (ММ-1Н), см. [Рис. 130](#).

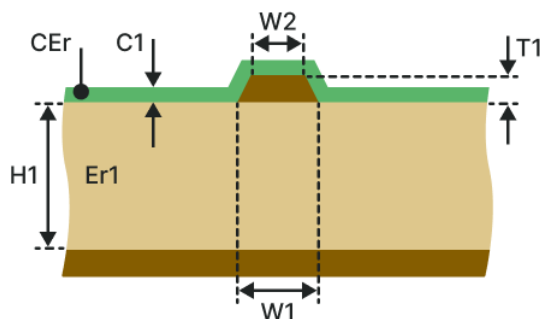


Рис. 130 Микрополосковая ЛП с маской (ММ-1Н)

- Микрополосковая ЛП (М-2Н), см. [Рис. 131](#).

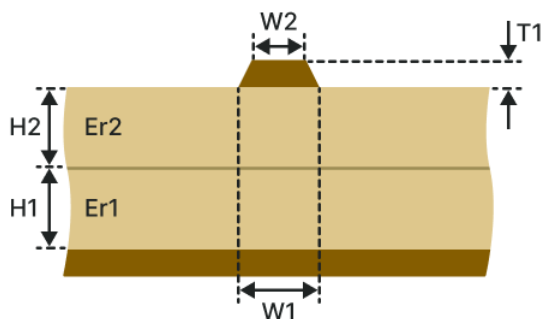


Рис. 131 Микрополосковая ЛП (М-2Н)

- Микрополосковая ЛП с маской (ММ-2Н), см. [Рис. 132](#).

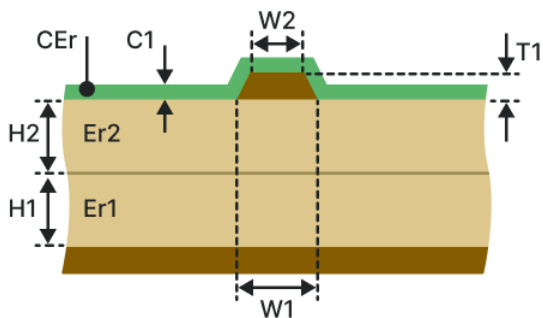


Рис. 132 Микрополосковая ЛП с маской

- Заглубленная ЛП (З-1Н1В), см. [Рис. 133](#).

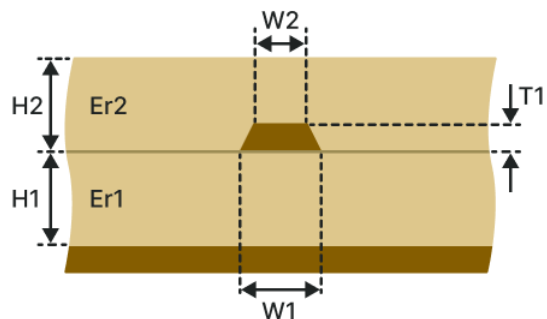


Рис. 133 Заглубленная ЛП (3-1H1B)

- Полосковая ЛП (П-1H1B), см. [Рис. 134](#).

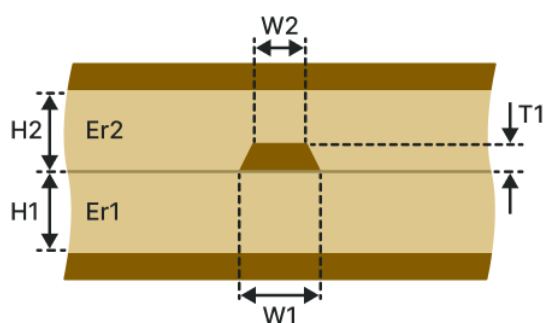


Рис. 134 Полосковая ЛП (П-1H1B)

- Заглубленная ЛП (3-1H2B), см. [Рис. 135](#).

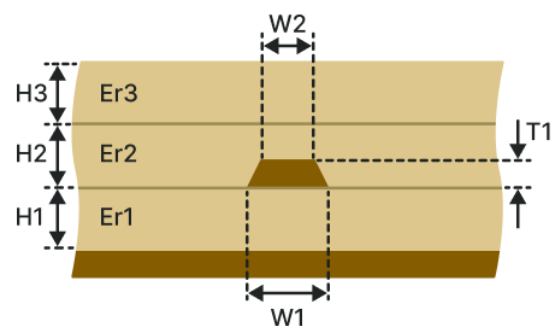


Рис. 135 Заглубленная ЛП (3-1H2B)

- Полосковая ЛП (П-1H2B), см. [Рис. 136](#).

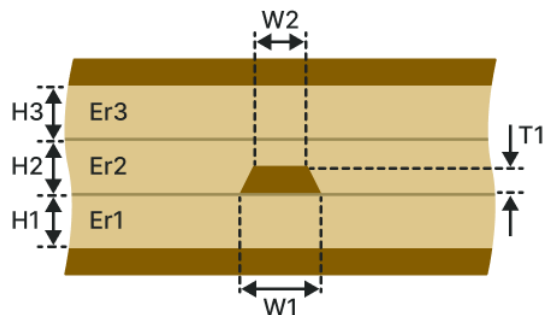


Рис. 136 Полосковая ЛП (П-1Н2В)

- Заглубленная ЛП (З-2Н1В), см. [Рис. 137](#).

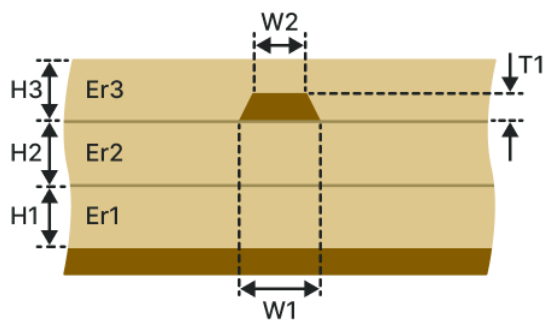


Рис. 137 Заглубленная ЛП (З-2Н1В)

- Полосковая ЛП (П-2Н1В), см. [Рис. 138](#).

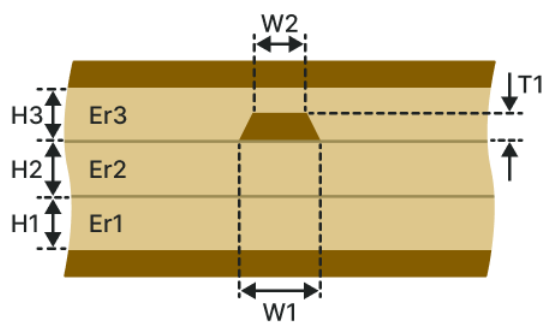


Рис. 138 Полосковая ЛП (П-2Н1В)

- Заглубленная ЛП (З-2Н2В), см. [Рис. 139](#).

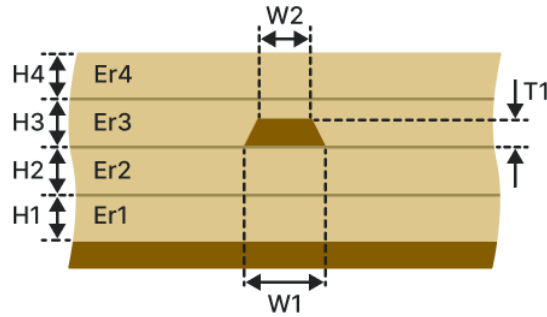


Рис. 139 Заглубленная ЛП (3-2H2B)

- Полосковая ЛП (П-2H2B), см. [Рис. 140](#).

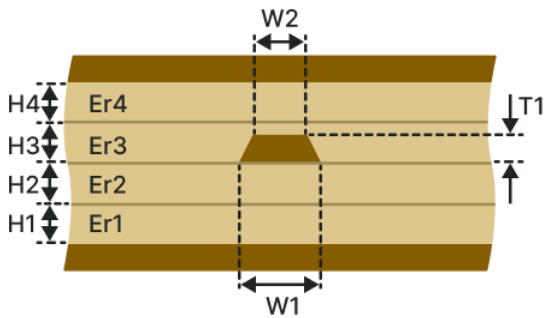


Рис. 140 Полосковая ЛП (П-2H2B)

б) Дифференциальные пары:

- Дифференциальная микрополосковая ЛП (ДМ-1Н), см. [Рис. 141](#).

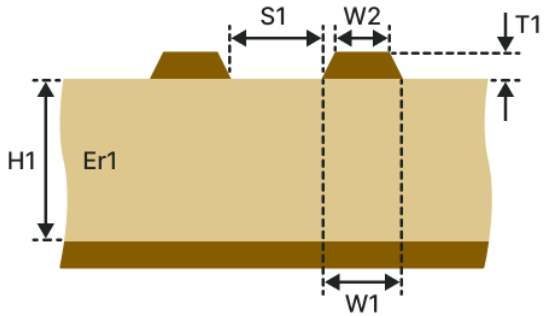


Рис. 141 Дифференциальная микрополосковая ЛП (ДМ-1Н)

- Дифференциальная микрополосковая ЛП с маской (ДММ-1Н), см. [Рис. 142](#).

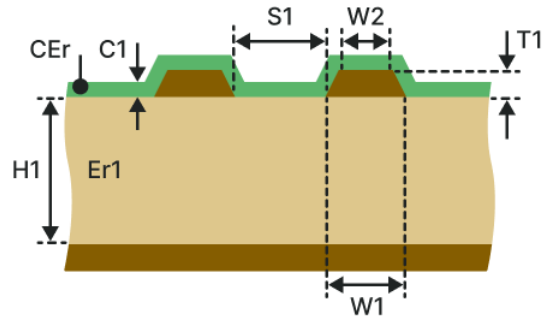


Рис. 142 Дифференциальная микрополосковая ЛП с маской (ДММ-1Н)

- Дифференциальная микрополосковая ЛП (ДМ-2Н), см. [Рис. 143](#).

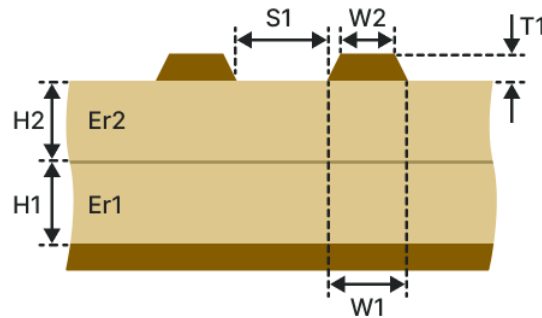


Рис. 143 Дифференциальная микрополосковая ЛП (ДМ-2Н)

- Дифференциальная микрополосковая ЛП с маской (ДММ-2Н), см. [Рис. 144](#).

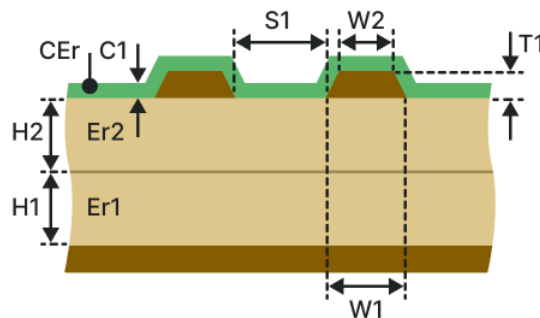


Рис. 144 Дифференциальная микрополосковая ЛП с маской (ДММ-2Н)

- Дифференциальная заглубленная ЛП (ДЗ-1Н1В), см. [Рис. 145](#).

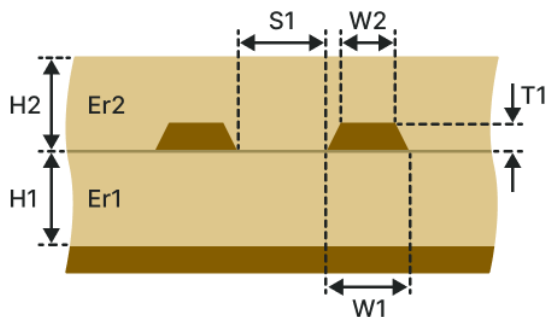


Рис. 145 Дифференциальная заглибленная ЛП (ДЗ-1Н1В)

- Дифференциальная полосковая ЛП (ДП-1Н1В), см. [Рис. 146](#).

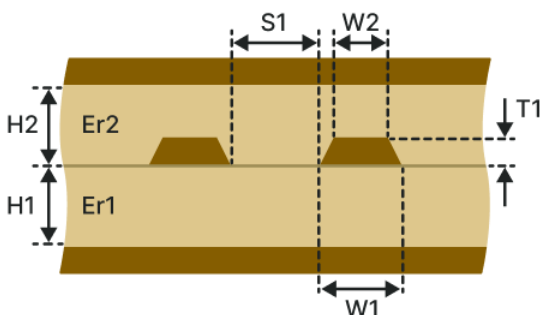


Рис. 146 Дифференциальная полосковая ЛП (ДП-1Н1В)

- Дифференциальная заглибленная ЛП (ДЗ-1Н2В), см. [Рис. 147](#).

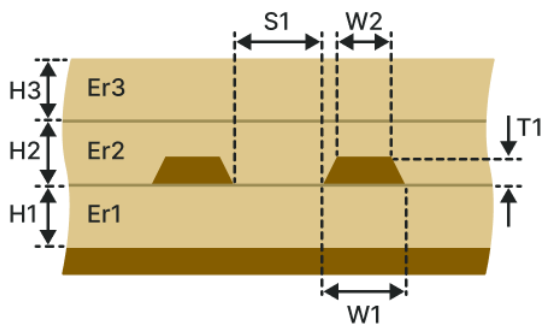


Рис. 147 Дифференциальная заглибленная ЛП (ДЗ-1Н2В)

- Дифференциальная полосковая ЛП (ДП-1Н2В), см. [Рис. 148](#).

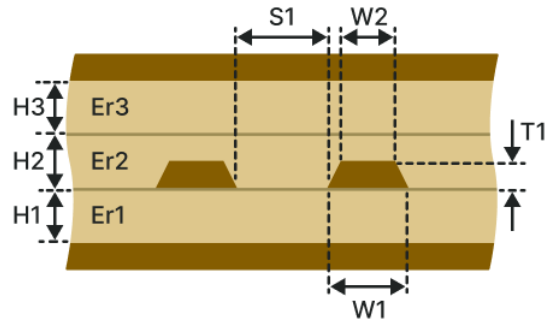


Рис. 148 Дифференциальная полосковая ЛП (ДП-1Н2В)

- Дифференциальная заглубленная ЛП (ДЗ-2Н1В), см. [Рис. 149](#).

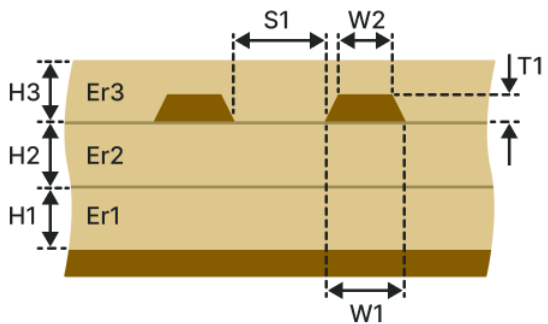


Рис. 149 Дифференциальная заглубленная ЛП (ДЗ-2Н1В)

- Дифференциальная полосковая ЛП (ДП-2Н1В), см. [Рис. 150](#).

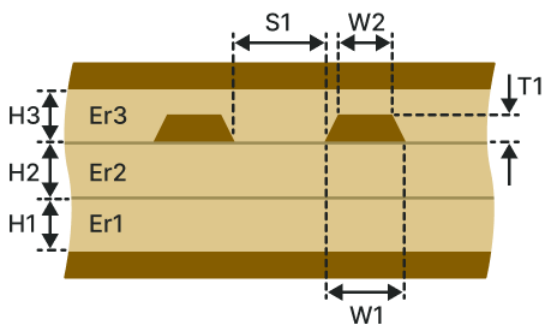


Рис. 150 Дифференциальная полосковая ЛП (ДП-2Н1В)

- Дифференциальная заглубленная ЛП (ДЗ-2Н2В), см. [Рис. 151](#).

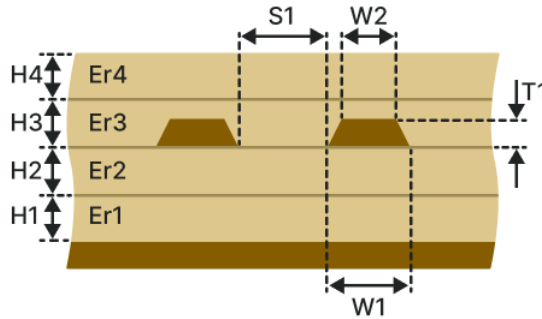


Рис. 151 Дифференциальная заглубленная ЛП (ДЗ-2Н2В)

- Дифференциальная полосковая ЛП (ДП-2Н2В), см. [Рис. 152](#).

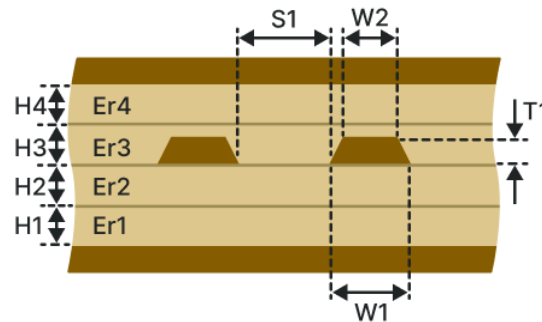


Рис. 152 Дифференциальная полосковая ЛП (ДП-2Н2В)

в) Копланарные одиночные линии передачи:

- Копланарная микрополосковая ЛП (КМ-1Н), см. [Рис. 153](#).

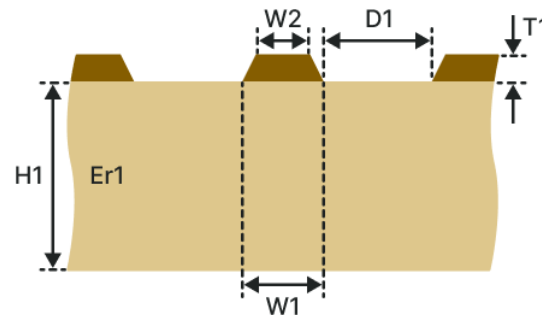


Рис. 153 Копланарная микрополосковая ЛП (КМ-1Н)

- Копланарная микрополосковая ЛП с маской (КММ-1Н), см. [Рис. 154](#).

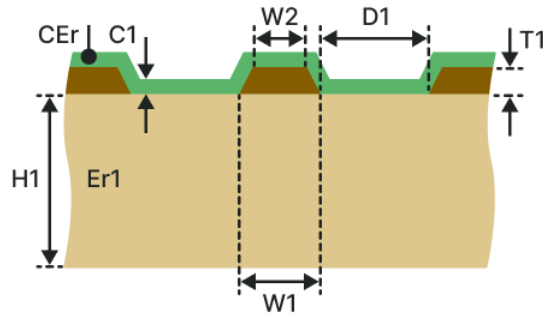


Рис. 154 Копланарная микрополосковая ЛП с маской (KMM-1H)

- Копланарная микрополосковая ЛП с опорным слоем (KMOС-1H), см. [Рис. 155](#).

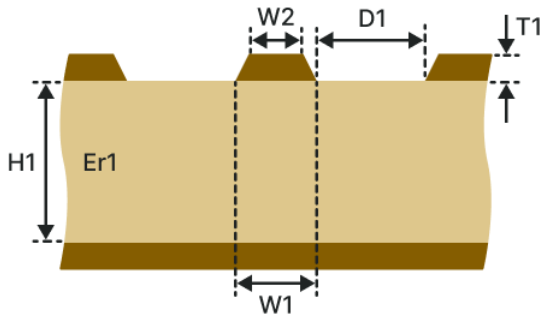


Рис. 155 Копланарная микрополосковая ЛП с опорным слоем (KMOС-1H)

- Копланарная микрополосковая ЛП с маской и опорным слоем (KMMOC-1H), см. [Рис. 156](#).

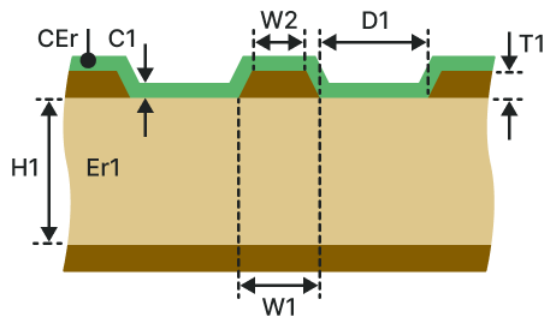


Рис. 156 Копланарная микрополосковая ЛП с маской и опорным слоем (KMMOC-1H)

- Копланарная микрополосковая ЛП (KM-2H), см. [Рис. 157](#).

