

УДК 621.396.41

А.М. Лакоза, В.П. Костелецкий, А.М. Заболоцкий

## Вычисление временных откликов экранированного модального фильтра из двух каскадов в дифференциальном и синфазном режимах на воздействие типовых сверхкоротких импульсов

Представлены результаты квазистатического моделирования экранированного модального фильтра из двух каскадов (МФ), предназначенного для защиты радиоэлектронных средств в синфазном и дифференциальном режимах. Приведены временные отклики на выходе МФ при раздельном воздействии трех различных сверхкоротких импульсов.

**Ключевые слова:** модальный фильтр, сверхкороткий импульс, дифференциальный режим, синфазный режим, устройство защиты, радиоэлектронное средство.

В условиях современной электромагнитной обстановки радиоэлектронные средства (РЭС) все чаще подвергаются влиянию импульсных помех. На текущий момент известно большое количество помеховых воздействий с сверхшироким спектром, представленных сверхкороткими импульсами (СКИ) [1]. Компоненты спектра таких сигналов преодолевают традиционные средства защиты с небольшими потерями энергии импульса [2]. Уровни таких помеховых воздействий регламентируются стандартом ИЕС 61000-2-13 [3]. Различают два типа помех: дифференциальные и синфазные [4]. Уровень таких помех регулируется стандартом EN 55022 [5]. Для достижения требуемых стандартом уровней помехозащиты можно использовать устройства для борьбы с импульсными помехами, функционирующие за счет принципов модальной фильтрации [6]. К таким защитным устройствам относят модальные фильтры (МФ) и меандровые линии задержки [7, 8]. Среди МФ выделяют конфигурации, способные ослаблять помехи в обоих режимах воздействия, в частности – каскадные структуры, позволяющие дополнительно разделить каждый импульс на два импульса с меньшими амплитудами при условии удвоения длины последующих каскадов [9]. Также для улучшения защитных свойств активно применяют экранирующие корпуса [10]. Совокупное применение рассмотренных технических решений позволяет получить высокоэффективное устройство помехозащиты.

Цель работы – исследовать влияние формы СКИ на защитные свойства экранированного МФ из двух каскадов в дифференциальном и синфазном режимах.

### Параметры МФ и подходы к моделированию

Поперечное сечение экранированного МФ представлено на рис. 1. Параметры поперечного сечения:  $w$  – ширина пассивных и активных проводников;  $w_1$  – ширина опорных проводников;  $s$  – расстояние между торцами проводников;  $h_1$  – расстояние от проводников до экрана;  $h_2$  – толщина подложки;  $h_3$  – расстояние между подложками;  $t$  – толщина проводников;  $g$  – расстояние между проводниками и экраном;  $\epsilon_{r1}$ ,  $\epsilon_{r2}$  – относительные диэлектрические проницаемости. В работе приняты следующие значения геометрических параметров (мм):  $w = 3$ ,  $w_1 = 6$ ,  $s = 0,5$ ,

$h_1 = 6$ ,  $h_2 = 4,3$ ,  $h_3 = 3$ ,  $t = 0,035$ ,  $g = 4,2$ . Также принято  $\epsilon_{r1} = 1$  и  $\epsilon_{r2} = 4,7$ .

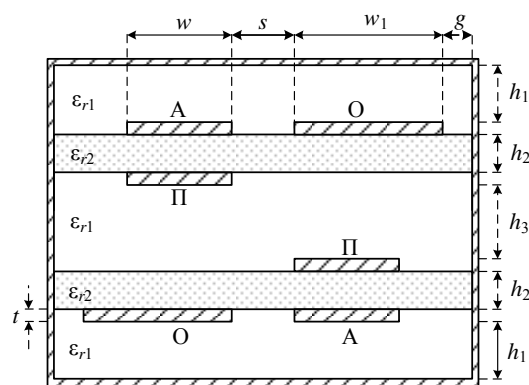


Рис. 1. Поперечное сечение экранированного МФ

В качестве тестовых воздействий использованы: оцифрованный сигнал с комбинированного вычислительного осциллографа С9-11 длительностью 300 пс и импульсные сигналы из стандарта МЭК 61000-2-13, соответствующие полупериоду и периоду синусоиды с длительностью 0,5 и 1 нс соответственно (далее – воздействия 1, 2 и 3). Формы ЭДС этих воздействий приведены на рис. 2.

