## СЕКЦИЯ 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ АВИАСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

**УДК 621.391.825**
**ДИНЬ Н.Т., ГАЗИЗОВ Т.Р.**
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

# МАКСИМИЗАЦИЯ РАЗНОСТИ ПОГОННЫХ ЗАДЕРЖЕК МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА С ПРОВОДНИКАМИ В ОДНОЙ ПЛОСКОСТИ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ

***Аннотация.*** *Вычислены зависимости разности погонных задержек ($\Delta\tau$) 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 $\Delta\tau$ с 1,23 до 3,82 нс/м. Это позволяет защиту от импульсов в 3 раза большей длительности.*

***Ключевые слова:*** *Авионика, электромагнитная совместимость, модальный фильтр, сверхкороткие импульсы, связанные полосковые линии.*

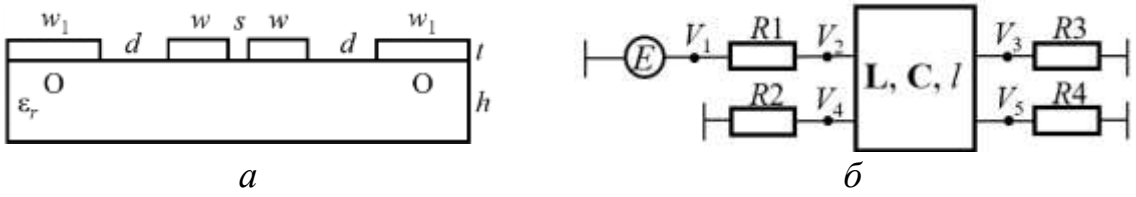
Современные тенденции развития авионики направлены на повышение их функциональных возможностей при одновременном уменьшении габаритов с ростом плотности монтажа. Это приводит к усложнению электромагнитной обстановки внутри неё и повышает актуальность обеспечения электромагнитной совместимости [1]. Отдельной проблемой стала защита авионики от преднамеренных электромагнитных помех [2]. Это стало особенно актуальным 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 СКИ 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, исходный импульс, воздействующий на входе защищаемого устройства, раскладывается на импульсы меньшей амплитуды.

Недавно запатентовано новое устройство защиты от СКИ в виде МФ с проводниками в одной плоскости на диэлектрической подложке [8], пока

очень мало исследованное. В работе [9] моделировалось влияние ряда геометрических параметров поперечного сечения на помехозащитные характеристики этого МФ. Между тем это сделано не в полном объёме, хотя возможности моделирования позволяют сделать это эффективнее эксперимента. Поэтому целью работы является более детальное моделирование влияния параметров поперечного сечения МФ на разность погонных задержек его мод ($\Delta\tau$) для её максимизации, повышающей длительность СКИ, разлагающегося в МФ полностью.

Моделирование выполнялось в системе TUSUR.EMC [10] 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 $\varepsilon_r$ – её относительная диэлектрическая проницаемость подложки. Исходные параметры [9]: $w$=1 мм, $w_1$=6 мм, $s$=0,2 мм, $d$=10 мм, $h$=0,5 мм, $t$=18 мкм, $\varepsilon_r$=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.




*а* *б*

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

В [9] 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: взята $h$ 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. 2. 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.

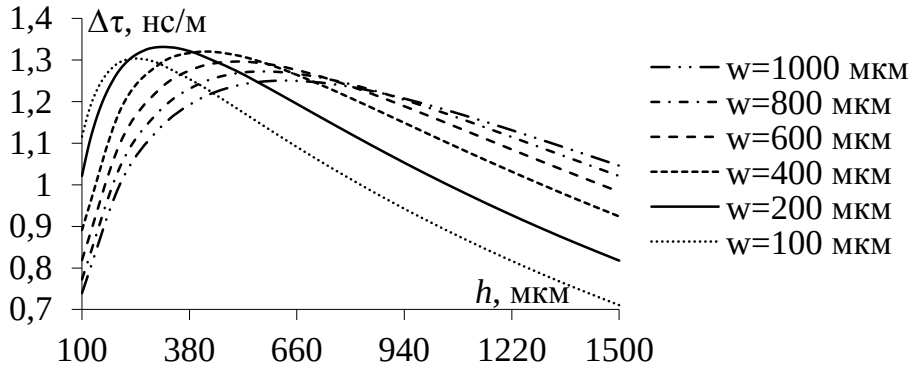



Рисунок 2 – Зависимости Δτ от $h$ при разных $w$

Далее исследованы зависимости $\tau_1$, $\tau_2$ и Δτ от $w_1$ и $d$ при изменении $w_1$ от 1 до 10 мм, а $d$ – от 5 до 15 мм. Полученные результаты представлены на рис. 3. Также приведены значения $\tau_1$ и $\tau_2$, соответствующие моментам прихода нечётной и чётной мод в точку $V_3$.

