

УДК 621.391.825

## Полосковая структура, защищающая от сверхкоротких импульсов в дифференциальном и синфазном режимах

Костелецкий В. П., Заболоцкий А. М.

**Постановка задачи:** в настоящее время актуальной задачей является обеспечение защиты радиоэлектронных средств (РЭС) от импульсов наносекундного и субнаносекундного диапазонов. Спектр такого импульса перекрывает широкий диапазон частот, вследствие чего он способен преодолевать традиционные схемотехнические и конструктивные средства защиты от помех. Распространяясь по цепям электропитания, сверхкороткий импульс (СКИ) приводит к электрическому пробое диэлектриков и полупроводников, тем самым повреждая оборудование. Однако для борьбы с СКИ существуют устройства, работающие по принципу модального разложения, которые лишены недостатков традиционных устройств. Среди них выделяются модальные фильтры (МФ), защищающие от помех, распространяющихся между активным и опорным проводниками. Однако по стандартам ослабление помеховых импульсов требуется как в дифференциальном, так и в синфазном режимах, поэтому необходима разработка новых устройств защиты от СКИ, выполняющих данную функцию. **Цель работы:** предложить новое устройство защиты от СКИ на основе полосковых линий, способное работать в дифференциальном и синфазном режимах распространения помехи. **Используемые методы:** при обосновании технических решений и демонстрации возможности защиты от СКИ используется система квазистатического анализа, основанная на методе моментов. **Новизна:** к элементам новизны представленного решения относятся новый для МФ критерий, такой как защита в дифференциальном и синфазном режимах, а также новая конструкция МФ, реализующая эту защиту. **Результат:** использование представленного решения позволяет ослаблять помеховый сигнал в дифференциальном и синфазном режимах воздействия помехи. Результат достигается за счет разложения СКИ на импульсы меньшей амплитуды посредством выбора параметров устройства и компоновки проводников. **Практическая значимость:** техническое решение в виде МФ с центрально-симметричным расположением проводников позволит организовать простую и дешевую защиту РЭС от кондуктивных СКИ в дифференциальном и синфазном режимах.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, устройства защиты, сверхкороткий импульс, модальная фильтрация, синфазный режим, дифференциальный режим.

### Актуальность

Развитие электронных технологий приводит к увеличению плотности монтажа электронных компонентов. Одновременно увеличиваются рабочие частоты радиоэлектронных средств (РЭС) [1]. Вследствие вышеперечисленных факторов уменьшается вероятность сохранения работоспособности РЭС с заданным качеством в определенной электромагнитной обстановке [2]. Увеличивается опасность воздействия электронного оборудования друг на друга и связанные с этим нарушения функционирования РЭС. Это актуализирует обеспе-

#### Библиографическая ссылка на статью:

Костелецкий В. П., Заболоцкий А. М. Полосковая структура, защищающая от сверхкоротких импульсов в дифференциальном и синфазном режимах // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 2. С. 130-141. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-2-130-141.

#### Reference for citation:

Kosteletskii V. P., Zabolotsky A. M. Stripline Structure Protecting Against Ultrashort Pulses in Differential and Common Modes. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 2, pp. 130-141 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2021-2-130-141.

чение защиты РЭС от импульсов наносекундного и субнаносекундного диапазонов. Спектр таких сверхкоротких импульсов (СКИ) перекрывает широкий диапазон частот, вследствие чего СКИ способны преодолевать традиционные схемотехнические и конструктивные средства защиты от помех [3]. Защите от СКИ требуется уделять особое внимание, поскольку из-за малой длительности основная энергия источника воздействия расходуется на увеличение его амплитуды [4]. Распространяясь по цепям электропитания, СКИ приводит к электрическому пробое диэлектриков и полупроводников, тем самым повреждая оборудование. Под традиционными схемотехническими средствами защиты от СКИ подразумеваются фильтры на сосредоточенных компонентах, модули гальванической развязки, ограничители помех и разрядные устройства. К конструктивным средствам защиты относят защитные экраны, методы обеспечения регулярности линий передачи, различные схемы заземления и способы уменьшения импеданса цепей питания [5]. Известно, что такие устройства защиты обладают рядом недостатков, к которым можно отнести недостаточное быстродействие, малую рассеиваемую мощность и паразитные параметры. Все эти факторы затрудняют защиту от СКИ повышенной мощности.

