

Локализация максимумов напряжения в шине печатной платы системы автономной навигации космического аппарата

Газизов Р.Р.^{1*}, Заболоцкий А.М.^{1}, Белоусов А.О.^{1***}, Газизов Т.Т.^{2****}**

¹*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,*

ТУСУР, пр. Ленина, 40, Томск, 634050, Россия

²*Томский государственный педагогический университет,*

ТГПУ, ул. Киевская, 60, Томск, 634061, Россия

**e-mail: ruslangazizow@gmail.com*

***e-mail: zabolotsky_am@mail.ru*

****e-mail: ant1lafleur@gmail.com*

*****e-mail: timurtsk@gmail.com*

Аннотация

Показана актуальность исследования локализации максимумов сигнала вдоль многопроводных линий передачи печатных плат. Вычислены параметры шины печатной платы радиоприемного устройства системы автономной навигации. Выявлены и локализованы максимумы напряжения, превышающие амплитуду сигнала на входе в 1,2 и 2,7 раза, при изменении граничных условий и источников воздействия.

Ключевые слова: моделирование, печатная плата, локализация максимумов сигнала, электромагнитная совместимость, система автономной навигации.

Введение

Корректная и безотказная работа критичных систем очень важна. Для этого проводятся исследования распространения сигналов в их элементах. Большинство

исследований проведено в частотной области, тогда как временной уделено меньше внимания. Между тем изучение процессов во временной области позволит усовершенствовать защиту от сверхкоротких импульсов (СКИ) [1, 2], что особенно важно для защиты бортовой аппаратуры самолета [3] и космического аппарата [4] от преднамеренных помех. Актуальны выявление и локализация максимумов сигнала в многопроводных линиях передачи (МПЛП) [5], поскольку результаты могут быть полезны для выявления и локализации мест возможных паразитных взаимовлияний, излучений и восприимчивости, чтобы своевременно принять меры по их устранению для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) и информационной безопасности.

Для таких исследований целесообразно использовать компьютерное моделирование, поскольку при натурных испытаниях зачастую выявляются уязвимости аппаратуры, и испытания приходится проводить повторно, что повышает затраты на разработку. Необходимость вычисления форм сигнала в большом числе точек вдоль каждого проводника сложных структур также подчеркивает актуальность компьютерного моделирования. Другой причиной является искажение сигнала входным импедансом измерителя. При разработке сложных печатных плат с высокой плотностью трассировки используют системы компьютерного моделирования, обеспечивающие анализ и визуализацию параметров сигнала, что позволяет лучше оценить процессы, происходящие в платах.

Для анализа межсоединений печатных плат широко используют квазистатический подход, так как схемотехнический анализ не всегда позволяет

получить результаты достаточной точности, а электродинамический требует значительных вычислительных затрат. Теоретические основы квазистатического вычисления отклика для произвольной схемы из отрезков МПЛП описаны в работах [6, 7]. На основе данной теории разработаны алгоритмы вычисления временного отклика [8], которые позволяют выполнить вычисления значений токов и напряжений только в узлах схемы. Актуальность и достоверность выявления и локализации максимумов сигнала в описаны в [3, 9]. В данных работах представлены выявленные и локализованные максимумы, превышающие амплитуду сигнала на входе и выходе в 1,5 и 2 раза для С-секции, а также в 1,14 раза в двухвитковой меандровой линии. Однако исследование проводилось на одиночных отрезках линий передачи.

Цель исследования – выявить особенности локализации максимумов и минимумов напряжения в шине реальной печатной платы при изменении граничных условий и источников воздействия.

Для исследования выбрана шина печатной платы радиоприемного устройства системы автономной навигации (САН) космических аппаратов. Фрагмент платы изображен на рис. 1. Согласно параметрам стека печатной платы построены поперечные сечения каждой из линий передачи. Плата ранее исследовалась, но лишь на уровень перекрестных помех [10]. На рис. 2 приведен пример поперечного сечения пятипроводной линии передачи. Для каждого построенного поперечного сечения вычислены матрицы L и C . Принципиальная схема всей шины представлена на рис. 3. Для более пояснения, на рис. 1 приведена часть принципиальной схемы, сопоставленная с фрагментом печатной платы.