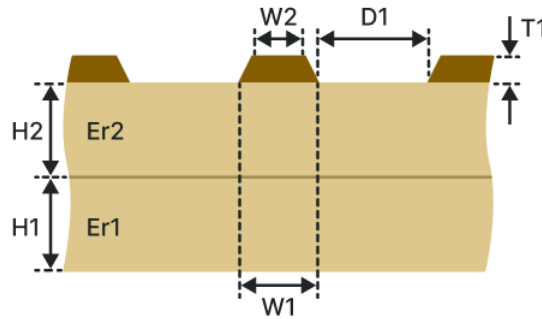


Рис. 157 Копланарная микрополосковая ЛП (KM-2H)

- Копланарная микрополосковая ЛП с маской (КММ-2H), см. [Рис. 158](#).

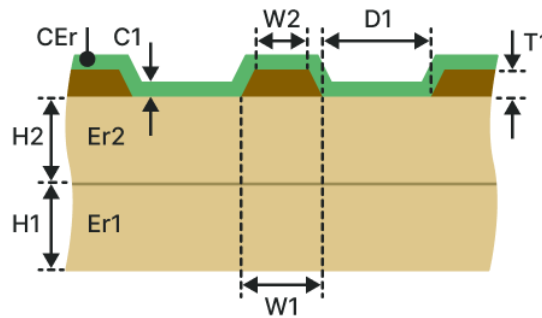


Рис. 158 Копланарная микрополосковая ЛП с маской (KMM-2H)

- Копланарная микрополосковая ЛП с опорным слоем (КМОС-2H), см. [Рис. 159](#).

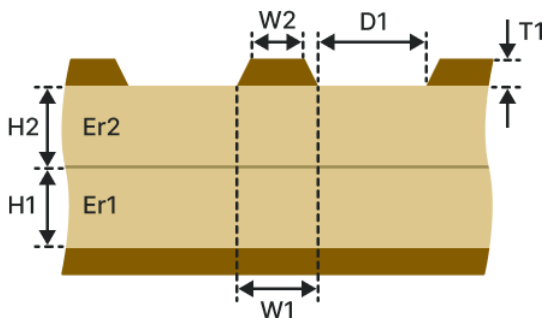


Рис. 159 Копланарная микрополосковая ЛП с опорным слоем (KMOС-2H)

- Копланарная микрополосковая ЛП с маской и опорным слоем (КММОС-2H), см. [Рис. 160](#).

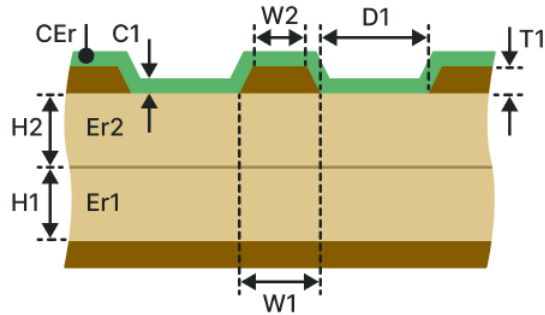


Рис. 160 Копланарная микрополосковая ЛП с маской и опорным слоем (КММОС-2Н)

- Копланарная заглубленная ЛП (КЗ-1Н1В), см. [Рис. 161](#).

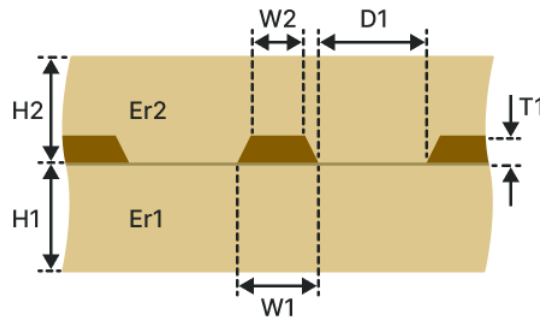


Рис. 161 Копланарная заглубленная ЛП (КЗ-1Н1В)

- Копланарная заглубленная ЛП с опорным слоем (КЗОС-1Н1В), см. [Рис. 162](#).

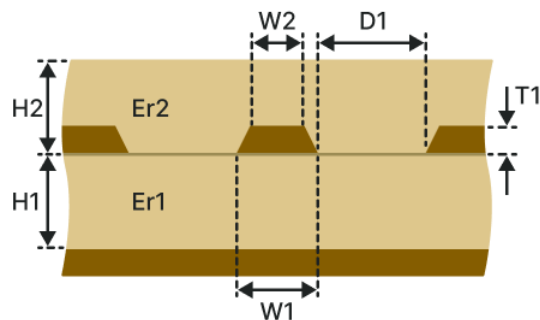


Рис. 162 Копланарная заглубленная ЛП с опорным слоем (КЗОС-1Н1В)

- Копланарная полосковая ЛП (КП-1Н1В), см. [Рис. 163](#).

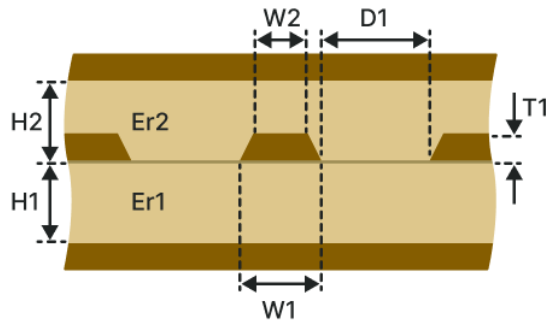


Рис. 163 Копланарная полосковая ЛП (КП-1Н1В)

- Копланарная заглибленная ЛП (КЗ-1Н2В), см. [Рис. 164](#).

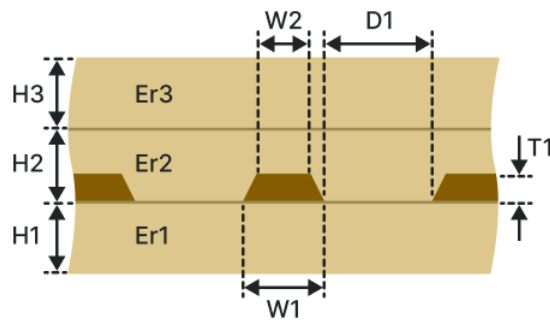


Рис. 164 Копланарная заглибленная ЛП (КЗ-1Н2В)

- Копланарная заглибленная ЛП с опорным слоем (КЗОС-1Н2В), см. [Рис. 165](#).

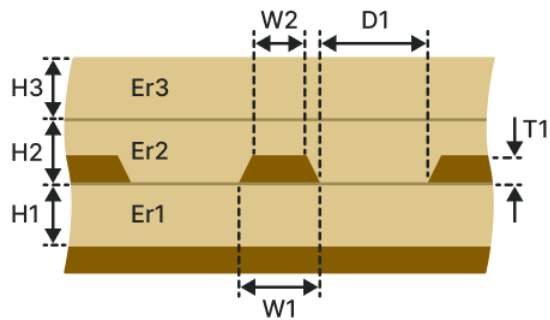


Рис. 165 Копланарная заглибленная ЛП с опорным слоем (КЗОС-1Н2В)

- Копланарная полосковая ЛП (КП-1Н2В), см. [Рис. 166](#).

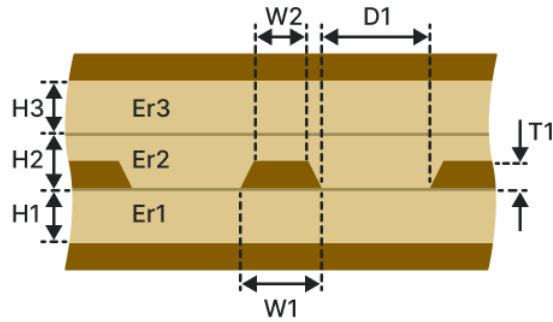


Рис. 166 Копланарная полосковая ЛП

- Копланарная заглибленная ЛП (КЗ-2Н1В), см. [Рис. 167](#).

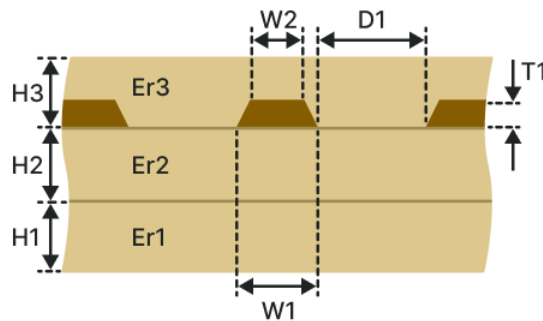


Рис. 167 Копланарная заглибленная ЛП (КЗ-2Н1В)

- Копланарная заглибленная ЛП с опорным слоем (КЗОС-2Н1В), см. [Рис. 168](#).

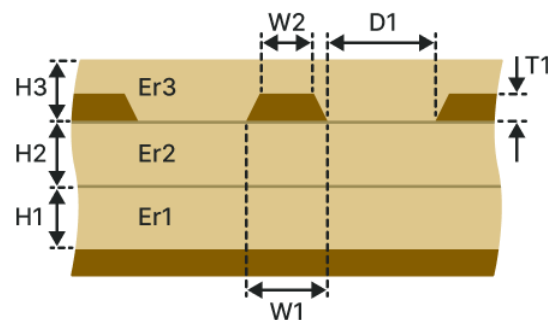


Рис. 168 Копланарная заглибленная ЛП с опорным слоем (КЗОС-2Н1В)

- Копланарная полосковая ЛП (КП-2Н1В), см. [Рис. 169](#).

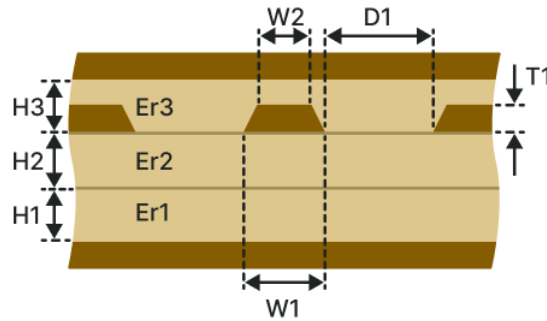


Рис. 169 Копланарная полосковая ЛП

- Копланарная заглубленная ЛП (КЗ-2Н2В), см. [Рис. 170](#).

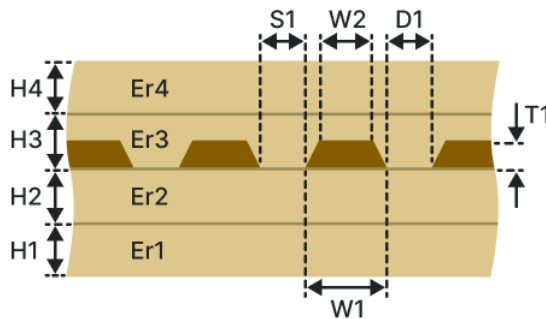


Рис. 170 Копланарная заглубленная ЛП (КЗ-2Н2В)

- Копланарная заглубленная ЛП с опорным слоем (КЗОС-2Н2В), см. [Рис. 171](#).

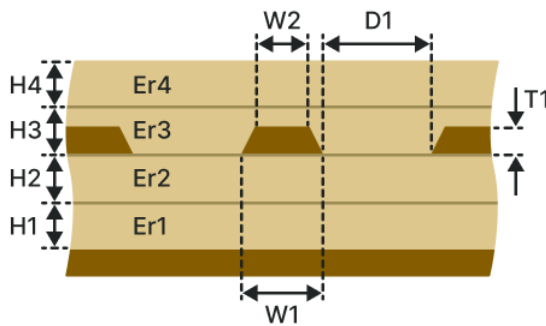


Рис. 171 Копланарная заглубленная ЛП с опорным слоем (КЗОС-2Н2В)

- Копланарная полосковая ЛП (КП-2Н2В), см. [Рис. 172](#).

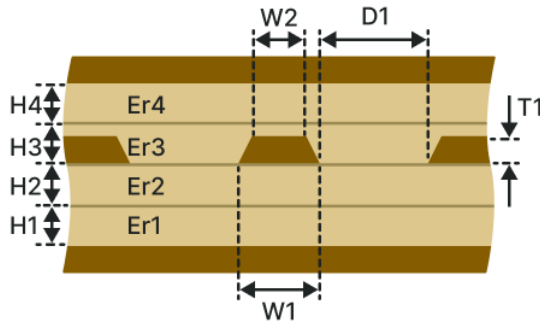


Рис. 172 Копланарная полосковая ЛП (КП-2Н2В)

г) Копланарные дифференциальные пары:

- Копланарная дифференциальная микрополосковая ЛП (КДМ-1Н), см. [Рис. 173](#).

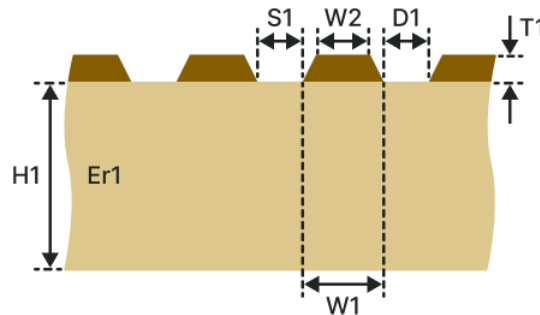


Рис. 173 Копланарная дифференциальная микрополосковая ЛП (КДМ-1Н)

- Копланарная дифференциальная микрополосковая ЛП с маской (КДММ-1Н), см. [Рис. 174](#).

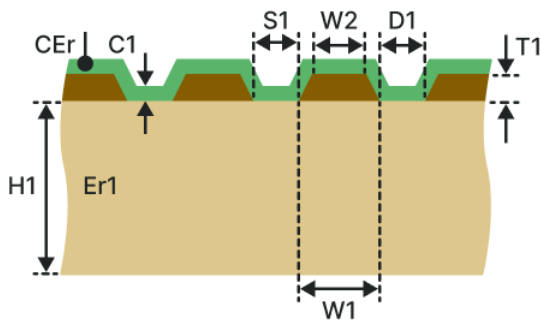


Рис. 174 Копланарная дифференциальная микрополосковая ЛП с маской (КДММ-1Н)

- Копланарная дифференциальная микрополосковая ЛП с опорным слоем (КДМОС-1Н), см. [Рис. 175](#).

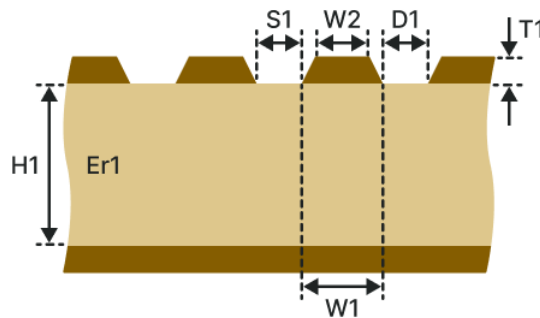


Рис. 175 Копланарная дифференциальная микрополосковая ЛП с опорным слоем (КДМОС-1Н)

- Копланарная дифференциальная микрополосковая ЛП с опорным слоем и маской (КДММОС-1Н), см. [Рис. 176](#).

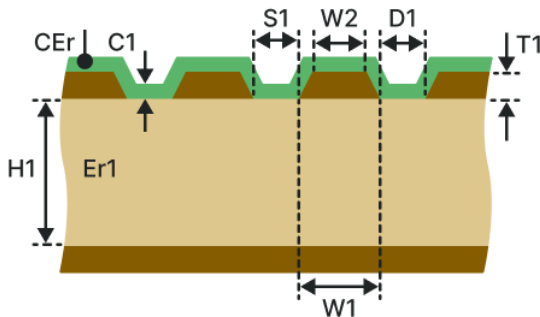


Рис. 176 Копланарная дифференциальная микрополосковая ЛП с опорным слоем и маской (КДММОС-1Н)

- Копланарная дифференциальная микрополосковая ЛП (КДМ-2Н), см. [Рис. 177](#).

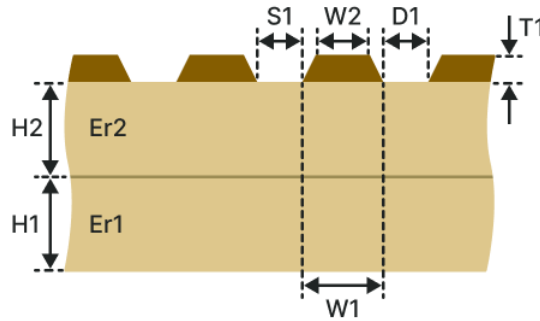


Рис. 177 Копланарная дифференциальная микрополосковая ЛП (КДМ-2Н)

- Копланарная дифференциальная микрополосковая ЛП с маской (КДММ-2Н), см. [Рис. 178](#).

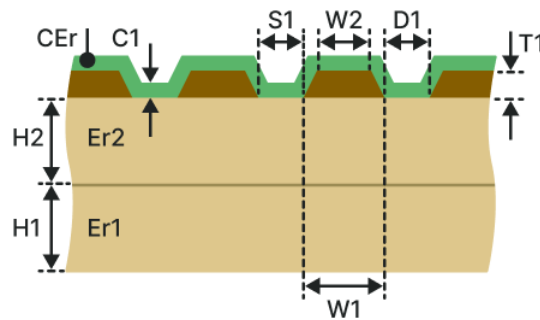


Рис. 178 Копланарная дифференциальная микрополосковая ЛП с маской (КДММ-2Н)

- Копланарная дифференциальная микрополосковая ЛП с опорным слоем (КДМОС-2Н), см. [Рис. 179](#).

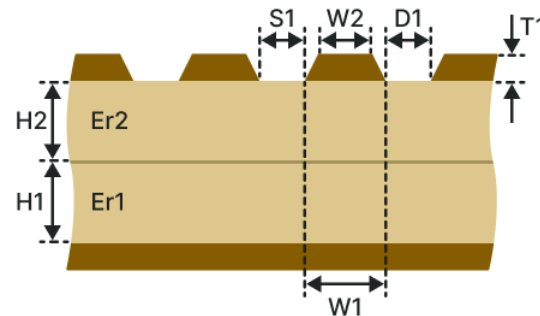


Рис. 179 Копланарная дифференциальная микрополосковая ЛП с опорным слоем (КДМОС-2Н)

- Копланарная дифференциальная микрополосковая ЛП с маской и опорным слоем (КДММОС-2Н), см. [Рис. 180](#).

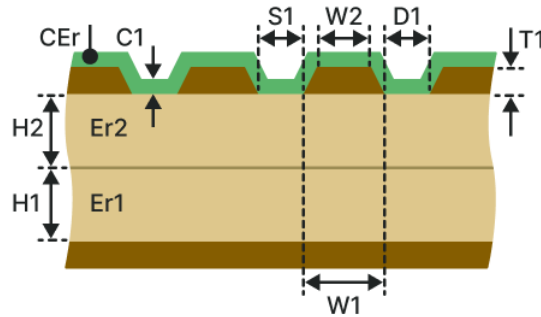


Рис. 180 Копланарная дифференциальная микрополосковая ЛП с маской и опорным слоем (КДММОС-2Н)

- Копланарная дифференциальная заглубленная ЛП (КДЗ-1Н1В), см. [Рис. 181](#).

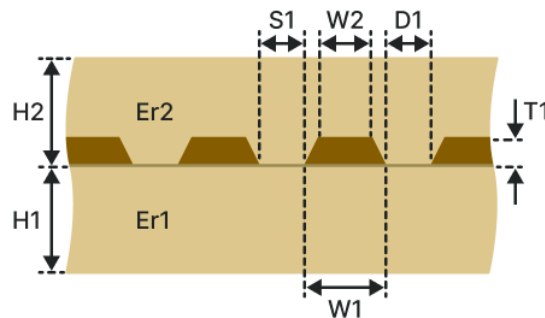


Рис. 181 Копланарная дифференциальная заглубленная ЛП (КДЗ-1Н1В)

- Копланарная дифференциальная заглубленная ЛП с опорным слоем (КДЗОС-1Н1В), см. [Рис. 182](#).

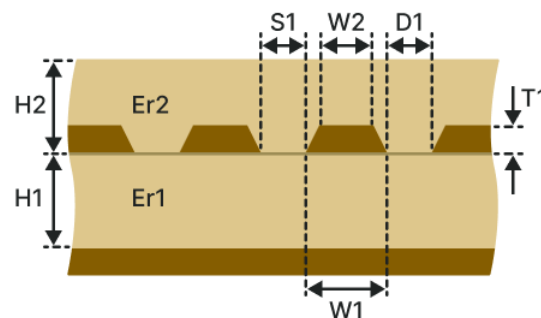


Рис. 182 Копланарная дифференциальная заглубленная ЛП с опорным слоем (КДЗОС-1Н1В)

- Копланарная дифференциальная полосковая ЛП (КДП-1Н1В), см. [Рис. 183](#).

