

Расчёт волнового сопротивления на печатной плате для интерфейса USB 3.1 в САПР SimPCB Lite

Вячеслав Кухарук, Виктор Ухин

В статье рассматривается пример расчёта первичных и вторичных параметров дифференциальной пары высокоскоростного интерфейса USB 3.1 в САПР SimPCB Lite, разработанной компанией ЭРЕМЕКС.

При проектировании высокоскоростных интерфейсов на печатной плате важно рассчитывать параметры линий передачи с высокой точностью. Одним из таких интерфейсов является USB 3.1, у которого скорость передачи данных достигает 10 Гбит/с. На таких скоростях несогласованность импеданса может критически повлиять на целостность сигнала, что приведёт к некорректной работе всего устройства.

В статье подробно рассматривается процесс вычисления параметров линии передачи с контролируемым дифференциальным волновым сопротивлением для интерфейса USB 3.1 в САПР SimPCB Lite. Расчёт ослабления сигнала и перекрёстных помех применительно к USB 3.1 будет рассмотрен в следующих статьях.

USB 3.1 использует две дифференциальные пары (TX и RX), по которым передаются данные со скоростью до 10 Гбит/с. Основные требования и рекомендации на трассировку и компоновку данного интерфейса изложены ниже [1, 2, 3].

- **Импеданс дифференциальной пары.** Волновое сопротивление должно составлять 90 Ом. Допускается отклонение в пределах десяти процентов.
- **Трассировка и количество переходных отверстий.** Не допускается в трассировке наличие прямых углов. Количество переходных отверстий минимальное: на одну линию не более двух.
- **Перекрёстные помехи.** Для минимизации помех расстояние от любых сигналов до проводника дифф. пары должно составлять не менее 5W, где W – ширина проводника дифф. пары. В случае плотной трассировки и невозможности обеспечения указанного выше значения

применять моделирование. Минимизировать расстояние между сигнальным и опорным слоем. Избегать размещения трасс под источниками помех (кристаллы, DC-DC, PLL).

- **Длина проводников в паре.** Разница в длине проводников не должна превышать 0,127 мм. Обеспечить равномерную ширину и зазор по всей длине дифференциальной пары.
- **Возвратный путь сигнала.** Следует избегать разрывов в опорном слое под дифференциальной парой.

- **Размещение конденсаторов.** Конденсаторы на сигнальных линиях следует располагать как можно ближе к разъёму USB.
- **Устанавливать TVS-диоды или ESD-защиту** ближе к USB-разъёму.
- **Ферриты или индуктивности.** Данные типы компонентов не должны стоять в сигнальных линиях Super Speed (TX/RX).

Как правило, для данного интерфейса USB 3.1 на печатной плате реализуются **дифференциальные микрополосковые** или **дифференциальные полосковые линии передачи**. Возможны также варианты и скопланарными структурами.

В данной статье рассматривается **микрополосковая дифференциальная линия передачи**.

Толщина	Тип препрега	RC	Dk 1GHz	2GHz	5GHz	10GHz	15GHz
0.102	3313	56	3.88	3.74	3.73	3.70	3.66
0.076	1080	64	3.68	3.52	3.52	3.5	3.46
0.064	106	76	3.38	3.19	3.21	3.19	3.16
0.05	106	71	3.51	3.33	3.34	3.32	3.28

Рис. 1. Список рекомендуемых препрегов FR4 категории High Speed от «РЕЗОНИТ»

