

УДК 621.391.825

Полосковая структура с лицевой связью, защищающая от сверхкоротких импульсов в синфазном и дифференциальном режимах

Костелецкий В. П., Лакоза А. М., Черникова Е. Б.

Постановка задачи: в настоящее время наблюдается интенсивное распространение радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) во всех отраслях деятельности человека. Эксплуатация РЭА сопряжена с риском нарушений ее работы или отказами. От правильного функционирования РЭА зависит успех проекта, что накладывает дополнительные требования к надежности и обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС). С ростом быстродействия РЭА становится чувствительнее к импульсным помехам, ранее не оказывавшим значительного влияния на ее работу, но теперь способных приводить к функциональным сбоям и поражениям. Важным направлением ЭМС является защита РЭА от помех, проникающих в электронику по интерфейсным проводам и цепям питания. Наиболее опасным помеховым воздействием является сверхкороткий импульс (СКИ), характеризующийся малой длительностью воздействия и обладающий широким частотным спектром, в результате чего традиционные средства ограничения импульсных помех оказываются неэффективными. Для защиты от СКИ есть устройства, использующие модальные искажения, возникающие в линиях передачи из-за разности задержек мод: модальные фильтры (МФ) и защитные меандровые линии. Однако они исследовались ранее в основном в дифференциальном режиме. Между тем ослабление СКИ требуется, не только в дифференциальном, но и синфазном режимах. **Цель работы** – разработать новое устройство защиты от СКИ на основе планарных устройств защиты с лицевой связью, работающих за счет модальных искажений одновременно в синфазном и дифференциальном режимах. **Используемые методы:** квазистатический анализ методом моментов. **Новизна:** заключается в компактной топологии расположения проводников в поперечном сечении на одной подложке. **Результат:** небольшой рост ослабления помеховых сигналов как в синфазном, так и в дифференциальном режимах, при упрощении технологии его изготовления. Результат достигается за счет изменения электромагнитной связи между проводниками, расположением пассивных проводников с обеих сторон подложки и их расширением, применением комбинации на ближнем и дальнем концах номиналов оконечных нагрузок. **Практическая значимость:** МФ улучшает защиту РЭА от кондуктивных СКИ.

Ключевые слова: сверхкороткий импульс, электромагнитная совместимость, модальный фильтр, синфазный режим, дифференциальный режим, устройство защиты.

Актуальность

Современные электронные устройства характеризуются непрерывным ростом плотности компоновки элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) [1], а также увеличением ее рабочих частот. Эта тенденция является ключевым фактором повышения производительности РЭА, но при этом создает серьезные вызовы электромагнитной совместимости (ЭМС) [2]. С ростом плот-

Библиографическая ссылка на статью:

Костелецкий В. П., Лакоза А. М., Черникова Е. Б. Полосковая структура с лицевой связью, защищающая от сверхкоротких импульсов в синфазном и дифференциальном режимах // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 3. С. 159-169. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-3-159-169

Reference for citation:

Kosteletskii V. P., Lakoza A. M., Chernikova E. B. Broad-side coupling strip structure with face connection, protecting against ultrashort pulses in common-mode and differential modes. *Systems of Control, Communication and Security*, 2025, no. 3, pp. 159-169 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2025-3-159-169

ности компоновки растет взаимное влияние электронных устройств друг на друга, что может привести к нестабильной работе и функциональным сбоям. Кроме того, традиционные средства защиты от электромагнитных помех становятся менее эффективными, так как сверхкороткие импульсы (СКИ) с наносекундной и субнаносекундной длительностью могут преодолеть стандартные схемы защиты. СКИ представляют особую опасность, поскольку их малая длительность приводит к концентрации энергии в небольшом импульсе с высокой амплитудой [3]. Распространяясь по цепям электропитания приборов, такие импульсы могут влиять на полезные сигналы. Традиционные методы защиты от СКИ, такие как фильтры, модули гальванической развязки, ограничители помех и разрядные устройства, а также защитные экраны, регулярность линий передачи, заземление и уменьшение импеданса цепей питания, не всегда справляются с этой задачей [4]. Их недостаточная скорость, ограниченная мощность и паразитные характеристики делают их неэффективными против СКИ высокой мощности. Все эти факторы затрудняют защиту от СКИ.

