

Расчет перекрестных помех на печатной плате во временной области в программе SimPCB Lite

В. Ухин¹, В. Кухарук², Д. Коломенский³, В. Дворников⁴

УДК 004.31 | ВАК 2.2.2

С перекрестными помехами сталкивается практически любой инженер, проектирующий электронное устройство на печатной плате. Данное физическое явление приводит к тому, что сигналы могут сильно искажаться и неверно считываться приемной микросхемой (устройством). Проблема перекрестных помех может стать критичной, когда речь заходит о высокоскоростной или высокочастотной аппаратуре. Расчет и контроль перекрестных помех – одна из задач обеспечения целостности сигналов на печатной плате. В статье рассмотрен способ вычисления помех во временной области через S-параметры, который реализован в САПР SimPCB Lite.

Часто о перекрестных помехах вспоминают, когда устройство уже собрано, и последствия их игнорирования при проектировании видны на экране измерительной аппаратуры. Пример воздействия помехи от скоростного сигнала с амплитудой 3,3 В на менее скоростной с амплитудой 1,2 В представлен на рис. 1.

В инженерной практике так сложилось, что оценка помех выполняется редко и на весьма примитивном уровне. Иногда для трасс, по которым распространяются чувствительные сигналы, применяют рекомендации, изложенные в материалах по проектированию печатных плат. Например, в инженерном пособии [1] указано, что расстояние между проводниками должно составлять не менее чем три ширины проводника. При этом забывают про длину параллельных участков, частоту, фронт сигнала, модель линии передачи. На рис. 2 и 3 показаны помехи на дальнем конце линии, когда расстояние до проводника-агрессора составляет три ширины проводника. Видно, что уровень помехи разный, поэтому полностью полагаться на информацию из технической литературы неправильно.

Так почему же инженер не выполняет расчет? Причин может быть несколько. Вот некоторые из них:

- разработчик не знаком с простым и удобным программным обеспечением, позволяющим быстро выполнить оценку перекрестных помех;

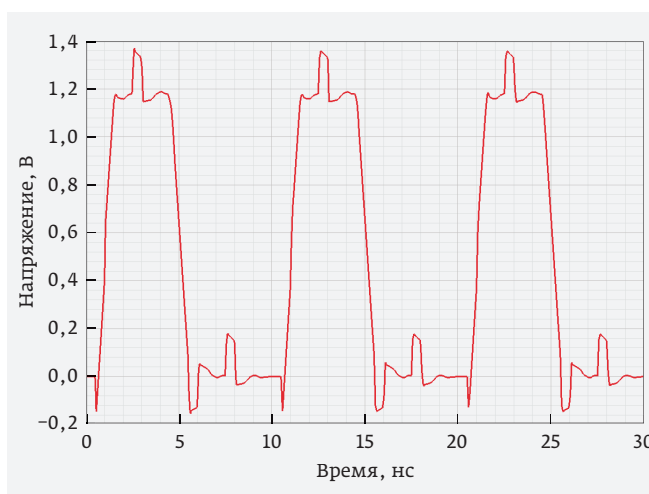


Рис. 1. Пример сигнала после воздействия помехи

- не понятны математика расчета, а также подходы и методы.

Цель данной статьи – знакомство разработчиков печатных плат с математическим аппаратом и методикой расчета перекрестных помех во временной области, реализованными в программе SimPCB Lite от компании «ЭРЕМЕКС».

Перекрестные помехи возникают из-за попадания проводника в поле другого топологического примитива (рис. 4) [1, 4]. Чем сильнее связь между проводниками, тем выше уровень помехи. Сила связи зависит от взаимной емкости и взаимной индуктивности. Уменьшить помеху возможно путем замены типа

¹ ООО «ЭРЕМЕКС», инженер по продукту.

² ООО «ЭРЕМЕКС», инженер по продукту.

³ ООО «ЭРЕМЕКС», инженер по продукту.

⁴ ООО «ЭРЕМЕКС», инженер по продукту.

линии передачи (например, микрополосковую линию можно изменить на полосковую), увеличения расстояния между проводниками, размещения защитных трасс и т.д. Фактически, все эти способы направлены на вывод линии-жертвы из поля линии-агрессора. Точно оценить эффект от применения того или иного способа повышения помехоустойчивости возможно только с помощью специального расчета. Такой расчет позволяет выполнить программа SimPCB Lite, причем как в частотной области, так и во временной. В данной статье основное внимание уделим временному анализу.

