

3. Park S.W. Analytical approach for crosstalk characterization of multiconductor transmission lines using mode decomposition technique in the time domain / S.W. Park, F. Xiao, Y. Kami // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2010. – Vol. 52. – P. 436–446.

УДК 621.391.825

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ С ПРОВОДНИКАМИ В ОДНОЙ ПЛОСКОСТИ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ

Н.Т. Динь, аспирант

*Научный руководитель Т.Р. Газизов, зав. каф. ТУ, д.т.н., проф.
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, dinhnamtuts2@gmail.com*

Представлены результаты анализа нового устройства защиты от сверхкоротких импульсов. Выявлены максимумы в зависимостях коэффициента ослабления A и разности погонных задержек мод $|\Delta\tau|$ от параметров поперечного сечения. Показано, что можно улучшить эти характеристики оптимизацией толщины подложки и ширины сигнальных проводников. Уменьшение толщины проводников дает рост $|\Delta\tau|$, но слабо уменьшает A .

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, печатная плата, модальное резервирование.

При разработке печатных плат радиоэлектронной аппаратуры необходимо обеспечивать электромагнитную совместимость и надежность. Хотя резервирование повышает надежность [1], оно не защищает от сверхкоротких импульсов (СКИ). Для решения этой задачи в [2] предложено модальное резервирование (МР), объединяющее холодное резервирование и модальную фильтрацию [3]. После первого патента на устройство с МР [4] вышло много работ и патентов. Самый свежий из них – устройство защиты от СКИ с проводниками в одной плоскости на диэлектрической подложке [5]. Оно почти не исследовано. Для оптимизации его параметров надо рассмотреть их влияние на A и $|\Delta\tau|$. Цель работы – выполнить их многовариантный анализ.

На рис. 1, a представлено поперечное сечение устройства, где w – ширина сигнальных проводников, w_1 – ширина опорных проводников, s – расстояние между сигнальными проводниками, d – расстояние между сигнальными и опорными проводниками, t – толщина проводников, h – толщина подложки, ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость подложки.

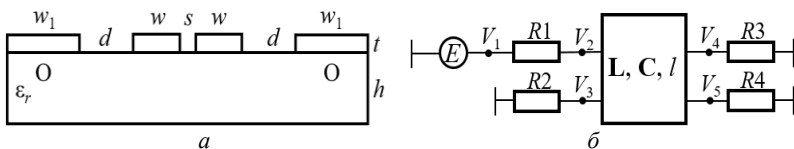


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и принципиальная схема устройства (б)

Моделирование выполнялось в системе TUSUR.EMC [6] без учета потерь в проводниках и диэлектриках. Исходные параметры: $w = 1$ мм, $w_1 = 6$ мм, $s = 0,2$ мм, $d = 10$ мм, $h = 0,5$ мм, $t = 18$ мкм, $\epsilon_r = 4,5$. Варьировались h и w от 0,1 до 1,5 мм с шагом 0,1 мм при $t = 18, 35, 70, 105$ мкм. На рис. 1, б представлена принципиальная схема устройства в виде связанной линии (длиной $l = 1$ м) с окончаниями (R1–R4), всегда имеющими сопротивления, равные среднему геометрическому импедансу четной и нечетной мод. Воздействовал трапециевидный импульс с ЭДС 5 В и длительностями фронта, спада и плоской вершины по 50 пс. В данной работе, A равно отношению половины ЭДС к напряжению в узле V_4 . При исходных параметрах $A = 2,58$ и $|\Delta\tau| = 1,24$ нс/м. Из-за ясности того, что рост s снижает A и $|\Delta\tau|$, а рост ϵ_r увеличивает, их зависимости не приводятся.

На рис. 2 приведены зависимости A и $|\Delta\tau|$ от h и w при разных t .

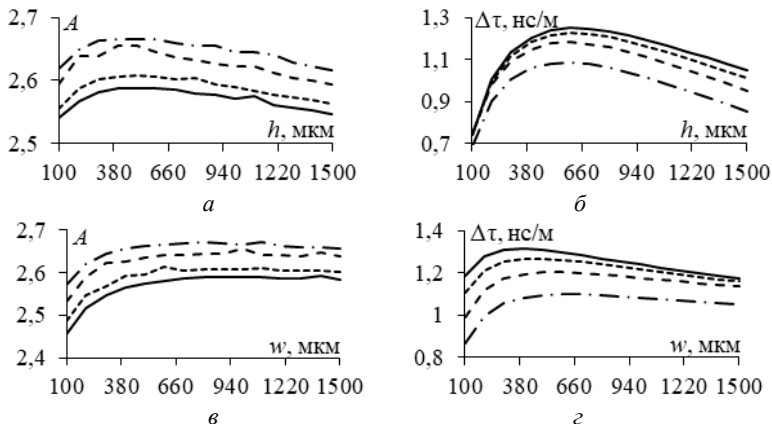


Рис. 2. Зависимости A и $|\Delta\tau|$ от h (а, б) и w (в, г) соответственно при $t = 18$ (—); 35 (---); 70 (— · —); 105 (· · ·) мкм

Из рис. 2, а видно, что графики имеют экстремумы при $h \approx 500$ мкм: $A = 2,59; 2,61; 2,66; 2,67$ при $t = 18, 35, 70, 105$ мкм соответственно. Таким образом, рост t приводит к росту (хотя и малому) экстремумов A .