На рис. 3 изображена схема электрических соединений МФ. Пассивные проводники соединены с электрическим экраном только на дальнем конце каждого каскада. МФ1 – первый каскад, а МФ2 – второй. Принято, что длина МФ1 110 мм, а МФ2 – 220 мм.

Для моделирования дифференциального режима между входными клеммами подключался генератор с внутренним сопротивлением 50 Ом, а между выходными клеммами – нагрузочное сопротивление 50 Ом. Для моделирования синфазного режима входные клеммы соединялись между собой перемычкой, к которой подключался генератор с внутренним сопротивлением 50 Ом. Выходные клеммы также соединялись перемычкой и подключались к нагрузочному сопротивлению 50 Ом.

### Результаты моделирования

Компьютерное моделирование выполнено без учета потерь в проводниках и диэлектриках. Вычислены матрицы коэффициентов электромагнитной (L)

и электростатической (С) индукций в системе TALGAT [11].

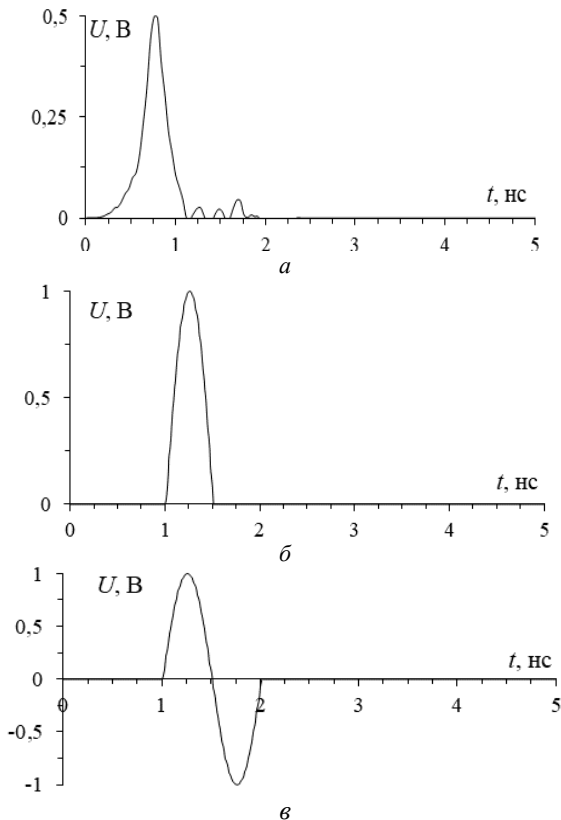


Рис. 2. Формы напряжений ЭДС импульсных воздействий: 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

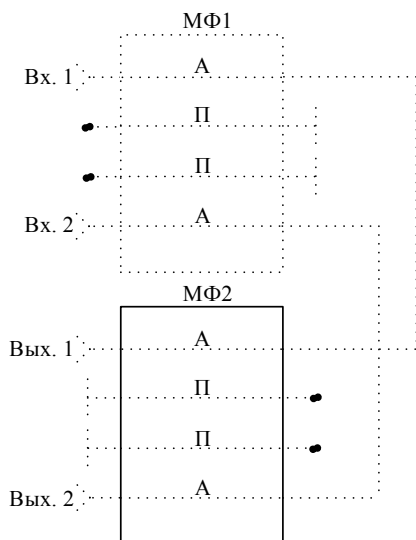


Рис. 3. Схема соединения МФ1 и МФ2: А и А' – активные проводники, П и П' – пассивные проводники

Вычисленные матрицы С и L имеют вид

$$C = \begin{bmatrix} 336,3 & -305,9 & -0,23 & -0,0176 \\ -305,9 & 337,6 & -2,2 & -0,23 \\ -0,23 & -2,2 & 337,6 & -305,9 \\ -0,0176 & -0,23 & -305,9 & 336,3 \end{bmatrix}, \text{ пФ/м,}$$

$$L = \begin{bmatrix} 315,8 & 243,7 & 21,9 & 17,6 \\ 243,7 & 315,1 & 27,3 & 21,9 \\ 21,9 & 27,3 & 315,1 & 243,7 \\ 17,6 & 21,9 & 243,7 & 315,8 \end{bmatrix}, \text{ нГн/м.}$$

На рис. 4 приведены полученные формы напряжения на выходе МФ при воздействии 1.