В программе SimPCB Lite расчет перекрестных помех во временной области осуществляется через S-параметры. Именно такой способ вычисления реализован практически во всех известных программах анализа целостности сигналов. Рассмотрим его более подробно.

Для того чтобы появились перекрестные помехи, необходимы как минимум две связанные линии. Эти линии можно представить в виде четырехпортовой системы (рис. 5). На рис. 5 через $V1_{вх}$, $V2_{вх}$, $V3_{вх}$, $V4_{вх}$, $V1_{вых}$, $V2_{вых}$, $V3_{вых}$, $V4_{вых}$ обозначены напряжения падающих и отраженных волн соответственно.

S-коэффициенты и напряжения для двух линий связаны следующим выражением:

$$\begin{pmatrix} S11 & S12 & S13 & S14 \\ S21 & S22 & S23 & S24 \\ S31 & S32 & S33 & S34 \\ S41 & S42 & S43 & S44 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V1_{вх} \\ V2_{вх} \\ V3_{вх} \\ V4_{вх} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V1_{вых} \\ V2_{вых} \\ V3_{вых} \\ V4_{вых} \end{pmatrix}.$$

Если, например, сигнал присутствует только на входе нижней линии (порт 3), то выражение, представленное выше, будет выглядеть так:

$$\begin{pmatrix} S11 & S12 & S13 & S14 \\ S21 & S22 & S23 & S24 \\ S31 & S32 & S33 & S34 \\ S41 & S42 & S43 & S44 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ V3_{вх} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V1_{вых} \\ V2_{вых} \\ V3_{вых} \\ V4_{вых} \end{pmatrix}.$$

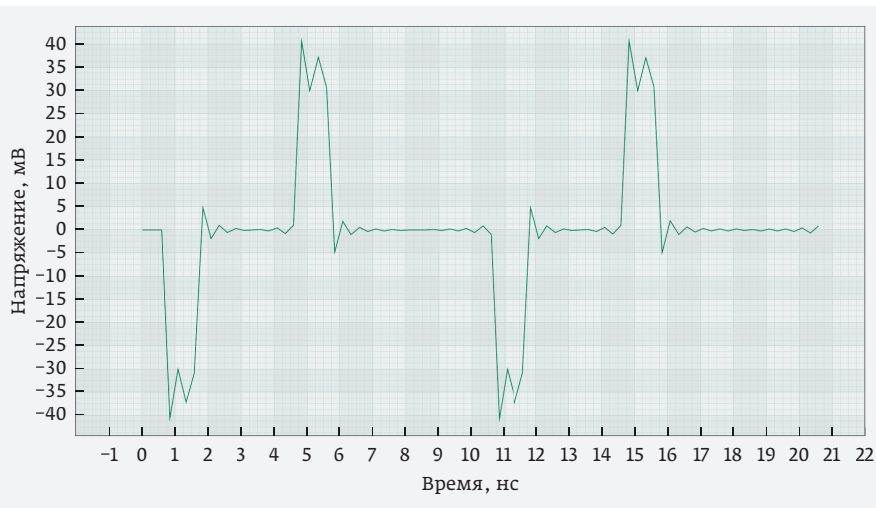


Рис. 2. Помеха на дальнем конце линии (фронт сигнала-агрессора – 1 нс)