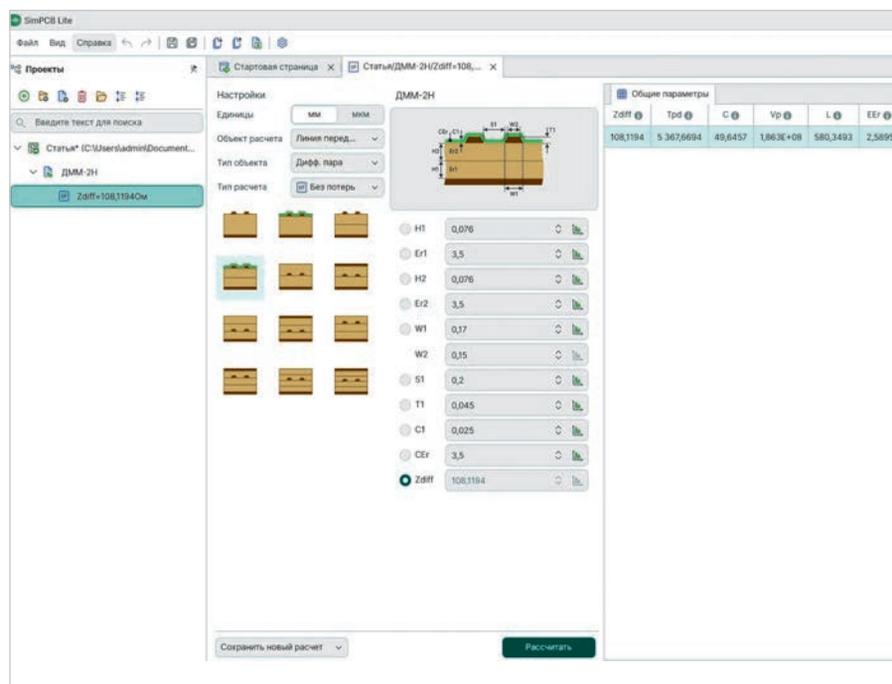


Рис. 2. Расчёт дифференциального волнового сопротивления $Z_{diff} = 108,11 \text{ Ом}$

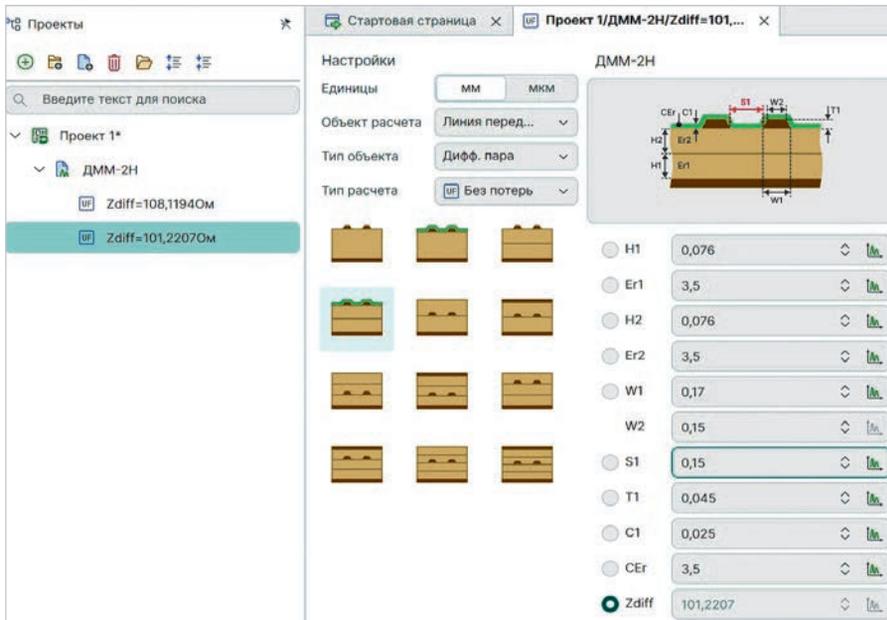


Рис. 3. Расчёт дифференциального волнового сопротивления $Z_{diff} = 101,22 \text{ Ом}$

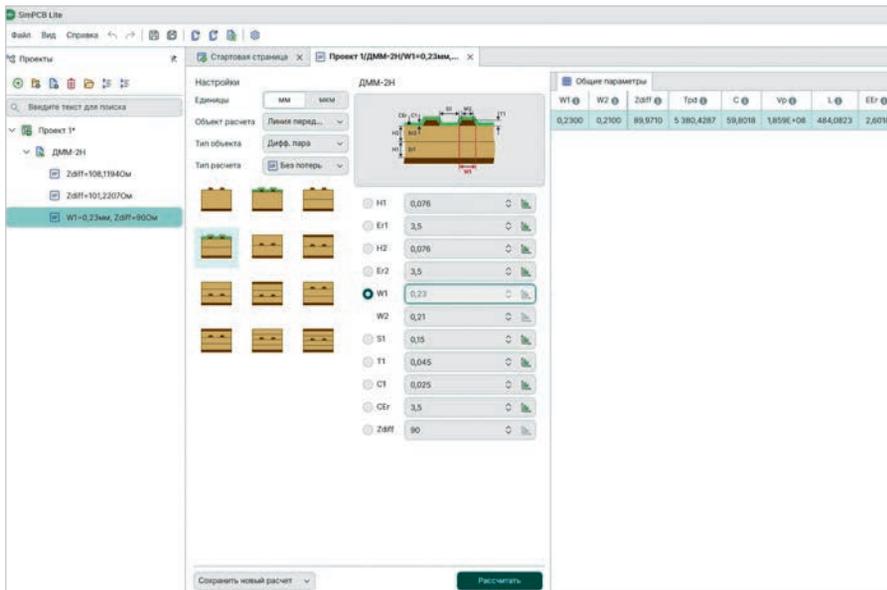


Рис. 4. Расчёт дифференциального волнового сопротивления $Z_{diff} = 89,97 \text{ Ом}$

