

УДК 621.37

Р.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, П.Е. Орлов

Локализация максимумов сигнала в многопроводных линиях передачи печатных плат с помощью системы TALGAT

Представлены выражения для совершенствования вычисления временного отклика в системе TALGAT, позволяющие получить значения токов и напряжений вдоль любого проводника каждого отрезка многопроводной линии передачи с помощью квазистатического анализа. Результаты динамически отображаются и используются для нахождения максимальных значений токов и напряжений и их последующей локализации. Приведены результаты реализации и верификации усовершенствованного вычисления.

Ключевые слова: меандровая линия, квазистатический анализ, электромагнитная совместимость, информационная безопасность.

Анализ и визуализация параметров сигнала в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) широко используются в современных системах компьютерного моделирования, поскольку это позволяет лучше оценить процессы, происходящие в объекте, примером которого является сложная печатная плата с высокой плотностью трассировки межсоединений. Как правило, отображаются цветом токи и напряжения при гармоническом воздействии на заданной частоте. При импульсном воздействии отображение затруднено и требует более сложных подходов. Между тем всё более широкое распространение цифровых сигналов, а также всевозможные воздействия самых разных форм помеховых сигналов, распространяющихся в реальной аппаратуре, а значит, требующих соответствующего имитационного моделирования, делают актуальной их визуализацию во временной области. В печатных платах с большими размерами и плотностью трассировки использование визуализации позволит выявить и локализовать места возможных паразитных взаимовлияний, излучений и восприимчивости, чтобы своевременно принять меры по их устранению для обеспечения электромагнитной совместимости и информационной безопасности. Другим применением может быть определение мест установки датчиков контроля полезных сигналов или мониторинга помеховых сигналов, обеспечивающих требуемую чувствительность, что также важно для повышения помехозащищенности и надежности РЭА. Наконец, реализация указанной возможности может оказаться полезной и для исследования особенностей распространения импульсных сигналов в СВЧ-устройствах на основе сложных многосвязных полосковых структур [1].

Для анализа межсоединений печатных плат широко используют квазистатический подход. Теоретические основы квазистатического вычисления отклика для произвольной схемы из отрезков многопроводных линий передачи (МПЛП) описаны в работах [2, 3]. На основе данной теории разработаны алгоритмы вычисления временного отклика [4], которые позволяют выполнить вычисления значений токов и напряжений только в узлах схемы. Представлены первые результаты по реализации в системе TALGAT [9] вычисления токов [5, 6] вдоль каждого проводника межсоединения печатной платы, а также напряженности создаваемого электрического поля [7]. Однако основные выражения и алгоритм, позволяющие вычислить значения тока и напряжения в заданной координате вдоль каждого проводника отрезка МПЛП для произвольной схемы, не описаны.

Целью данной работы является усовершенствование алгоритма вычисления токов и напряжений в системе TALGAT для их динамической визуализации, а также для обнаружения, локализации и отображения максимумов напряжений и токов.

Для вычисления откликов в TALGAT используется алгоритм, описанный в работе [5]. Он сводится к решению уравнения в частотной области для схемы из n отрезков МПЛП с сосредоточенными элементами на концах отрезков:

$$\mathbf{V}(s) = \left(s\mathbf{W} + \mathbf{H} + \sum_{k=1}^n \mathbf{D}_k \mathbf{Y}(s)_k \mathbf{D}_k^t \right)^{-1} \mathbf{E}(s), \quad (1)$$

где $s = j\omega$, ω – угловая частота; \mathbf{W} , \mathbf{H} – матрицы размера $A \times A$, описывающие произвольные оконечные и соединительные схемы из активных и реактивных элементов (A – количество параметров,

вычисляемых в модифицированном методе узловых потенциалов); \mathbf{D}_k – матрица-селектор, отображающая токи, входящие в k -ю линию, с элементами $d_{i,j} \in \{0, 1\}$, где $i \in \{1, \dots, N_k\}$, $j \in \{1, \dots, m_k\}$ с одним ненулевым значением в каждом столбце, $m_k = 2 \cdot N_k$ – количество токов, входящих в k -ю линию, где N_k – число проводников k -й линии; $\mathbf{Y}(s)_k$ – матрица проводимостей для k -й линии; $\mathbf{V}(s)$ – вектор узловых напряжений; $\mathbf{E}(s)$ – вектор, состоящий из независимых источников напряжения или токов.

