

УДК 621.391.825

**АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРЫ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ  
С ПРОВОДНИКАМИ НА ВНУТРЕННЕМ СЛОЕ С МОДАЛЬНЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ**

С.Р. Морозов, А.В. Медведев

Научный руководитель: д.т.н. Т.Р. Газизов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,

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

E-mail: pred11072@yandex.ru

**ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF A STRUCTURE WITH CONDUCTORS ON THE INNER  
LAYER OF PCB WITH MODAL RESERVATION**

S.R. Morozov, A.V. Medvedev

Scientific supervisor: Dr. T.R. Gazizov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Russia, Tomsk, Lenin str., 40, 634050

E-mail: pred11072@yandex.ru

***Abstract.** The analysis of characteristics in time domain of a structure with conductors on the inner layer of PCB with modal reservation is performed. The dependences of the per-unit-length delay difference and the geometric mean impedance on the structure parameters were considered. Recommendations for changing the geometric parameters to maximize the difference in delays are proposed.*

**Введение.** При создании печатных плат (ПП) критичной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) большое внимание уделяется электромагнитной совместимости (ЭМС) и функциональной безопасности электронных схем [1]. Кардинальным методом повышения функциональной безопасности является резервирование. Холодное резервирование отличается от горячего тем, что при отказе резервируемой системы выполняется переключение на выключенную резервную систему. Однако, от воздействия систематических электромагнитных помех (ЭМП) резервирование не защищает, так как при отказе резервируемой системы из-за воздействия ЭМП откажет и резервная система.

Большую опасность представляют сверхкороткие импульсы (СКИ), которые несут большую энергию при маленькой длительности. Для предотвращения влияния СКИ используются технологии на основе модальной фильтрации (МФ) [2]. Модальное резервирование – это подход к компоновке и трассировке резервируемых проводников системы с холодным резервированием, при котором реализуется модальная фильтрация [3].

Существует ряд способов компоновки и трассировки проводников ПП с МР [4]. Их недостатком является сложность в трассировке проводников с большим количеством цепей электронной схемы. Разработан способ трассировки проводников на внешних и внутренних слоях многослойной ПП [5], который отличается наличием проводников на внешнем и внутреннем слоях ПП. Данный способ позволяет выполнять трассировку проводников электронных схем с большим количеством компонентов. Выполнено предварительное исследование данного способа с неоптимизированными параметрами [6]. В дальнейших исследованиях необходимо рассмотреть влияние параметров поперечного сечения

структур с проводниками на внешнем и внутреннем слоях ПП с МР для разработки рекомендаций по оптимизации параметров поперечного сечения.

Цель работы – выполнить анализ характеристик структуры с проводниками на внутреннем слое четырехслойной ПП с МР.

**Экспериментальная часть.** На рис. 1а представлена модель поперечного сечения. Моделирование выполняется в системе TALGAT [7] без учета потерь в проводниках и диэлектриках. Параметры поперечного сечения: ширина сигнального проводника  $w=200$  мкм, расстояние между проводниками  $s=200$  мкм, толщина проводника  $t=18$  мкм, толщина нижнего диэлектрического слоя  $h_1=200$  мкм, толщина верхнего диэлектрического слоя  $h_2=200$  мкм, диэлектрические проницаемости  $\epsilon_{r1}=10,2$  и  $\epsilon_{r2}=4$ .

На рис. 1б представлена принципиальная электрическая схема, которая представляет собой двухпроводную структуру (длиной  $l=1$  м) с нагрузками на ближнем и дальних концах, с источником воздействия в активной линии. Значение импеданса нагрузок  $R1-R4$  взято равным среднему геометрическому импедансов четной и нечетной мод (50 Ом), тогда как воздействие имеет следующие характеристики: форма импульса – трапецевидная, ЭДС 2 В, длительность фронта, спада и плоской вершины  $t_r=t_{fj}=t_d=100$  пс.



Рис. 1. Модель структуры ПП с проводниками на внутреннем слое (а), где проводники А – активный, П – пассивный, О – опорный; принципиальная электрическая схема (б)

**Результаты.** На рис. 2 представлен формы сигналов на ближнем и дальнем концах при исходном наборе параметров. В дальнейшем все зависимости параметров рассмотрены относительно этого набора. На дальнем конце структуры наблюдаются два импульса разложения меньшей амплитуды, чем на ближнем конце, где разность задержек  $\Delta t=1$  нс.