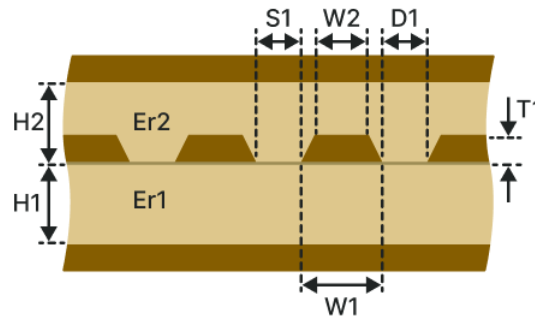


Рис. 183 Копланарная дифференциальная полосковая ЛП (КДП-1Н1В)

- Копланарная дифференциальная заглубленная ЛП (КДЗ-2Н1В), см. [Рис. 184](#).

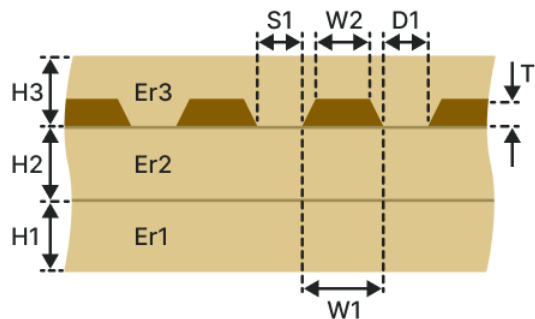


Рис. 184 Копланарная дифференциальная заглубленная ЛП (КДЗ-2Н1В)

- Копланарная дифференциальная заглубленная ЛП с опорным слоем (КДЗОС-2Н1В), см. [Рис. 185](#).

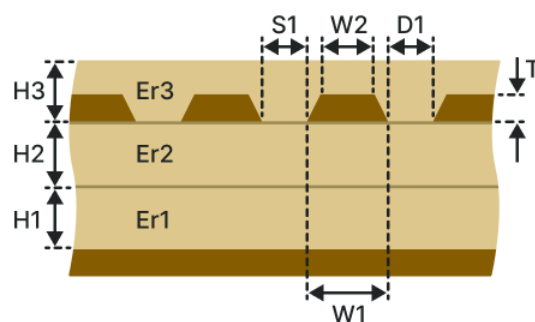


Рис. 185 Копланарная дифференциальная заглубленная ЛП с опорным слоем

- Копланарная дифференциальная полосковая ЛП (КДП-2Н1В), см. [Рис. 186](#).

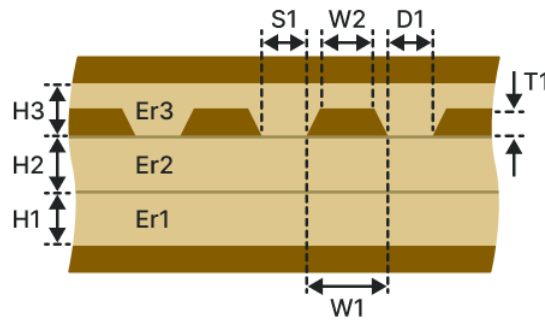


Рис. 186 Копланарная дифференциальная полосковая ЛП (КДП-2Н1В)

- Копланарная дифференциальная заглубленная ЛП (КДЗ-1Н2В), см. [Рис. 187](#).

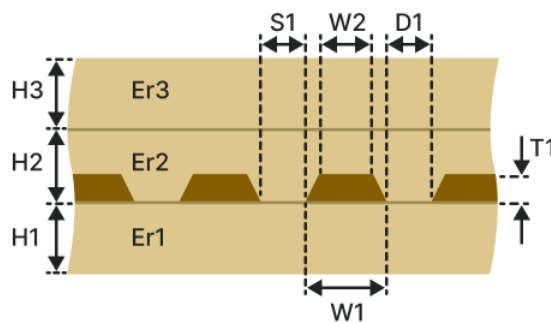


Рис. 187 Копланарная дифференциальная заглубленная ЛП (КДЗ-1Н2В)

- Копланарная дифференциальная заглубленная ЛП с опорным слоем (КДЗОС-1Н2В), см. [Рис. 188](#).

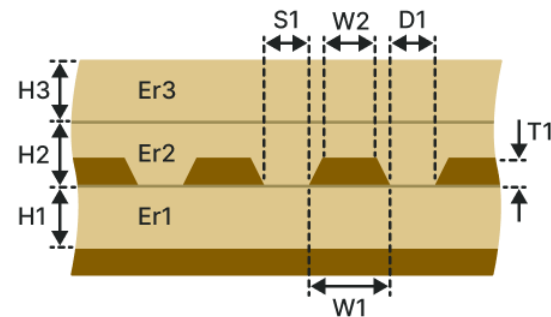


Рис. 188 Копланарная дифференциальная заглубленная ЛП с опорным слоем (КДЗОС-1Н2В)

- Копланарная дифференциальная полосковая ЛП (КДП-1Н2В), см. [Рис. 189](#).

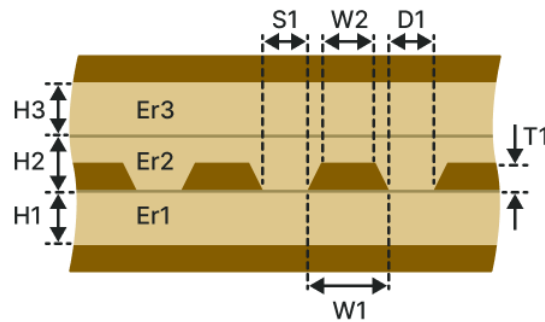


Рис. 189 Копланарная дифференциальная полосковая ЛП (КДП-1Н2В)

- Копланарная дифференциальная заглубленная ЛП (КДЗ-2Н2В), см. [Рис. 190](#).

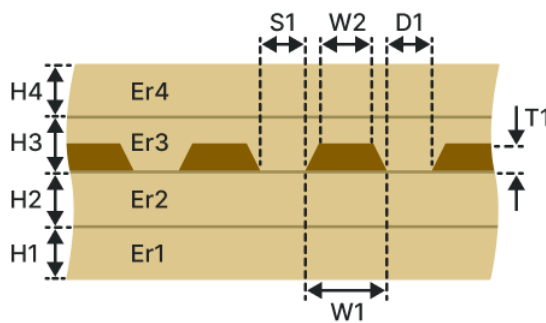


Рис. 190 Копланарная дифференциальная заглубленная ЛП (КДЗ-2Н2В)

- Копланарная дифференциальная заглубленная ЛП с опорным слоем (КДЗОС-2Н2В), см. [Рис. 191](#).

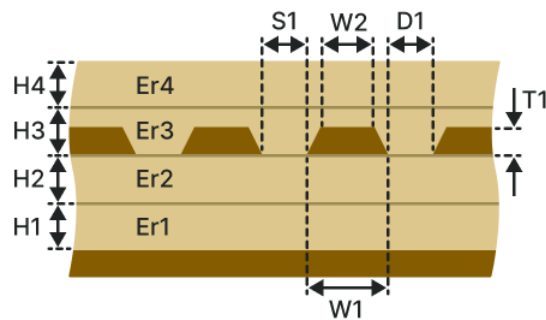


Рис. 191 Копланарная дифференциальная заглубленная ЛП с опорным слоем (КДЗОС-2Н2В)

- Копланарная дифференциальная полосковая ЛП (КДП-2Н2В), см. [Рис. 192](#).

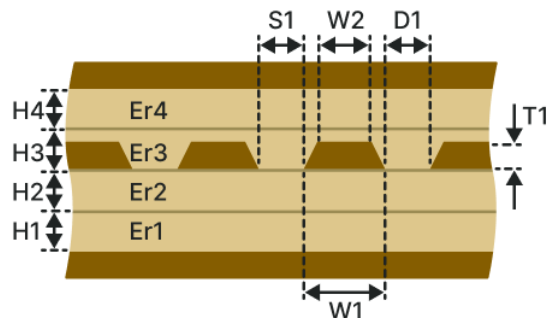


Рис. 192 Копланарная дифференциальная
полосковая ЛП (КДП-2Н2В)

9.2 Модели переходных отверстий

Модели необходимых переходных отверстий формируются с помощью установки и снятия флагов в чек-боксах «Маска» и «Опорный 1...4» в области просмотра.

На [Рис. 193](#) представлена модель переходного отверстия двухслойной печатной платы со всеми активными настройками (с маской и опорой на 1 и 2 слоях).

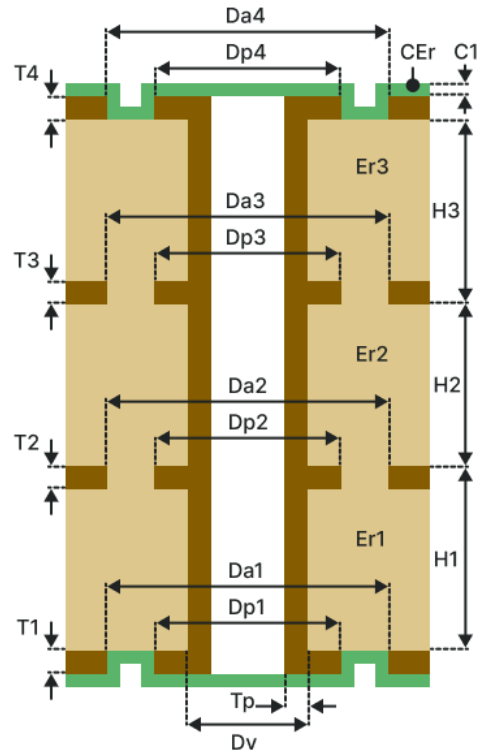


Рис. 194 Модель переходного отверстия четырехслойной печатной платы

10 Приложение Б - Практические примеры расчетов

10.1 Расчет волнового сопротивления

В качестве примера расчета волнового сопротивления и вторичных параметров ЛП рассмотрим расчет полосковой линии передачи, расположенной на третьем слое типовой структуры 6-и слойной печатной платы толщиной 1,5 мм с известными геометрическими и электрофизическими параметрам, см. [Рис. 195](#).

Источник изображения типовой структуры – сайт www.rezonit.ru.

6-и слойная печатная плата МСО фольга 18 мкм TG170

Требуемая толщина платы, мм	1	1,5	2
Фольга 1	0,018	0,018	0,018
Препрег 1 TG170	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 2	0,018	0,018	0,018
Ядро 1 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 3	0,018	0,018	0,018
Препрег 2 TG170	2 x 2116 0,125 + 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 4	0,018	0,018	0,018
Ядро 2 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 5	0,018	0,018	0,018
Препрег 3 TG170	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 6	0,018	0,018	0,018
Фактическая толщина платы*, мм:	1,008	1,503	1,903

* без учета гальванического покрытия, финишного покрытия и маски

Рис. 195 Типовая структура 6-и слойной печатной платы

Определите стартовые настройки расчета: для одиночной полосковой линии (П-1Н1В) передачи выберите тип расчета «Без потерь» и установите флаг в чек-бокс «Перевернуть проводник» в соответствии с положением ядра в выбранной структуре, см. [Рис. 196](#).

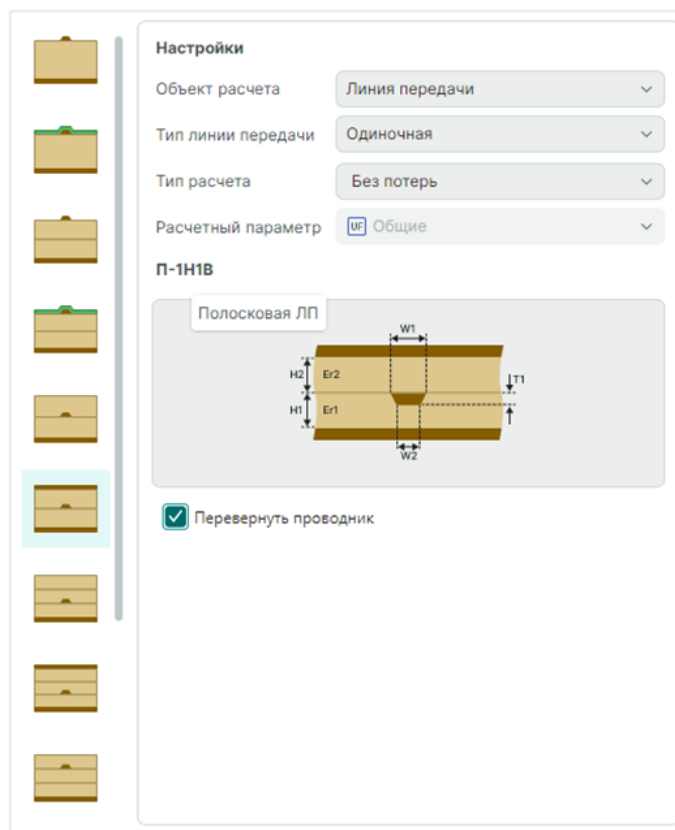


Рис. 196 Настройки расчета

Внесите известные геометрические и электрофизические параметры линии передачи в соответствии с выбранной типовой структурой платы ([Рис. 197](#)):

- Толщина диэлектрика сверху (H1) – 0,51 мм;
- Толщина диэлектрика снизу (H2) – 0,125 мм;
- Толщина проводника (T1) – 0,18 мм.

Ширину проводника до и после подтравки установите равной 0,2 мм.

Толщина диэлектрика	
Н	0,51 мм; 0,125 мм
<input type="radio"/> H1	0,51 мм
<input type="radio"/> H2	0,125 мм
Диэлектрическая проницаемость	
Er	4,2
<input type="radio"/> Er1	4,2
<input type="radio"/> Er2	4,2
Ширина проводника	
<input type="radio"/> W1	0,2 мм
<input type="radio"/> W2	0,2 мм
Толщина проводника	
<input type="radio"/> T1	0,018 мм
Результат	
<input checked="" type="radio"/> Zo	0

Рис. 197 Параметры линии передачи



Примечание! Боковой подтрав в расчете не учитывается. Для его учета необходимо связаться с производителем печатных плат, так как этот параметр зависит не только от геометрии проводника, но и от технологических особенностей производства. Также если плата имеет металлизированные отверстия, то толщина меди на сигнальном слое будет отличаться в большую сторону от номинального значения. Окончательную толщину необходимо согласовать с производителем печатной платы.

Запустите расчет. Результаты расчета будут представлены в виде таблицы в нижней области вкладки, см. [Рис. 198](#).

The screenshot shows the SimPCB Lite software interface with the following settings and results:

- Настройки (Settings):**
 - Объект расчета: Линия передачи
 - Тип линии передачи: Одиночная
 - Тип расчета: Без потерь
 - Расчетный параметр: Общие
- П-1Н1В (Diagram):**
 - Diagram showing a microstrip line on a PCB with parameters: H_1 , H_2 , E_{r1} , E_{r2} , W_1 , W_2 , and T_1 .
 - Перевернуть проводник
- Толщина диэлектрика (Dielectric thickness):**
 - H : 0,51 мм; 0,125 мм
 - H_1 : 0,51 мм
 - H_2 : 0,125 мм
- Диэлектрическая проницаемость (Dielectric permittivity):**
 - ϵ_r : 4,2
 - ϵ_{r1} : 4,2
 - ϵ_{r2} : 4,2
- Ширина проводника (Conductor width):**
 - W_1 : 0,2 мм
 - W_2 : 0,2 мм
- Толщина проводника (Conductor thickness):**
 - T_1 : 0,018 мм
- Результат (Result):**
 - Z_0 : 44,0995 Ом

Таблица параметров (Parameters table):

Zo	Trpd	C	Vp	L	EEr
44,0995	6 838,3910	155,0674	1,462E+08	301,5694	4,2029

Рис. 198 Результаты расчета

Рассчитанное волновое сопротивление (Z_0) составит 44,0995 Ом, погонная задержка сигнала (Trpd) – 6838.391 пс/м (параметр используется при выравнивании сигналов в высокоскоростных интерфейсах).

10.2 Расчет ширины проводника

В качестве примера расчета ширины проводника и вторичных параметров ЛП рассмотрим расчет одиночной микрополосковой линии передачи с маской, расположенной на первом слое типовой структуры 6-и слойной печатной платы толщиной 1,5 мм с опорным слоем, расположенным на втором слое выбранной структуры под заданное волновое сопротивление 50 Ом, см. [Рис. 199](#).

Источник изображения типовой структуры – сайт www.rezonit.ru.

6-и слойная печатная плата МСО фольга 18 мкм TG170

Требуемая толщина платы, мм	1	1,5	2
Фольга 1	0,018	0,018	0,018
Препрег 1 TG170	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 2	0,018	0,018	0,018
Ядро 1 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 3	0,018	0,018	0,018
Препрег 2 TG170	2 x 2116 0,125 + 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 4	0,018	0,018	0,018
Ядро 2 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 5	0,018	0,018	0,018
Препрег 3 TG170	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 6	0,018	0,018	0,018
Фактическая толщина платы*, мм:	1,008	1,503	1,903

* без учета гальванического покрытия, финишного покрытия и маски

Рис. 199 Типовая структура 6-и слойной печатной платы

Определите стартовые настройки расчета: для одиночной микрополосковой линии передачи с маской (ММ-1Н) выберите тип расчета «Без потерь», см. [Рис. 200](#).

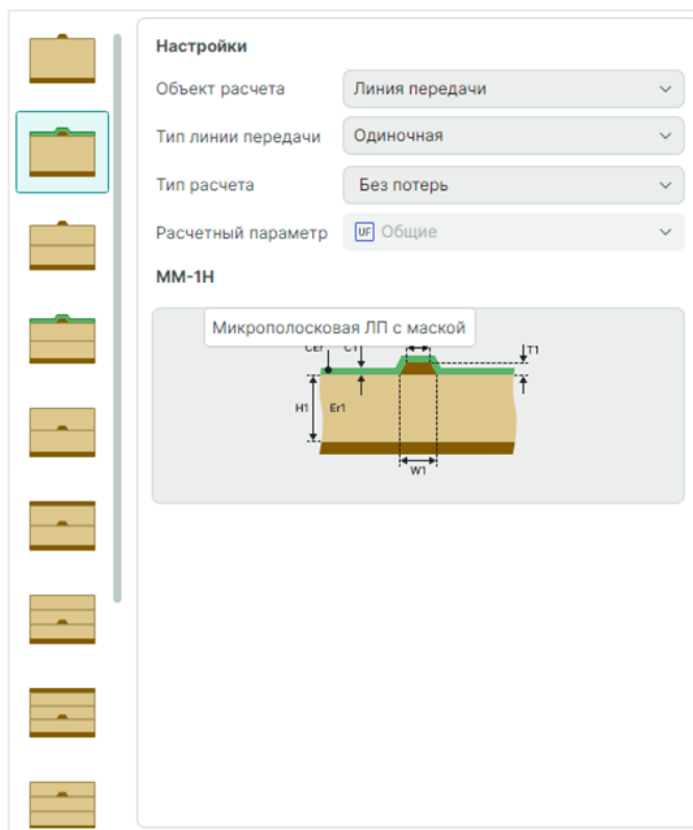
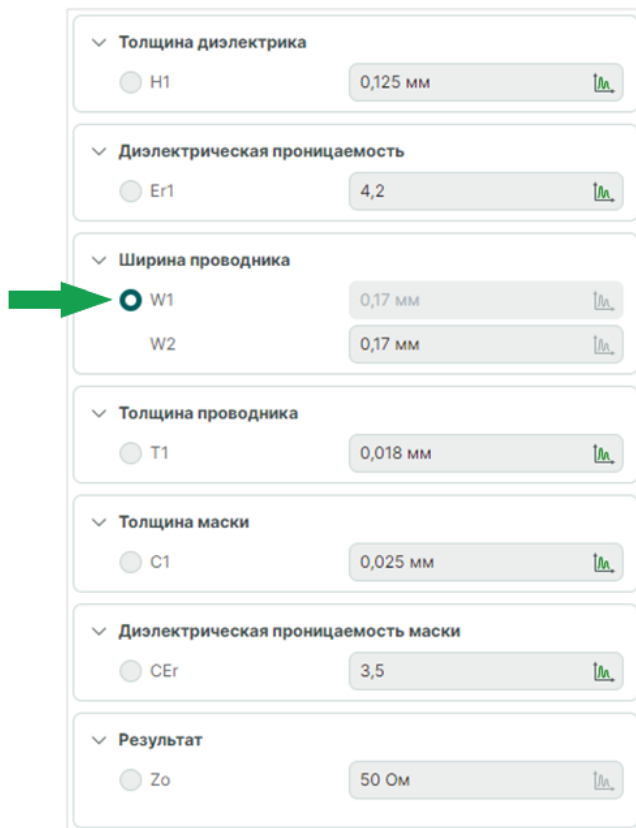


Рис. 200 Настройки расчета

Внесите значения параметров структуры платы в соответствующие поля:

- Толщина диэлектрика ($H1$) – 0,125 мм;
- Толщина проводника ($T1$) – 0,18 мм.

Установите переключатель напротив параметра $W1$ для расчета ширины проводника под заданное значение волнового сопротивления $Z_0=50$ Ом, см. [Рис. 201](#).