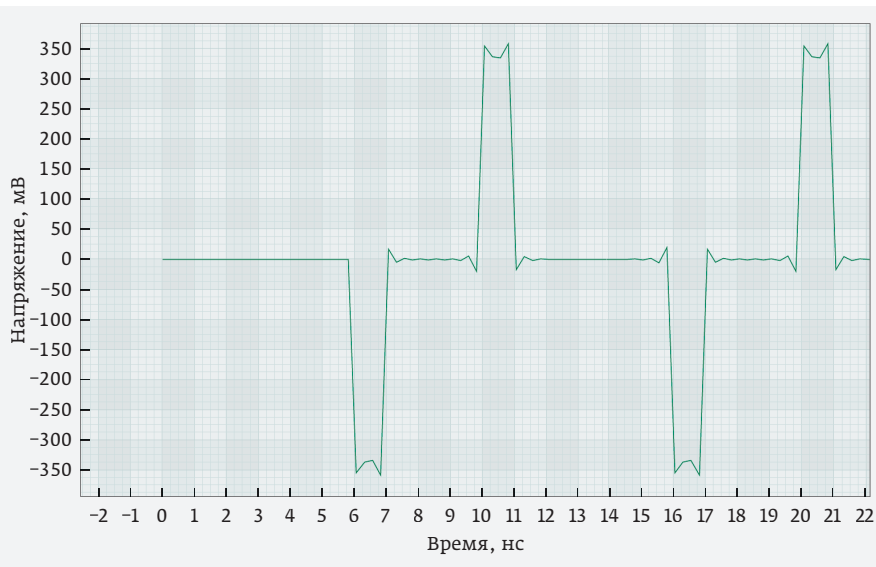


Рис. 3. Помеха на дальнем конце линии (фронт сигнала-агрессора – 100 пс)

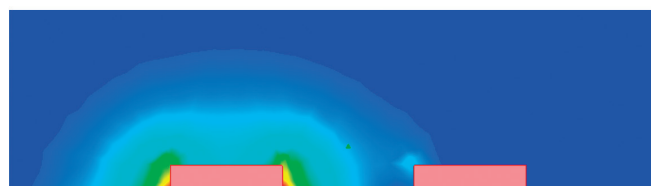


Рис. 4. Проводник в поле соседнего проводника

Понятно, что линией передачи, которая принимает помеху, в данном случае является верхняя. Инженер увидит возмущение на первом и втором порте. При этом ближний конец – порт 1, дальний – порт 2. Тогда $U_{next} = V1_{вых}$ и $U_{fext} = V2_{вых}$, где U_{next} и U_{fext} – напряжение помехи на ближнем и дальнем конце линии соответственно.

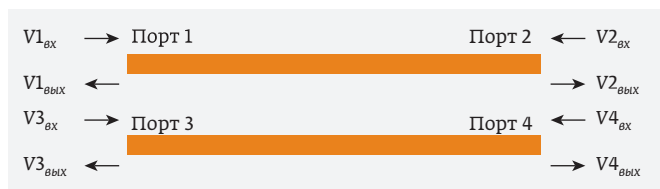


Рис. 5. Две линии передачи в виде четырехпортовой системы

Используя связь S -коэффициентов и входных напряжений, получим $U_{\text{next}} = V1_{\text{вых}} = S13 \cdot V3_{\text{вх}}$ и $U_{\text{fext}} = V2_{\text{вых}} = S23 \cdot V3_{\text{вх}}$. Если $V3_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$, то перекрестная помеха на ближнем и дальнем конце линии передачи будет соответствовать значениям S -коэффициентов, то есть $U_{\text{next}} = V1_{\text{вых}} = S13 \cdot V3_{\text{вх}}$ и $U_{\text{fext}} = V2_{\text{вых}} = S23$.

В случае, когда на входе линии-жертвы присутствует полезный сигнал, связь S -коэффициентов и напряжений примет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} S11 & S12 & S13 & S14 \\ S21 & S22 & S23 & S24 \\ S31 & S32 & S33 & S34 \\ S41 & S42 & S43 & S44 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V1_{\text{вх}} \\ 0 \\ V3_{\text{вх}} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V1_{\text{вых}} \\ V2_{\text{вых}} \\ V3_{\text{вых}} \\ V4_{\text{вых}} \end{pmatrix}$$

Перекрестная помеха на ближнем конце в этом случае будет входить в состав отраженного сигнала, а на дальнем – в состав сигнала, выходящего из линии:

$$U_{\text{next}} = V1_{\text{вых}} = S13 \cdot V3_{\text{вх}} + S11 \cdot V1_{\text{вх}}$$

$$U_{\text{fext}} = V2_{\text{вых}} = S23 \cdot V3_{\text{вх}} + S21 \cdot V1_{\text{вх}}$$

Видно, что ключевыми элементами в формулах являются S -коэффициенты. Рассчитываются они по известным формулам, широко представленным в литературе.

