

Международная академия наук высшей школы  
Академия наук высшей школы Российской Федерации  
Сибирская академия наук высшей школы  
Бурятский, Красноярский, Кузбасский, Новосибирский,  
Омский, Томский научные центры САН ВШ  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

# **Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-27-2021)**

27-я международная  
научно-практическая конференция

16 ноября 2021 г.  
г. Томск, Россия

**ДОКЛАДЫ**  
(материалы конференции)

Томск  
Издательство ТУСУРа  
2021

В. П. КОСТЕЛЕЦКИЙ, аспирант каф. ТУ, ТУСУР, Томск  
Е. Б. ЧЕРНИКОВА, аспирант каф. ТУ, ТУСУР, Томск

## **МОДАЛЬНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ПАЧКИ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ В ЗЕРКАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ СТРУКТУРАХ**

Выполнено моделирование отклика модального фильтра (МФ) и меандровой линии (МЛ) с зеркальной симметрией поперечного сечения на воздействие пачки сверхкоротких импульсов (СКИ) с периодами повторения 0,5, 1 и 2 нс. Показано, что в исследуемых структурах пачка СКИ раскладывается на последовательность импульсов меньшей амплитуды. Выявлено, что при фиксированных значениях периода повторения и общей длительности каждого отдельного импульса из пачки их полное разложение возможно при периоде повторения не менее общей длительности последовательности импульсов разложения одного СКИ.

Радиоэлектронные средства (РЭС) разной степени сложности находят широкое применение в различных областях, в том числе военной, космической, телекоммуникационной и др., что приводит к обострению проблемы обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) [1]. Нарушение нормального функционирования РЭС в результате воздействия помех еще более актуализирует данную проблему. Если уровень помех слишком высок или оборудование не защищено должным образом, то нарушается электромагнитная обстановка в целом [2].

Одним из направлений обеспечения ЭМС является защита от кондуктивных помех, длительность которых находится в субнаносекундном диапазоне. Такие помехи носят название сверхкоротких импульсов [3]. Кроме того, серьезное внимание уделяют защите от преднамеренных электромагнитных воздействий. Поскольку традиционные защитные устройства обладают рядом недостатков (недостаточное быстродействие, паразитные параметры, сложность и дороговизна), актуален поиск новых подходов к защите от СКИ и их дальнейшее совершенствование.

Известна технология модальной фильтрации, исследуемая и применяющаяся для защиты от СКИ. Ее принцип основан на делении СКИ на импульсы меньшей амплитуды из-за разности задержек мод путем применения связанных линий передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением [4]. Предложен подход к совершенствованию модальной фильтрации за счет использования зеркальной симметрии. Он реализован в новых устройствах: зеркально-симметричном модальном фильтре [5] и зеркально-симметричной меандровой линии [6].

Основными параметрами СКИ являются максимальное значение амплитуды напряжения, длительность импульса и крутизна его фронта, вид и ширина спектра, а также количество следующих друг за другом импульсов и временные интервалы между ними [7]. Ранее при исследовании возможности разложения СКИ в зеркально-симметричных МФ и МЛ в качестве воздействия использовался одиночный импульс. Однако в реальной ситуации СКИ генерируются в виде пачки с определенной частотой следования или периодом повторения [8]. При этом вероятность ошибки возрастает с увеличением частоты повторения помехи [9]. В этой связи актуален анализ модального разложения пачки СКИ в зеркально-симметричных МФ и МЛ. Цель работы – выполнить такое исследование.

Моделирование выполнялось в ПО ADS 2020. Временные характеристики получены с помощью обратного преобразования Фурье [10]. Сначала были проведены измерения  $S$ -параметров исследуемых структур при помощи векторного анализатора цепей «Панорама» P4226 в частотном диапазоне от 10 МГц до 20 ГГц. Далее в ПО ADS задавалось двухпортовое устройство, определяемое частотными характеристиками, полученными при измерениях, после чего на его вход подавалось воздействие в виде пачки СКИ. Эквивалентные схемы зеркально-симметричных МФ и МЛ представлены на рисунках 1,а и б соответственно. Поперечное сечение приведено на рисунке 1,в, где  $w$  и  $t$  – ширина и толщина проводников (1075 мкм и 35 мкм);  $s$  – расстояние между проводниками (700 мкм);  $h$  – толщина диэлектрика (1000 мкм);  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость (4,5). В качестве воздействия выбран сигнал, состоящий из последовательности 4 импульсов с периодами повторения  $T$ , равными 0,5, 1 и 2 нс. Амплитуда каждого импульса равна 1 В, длитель-

ности фронта спада и плоской вершины – 50 пс, общая длительность  $t_{\Sigma} = 150$  пс.