Толщина диэлектрика	<input type="radio"/> H1	0,125 мм	
Диэлектрическая проницаемость	<input type="radio"/> Er1	4,2	
Ширина проводника	<input checked="" type="radio"/> W1	0,17 мм	
	<input type="radio"/> W2	0,17 мм	
Толщина проводника	<input type="radio"/> T1	0,018 мм	
Толщина маски	<input type="radio"/> C1	0,025 мм	
Диэлектрическая проницаемость маски	<input type="radio"/> CEr	3,5	
Результат	<input type="radio"/> Zo	50 Ом	

Рис. 201 Параметры расчета



Примечание! Для расчета ширины проводника без бокового подтравы установите одинаковые значения в полях W1 и W2 до запуска расчета.

Запустите расчет.

Первые столбцы таблицы с результатами в нижней области вкладки будут соответствовать рассчитанным значениям ширины проводника (W1) и ширины проводника после подтравы (W2) (в нашем случае значения одинаковы). Следующие столбцы будут отображать точное рассчитанное значение волнового сопротивления и вторичные параметры линии передачи, см. [Рис. 202](#).

The screenshot shows the SimPCB Lite software interface. On the left, there is a vertical toolbar with icons for different PCB layers. The main window is divided into several sections:

- Настройки (Settings):**
 - Объект расчета: Линия передачи
 - Тип линии передачи: Одиночная
 - Тип расчета: Без потерь
 - Расчетный параметр: Общие
- MM-1H:** A diagram showing a cross-section of a transmission line on a PCB with various layers and parameters labeled: C_{Er} , $C1$, $W2$, $T1$, $H1$, E_{r1} , and $W1$.
- Толщина диэлектрика:** $H1 = 0,125$ мм
- Диэлектрическая проницаемость:** $E_{r1} = 4,2$
- Ширина проводника:** $W1 = 0,2132$ мм, $W2 = 0,2132$ мм
- Толщина проводника:** $T1 = 0,018$ мм
- Толщина маски:** $C1 = 0,025$ мм
- Диэлектрическая проницаемость маски:** $C_{Er} = 3,5$
- Результат:** $Z_0 = 50$ Ом

At the bottom, there is a table titled "Параметры" (Parameters) with the following data:

W1	W2	Zo	Tpd	C	Vp	L	EEr
0,2132	0,2132	50,0039	6 118,4309	122,3591	1,634E+08	305,9453	3,3645

Рис. 202 Результаты расчета

Ширина проводника, необходимая для обеспечения волнового сопротивления в 50 Ом, составит 0,2132 мм.

10.3 Расчет дифференциального волнового сопротивления

В качестве примера расчета дифференциального волнового сопротивления и вторичных параметров ЛП рассмотрим расчет дифференциальной полосковой линии передачи, расположенной на третьем слое типовой структуры 6-и слойной печатной платы толщиной 1,5 мм с известными геометрическими и электрофизическими параметрам, см. [Рис. 203](#).

Источник изображения типовой структуры – сайт www.rezonit.ru.

6-и слойная печатная плата МСО фольга 18 мкм TG170

Требуемая толщина платы, мм	1	1,5	2
Фольга 1	0,018	0,018	0,018
Препрег 1 TG170	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 2	0,018	0,018	0,018
Ядро 1 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 3	0,018	0,018	0,018
Препрег 2 TG170	2 x 2116 0,125 + 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 4	0,018	0,018	0,018
Ядро 2 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 5	0,018	0,018	0,018
Препрег 3 TG170	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 6	0,018	0,018	0,018
Фактическая толщина платы*, мм:	1,008	1,503	1,903

* без учета гальванического покрытия, финишного покрытия и маски

Рис. 203 Типовая структура 6-и слойной печатной платы

Определите стартовые настройки расчета: для дифференциальной полосковой линии передачи (ДП-1Н1В) выберите тип расчета «Без потерь» и установите флаг в чек-бок «Перевернуть проводник» в соответствии с положением ядра в выбранной структуре, см. [Рис. 204](#).

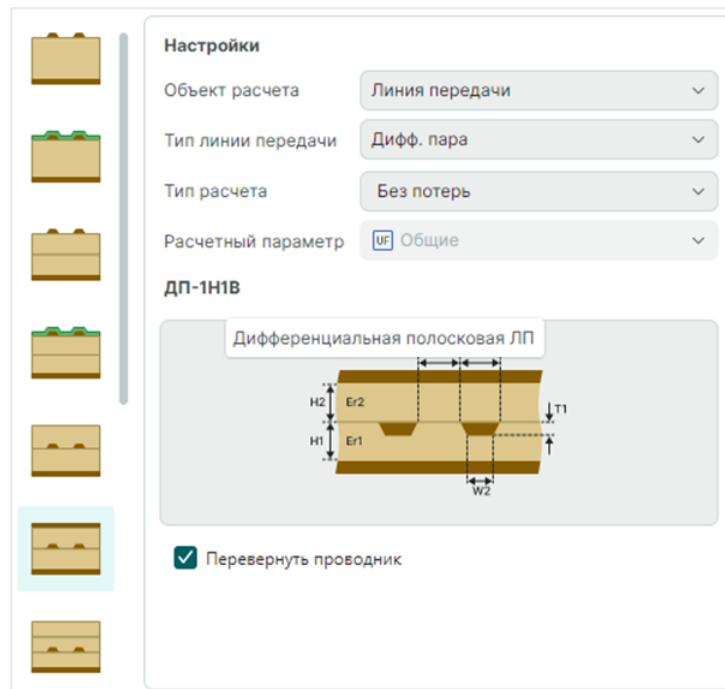
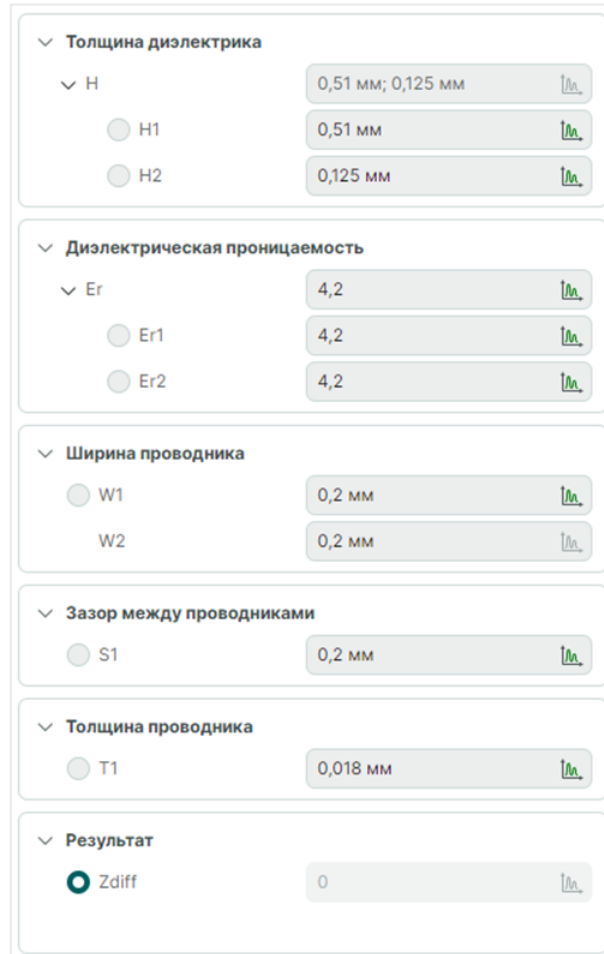


Рис. 204 Настройки расчета

Внесите известные геометрические и электрофизические параметры линии передачи в соответствии с выбранной типовой структурой платы. Ширину проводника до и после подтравы (W1, W2) установим равной 0,2 мм, зазор между проводниками (S1) – 0,2 мм, см. [Рис. 205](#).



Section	Parameter	Value
Толщина диэлектрика	H	0,51 мм; 0,125 мм
	H1	0,51 мм
	H2	0,125 мм
Диэлектрическая проницаемость	Er	4,2
	Er1	4,2
	Er2	4,2
Ширина проводника	W1	0,2 мм
	W2	0,2 мм
Зазор между проводниками	S1	0,2 мм
Толщина проводника	T1	0,018 мм
Результат	Zdiff	0

Рис. 205 Параметры расчета

Запустите расчет.

Результаты расчета дифференциального волнового сопротивления и вторичных параметров ЛП будут представлены в виде таблицы в нижней области вкладки, см. [Рис. 206](#).

The screenshot shows the 'Настройки' (Settings) window for a differential pair calculation. The 'Общие' (General) tab is active. The 'Объект расчета' (Calculation object) is 'Линия передачи' (Transmission line), 'Тип линии передачи' (Transmission line type) is 'Дифф. пара' (Differential pair), and 'Тип расчета' (Calculation type) is 'Без потерь' (Lossless). The 'Расчетный параметр' (Calculation parameter) is 'Общие' (General). The 'ДП-1Н1В' (Differential pair 1N1V) section includes a diagram of a microstrip structure with parameters $S1$, $W1$, $H1$, $H2$, $Er1$, $Er2$, $T1$, and $V2$. A checkbox 'Перевернуть проводник' (Flip conductor) is checked. The right-hand side shows a list of parameters with their values: Thickness of dielectric (H) is 0,51 mm and 0,125 mm; Dielectric permittivity (Er) is 4,2; Conductor width (W) is 0,2 mm; Gap between conductors (S) is 0,2 mm; Conductor thickness (T) is 0,018 mm; and the result (Zdiff) is 79,0754 Ohm.

Параметры					
Zdiff	Трд	C	Vp	L	EEr
79,0754	6 837,8359	86,4724	1,462E+08	540,7043	4,2022

Рис. 206 Результаты расчета

Рассчитанное дифференциальное волновое сопротивление (Z_{diff}) составит 79,0754 Ом, подробнее об управлении отображением результатами расчета дифф. пары см. раздел [Одиночный расчет дифф. пары или копланарной дифф. пары](#).

10.4 Расчет параметров дифф. пары

В качестве примера расчета параметров дифф. пары и вторичных параметров ЛП рассмотрим расчет дифференциальной микрополосковой линии передачи с маской, расположенной на первом слое типовой структуры 6-и слойной печатной платы толщиной 1,5 мм с опорным слоем, расположенным на втором слое выбранной структуры, под заданное волновое сопротивление 100 Ом, см. [Рис. 207](#).

Источник изображения типовой структуры – сайт www.rezonit.ru.

6-и слойная печатная плата МСО фольга 18 мкм TG170

Требуемая толщина платы, мм	1	1,5	2
Фольга 1	0,018	0,018	0,018
Препрег 1 TG170	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 2	0,018	0,018	0,018
Ядро 1 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 3	0,018	0,018	0,018
Препрег 2 TG170	2 x 2116 0,125 + 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 4	0,018	0,018	0,018
Ядро 2 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 5	0,018	0,018	0,018
Препрег 3 TG170	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 6	0,018	0,018	0,018
Фактическая толщина платы*, мм:	1,008	1,503	1,903

* без учета гальванического покрытия, финишного покрытия и маски

Рис. 207 Типовая структура 6-и слойной печатной платы

Определите стартовые настройки расчета: для дифференциальной микрополосковой линии передачи с маской (ДММ-1Н) выберите тип расчета «Без потерь», см. [Рис. 208](#).

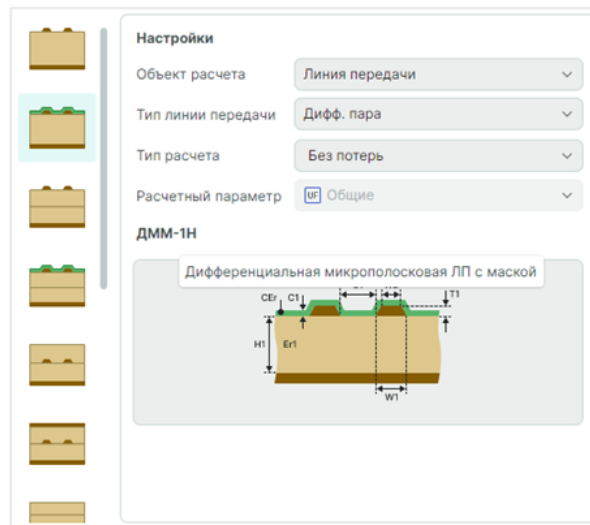
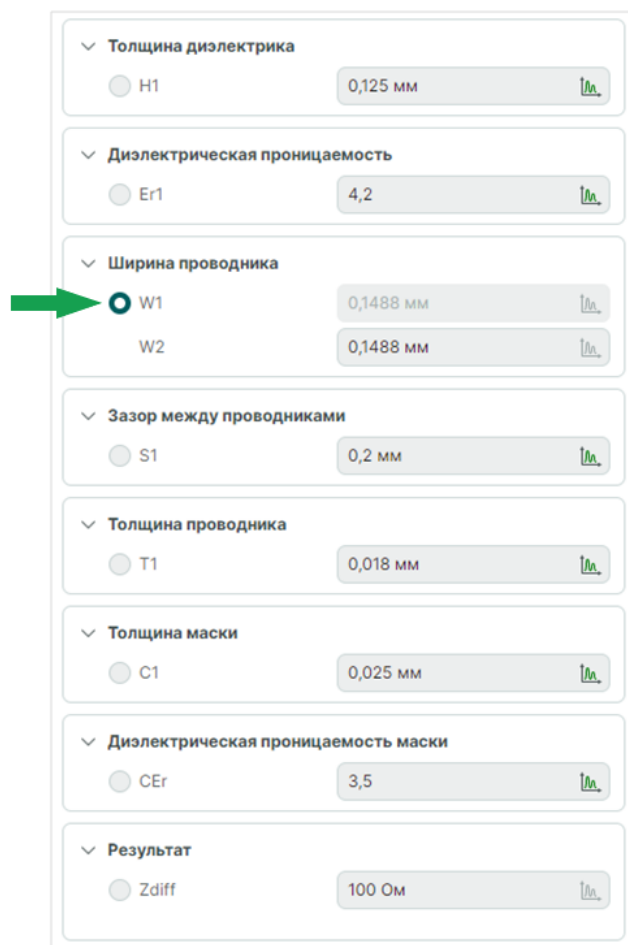


Рис. 208 Настройки расчета

Внесите значения параметров структуры платы в соответствующие поля, установите переключатель напротив параметра W1 для расчета ширины проводников диффпары под заданное значение дифференциального волнового сопротивления $Z_{diff}=100$ Ом, см. [Рис. 209](#).












Толщина диэлектрика	<input type="radio"/> H1	0,125 мм	
Диэлектрическая проницаемость	<input type="radio"/> Er1	4,2	
Ширина проводника	<input checked="" type="radio"/> W1	0,1488 мм	
	<input type="radio"/> W2	0,1488 мм	
Зазор между проводниками	<input type="radio"/> S1	0,2 мм	
Толщина проводника	<input type="radio"/> T1	0,018 мм	
Толщина маски	<input type="radio"/> C1	0,025 мм	
Диэлектрическая проницаемость маски	<input type="radio"/> CEr	3,5	
Результат	<input type="radio"/> Zdiff	100 Ом	

Рис. 209 Параметры расчета

Запустите расчет.

Первые столбцы таблицы с результатами в нижней области вкладки будут соответствовать рассчитанным значениям ширины проводников дифференциальной пары до и после подтравы (W1/W2) (в нашем случае значения одинаковы). Следующие столбцы отображают точное рассчитанное значение волнового сопротивления и вторичные параметры линии передачи, см. [Рис. 210](#).

The screenshot shows the SimPCB Lite interface with the following settings and results:

Настройки

- Объект расчета: Линия передачи
- Тип линии передачи: Дифф. пара
- Тип расчета: Без потерь
- Расчетный параметр: Общие

ДММ-1Н

Diagram showing parameters: C_{Er} , $C1$, $H1$, E_{r1} , $S1$, $W1$, $W2$, $T1$.

Параметры расчета:

- Толщина диэлектрика: $H1 = 0,125$ мм
- Диэлектрическая проницаемость: $E_{r1} = 4,2$
- Ширина проводника: $W1 = 0,1678$ мм, $W2 = 0,1678$ мм
- Зазор между проводниками: $S1 = 0,2$ мм
- Толщина проводника: $T1 = 0,018$ мм
- Толщина маски: $C1 = 0,025$ мм
- Диэлектрическая проницаемость маски: $C_{Er} = 3,5$
- Результат: $Z_{diff} = 100$ Ом

Таблица параметров:

W1	W2	Zdiff	Tpd	C	Vp	L	EEr
0,1678	0,1678	100,0296	5 894,7980	58,9305	1,696E+08	589,6545	3,1231

Рис. 210 Результаты расчета

Ширина проводников диффпары, необходимая для обеспечения волнового сопротивления в 100 Ом, составит 0,1678 мм.

Аналогичным образом может быть выполнен расчет значения зазора между проводниками дифференциальной пары ($S1$) при заданных значениях ширины проводников диффпары и требуемого волнового сопротивления.

10.5 Расчет длины ЛП при известном уровне потерь

Тип расчета «Частотный анализ» → «Общие» применяется для определения потерь в линии передачи, значения волнового сопротивления на конкретной частоте, набора значений вторичных параметров линии передачи (RLGC – данные параметры могут использоваться для составления ABCD-матриц).

Кроме этого с помощью «Частотного анализа» → «Общие» можно определить максимальную длину линии передачи, если допустимый уровень потерь известен. Как правило, допустимые потери указываются в документации на высокоскоростные интерфейсы передачи данных.



Важно! Потери линии передачи при расчетах типа «Частотный анализ» вычисляются для согласованной линии.

Рассмотрим в качестве примера модуль DDR5-4800 с тактовой частотой 4800 МГц. Допустимые потери на линию примерно -3 дБ.

Рассчитаем длину микрополосковой линии передачи с маской, расположенной на первом слое типовой структуры 6-и слойной печатной платы толщиной 1,5 мм, которая соответствует указанному уровню потерь, см. [Рис. 211](#).

Источник изображения типовой структуры – сайт www.rezonit.ru.

6-и слойная печатная плата МСО фольга 18 мкм TG170

Требуемая толщина платы, мм	1	1,5	2
Фольга 1	0,018	0,018	0,018
Препрег 1 TG170	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 2	0,018	0,018	0,018
Ядро 1 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 3	0,018	0,018	0,018
Препрег 2 TG170	2 x 2116 0,125 + 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 4	0,018	0,018	0,018
Ядро 2 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 5	0,018	0,018	0,018
Препрег 3 TG170	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 6	0,018	0,018	0,018
Фактическая толщина платы*, мм:	1,008	1,503	1,903

* без учета гальванического покрытия, финишного покрытия и маски

Рис. 211 Типовая структура 6-и слойной печатной платы

Волновое сопротивление линии передачи должно составлять 40 Ом.

Определите ширину проводника, соответствующую волновому сопротивлению в 40 Ом, с помощью расчета «Без потерь», см. [Рис. 212](#).

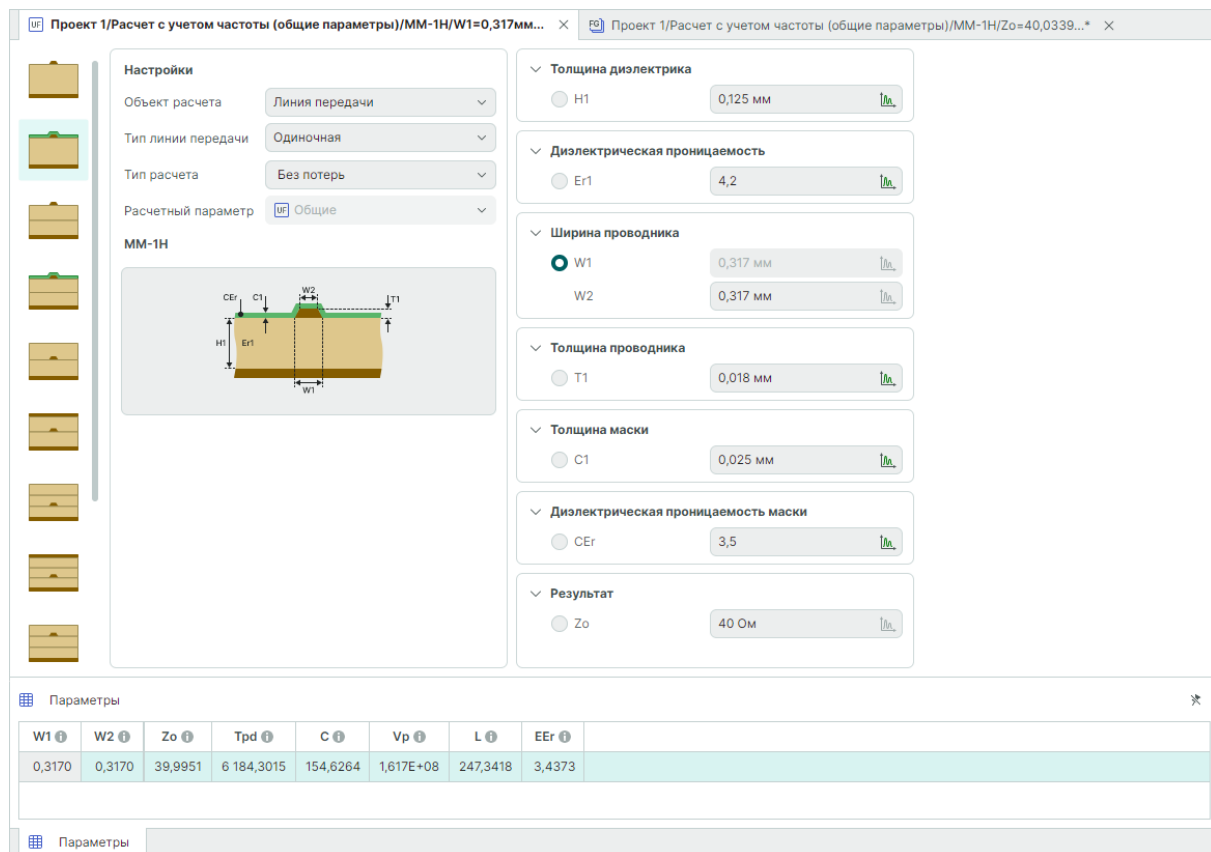


Рис. 212 Расчет ширины проводника

Подробное описание расчета представлено в разделе [Расчет ширины проводника](#).