Однако уравнение (1) позволяет вычислять отклик только в узлах цепи. Поэтому для вычисления значений напряжения и тока вдоль линии передачи, используются уравнения [2]:

$$\mathbf{V}(x) = \mathbf{S}_V(\mathbf{E}(x)\mathbf{C1} + \mathbf{E}(x)^{-1}\mathbf{C2}), \quad (2)$$

$$\mathbf{I}(x) = \mathbf{S}_I(\mathbf{E}(x)\mathbf{C1} - \mathbf{E}(x)^{-1}\mathbf{C2}), \quad (3)$$

где \mathbf{S}_V – матрица модальных напряжений; \mathbf{S}_I – матрица модальных токов; $\mathbf{E}(x)$ – диагональная матрица $\{\exp(-\gamma_1 x), \exp(-\gamma_2 x), \dots, \exp(-\gamma_{N_k} x)\}$ и γ_{N_k} – коэффициенты распространения линии передачи; x – координата вдоль линии передачи; $\mathbf{C1}$, $\mathbf{C2}$ – векторы констант. Вычисление значений матриц \mathbf{S}_I , \mathbf{S}_V , $\mathbf{E}(x)$ описано в [4]. Однако чтобы найти $\mathbf{V}(x)$ и $\mathbf{I}(x)$ для каждого значения координаты x вдоль отрезка линии передачи в цепи, необходимо вычислить $\mathbf{C1}$ и $\mathbf{C2}$ как

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C1} \\ \mathbf{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_V & \mathbf{S}_V \\ \mathbf{S}_V \mathbf{E}(l) & \mathbf{S}_V [\mathbf{E}(l)]^{-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{V}(l) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $\mathbf{E}(l)$ – диагональная матрица $\{\exp(-\gamma_1 l), \exp(-\gamma_2 l), \dots, \exp(-\gamma_{N_k} l)\}$ и l – длина линии; $\mathbf{V}(0)$ и $\mathbf{V}(l)$ – векторы констант, описывающие напряжение на концах линии передачи, полученные после решения уравнения (1).

В результате совершенствования алгоритма вычисления временного отклика с помощью выражений (2)–(4) в TALGAT появилась возможность вычислять формы напряжений и токов вдоль проводников каждого отрезка МПЛП. Для визуального отображения изменения форм сигнала в TALGAT создается принципиальная схема. На ней необходимо указать начальный узел А и конечный узел В. После этого путь распространения импульса определяется автоматически, используя алгоритм GoThrough [8, 9]. При этом проводник отрезка МПЛП, по которому распространяется сигнал, окрашивается в цвет, соответствующий форме сигнала. Далее по вычисленным формам сигнала определяются максимальные значения токов и напряжений. В результате отображается информация о расположении локализованных максимумов.

Демонстрация работы алгоритма выполнима на примере любой сложности, но для оценки достоверности результатов желательна ясная физическая интерпретация полученного результата, которая возможна только на относительно простой структуре. Примером такой структуры является меандровая линия: процессы в ней довольно хорошо исследованы, но в многовитковых линиях при сильной связи между проводниками могут наблюдаться мало изученные эффекты. Поэтому рассмотрена микрополосковая меандровая линия из двух витков, включенная в тракт 50 Ом, с длиной полувитков по 27 мм (рис. 1), поперечное сечение которой изображено на рис. 2. Ширина проводника – 0,542 мм, толщина проводника – 0,1 мм, ширина диэлектрика – 5,149 мм, толщина диэлектрика – 0,3 мм, расстояние между проводниками – 0,217 мм. Вычислено по 50 форм напряжений вдоль каждого полувитка меандровой линии, 6 из которых (через каждый полувиток) показаны на рис. 3. Видно, что форма сигнала существенно искажается перекрестными наводками в полувитках линии, несмотря на то, что потери в проводниках и диэлектрике полагаются отсутствующими. Примечательно, что максимальное напряжение равно 0,57 В (график 3_4(46)), что в 1,14 раза больше максимального напряжения в узле 2. Это локализованный максимум: он находится в 46-м сегменте (указан стрелкой) второго проводника отрезка линии (между узлами 3 и 4). Обращают на себя внимание и значительные отрицательные выбросы на сигналах.