Известно устройство для защиты от импульсных перенапряжений [6] с использованием шунтирующих устройств путем задержки воздействия наводок на защищаемые цепи радиотехнических устройств. В [7] описано устройство защиты от импульсных помех, содержащее кольцевые магнитопроводы с общей обмоткой, в которых э.д.с. синфазной помехи вычитаются. Другое устройство описано в [8] и содержит высоковольтный усилитель и два диодно-емкостных моста с нагрузочными сопротивлениями, обеспечивающих блокирование импульсных напряжений и токов, наводимых многократно повторяющимися мощными электромагнитными СКИ. В [9] описано устройство защиты, которое содержит две продольных ветви, образованных последовательно соединенными обмотками двух дросселей. С целью повышения эффективности и уменьшения энергопотребления, в каждую из ветвей введена дополнительная обмотка, общая для обоих дросселей. В работе [10] описано устройство защиты, в котором повышение качества фильтрации пиковых синфазных и дифференциальных помех достигается за счет того, что ко входным клеммам импульсного источника питания подключается входной помехоподавляющий фильтр, содержащий два конденсатора, подключенных ко входным и выходным клеммам предлагаемого фильтра, и синфазный дроссель, расположенный между данными конденсаторами. Устройство защиты от импульсных перенапряжений [11] предназначено для повышения электро- и пожаробезопасности при появлении в электроустановках зданий грозových импульсных перенапряжений большого уровня и содержит в себе варистор и термопредохранитель с нормально замкнутыми контактами. В [12] описано устройство, защищающее приемный тракт радиолокационных систем от мощного электромагнитного излучения за счет присутствия в схеме датчика такого излучения, который управляет разрядником и схемой формирования импульса поджига. Для защиты входа радиоприемника от электромагнитного импульса ядерного взрыва предлагается устройство [13], использующее трехсекционный автотрансформатор и за-

пирающую катушку. Известно устройство защиты [14], представляющее собой электрическую розетку, в которую введен высокочастотный сетевой фильтр и дополнительная клемма земли. Рассмотренные устройства имеют свои достоинства, но обладают рядом общих недостатков, таких как относительно высокие сложность и масса и низкие быстродействие, радиационная стойкость и наработка на отказ. Поэтому актуальна разработка новых устройств защиты от СКИ.

### Постановка задачи

Одним из подходов к защите РЭС от СКИ является модальная фильтрация. Она основана на использовании модальных искажений сигнала, возникающих в многопроводной линии передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением из-за разности задержек мод [15]. Разложение помехового импульса на последовательность импульсов меньшей амплитуды достигается, если длительность импульса меньше минимального модуля разности задержек мод. Количество импульсов разложения может равняться количеству мод [16]. Устройства, работающие по принципу модального разложения [17], лишены недостатков, традиционных средств защиты. Среди них выделяются различные конфигурации модальных фильтров (МФ) [18, 19, 20], защищающих от помех, распространяющихся между активным и опорным проводниками. Однако эти структуры не способны ослаблять помеховый сигнал в синфазном режиме. Между тем ослабление помеховых импульсов требуется как в дифференциальном, так и в синфазном режимах [21]. Для этого можно использовать МФ. Это МФ с лицевой связью, поперечное сечение и схема соединений которого изображены на рис. 1 и 2 [22]. Он, при оптимальных параметрах, обеспечивает наилучшее ослабление помеховых импульсов в условиях, когда подается тестовое воздействие между активным проводником и землей. Предлагается модифицировать такой МФ путем добавления в конструкцию еще одной структуры и электрического экрана. Цель работы – представить новое устройство, защищающее от СКИ в дифференциальном и синфазном режимах, на которое подана заявка на изобретение и получен патент [23].

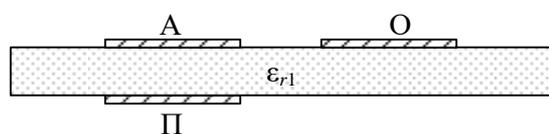


Рис. 1. Поперечное сечение МФ с лицевой связью [22]

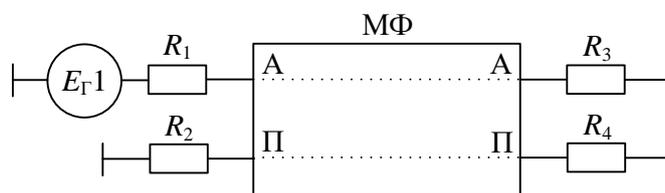


Рис. 2. Схема включения МФ с лицевой связью [22]