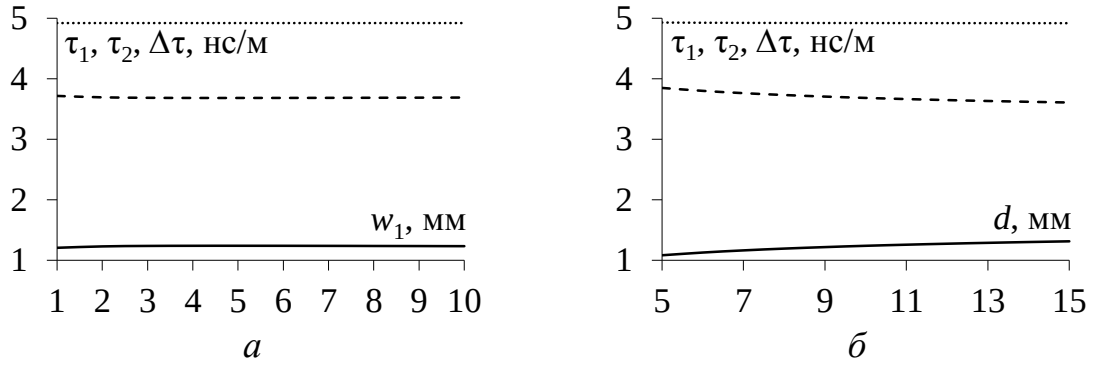



Рисунок 3 – Зависимости $\tau_1$ (---), $\tau_2$ (…) и Δτ (—) от $w_1$ (*а*) при $d$=10 мм и от $d$ (*б*) при $w_1$=6 мм

Из рис. 3*а* видно, что $w_1$ почти не влияет на Δτ. Из рис. 3*б* следует, что с ростом $d$, $\tau_2$ почти не меняется, а $\tau_1$ слабо снижается, что даёт малый рост Δτ. Следовательно, ростом $d$ можно повышать Δτ, хотя это может быть нецелесообразным с точки зрения конструкции устройства.

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

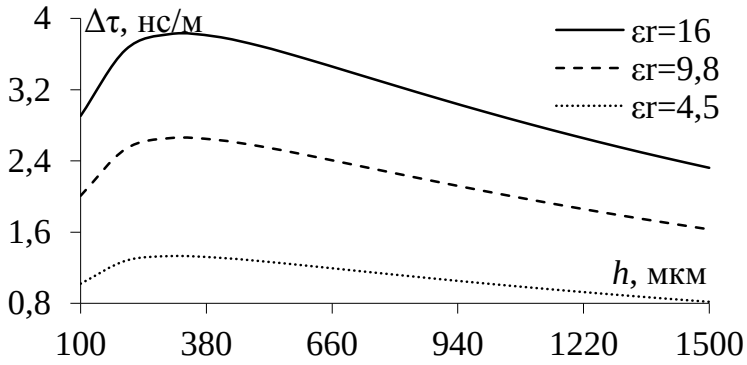



Рисунок 4 – Зависимости Δτ от $h$ при разных $\varepsilon_r$

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

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

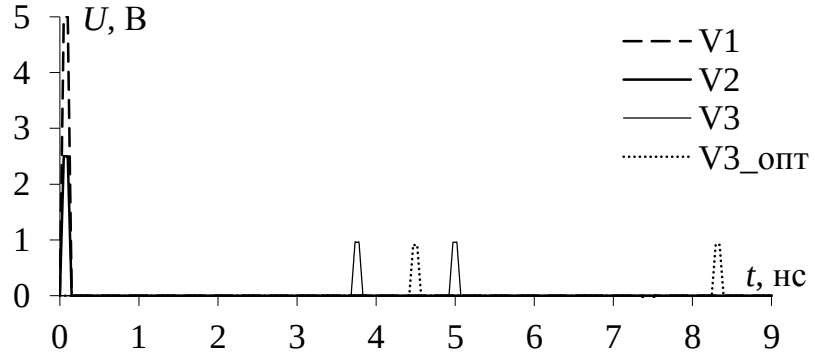



Рисунок 5 – Формы ЭДС (*V*1) и напряжения в начале (*V*2) и конце МФ до (*V*3) и после (*V*3_опт) оптимизации

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

*Список литературы*

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. 92 p.

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. Динь Н.Т. Анализ характеристик устройства защиты от сверхкоротких импульсов с проводниками в одной плоскости на диэлектрической подложке // XXXI Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР - 2026», Томск, Россия. – 2026. – В печати.

10. Система TUSUR.EMC – Программный комплекс для моделирования задач электромагнитной совместимости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://emc.tusur.ru/, свободный (дата обращения: 15.04.2026).

**УДК 641.45.026.8**

**ЗУБКО А.И.**
ОКБ им.А.Люльки филиал ПАО «ОДК-УМПО», г. Москва

# ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РОТОРНЫХ СИСТЕМ ГТД ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

***Аннотация**. В статье анализируется необходимость поэтапного комплексного подхода к формированию базы знаний или матрицы мод характеризующей текущее техническое состояние роторной системы и позволяющей анализировать тенденции его изменения. Его использование дает возможность построить тренд изменения диагностических параметров для составления прогноза периода исправного функционирования газотурбинного двигателя.*