

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.14>

УДК: 621.396.669

МЕТОДЫ КОМПОНОВКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ В СТРУКТУРАХ МАЛОГАБАРИТНЫХ МОДАЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ

В. А. Трубченинов, С. В. Власов, Е. С. Жечев и А. М. Заболоцкий

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050, Россия, Томск, проспект Ленина, 40

Статья поступила в редакцию 27 июня 2024 г.

Аннотация. В работе представлены новые методы компоновки электромагнитных поглотителей (ЭП) в двух структурах модальных фильтров (МФ): на основе связанной микрополосковой линии и четырехслойной зеркально-симметричной полосковой линии. Анализ частотных и временных характеристик МФ с ЭП выполнен с помощью метода конечных элементов. Показаны преимущества каждого из методов компоновки ЭП с точки зрения подавления сверхширокополосных электромагнитных помех.

Ключевые слова: сверхширокополосные помехи, модальная фильтрация, микрополосковая линия передачи, электромагнитный поглотитель.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00486 от 13.01.2023, <https://rscf.ru/project/23-29-00486/>.

Автор для переписки: Трубченинов Вячеслав Анатольевич, slava.trubcheninov@mail.ru

Введение

Подавление электромагнитных помех (ЭМП), в особенности сверхширокополосных (СШП), является важной задачей в области

электромагнитной совместимости [1-4]. За счет широкого спектра, большой амплитуды и малого времени нарастания такие ЭМП могут приводить к функциональным сбоям и поражениям радиоэлектронных систем (РЭС) и их элементов. Перспективными устройствами защиты от СШП ЭМП являются модальные фильтры (МФ), способные раскладывать импульсы малой длительности на последовательность из импульсов меньшей амплитуды за счет разности погонных задержек основных мод [5-7]. Их основными недостатками являются большие габариты и, зачастую, недостаточное ослабление. Для их устранения ранее предложено применять электромагнитные поглотители (ЭП) на основе магнитодиэлектриков совместно с МФ [8]. За счет параметров магнитодиэлектрика удалось увеличить разность погонных задержек мод и коэффициент ослабления СШП ЭМП, что в результате позволило создать высокоэффективный фильтр нижних частот небольших размеров [9]. Несмотря на многообещающие результаты в [8,9] рассмотрен только один метод применения одного конкретно ЭП и только для МФ на основе связанной микрополосковой линии (МПЛ). Остались без внимания другие материалы и методы компоновки, в том числе в МФ на основе полосковых линий. Целью данной работы является исследование методов компоновки ЭП в структурах с модальной фильтрацией, а именно МФ на основе двухпроводной МПЛ (далее двухпроводный МФ) и МФ на основе четырехслойной зеркально-симметричной структуры (далее четырехслойный ЗСМФ). Задачи исследования:

- разработка новых методов компоновки ЭП в структурах МФ на основе микрополосковой и полосковой линий;
- анализ частотных и временных характеристик МФ с использованием ЭП с разными электрофизическими параметрами;
- демонстрация преимуществ каждого метода компоновки с точки зрения подавления СШП ЭМП.

1. Методы применения ЭП в структурах МФ

В работе рассмотрено три ЭП для сравнения и определения наилучших характеристик.

Материал ЗИПСИЛ 601 РПМ-01 является тонким, гибким, листовым поглотителем СВЧ-энергии. Он способен эффективно поглощать СВЧ-волны в частотном диапазоне от 100 МГц до 50 ГГц, не проводит электрический ток, имеет высокую электрическую прочность, поэтому может применяться вблизи неизолированных электропитающих элементов [10].

Материал E-RAM MTM FR представляет собой легкий, гибкий поглотитель электромагнитного излучения широкого диапазона, обладает высокими потерями. Предназначен для подавления ЭМП, изолирования различных компонентов и мест стыков. Частотный диапазон использования такого ЭП от 500 МГц до 100 ГГц [11].

Материал ECCOSORB LS-26 представляет собой тонкий, эластичный листовой силиконовый поглотитель, предназначенный для уменьшения или устранения поверхностных токов, ослабления переотражений. Преимущества данного материала: высокая термостойкость, гибкость, рабочий диапазон частот от 1 до 18 ГГц [12]. Характеристики материалов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики используемых ЭП.

Материал	ϵ_r	μ_r	$\text{tg}\delta_\epsilon$
ЗИПСИЛ 410 РПМ-Л	20	3	0,1
E-RAM MTM FR	22,28	3	0,525
ECCOSORB LS-26	28	1	0,97

В работе рассмотрено три метода применения ЭП в исследуемых структурах (рис. 1):

- первый метод заключается в том, что минимально допустимый технологический зазор между проводниками МФ заполняется материалом с относительными диэлектрической (ϵ_r) и магнитной (μ_r) проницаемостями, большими, чем у материала подложки печатной платы (ПП);

- второй метод заключается в том, что в качестве ядра используется материал с ϵ_r и μ_r , большими, чем у материала подложки ПП;

- третий метод заключается в том, что в структурах МФ проводники с внешних сторон покрываются материалом с ϵ_r и μ_r , большими, чем у материала подложки ПП.