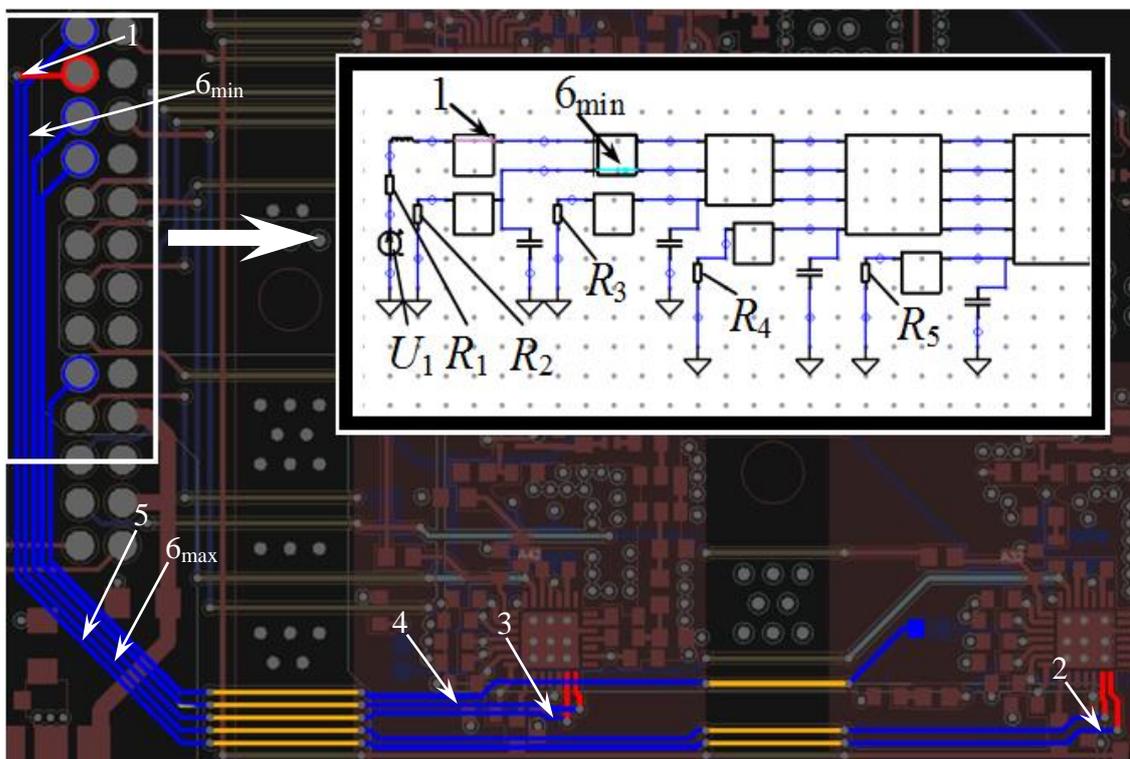


Рис. 1 Локализация пиковых значений сигнала на фрагменте печатной платы



Рис. 2. Поперечное сечение пятипроводной линии передачи

Изменялись граничные условия и количество активных проводников. В качестве воздействия использовался СКИ в форме трапеции амплитудой ЭДС 1 В, с длительностью фронта, вершины и спада по 0,1 нс. Для моделирования холостого хода (ХХ) принят резистор с сопротивлением 50 КОм, а для короткого замыкания (КЗ) – резистор с сопротивлением 50 мОм.

