

Частотный анализ дифференциальной линии передачи для интерфейса USB 3.1 в САПР SimPCB Lite

Виктор Ухин, Вячеслав Кухарук

В статье объясняется необходимость выполнения частотного анализа линий передачи. Приводится пример расчёта в САПР SimPCB Lite от компании «ЭРЕМЕКС» для дифференциальной линии высокоскоростного интерфейса USB 3.1.

Значительная часть инженеров при расчёте параметров линий передачи часто ограничиваются расчётом без потерь. Это оправдано, когда стоит задача оценить только волновое сопротивление или задержку, так как известно, что при вычислении импеданса в широком диапазоне частот

его разброс не превышает 5%. Такая погрешность вполне удовлетворяет требованиям большого количества интерфейсов передачи данных. На рис. 1 показан пример зависимости волнового сопротивления одиночной линии передачи от частоты, полученной в программе SimPCB Lite.

При проектировании высокочастотных и высокоскоростных устройств знания импеданса, погонной ёмкости, индуктивности и задержки может быть уже недостаточно, и расчёт без учёта потерь не покроет все потребности специалиста. В этом случае необходимо оценивать поведение линии с учётом частоты сигнала, то есть выполнить частотный анализ. Данной вид расчёта позволяет вычислять следующее.

1. Значение волнового сопротивления на конкретной частоте. Дан-

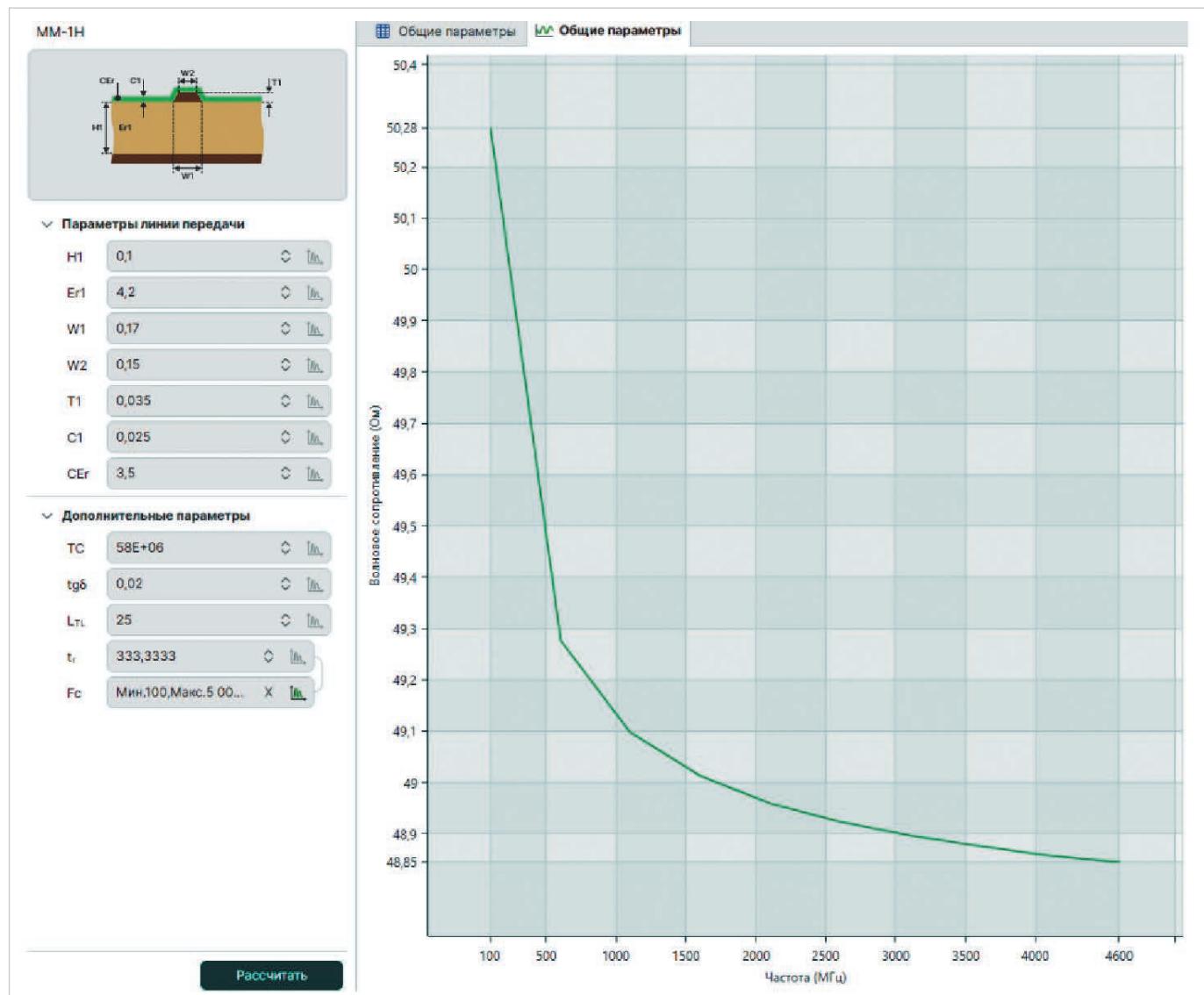


Рис. 1. График зависимости волнового сопротивления от частоты

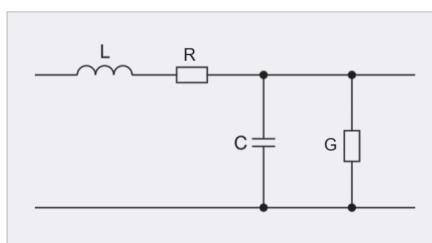


Рис. 2. Модель линии передачи при частотном анализе

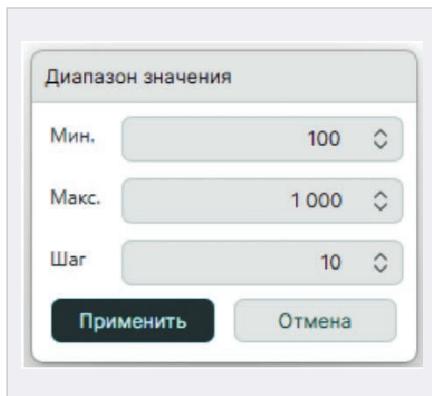


Рис. 6. Настройка множественного расчёта для L_{tl}

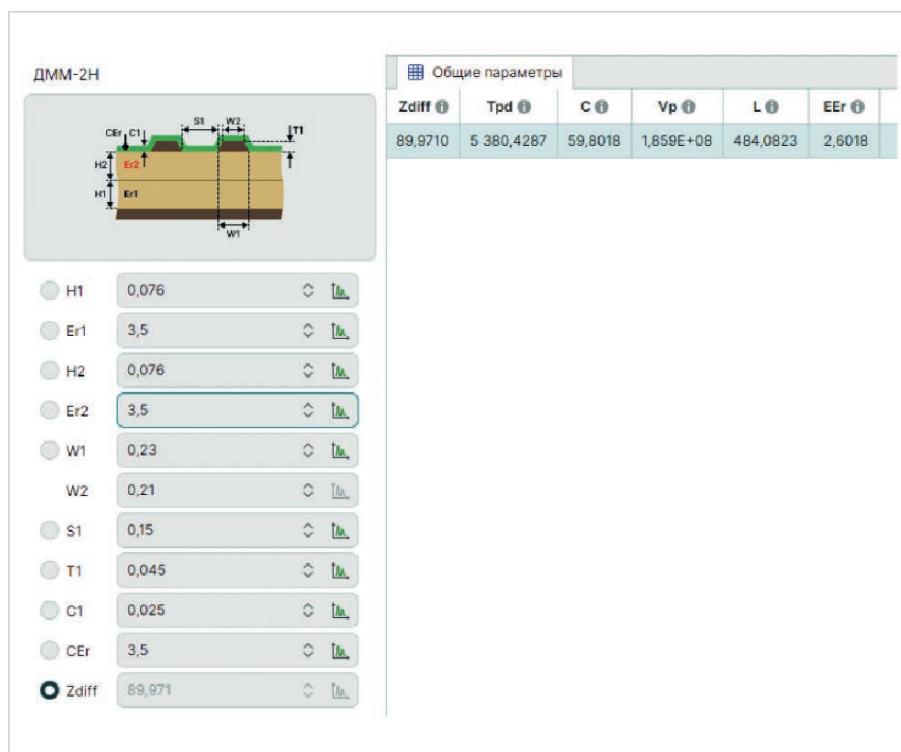


Рис. 3. Параметры дифференциальной пары и результат расчёта без учёта потерь

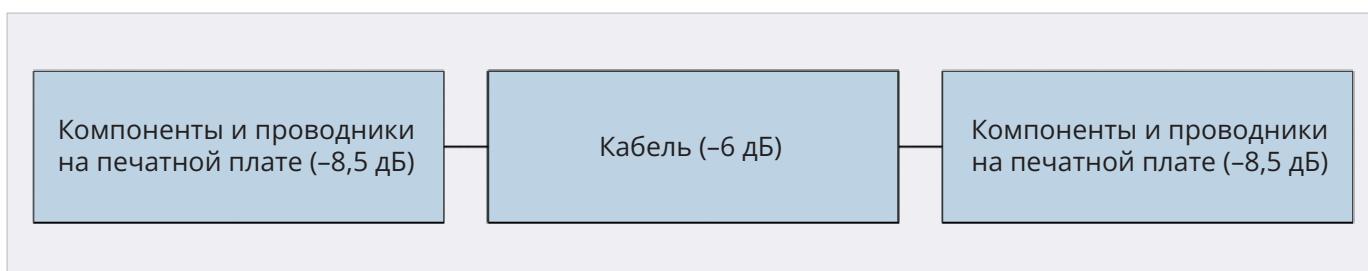


Рис. 4. Распределение потерь в дифференциальной паре USB 3.1

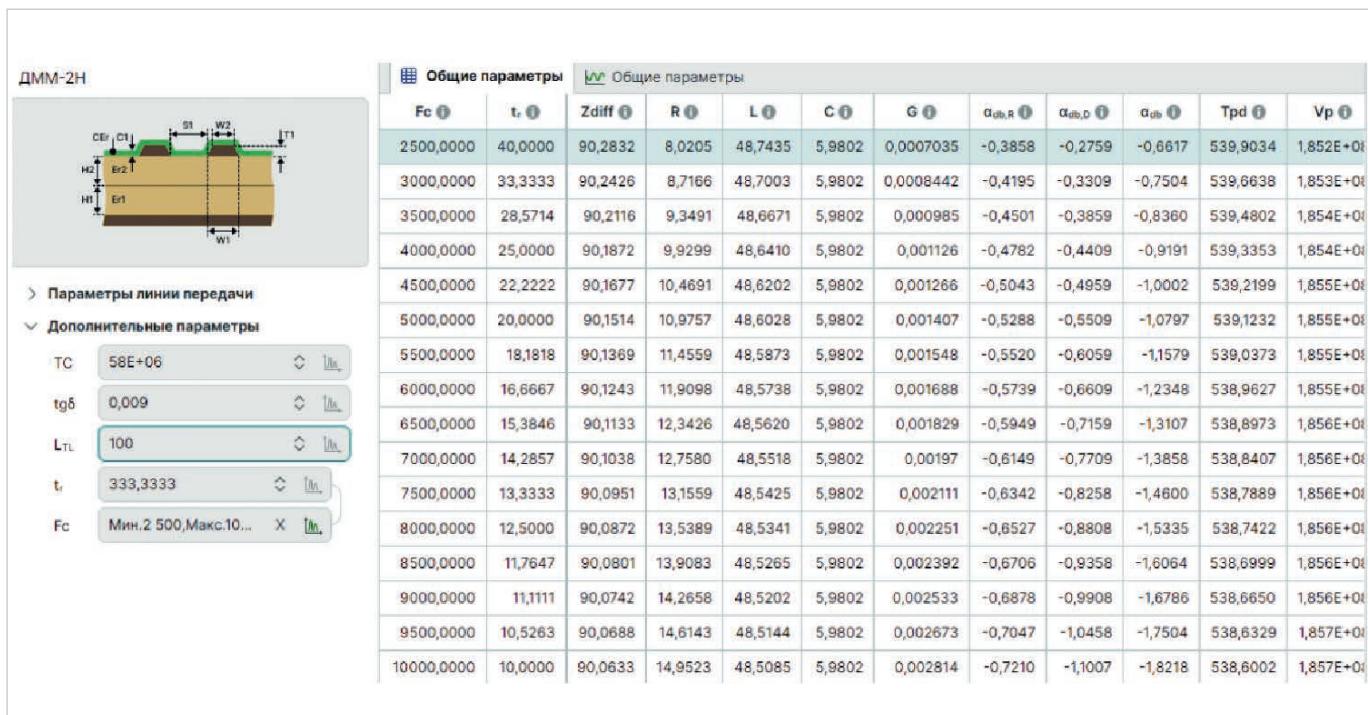


Рис. 5. Результат расчёта дифференциальной линии передачи интерфейса USB 3.1 с учётом частоты

