

УДК 621.391.825

Однократное модальное резервирование: обзор современного состояния

Морозов С. Р., Газизов Т. Р.

Постановка задачи: Современные тенденции снижения размеров проектируемой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), а также увеличения плотности ее компонентов усложняют обеспечение их электромагнитной совместимости (ЭМС). Одним из наиболее опасных видов помех при обеспечении ЭМС являются кондуктивные сверхширокополосные помехи (СШП). Для борьбы с ними предложен подход, называемый модальным резервированием (МР), который за счет модальных искажений ослабляет входящую помеху за счет ее разложения на несколько импульсов меньшей амплитуды с задержкой по времени прихода. С момента разработки первого устройства с МР было создано множество способов его реализации и компоновки. Несмотря на то, что большой объем исследований был последовательно отражен в обзорах, данные о последних достижениях по МР отсутствуют, а анализ отдельных его реализаций носит фрагментарный характер. В то же время недостаточно систематизированы функциональные возможности и эксплуатационные характеристики различных схем, а также не определены четкие области оптимального применения каждого способа МР. Поэтому выполнение системного обзора о способах реализации МР являются актуальными. Так как всестороннее описание всех вариантов 1-, 2- и 3-кратного МР привело бы к чрезмерному росту объема материала, в данной работе основное внимание отдано только способам на основе однократного МР. Это решение дает возможность углубленно рассмотреть базовые принципы построения систем, детально проанализировать особенности реализации, а также объективно оценить преимущества и ограничения методов. Таким образом, представленный обзор призван заполнить существующие пробелы в систематизации знаний о МР. **Цель работы** – сделать системный обзор новых способов однократного МР. **Используемые методы:** Для анализа эволюции способов использованы линии развития технических систем из теории решения изобретательских задач. **Новизна:** Впервые комплексно охвачены как ранее разработанные способы однократного МР, так и новые в единой работе. **Результат:** системное представление о современном состоянии однократного МР. **Практическая значимость:** обеспечена основа для успешного выполнения перспективных проектов по МР.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, устройства защиты, печатная плата, модальное резервирование.

Введение

В современной радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) и функциональной безопасности (ФБ) представляет собой одну из наиболее значимых проблем [1]. Актуальность её решения непрерывно растет ввиду устойчивой тенденции к миниатюризации устройств и росту плотности размещения компонентов. Это усложняет обеспечение ЭМС, формируя серьёзные риски для надёжной работы аппаратуры.

Библиографическая ссылка на статью:

Морозов С. Р., Газизов Т. Р. Однократное модальное резервирование: обзор современного состояния // Системы управления, связи и безопасности. 2026. № 2. С. 105-154. DOI: 10.24412/2410-9916-2026-2-105-154

Reference for citation:

Morozov S. R., Gazizov T. R. Single modal reservation: state-of-the-art. *Systems of Control, Communication and Security*, 2026, no. 2, pp. 105-154 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2026-2-105-154

Особенно остро проблема проявляется в критически важных системах, где отказ РЭА способен повлечь за собой значительные негативные последствия: финансовые потери, утрата критически важной информации и нарушение работоспособности стратегически значимых объектов. К таким системам относятся спутниковая аппаратура, бортовые вычислительные комплексы, военная электроника и иные устройства, требующие длительной бесперебойной работы.

Для повышения надёжности и обеспечения ФБ традиционно используется резервирование, вводящее в устройства дополнительную избыточность [2, 3]. Однако оно имеет ограниченную эффективность при защите от систематических кондуктивных сверхширокополосных помех (СШП) [4] – одного из опасных видов электромагнитных воздействий. СШП обладают сочетанием критических характеристик: малой длительностью импульса, широким спектром частот и высокой мощностью [5]. Благодаря этим особенностям они способны проникать в РЭА и вызывать необратимые повреждения компонентов. При этом обычное резервирование имеет ряд недостатков. Во-первых, под воздействием СШП выход из строя резервируемой системы может повлечь за собой отказ резервной, поскольку обе подвергаются электромагнитному воздействию. Во-вторых, традиционные схемы резервирования не ослабляют электромагнитные помехи. В-третьих, внедрение резервирования приводит к росту массо-габаритных показателей и стоимости устройства.

В качестве решения обозначенной проблемы предложено модальное резервирование (МР) [6, 7]. Оно обеспечивает ЭМС за счет электромагнитной связи между резервируемым и резервными проводниками в неоднородной диэлектрической среде. Так, МР подавляет СШП посредством ее модального разложения на несколько сигналов меньшей амплитуды [8–10], а также повышает надёжность за счет холодного резервирования с замещением.

