

Частотный анализ линий передачи в САПР SimPCB Lite

В. Ухин¹, В. Кухарук²

УДК 004.31 | ВАК 2.2.2

В условиях ограничений на использование зарубежных САПР у российских разработчиков растет интерес к отечественным программным продуктам. Один из ведущих разработчиков программного обеспечения для автоматизации проектирования радиоэлектронной аппаратуры, компания «Эремекс», недавно анонсировал САПР SimPCB Lite, которая позволяет решать целый ряд задач, направленных на обеспечение целостности сигналов в высокоскоростных цифровых и снижение потерь в высокочастотных аналоговых устройствах, реализованных на печатных платах. В статье рассматриваются математические и физические основы расчета параметров линий передачи в зависимости от частоты, реализованного в SimPCB Lite. Приводится сравнение результатов вычислений, полученных с помощью SimPCB Lite и в программе Ansys.

При проектировании высокоскоростных или высокочастотных устройств разработчики сталкиваются с необходимостью вычисления волнового сопротивления линий передачи – как одиночных, так и дифференциальных. Импеданс должен соответствовать значению, указанному в описании к микросхеме либо в стандарте передачи данных. Чаще всего эти значения составляют 40–50 Ом или 80–100 Ом.

Определяя импеданс линии или ее геометрические, электрофизические параметры при заданном значении волнового сопротивления, инженер, как правило, использует расчет без учета потерь. В этом случае модель линии передачи представляется так, как показано на рис. 1 [1].

Характеристики такой линии определяются двумя параметрами – емкостью (C) и индуктивностью (L) [1]. При этом емкость – результат решения электростатической задачи. Импеданс вычисляется через емкость линии передачи в реальной среде и в воздушной. Индуктивность определяется через соотношение:

$$L = C \cdot Z^2. \quad (1)$$

Более подробное описание расчета без учета потерь представлено в статье [2]. В САПР SimPCB его реализация была выполнена год назад.

Модель линии передачи без учета потерь (см. рис. 1) позволяет оценить волновое сопротивление, емкость

и индуктивность, но в то же время является неполной. В результате невозможно проанализировать линию в частотной области, что особенно важно при проектировании высокочастотной аппаратуры. Модель, которая учитывает все параметры линии передачи, показана на рис. 2 [1].

В этой модели дополнительно присутствуют параметры: R – активное сопротивление, G – проводимость диэлектрика. Параметры L, R, G зависят от частоты. Импеданс для такой линии вычисляется по формуле:

$$Z = \sqrt{(R + i\omega L) / (G + i\omega C)}, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$, f – частота сигнала, i – мнимая единица.

Для частотного анализа необходимо выполнить расчеты параметров электрического и магнитного полей переменного тока. С помощью первого определяются параметры C и G, второго – L и R. В САПР SimPCB Lite реализован частотный анализ линий передачи.

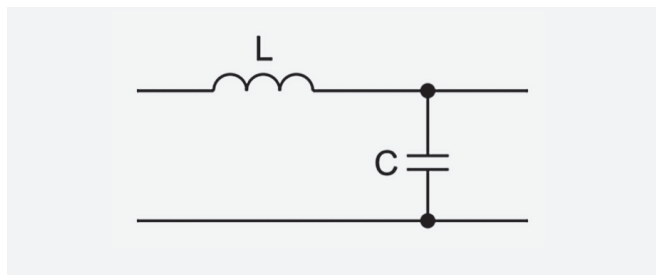


Рис. 1. Модель линии передачи без потерь

¹ Компания «Эремекс».

² Компания «Эремекс».

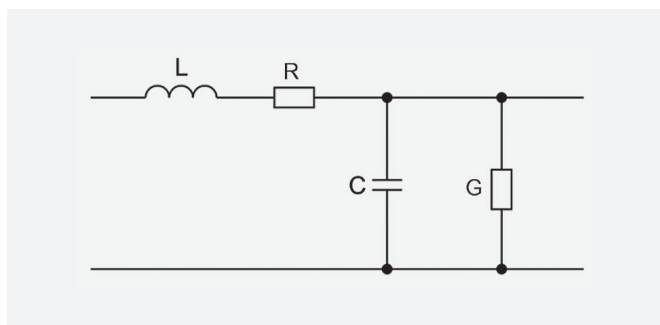


Рис. 2. Модель линии передачи с учетом потерь

Для компании «Эремекс» важно информировать пользователей, в том числе потенциальных, о методах вычислений, заложенных в САПР, поэтому ниже представлено краткое описание физических и математических основ частотного анализа, реализованного в САПР SimPCB Lite.

Для расчета параметра G диэлектрическая проницаемость представляется, как комплексное число:

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'', \quad (3)$$

где ε' – действительная часть (значение, которое вводится при расчете), ε'' – мнимая часть.

Вводится переменная – тангенс угла диэлектрических потерь. Эта величина характерна для конкретного материала печатной платы:

$$\operatorname{tg} \delta = \varepsilon'' / \varepsilon'. \quad (4)$$

Проводимость диэлектрика можно вычислить через тангенс угла потерь по известному соотношению:

$$G = \omega \varepsilon_0 \varepsilon' \operatorname{tg} \delta, \quad (5)$$

где ε_0 – электрическая постоянная.

В этом случае уравнение для электрического потенциала будет иметь вид:

$$\nabla([\varepsilon' - iG/\omega] \nabla U) = 0. \quad (6)$$

Используя численные методы (метод граничных элементов) и представленное выше выражение, вычисляется отношение заряда системы к потенциалу. Результат вычисления – комплексное число:

$$C - iG/\omega = Q/V, \quad (7)$$

где Q – заряд системы, V – разность потенциалов, C – емкость линии передачи.

