УДК: 621.391.825

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОСТОГО УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ КРИТИЧНЫХ ЦЕПЕЙ ОТ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

Т.Р. Газизов, д.т.н., профессор, Н.Т. Динь, аспирант

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск

Вычислены зависимости коэффициента ослабления (A) и разности погонных задержек (Δτ) от параметров поперечного сечения модального фильтра с проводниками в одной плоскости на диэлектрической подложке. Оптимизация толщины подложки, ширины сигнальных проводников и выбора материала подложки увеличила Δτ с 1,23 до 3,82 нс/м и A с 2,3 до 2,7. Это позволяет защиту от импульсов в 3 раза большей длительности.

Ключевые слова Электромагнитная совместимость, модальный фильтр, сверхкороткие импульсы, связанные полосковые линии.

Современные тенденции развития радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) подвижных систем мониторинга направлены на повышение функциональных возможностей при одновременном уменьшении габаритов с ростом плотности монтажа. Это приводит к усложнению электромагнитной обстановки внутри неё и повышает актуальность обеспечения электромагнитной совместимости [1]. Отдельной проблемой стала защита авионики от преднамеренных электромагнитных помех [2]. Это всё более актуально с развитием средств функционального поражения беспилотных летательных аппаратов [3], что требует их комплексной защиты [4].

Одним из опасных электромагнитных воздействий являются сверхкороткие импульсы (СКИ) [5]. Благодаря малой длительности и широкому спектру они могут проникать в различные цепи аппаратуры, вызывая искажения сигналов, нарушения передачи данных и повреждения функциональных узлов [6]. Для защиты РЭА от СКИ могут использоваться модальные фильтры (МФ) [7], действие которых основано на модальном разложении сигнала в многопроводной структуре. Из-за различия погонных задержек мод, СКИ, воздействующий на входе защищаемого устройства, раскладывается на импульсы меньшей амплитуды.

Недавно запатентовано простое новое устройство защиты от СКИ в виде МФ с проводниками в одной плоскости на диэлектрической подложке [8], пока малоисследованное. Для оптимизации его параметров надо рассмотреть их влияние на два ключевых параметра: коэффициент ослабления (A) и разность погонных задержек ($\Delta\tau$). Поэтому цель работы – выполнить многовариантный анализ влияния геометрических параметров поперечного сечения данного устройства на A и $\Delta\tau$ и оптимизацию его структуры с учетом полученных результатов.

Моделирование выполнялось в системе TUSUR.EMC [9] без учета потерь в проводниках и диэлектриках. На рис. 1*а* представлено поперечное сечение МФ, где w – ширина сигнальных проводников, а w_1 – опорных, s – расстояние между сигнальными проводниками, d – расстояние между сигнальными и опорными проводниками, t – толщина проводников, h – толщина подложки, а ε_r – её относительная диэлектрическая проницаемость подложки. Исходные параметры [8]: w=1 мм, w_1=6 мм, s=0,2 мм, d=10 мм, h=0,5 мм, t=18 мкм, ε_r=4,5. На рис. 1*б* приведена принципиальная схема МФ в виде связанной линии (длиной l=1 м) с сопротивлениями ($R1$–$R4$), равными среднему геометрическому волновых сопротивлений четной и нечетной мод. Воздействовал трапециевидный импульс с электродвижущей силой (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_3.

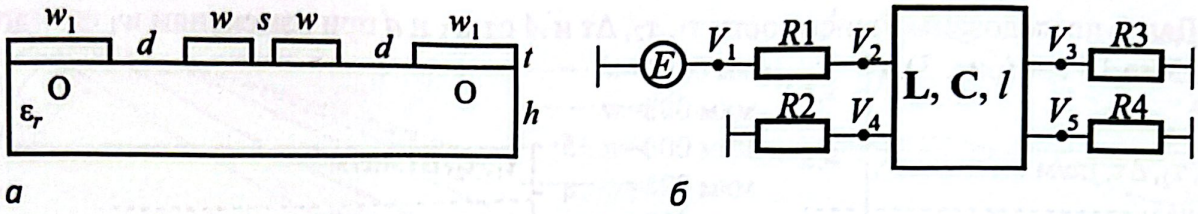


Рисунок 1 - Поперечное сечение (*а*) и принципиальная схема (*б*) МФ

Варьировались h и w от 0,1 до 1,5 мм, а также s от 0,2 до 1 мм с шагом 0,1 мм, при t = 18, 35, 70, 105 мкм. На рис. 2 приведены зависимости A и $\Delta\tau$ от h, w и s при разных t.