Важной составляющей этих формул является матрица ABCD-параметров, представленная ниже:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\gamma \cdot l) & Z0 \cdot \sinh(\gamma \cdot l) \\ \sinh(\gamma \cdot l)/Z0 & \cosh(\gamma \cdot l) \end{pmatrix}$$

где l – длина линии передачи; $Z0$ – волновое сопротивление; γ – постоянная распространения, вычисляемая по формуле:

$$\gamma = \sqrt{(R + i \cdot \omega \cdot L) \cdot (G + i \cdot \omega \cdot C)}$$

где R, L, C, G – матрицы первичных параметров линий передачи, вычисляемые численным методом [2], а именно, методом граничных элементов; i – мнимая единица; ω – круговая частота.

Расчет перекрестных помех во временной области в SimPCB Lite осуществляется без учета потерь также, как и в большинстве других программ обеспечения целостности сигналов (Polar SI9000, HyperLynx). Это означает, что для вычисления помех требуются матрицы не всех первичных параметров линий передачи, а всего двух – емкости и индуктивности. Потери из расчета исключаются по нескольким причинам, а именно:

- рассматривается наихудший случай, то есть помеха будет немного завышена, а инженер получает результат с подстраховкой;
- применяется только электростатический solver, в результате все вычисления выполняются намного быстрее.

Следует отметить, что поскольку каждое значение S -коэффициента соответствует определенному значению частоты, SimPCB Lite позволяет рассчитывать помехи в частотной области [3].

Рассмотрим пример расчета перекрестных помех в частотной области для линии передачи с параметрами, представленными на рис. 6. Результаты расчета перекрестных помех на дальнем и ближнем концах в частотном диапазоне от 100 МГц до 2 ГГц показаны на рис. 7.

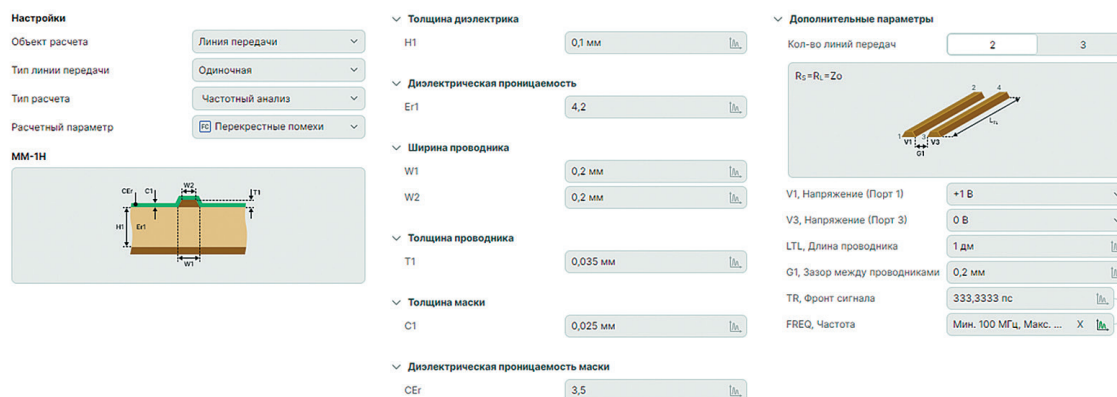


Рис. 6. Параметры линии передачи для частотного анализа

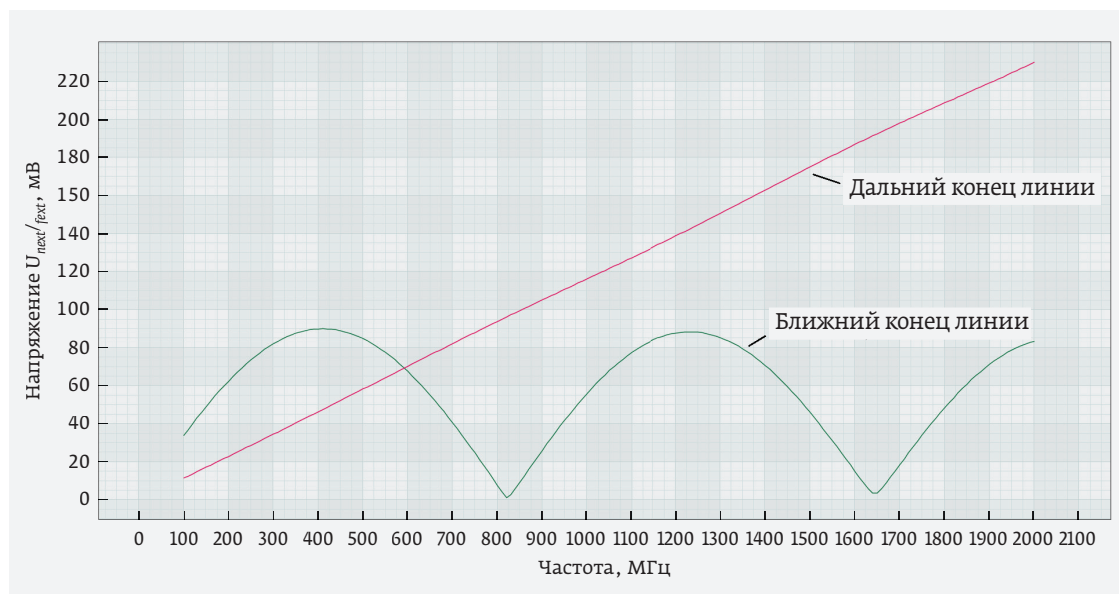
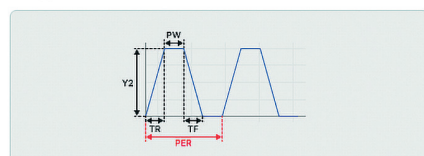