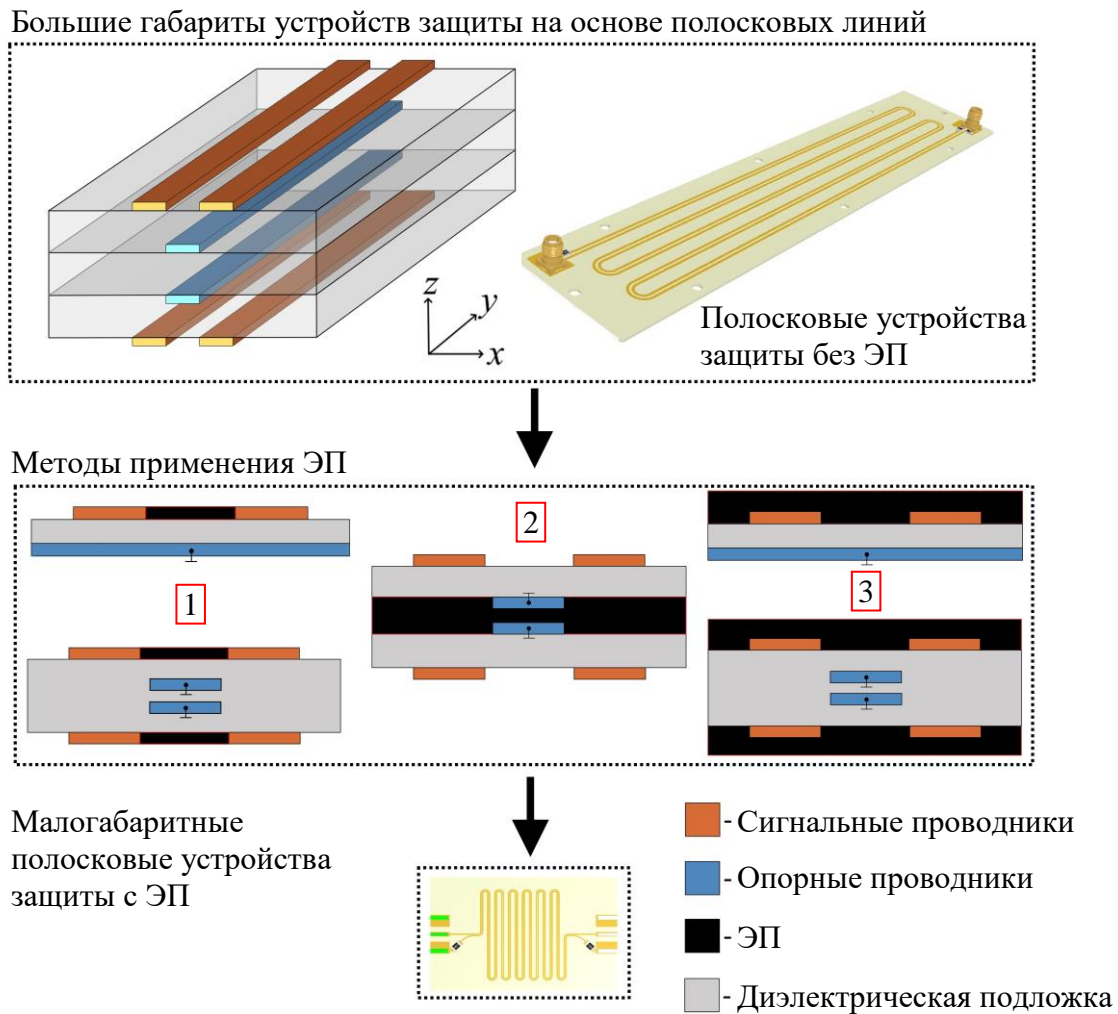


Рис. 1. Графическое представление применения ЭП в структурах МФ.

В первом методе исследованы двухпроводный МФ и четырехслойный ЗСМФ [8,13]. Двухпроводный МФ состоит из двух проводников, расположенных на одном слое параллельно друг другу. В данной структуре основными являются две моды (количество мод соответствует количеству проводников в структуре). Поперечное сечение двухпроводного МФ с использованием ЭП в зазоре между проводниками и его эквивалентная схема включены представлены на рис. 2.

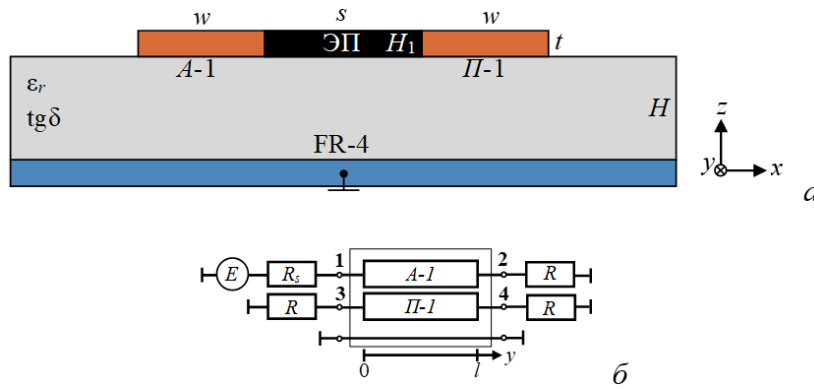


Рис. 2. Поперечное сечение двухпроводного МФ с ЭП в первом методе (а) и его эквивалентная схема включения (б).

Четырехслойный ЗСМФ состоит из шести проводников (включая два опорных), и трассируется на четырехслойной ПП. Два проводника расположены на одной из внешних сторон ПП, другие два – на противоположной внешней стороне ПП, а два опорных – на втором и третьем слое. В результате образуется четырехпроводная связанная линия передачи. Поперечное сечение четырехслойного ЗСМФ с использованием ЭП в зазоре между проводниками и его эквивалентная схема включения представлены на рис. 3.

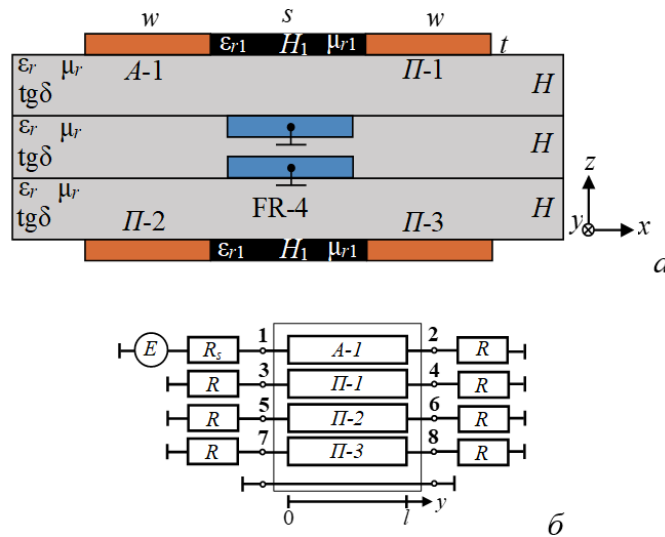


Рис. 3. Поперечное сечение четырехслойного ЗСМФ с ЭП в первом методе (а) и его эквивалентная схема включения (б).