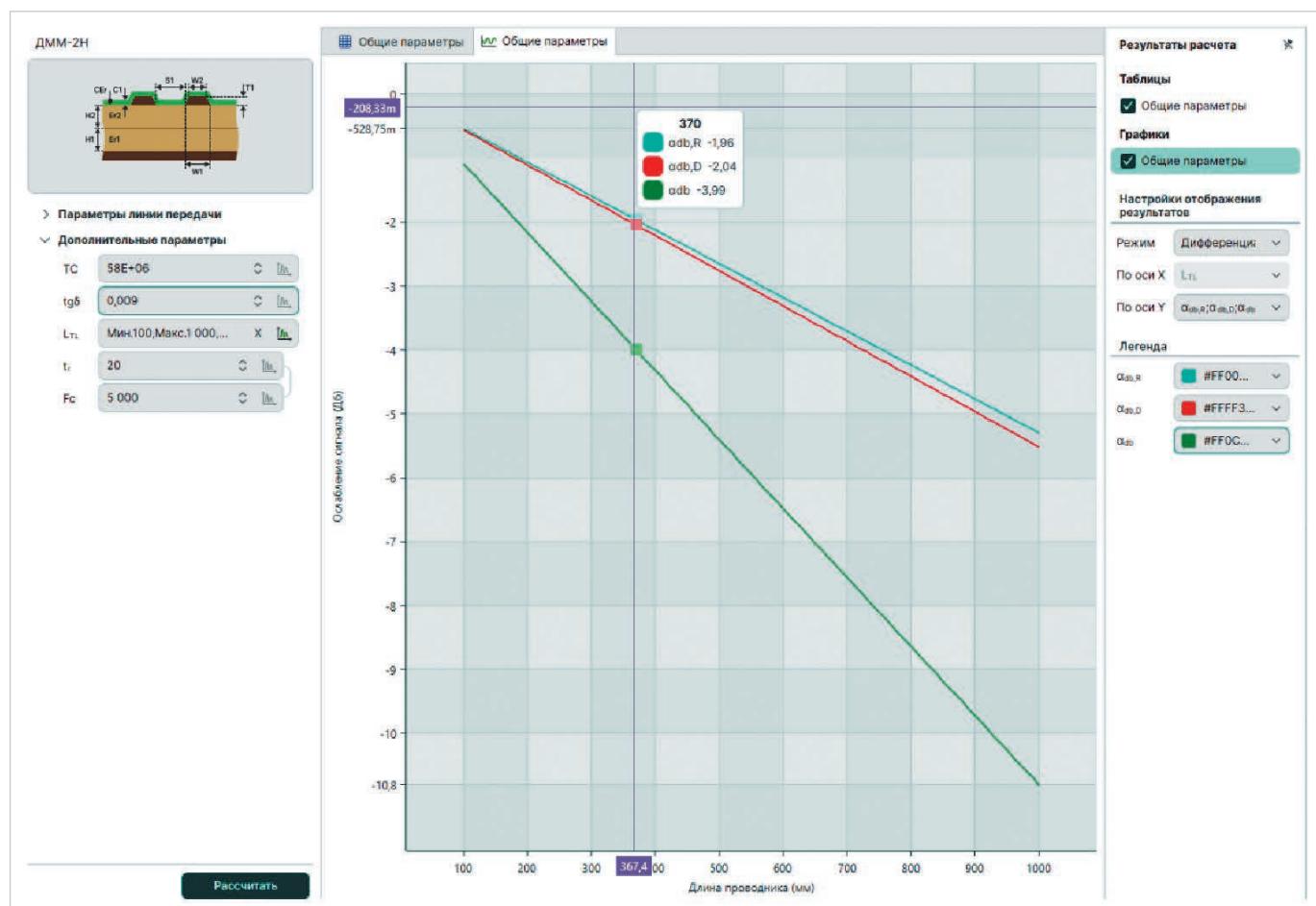


Рис. 7. Результат расчёта ослабления сигнала в зависимости от длины линии передачи для материала TU-872