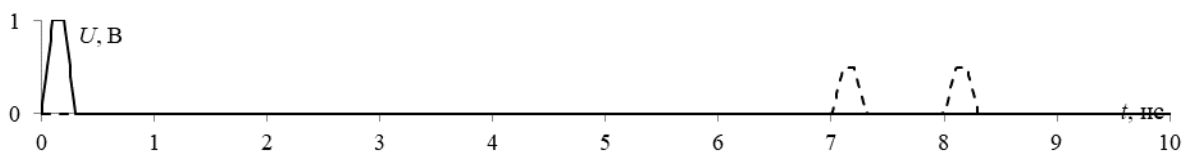


Рис. 2. Формы сигналов на ближнем (—) и дальнем (---) концах при исходном наборе параметров

На рис. 3 и 4 представлены зависимости разностей погонных задержек ( $\Delta t$ ) и среднего геометрического импеданса ( $R$ ) от геометрических параметров, которые изменяются по отдельности. Видно, что  $\Delta t$  и  $R$  изменяются при изменении параметра  $h_2$  в пределах  $\pm 300$  пс/м и  $\pm 7$  Ом,  $w$  –  $\pm 500$  пс/м и  $\pm 43$  Ом,  $s$  –  $\pm 1000$  пс/м и  $\pm 5$  Ом,  $h_1$  –  $\pm 630$  пс/м и  $\pm 50$  Ом,  $t$  –  $\pm 285$  пс и  $\pm 18$  Ом. Следовательно, максимальное значение  $\Delta t$  при изменении  $s$  достигается при его минимальном значении (1100 пс), а с увеличением  $s$   $\Delta t$  уменьшается почти до нуля. Это объясняется тем, что уменьшается связь между

проводниками. При этом  $R$  практически не изменяется. Изменение параметра  $h_2$  не влияет на  $R$ , но  $\Delta t$  можно увеличить примерно на 300 пс/м при  $h_2=300$  мкм.

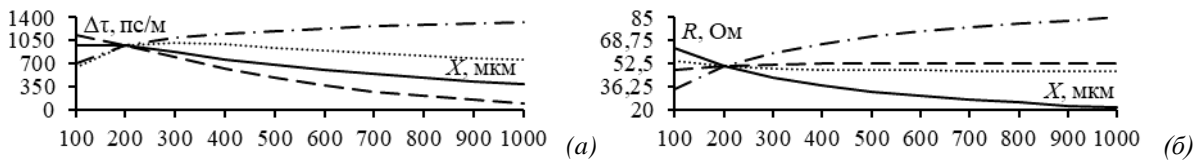


Рис. 3. Зависимости  $\Delta t$  (а) и  $R$  (б) от  $X$ , где  $X$  равен:  $w$  (—),  $s$  (---),  $h_1$  (----),  $h_2$  (.....)

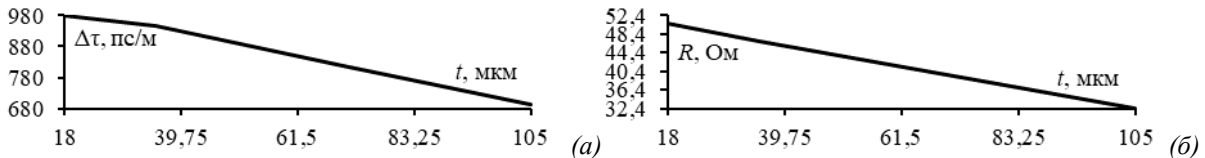


Рис. 4. Зависимости  $\Delta t$  (а) и  $R$  (б) от  $t$

**Заключение.** Выполнен анализ характеристик структуры с проводниками на внутреннем слое ПП с МР. Рассмотрены зависимости разности погонных задержек и среднего геометрического импеданса. Показано, что из всех рассматриваемых параметров наиболее сильно на  $\Delta t$  влияют параметры  $w$  и  $h_1$ . Таким образом, для увеличения  $\Delta t$  необходимо увеличивать  $h_1$  и уменьшать  $w$ ,  $t$  и  $s$ , а значение  $h_2$  принять средним. Однако, при изменении геометрических параметров согласно рекомендациям, также сильно будет изменяться  $R$ . В случаях, когда необходим контроль импеданса, необходимо отслеживать изменения  $R$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р МЭК 61508-1—2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Общие требования [Текст]. – Взамен ГОСТ Р МЭК 61508-1—2007; введ. 2012-08-29. – М. : Стандартинформ, 2014 – 58 с.
2. Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. UWB pulse decomposition in simple printed structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2016. – V.58., № 4. – P. 1136-1142.
3. Шарафутдинов В.Р., Газизов Т.Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации. // Системы управления, связи и безопасности. – 2019 – № 3. – С.117-144.
4. Алхадж Хасан А., Газизов Т.Р. Обзор исследований по модальному резервированию // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25. №4. – С. 54-67.
5. Пат. 2752233 РФ. МПК Н04В 15/02. Способ трассировки печатных проводников на двуслойной печатной плате для цепей с резервированием / А.В. Медведев, А. Алхадж Хасан, О.М. Кузнецова-Гаджибаева, Т.Р. Газизов. Заявлено 06.07.2020; Опубл. 23.07.2021, Бюл. № 21 – 8 с.
6. Medvedev A.V. Interconnect Routing on Two Signal Layers of a Modal Reservation PCB: a Case Study // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – 2022. – P. 301-306.
7. Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019 – V. 560 – P. 1-7.