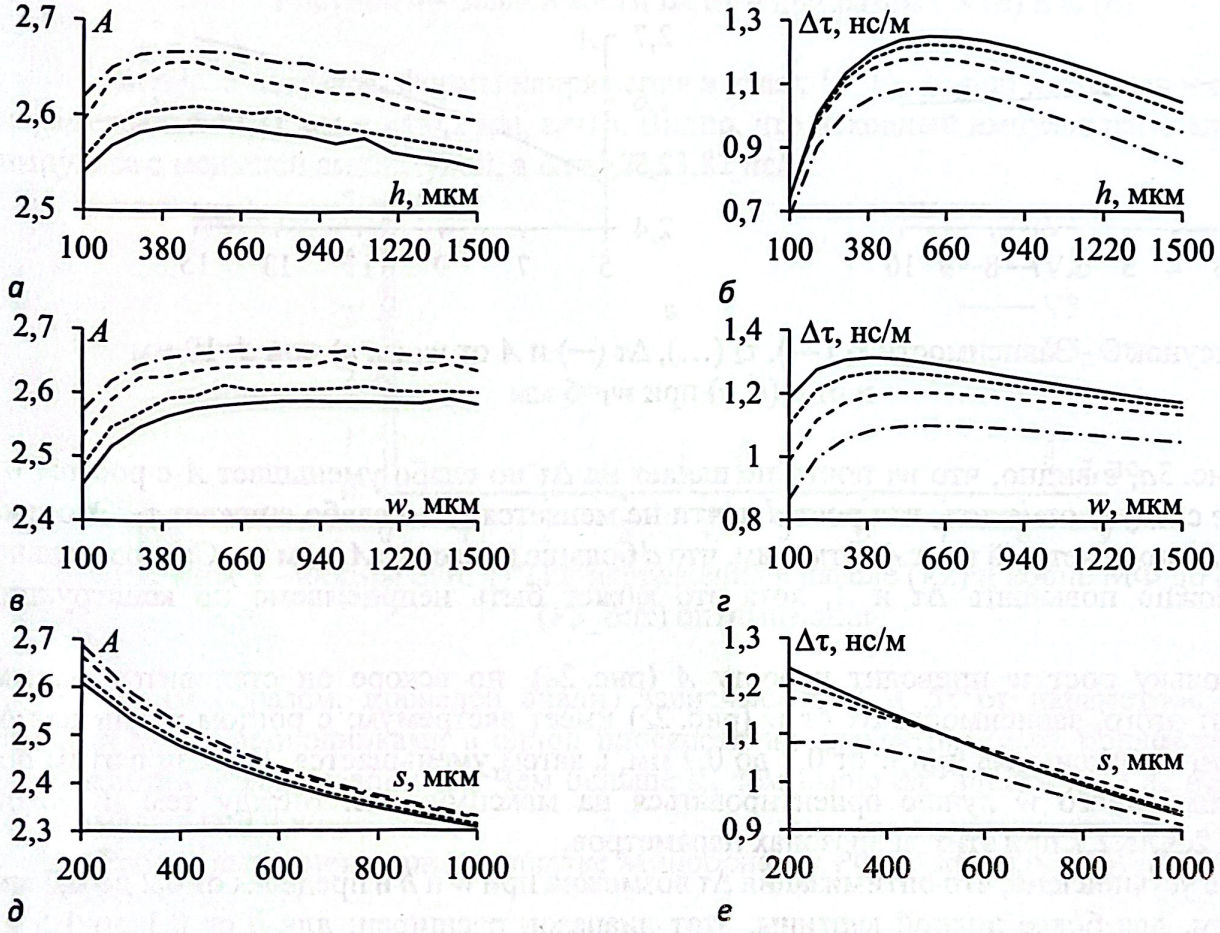


Рисунок 2 - Зависимости A и $\Delta\tau$ от h (*а*, *б*), w (*в*, *г*) и s (*д*, *е*) соответственно при t=18 (—), 35 (---), 70 (- - -), 105 (- · -) мкм