На рис. 3 приведена схема электрических соединений предлагаемого МФ. Она состоит из шести проводников одинаковой длины  $l = 100$  мм, источников импульсных сигналов, представленных идеальными источниками э.д.с.  $E_{Г1}$  и  $E_{Г2}$  с внутренними сопротивлениями  $R_{Г}$ , которые подсоединены к активным

проводникам на ближнем конце, и нагрузок сопротивлением  $R_H$ , которые подсоединены к активным проводникам на дальнем конце заявляемой структуры. Значения резисторов  $R_G$ ,  $R_H$ ,  $R_C$  равны 16,7 Ом. Два опорных проводника соединены с электрическим экраном вдоль всей длины, а пассивные проводники соединяются с экраном только на дальнем конце линии.

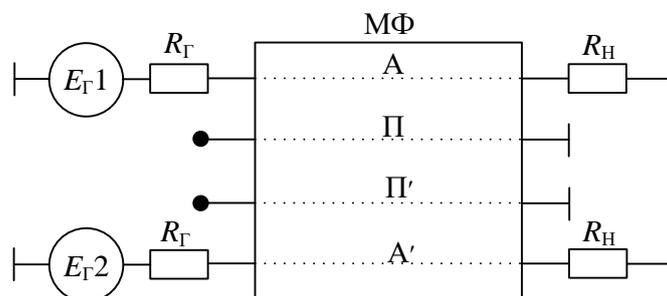


Рис. 3. Схема электрических соединений предлагаемого МΦ

На рис. 4 приведено поперечное сечение МΦ с параметрами:  $w$  – ширина активных и пассивных проводников,  $w_1$  – ширина опорных проводников,  $s$  – расстояние между проводниками,  $t$  – толщина проводников,  $h_2$  – толщина диэлектрических слоев,  $h_3$  – толщина воздушного зазора между слоями структурами,  $h_1$  – толщина воздушных зазоров в верхней и нижней частях структуры. Значения параметров:  $w = 10$  мм,  $w_1 = 18$  мм,  $t = 0,105$  мм,  $s = 2$  мм,  $h_1 = 10$  мм,  $h_2 = 0,18$  мм,  $h_3 = 2,54$  мм,  $\epsilon_{r1} = 1$ ,  $\epsilon_{r2} = 4,5$ . Параметры поперечного сечения выбирались по критериям допустимой токовой нагрузки, доступности материалов, уменьшения массы и напряжения на выходе МΦ.

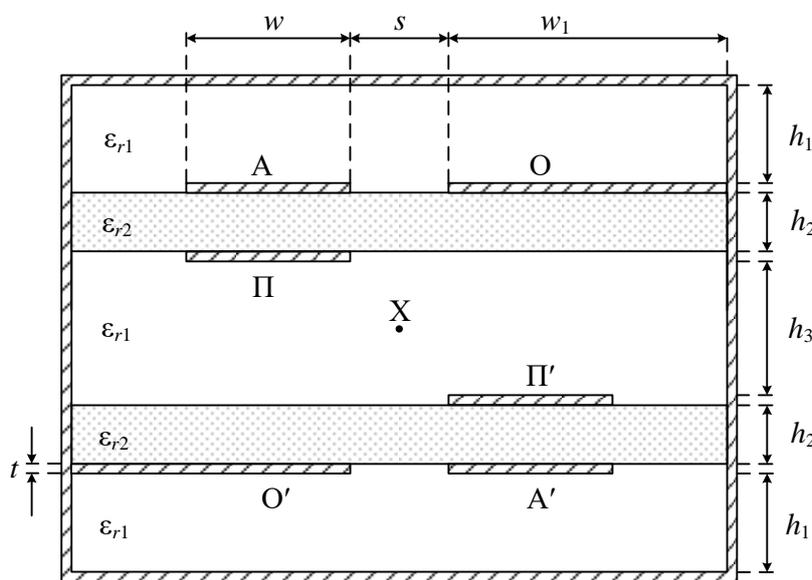


Рис. 4. Поперечное сечение предлагаемого МΦ

Исходная полосковая структура состоит из опорного проводника и двух параллельных ему проводников, а также диэлектрической среды, состоящей из диэлектрической подложки и окружающего воздуха. Опорный и активный проводники расположены на одной стороне диэлектрической подложки, а пассивный – на другой, симметрично активному. Значение минимального модуля раз-

ности погонных задержек мод линии, умноженное на длину линии, не меньше суммы длительностей фронта, плоской вершины и спада импульса, подающегося между сигнальным и опорным проводниками. Со стороны пассивного проводника через воздушный зазор расположена аналогичная структура центрально-симметрично относительно центра (точка X на рис. 4) корпуса всей структуры. Добавлен прямоугольный в поперечном сечении электрический экран. Ширина опорных проводников больше ширины остальных, а их внешняя торцевая сторона соединена по всей длине с экраном. Между экраном и проводниками в верхней и нижней частях структуры есть одинаковые воздушные зазоры. Все проводники расположены на одинаковом расстоянии от вертикальной оси, проходящей через центр симметрии.