Эквивалентные схемы включения для двухпроводного МФ и четырехслойного ЗСМФ далее в работе остаются неизменными, поэтому представлены только один раз.

Из-за особенностей реализации второго метода, его можно применить только для четырехслойного ЗСМФ. Поперечное сечение исследуемой структуры с ЭП вместо ядра представлено на рис. 4.

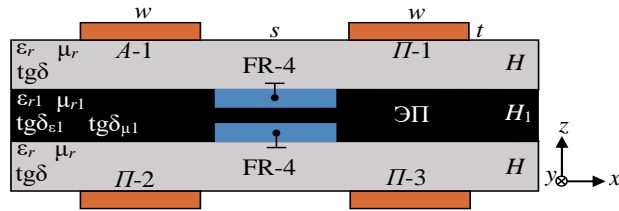


Рис. 4. Поперечное сечение четырехслойного ЗСМФ с ЭП во втором методе.

Третий метод можно применить для обеих структур. Поперечные сечения исследуемых структур с использованием ЭП в качестве покрытия проводников с внешних сторон представлены на рис. 5.

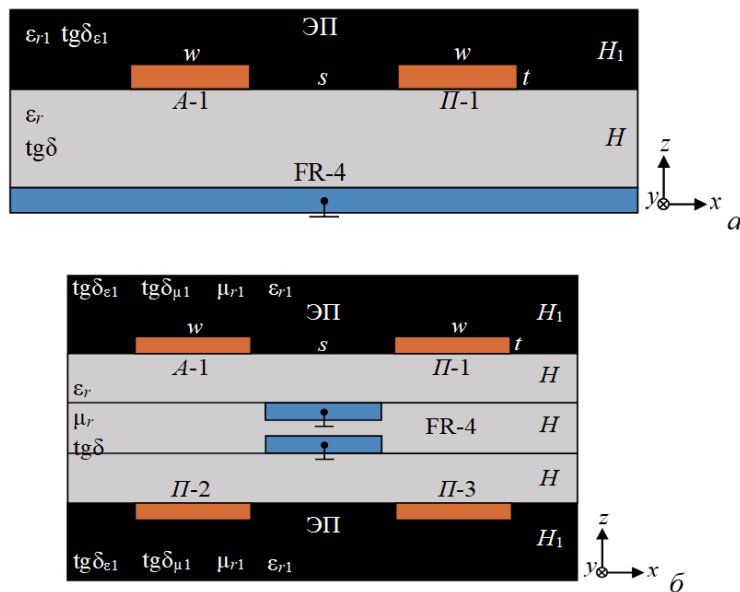


Рис. 5. Поперечные сечения исследуемых структур с ЭП в третьем методе: двухпроводный МФ (а), четырехслойный ЗСМФ (б).

Геометрические параметры двухпроводного МФ (мкм): ширина проводников $w = 300$, расстояние между проводниками $s = 100$, толщина проводников $t = 35$, толщина подложки $H = 510$, длина линии $l = 250 \cdot 10^3$. Геометрические параметры четырехслойного ЗСМФ (мкм): ширина проводников $w = 1000$, расстояние между проводниками $s = 700$, толщина проводников $t = 35$, толщина подложки $H = 1000$, длина линии $l = 250 \cdot 10^3$.

Толщина ЭП (H_1) для первого метода составляет 35 мкм, для второго и третьего – 300 мкм.

2. Результаты исследования структур

Далее приведены результаты исследования МФ во временной и частотной областях. Получены временные отклики на помеховый импульс, а также проанализированы частотные зависимости модуля коэффициента передачи $|S_{21}|$. Зависимости напряжения снимались на выходе активной линии (узел 2).

На рис. 6 (а, в, д) представлены результаты моделирования исследуемых структур во временной области. Время задержки импульса определялось, как 10% от максимального значения импульса.