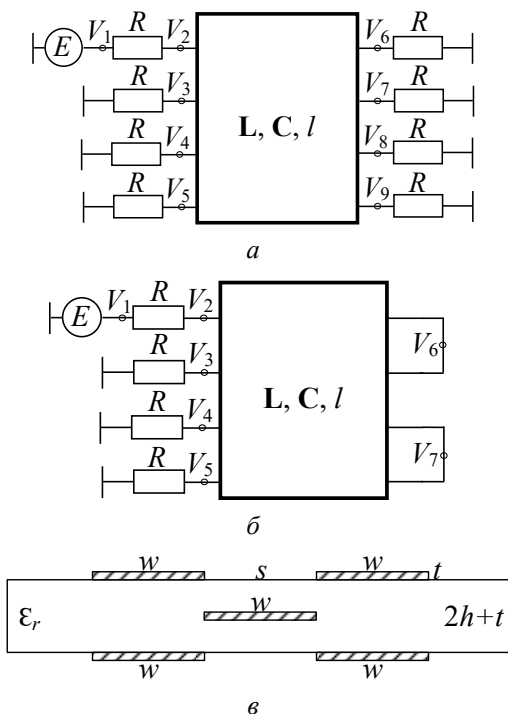


Рисунок 1 – Эквивалентные схемы зеркально-симметричных МФ (а) и МЛ (б) и их поперечное сечение (в)

На рисунке 2 представлены результаты моделирования зеркально-симметричных МФ и МЛ при воздействии пачки СКИ, а в таблице – амплитуды  $U_{\max}$  на выходе структур.

Из рисунка 2 следует, что при уменьшении значения  $T$  на выходе МФ и МЛ происходит наложение последовательностей импульсов разложения отдельных СКИ из пачки, что приводит к увеличению результирующего значения максимальной амплитуды.

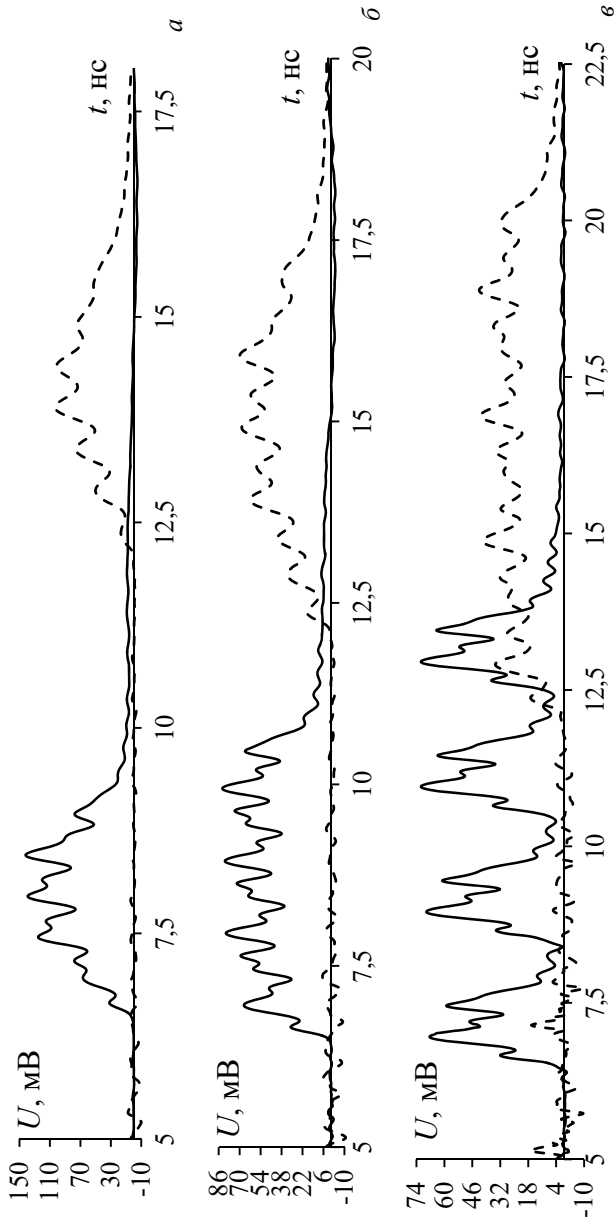


Рисунок 2 — Формы напряжений на выходе зеркально-симметричных МФ (—) и МЛ (---) при воздействии пачки СКИ с периодами повторения 0,5 нс (*a*), 1 нс (*б*) и 2 нс (*в*)