Известно устройство защиты от импульсных помех [5], состоящее из цепи фазных и линейных конденсаторов, собранных в единую батарею, и обладающее малыми габаритами. В [6] описано гибридное устройство защиты, на основе экранированной полосковой структуры, соединенное на ближнем конце с линией электропитания, а на дальнем с LC-фильтром на пассивных компонентах, который соединен с защищаемым устройством. Защитные устройства [7, 8] представляет собой корпусной модульный помехоподавляющий фильтр в герметичном исполнении, в состав которого входят блоки активной защиты от перенапряжений, фильтрации и управления, а также набор встроенных Y-конденсаторов. В [9] представлено устройство, в составе которого, помимо индуктивно-емкостного фильтра, есть газовый разрядник. Известна конструкция активного ЭМП-фильтра на основе операционных усилителей, использующая принцип компенсации обратной связью по напряжению [10]. Существуют также различные миниатюрные [11-13] интегрированные устройства защиты в виде помехоподавляющих кабелей [14, 15], соединителей [16] и переходов [17, 18].

Рассмотренные устройства защиты от СКИ обладают определенными преимуществами, однако возможности их применения ограничены из-за сложности конструкции устройств защиты, низкой скорости реакции, незначительной стойкостью к радиационным воздействиям, наличия эффекта деградации радиоэлектронных компонентов, малой наработки на отказ и неспособность фильтрации помеховых импульсов в дифференциальном и синфазном режимах работы одновременно. Поэтому актуальна разработка новых и современных устройств защиты от СКИ с улучшенными характеристиками.

Постановка задачи

Модальная фильтрация защищает РЭА от СКИ. Она основана на искажениях помехового сигнала в многопроводных линиях передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением. Различия в задержках мод приводят к разложе-

нию входного помехового импульса на импульсы меньшей амплитуды при условии, что его длительность меньше минимальной разности задержек мод. Число импульсов может равняться числу мод [19]. Устройства на основе модального разложения, называемые модальными фильтрами (МФ), обладают рядом преимуществ, по сравнению с традиционными средствами защиты. Многие МФ имеют различные конфигурации для защиты от помех, распространяющихся между активным и опорным проводниками [20-22], работая только в одном режиме. Для защиты в двух режимах (синфазном и дифференциальном), предложен экранированный МФ с лицевой связью [23]. Его конструкция (рис. 1), обеспечивает оптимальное ослабление помеховых импульсов, но довольно сложна [24]. Поэтому предлагается снизить массу и упростить за счет отказа от электрического экрана путем реализации дополнительной структуры не через воздушный зазор, а на общем диэлектрическом основании. Цель работы – представить новое устройство защиты от СКИ на основе полосковых линий с лицевой связью, способное работать одновременно в синфазном и дифференциальном режимах, на которое получен патент на изобретение [25].