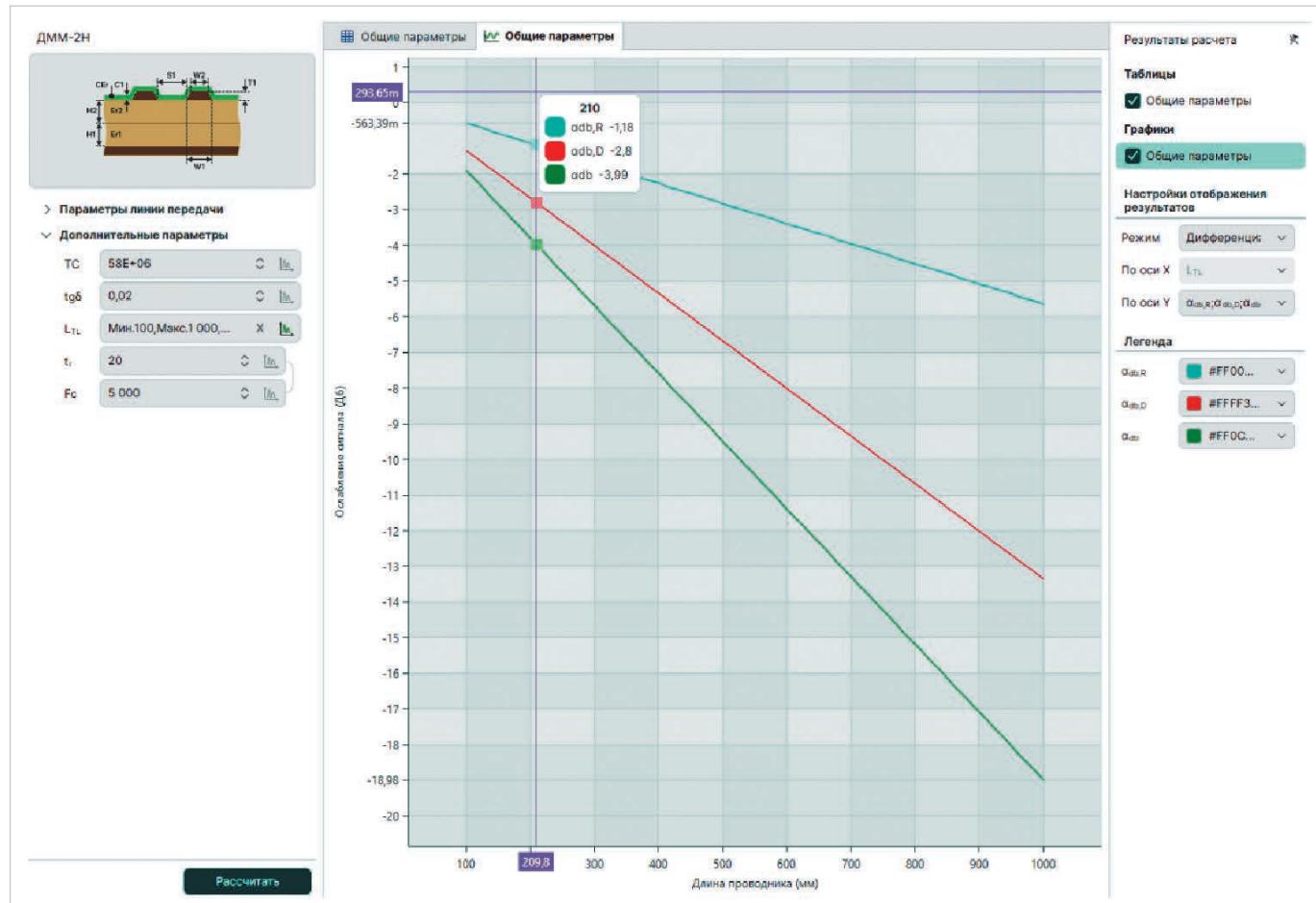


Рис. 8. Результат расчёта ослабления сигнала в зависимости от длины линии для материала FR4