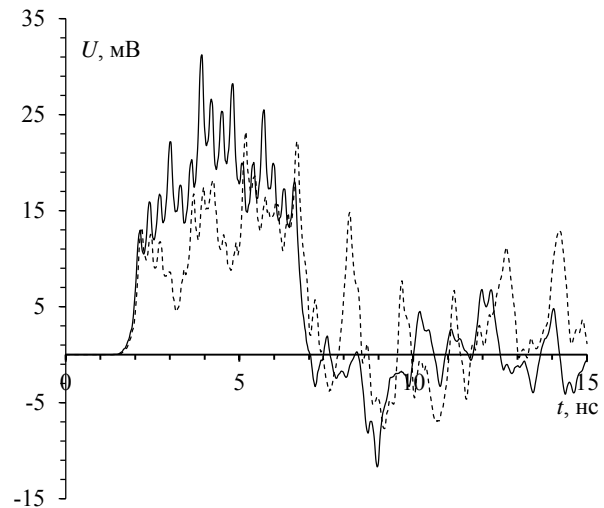


Рис. 4. Формы напряжения на выходе МФ в дифференциальном (—) и синфазном (---) режимах при воздействии 1

Максимальные напряжения импульсов на выходе МФ составили 31 и 23 мВ для дифференциального и синфазного режимов. Вычислены вносимые потери по выражению

$$\alpha = 20 \lg(U_1/U_2), \text{ дБ,} \quad (1)$$

где  $U_1, U_2$  – напряжения с и без МФ [12], которые составили 18,1 и 20,7 дБ соответственно.

На рис. 5 приведены формы напряжения на выходе МФ при воздействии 2. Максимальные напряжения импульсов составили 57 и 45 мВ, а вносимые потери составили 18,9 и 20,9 дБ для дифференциального и синфазного режимов соответственно.

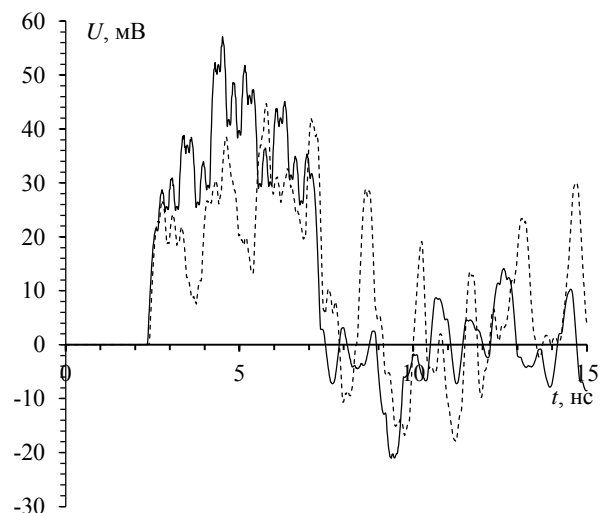


Рис. 5. Формы напряжения на выходе МФ в дифференциальном (—) и синфазном (---) режимах при воздействии 2

На рис. 6 приведены формы напряжения на выходе МФ при воздействии 3. Максимальные напряжения на выходе составили минус 38 и 44 мВ, а вносимые потери – 37,6 и 38,9 дБ для дифференциального и синфазного режимов соответственно.

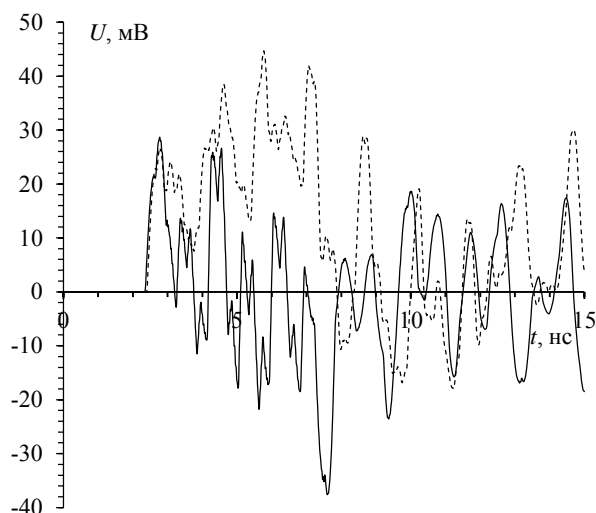


Рис. 6. Формы напряжения на выходе МФ в дифференциальном (—) и синфазном (---) режимах при воздействии 3

**Обсуждение результатов**

Результаты моделирования сведены в таблицу. Из таблицы видно, что МФ ослабляет все типы воздействий как в дифференциальном, так и синфазном режимах.