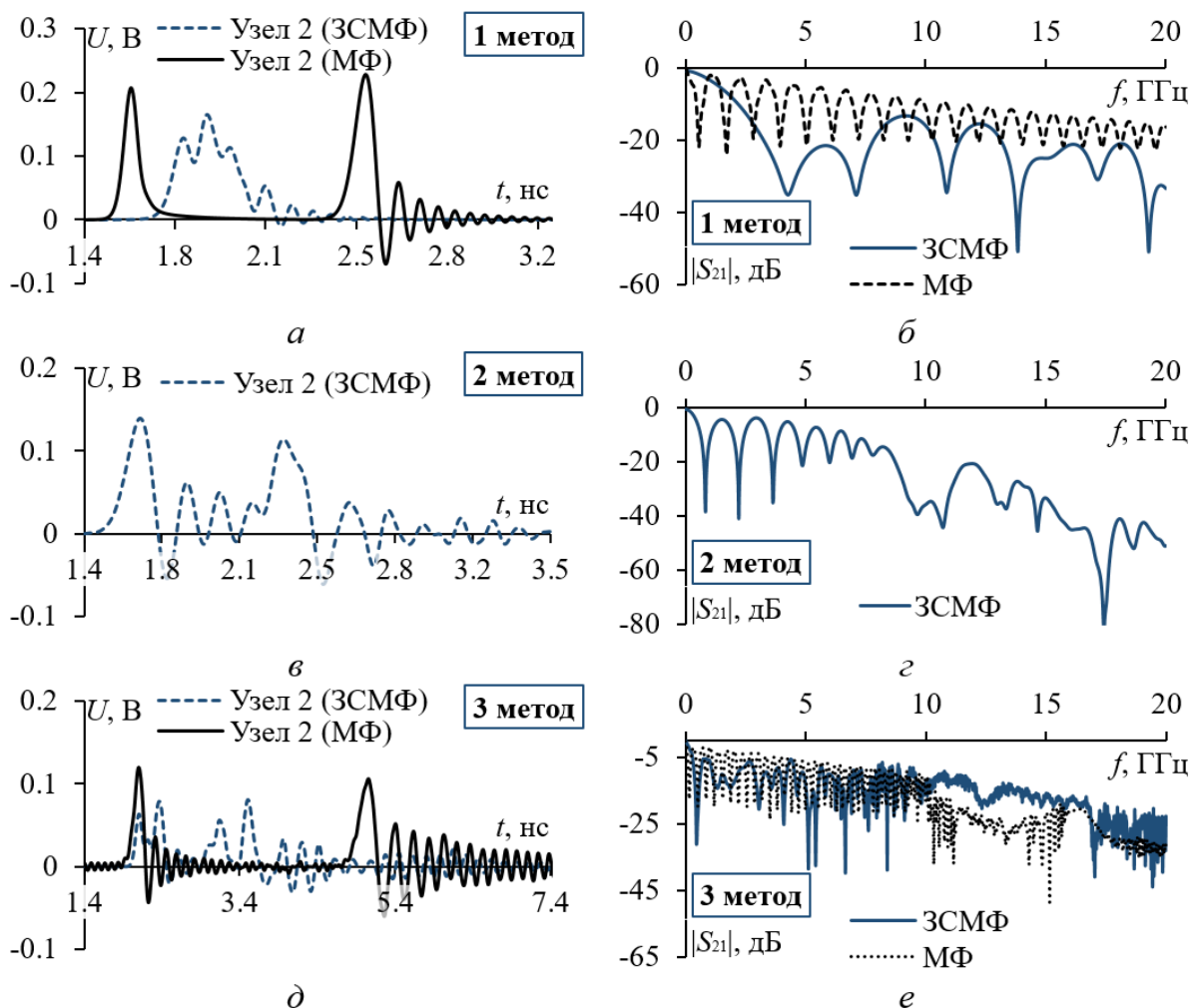


Рис. 6. Результаты моделирования четырехслойного ЗСМФ во временной и частотной областях.

Для двухпроводного МФ с ЭП в первом методе получены следующие параметры: время прихода первого импульса составило 1.5 нс, второго – 2.4 нс. Амплитуды импульсов на выходе не превышают 0.2 В. Для структуры четырехслойного ЗСМФ: время прихода первого импульса составило 1.7 нс, второго – 1.82 нс, третьего – 1.93 нс и четвертого – 2.06 нс. Амплитуды импульсов на выходе составили 0.12 В, 0.14 В, 0.10 В, 0.05 В, соответственно. Для структуры четырехслойного ЗСМФ с ЭП во втором методе получены следующие параметры: время прихода первого импульса составило 1.5 нс, второго – 1.82 нс, третьего – 1.96 нс и четвертого – 2.11 нс. Амплитуды импульсов на выходе составили 0.12 В, 0.03 В, 0.03 В, 0.11 В, соответственно. Для структуры двухпроводного МФ с ЭП в третьем методе получены следующие параметры: время прихода первого импульса составило 1.95 нс, второго – 4.8 нс. Амплитуды импульсов на выходе не превышают 0.1 В. Для структуры четырехслойного ЗСМФ: время прихода первого импульса составило 1.96 нс, второго – 2.28 нс, третьего – 2.97 нс и четвертого – 3.4 нс. Амплитуды импульсов на выходе составили 0.05 В, 0.07 В, 0.05 В, 0.07 В, соответственно. Из результатов видно, что наибольшее ослабление амплитуды СШП ЭМП достигнуто при использовании третьего метода. Так, для двухпроводного МФ ослабление составило более чем 10 раз, а для четырехслойного ЗСМФ – 15 раз.

На рис. 6 (*б, г, е*) представлены результаты моделирования исследуемых структур в частотной области, в трех методах применения ЭП. Для структуры двухпроводного МФ с ЭП в первом методе получены следующие значения: частота среза (f_c) по уровню минус 3 дБ составила 0.26 ГГц, частота первого резонанса (f_p) – 0.56 ГГц. Для структуры четырехслойного ЗСМФ: f_c составила 0.94 ГГц, f_p – 4.3 ГГц. Для структуры четырехслойного ЗСМФ с ЭП во втором методе получены следующие значения: f_c составила 0.34 ГГц, f_p – 0.84 ГГц. Для структуры двухпроводного МФ с ЭП в третьем методе получены следующие значения: f_c составила 0.06 ГГц, f_p – 0.16 ГГц. Для структуры четырехслойного ЗСМФ с ЭП: f_c составила 0.2 ГГц, f_p – 0.46 ГГц. Видно, что структуры в разных

методах имеют различные значения f_c и f_p . Отсюда следует, что ЭП влияет на частотные характеристики структур с учетом метода применения ЭП.

3. Результаты исследования малогабаритных МФ

Основной недостаток существующих МФ заключается в их больших габаритах и массе, что ограничивает их практическое применение. Поэтому далее рассмотрены методы компоновки ЭП применительно к МФ для микросборок (техпроцесс до 20 мкм). Так, были получены оптимальные, с точки зрения массогабаритных характеристик, геометрические параметры структуры ЗСМФ (мкм): ширина проводников $w = 20$, расстояние между проводниками $s = 40$, толщина проводников $t = 5$, толщина подложки $H = 100$, длина линии $l = 100 \cdot 10^3$.

При проведении анализа временных характеристик малогабаритных ЗСМФ использовано два помеховых воздействия. Первым был трапециевидный импульс со следующими параметрами: амплитуда 1 В, длительность фронта, спада и плоской вершины по 100 пс, общая длительность импульса 300 пс. Второй импульс был взят из [14] и также имел амплитуду 1 В. Формы входного воздействия представлены на рис. 7.

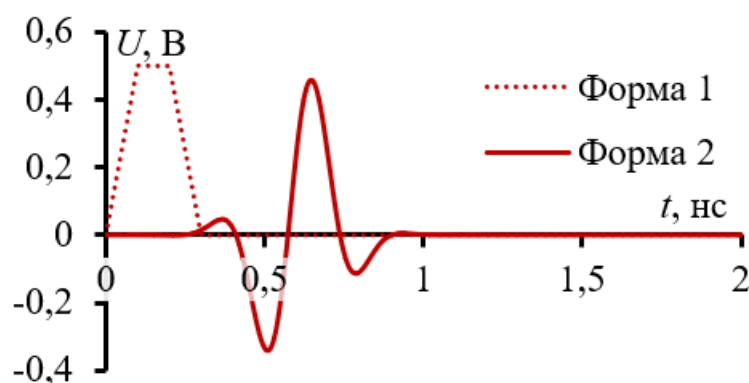


Рис. 7. Формы входного воздействия: трапециевидный импульс (форма 1) и Гауссов импульс (форма 2).