Анализ рис. 2, б показывает, экстремумы при $h \approx 600$ мкм: $|\Delta\tau| = 1,25; 1,23; 1,18; 1,08$ нс/м. Рост t уменьшает $|\Delta\tau|$. На рис. 2 в, г показаны зависимости A и $|\Delta\tau|$ от w при разных t . Видно, что рост w увеличивает, а затем стабилизирует A . Зависимости $|\Delta\tau|$ от w показывают слабые максимумы при w от 200 до 700 мкм. Рост t также уменьшает $|\Delta\tau|$ и увеличивает A , как и в зависимости от h .

В зависимостях от h и w с ростом t A увеличивается на 2,9 и 3,1%, а $|\Delta\tau|$ уменьшается на 13,6 и 16,3% соответственно. Поскольку $|\Delta\tau|$ сильнее меняется, чем A , то целесообразно выбрать $t = 18$ мкм. При этом при $w = 400$ мкм, $|\Delta\tau|$ достигает 1,31 нс/м, что на 5,6% больше исходного $|\Delta\tau| = 1,24$ нс/м. Между тем здесь не учитывалось одновременное изменение h и w , когда можно улучшить результат.

При вычислении матриц L и C задавалась равномерная сегментация границ диэлектрика и проводников поперечного сечения следующим образом. Для торца и ширины сигнальных проводников длина сегмента 3 и 5 мкм, а для опорных и диэлектрика – 50 и 75 мкм соответственно.

Итак, проведен анализ нового устройства защиты от СКИ с проводниками в одной плоскости на диэлектрической подложке при изменении параметров его поперечного сечения. Показано, что характеристики устройства могут быть усовершенствованы оптимизацией h и w в пределах от 200 до 700 мкм. Выявлено, что при $t = 18$ мкм достигается высокий $|\Delta\tau|$ с незначительным уменьшением A . Результаты будут полезны при оптимизации подобных структур генетическим алгоритмом.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ по проекту FEWM-2024-0005.

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисенко В.В. Аппаратное резервирование в промышленной автоматизации. – Ч. 1 // Современные технологии автоматизации. – 2008. – № 2. – С. 90 – 99.
2. Новый способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, А.М. Заболоцкий, Е.Н. Буичкин // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 3 (37). – С. 129 – 131.
3. Заболоцкий А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: ТУСУР, 2013. – 151 с.
4. Пат. 2 603 850 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием / Т.Р. Газизов (РФ), П.Е. Орлов (РФ), В.Р. Шарафутдинов (РФ) и др. – № 2 015 129 253 / 07; заявл. 16.07.15; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34. – 5 с.

5. Пат. 2 850 908 РФ, МПК Н 04 В 15/00. Устройство защиты от сверхкоротких импульсов с проводниками в одной плоскости на диэлектрической подложке / Е.Б. Черникова (РФ), Т.Р. Газизов (РФ). – № 2 025 118 096; заявл. 01.07.25; опубл. 17.11.2025, Бюл. № 32. – 5 с.

6. Система TUSUR.EMC – Программный комплекс для моделирования задач электромагнитной совместимости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://emc.tusur.ru/>, свободный (дата обращения: 24.02.2026).

УДК 621.372.22

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ДИЭЛЕКТРИКА СВЯЗАННОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ В КОРПУСЕ НА АСИММЕТРИЮ МАТРИЦЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ИНДУКЦИИ

В.Д. Нгуен, аспирант каф. ТУ

г. Томск, ТУСУР, nguyen.d.2216-2023@e.tusur.ru

Проводятся численный анализ асимметрии матрицы коэффициентов электростатической индукции (C) при изменении диэлектрической проницаемости диэлектрика связанной линии передачи в корпусе и значения автосегментации. Для оценки степени асимметрии используется значение максимального элемента матрицы ошибок C . Показано, что изменение диэлектрической проницаемости среды при разной автосегментации может существенно влиять на асимметрию матрицы C .

Ключевые слова: матрица погонных коэффициентов электростатической индукции, относительная диэлектрическая проницаемость, численный анализ, автосегментация, асимметрия.

В работе [1] выполнен квазистатический анализ связанной линии передачи, которая размещена внутри металлического корпуса. Анализ выполнен в программном обеспечении TUSUR.EMC [2]. В результате выявлена асимметрия вычисляемой матрицы погонных коэффициентов электростатической индукции (C) между элементами C_{13} и C_{31} и C_{23} и C_{32} , несмотря на то, что теоретически такая матрица должна быть симметричной. Таким образом, возникла необходимость в выявлении причин возникновения асимметрии матрицы C . Предполагается, что одной из возможных причин появления асимметрии может быть сегментация структуры, а также свойства среды, в которой находятся проводники. Цель работы – выполнить анализ влияния изменения относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика при разных значениях шага автосегментации на максимальный элемент матрицы ошибок C .