Для верификации квазистатического моделирования системой TALGAT выполнено электродинамическое моделирование системой CST MWS [10] при прочих равных условиях (рис. 4). Сравнение форм напряжений в точке локализованного максимума показывает хорошее согласование основной формы импульса. Более ранний приход сигнала, полученного в TALGAT, вызван неучетом задержки в перемычке, соединяющей первый и второй полувитки. Для более точного учета реальной структуры проведено еще одно моделирование в TALGAT со схемой, в которой вместо трёх перемычек между полувитками включены соответствующие отрезки одиночной линии с такими же параметрами, как у меандровой. Как видно из рис. 4, основные формы импульса практически полностью совпадают. Кроме того, улучшилось совпадение и отражений.

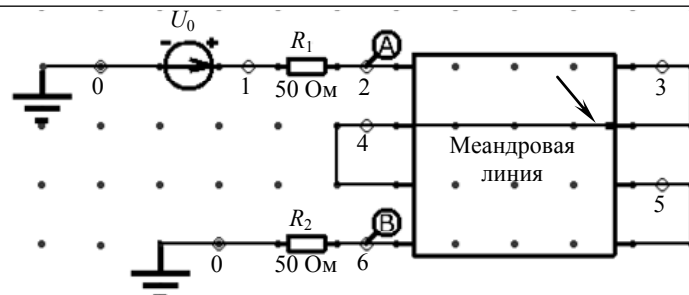


Рис. 1. Схема включения меандровой линии



Рис. 2. Поперечное сечение меандровой линии

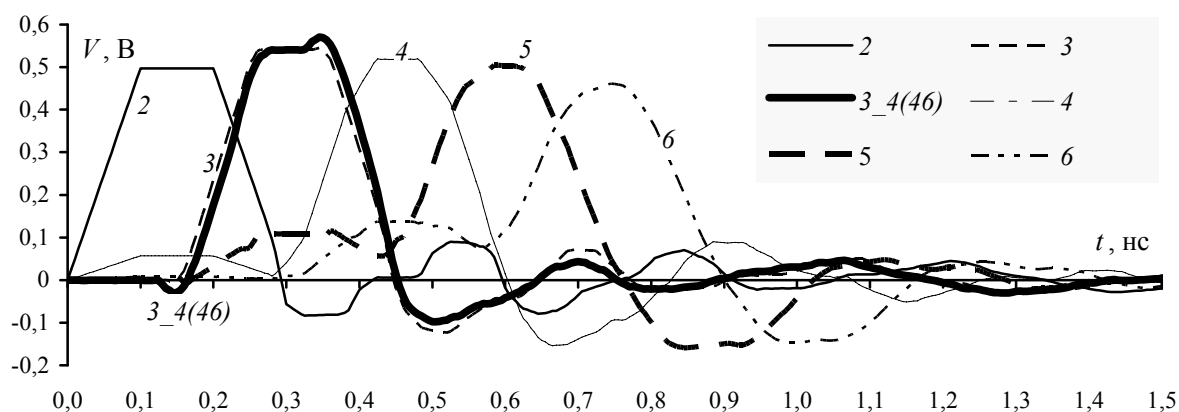


Рис. 3. Формы напряжений вдоль меандровой линии, вычисленные в TALGAT

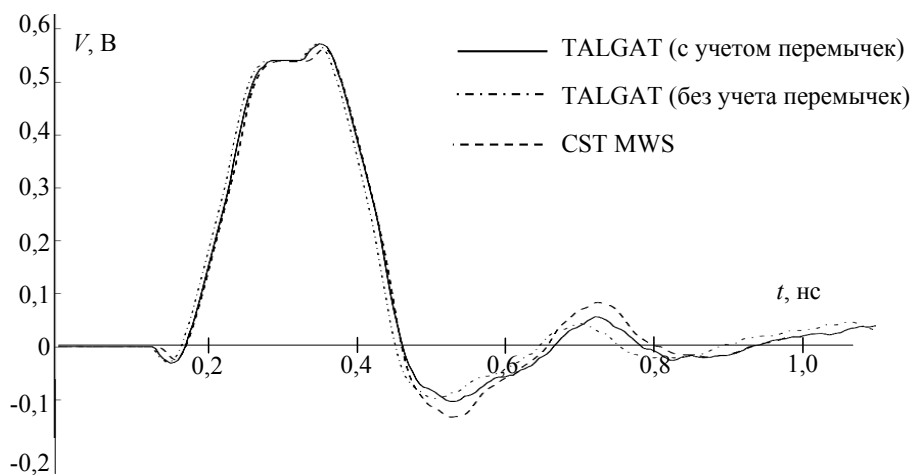


Рис. 4. Сравнение форм напряжений, вычисленных в CST MWS и TALGAT

Таким образом, в результате работы усовершенствован программный модуль для вычисления и отображения токов и напряжений вдоль проводников МПЛП с помощью квазистатического анализа. Добавлена возможность нахождения и отображения местоположения максимальных значений амплитуд напряжений и токов. Тем самым реализована локализация максимумов сигнала в полосковых структурах произвольной сложности. Она продемонстрирована и верифицирована на примере двухвитковой меандровой линии, в которой выявлена точка с напряжением, значительно превышающим напряжение на входе линии. Использование реализованной функциональности представляется полезным для решения ряда прикладных задач.

Разработка алгоритма выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-29-09254, моделирование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-01232) в ТУСУРе.

Литература

1. Малютин Н.Д. Регулярные и нерегулярные многосвязанные полосковые структуры и устройства на их основе: расчет первичных параметров, импульсные измерения характеристик / Н.Д. Малютин и др. – Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 218 с.
2. Djordjevic A.R., Sarkar T.K. Analysis of time response of lossy multiconductor transmission line networks // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1987. – Vol. 35, № 10. – P. 898–907.
3. Achar R. Simulation of high-speed interconnects / R. Achar, M.S. Nakhla // Proceedings of the IEEE. – 2001. – Vol. 89, № 5. – P. 693–728.