На рис. 8 представлены результаты моделирования малогабаритной структуры четырехслойного ЗСМФ во временной области, в трех методах применения ЭП.

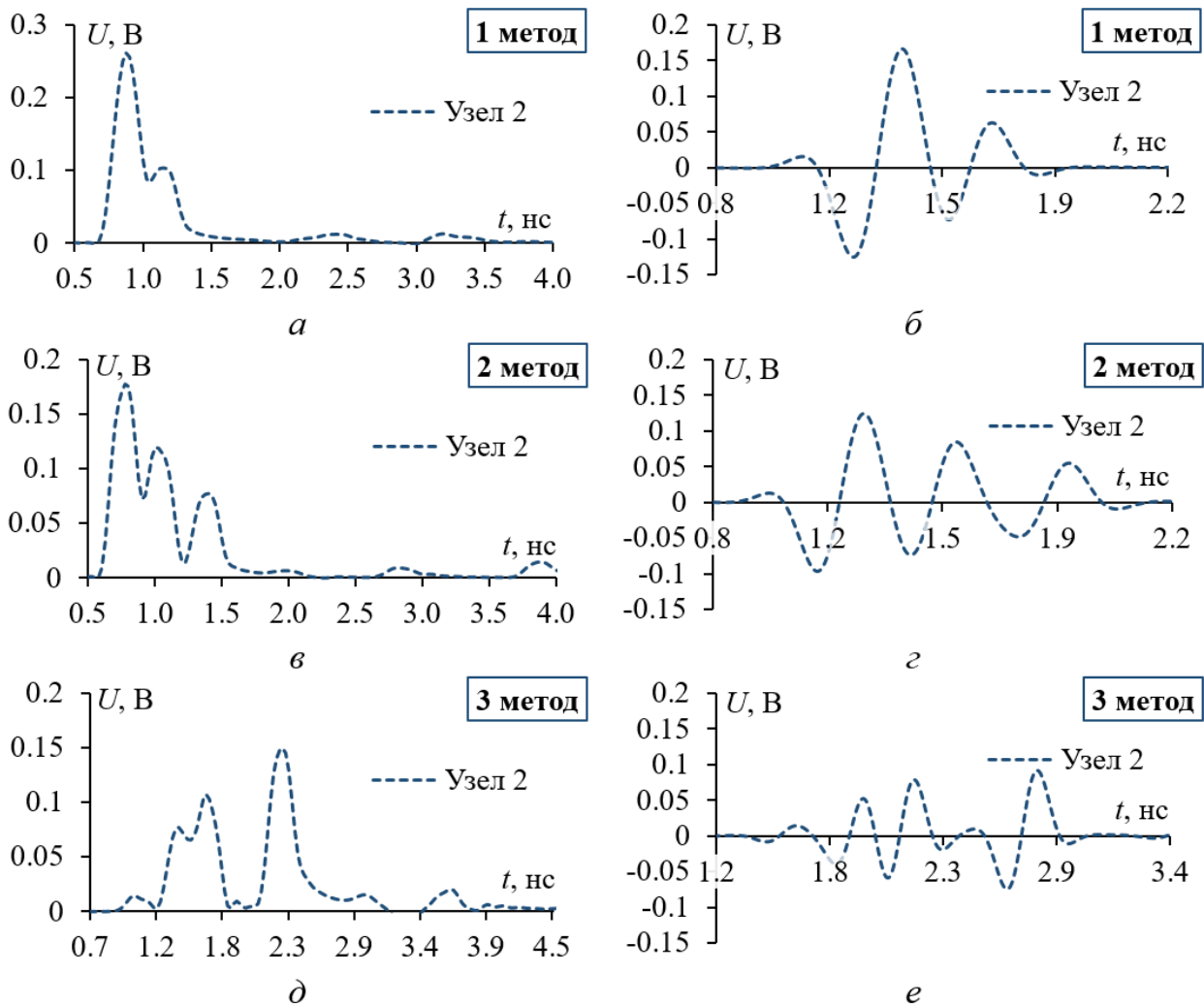


Рис. 8. Результаты моделирования малогабаритного четырехслойного ЗСМФ во временной области.

Для данной структуры в первом методе получены следующие значения: время прихода первого импульса составило 0.66 нс, второго – 1.06 нс, третьего – 2.1 нс и четвертого – 3 нс. Амплитуды импульсов на выходе составили 0.25 В, 0.1 В, 0.012 В, 0.013 В, соответственно. Для малогабаритной структуры четырехслойного ЗСМФ с ЭП во втором методе получены следующие значения: время прихода первого импульса составило 0.58 нс, второго – 0.93 нс, третьего – 1.2 нс и четвертого – 2.7 нс. Амплитуды импульсов на выходе составили 0.17 В, 0.11 В, 0.07 В, 0.008 В, соответственно. Для малогабаритной структуры четырехслойного ЗСМФ с ЭП в третьем методе получены следующие

значения: время прихода первого импульса составило 1 нс, второго – 1.25 нс, третьего – 1.51 нс и четвертого – 2.05 нс. Амплитуды импульсов на выходе составили 0.015 В, 0.076 В, 0.107 В, 0.15 В, соответственно. За счет высокой разности погонных задержек мод произошло разложение импульса. Третий метод обеспечил наибольшее ослабление помехового импульса, что говорит об эффективности такого применения ЭП.

На рис. 9 представлены результаты моделирования малогабаритной структуры четырехслойного ЗСМФ в частотной области.