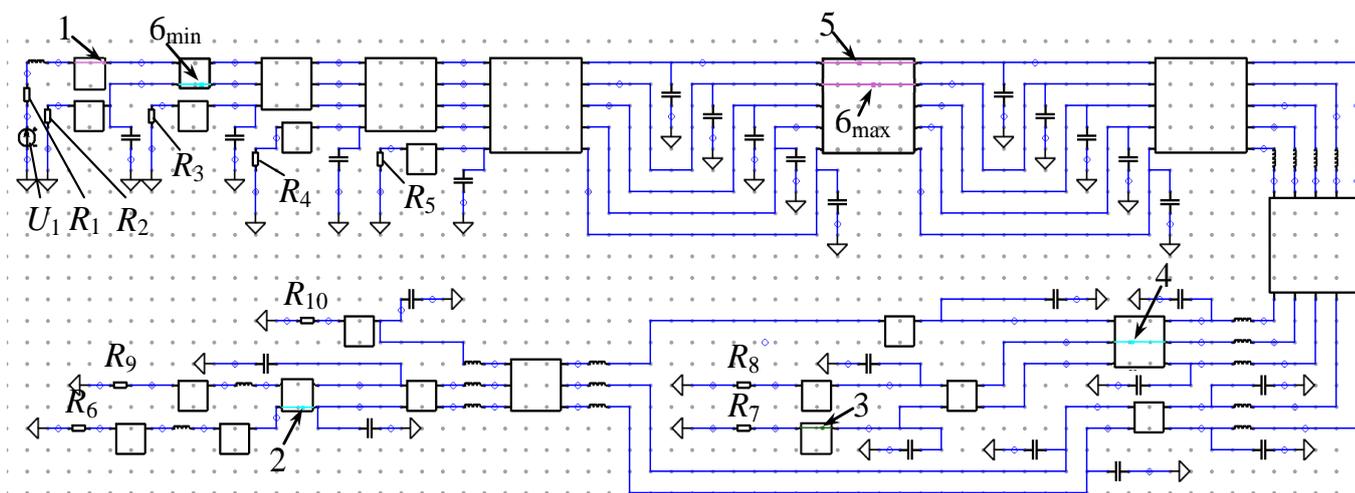


Рис. 3. Принципиальная схема шины печатной платы РПУ САН

Выполнены вычисления для 40 случаев с различными комбинациями активных проводников (источник сигнала U_1 подключался к проводникам с R_1-R_5), резисторов ХХ и КЗ, однако приведены результаты лишь для 6-и случаев с наиболее интересными результатами. В таблице указаны параметры вычислений для этих случаев, а на рис. 4 представлены формы напряжений в начале ($V_{\text{нач}}$) и конце ($V_{\text{кон}}$) всего проводника, а также формы с максимальным значением напряжения (V_{max}). Как видно, сигнал представляет собой последовательность импульсов, обусловленных многократными отражениями из-за ХХ и КЗ на концах проводников. На принципиальной схеме из рис. 3 указаны точки на проводниках, в которых локализованы максимальные значения. Отметим, что каждый проводник делится на 20 сегментов, в каждом из которых вычислялся отклик и анализировалось его пиковое значение. Цифры означают номер случая из таблицы. Во всех остальных случаях максимумы или минимумы не были ярко выражены, либо находились на концах отрезка линии передачи.

Параметры вычислений

№ случая	№ резисторов с XX	№ резисторов с КЗ	№ активных проводников	№ проводника с пиковым значением	Пиковое значение	№ сегмента
1	R_1-R_5	R_6-R_{10}	1, 5	1	3,67 мВ	19
2	R_4, R_5, R_6-R_8	R_1-R_3, R_9, R_{10}	1, 2, 4, 5	1	2,7 В	14
3	R_4, R_5, R_6-R_8	R_1-R_3, R_9, R_{10}	1, 2, 4, 5	3	-1,21 В	7
4	R_1-R_3, R_9, R_{10}	R_4, R_5, R_6-R_8	1	4	-0,18 мВ	14
5	R_1-R_3, R_9, R_{10}	R_4, R_5, R_6-R_8	1, 2, 4, 5	1	0,21 В	9
6	R_1-R_3, R_9, R_{10}	R_4, R_5, R_6-R_8	1, 2, 4, 5	2	0,41 В	11
					-0,37 В	14

Рассмотрим подробнее случаи 2 и 3. В них наблюдается самое значительное превышение напряжения по сравнению со всеми остальными: в случае 2 максимум превышает напряжение на входе в 2,7 раза, а в случае 3 наблюдается отрицательный импульс, по модулю превышающий амплитуду сигнала на входе в 1,2 раза.

Отметим, что максимумы из случаев 5 и 6 находятся вблизи шины, проходящей слоем ниже (указано стрелками на рис. 1), и связь с ней может оказаться критичной. Примечателен случай 6, поскольку содержит сразу два пиковых значения: максимальное (0,41 В) и минимальное (-0,37 В). Интересен и тот факт, что локализация пиковых значений непостоянна, а зависит как от значений резисторов, так и от параметров воздействия.