Рис. 7.
Перекрестная
помеха
в зависимости
от частоты

Сигнал



Y2, Амплитуда	3,3 В
TR, Передний фронт	11,5 нс
TF, Задний фронт	11,5 нс
PW, Плоская часть импульса	30 нс
PER, Период повторения	100 нс

Рис. 8.
Входной
сигнал
для расчета
перекрестных
помех

Для вычисления перекрестных помех во временной области необходимо задать входной сигнал. Пусть это будет цифровой сигнал с параметрами, показанными на рис. 8. Первое, что необходимо сделать, – это оценить его спектр. Частоту дискретизации примем равной 340 МГц, что соответствует примерно четырем отсчетам на фронт сигнала. Спектр будет выглядеть так, как показано на рис. 9.

Далее для каждой частотной составляющей вычисляются S-коэффициенты. Причем такие, которые определяют помеху на ближнем и дальнем концах линии

передачи. Если рассматривать пример, приведенный выше, то это будут коэффициенты S13 и S23. Полученный результат (S13, S23) умножается на амплитуды частот в спектре начального сигнала. После этого применяется обратное преобразование Фурье, то есть помеха переводится во временную область.

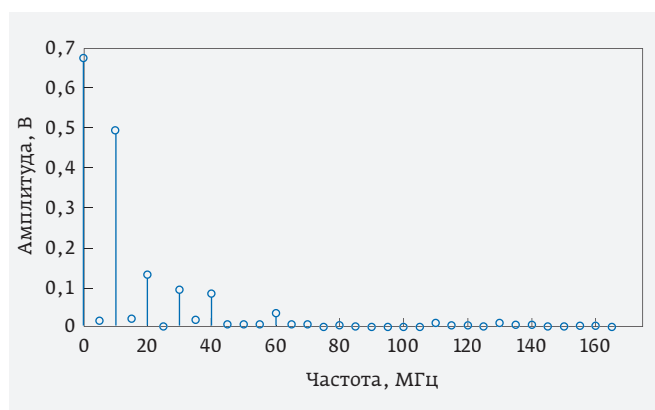


Рис. 9. Спектр входного сигнала

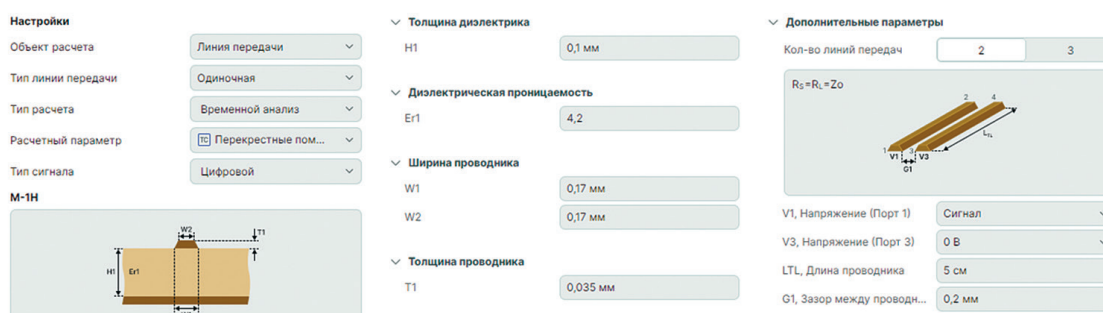
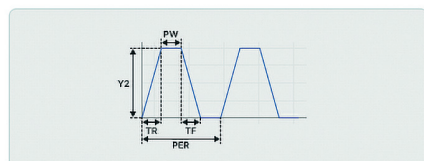