Рассчитанная ширина проводника составит 0,3170 мм.

Переключите тип расчета в области настроек на «Частотный анализ» → «Общие», при этом заданные параметры линии передачи сохранят свои значения.

Установите длину проводника (LTL) в виде диапазона значений от 10 мм до 300 мм с шагом изменения 10 мм и запустите расчет, см. [Рис. 213](#).

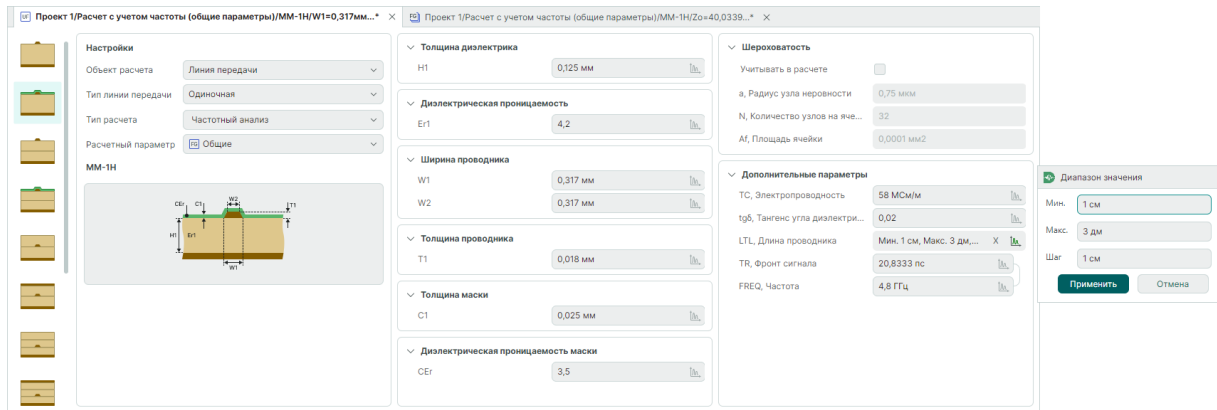


Рис. 213 Параметры расчета

Для удобной работы с результатами расчета в панели «Настройка результатов» включите отображение графиков и выберите для отображения общее ослабление (α_{db}), см. [Рис. 214](#).

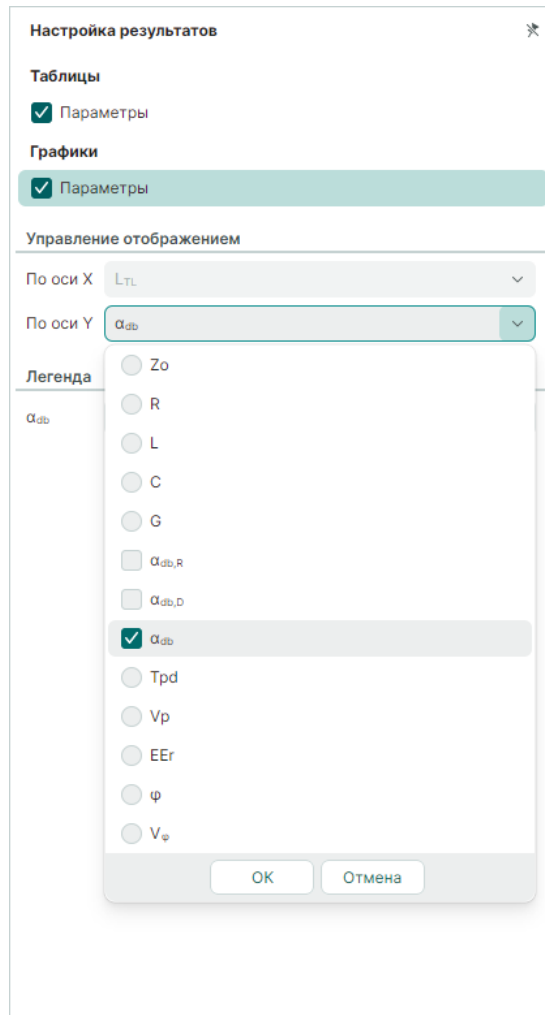


Рис. 214 Выбор параметра для отображения

Длина линии передачи при уровне потерь -3 дБ составит ~140 мм, см. [Рис. 215](#).

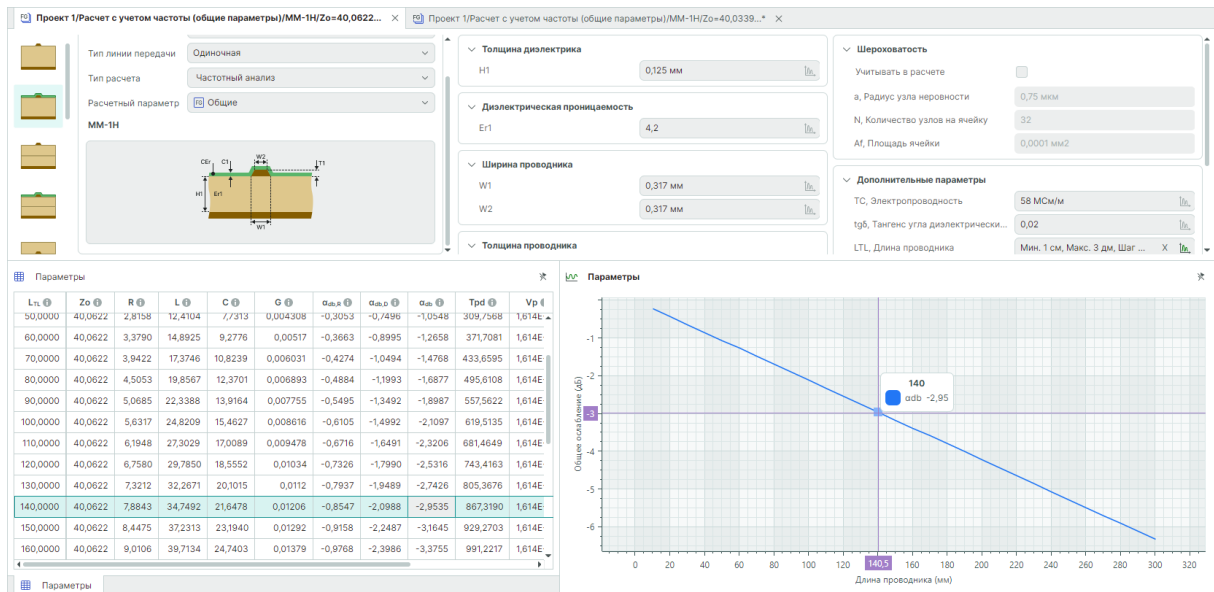


Рис. 215 Результаты расчета

Повторите расчет с учетом шероховатости: для этого установите флаг в чек-бок «Шероховатость» и запустите расчет повторно.

Теперь длина линии передачи при уровне потерь -3 дБ составит ~100 мм, см. [Рис. 216](#).

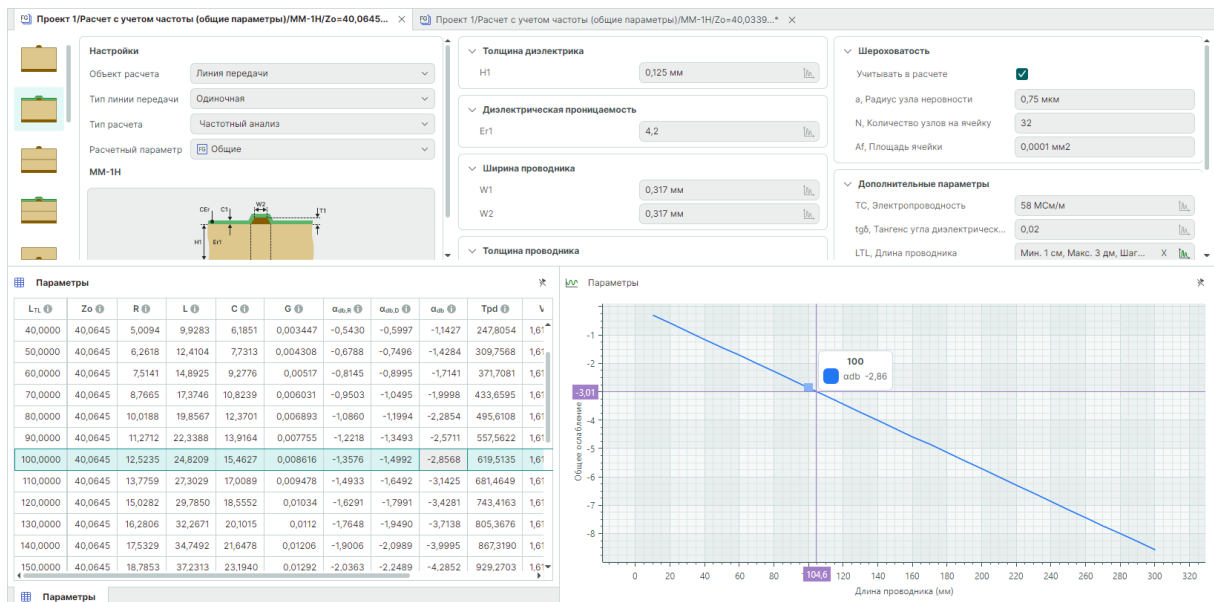


Рис. 216 Результаты расчета с учетом шероховатости

Совместно со значением длины линии передачи, расчет которого рассматривался как основная задача, вычисляется множество дополнительными параметрами ЛП.

10.6 Расчет S-параметров в частотном диапазоне

В случаях, когда согласовать линию передачи затруднительно или невозможно, логичным решением будет оценка энергетической эффективности линии передачи через S-параметры. Чаще всего S-параметры рассчитывают в частотном диапазоне.

Рассмотрим пример расчета S-параметров микрополосковой линии передачи с маской, расположенной на первом слое типовой структуры 6-и слойной печатной платы толщиной 1,5 мм, см. [Рис. 217](#).

Источник изображения типовой структуры – сайт www.rezonit.ru.

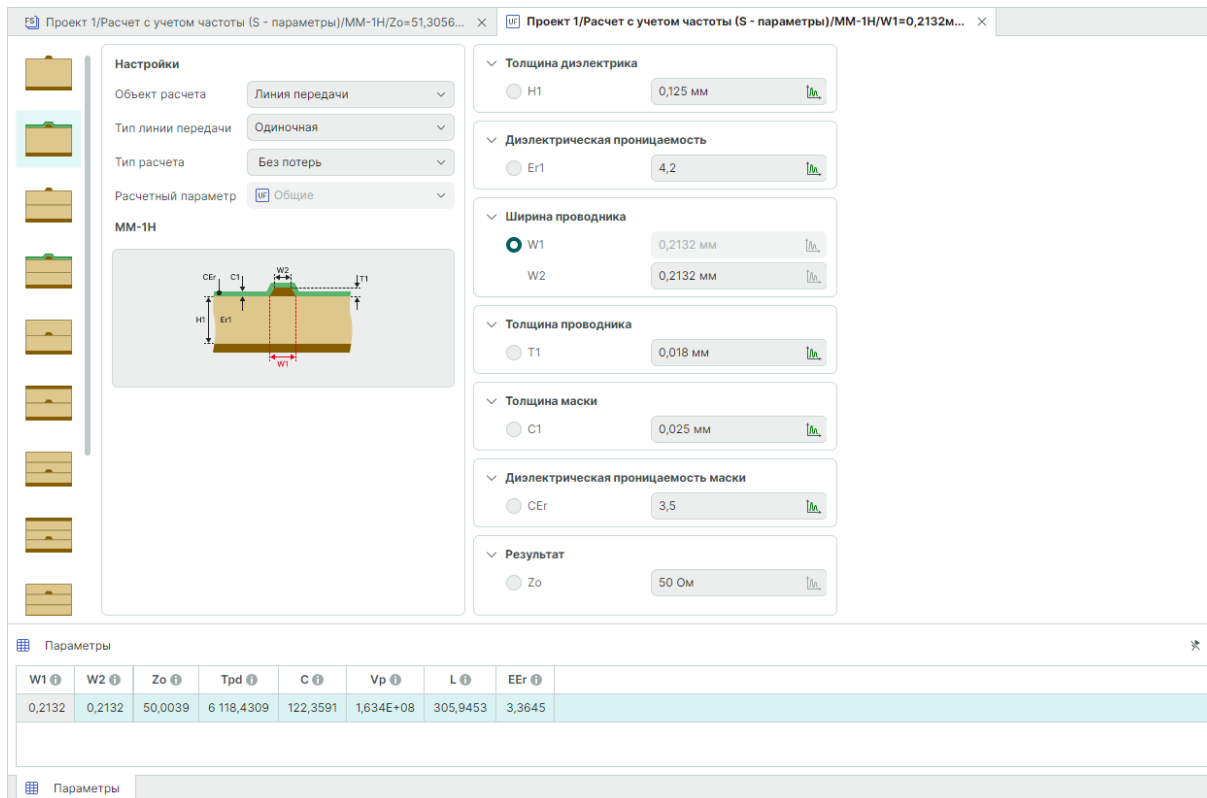
6-и слойная печатная плата МСО фольга 18 мкм TG170

Требуемая толщина платы, мм	1	1,5	2
Фольга 1	0,018	0,018	0,018
Препрег 1 TG170	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 2	0,018	0,018	0,018
Ядро 1 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 3	0,018	0,018	0,018
Препрег 2 TG170	2 x 2116 0,125 + 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 4	0,018	0,018	0,018
Ядро 2 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 5	0,018	0,018	0,018
Препрег 3 TG170	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 6	0,018	0,018	0,018
Фактическая толщина платы*, мм:	1,008	1,503	1,903

* без учета гальванического покрытия, финишного покрытия и маски

Рис. 217 Типовая структура 6-и слойной печатной платы

Определите ширину проводника, соответствующую волновому сопротивлению в 50 Ом с помощью расчета «Без потерь», см. [Рис. 218](#).



The screenshot shows the 'Настройки' (Settings) panel for calculating the conductor width. The settings are as follows:

- Объект расчета: Линия передачи
- Тип линии передачи: Одиночная
- Тип расчета: Без потерь
- Расчетный параметр: Общие

The 'MM-1H' diagram shows a cross-section of a PCB with parameters: CEr , $C1$, $E1$, $W1$, $W2$, $T1$, and $H1$.

The 'Толщина диэлектрика' (Dielectric thickness) is set to $H1 = 0,125$ мм.

The 'Диэлектрическая проницаемость' (Dielectric permittivity) is set to $E1 = 4,2$.

The 'Ширина проводника' (Conductor width) is set to $W1 = 0,2132$ мм and $W2 = 0,2132$ мм.

The 'Толщина проводника' (Conductor thickness) is set to $T1 = 0,018$ мм.

The 'Толщина маски' (Mask thickness) is set to $C1 = 0,025$ мм.

The 'Диэлектрическая проницаемость маски' (Mask dielectric permittivity) is set to $CEr = 3,5$.

The 'Результат' (Result) is $Zo = 50$ Ом.

The 'Параметры' (Parameters) table is shown below:

W1	W2	Zo	Trpd	C	Vp	L	EEr
0,2132	0,2132	50,0039	6 118,4309	122,3591	1,634E+08	305,9453	3,3645

Рис. 218 Расчет ширины проводника

Подробное описание расчета представлено в разделе [Расчет ширины проводника](#).

Рассчитанная ширина проводника составит 0,2132 мм.

Переключите тип расчета в области настроек на «Частотный анализ» → «S-параметры», при этом заданные параметры линии передачи сохранят свои значения.

Задайте параметры линии передачи:

- Длина линии (LTL) – 100 мм;
- Сопротивление источника (ZS) – 30 Ом;
- Сопротивление приемника (ZL) – 80 Ом.

Расчет выполним в частотном диапазоне от 100 МГц до 1 ГГц с шагом 50 МГц, см. [Рис. 219](#)

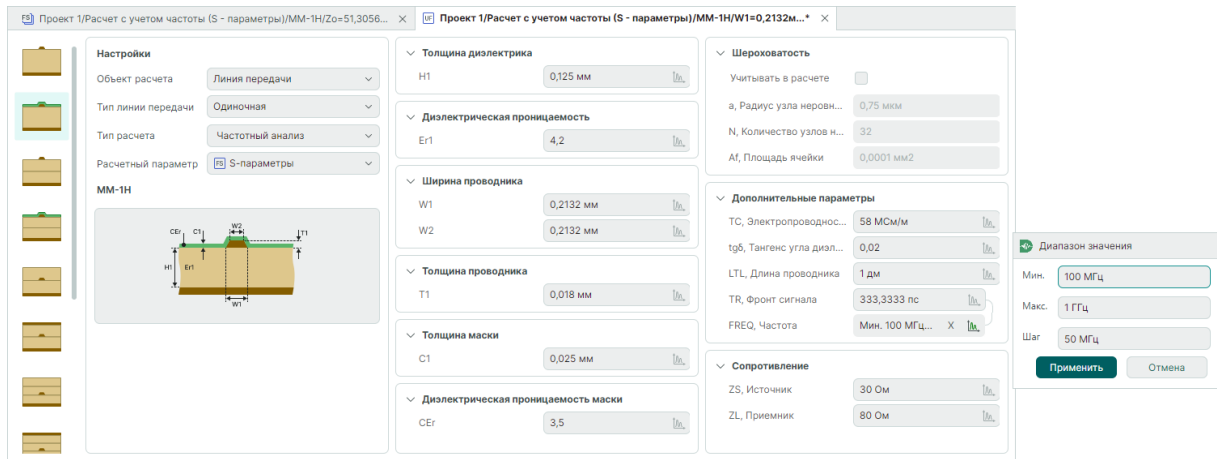


Рис. 219 Параметры расчета

Запустите расчет.

Перейдите к отображению графиков и выберите для отображения коэффициент отражения от входа (S11) в режиме «Магнитуда», см. [Рис. 220](#).

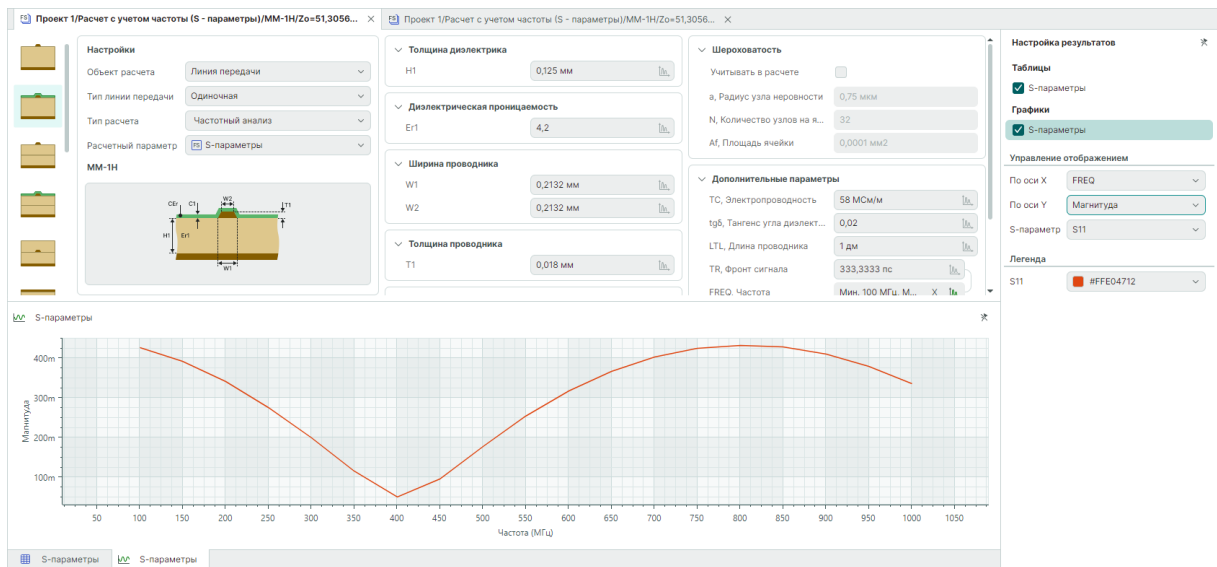


Рис. 220 Коэффициент отражения от входа (S11) в режиме «Магнитуда»

На графике видно, что минимальный уровень отраженной волны отмечен на частоте 400 МГц. Именно на этой частоте линия передачи будет вести себя наилучшим образом.