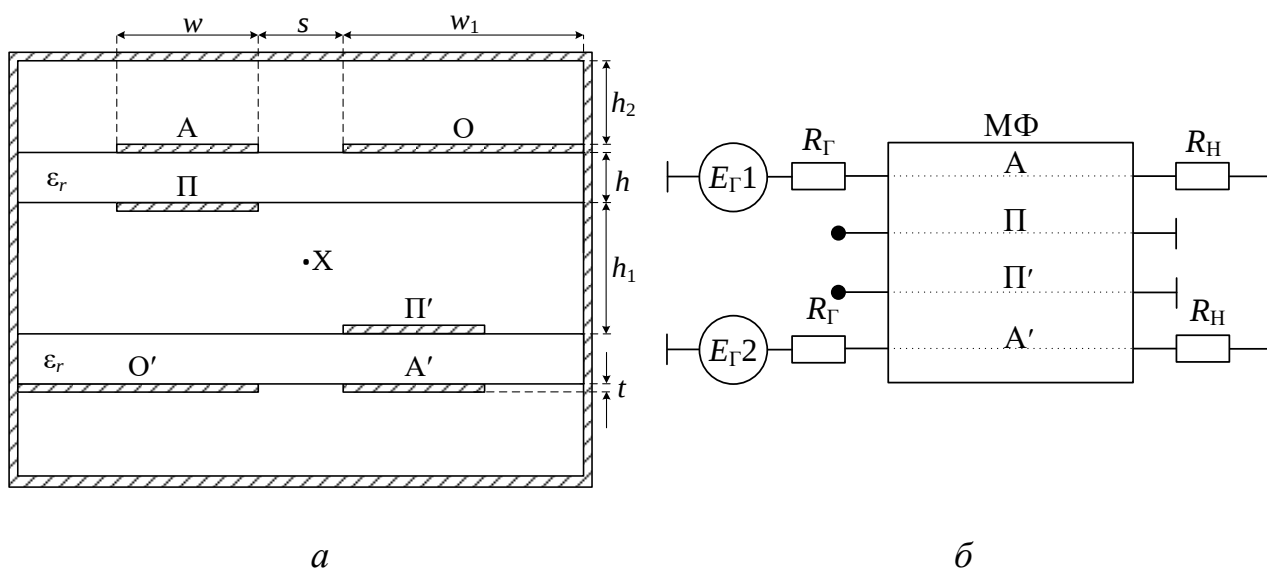


Рис. 1. Экранированный МФ с лицевой связью: поперечное сечение (а) и схема электрических соединений (б), где А, А' – активные, О, О' – опорные, П, П' – пассивные проводники [23]

Схемы электрических соединений предлагаемого и экранированного МФ одинаковы (рис. 1). Схема состоит из 6 проводников одинаковой длины $l = 100$ мм, два из которых (опорные О и О') представлены схемной землей, источников э.д.с. $E_{Г1}$ и $E_{Г2}$ с внутренними сопротивлениями $R_{Г} = 50$ Ом, подсоединенных к активным проводникам А и А' на ближнем конце, и сопротивлений $R_{Н} = 50$ Ом, – на дальнем конце заявляемой структуры. На ближних концах пассивных линий П и П' используются сопротивления 1 МОм (режим холостого хода (ХХ)), а на дальних – 1 мкОм (короткое замыкание (КЗ)). Воздействует трапецевидный импульс, с длительностями фронта, спада и плоской вершины по 100 пс, и амплитудой э.д.с. $E_{Г1} = E_{Г2} = 1$ В для синфазного режима и $E_{Г1} = 0,5$ В, $E_{Г2} = -0,5$ В для дифференциального.

На рис. 2 приведено поперечное сечение предлагаемого модифицированного МФ, где w – ширина проводников П, П' и А, А', s – разнос проводников, w_1 – ширина проводников О, О', g – защитный интервал от края структуры, t – толщина проводников, h – толщина диэлектрической подложки, ϵ_r – диэлектрическая проницаемость подложки. Значения параметров: $w = 10$ мм, $s = 2$ мм, $w_1 = 21$ мм, $g = 1$ мм, $t = 105$ мкм, $h = 0,36$ мкм, $\epsilon_r = 20$. Эти параметры выбирались по критериям допустимой токовой нагрузки, доступности материалов, уменьшения амплитуды импульсов на выходе МФ и снижения массогабаритных характеристик.

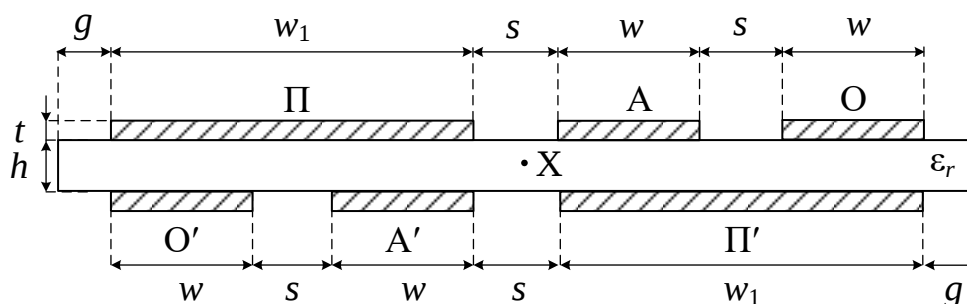


Рис. 2. Поперечное сечение модифицированного МФ, где А, А' – активные, О, О' – опорные, П, П' – пассивные проводники

МФ состоит из 2 центрально-симметричных (относительно точки X) частей. Каждая включает опорный (заземленный) проводник и 2 параллельных ему проводника, а также диэлектрическое окружение, подложка и воздух. На одной стороне подложки располагаются опорный и активный проводники, а на другой – пассивный, продленный до внешнего края опорного проводника.