Рис. 10.
Модель линии
передачи
для расчета
перекрестных
помех
во временной
области

Сигнал



Y2, Амплитуда	3,3 В
TR, Передний фронт	1 нс
TF, Задний фронт	1 нс
PW, Плоская часть импул...	3 нс
PER, Период повторения	10 нс

Рис. 11.
Входной
сигнал

Приведем пример расчета в SimPCB Lite перекрестных помех во временной области. Пусть на вход линии передачи (рис. 10) подан цифровой сигнал с параметрами, показанными на рис. 11. Результат расчета представлен на рис. 12.

Сравним полученный результат с другими программами. «Легкие» инструменты анализа, такие как Polar SI9000, не позволяют выполнять временной анализ перекрестных помех, поэтому аналогичный расчет с такими же входными данными выполним в Ansys. Результат расчета представлен на рис. 13.

Сравнивая рис. 12 и 13, можно увидеть, что результаты практически совпадают, погрешность не превышает 10%. Отсутствие всплесков в пиках помехи на дальнем конце линии передачи объясняется применением в Ansys сетки с меньшим шагом и более высоким частотным разрешением при вычислении S-коэффициентов.

Таким образом, применяемый в SimPCB Lite математический аппарат позволяет достаточно точно оценивать перекрестные помехи во временной области. Качество расчета практически не уступает «тяжелым» программам, а время вычисления и создания модели существенно меньше.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кечиев Л.Н.** Справочник по расчету электрической емкости, индуктивности и волнового сопротивления в электронной аппаратуре: инженерное пособие. М.: Грифон, 2021. 280 с.

2. **Ухин В.А., Кухарук В.С., Коломенский Д.С., Смирнова О.В.** Методы расчета волнового сопротивления линий передач на печатных платах // Современная электроника. 2023. № 9. С. 40–42.
3. **Кухарук В.С., Ухин В.А., Коломенский Д.С., Смирнова О.В.** Сравнение результатов расчетов волнового сопротивления линий передач на печатных платах // Современная электроника. 2023. № 9. С. 43–45.
4. **Ухин В.А., Кухарук В.С.** Метод расчета перекрестных помех через S-параметры // Современная электроника. 2026. № 3. С. 4–6.

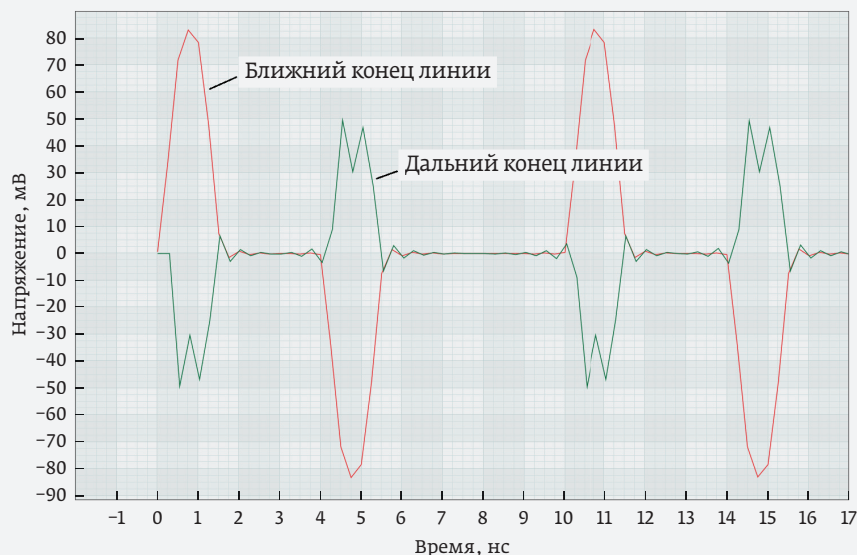


Рис. 12. Перекрестная помеха на ближнем и дальнем концах линии передачи (SimPCB Lite)



Рис. 13. Перекрестная помеха на ближнем и дальнем концах линии передачи (Ansys)