

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ С ПРОВОДНИКАМИ НА ВНЕШНЕМ СЛОЕ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ С МОДАЛЬНЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

*С.Р. Морозов, магистрант каф. ТУ;*

*А.В. Медведев, аспирант каф. ТУ*

*Научный руководитель Т.Р. Газизов, зав. каф. ТУ, д.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, pred11072@yandex.ru*

Выполнен анализ характеристик структуры с проводниками на внешнем слое печатной платы с модальным резервированием. Рассмотрены зависимости разности погонных задержек и среднего геометрического импедансов мод от параметров структуры. Предложены рекомендации по изменению геометрических параметров для максимизации разности задержек мод.

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

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 имеют большую энергию при малой длительности. Для предотвращения влияния СКИ используются технологии на основе модальной фильтрации [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 [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 внешнем слое ПП с МР.

На рис. 1, *а* 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. 1, *б* показана 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. Сопротивления нагрузок  $R1$ – $R4$  взяты равными среднему геометрическому импедансов четной и нечетной мод (67 Ом), тогда как воздействие имеет следующие характеристики: форма импульса – трапецевидная, ЭДС 2 В, длительность фронта, спада и плоской вершины  $t_r = t_{fr} = t_d = 10$  пс.

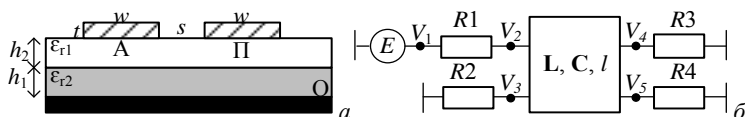


Рис. 1. Модель структуры ПП с проводниками на внешнем слое (*а*), где проводники А – активный, П – пассивный, О – опорный; принципиальная электрическая схема (*б*)

На рис. 2 представлены формы сигналов на ближнем (см. рис. 2, *а*) и дальнем (см. рис. 2, *б*) 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. Разность задержек мод  $\Delta t = 0,04$  нс.

На рис. 3 и 4 представлены зависимости разностей погонных задержек ( $\Delta t$ ) и среднего геометрического импедансов мод ( $R$ ) от геометрических параметров, изменяемых по отдельности. Видно, что  $\Delta t$  и  $R$ , при изменении  $s$ , изменяются в пределах  $\pm 200$  пс/м и  $\pm 9$  Ом,  $h_2$  –  $\pm 380$  пс/м и  $\pm 16$  Ом;  $w$  –  $\pm 260$  пс/м и  $\pm 49$  Ом;  $h_1$  –  $\pm 615$  пс и  $\pm 32$  Ом;

$t = \pm 424$  пс и  $\pm 6$  Ом. Следовательно, увеличение параметров  $s$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  ведет к увеличению  $\Delta t$  и  $R$ , тогда как увеличение параметров  $w$  и  $t$  ведет также к росту  $\Delta t$ , однако  $R$  будет уменьшаться.

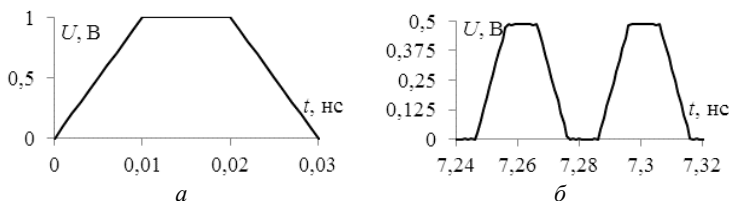


Рис. 2. Формы сигналов на ближнем (а) и дальнем (б) концах при исходном наборе параметров

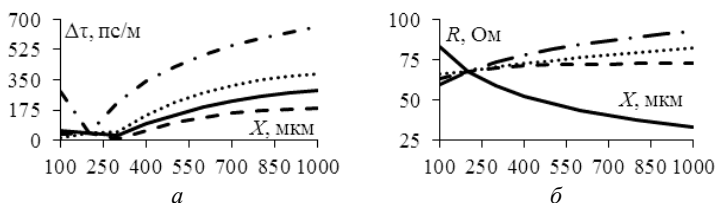


Рис. 3. Зависимости  $\Delta t$  (а) и  $R$  (б) от  $X$ , где  $X$  равен:  $w$  (—),  $s$  (---),  $h_1$  (-·-·-),  $h_2$ (...)

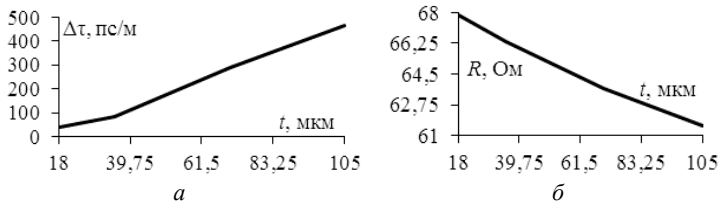


Рис. 4. Зависимости  $\Delta t$  (а) и  $R$  (б) от  $t$

Приведенные результаты показывают, что из всех рассматриваемых параметров наиболее сильно на  $\Delta t$  влияют параметры  $h_1$  и  $t$ . Таким образом, для увеличения  $\Delta t$  необходимо взять максимально возможными каждый из параметров. Однако при изменении геометрических параметров, согласно рекомендациям, также сильно будет изменяться  $R$ . В случаях, когда необходим контроль волнового сопротивления проводников ПП, необходимо отслеживать изменение  $R$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00424) (<https://rscf.ru/project/22-19-35072/>) в ТУСУРе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ИЕС 61508-1:2010. Functional Safety of Electrical/Electronic/ Programmable Electronic Safety-Related Systems. – Part 1: General requirements [Элек-

тронный ресурс]. – Режим доступа: <https://webstore.iec.ch/publication/5515>, свободный (дата обращения: 7.01.2023).

2. Gazizov A.T. UWB pulse decomposition in simple printed structures / A.T. Gazizov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2016. – Vol. 58, No. 4. – PP. 1136–1142.

3. Шарафутдинов В.Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации / В.Р. Шарафутдинов, Т.Р. Газизов // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 3. – С. 117–144.

4. Алхадж Х.А. Обзор исследований по модальному резервированию / Х.А. Алхадж, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 54–67.

5. Пат. 2 752 233 РФ, МПК H04B 15/02. Способ трассировки печатных проводников на двуслойной печатной плате для цепей с резервированием / А.В. Медведев (РФ), А. Алхадж Хасан (САР), О.М. Кузнецова-Таджибаева (РФ), Т.Р. Газизов (РФ). – № 2020122274; заявл. 06.07.20; опубл. 23.07.21, Бул. № 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. – PP. 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. – Vol. 560, – PP. 1–7.

УДК 681.5.08

## **УСТРОЙСТВО ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИЗМЕРЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ**

*Т.И. Третьяков, студент каф. ТУ*

*Научный руководитель М.Е. Комнатнов, доцент каф. ТУ, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, [henos19039@gmail.com](mailto:henos19039@gmail.com)*

Разработано устройство для автоматизированного измерения статических вольт-амперных характеристик биполярных транзисторов со схемой включения с общим эмиттером. Рассмотрен процесс измерения статических вольт-амперных характеристик биполярного транзистора с помощью разработанного устройства.

**Ключевые слова:** биполярный транзистор, широтно-импульсная модуляция, вольт-амперные характеристики, общий эмиттер, автоматизация.

Современные радиоэлектронные средства (РЭС) разрабатываются с применением различных полупроводниковых, одним из которых является биполярный транзистор (БТ). Корректная работа узла, содержащего БТ, требует соответствия его характеристик заданным до-