Результатом является способность ослаблять помеховый сигнал в дифференциальном и синфазном режимах воздействия помехи. Он достигается за счет разложения СКИ на импульсы меньшей амплитуды с помощью выбора параметров устройства и компоновки проводников.

### Моделирование устройства

Моделирование многопроводного МФ в дифференциальном и синфазном режимах работы подразумевает вычисление временного отклика. Оно выполнено в программном обеспечении TALGAT 2019 [24] посредством квазистатического подхода [25]. Сначала строится геометрическая модель поперечного сечения исследуемых структур МФ. После вычисляются матрицы первичных погонных параметров **L** и **C**:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1255,61 & -1229,91 & -0,521 & -0,137 \\ -1229,91 & 1275,31 & -1,324 & -0,521 \\ -0,521 & -1,324 & 1275,31 & -1229,91 \\ -0,137 & -0,521 & -1229,91 & 1255,61 \end{bmatrix} \text{ пФ/м;}$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 197,309 & 172,964 & 7,860 & 7,647 \\ 172,964 & 186,716 & 8,074 & 7,860 \\ 7,860 & 8,074 & 186,716 & 172,964 \\ 7,647 & 7,860 & 172,964 & 197,309 \end{bmatrix} \text{ нГн/м.}$$

Затем вычисляются матрица импедансов **Z** и вектор погонных задержек мод **τ**:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 52,842 & 49,311 & 1,985 & 1,958 \\ 49,311 & 51,308 & 2,012 & 1,985 \\ 1,985 & 2,012 & 51,308 & 49,311 \\ 1,958 & 1,985 & 49,311 & 52,842 \end{bmatrix} \text{ Ом;}$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,57723 \\ 3,60731 \\ 6,89045 \\ 6,89066 \end{bmatrix} \text{ нс/м.}$$

Далее составлялась схема соединений МФ (рис. 3), задавались номиналы сопротивлений  $R_r, R_n, R_c$ , а также входные воздействия, в форме трапециевидного СКИ с длительностью фронта, спада и плоской вершины по 100 пс. Амплитуда э.д.с. источника СКИ изменялась в зависимости от режима: для дифференциального  $E_{r1} = 0,5 \text{ В}$  и  $E_{r2} = -0,5 \text{ В}$ , а синфазного –  $E_{r1} = 1 \text{ В}$  и  $E_{r2} = 1 \text{ В}$ .

На рис. 5 представлены результаты вычислительного эксперимента, из которых видно ослабление воздействующего СКИ за счет его разложения на импульсы меньшей амплитуды. В таблицу 1 сведены задержки импульсов разложения.