Таблица 1. Список входных параметров, который необходимо задать в САПР SimPCB Lite

Параметр	Значение	Комментарий
Объект расчёта	Линия передачи	
Тип объекта	Дифф. пара	
Тип расчёта	Без потерь	
Модель	ДММ-2Н	Дифференциальная микрополосковая ЛП с маской
H1 и H2	0,076	Толщина диэлектрика (мм)
Er1 и Er2	3,5	Диэлектрическая проницаемость
W1	0,17	Ширина проводника (мм), значение по умолчанию
W2	0,15	Ширина проводника после подтравы (мм), значение по умолчанию. Подтрав зависит от технологических особенностей производства. Данный параметр лучше уточнять у технологических служб конкретного производства
S1	0,2	Зазор между проводниками (мм), значение по умолчанию
T1	0,045	Толщина проводника (мм). Значение складывается из базовой толщины меди и осаждения меди. Данный параметр лучше уточнять у технологических служб конкретного производства
C1	0,025	Толщина маски (мм)
CEr	3,5	Диэлектрическая проницаемость маски

Параметры линий передачи, в том числе и геометрические, во многом зависят от применяемых материалов в структуре печатной платы. Выбор материала зависит от многих факторов, а именно: типа платы, условий эксплуатации, применяемых компонентов, способа монтажа, максимальной частоты сигналов, значения волнового сопротивления, типов переходных отверстий, максимального тока в устройстве и допустимой толщины платы и т.д.

Для высокоскоростных интерфейсов следует использовать специальные материалы из категории High Speed. Как правило, они имеют низкую диэлектрическую проницаемость, малый тангенс угла диэлектрических потерь и стабильность свойств в широком диапазоне частот. Такие материалы предлагает компания ООО «РЕЗОНИТ».

Дифференциальная пара размещается на внешнем слое. Пусть между сигнальным слоем и опорным располагается препрег. Такой вариант структуры многослойной печатной платы относится к типовым. Параметры препрега взяты с сайта компании ООО «РЕЗОНИТ» и представлены на рис. 1. Данные препрега выполнены на основе материала TU-872 компании TUC [4].

В разрабатываемой конструкции применим два препрега $2 \times 0,076$ с диэлектрической проницаемостью $E_r (D_k) = 3,5$. Данная комбинация проста в изготовлении и довольно часто используется на практике. При необходимости, в зависимости от решаемой задачи и возможностей производства, количество и тип препрегов могут отличаться от представленного выше.

В САПР SimPCB Lite задаются следующие входные параметры, приведённые в табл. 1.

Также необходимо изменить режим расчёта на вариант **Сохранить новый расчёт**. В этом случае после нажатия на кнопку **Рассчитать** расчёт будет сохраняться в панели **Проекты**.

При данных, указанных в табл. 1, дифференциальное волновое сопротивление составит $Z_{diff} = 108,11 \text{ Ом}$. Кроме волнового сопротивления программа рассчитывает задержку, ёмкость, индуктивность, скорость распространения сигнала и эффек-

тивную диэлектрическую проницаемость (рис. 2).

Полученный результат не удовлетворяет требованиям данного интерфейса, так как импеданс значительно превышает 90 Ом.

Параметры материалов, геометрические и электрофизические, являются константами в нашем примере, поэтому влиять на волновое сопротивление возможно только через S1 и W1, W2. Изменим S1: пусть зазор между проводниками составляет 0,15 мм, тогда $Z_{diff} = 101,22$ Ом. Значение сопротивления стало ближе к необходимому, но всё же не удовлетворяет требованию (рис. 3).

Далее вычислим в SimPCB Lite ширину проводника дифференциальной пары под волновое сопротивление 90 Ом. Для этого следует переключить радиокнопку на параметр W1. В поле Z_{diff} нужно ввести 90 Ом и нажать кнопку **Рассчитать**. В итоге ширина проводника получается 0,23 мм.