Результатом является упрощение конструкции МФ при сохранении коэффициента ослабления в обоих режимах. Он достигается изменением электромагнитной связи между проводниками, за счет расположения пассивных проводников на обеих сторонах подложки и их расширения, комбинации на ближнем и дальнем концах резистивных нагрузок пассивных проводников, при сохранении центральной симметрии поперечного сечения относительно точки X.

Моделирование устройства защиты

Временные отклики в дифференциальном и синфазном режимах на выходе МФ получены квазистатическим моделированием [26] в программном обеспечении TUSUR.EMC [27]. Для этого создана геометрическая модель поперечного сечения исследуемого МФ. Далее, на ее основе, вычислены матрицы коэффициентов электромагнитной (**L**) и электростатической (**C**) индукции:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 74,04 & 3,87 & 35,90 & 5,20 \\ 3,87 & 38,01 & 2,69 & 35,90 \\ 35,90 & 2,69 & 38,01 & 3,87 \\ 5,20 & 35,90 & 3,87 & 74,04 \end{bmatrix} \text{ нГн/м; } \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 5063 & -14,6 & -5036 & -8,4 \\ -14,6 & 10112 & -11,6 & -5036 \\ -5036 & -11,6 & 10112 & -14,6 \\ -8,4 & -5036 & -14,6 & 5063 \end{bmatrix} \text{ пФ/м.}$$

Затем, из матриц **L** и **C** вычислены матрица характеристического импеданса (**Z**), а также вектор погонных задержек мод (**τ**):

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 5,38 & 0,16 & 2,64 & 0,22 \\ 0,16 & 2,73 & 0,11 & 2,65 \\ 2,65 & 0,11 & 2,73 & 0,16 \\ 0,22 & 2,64 & 0,16 & 5,38 \end{bmatrix} \text{ Ом;}$$

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 13,20 \\ 14,15 \\ 14,47 \\ 14,52 \end{bmatrix} \text{ нс/м.}$$

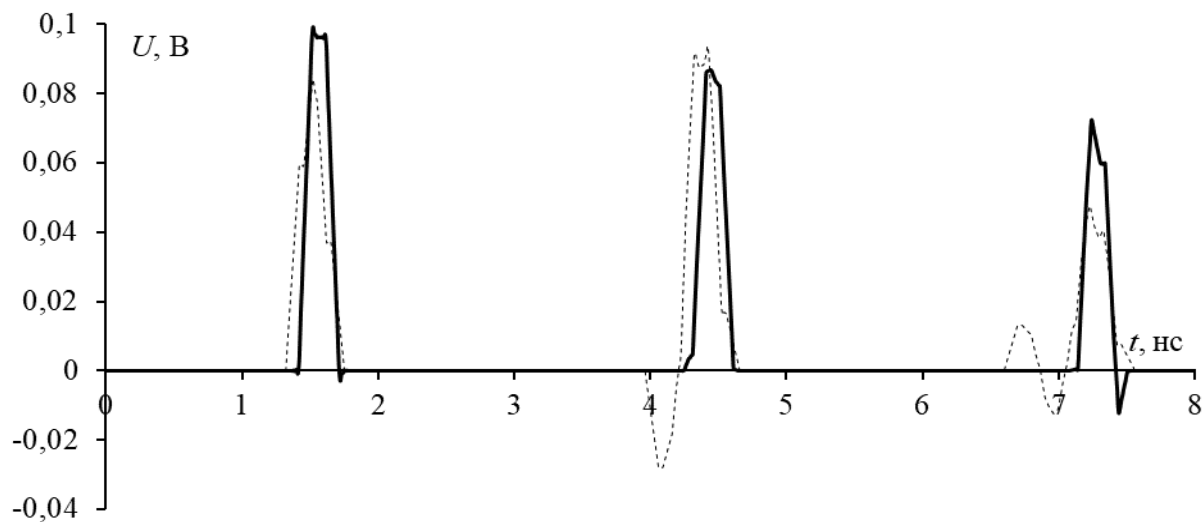


Рис. 3. Формы напряжения на выходе представленного МФ в синфазном (—) и дифференциальном (....) режимах