## Амплитуды на выходе исследуемых структур

Период повторения импульсов в пачке СКИ, нс	0,5	1	2
$U_{\max}$ на выходе зеркально-симметричного МФ, мВ	141,39	82,27	69,45
$U_{\max}$ на выходе зеркально-симметричной МЛ, мВ	100,97	69,71	41,71

При периоде 2 нс наблюдается деление каждого импульса из пачки СКИ на отдельную последовательность импульсов разложения. На основании этого сделан вывод, что при фиксированных значениях  $T$  и длительности каждого отдельного импульса из пачки их полное разложение возможно, если значение  $T$  больше или равно общей длительности последовательности импульсов разложения одного СКИ.

Таким образом, зеркально-симметричный МФ ослабляет СКИ в 3,53; 6,08 и 7,19 раза, а зеркально-симметричная МЛ – в 4,95; 7,17 и 11,98 раза при  $T= 0,5, 1, 2$  нс соответственно. Более эффективное ослабление в зеркально-симметричной МЛ объясняется тем, что в ней временной интервал между импульсами разложения одного СКИ  $\Delta t$  в 2 раза больше, чем в МФ.

*Работа выполнена в рамках проекта FEWM-2020-0041  
Министерства науки и высшего образования России.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Kučera, M., Šebök, M. Electromagnetic compatibility analysing of electrical equipment // Diagnostic of electrical machines and insulating systems in electrical engineering (DEMISEE). 2016. P. 1–6.
2. Уилльямс, Т. ЭМС для разработчиков продукции. М.: Технологии, 2003. 540 с.
3. Study and classification of potential IEMI sources / N. Mora, F. Vega, G. Lugrin, F. Rachidi, M. Rubinstein // System and assessment notes. 2014, 8 July. N 41. 92 p.
4. Заболоцкий, А.М., Газизов, Т.Р. Теоретические основы модальной фильтрации // Техника радиосвязи. 2014. № 3. С. 79–83.
5. Using reflection symmetry to improve the protection of radio-electronic equipment from ultrashort pulses / E.B. Chernikova, A.O. Belousov, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Symmetry. 2019. Vol. 11(7), N 883. P. 1–25.

6. Черникова, Е.Б. Зеркально-симметричная меандровая линия, защищающая от сверхкоротких импульсов // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 280–293.

7. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / В.Д. Добыкин, А.И. Куприянов, В.Г. Пономарев, Л.Н. Шустов. М.: Вузовская книга, 2007. 468 с.

8. Макаренко, С.И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки: моногр. СПб.: Научно-технологические технологии, 2020. 337 с.

9. Три возможных механизма возникновения отказов электронных устройств в результате электромагнитного воздействия / Л.Н. Здухов, Ю.В. Парфенов, О.А. Тарасов, В.М. Чепелев // Технологии электромагнитной совместимости. 2018. № 2(65). С. 22–34.

10. Experimental time-domain study for bandpass negative group delay analysis with lill-shape microstrip circuit / R. Vauche, R.A.B. Meftteh, F. Haddad, J. Nebhen, W. Rahajandraibe, F. Wan, S. Lal-lechere, B. Ravelo // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 24155–24167.

V. P. Kosteletskii, E. B. Chernikova

### **Modal decomposition of a pack of ultrashort pulses in reflection symmetric structures**

Simulation of the response of the modal filter (MF) and the meander line (ML) with reflection symmetry of the cross-section to the excitation of a pack of ultrashort pulses (USPs) with periods of 0,5, 1 and 2 ns is performed. It is shown that in the investigated structures the packet of USP is decomposed into a sequence of pulses of lower amplitude. It was found that with fixed values of the period and the total duration of each individual pulse from the pack, their complete decomposition is possible with a period not less than the total duration of the sequence of pulses of the decomposition of one USP.

kosteletskiy.vp@gmail.com