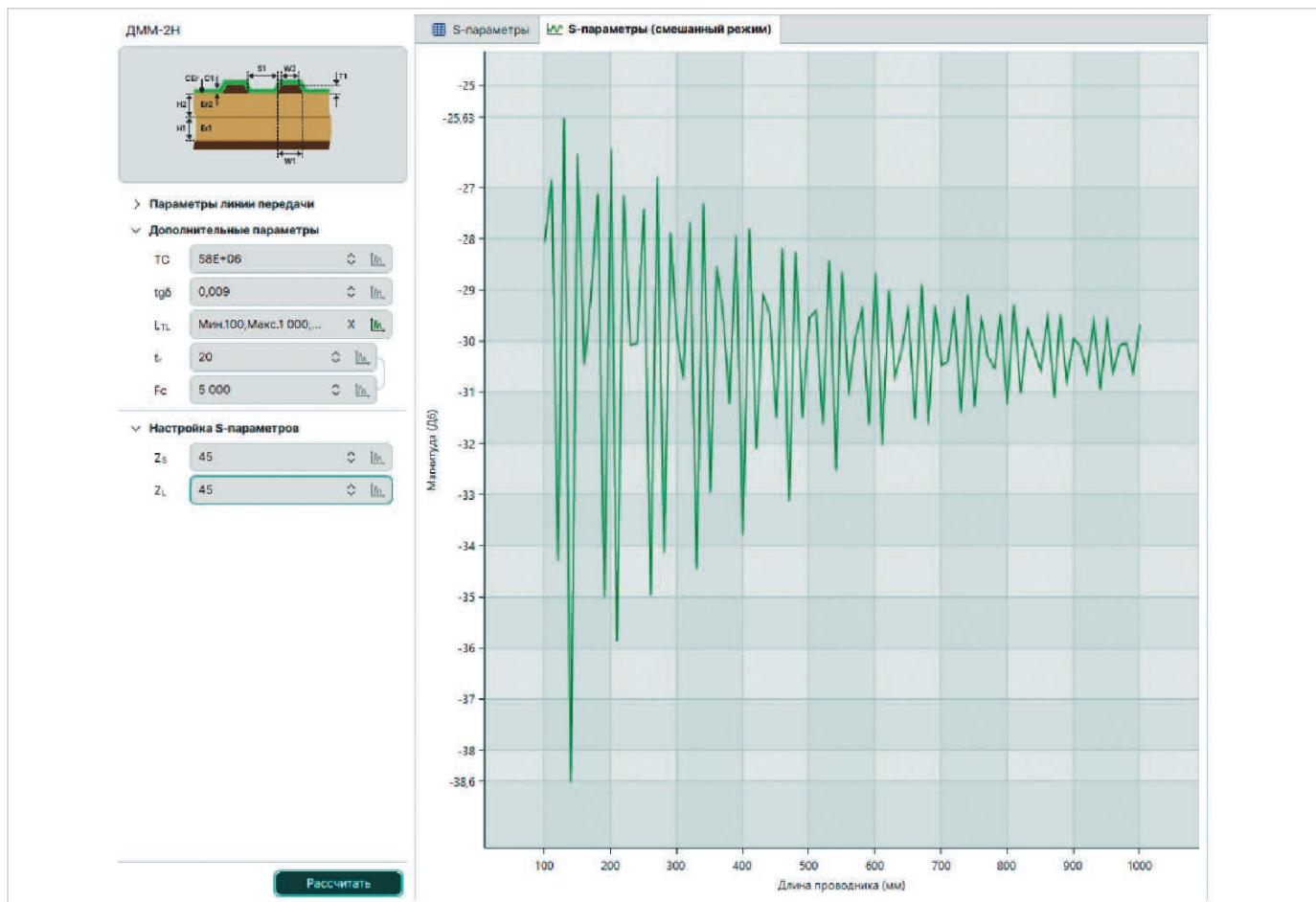


Рис. 9. Результат расчёта коэффициента SDD11

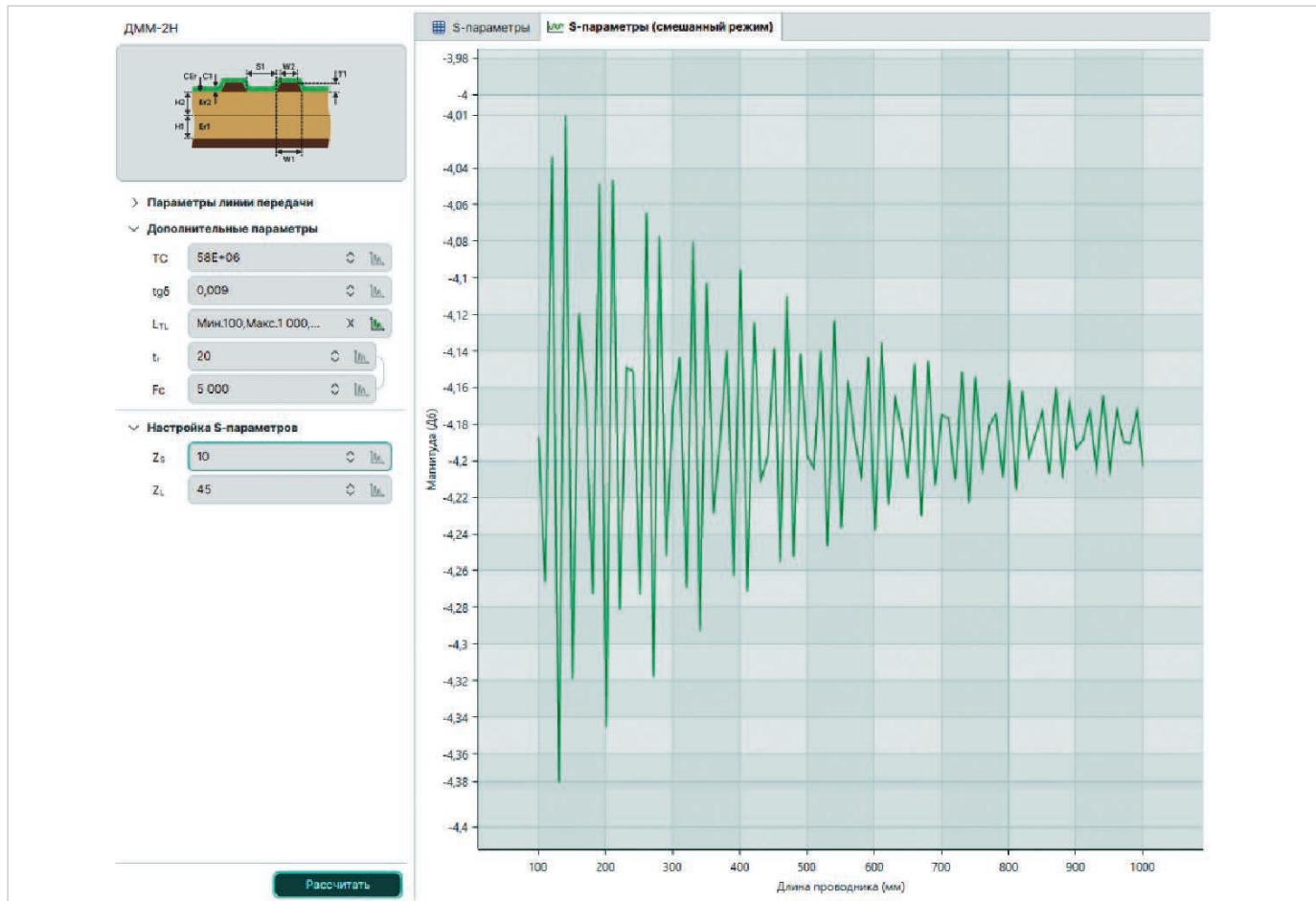


Рис. 10. Результат расчёта