В итоге получим:

$$G = -\omega \operatorname{Im}(Q/V), \quad (8)$$

Таким образом, с помощью решателя переменного электрического поля вычисляются два параметра – C и G . При этом емкость не зависит от частоты при условии, что диэлектрическая проницаемость постоянна в широком диапазоне частот.

Параметры L и R зависят от частоты. Индуктивность и активное сопротивление рассчитываются через магнитное поле переменного тока.

Основное уравнение выглядит следующим образом:

$$\partial/\partial x(1/\mu \cdot \partial A/\partial x) + \partial/\partial y(1/\mu \cdot \partial A/\partial y) - i\omega g A = -j_0, \quad (9)$$

где A – вектор магнитного потенциала, g – электропроводность, в нашем случае это электропроводность меди, которая составляет $58 \cdot 10^6$ См/м, ω – угловая частота, равная $2\pi f$, j_0 – плотность тока в конкретной точке, μ – магнитная проницаемость, равная единице.

Для вычисления энергии магнитного поля необходимо рассчитать магнитную индукцию и напряженность магнитного поля.

Магнитная индукция вычисляется по формуле:

$$B_x = \partial A/\partial y, B_y = \partial A/\partial x. \quad (10)$$

Используя формулу (10), определяем напряженность поля:

$$H = B/(\mu_0 \mu). \quad (11)$$

Энергия магнитного поля в ячейке определяется через выражение:

$$W = 1/2 \int (H \cdot B) dS, \quad (12)$$

где S – площадь рассчитываемой области. Размер области определяется так же, как и при решении электростатической задачи [2].

Индуктивность линии передачи на единицу длины можно определить через энергию по формуле:

$$L = 2W/I^2, \quad (13)$$

где I – сила тока в проводнике. Ток задается равным 1 А.

Активное сопротивление рассчитывается через ток (I_r), возникающий на конкретной частоте. Значение тока легко вычисляется через магнитный солвер.

Далее определяется разность потенциалов на проводнике через соотношение:



Рис. 3. Модель микрополосковой линии передачи

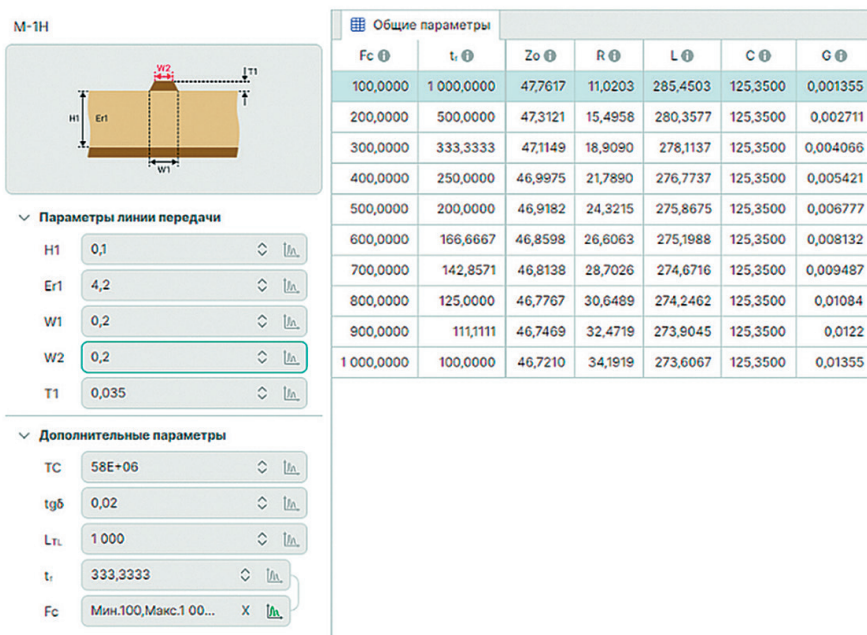


Рис. 4. Модель линии и результаты вычислений в SimPCB Lite



Рис. 5. Модель линии и результаты вычислений в Ansys 2D Extractor

$$U = I/gS, \quad (14)$$

где $I = 1$ А, g – электропроводность, S – площадь поперечного сечения проводника.

В результате получим:

$$R = Re(U/Ir).$$

Магнитная задача решается, как и электрическая, с применением метода граничных элементов. Пример модели микрополосковой линии передачи, сформированной в солвере, представлен на рис. 3.

Результаты вычислений САПР SimPCB Lite сравнивались с другими подобными программами. Так на рис. 4 показаны значения первичных и вторичных параметров в диапазоне от 100 МГц до 1 ГГц, полученные в SimPCB Lite, а на рис. 5 – полученные в Ansys 2D Extractor для микрополосковой линии передачи без маски [3].

Частотный анализ линий передачи в САПР SimPCB Lite реализован с применением численных методов (граничных элементов). Аналогичные методы применяются и в других подобных программах, таких как Ansys, Polar SI9000. Точность вычислений, как видно из полученных результатов, достаточно высокая и не уступает зарубежным САПР. Таким образом, разработчик может эффективно использовать SimPCB Lite для решения задач, возникающих в процессе проектирования высокоскоростных и высокочастотных устройств на основе печатных плат.

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., Коломенский Д.С., Кухарук В.С., Смирнова О.В. Методы расчета волнового сопротивления линий передач на печатных платах // Современная электроника. 2023. № 9. С. 40–42.
3. Ansys 2D Extractor Help.