Таким образом, при ширине проводника 0,23 мм и зазоре между проводниками 0,15 мм волновое сопротивление для данной конструкции составит $Z_{diff} = 89,97$ Ом. Если отсутствуют какие-либо дополнительные ограничения, то требования по импедансу можно считать выполненными (90 Ом $\pm 10\%$) (рис. 4).

Для быстродействующих интерфейсов рекомендуется дополнительно проводить частотный анализ. С его помощью можно оценить зависимость волнового сопротивления от частоты и вычислить множество дополнительных величин, влияющих на качество сигнала. САПР SimPCB Lite позволяет провести такой анализ. Для его выполнения в программе следует изменить тип расчёта на **Частотный анализ** и ввести данные в **Дополнительные параметры**. Пусть они будут иметь следующие значения (рис. 5).

Параметр Fc (частота) меняется от 100 МГц до 11 ГГц с шагом 100 МГц. Результат расчёта представлен на рис. 6.

Видно, что волновое сопротивление уменьшается с увеличением частоты. Так, для 100 МГц оно составляет 92,113 Ом, а для 10 ГГц – 89,93 Ом. Такое поведение обусловлено учётом двух дополнительных первичных параметров (активное сопротивление и проводимость диэлектрика),

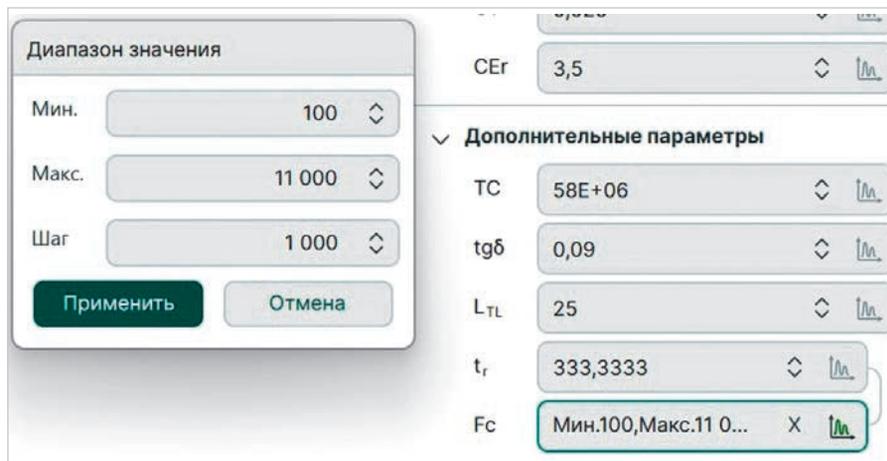


Рис. 5. Значения в дополнительных параметрах

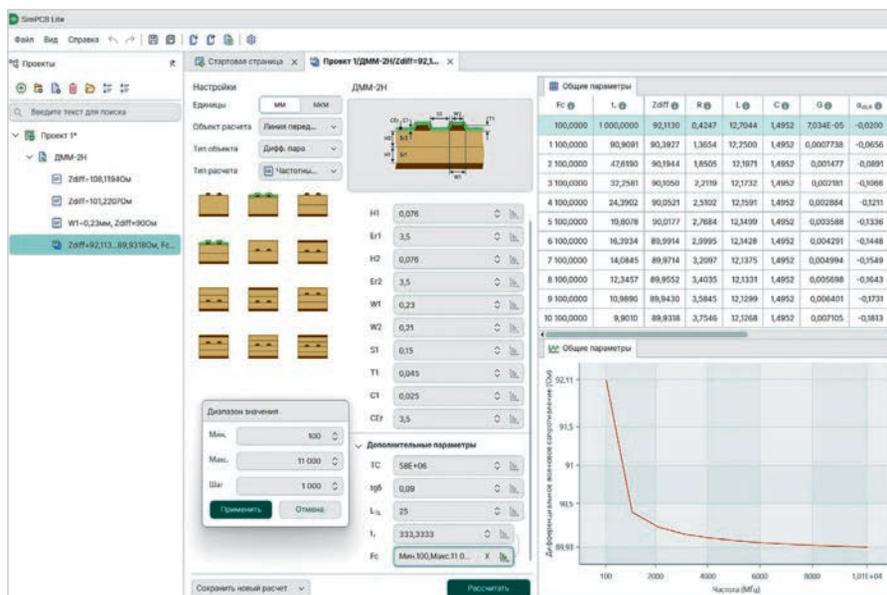


Рис. 6. Частотный анализ, результат расчёта

а также влиянием частоты на значение индуктивности. Полученный интервал дифференциального волнового сопротивления линий передачи (89,93...92,113 Ом) в широком диапазоне частот (100 МГц...10 ГГц) также полностью удовлетворяет требованиям к высокоскоростному интерфейсу USB 3.1.