Выбрав для отображения коэффициент передачи (S21) в режиме «Магнитуда (дБ)», получите зависимость потерь в линии передачи от частоты на графике, см. [Рис. 221](#).

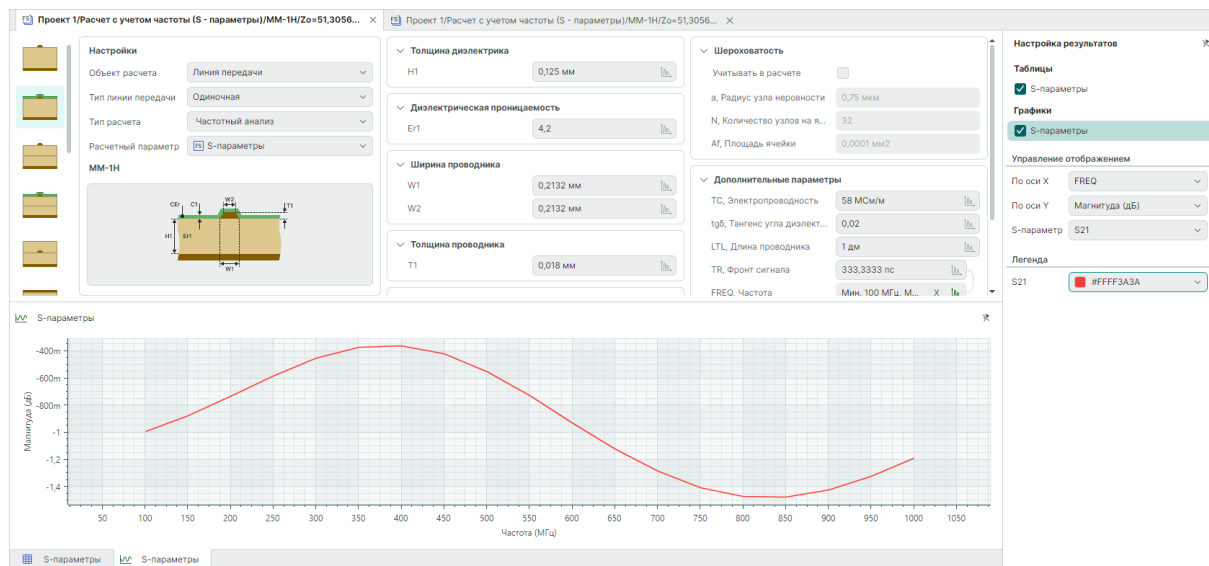


Рис. 221 Коэффициент передачи (S_{21}) в режиме «Магнитуда (дБ)»

10.7 Оценка перекрестных помех

Одной из важнейших задач обеспечения целостности сигналов, является определение уровня перекрестных помех. В системе SimPCB Lite перекрестные помехи вычисляются для согласованных линий передачи, т.е. сопротивление источника и нагрузки равно волновому сопротивлению линии.

Рассмотрим в качестве примера модуль DDR4 с частотой 2400 МГц.

Рассчитаем перекрестные помехи между двумя линиями на данной частоте для согласованной микрополосковой линии передачи с маской, расположенной на первом слое типовой структуры 6-и слойной печатной платы толщиной 1,5 мм, см. [Рис. 222](#).

Источник изображения типовой структуры – сайт www.rezonit.ru.

6-и слойная печатная плата МСО фольга 18 мкм TG170

Требуемая толщина платы, мм	1	1,5	2
Фольга 1	0,018	0,018	0,018
Препрег 1 TG170	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 2	0,018	0,018	0,018
Ядро 1 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 3	0,018	0,018	0,018
Препрег 2 TG170	2 x 2116 0,125 + 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 4	0,018	0,018	0,018
Ядро 2 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 5	0,018	0,018	0,018
Препрег 3 TG170	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 6	0,018	0,018	0,018
Фактическая толщина платы*, мм:	1,008	1,503	1,903

* без учета гальванического покрытия, финишного покрытия и маски

Рис. 222 Типовая структура 6-и слойной печатной платы

Определите ширину проводника, соответствующую волновому сопротивлению в 40 Ом с помощью расчета «Без потерь», см. [Рис. 223](#).

Настройки

Объект расчета: Линия передачи

Тип линии передачи: Одиночная

Тип расчета: Без потерь

Расчетный параметр: Общие

MM-1H

Толщина диэлектрика: H1 = 0,125 мм

Диэлектрическая проницаемость: Eг1 = 4,2

Ширина проводника: W1 = 0,317 мм, W2 = 0,317 мм

Толщина проводника: T1 = 0,018 мм

Толщина маски: C1 = 0,025 мм

Диэлектрическая проницаемость маски: CEг = 3,5

Результат: Zo = 40 Ом

W1	W2	Zo	Trpd	C	Vp	L	EEr
0.3170	0.3170	39.9951	6 184.3015	154.6264	1.617E+08	247.3418	3.4373

Рис. 223 Расчет ширины проводника

Подробное описание расчета представлено в разделе [Расчет ширины проводника](#).

Рассчитанная ширина проводника составит 0,3170 мм.

Переключите тип расчета в области настроек на «Частотный анализ» → «Перекрестные помехи», при этом заданные параметры линии передачи сохранят свои значения.

Определите параметры линии передачи ([Рис. 224](#)):

- Длина линии (LTL) – 100 мм;
- Напряжение V1 (Порт 1) – «+1 В»;
- Напряжение V3 (Порт 3) – «0 В»;
- Частота (FREQ) – 2400 МГц;
- Зазор между проводниками (G1) – 0,2 мм.

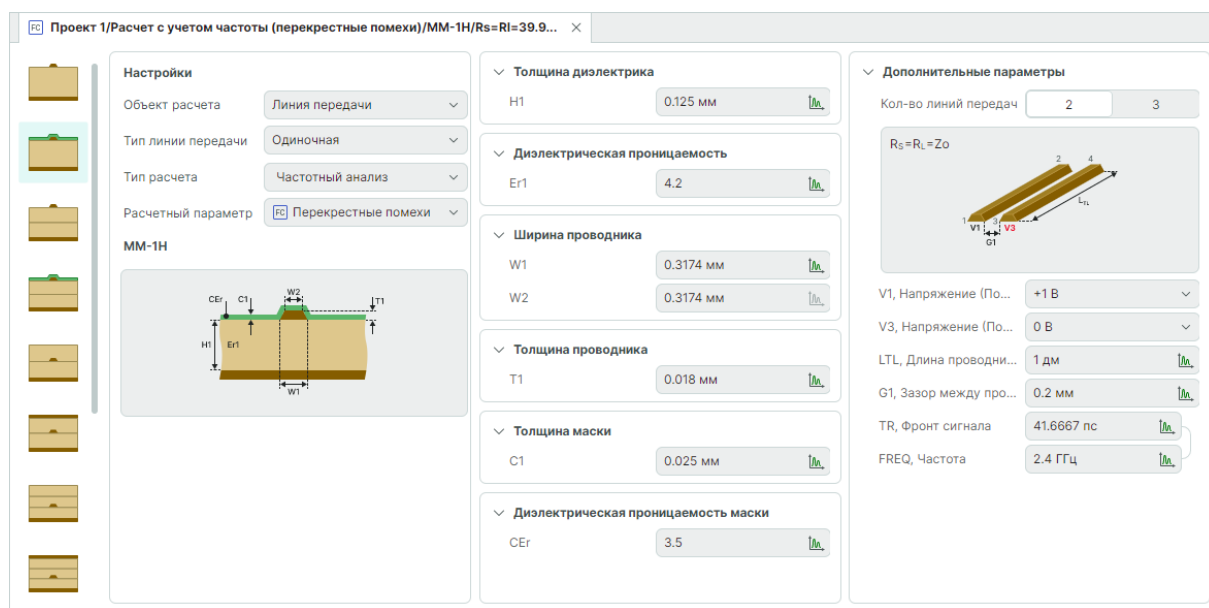


Рис. 224 Параметры расчета

Запустите расчет.

В таблице с результатами расчета видно ([Рис. 225](#)):

- помеха на ближнем конце линии ($U_{\text{НЕХТ3}}$) составляет 0,015 В;
- на дальнем конце ($U_{\text{ФЕХТ4}}$) – 0,27 В.

Zo	U_NEXT1	F_NEXT1	U_FEXT2	F_FEXT2	U_NEXT3	F_NEXT3	U_FEXT4	F_FEXT4
39.9951	2.5103e-002	106.6982	9.6160e-001	-172.2265	1.5415e-002	-55.0605	2.7286e-001	978534

Рис. 225 Результаты расчета

Следует отметить, что расчет выполняется при фиксированном значении напряжения V1 (Порт 1). Это может быть «+1 В» и «-1 В». Уровень помехи в данном случае будет пропорционален напряжению на порте 1.

Например, если необходимо определить помеху от V1=5 В входного сигнала, то она составит:

- $5 * 0.015 \text{ В} = 0.075 \text{ В}$ – на ближнем конце линии (U_NEXT3);
- $5 * 0.27 \text{ В} = 1.35 \text{ В}$ – на дальнем конце линии (U_FEXT4).

10.8 Расчет расстояния между линиями передачи

Важной практической задачей расчета перекрестных помех является определение расстояния между линиями передачи для обеспечения допустимого уровня помехи.

Рассмотрим пример расчета с условиями из предыдущей задачи, подробнее см. [Оценка перекрестных помех](#):

- Ширина проводника ($Z_0=40 \text{ Ом}$) – 0,3170 мм;
- Длина проводника (LTL) – 100 мм;
- Напряжение V1 (Порт 1) – «+1 В»;
- Напряжение V3 (Порт 3) – «0 В»;

- Частота (FREQ) – 2400 МГц.



Примечание! В данном примере можно использовать предыдущий расчет и внести необходимые изменения или задать входные параметры повторно в новый расчет.

Определим значение зазора между проводниками при условии, что допустимый уровень перекрестной помехи не должен превышать 10% от уровня входного сигнала (1 В), т.е. перекрестная помеха должна быть не более 100 мВ.

Запустите множественный расчет от параметра G1 (зазор между проводниками), установив для него диапазон значений от 0,1 мм до 1 мм с шагом изменения 0,05 мм, см. [Рис. 226](#).

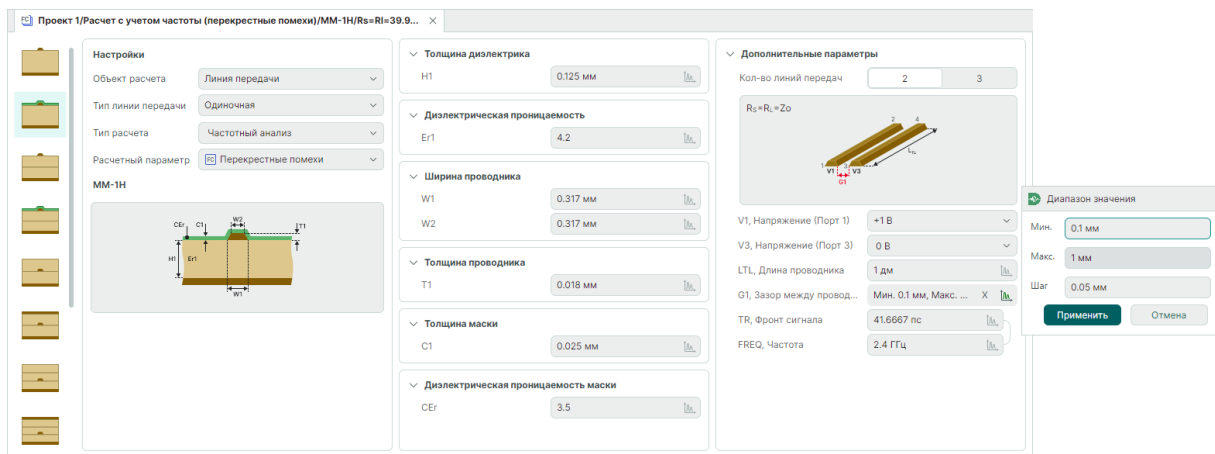


Рис. 226 Параметры расчета

Перейдите к результатам расчета, выбрав для отображения уровень помехи ($U_{(NEXT/FEXT)}$) на ближнем конце линии (Порт 3), см. [Рис. 227](#).

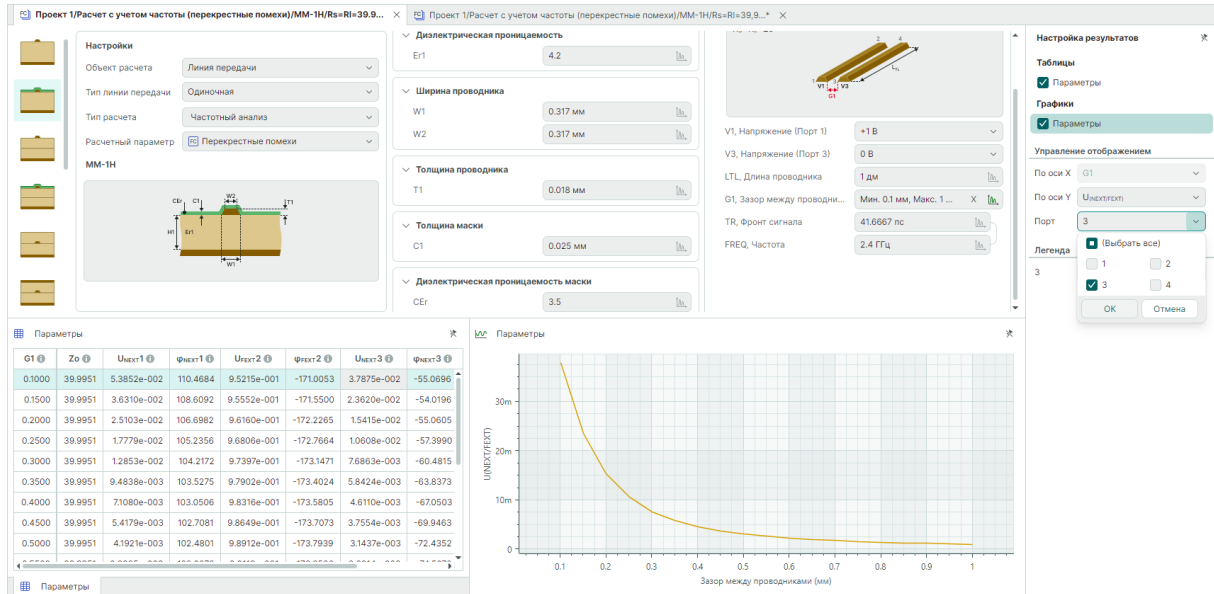


Рис. 227 Уровень помехи на ближнем конце линии

Результаты расчета в табличном виде и на графике подтверждают, что уровень помехи ($U_{NEXT3} = 37,8 \text{ мВ}$) не превышает порогового значения даже при минимальном значении зазора между проводниками (G1) в 0,1 мм.

Переключите результаты расчета на отображение уровня помехи ($U_{NEXT/FEXT}$) на дальнем конце линии (Порт 4), см. [Рис. 228](#).

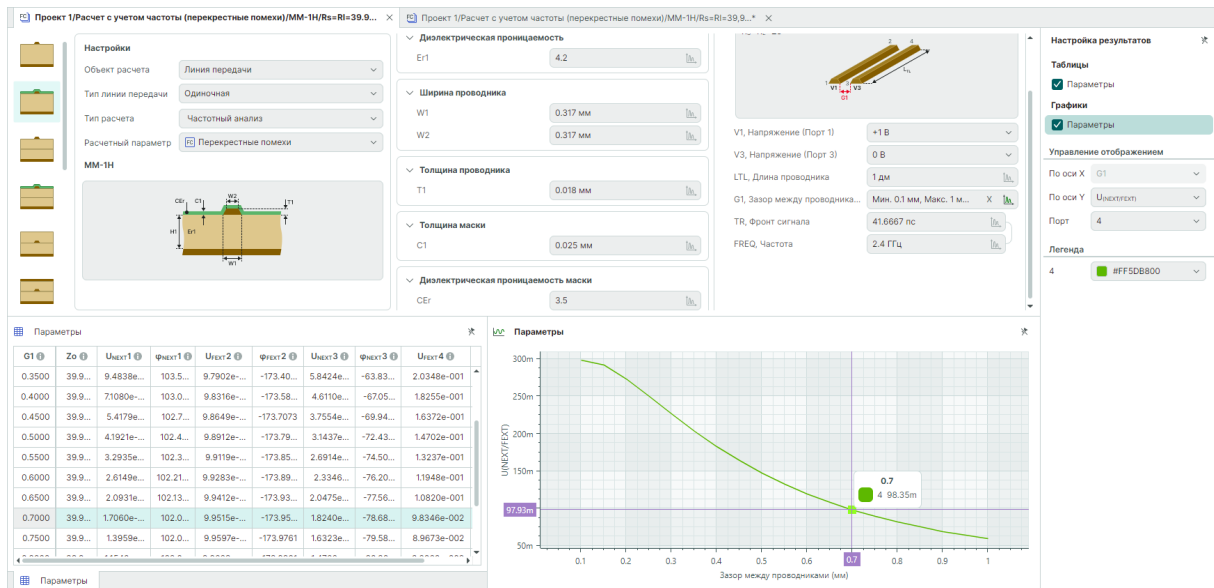


Рис. 228 Уровень помехи на дальнем конце линии

Для дальнего конца линии расстояние между проводниками (G1) не должно превышать 0,7 мм для обеспечения допустимого уровня помехи в 100мВ ($U_{FEXT4} = 98,35 \text{ мВ}$).

10.9 Расчет формы сигнала

Значимой задачей в области обеспечения целостности сигналов является отслеживание формы сигнала после прохождения через линию передачи.

Рассмотрим в качестве примера линию передачи, соединяющую микросхему памяти DDR4 и ПЛИС. Отследим форму сигнала на выходе линии согласованной микрополосковой линии передачи с маской, расположенной на первом слое типовой структуры 6-и слойной печатной платы толщиной 1,5 мм.

Источник изображения типовой структуры – сайт www.rezonit.ru.