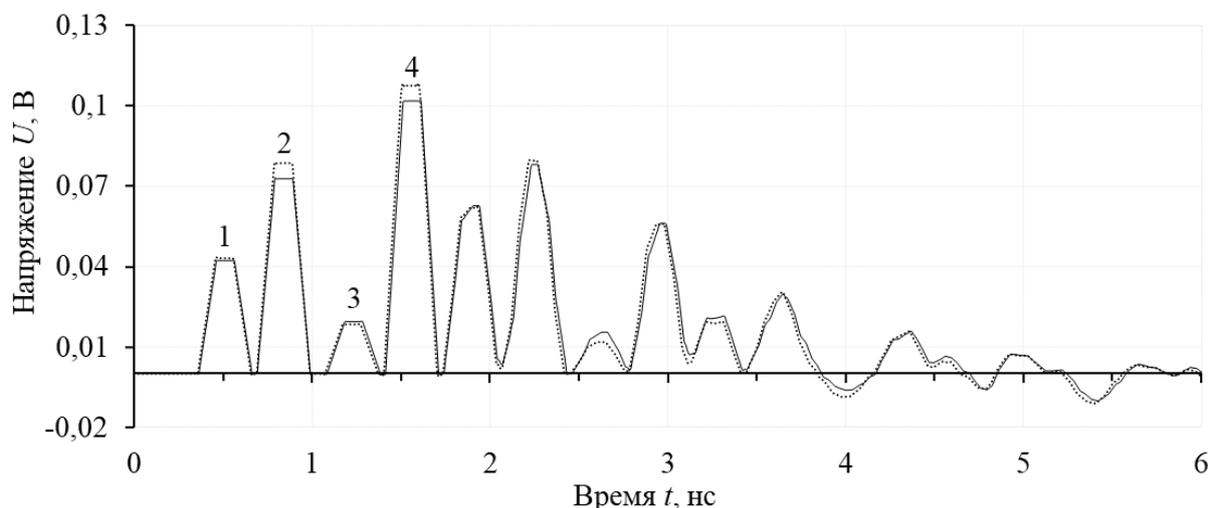


Рис. 5. Формы напряжения на выходе МФ в дифференциальном (...) и синфазном (—) режимах

Таблица 1 – Задержки импульсов разложения на выходе МФ

№ импульса	Время прихода импульса, нс
1	$0,358 = l\tau_1$
2	$0,689 = l\tau_3$
3	$1,073 = 3l\tau_1$
4	$1,404 = 2l\tau_1 + l\tau_3$

Благодаря модальным эффектам и симметрии, свойственны предлагаемому МФ, амплитуды импульсов мод 2 и 4 равны нулю. Тогда из анализа полученных данных следует, что импульс 1 с задержкой  $l\tau_1$  – импульс моды 1, импульс 2 с задержкой  $l\tau_3$  – импульс моды 3, импульс 3 с задержкой  $3l\tau_1$  – двойное отражение импульса моды 1, импульс 4 – суперпозиция с линейной комбинацией задержек  $2l\tau_1 + l\tau_3$ . Максимальное напряжение импульсов на выходе состави-

ло 107 мВ для дифференциального и 101 мВ для синфазного режимов, так что вносимые потери составили 13,4 дБ и 13,9 дБ соответственно. Таким образом, разложение СКИ на импульсы меньшей амплитуды происходит в дифференциальном и синфазном режимах.

### Выводы

Представлено устройство, защищающее от СКИ в дифференциальном и синфазном режимах. Оно отличается от традиционных защитных устройств отсутствием радиоэлектронных компонентов. Вместо них используются специальным образом расположенные проводники отрезка линии передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением. Традиционные средства защиты от СКИ поглощают или отражают помеховый импульс, в то время как предлагаемый МФ раскладывает его на последовательность импульсов меньшей амплитуды за счет разности задержек мод, а затем частично отражает их. Представленное защитное устройство позволяет не использовать полупроводниковые компоненты в своем составе, что наделяет его рядом положительных качеств, таких как устойчивость к перегрузкам, вибрации, влажности, перепаду температур, радиационному воздействию. Примечательна и низкая стоимость изготовления из-за простоты конструкции, так как для этого достаточно типового технологического процесса изготовления печатных плат. В отличие от других устройств защиты от СКИ, работающих на принципе модального разложения, предложенная структура способна осуществлять защитные функции в дифференциальном и синфазном режимах. Так, для дифференциального режима вносимые потери составили 13,4 дБ а для синфазного – 13,9 дБ.

На основе полосковой структуры, защищающей от СКИ в дифференциальном и синфазном режимах, планируется разработка защитного устройства, которое позволит усилить ослабление помехового сигнала и расширить диапазон рабочих частот за счет гибридизации МФ и фильтра на сосредоточенных компонентах.

*Работа выполнена в рамках проекта FEWM–2020–0041.*

### Литература

1. Ефанов В. И., Тихомиров А. А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем. Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 228 с.
2. Kučera M., Šebök M. Electromagnetic compatibility analysing of electrical equipment. // Diagnostic of electrical machines and insulating systems in electrical engineering (DEMISEE). 2016. P. 104–109.
3. Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F, Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources // System design and assessment notes. 2014. Note 41. P. 1–93.

4. Mojert C. UWB and EMP susceptibility of microprocessors and networks. 14th International Zürich Symposium & Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility. 2001. P. 47–52.

5. Гизатуллин З. М. Помехоустойчивость средств вычислительной техники внутри зданий при широкополосных электромагнитных воздействиях: Монография. – Казань: Издательство Казанского государственного технического университета, 2012. – 254 с.