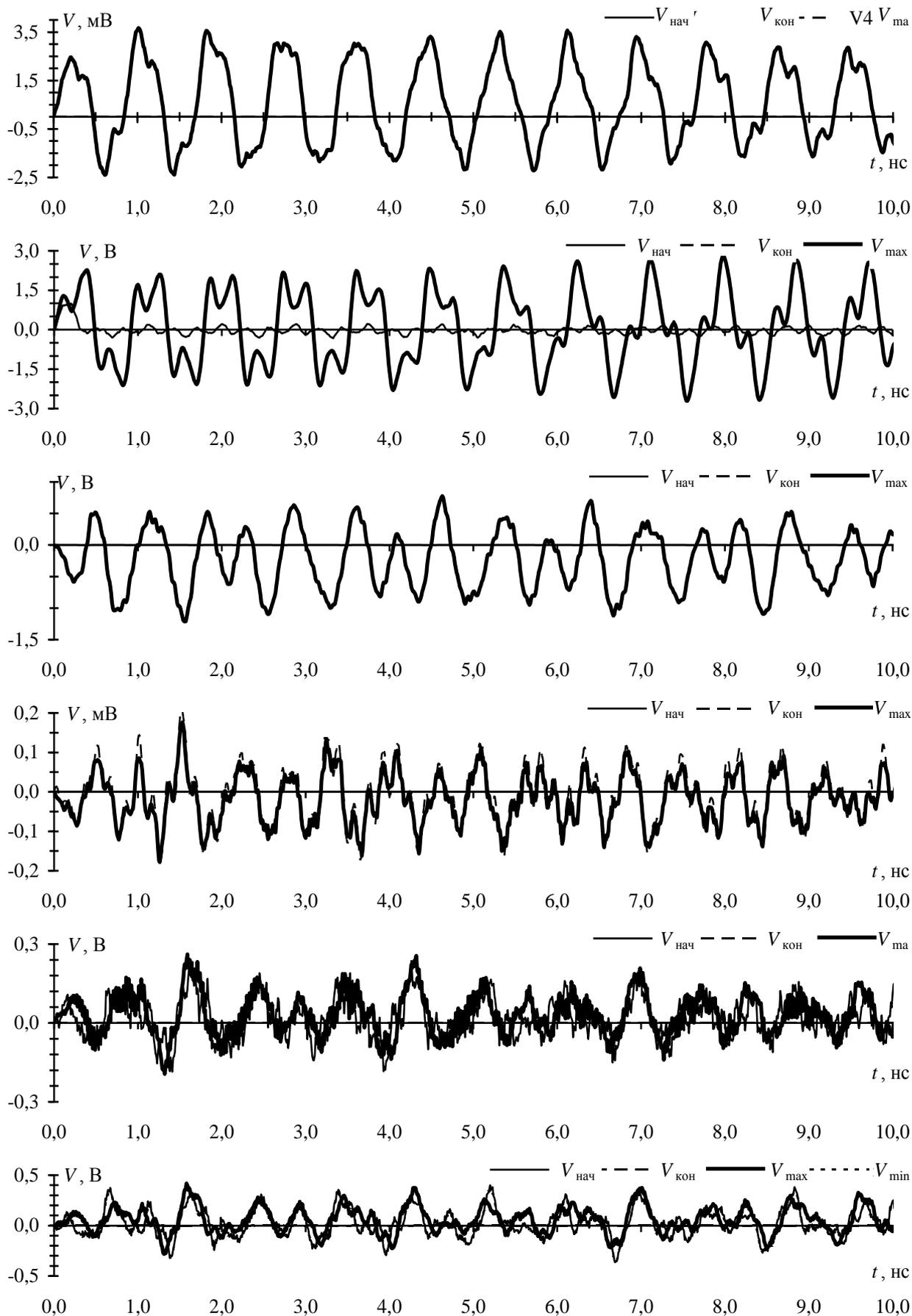


Рис. 4. Формы сигнала для случаев 1–6 (сверху вниз) из таблицы

Таким образом, в результате работы исследована шина реальной печатной платы, выявлены параметры граничных условий и источников воздействия, при которых наблюдаются пиковые значения напряжений, более чем в 2 раза превышающие сигнал от источника воздействия, что может быть причиной различных паразитных эффектов.

Разработка программного обеспечения выполнена в рамках выполнения проектной части государственного задания №8.1802.2014/К Миноборнауки России.

Моделирование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-01232) в ТУСУРе.

Библиографический список

1. Surovtsev R.S. *Pulse Decomposition in a Turn of Meander Line as a New Concept of Protection against UWB Pulses* / R.S. Surovtsev, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Proc. of Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Omsk, Russian Federation, May 2015. –7 p.
2. Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. *UWB pulse decomposition in simple printed structures*. IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 2016. Vol. 58, №4. DOI: 10.1109/TEMC.2016.2548783. copus:2-s2.0-84964501696.
3. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Нгуен В.Х. Моделирование воздействия мощных электромагнитных помех на электротехнический комплекс самолета // Труды МАИ, 2013, №71: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=46938>

4. Кириллов В.Ю., Томилин М.М. Воздействие преднамеренных электромагнитных помех на бортовые кабели космических аппаратов // Труды МАИ, 2013, №66: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=40836>
5. Газизов Р.Р., Заболоцкий А.М., Орлов П.Е. Локализация максимумов сигнала в многопроводных линиях передачи печатных плат с помощью системы TALGAT // Доклады ТУСУР. 2015. № 4 (38). С. 147–150.
6. Achar R. *Simulation of high-speed interconnects* / R. Achar, M.S. Nakhla // Proceedings of the IEEE. 2001. Vol. 89, № 5. P. 693–728.
7. Djordjevic A.R. *Analysis of time response of lossy multiconductor transmission line networks* / A.R. Djordjevic, T.K. Sarkar // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1987. Vol. 35, № 10. P. 898–907.
8. Заболоцкий А.М. Газизов Т.Р. Временной отклик многопроводных линий передачи. – Томск: Томский государственный университет, 2007. – 152 с.
9. Газизов Р.Р., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Т. Исследование распространения сверхкороткого импульса в микрополосковой С-секции при изменении зазора между связанными проводниками // Доклады ТУСУР. 2016. Т.19. №1. С. 79–82.
10. Суровцев Р.С., Газизов Т.Р. Оценка целостности сигналов в печатных платах системы автономной навигации космического аппарата // Труды МАИ, 2015, №83: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=62204>