SDD11 для несогласованной линии передачи

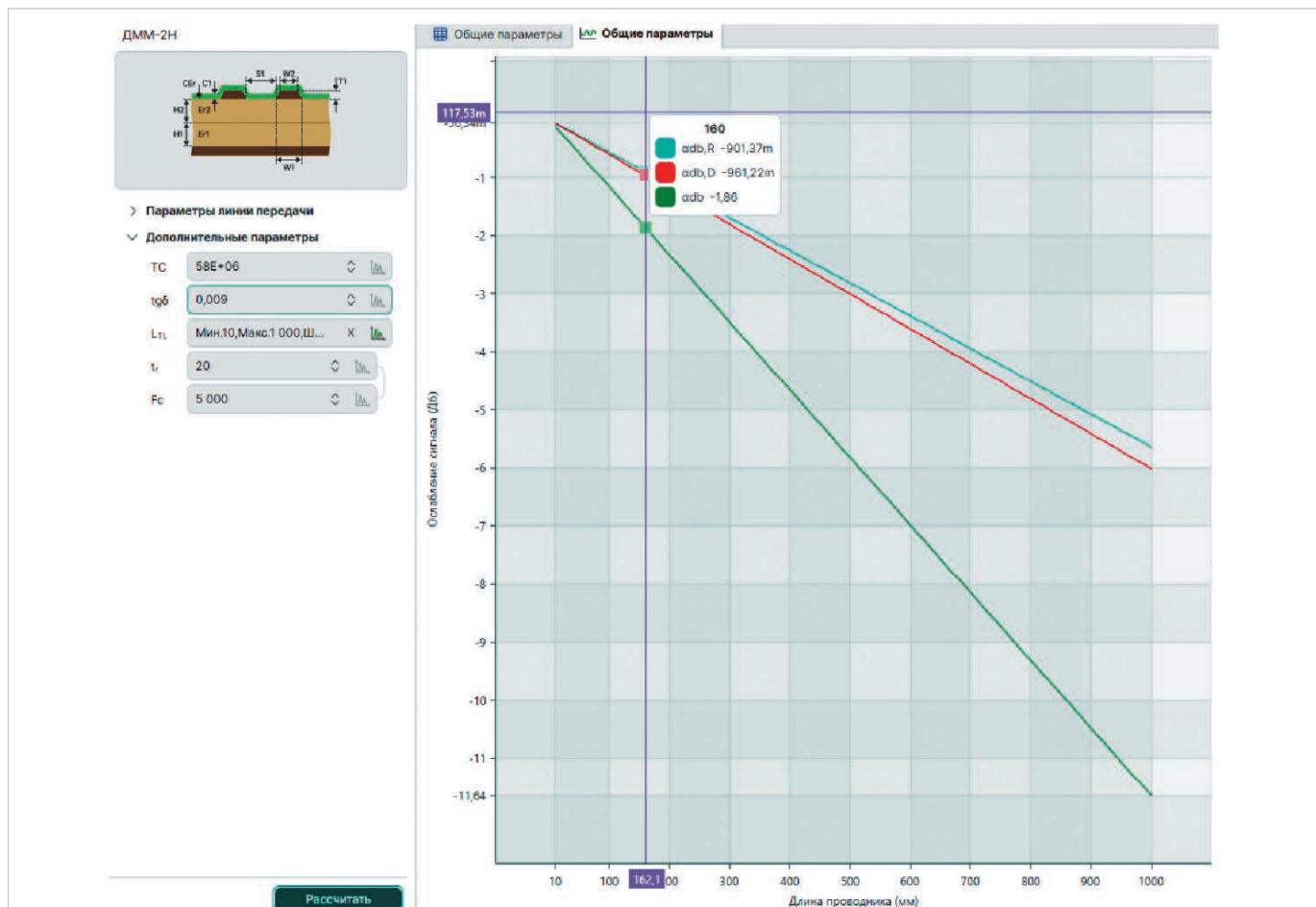


Рис. 11. Зависимость ослабления сигнала от длины линии передачи (TU-872)