6. Гришук В. И., Черноусов В. В., Грибанов С. Н. Устройство для защиты средств связи от импульсных перенапряжений // Патент на изобретение SU 1840153 A1, опубл. 20.07.2006, бюл. №20.

7. Джус И. Н. Синфазный фильтр импульсного преобразователя // Патент на изобретение RU 2 658 905 C1, опубл. 26.06.2018, бюл. №18.

8. Попов П. В., Кропоткин Д. В., Пуха Г. П., Катанович А. А. Устройство защиты приемопередающего радиоэлектронного оборудования от воздействия последовательности мощных сверхкоротких электромагнитных импульсов // Патент на изобретение RU 118118 U1, опубл. 10.07.2012, бюл. №19.

9. Долгов В. К., Гарцман Ф. М. Помехоподавляющий фильтр // Патент на изобретение SU 837280 A1, опубл. 23.03.1984.

10. Моргунов Д. Н., Машков С. В., Васильев С. И. Фильтр входной помехоподавляющий // Патент на изобретение RU 193304 U1, опубл. 23.10.2019, бюл. №4.

11. Шварц Г. К., Грунский Г. И., Новиков О. В. Устройство защиты от импульсных перенапряжений // Патент на полезную модель RU 56733 U1, опубл. 10.09.2006, бюл. №16.

12. Карельский И. Н., Нестеров А. А. Устройство защиты приемного тракта РЛС от мощного электромагнитного излучения // Патент на полезную модель № 0098103128, опубл. 01.27.1999.

13. Веселов Д. А., Пониматкин В. Е., Сычугов В. А., Вихлянцев А. А., Шакиров П. А. Устройство защиты входа радиоприемника от электромагнитного импульса ядерного взрыва // Патент на изобретение RU 96 106 554 A, опубл. 27.07.1998.

14. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р. М. Электрическая розетка с защитой от помех // Патент на изобретение H01R 13/66, опубл. 10.04.2012.

15. Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. New approach to EMC protection. – IEEE, Munich. 2007. pp. 273–276.

16. Газизов Т. Р., Заболоцкий А. М. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов // Технологии ЭМС. 2006. № 4. С. 40–44.

17. Заболоцкий А. М., Газизов Т. Р., Калимулин И. Ф. Новые решения для обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата. Монография. – Томск: ТУСУР, 2016. – 288 с.

18. Заболоцкий А. М., Газизов Т. Р., Куксенко С. П. Четырехпроводная зеркально-симметричная структура, защищающая от сверхкоротких импульсов // Патент на изобретение RU 2015 137 546 A, опубл. 09.03.2017, бюл. №07.

19. Газизов Т. Р., Заболоцкий А. М., Бевзенко И. Г., Самотин И. Е., Орлов П. Е., Мелкозеров А. О., Газизов Т. Т. Куксенко С. П., Костарев И. С. Устройство защиты от импульсных сигналов // Патент на изобретение RU 2 431 912 С1, опубл. 20.10.2011, бюл. №29.

20. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. UWB pulse decomposition in simple printed structures // Institute of electrical and electronics engineers transactions on electromagnetic compatibility. 2016. Vol. 58. № 4. pp. 1136–1142.

21. Miloudi M., Bendaoud A., Miloudi H., Nemmich S., Slimani H. Analysis and reduction of common-mode and differential-mode EMI noise in a Flyback switch-mode power supply (SMPS) // 20th Telecommunications Forum (TELFOR). 2012. P. 1080-1083.

22. Газизов А. Т., Заболоцкий А. М., Газизов Т. Р. Измерение и моделирование временного отклика печатных модальных фильтров с лицевой связью // Радиотехника и электроника. 2018. № 3. С. 292-298.

23. Костелецкий В. П., Заболоцкий А. М. Полосковая структура, защищающая от сверхкоротких импульсов в дифференциальном и синфазном режимах // Заявка № 2020126543. Приоритет изобретения 10.08.2020.

24. Kuxsenko S. P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560. № 012110. P. 1-7.

25. Куксенко С. П., Газизов Т. Р. Усовершенствование алгоритма вычисления методом моментов емкостных матриц структуры проводников и диэлектриков в диапазоне значений диэлектрической проницаемости // Электромагнитные волны и электронные системы. 2012. № 10. С. 13-21.

### References

1. Efanov V. I., Tihomirov A. A. *Elektromagnitnaya sovместimost' radioelektronnyh sredstv i system. Uchebnoe posobie* [Electromagnetic compatibility of electronic devices and systems. Tutorial]. Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2012. 228 p. (in Russian).