На рис. 3 представлены результаты вычисления временного отклика на выходе МФ в синфазном и дифференциальном режимах. Наблюдается ослабление воздействующего импульсного сигнала, за счет интерференции мод, а также частичного отражения на ближнем и дальнем концах МФ. Максимальные напряжения импульсов на выходе составило 99 мВ для синфазного и 93 мВ для дифференциального режимов, ослабление – 5 и 5,37 раза, а вносимые потери составили 14 дБ и 14,6 дБ соответственно. Для экранированного МФ из [24] аналогичные результаты составили 101 мВ для синфазного и 107 мВ для дифференциального режимов, ослабление – 4,95 и 4,67 раза, а вносимые потери составили 13,4 и 13,9 дБ соответственно. Таким образом у предлагаемого МФ они не хуже.

Заключение

Представлено новое устройство защиты от помеховых СКИ, работающее в синфазном и дифференциальном режимах. Его важной особенностью является отсутствие радиоэлектронных компонентов. Вместо них в конструкции использованы медные проводники, расположенные на общем диэлектрическом основании. Данный класс устройств защиты позволяет ослабить помеховый СКИ за счет его разложения на импульсы меньшей амплитуды. Модальное разложение обеспечивается неоднородным диэлектрическим заполнением в поперечном сечении устройства и сильной электромагнитной связью между проводниками, обеспечивающей разность задержек мод. Отсутствие радиоэлектронных компонентов, склонных к деградации и потере эксплуатационных характеристик, делает такой класс устройств устойчивым к внешним воздействи-

ям, например, ионизирующего излучения, вибраций или перегрузок, а также перепадам температур и влажности. Все это обеспечивает простоту конструкции устройства и снижение себестоимости, позволяя производить его в рамках типового технологического процесса изготовления печатных плат. Еще одной особенностью данного класса устройств является обеспечение защиты РЭА в дифференциальном и синфазном режимах одновременно. Уровни вносимых потерь составили 14,1 и 14,5 дБ, соответственно, что не хуже, чем у прототипа. В перспективе будет изготовлен макет МФ для экспериментального подтверждения результатов моделирования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01216, <https://rscf.ru/project/23-79-01216/> в ТУСУР.

Литература

1. Rachidi F., Rubinstein M. Electromagnetic Time Reversal: Application to Electromagnetic Compatibility and Power Systems. – Wiley-IEEE Press, 2017. – 350 p.
2. Седельников Ю. Е., Веденькин Д. А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств: учебное пособие для вузов. – М.: Юрайт, 2024. – 318 с.
3. Sekiguchi H., Seto S., Minematsul I. The Malfunction and Immunity limit of Information technology equipment under HPEM environments // 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2009. P. 69–72.
4. Костелецкий В. П. Обзор гибридных фильтров для защиты радиоэлектронных средств от кондуктивных помех // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2022. Т. 25. № 1. С. 37–47.
5. Джус И. Н. Конденсаторная батарея-фильтр // Патент на изобретение RU 2 746 260 C1, опубл. 12.04.2021, бюл. № 11.
6. Костелецкий В. П., Заболоцкий А. М. Усовершенствование устройства, защищающего от сверхкоротких импульсов в дифференциальном и синфазном режимах // Патент на изобретение RU 2 773 640 C1, опубл. 06.06.2022, бюл. № 16.
7. Жданкин В. Модули фильтрации и защиты от перенапряжений для питающих сетей постоянного тока // Современная электроника. 2014. № 2. С. 34–39.
8. Никитин М. Компактные ЕМІ-фильтры SynQor для гражданских и военных применений // Электронные компоненты. 2011. № 2. С. 12–17.
9. Борисенко Д. Н., Жохов А. А., Редькин Б. С. Индуктивно-емкостный фильтр // Патент на изобретение RU 2 741 069 C1, опубл. 22.01.2021, бюл. № 3.
10. Di Piazza M. C., Luna M, Vitale G. EMI reduction in DC-fed electric drives by active common-mode compensator // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2014. Vol. 56. No. 5. P. 1067–1076.