**Вносимые потери (дБ) в дифференциальном и синфазном режимах работы МФ**

Режим работы	Воздействие		
	1	2	3
Дифференциальный	18,1	18,9	37,6
Синфазный	20,7	20,9	38,9

**Заключение**

Вычислены временные отклики на выходе экранированного МФ из двух каскадов при воздействии трех видов СКИ в дифференциальном и синфазном режимах. Выявлено, что МФ способен ослаблять не только пикосекундные, но и наносекундные импульсы. Так, при воздействии оцифрованным сигналом с осциллографа С9-11 (длительность 300 пс) вносимые потери составили 18,1 и 20,7 дБ для дифференциального и синфазного режимов. При воздействии импульсными сигналами, соответствующими полупериоду и периоду синусоиды (длительность 0,5 и 1 нс), аналогичные значения составили 18,9; 20,9 дБ и 37,6; 38,9 дБ соответственно. Стоит отметить, что актуальность применения такого МФ обуславливается простотой его конструкции, что позволяет производить его в рамках типового технологического процесса печатных плат.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-70020.

*Литература*

1. Opperman I. UWB Theory and applications / I. Opperman, M. Hamalainen, J. Linatti. – Finland, university of Oula, 2004. – 250 p.

2. Weber T. Linear and nonlinear filters suppressing UWB pulses / T. Weber, R Krzikalla, J.L. Haseborg. // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2004. – Vol. 46, No. 3. – P. 423–430.

3. МЭК 61000-2-13. Электромагнитная совместимость. – Ч. 2-13: Окружающая среда. Электромагнитные среды высокой мощности (НРЕМ). Излучаемые и проводимые. – 2005. – 44 с.

4. Балюк Н.В. Электромагнитная совместимость технических средств подвижных объектов / Н.В. Балюк, В.Г. Болдырев, В.П. Булеков. – М.: МАИ, 2004. – 648 с.

5. СТБ EN 55022. Электромагнитная совместимость. Радиопомехи от оборудования информационных технологий. Нормы и методы измерений. – 2012. – 70 с.

6. Заболоцкий А.М. Новые решения для обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, И.Ф. Калимулин. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2016. – 288 с.

7. Газизов Т.Р. Сравнительный анализ двух видов новых устройств для защиты от электромагнитного терроризма // Матер. VII регион. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения». – 2018. – С. 623–625.

8. Заболоцкий А.М. Теоретические основы модальной фильтрации / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Техника радиосвязи. – 2014. – № 3. – С. 79–83.

9. Патент РФ на изобретение № 2748423. Авторы: Костелецкий В.П., Заболоцкий А.М. Полосковая структура, защищающая от сверхкоротких импульсов в дифференциальном и синфазном режимах. Заявка № 2020126543. Приоритет изобр. 10.08.2020. Опубл.: 25.05.2021. Бюл. № 15.

10. Кечиев Л.Н. Экранирование технических средств и экранирующие системы / Л.Н. Кечиев, Б.Б. Акбашев, П.В. Степанов. – М.: Группа ИДТ, Изд. дом «Технологии», 2010. – 472 с.

11. 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, No. 012110. – P. 1–7.

12. Кечиев Л.Н. Помехоподавляющие фильтры. Методы проектирования / Л.Н. Кечиев, А.Л. Бобков, П.В. Степанов. – М.: Моск. гос. ин-т электроники и математики, 1999. – 36 с.

**Лакоза Александр Михайлович**  
Аспирант каф. ТУ ТУСУРа  
ORCID: 0000-0002-0778-5037  
Эл. почта: alexandrlakoza@mail.ru

**Костелецкий Валерий Павлович**  
Аспирант, ассистент каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: kosteletskiy.vp@gmail.com

**Заболоцкий Александр Михайлович**  
Д-р техн. наук, доцент, проф. каф. ТУ ТУСУРа  
ORCID: 0000-0002-1801-7922  
Эл. почта: zabolotsky\_am@mail.ru