2. Kučera M., Šebök M. Electromagnetic compatibility analysing of electrical equipment. *Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering (DEMISEE)*, 2016, pp. 104–109.

3. Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and Classification of Potential IEMI Sources. *System Design and Assessment Notes*, 2014, note 41, pp. 1-93.

4. Mojert C. UWB and EMP susceptiblity of microprocessors and networks. *14th International Zürich Symposium & Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility*, 2001, pp. 47–52.

5. Gizatullin Z. M. *Pomekhoustojchivost' sredstv vychislitel'noj tekhniki vnutri zdaniy pri širokopolosnyh elektromagnitnyh vozdeystviyah. Monografija* [The Immunity of Computer Equipment inside Buildings with Broadband Electromagnetic Effects. Monography]. Kazan, Kazan State Technical University Publ., 2012. 254 p. (in Russian).

6. Grishchuk V. I., Chernousov V. V., Gribanov S. N. Device for protection of communication means against impulse overvoltages. Patent Russia, no. SU 1840153 A1. Publish. 20.07.2006, bul. no. 20. (in Russian).

7. Dzhus I. N. Common-mode filter of a pulse converter. Patent Russia, no. RU 2 658 905 C1. Publish. 06.26.2018, bul. no. 18. (in Russian).

8. Popov P. V., Kropotkin D. V., Pukha G. P., Katanovich A. A. A device for protecting transeiving radio-electronic equipment from the effects of a sequence of powerful ultrashort electromagnetic pulses. Patent Russia, no. RU 118118 U1. Publish. 10.07.2012, bul. no. 19. (in Russian).

9. Dolgov V. K., Gartsman F. M. Noise suppression filter. Patent Russia, no. SU 837280 A1. Publish. 03.23.1984. (in Russian).

10. Morgunov D. N., Mashkov S. V., Vasiliev S. I. Input noise suppression filter. Patent Russia, no. RU 193304 U1. Publish. 10.23.2019, bul. no. 4. (in Russian).

11. Shvarts G. K., Grunsky G. I., Novikov O. V. Surge protection device. Patent Russia, no. RU 56733 U1, Publish. 10.09.2006, bul. no. 16. (in Russian).

12. Karelsky I. N., Nesterov A. A. Device for protecting the receiving path of the radar from powerful electromagnetic radiation. Patent Russia, no. 0098103128, Publish. 01.27.1999. (in Russian).

13. Veselov D. A., Ponimatkin V. E., Sychugov V. A., Vikhlyantsev A. A., Shakirov P. A. Device for protection of radio receiver input from electromagnetic pulse of nuclear explosion. Patent Russia, no. RU 96 106 554 A, Publish. 27.07.1998. (in Russian).

14. Gizatullin Z. M., Gizatullin R. M. Electrical socket with protection against interference. Patent Russia, no. H01R 13/66, Publish. 10.04.2012. (in Russian).

15. Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. New approach to EMC protection. *18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2007, pp. 273-276.

16. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M. *Modal'noe razlozhenie impul'sa v otrezkah svyazannykh linij kak novyj princip zashchity ot korotkih impul'sov* [Modal Pulse Decomposition in Segments of Coupling Lines as a New Principle of Protection Against Short Pulses]. *Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2006, vol. 18, no. 4, pp. 40-44 (in Russian).

17. Zabolotsky A. M., Gazizov T. R., Kalimulin I. F. *Novyye resheniya dlya obespecheniya elektromagnitnoy sovместимости bortovoy radioelektronnoy apparatury kosmicheskogo apparata* [New solutions to ensure electromagnetic compatibility of onboard radio-electronic equipment of spacecraft. Monography]. Tomsk, State University of Control Systems and Radioelectronics Publ., 2016. 299 p. (in Russian).

18. Zabolotsky A. M., Gazizov T. R., Kuksenko S. P. Four-wire mirror-symmetric structure protecting against ultrashort pulses. Patent Russia, no. RU 2015 137 546 A, Publish. 09.03.2017, bul. no. 07 (in Russian).

19. Gazizov T. R., Zabolotsky A. M., Bevzenko I. G., Samotin I. E., Orlov P. E., Melkozerov A. O., Gazizov T. T. Kuksenko S. P., Kostarev I. C. Device for protection against pulse signals. Patent Russia, no. RU 2 431 912 C1. Publish. 20.10.2011, bul. no. 29 (in Russian).

20. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. UWB Pulse Decomposition in Simple Printed Structures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no. 4, pp. 1136-1142.

21. Miloudi M., Bendaoud A., Miloudi H., Nemnich S., Slimani H. Analysis and reduction of common-mode and differential-mode EMI noise in a Flyback switch-mode power supply (SMPS). *2012 20th Telecommunications Forum (TELFOR)*. IEEE, 2012, pp. 1080-1083.

22. Gazizov A.T., Zabolotskiy A.M., Gazizov T.R. *Izmereniye i modelirovaniye vremennogo otklika pechatnykh modal'nykh fil'trov s litsevoy svyaz'yu* [Measuring and modeling the temporal response of printed modal filters with face coupling]. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics], 2018, Tomsk, no. 3, pp. 292-298 (in Russian).

23. Kosteletskiy V. P., Zabolotskiy A. M. Stripe structure protecting against ultrashort pulses in differential and common modes. Request no 2020126543. Priority of the invention 10.08.2020.

24. Kuksenko S. P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560, no. 012110, pp. 1-7.

25. Kuksenko S. P., Gazizov T. R. *Uovershenstvovaniye algoritma vychisleniya metodom momentov yemkostnykh matrits struktury provodnikov i dielektrikov v diapazone znacheniy dielektricheskoy pronitsayemosti* [Improvement of the algorithm for calculating the method of moments of capacitive matrices of the structure of conductors and dielectrics in the range of dielectric permittivity values]. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*, 2012. no. 10, pp. 13-21 (in Russian).

Статья поступила 21 апреля 2021 г.

### Информация об авторах

*Костелецкий Валерий Павлович* – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, устройства защиты, модальная фильтрация. E-mail: kosteletskiy.vp@gmail.com

*Заболоцкий Александр Михайлович* – доктор технических наук, доцент. Заведующий лабораторией фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость; численные методы, модальная фильтрация. E-mail: zabolotsky\_am@mail.ru

Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 40.

## Stripline Structure Protecting Against Ultrashort Pulses in Differential and Common Modes

V. P. Kosteletskii, A. M. Zabolotsky

**Statement of the problem:** Today, the problem of protecting radioelectronic equipment (REE) from pulses of nanosecond and subnanosecond ranges is of great concern. The spectrum of such pulses covers a wide range of frequencies; therefore, it is able to overcome the traditional schematic and structural means of protection against interference. Propagating through the power supply circuits, an ultrashort pulse (USP) leads to electrical destruction of dielectrics and semiconductors, thereby damaging equipment. To reduce USP impact, there are devices working on the principle of modal decomposition that are devoid of the disadvantages of traditional filtering techniques. Among them are modal filters (MF) that protect against interference propagating between the active and reference conductors. However, the EMC standards require that interference pulses are attenuated in both differential and common modes. Consequently, the development of new USP protection devices that perform this function is necessary. **Purpose of work:** The aim of this work is to propose a new USP protection device based on strip lines and capable of operating in differential and common modes of interference propagation. **Methods used:** To justify the technical solutions and demonstrate the efficiency of the proposed MF structure, we used a system of quasi-static analysis based on the method of moments. **Novelty:** The novelty of the presented solution includes a new criterion for the MF, namely the ability to provide protection in differential and common modes, as well as a new MF design that implements this protection. **Result:** The use of the proposed solution allows attenuating the interfering signal in differential and common modes by decomposing the USP into pulses of lower amplitude through the choice of device parameters and conductor configuration. **Practical relevance:** The technical solution in the form of the MF with a centrally symmetrical arrangement of conductors will allow for a simple and cheap protection of REE from conducted USPs in differential and common modes.

**Key words:** electromagnetic compatibility, protection devices, ultrashort pulse, modal filtration, common mode, differential mode.

### Information about Authors

*Valerii Pavlovich Kosteletskii* – Doctoral Student. Research Assistant of the Research Laboratory of Fundamental Research on Electromagnetic Compatibility. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility, protection devices, modal filtration. E-mail: kosteletskiy.vp@gmail.com

*Alexandr Mikhailovich Zabolotsky* – Dr. habil. of Engineering Sciences, Docent. Head of the Research Laboratory of Fundamental Research on Electromagnetic Compatibility. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility; numerical methods, modal filtration. E-mail: zabolotsky\_am@mail.ru

Address: Russia, 634035, Tomsk, Lenina prospect, 40.