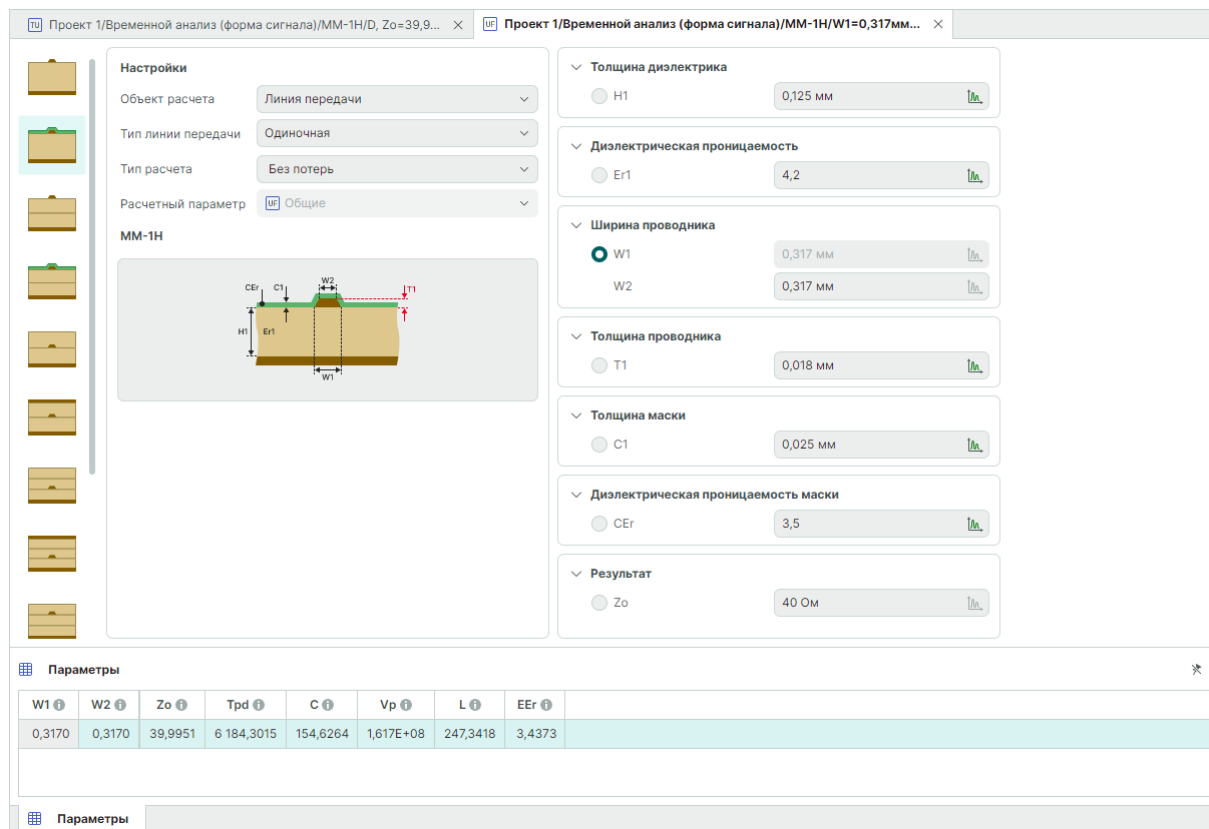
6-и слойная печатная плата МСО фольга 18 мкм TG170

Требуемая толщина платы, мм	1	1,5	2
Фольга 1	0,018	0,018	0,018
Препрег 1 TG170	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 2	0,018	0,018	0,018
Ядро 1 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 3	0,018	0,018	0,018
Препрег 2 TG170	2 x 2116 0,125 + 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 4	0,018	0,018	0,018
Ядро 2 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 5	0,018	0,018	0,018
Препрег 3 TG170	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 6	0,018	0,018	0,018
Фактическая толщина платы*, мм:	1,008	1,503	1,903

* без учета гальванического покрытия, финишного покрытия и маски

Рис. 228 Типовая структура 6-и слойной печатной платы

Определите ширину проводника, соответствующую волновому сопротивлению в 40 Ом с помощью расчета «Без потерь», см. [Рис. 229](#).



Настройки

Объект расчета: Линия передачи

Тип линии передачи: Одиночная

Тип расчета: Без потерь

Расчетный параметр: Общие

MM-1H

Толщина диэлектрика: H1 = 0,125 мм

Диэлектрическая проницаемость: Er1 = 4,2

Ширина проводника: W1 = 0,317 мм, W2 = 0,317 мм

Толщина проводника: T1 = 0,018 мм

Толщина маски: C1 = 0,025 мм

Диэлектрическая проницаемость маски: CEr = 3,5

Результат: Zo = 40 Ом

W1	W2	Zo	Trd	C	Vp	L	EEr
0,3170	0,3170	39,9951	6 184,3015	154,6264	1,617E+08	247,3418	3,4373

Рис. 229 Расчет ширины проводника

Подробное описание расчета представлено в разделе [Расчет ширины проводника](#).

Рассчитанная ширина проводника составит 0,3170 мм.

Переключите тип расчета в области настроек на «Временной анализ» → «Форма сигнала», при этом заданные параметры линии передачи сохранят свои значения.

Определите параметры линии передачи ([Рис. 230](#)):

- Длина линии (LTL) – 100 мм;
- Сопротивление источника (ZS) – 40 Ом;
- Сопротивление приемника (ZL) – 40 Ом;
- Амплитуда сигнала (Y2) – 1,2 В;
- Передний фронт (TR) – 100 пс;
- Задний фронт (TF) – 100 пс;
- Плоская часть импульса (PW) – 300 пс;
- Период повторения (PER) – 1 нс.

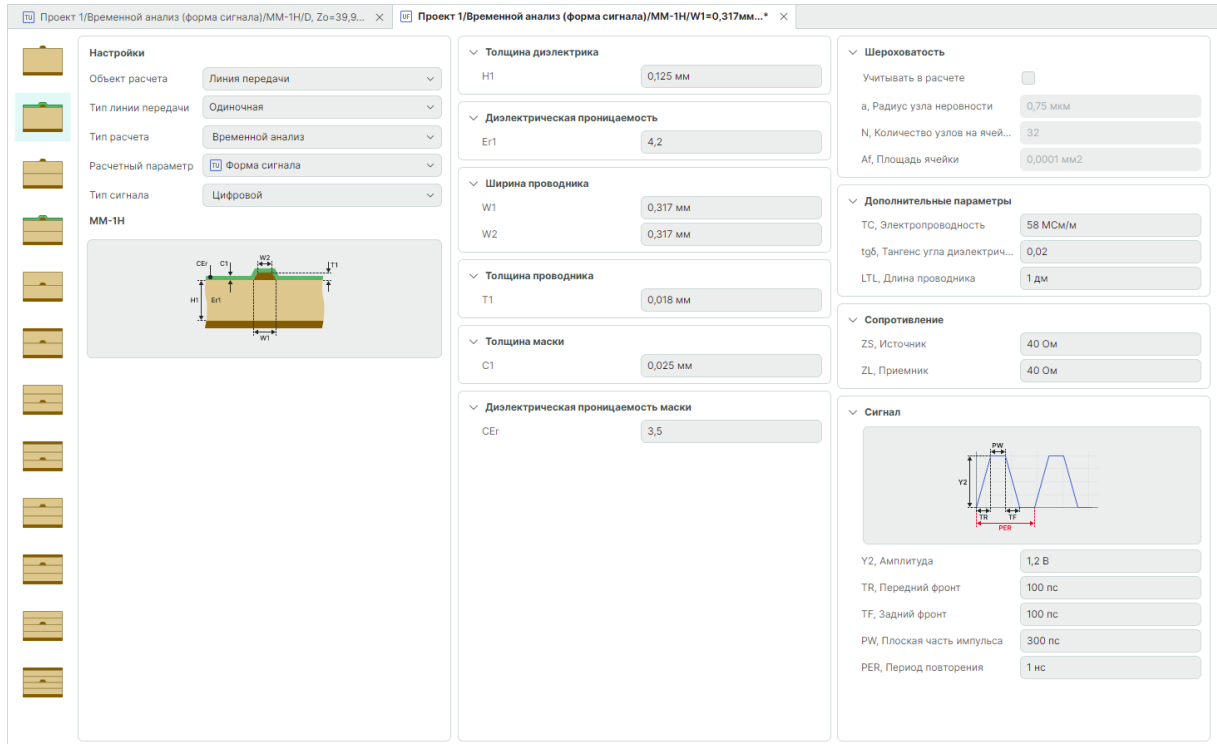


Рис. 230 Параметры расчета

Перейдите к отображению графика с помощью панели «Настройка результатов», см. [Рис. 231](#).

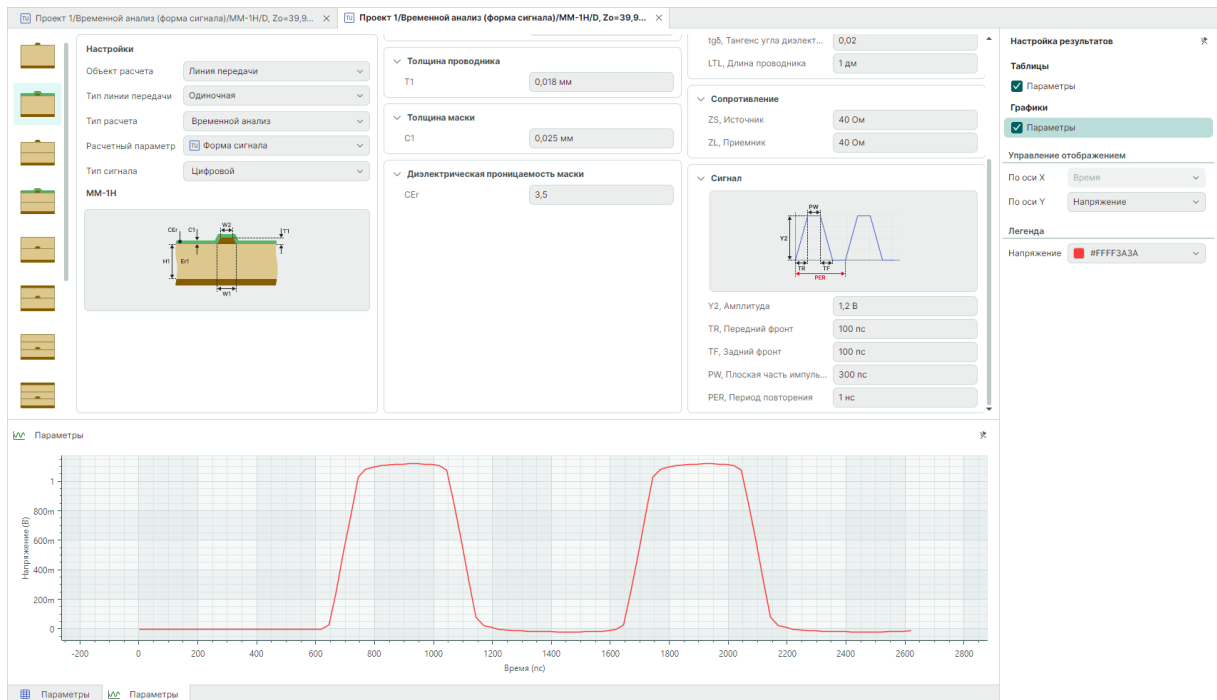


Рис. 231 Форма сигнала

На графике видно, что амплитуда сигнала немного уменьшилась и составляет 1,1 В, фронты сигнала увеличились и составляют ~110 пс. Кроме этого графическое отображение предоставляет информацию о задержке сигнала, в данном случае она составляет ~640 пс.

Аналогичные расчеты могут быть выполнены и для дифференциальных линий передачи, а в качестве сигнала может быть выбран аналоговый сигнал.

10.10 Расчет S-параметров во временной области

Значительную практическую ценность имеет временной анализ S-параметров. С помощью временной зависимости доступно восстановление формы сигнала с использованием математической функции свертки. Чаще всего для линии передачи представляют интерес коэффициенты S11 и S21.

Рассмотрим пример расчета S-параметров во временной области для согласованной полосковой линии передачи, расположенной на третьем слое типовой структуры 6-и слойной печатной платы толщиной 1,5 мм, см. [Рис. 232](#).

Источник изображения типовой структуры – сайт www.rezonit.ru.

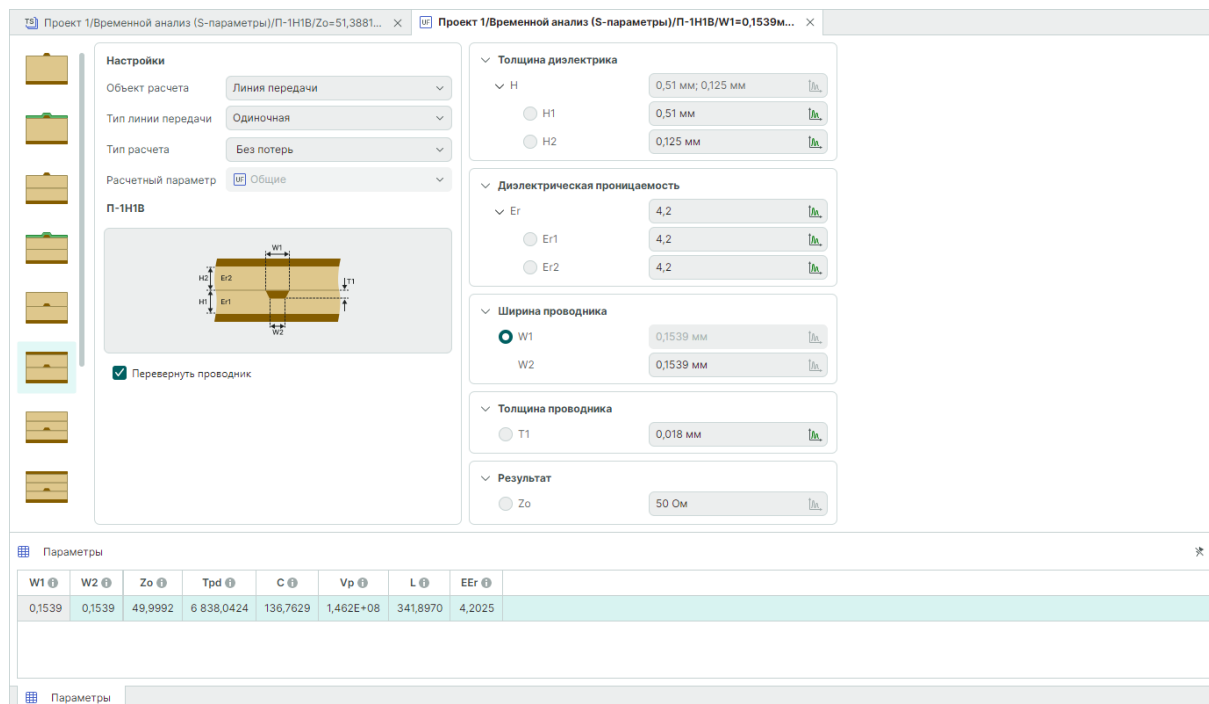
6-и слойная печатная плата МСО фольга 18 мкм TG170

Требуемая толщина платы, мм	1	1,5	2
Фольга 1	0,018	0,018	0,018
Препрег 1 TG170	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 2	0,018	0,018	0,018
Ядро 1 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 3	0,018	0,018	0,018
Препрег 2 TG170	2 x 2116 0,125 + 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 4	0,018	0,018	0,018
Ядро 2 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 5	0,018	0,018	0,018
Препрег 3 TG170	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 6	0,018	0,018	0,018
Фактическая толщина платы*, мм:	1,008	1,503	1,903

* без учета гальванического покрытия, финишного покрытия и маски

Рис. 232 Типовая структура 6-ти слойной печатной платы

Определите ширину проводника, соответствующую волновому сопротивлению в 50 Ом с помощью расчета «Без потерь», см. [Рис. 233](#).



Параметры

W1	W2	Zo	Trd	C	Vp	L	EEr
0,1539	0,1539	49,9992	6 838,0424	136,7629	1,462E+08	341,8970	4,2025

Рис. 233 Расчет ширины проводника

Подробное описание расчета представлено в разделе [Расчет ширины проводника](#).

Рассчитанная ширина проводника составит 0,1539 мм.

Переключите тип расчета в области настроек на «Временной анализ» → «S-параметры», при этом заданные параметры линии передачи сохранят свои значения.

Определите параметры линии передачи ([Рис. 234](#)):

- Длина линии (LTL) – 100 мм;
- Сопротивление источника (ZS) – 50 Ом;
- Сопротивление приемника (ZL) – 50 Ом;
- Частотный диапазон (FREQ) – 100 МГц до 2ГГц с шагом 50 МГц.

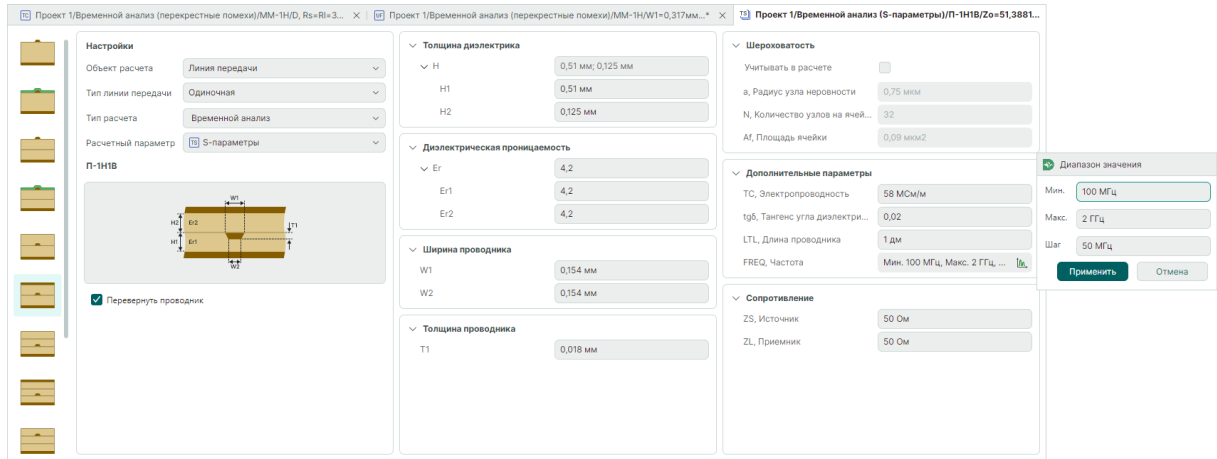


Рис. 234 Параметры расчета

Перейдите к отображению результатов расчета с помощью панели «Настройка результатов» и выберите коэффициент S11, см. [Рис. 235](#).

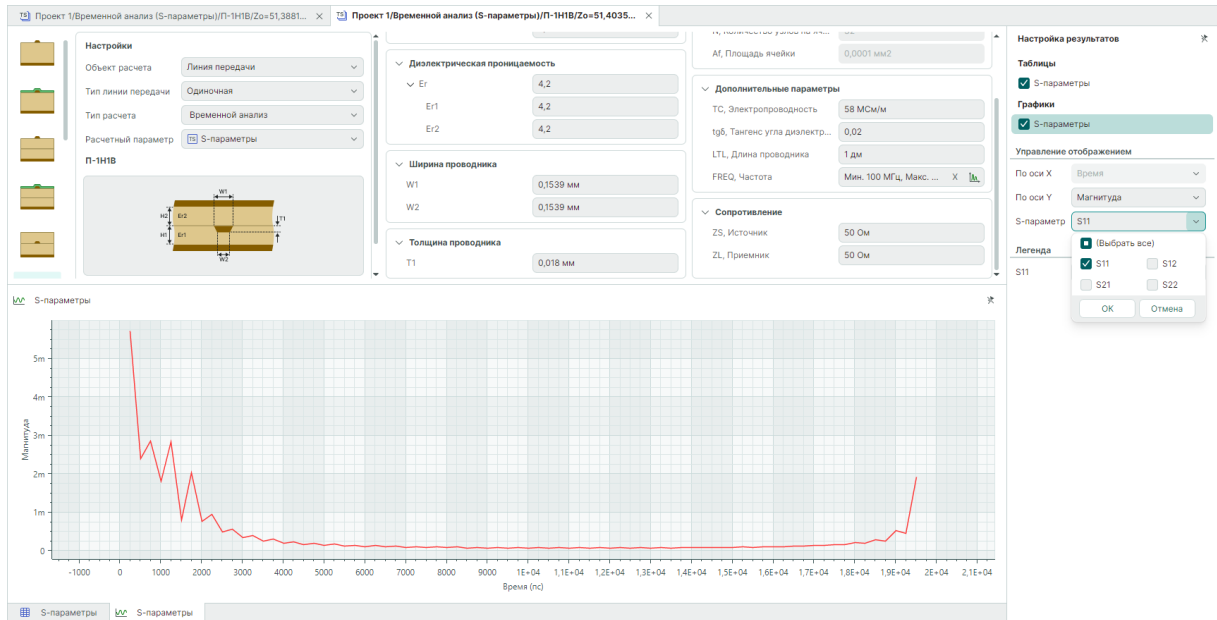


Рис. 235 Коэффициент отражения от входа (S11)

Аналогичные расчеты могут быть выполнены и для дифференциальных линий передачи.

10.11 Оценка перекрестных помех во временной области

Значительное влияние на качество сигнала оказывают перекрестные помехи, и нередко возникает необходимость оценить форму перекрестной помехи на ближнем и дальнем конце линии передачи. Решение этой задачи осуществляется с помощью расчета «Временной анализ» → «Перекрестные помехи».

Рассмотрим в качестве примера две линии передачи, соединяющие микросхему памяти DDR4 и ПЛИС. Отследим форму и уровень перекрестной помехи ближнем и дальнем конце согласованной (волновое сопротивление, сопротивление источника и нагрузки составляет 40 Ом) микрополосковой линии передачи с маской, расположенной на первом слое типовой структуры 6-и слойной печатной платы толщиной 1,5 мм.

Источник изображения типовой структуры – сайт www.rezonit.ru.