4. Заболоцкий А.М. Временной отклик многопроводных линий передачи / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Томский государственный университет, 2007. – 152 с.
5. Газизов Р.Р. Вычисление токов вдоль многопроводных межсоединений печатных плат // Студент и научно-технический прогресс: сб. тезисов междунар. науч. студ. конф. МНСК–2013. – Новосибирск, 2013. – С. 76.
6. Газизов Р.Р. Результаты квазистатического анализа токов вдоль отрезка многопроводной шины печатной платы // Научная сессия ТУСУР–2013: матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 15–17 мая 2013 г. – Томск: В-Спектр, 2013. – С. 103–105.
7. Газизов Р.Р. Программный модуль для динамической визуализации токов и электромагнитного поля печатной платы // Электронные средства и системы управления: матер. докладов X Междунар. науч.-практ. конф. / Томск, 12–14 ноября 2014 г. – Томск: В-Спектр, 2014. – С. 200–202.
8. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – № 2 (36). – С. 45–50.
9. Газизов Р.Р. Анимированные графики для визуализации токов и напряжений в системе TALGAT / Р.Р. Газизов, Ев.В. Лежнин // Научная сессия ТУСУР–2015: матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 13–15 мая 2015 г. – Томск: В-Спектр, 2015. – С. 109–111.
10. CST MICROVAWE STUDIO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cst.com/products/CSTMWS>, свободный (дата обращения: 25.10.2015).

Газизов Руслан Рифатович

Студент каф. КИБЭВС, лаборант науч.-исслед. лаборатории безопасности и электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств (НИЛ БЭМС РЭС)
Тел.: +7-923-431-77-24
Эл. почта: ruslangazizow@gmail.com

Заболоцкий Александр Михайлович

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ, заведующий НИЛ «БЭМС РЭС»
Тел.: +7-913-824-23-06
Эл. почта: zabolotsky_am@mail.ru

Орлов Павел Евгеньевич

Канд. техн. наук, мл. науч. сотрудник НИЛ «БЭМС РЭС»
Тел.: +7-923-408-59-95
Эл. почта: praetorian281@gmail.ru

Gazizov R.R., Zabolotsky A.M., Orlov P.E.

Signal maximum localization in multiconductor transmission lines of printed circuit boards using TALGAT system

Expressions for modified calculation of time response in TALGAT system are shown. These expressions allow getting currents and voltage values along each conductor of each section of multiconductor transmission line, using quasi-static analysis. The results are dynamically plotted and are used for maximum values of currents and voltages searching. Results of implementation and verification of modified calculation are given.

Keywords: meander line, quasi-static analysis, electromagnetic compatibility, information security.