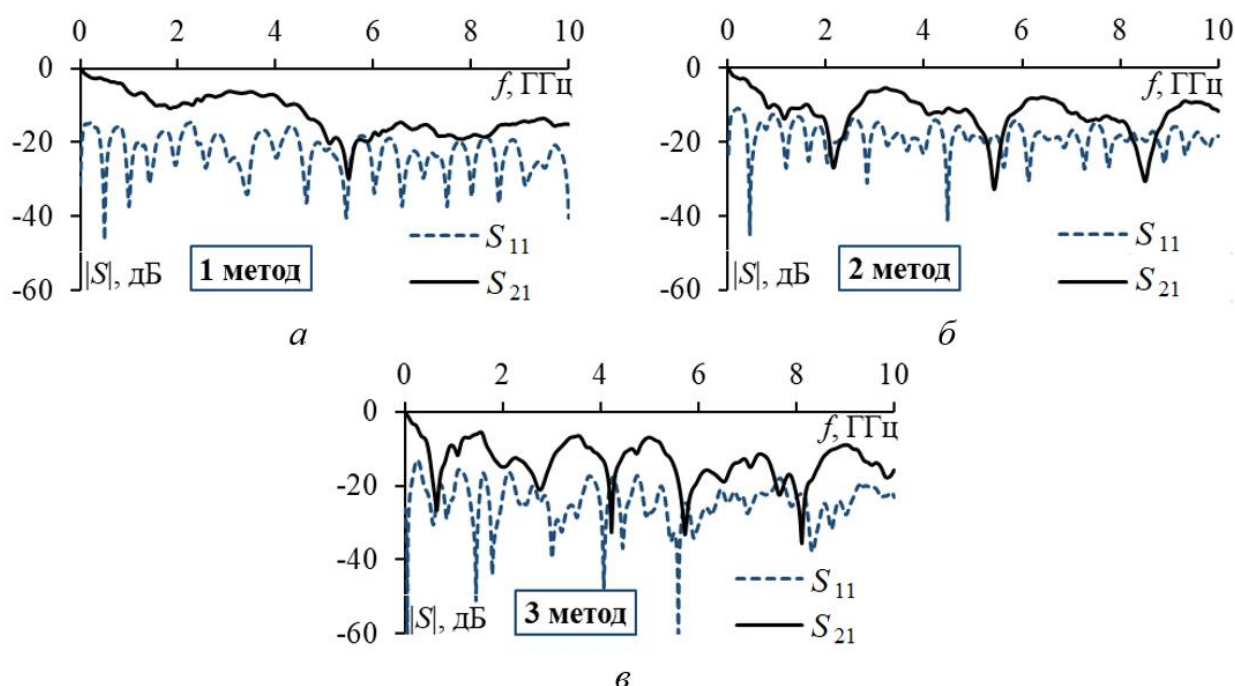


Рис. 9. Результаты моделирования малогабаритного четырехслойного ЗСМФ в частотной области.

Получены зависимости модулей коэффициентов $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ в предложенных ранее методах. Для структуры четырехслойного ЗСМФ с ЭП в первом методе получены следующие значения: f_c составила 0.5 ГГц, f_p – 5.5 ГГц. Для структуры четырехслойного ЗСМФ с ЭП во втором методе f_c составила 0.37 ГГц, f_p – 2.15 ГГц. Для структуры четырехслойного ЗСМФ с ЭП в третьем методе получены следующие значения: f_c составила 0.145 ГГц, f_p – 0.65 ГГц. Видно, что третий метод показал более высокое ослабление сигнала, характеризуясь наиболее низкими частотами среза и резонансами.

4. Результаты сравнения характеристик ЭП

Далее приведены результаты сравнительного анализа материалов ЗИПСИЛ 601 РПМ-01, ERAM-MTM-FR и ECCOSORB LS-26. Использована структура малогабаритного четырехслойного ЗСМФ с геометрическими параметрами, представленными в разделе 3.

На рис. 10 представлены результаты моделирования исследуемой структуры во временной области для трех методов применения ЭП.