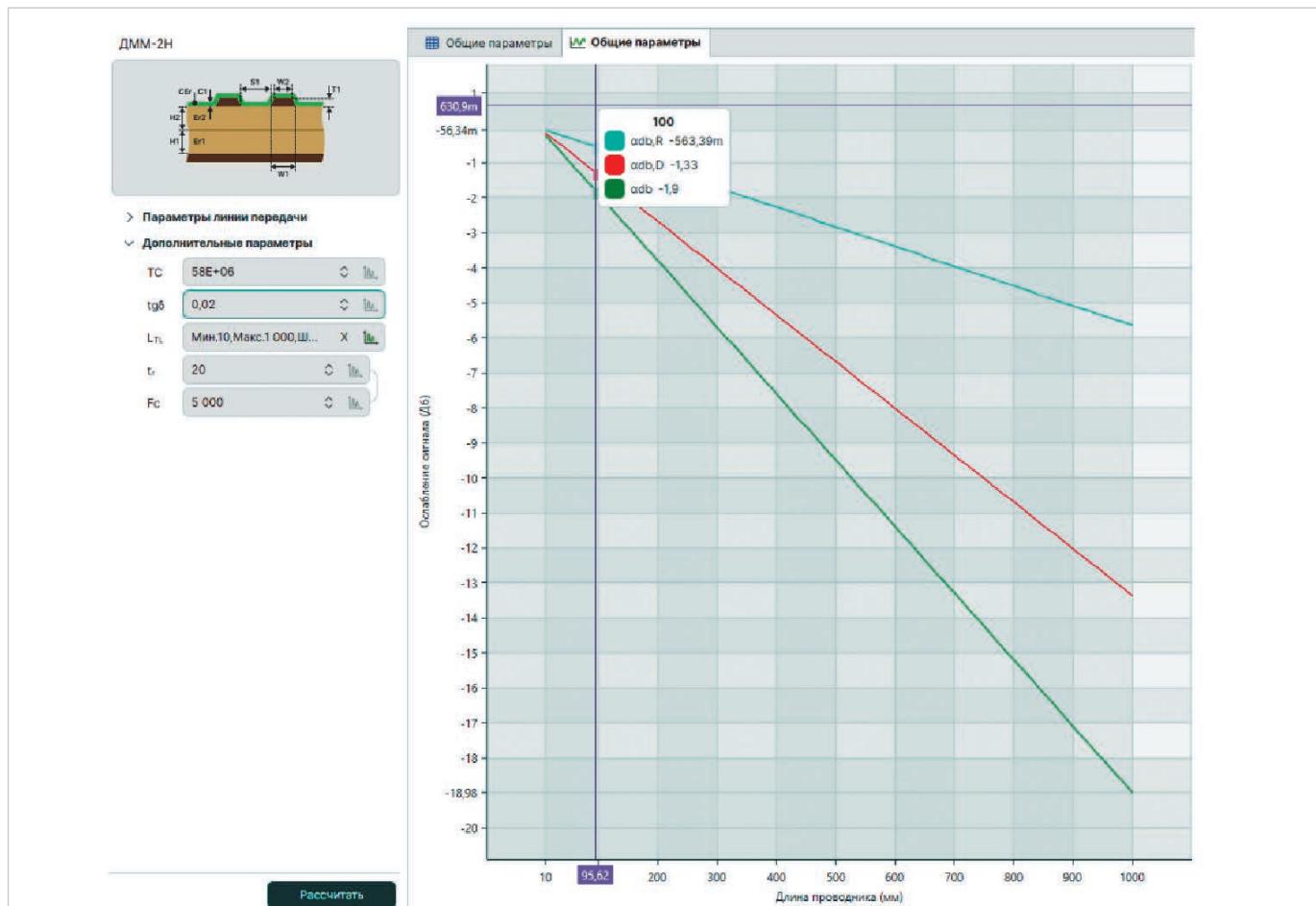


Рис. 12. Зависимость ослабления сигнала от длины линии передачи (FR4)

ная информация позволяет более точно оценить возвратные потери в линии передачи, что важно при построении высокочастотных трактов.

2. Все первичные параметры линии передачи (индуктивность, ёмкость, активное сопротивление, проводимость диэлектрика). Модель линии в этом случае является полной и представляется так, как показано на рис. 2.
3. Ослабление сигнала. Позволяет определить допустимую длину линии передачи.
4. S-коэффициенты линии передачи (возвратные потери и потери непосредственно в линии).

В статье в качестве примера проведём для интерфейса USB 3.1 частотный анализ дифференциальной линии передачи и определим её максимальную допустимую длину на печатной плате. Известно, что скорость передачи данных через данный интерфейс варьируется в диапазоне от 2,5 Гбит/с до 10 Гбит/с. Параметры линии взяты из статьи [1]. На рис. 3 показан её расчёт без учёта потерь.