При проектировании линий передачи для определения их геометрических параметров и электрофизических свойств под конкретное значение волнового сопротивления в значительном количестве случаев достаточно использовать только расчёт без учёта потерь. Для получения более детальной информации о линии необходимо выполнять частотный анализ. С его помощью специалист получит значения всех четырёх первичных параметров (ёмкость, индуктивность, активное сопротивление, проводимость

диэлектрика) и точное значение импеданса на конкретной частоте.

Литература

1. Universal Serial Bus 3.1 Specification, 2013.
2. High-Speed Interface Layout Guidelines. Texas Instruments. 2023.
3. AN222944. EZ-USB HX3PD Hardware Design Guidelines and Checklist. Infineon Technologies.
4. Сайт компании «РЕЗОНИТ». Материалы для производства печатных плат. URL: https://www.rezonit.ru/directory/v-pomoshch-konstruktoru/materialy-dlya-proizvodstva-pechatnykh-plat/materialy-high-speed/#TU872_SLK/ (дата обращения: 15.05.2025).
5. Сайт компании TUC. URL: <https://www.tuc.com.tw/en-us/products-detail/id/2> (дата обращения: 15.05.2025).

НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

Еще десять микросхем Микрона первого уровня в реестре российской продукции



Десять интегральных микросхем первого уровня производства Микрона, крупнейшего производителя российской микроэлектроники (входит в группу компаний «Элемент», ELMT), резидента ОЭЗ «Технополис Москва», внесены в реестр российской промышленной продукции и в Единый реестр российской радиоэлектронной продукции.



В числе десяти интегральных микросхем первого уровня промышленного применения в реестре: регуляторы напряжения K5361EH1T, K5361EH1AT, K5361EH1BT, K5361EH1DT, K5361EH1ET, стабилизатор напряжения K5361EF2T, понижающие

регуляторы напряжения K5361EK2AT, K5361EK2BT, K5361EK1AT, K5361EK1BT. Все микросхемы произведены и корпусированы на Микроне и полностью соответствуют требованиям по локальному производству.

Шлюзы PFORT в аэропорту Пулково в рамках ПМЭФ-2025

В дни работы Петербургского международного экономического форума (ПМЭФ-2025) в аэропорту Пулково успешно прошло тестирование биометрического шлюза TOP-22ш со встроенным искусственным интеллектом.

Технология предлагает пассажирам удобное и быстрое прохождение процесса подтверждения личности без предъявления паспорта, используя биометрическую идентификацию по лицу.

Для этого в шлюзе установлен терминал BioSmart Quasar 7, который соответствует всем требованиям 572-ФЗ и напрямую подключен к Единой Биометрической Системе (ЕБС) по транзакционной модели.

TOP-22ш разработан компанией ПРОСОФТ (торговая марка PFORT) совместно

с Министерством промышленности и торговли РФ, курируется Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ и производится в России.



Использование именно этого уникального продукта обусловлено его способностью обеспечивать повышенный уровень контроля прохода благодаря встроенному искусственному интеллекту. Шлюз способен успешно выявлять попытки прохода двух человек, даже прижавшихся друг к другу; контролировать наличие ручной клади, детей на руках или рядом со взрослыми; обнаруживать оставленные предметы, животных вне переносок и т.п.



Промышленный **ТЕХНОПАРК**

Производство, разработка и поставка постоянных резисторов, аттенуаторов и чип-индуктивностей:

- Эквиваленты нагрузок ПР1-24 (от 50 Вт – 2000 Вт)
- Аттенуаторы ПР1-25 (от 50 Вт – 2000 Вт)
- ТПИ – тепловые чип-перемычки
- СВЧ-резисторы
- Мощные СВЧ-резисторы P1-170 (до 1000 Вт)
- Силовые резисторы P1-150M (до 1500 Вт)
- Наборы резисторов НР1-82
- Чип-резисторы P1-8В (А, И, С) соответствуют требованиям стандарта АЕС-Q200

- Современная производственная база
- Высокое качество
- Индивидуальный подход к потребителю
- Изделия по вашему ТЗ



Связаться с нами: **8 800 444 30 99**

г. Нижний Новгород, ул. Нартова, д.6
e-mail: info@erkonpark.ru

erkonpark.ru