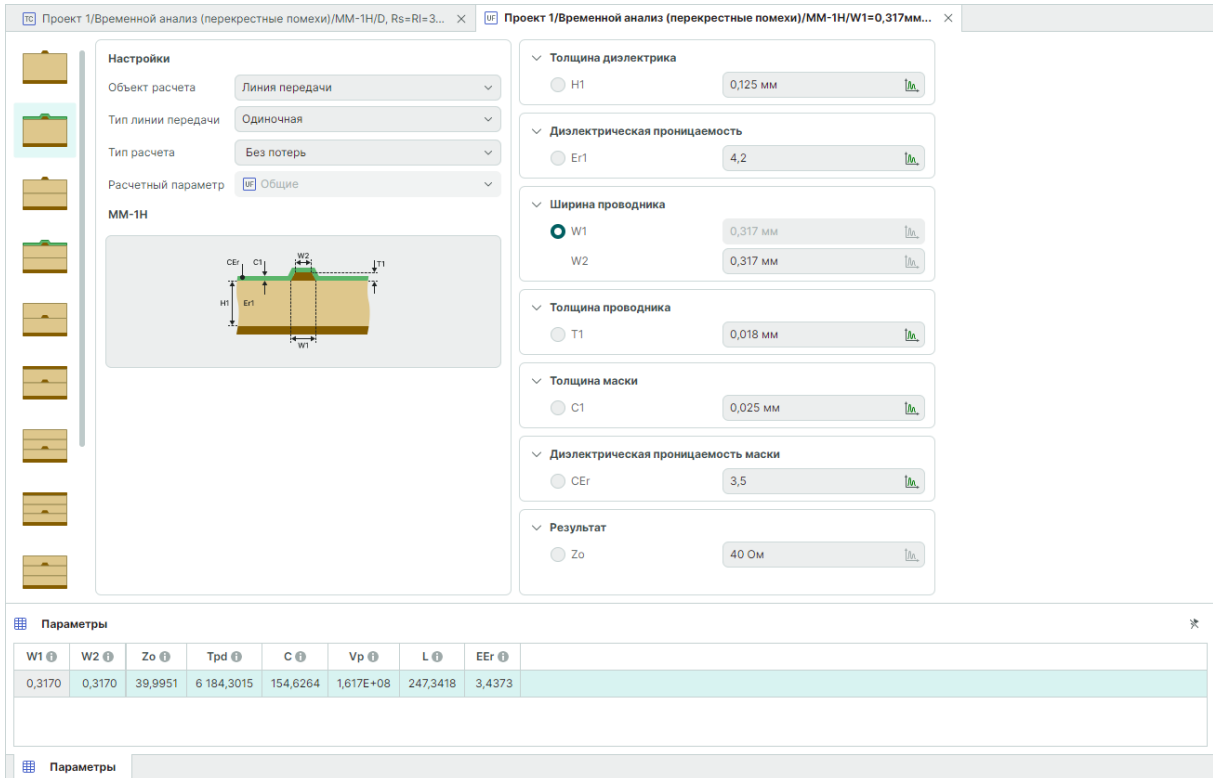
6-и слойная печатная плата MCO фольга 18 мкм TG170

Требуемая толщина платы, мм	1	1,5	2
Фольга 1	0,018	0,018	0,018
Препрег 1 TG170	1 x 2116	1 x 2116	1 x 2116
	0,125	0,125	0,125
Фольга 2	0,018	0,018	0,018
Ядро 1 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 3	0,018	0,018	0,018
Препрег 2 TG170	2 x 2116	1 x 2116	1 x 2116
	0,125 + 0,125	0,125	0,125
Фольга 4	0,018	0,018	0,018
Ядро 2 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 5	0,018	0,018	0,018
Препрег 3 TG170	1 x 2116	1 x 2116	1 x 2116
	0,125	0,125	0,125
Фольга 6	0,018	0,018	0,018
Фактическая толщина платы*, мм:	1,008	1,503	1,903

* без учета гальванического покрытия, финишного покрытия и маски

Рис. 235 Типовая структура 6-и слойной печатной платы

Определите ширину проводника, соответствующую волновому сопротивлению в 40 Ом с помощью расчета «Без потерь», см. [Рис. 236](#).



W1	W2	Zo	Trd	C	Vr	L	EEr
0,3170	0,3170	39,9951	6 184,3015	154,6264	1,617E+08	247,3418	3,4373

Рис. 236 Расчет ширины проводника

Подробное описание расчета представлено в разделе [Расчет ширины проводника](#).

Рассчитанная ширина проводника составит 0,3170 мм.

Переключите тип расчета в области настроек на «Временной анализ» → «Перекрестные помехи», при этом заданные параметры линии передачи сохранят свои значения.

Определите параметры линии передачи ([Рис. 237](#)):

- Длина линии (LTL) – 100 мм;
- Зазор между проводниками (G1) – 0,2 мм;
- Напряжение V1 (Порт 1) – «Сигнал»;
- Напряжение V3 (Порт 3) – «0 В»;
- Амплитуда сигнала (Y2) – 1,2 В;
- Передний фронт (TR) – 100 пс;
- Задний фронт (TF) – 100 пс;
- Плоская часть импульса (PW) – 300 пс;

- Период повторения (PER) – 1 нс.

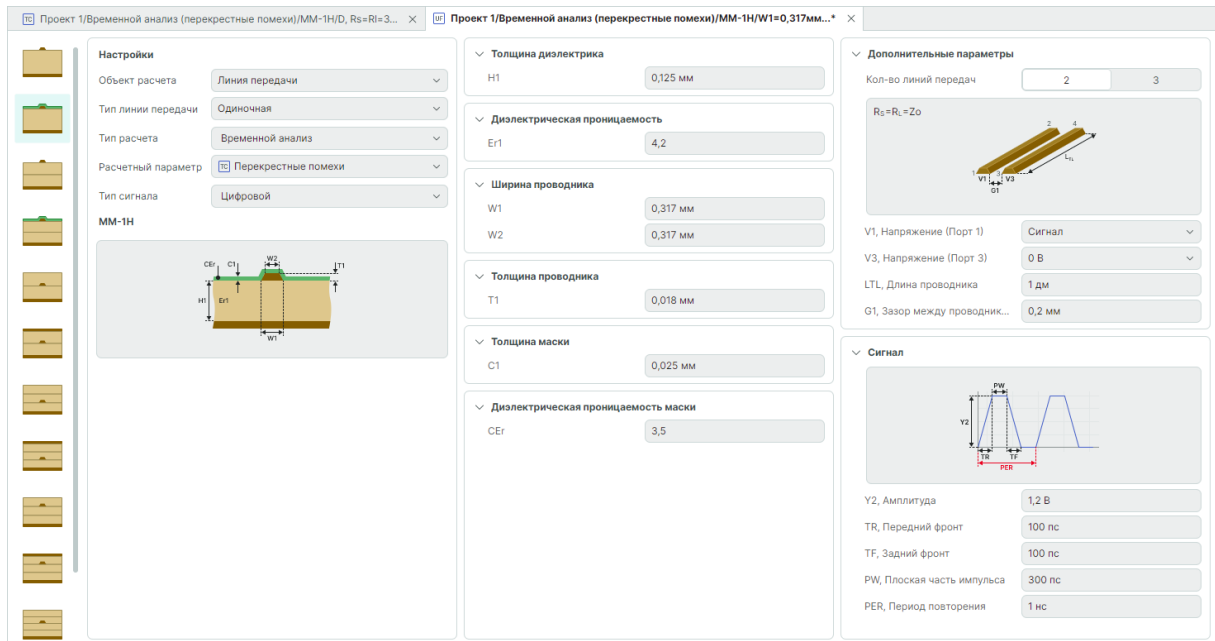


Рис. 237 Параметры расчета

Запустите расчет и перейдите к отображению помехи на ближнем конце линии в графическом виде, для этого установите флаг в чек-боксы порта 3 в панели «Настройка результатов», см. [Рис. 238](#).

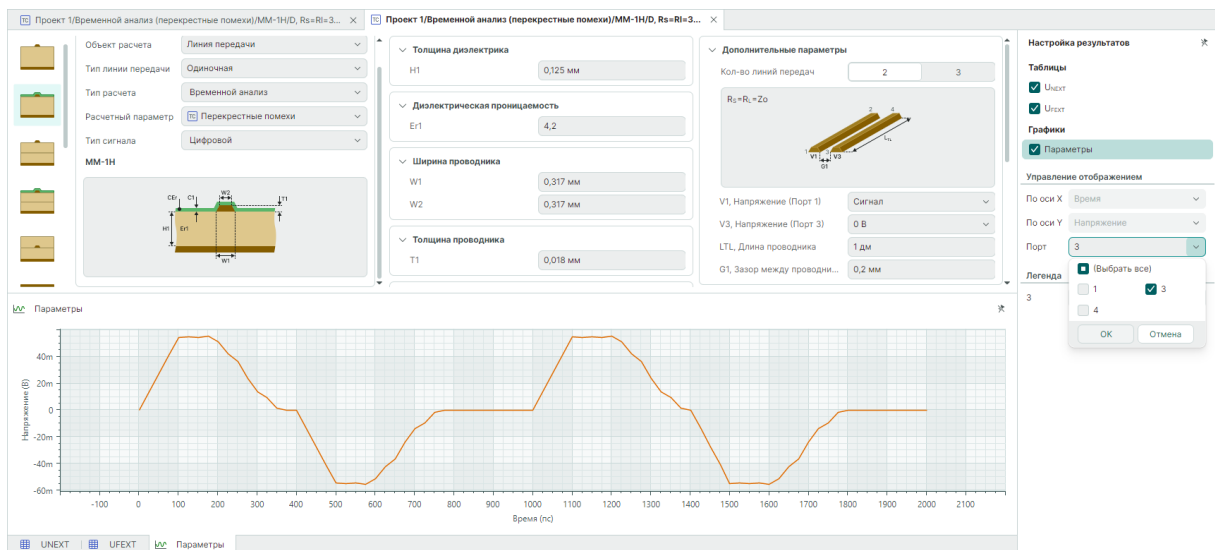


Рис. 238 Помеха на ближнем конце линии

На графике отображается форма помехи на ближнем конце линии, амплитуда помехи составляет примерно 55 мВ.

Для оценки формы и амплитуды перекрестной помехи на дальнем конце линии установите флаг в чек-бокс порта 4 в панели «Настройка результатов», см. [Рис. 239](#).

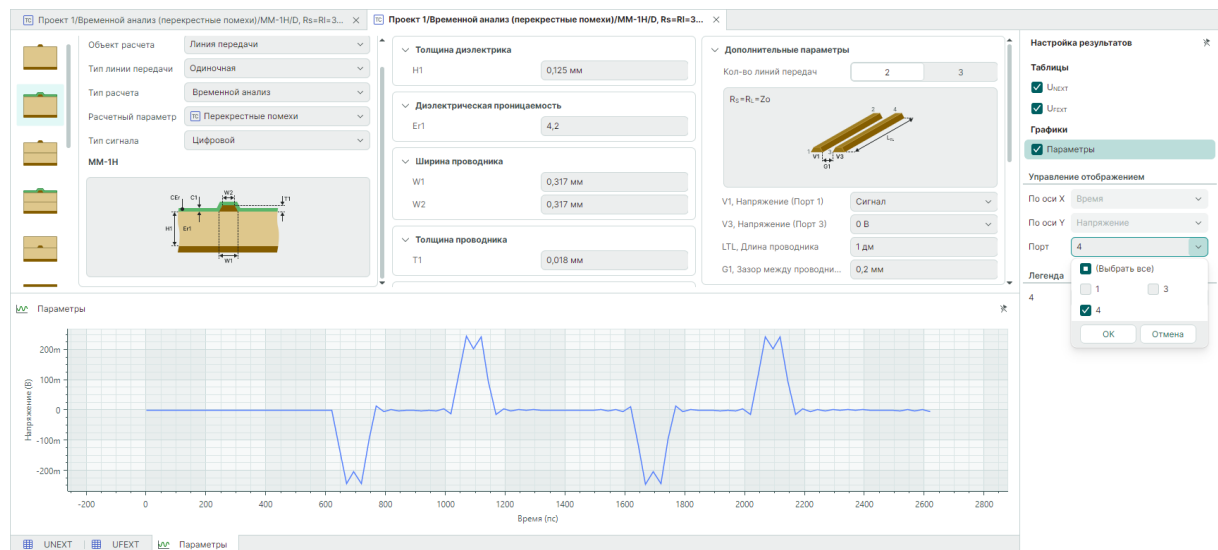


Рис. 239 Помеха на дальнем конце линии

Амплитуда помехи в конце линии составляет примерно 244 мВ.

Аналогичные расчеты могут быть выполнены для дифференциальных линий передачи как для цифрового, так и аналогового сигнала.

10.12 Анализ уровня помехи по отношению к сигналу

Известно, что если линии передачи располагаются в однородной среде, то помеха на дальнем конце линии-«жертвы» будет стремиться к нулю. Проверим данное утверждение на конкретном примере.

Рассмотрим в качестве примера согласованную (волновое сопротивление, сопротивление источника и нагрузки составляет 40 Ом) полосковую линию передачи, расположенную на третьем слое типовой структуры 6-и слойной печатной платы толщиной 1,5 мм, см. [Рис. 240](#).

Источник изображения типовой структуры – сайт www.rezonit.ru.

6-и слойная печатная плата МСО фольга 18 мкм TG170

Требуемая толщина платы, мм	1	1,5	2
Фольга 1	0,018	0,018	0,018
Препрег 1 TG170	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 2	0,018	0,018	0,018
Ядро 1 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 3	0,018	0,018	0,018
Препрег 2 TG170	2 x 2116 0,125 + 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 4	0,018	0,018	0,018
Ядро 2 FR-4 (TG 170)	0,2	0,51	0,71
Фольга 5	0,018	0,018	0,018
Препрег 3 TG170	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125	1 x 2116 0,125
Фольга 6	0,018	0,018	0,018
Фактическая толщина платы*, мм:	1,008	1,503	1,903

* без учета гальванического покрытия, финишного покрытия и маски

Рис. 240 Типовая структура 6-и слойной печатной платы

Определите ширину проводника, соответствующую волновому сопротивлению в 40 Ом с помощью расчета «Без потерь», см. [Рис. 241](#).

Настройки

Объект расчета: Линия передачи

Тип линии передачи: Одиночная

Тип расчета: Без потерь

Расчетный параметр: Общие

П-1Н1В

Перевернуть проводник

Толщина диэлектрика

- H: 0,51 мм; 0,125 мм
- H1: 0,51 мм
- H2: 0,125 мм

Диэлектрическая проницаемость

- Er: 4,2
- Er1: 4,2
- Er2: 4,2

Ширина проводника

- W1: 0,241 мм
- W2: 0,241 мм

Толщина проводника

- T1: 0,018 мм

Результат

- Zo: 40 Ом

Параметры

W1	W2	Zo	Tpd	C	Vp	L	EEr
0,2410	0,2410	39,9749	6 839,1287	171,0857	1,462E+08	273,3934	4,2038

Рис. 241 Расчет ширины проводника

Подробное описание расчета представлено в разделе [Расчет ширины проводника](#).

Рассчитанная ширина проводника составит 0,241 мм.

Переключите тип расчета в области настроек на «Временной анализ» → «Перекрестные помехи», при этом заданные параметры линии передачи сохраняют свои значения.

Остальные условия аналогичны условиям предыдущей задачи, подробнее см. [Оценка перекрестных помех во временной области](#):

- Длина проводника (LTL) – 100 мм;
- Напряжение V1 (Порт 1) – «Сигнал»;
- Напряжение V3 (Порт 3) – «0 В»;
- Амплитуда (Y2) – 1,2 В;
- Передний фронт (TR) – 100 пс;
- Задний фронт (TF) – 100 пс;
- Плоская часть импульса (PW) – 300 пс;
- Период повторения (PER) – 1 нс.



Примечание! В данном примере можно использовать предыдущий расчет и внести необходимые изменения или задать входные параметры повторно в новый расчет.

Внесите необходимые параметры и запустите расчет.

Перейдите к отображению помехи на дальнем конце линии в графическом виде, для этого установите флаг в чек-бокс порта 4 в панели «Настройка результатов», см. [Рис. 242](#).

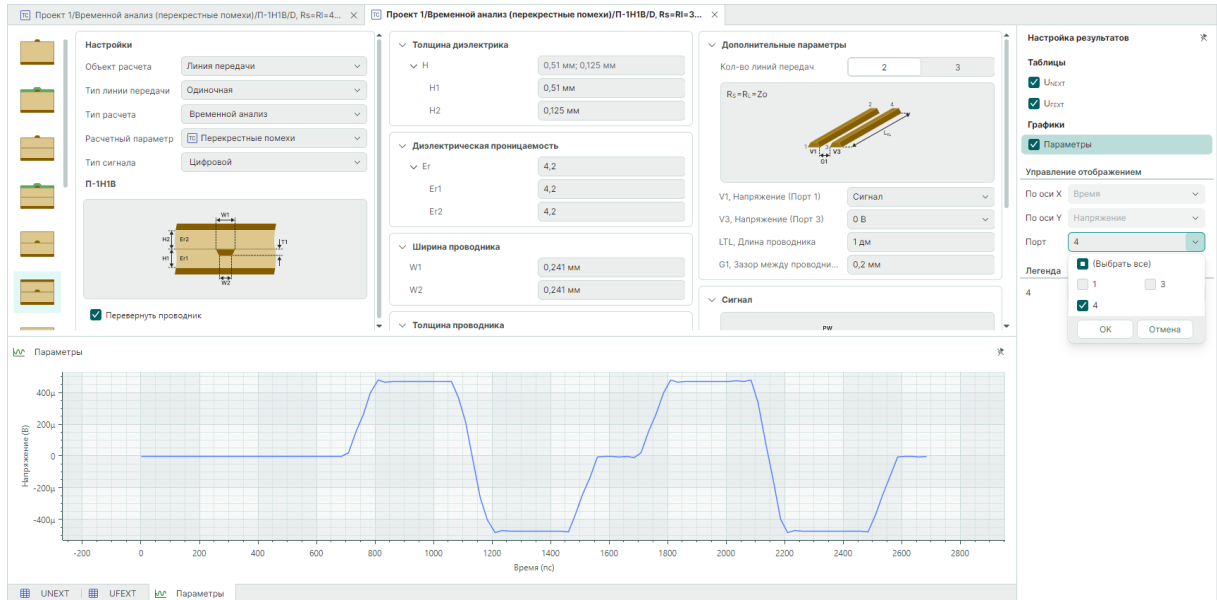


Рис. 242 Помеха на дальнем конце линии

Амплитуда помехи составляет примерно 500 мкВ.

Для сравнения амплитуды перекрестной помехи относительно амплитуды сигнала установите одновременно флаги в чек-боксы портов 1 и 4, см. [Рис. 243](#).

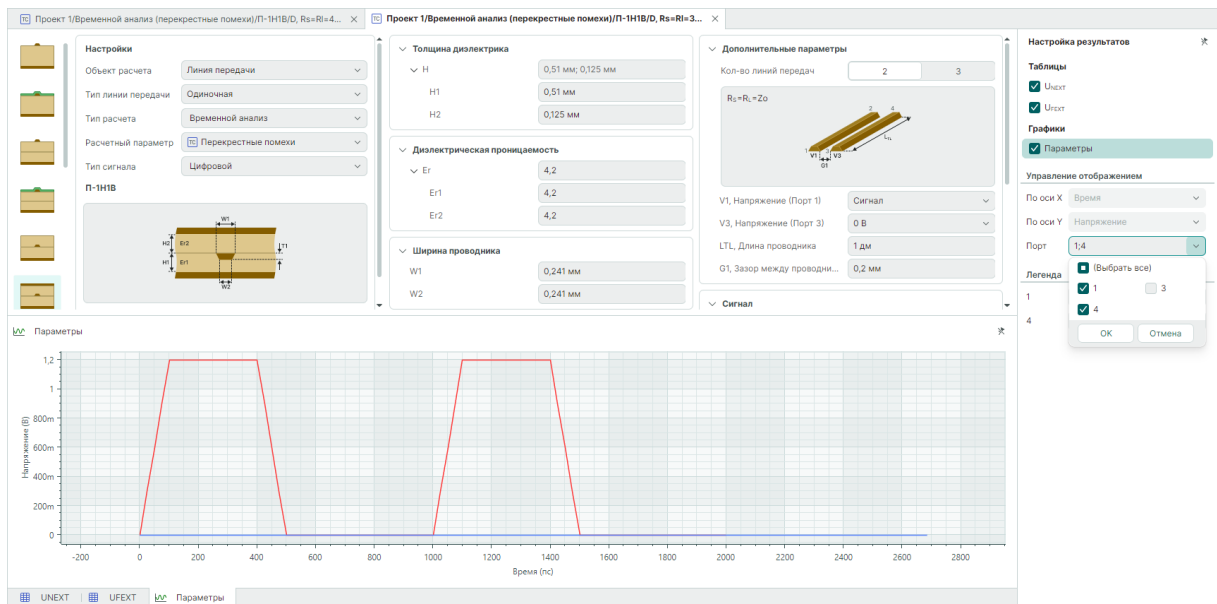


Рис. 243 Сравнение сигнала и помехи

На графике видно, что на фоне основного сигнала помеха выглядит нулевой.

Аналогичные расчеты могут быть выполнены для дифференциальных линий передачи как для цифрового, так и аналогового сигнала.