11. Джуринский К. Миниатюрные помехоподавляющие фильтры СВЧ диапазона частот // Современная электроника. 2023. № 8. С. 28–33.
12. Смирнов В. Ф., Шалаева А. А., Красильщиков М. Я. Керамический проходной помехоподавляющий фильтр // Патент на полезную модель RU 125 387 U1, опубл. 27.02.2013, бюл. № 6.
13. Кабанов А. А., Панюхин Ю. Н., Кузьмин В. А., Баканин Д. В. Фильтр помехоподавляющий миниатюрный резьбовой // Патент на полезную модель RU 211 781 U1, опубл. 22.06.2022, бюл. № 18.
14. Баранов И. А., Петров С. Н. Помехоподавляющий кабель // Патент на полезную модель RU 194 412 U1, опубл. 11.12.2019, бюл. № 24.
15. Чопенко А. А. Помехоподавляющий кабель питания // Патент на полезную модель RU 221 507 U1, опубл. 09.11.2023, бюл. № 31.
16. LTR-CMF. Синфазный помехоподавляющий фильтр // L-CARD [Электронный ресурс]. 10.03.2025. – URL: <https://www.lcard.ru/products/accesories/ltr-cmf> (дата обращения: 10.03.2025).
17. Дорохин А. В., Иванов П. Е., Стефанов И. А. Фильтр защиты опасных цепей ракеты // Патент на полезную модель RU 166 982 U1, опубл. 20.12.2016, бюл. № 35.
18. Копылов Д. А. Электрический соединитель со встроенными фильтрами нижних частот // Патент на изобретение RU 2 600 114 C2, опубл. 20.10.2016, бюл. № 22.
19. Заболоцкий А. М., Газизов Т. Р. Теоретические основы модальной фильтрации // Техника радиосвязи. 2014. № 3. С. 79–83.
20. Самойличенко М. А., Газизов Т. Р. Способ трассировки двухсторонней печатной платы для цепей с модальным резервированием // Патент на изобретение RU 2 762 336 C1, опубл. 20.12.2021, бюл. № 35.
21. Самойличенко М. А., Газизов Т. Р. Модифицированная микрополосковая линия с улучшенной защитой от сверхкоротких импульсов // Патент на изобретение RU 2 728 327 C1, опубл. 29.07.2020, бюл. № 22.
22. Самойличенко М. А., Газизов Т. Р. Зеркально-симметричный модальный фильтр на двухсторонней печатной плате, защищающий от сверхкоротких импульсов // Патент на изобретение RU 2 784 040 C1, опубл. 23.11.2022, бюл. № 33.
23. Костелецкий В. П., Заболоцкий А. М. Полосковая структура, защищающая от сверхкоротких импульсов в дифференциальном и синфазном режимах // Патент на изобретение RU 2 748 423 C1, опубл. 25.05.2021, бюл. № 15.
24. 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.
25. Костелецкий В. П., Лакоза А. М., Заболоцкий А. М., Нестеренко А. К. Полосковая структура с лицевой связью, защищающая от сверхкоротких импульсов в синфазном и дифференциальном режимах // Патент на изобретение RU 2 823 269 C1, опубл. 22.07.2024, бюл. № 21.

26. 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.

27. Куксенко С. П., Газизов Т. Р., Квасников А. А., Демаков В., Иванов А. А., Ключин Д. В., Алхадж Хасан А., Максимов А. Е., Осинцев А. В. Разработка программного обеспечения для моделирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости в ТУСУР // Наноиндустрия. 2023. Т. 16. № S9-1 (119). С. 170–178.

References

1. Rachidi F., Rubinstein M. *Electromagnetic Time Reversal: Application to Electromagnetic Compatibility and Power Systems*. Wiley-IEEE Press, 2017. 350 p.

2. Sedelnikov Yu. Ye., Vedenkin D. A. *Elektromagnitnaya sovместimost radioelektronnikh sredstv: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment: tutorial for universities]. Moscow, House Yurait Publ., 2024. 318 p. (in Russian).

3. Sekiguchi H., Seto S., Minematsul I. The Malfunction and Immunity limit of Information technology equipment under HPEM environments. *20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2009, pp. 69–72.

4. Kosteletskii V. P. Overview of hybrid filters for protection against conductive interference. *Proceedings of TUSUR Universit*, 2022, vol. 25, no. 1, pp. 37–47 (in Russian).