Из рис. 2*а* видны экстремумы при h≈0,5 мм: 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≈0,6 мм: $\Delta\tau$=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 0,2 до 0,7 мм. Рост t также уменьшает $\Delta\tau$ и увеличивает A, как и в зависимости от h. Из рис. 2*д*, *е* видно, что рост s монотонно уменьшает A и $\Delta\tau$. В зависимостях от h, w и s с ростом t A увеличивается на 2,9; 3,1; 3,01%, а $\Delta\tau$ уменьшается на 13,6; 16,3; 12,6% соответственно. Поскольку $\Delta\tau$ сильнее меняется чем A, то целесообразно выбрать t=18 мкм.

Таким образом, характеристики устройства могут быть усовершенствованы оптимизацией h и w в пределах от 0,2 до 0,7 мм при t=18 мкм. При этом, s выбирается минимально допустимым для заданной технологии изготовления печатной платы.

Далее исследованы зависимости τ_1, τ_2, $\Delta\tau$ и A от w_1 и d при изменении w_1 от 1 до 10 мм, а d – от 5 до 15 мм (рис. 3).

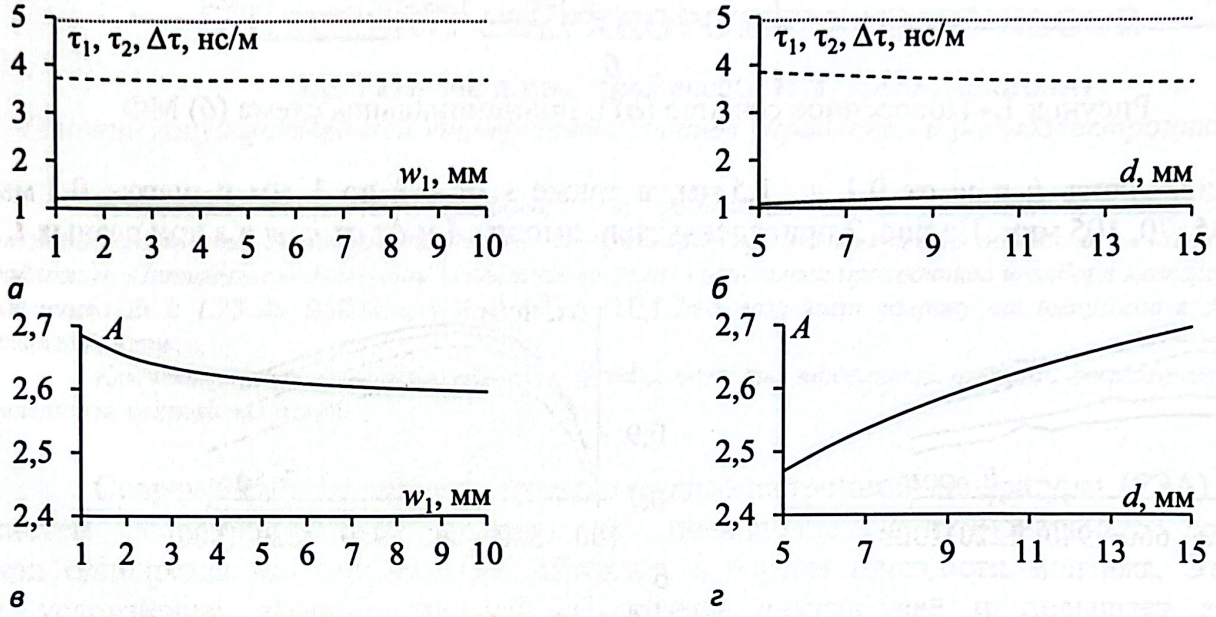


Рисунок 3 - Зависимости τ_1 (---), τ_2 (…), $\Delta\tau$ (—) и A от w_1 (*а*, *в*) при d=10 мм и от d (*б*, *г*) при w_1=6 мм