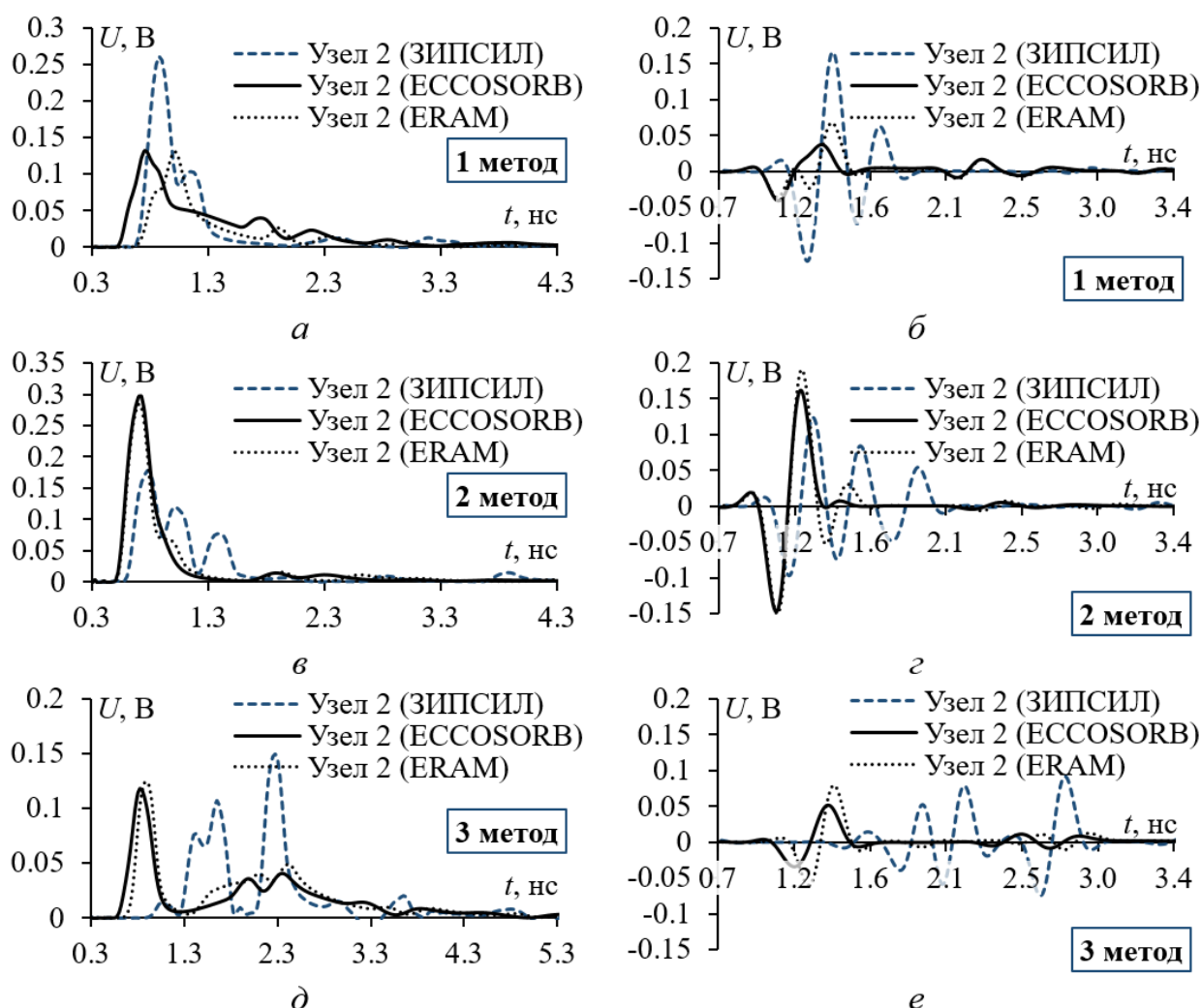


Рис. 10. Результаты моделирования малогабаритного четырехслойного ЗСМФ с разными ЭП во временной области.

Видно, что материал ERAM MTM FR в первом методе обладает лучшими характеристиками с точки зрения подавления СШП ЭМП. Время прихода первого импульса составило 0.71 нс, второго – 1.1 нс, третьего – 2.25 нс и четвертого – 3.09 нс. Время прихода первого импульса в 1.43 раза больше,

чем с материалом ECCOSORB LS-26, но одинаковое с материалом ЗИПСИЛ 601 РПМ-01. По результатам моделирования во втором методе видно, что с применением материала ЗИПСИЛ 601 РПМ-01 время прихода первого импульса составило 0.51 нс, второго – 0.94 нс, третьего – 1.23 нс и четвертого – 3.74 нс, что как минимум в 1.52 раза больше, чем в той же структуре, но с другими материалами. Амплитуды импульсов на выходе уменьшились в 1.75 раза. Видно, что материал ЗИПСИЛ 601 РПМ-01 в третьем методе обладает лучшими характеристиками, так время прихода первого импульса составило 1 нс, второго – 1.25 нс, третьего – 1.51 нс и четвертого – 2.05 нс, что как минимум в 1.7 раза больше, чем в той же структуре, но с другими материалами. Амплитуды импульсов на выходе составили 0.015 В, 0.076 В, 0.107 В, 0.15 В, соответственно. Третий метод с использованием материала ЗИПСИЛ 601 РПМ-01 обеспечил наибольшее ослабление помехового импульса, что характеризуется значительным увеличением времени прихода импульса на выходе.

На рис. 11 представлены результаты моделирования исследуемой структуры четырехслойного ЗСМФ в частотной области, в трех методах применения ЭП. Получены зависимости модулей коэффициентов $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ для первого ($a, б$), второго ($в, г$) и третьего ($д, е$) метода, соответственно.