5. Dzhus I. N. Capacitor battery filter. Patent Russia, no. RU 2 746 260 C1. Publish. 12.04.2021, bul. no. 11 (in Russian).

6. Kosteletskii V. P., Zabolotskii A. M. Improvement of the device protecting against ultrashort pulses in differential and common mode. Patent Russia, no. RU 2 773 640 C1. Publish. 06.06.2022, bul. no. 16 (in Russian).

7. Zhdankin V. Filtering and surge protection modules for DC power supply networks. *Sovremennaya elektronika*, 2014, no. 2, pp. 24–39 (in Russian).

8. Nikitin M. SynQor Compact EMI Filters for Civil and Military Applications. *Sovremennaya elektronika*, 2011, no. 2, pp. 12–17 (in Russian).

9. Borisenko D. N., Zhokhov A. A., Redkin B. S. Inductive-capacitive filter. Patent Russia, no. RU 2 741 069 C1. Publish. 22.01.2021, bul. no. 3 (in Russian).

10. Di Piazza M. C., Luna M, Vitale G. EMI reduction in DC-fed electric drives by active common-mode compensator. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2014, vol. 56, no 5, pp. 1067–1076.

11. Dzhurinskii K. Miniature microwave interference suppression filters. *Sovremennaya elektronika*, 2023, no. 8, pp. 28–33 (in Russian).

12. Smirnov V. F., Shalaeva A. A., Krasilshchikov M. Ya. Ceramic Pass-Through Interference Suppression Filter. Patent Russia, no. RU 125 387 U1. Publish. 27.02.2013, bul. no. 6 (in Russian).

13. Kabanov A. A., Panyukhin Yu. N., Kuzmin V. A., Bakanin D. V. Miniature threaded interference suppression filter. Patent Russia, no. RU 211 781 U1. Publish. 22.06.2022, bul. no. 18 (in Russian).
14. Baranov I. A., Petrov S. N. Noise suppression cable. Patent Russia, no. RU 194 412 U1. Publish. 11.12.2019, bul. no. 24 (in Russian).
15. Chopenko A. A. Noise suppressing power cable. Patent Russia, no. RU 221 507 U1. Publish. 09.11.2023, bul. no. 31 (in Russian).
16. LTR-CMF. Sinfaznyj pomekhopodavlyayushchij fil'tr [LTR-CMF. Common Mode Noise Suppression Filter]. *L-CARD Russia*, 10.03.2025. Available at: <https://www.lcard.ru/products/accesories/ltr-cmf> (accessed 10.03.2025).
17. Dorokhin A. V., Ivanov P. Ye., Stefanov I. A. Rocket Hazard Circuit Protection Filter. Patent Russia, no. RU 166 982 U1. Publish. 20.12.2016, bul. no. 35 (in Russian).
18. Kopilov D. A. Electrical connector with built-in low-pass filters. Patent Russia, no. RU 2 600 114 C2. Publish. 20.10.2016, bul. no. 22 (in Russian).
19. Zabolotskii A. M., Gazizov T. R. Theoretical foundations of modal filtering. *Tekhnika radiosvyazi*, 2014, no. 3, pp. 79–83 (in Russian).
20. Samoilichenko M. A., Gazizov T. R. Double-sided printed circuit board routing method for circuits with modal redundancy. Patent Russia, no. RU 762 336 C1. Publish. 20.12.2021, bul. no. 35 (in Russian).
21. Samoilichenko M. A., Gazizov T. R. Modified microstrip line with improved protection against ultrashort pulses. Patent Russia, no. RU 2 728 327 C1. Publish. 29.07.2020, bul. no. 22 (in Russian).
22. Samoilichenko M. A., Gazizov T. R. Mirror-symmetrical modal filter on double-sided printed circuit board protecting against ultra-short pulses. Patent Russia, no. RU 2 784 040 C1. Publish. 23.11.2022, bul. no. 33 (in Russian).
23. Kosteletskii V. P., Zabolotskii A. M. Stripline structure protecting against ultrashort pulses in differential and common mode. Patent Russia, no. RU 2 748 423 C1. Publish. 25.05.2021, bul. no. 15 (in Russian).
24. Kosteletskii V. P., Zabolotskii A. M. Stripline structure protecting against ultrashort pulses in differential and common mode. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 2, pp. 130–141 (in Russian).
25. Kosteletskii V. P., Lakoza A. M., Zabolotskii A. M., Nesterenko A. K. Stripline structure with face coupling, protecting against ultrashort pulses in common and differential modes. Patent Russia, no. RU 2 823 269 C1. Publish. 22.07.2024, bul. no. 21 (in Russian).
26. Kuksenko S. P., Gazizov T. R. Improvement of the algorithm for calculating the capacitance matrices of structure of conductors and dielectrics by method of moments in the range of dielectric permeability values. *Electromagnetic waves and electronic systems*, 2012, no. 10, pp. 13–21 (in Russian).
27. Kuksenko S. P., Gazizov T. R., Kvasnikov A. A., Demakov V., Ivanov A. A., Klyukin D. V., Alkhadzh Khasan A., Maksimov A. Ye., Osintsev A. V. Developing software for modelling radioelectronic equipment with respect to electromagnetic compatibility in TUSUR. *Nanoindustry*, 2023, vol. 16, no. S9-1 (119), pp. 170–178 (in Russian).