Из рис. 3*а*, *в* видно, что w_1 почти не влияет на $\Delta\tau$ но слабо уменьшает A с ростом w_1. Из рис. 3*б*, *г* следует отметить, что рост d почти не меняется τ_2 но слабо снижает τ_1. Это даёт малый рост $\Delta\tau$ но заметный рост A. Отметим, что d больше влияет на A, чем w_1. Следовательно, ростом d можно повышать $\Delta\tau$ и A, хотя это может быть неприемлемо по конструкции устройства.

Поскольку рост w приводит к росту A (рис. 2*в*), но вскоре он становится малым. В отличие от этого, зависимость $\Delta\tau$ от w (рис. 2*г*) имеет экстремум: с ростом w сначала $\Delta\tau$ растёт, достигая максимума при w от 0,2 до 0,7 мм, а затем уменьшается. В связи с этим при выборе оптимального w лучше ориентироваться на максимум $\Delta\tau$. Между тем A можно увеличить с 2,3 до 2,7 при этих диапазонах параметров.

Выше установлено, что оптимизация $\Delta\tau$ возможна при w и h в пределах от 0,2 до 0,7 мм. Вместе с тем, для более полной картины, этот диапазон расширен: для h от 0,1 до 1,5 мм с шагом 0,1 мм при w=0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1 мм. Зависимости $\Delta\tau$ от h при разных w приведены на рис. 4*а*. Видно, что максимум $\Delta\tau$ смещается влево с уменьшением w, а наибольший (1,33 нс/м) достигается при h=0,31 мм и w=0,2 мм.

Для оценки влияния диэлектрика на $\Delta\tau$ взяты ε_r=4,5; 9,8; 16 (FR-4, поликор и ФЛАН). Результаты при w=0,2 мм (найденный выше оптимум) представлены на рис. 4*б*. Виден рост $\Delta\tau$ с ростом ε_r: экстремумы $\Delta\tau$=1,33; 2,66; 3,82 нс/м при ε_r=4,5; 9,8; 16 соответственно. Все они для $h\approx$0,31 мм.

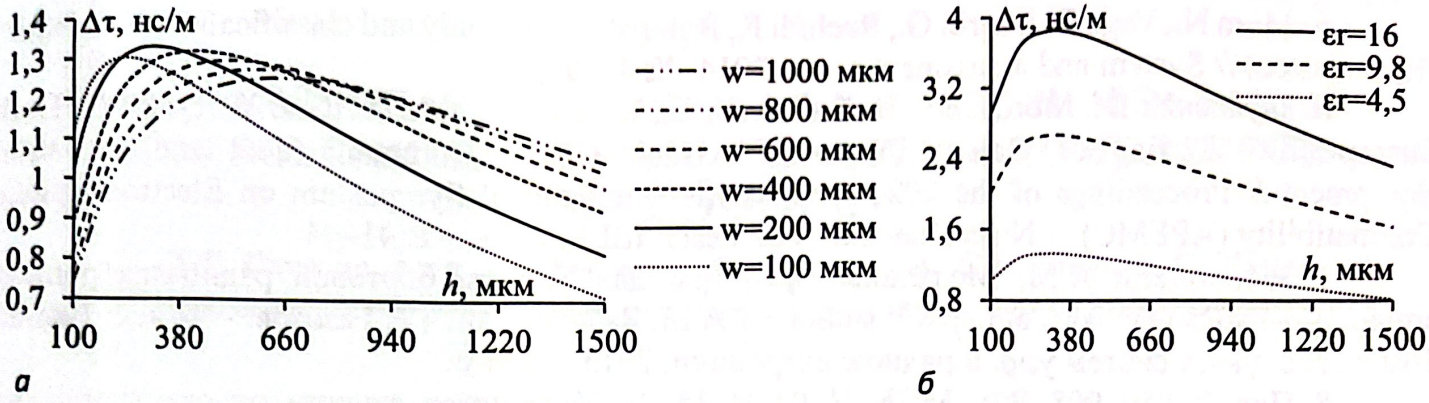


Рисунок 4 - Зависимости Δτ от h при разных w (*а*) и ε_r (*б*)