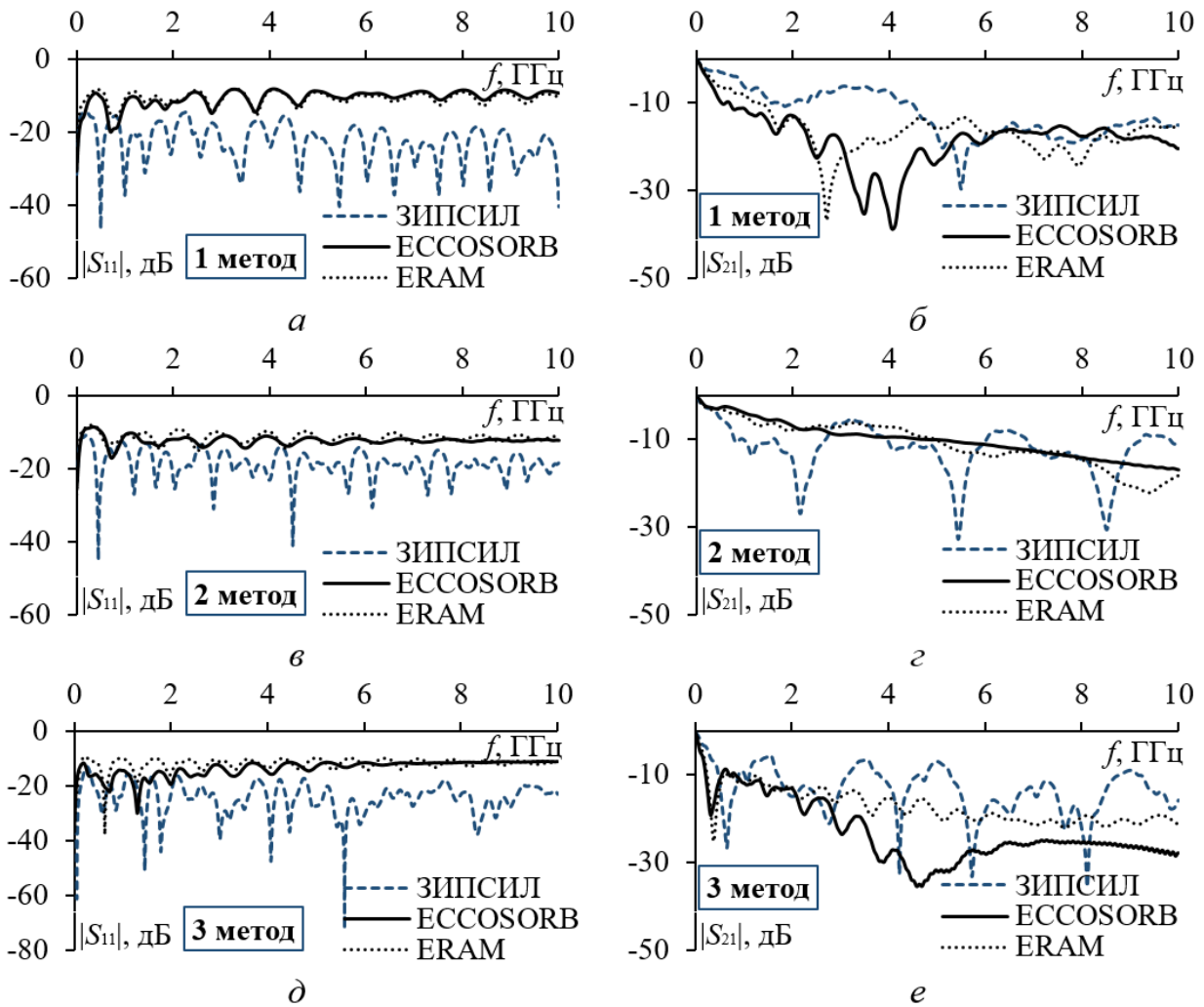


Рис. 11. Результаты моделирования малогабаритного четырехслойного ЗСМФ с разными ЭП в частотной области.

Видно, что с точки зрения подавления СШП ЭМП в первом методе использование ЭП для помехоподавляющих свойств более эффективным является материал ERAМ MTM FR за счет обеспечения наиболее низких f_c и f_p . Так f_c составила 0.2 ГГц, f_p – 2.7 ГГц. При анализе результатов второго метода эффективным является материал ZИПСИЛ 601 PPM-01 за счет обеспечения наиболее низких f_c и f_p (f_c составила 0.26 ГГц, f_p – 2.1 ГГц). В третьем методе материал ECCOSORB LS-26 позволил получить следующие результаты: f_c составила 0.09 ГГц, f_p – 0.3 ГГц.

Заключение

В работе исследованы методы компоновки ЭП в структурах двухпроводного МФ и четырехслойного ЗСМФ. Проведен анализ частотных и временных характеристик МФ с использованием ЭП с разными параметрами. Получены временные отклики на СШП помехи. Показаны преимущества каждого метода компоновки в контексте подавления СШП ЭМП. Таким образом, достигается повышение эффективности защиты от СШП ЭМП в РЭС за счет применения ЭП в структурах МФ. С точки зрения подавления СШП ЭМП наиболее эффективным методом применения ЭП является третий, поскольку он обеспечивает наибольшее ослабление помехи и увеличение разности погонных задержек мод. Материалом с наибольшей эффективностью подавления СШП ЭМП является ЗИПСИЛ 601 РПМ-01.

К перспективам дальнейшего исследования можно отнести проведение лабораторного эксперимента, исследование других материалов и структур, которые могут быть более эффективны в подавлении ЭМП.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00486 от 13.01.2023, <https://rscf.ru/project/23-29-00486/>.

Литература

1. Гизатуллин Р.М., Гизатуллин З.М. Помехоустойчивость и информационная безопасность вычислительной техники при электромагнитных воздействиях по сети электропитания – Казань: Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, 2014. – 142 с.
2. Газизов Т.Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры. Томск: ТМЛ-Пресс, 2007.
3. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007.

4. Weber T., Krzikalla R., ter Haseborg J.L. Linear and nonlinear filters suppressing UWB pulses // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2004. – Т. 46. – №. 3. – P. 423-430. <https://doi.org/10.1109/ТЕМС.2004.831887>
5. Черникова Е.Б., Газизов Т.Р. Модальное разложение сверхкороткого импульса в 8-проводных зеркально-симметричных структурах // Журнал радиоэлектроники. – 2020. – №. 9. – С. 15-15. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.9.12>
6. Самойличенко М.А., Жечев Е.С., Газизов Т.Р. Экспериментальное исследование электрических характеристик модального фильтра на двухсторонней печатной плате // Radiotehnika i elektronika. – 2023. – Т. 68. – №. 11. – С. 1131-1139. <https://doi.org/10.31857/S0033849423070094>
7. Самойличенко М.А., Газизов Т.Р. Влияние соединения опорных проводников на разложение сверхкороткого импульса в модальном фильтре на двухсторонней печатной плате // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – №. 9. – С. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.12.10>
8. Zhechev Y.S., Adnan A.H., Malygin K.P. New technique for improving modal filter performance by using an electromagnetic absorber // IEEE Access. – 2022. – Т. 10. – С. 86663-86670. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3199360>
9. Zhechev Y. S. et al. High-Efficiency Low-Pass Reflectionless Filter Based on Modal Decomposition and Electromagnetic Absorber // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. vol. 14, no. 5, pp. 938-944, May 2024, <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2024.3383840> (дата обращения: 11.02.2024).
10. Официальный сайт компании «Зипсил» [Электрон. ресурс]. (https://www.elibrary.ru/download/elibrary_25845156_50175301.pdf) (дата обращения: 11.02.2024).
11. Официальный сайт компании «Аделантест» [Электрон. ресурс]. (<https://adtst.ru/radio-emc/>) (дата обращения: 11.02.2024).
12. Официальный сайт компании «Аделантест» [Электрон. ресурс]. (<https://adtst.ru/radio-laird/>) (дата обращения: 12.02.2024).

13. Жечев Е.С. и др. Экспериментальные исследования зеркально-симметричного модального фильтра во временной и частотной областях // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – №. 2. – С. 162-179.
14. Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 1–5: High Power Electromagnetic (HPEM) Effects on Civil Systems, IEC. 61000–1–5, Ed: IEC, 2004.

Для цитирования:

Трубченинов В.А., Власов С.В., Жечев Е.С., Заболоцкий А.М. Методы компоновки электромагнитных поглотителей в структурах малогабаритных модальных фильтров. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.14>