Статья поступила 21 апреля 2025 г.

Информация об авторах

Костелецкий Валерий Павлович – кандидат технических наук. Доцент кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники, старший 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

Лакоза Александр Михайлович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории безопасности и электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, устройства защиты, модальная фильтрация. E-mail: alexandrlakoza@mail.ru

Черникова Евгения Борисовна – кандидат технических наук. Доцент кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, устройства защиты на основе модальной фильтрации, аналитические модели для линий передачи. E-mail: evgeniia.b.chernikova@tusur.ru

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

Broad-Side Coupling Stripline Structure Protecting Against Ultrashort Pulses in Common and Differential Modes

V. P. Kosteletskii, A. M. Lakoza, E. B. Chernikova

Statement of the problem: At the present moment there is an intensive spread of radio-electronic equipment (REE) in all branches of human activity. Operation of REE is associated with the risk of malfunctions or failures. The success of a project depends on the proper functioning of the REE, which imposes additional requirements for reliability and electromagnetic compatibility (EMC). As the speed of REE increases, it becomes more sensitive to impulse interference, which previously had no significant effect on its operation, but now can lead to false alarms and failures. An important area of EMC is the protection of REE from interference that penetrates into electronics via interfaces and power supply circuit conductors. The most dangerous noise influence is an ultra-short pulse (USP), characterised by a short duration of influence and possessing a spectrum overlapping a wide range of frequencies, as a result of which traditional means of limiting pulse interference are ineffective. To protect against USP, there are devices based on modal distortions that occur in transmission lines due to mode delay differences: modal filters (MF) and meander line

protectors. Weakening of USP is required in both common and differential modes, which is achieved by using such devices. **Purpose of work:** to propose a new device of protection against USP based on of planar broad side coupling conductors, capable to work simultaneously in common and differential modes of interference propagation. **Methods used:** the method of quasi-static analysis based on the method of moments. **Novelty:** a new compact topology of conductor arrangement in cross-section on one substrate **Result:** a slight increase in the attenuation of interference signals in both common and differential modes, simplification of the manufacturing technology. The result is achieved by changing the electromagnetic coupling between the conductors, the location of passive conductors on both sides of the substrate and their expansion, the use of a combination of terminal load ratings at the near and far ends. **Practical relevance:** MF improves protection of electronic equipment from conductive USP.

Key words: ultra-short pulse, electromagnetic compatibility, modal filter, common mode, differential mode, protection device.

Information about Authors

Valerii Pavlovic Kosteletskii – Ph.D. of Engineering Sciences. Associate Professor at the Department of microwave and quantum radio engineering, senior Researcher 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 Lakoza – Postgraduate 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: alexandrlakoza@mail.ru

Chernikova Evgeniya Borisovna – Ph.D. of Engineering Sciences. Associate Professor at the Department of microwave and quantum radio engineering, senior researcher of the Research laboratory of fundamental research on electromagnetic compatibility of Tomsk state university of control systems and radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility, protection devices based on modal filtration, analytical models for transmission lines. E-mail: evgeniia.b.chernikova@tusur.ru

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