На рис. 5 показаны формы напряжения в узлах V_1, V_2, V_3 при исходных и оптимальных параметрах: h=0,31 мм и w=0,2 мм, ε_r=16. Видно, что исходный импульс раскладывается на 2 импульса с меньшей амплитудой, а Δτ=1,23; 3,82 нс/м.

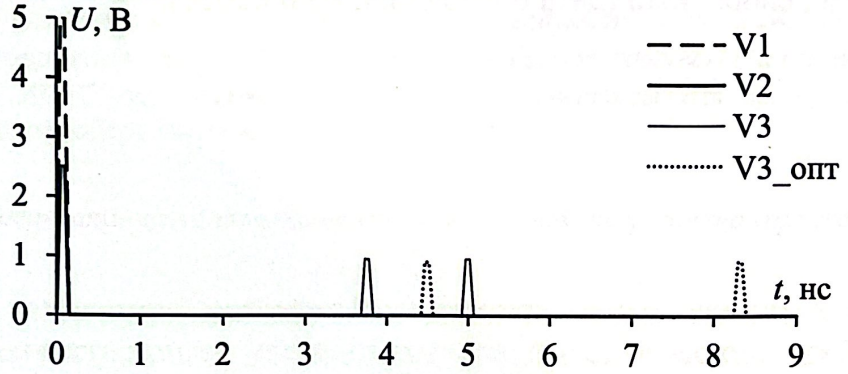


Рисунок 5 - Формы ЭДС (*V*1) и напряжения в начале (*V*2) и конце МФ до (*V*3) и после (*V*3_опт) оптимизации

Таким образом, проведен анализ зависимости A и Δτ от параметров поперечного сечения МФ с проводниками в одной плоскости на диэлектрической подложке и выявлена возможность максимизации Δτ. Чем больше ε_r, тем выше Δτ: вплоть до 3,82 нс/м при ε_r=16 и оптимальных h и w.

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

Литература

1. Li E.P., Wei X.C., Cangellaris A.C., Liu E.X., Zhang Y.J., D'Amore M., Kim J., Sudo T. Progress review of electromagnetic compatibility analysis technologies for packages, printed circuit boards, and novel interconnects // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2010. Vol. 52, no. 2. P. 248–265.

2. Газизов Т.Р. Преднамеренные электромагнитные помехи и авионика // Успехи современной радиоэлектроники. – 2004. – № 2. – С. 37–51.

3. Макаренко С.И. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 4. Функциональное поражение сверхвысокочастотным и лазерным излучениями // Системы управления, связи и безопасности. – 2020. – №3. – С. 122–157.

4. Белоусов А.О. Повышение помехозащищенности беспилотного летательного аппарата в условиях воздействия мощного электромагнитного излучения: комплексный подход / А.О. Белоусов, А.В. Носов // Системы управления, связи и безопасности. – 2025. – № 1. – С. 10–47.

5. Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources // System and assessment notes. 2014. № 41. 92p.

6. Tsyanenka D., Mordachev V., Sinkevich E., Galenko A., Ma X., Guo W.-Q. UWB EMP Susceptibility Testing of General-Purpose Electronic, Radio Communication, and Industrial Equipment // Proceedings of the 2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). – Nusa Dua-Bali, Indonesia: IEEE, 2021. – P. 41–44.

7. Заболоцкий А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата: моногр. / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2013. – 151 с.

8. Пат. 2 850 908 РФ, МПК H 04 B 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.

9. Система TUSUR.EMC – Программный комплекс для моделирования задач электромагнитной совместимости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://emc.tusur.ru/, свободный (дата обращения: 05.05.2026).