Максимальное ослабление сигнала при передаче данных по USB 3.1 не должно превышать -23 дБ [2]. При этом схема распределения потерь выглядит так, как показано на рис. 4.

Видно, что суммарное ослабление на печатной плате не должно быть более -8,5 дБ. Исключив потери на компонентах, переходных отверстиях, если таковые имеются, а также паяных соединениях, получим, что максимальное ослабление в дифференциальной линии передачи будет составлять примерно -4 дБ. Формула для расчёта допустимых потерь в линии следующая:

$$A_{max} = -8,5 - A_{via} - A_{comp} - A_{sold},$$

где A_{via} , A_{comp} , A_{sold} – ослабление сигнала в отверстиях, компонентах, паяных соединениях соответственно. Для более точной оценки потерь в линии необходимо использовать информацию из документации на применяемые компоненты.

В соответствии с выражением $A = 10_{log}(P_{вых}/P_{вх})$ получаем, что $P_{вых} = 0,398P_{вх}$. То есть допускается потеря мощности в 60%.

Выполним расчёт параметров дифференциальной пары, представленной выше (рис. 3), в частотном диапазоне от 2,5 ГГц до 10 ГГц с шагом 500 МГц в

программе SimPCB Lite. Результат расчёта показан на рис. 5 и соответствует длине линии в 100 мм.

Рассчитаны все первичные параметры линии (R , L , C , G), волновое сопротивление ($Zdiff$), потери в проводнике $\backslash adb.R$, в диэлектрике $\backslash adb.D$, суммарное ослабление $\backslash adb$.

Волновое сопротивление и индуктивность уменьшаются с увеличением частоты, активное сопротивление, проводимость диэлектрика и потери возрастают, ёмкость остаётся без изменений. Постоянство ёмкости объясняется тем, что диэлектрическая проницаемость применяемого материала практически не изменяется до 10 ГГц.

Оценим ослабление сигнала в зависимости от длины линии передачи для частоты 5 ГГц. Для этого параметр Ll переведём в режим множественного расчёта и зададим для него следующие значения (рис. 6). На рис. 7 представлен результат расчёта. Видно, что ослабление сигнала в -4 дБ соответствует длине линии в 368 мм.

В первом примере используется материал TU-872. Данный материал рекомендуется применять в высокоскоростных устройствах. Однако инженер часто ориентируется на стандартный FR4. Отличия этих двух материалов в диэлектрической проницаемости и тангенсе угла диэлектрических потерь. Для второго материала первый параметр составляет 4,2, а второй – 0,02. Следует отметить, что тангенс угла диэлектрических потерь в значительной степени влияет на ослабление сигнала в диэлектрике. Выполним расчёт, аналогичный представленному выше, но для материала FR4, и оценим максимальную длину линии. Результат расчёта показан на рис. 8. Для материала FR4 максимальная длина линии будет меньше и составит 210 мм.

На ослабление сигнала влияют и потери на отражение. Такие потери можно оценить с помощью S-параметров. Если линия передачи согласована, то отражение должно быть минимальным. Выполним расчёт коэффициента SDD11 на частоте 5 ГГц в зависимости от длины согласованной дифференциальной линии передачи в программе SimPCB Lite. Материал диэлектрика TU-872. Результат расчёта показан на рис. 9. Максимальные потери составляют -25 дБ. Это означает, что менее чем 0,5% мощ-

ности сигнала будет рассеяно. То есть потерями на отражение можно пренебречь.

В качестве примера рассмотрим и несогласованную линию передачи. Для этого изменим сопротивление источника на 10 Ом. График зависимости SDD11 от длины линии передачи на частоте 5 ГГц показан на рис. 10.

Максимальные потери на отражение составляют уже -4 дБ, что соответствует снижению мощности сигнала на входе линии в 40%. То есть допустимое ослабление сигнала уже будет $A = 10_{log}(0,39P_{вх}/0,6P_{вх}) = -1,87$ дБ. В результате длина дифференциальной линии передачи для материала TU-872 составит 162 мм (рис. 11), а для FR4 – 96 мм (рис. 12).

Кроме этого, следует отметить, что при коэффициенте SDD11, равном -4 дБ, возникнет высокая вероятность появления проблем с целостностью сигналов, что может привести к некорректной работе интерфейса [3]. Принимать решение об использовании такой реализации следует только после дополнительного анализа во временной области.

Частотный анализ позволяет инженеру получить два важных первичных параметра линии передачи: активное сопротивление (R) и проводимость диэлектрика (G). R и G являются элементами, от которых зависит ослабление сигнала. Используя суммарные потери (проводник и диэлектрик), можно оценить допустимую длину линии для любой модели линии передачи. Следует помнить, что на ослабление влияет и коэффициент отражения от входа. Если линия согласована, то потерями на отражение можно пренебречь, в противном случае их следует учитывать.

Литература

1. Кухарук В.С., Ухин В.А. Расчёт волнового сопротивления на печатной плате для интерфейса USB 3.1 в САПР SimPCB Lite // Современная электроника. 2025. № 6. С. 18.
2. URL: <https://www.infineon.com/> (дата обращения: 27.08.2025).
3. Кечиев Л.Н. Справочник по расчёту электрической ёмкости, индуктивности и волнового сопротивления в электронной аппаратуре: инженерное пособие. М.: Грифон, 2021. 280 с.