Вместе с тем, в ходе двух пятилетних проектов по грантам Российского научного фонда интенсивно исследовалось однократное (РНФ 19-19-00424, 2019–2021 гг.) и трёхкратное (РНФ 20-19-00446, 2020-2022 гг.) МР. Большой объем этих исследований последовательно отражался в обзорах [11–14]. Однако нет данных о последних достижениях по МР, а анализ отдельных реализаций МР носит фрагментарный характер. В то же время недостаточно систематизированы функциональные возможности и эксплуатационные характеристики различных схем, а также не определены чёткие области оптимального применения каждого способа МР. Между тем это затрудняет эффективную и актуальную цель работы – сделать системный обзор способов реализации однократного МР.

Обоснование сосредоточения внимания на однократном МР представляется следующим. Всестороннее описание всех вариантов 1-, 2- и 3-кратного МР привело бы к чрезмерному росту объёма материала, что существенно затруднило бы восприятие ключевых положений. Сосредоточение на однократном МР даёт возможность углублённо рассмотреть базовые принципы построения систем, детально проанализировать особенности реализации, а также объективно оценить преимущества и ограничения методов. Таким образом, представленный обзор призван заполнить существующие пробелы в систематизации знаний

о МР. В связи с большим материалом статьи он был декомпозирован на следующие разделы:

1. Обзор исследований за 2015–2018 годы;
2. Обзор исследований за 2019–2022 годы:
 - 2.1. Способ однократного модального резервирования межсоединений;
 - 2.2. Способ трассировки печатных проводников на двух сигнальных слоях печатной платы для цепей с резервированием;
 - 2.3. Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием на противоположных сторонах печатной платы;
 - 2.4. Способ компоновки многослойных печатных плат для цепей с резервированием;
 - 2.5. Способ трассировки двухсторонней печатной платы для цепей с модальным резервированием;
 - 2.6. Способ трассировки двухсторонней печатной платы с модальным резервированием при уменьшенном числе проводников;
 - 2.7. Способ симметричной трассировки сигнальных и опорных проводников цепей с модальным резервированием;
 - 2.8. Способ удаленной трассировки печатных проводников цепей с однократным модальным резервированием;
3. Обзор исследований за 2023–2026 годы:
 - 3.1. Способ компоновки дифференциальной пары для цепей с модальным резервированием на основе зеркально-симметричной полосковой структуры;
 - 3.2. Полосковая структура с лицевой связью, защищающая от сверхкоротких импульсов в синфазном и дифференциальном режимах;
 - 3.3. Способ трассировки проводников модального фильтра на основе кабельной структуры;
 - 3.4. Устройство защиты от сверхкоротких импульсов с проводниками в одной плоскости на диэлектрической подложке.

1. Обзор исследований за 2015–2018 годы

В 2019 г. опубликована обзорная статья [11], в которой систематизированы способы компоновки структур с однократным и трёхкратным модальным резервированием (МР), разработанные в 2015–2018 гг. Поскольку в этом обзоре представлено полное описание каждого способа, соответствующее описанию в патенте, а также полный перечень их достоинств и недостатков, для этого периода мы приведем краткую характеристику, а также проанализируем статьи и исследования, связанные с описываемыми способами.

Одним из первых стал способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием [15]. Он предполагает трассировку резервируемых и резервных проводников совместно с опорным проводником в виде отдельного слоя. Проводники одноимённых цепей прокладываются парами параллельно друг другу на одном слое с минимально допустимым зазором, обеспечивая боковую

связь между резервируемой и резервной трассами. На рис. 1 представлены поперечное сечение и принципиальная схема этого способа.

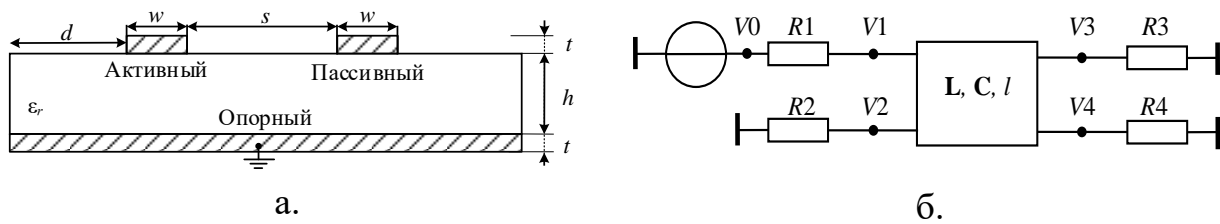


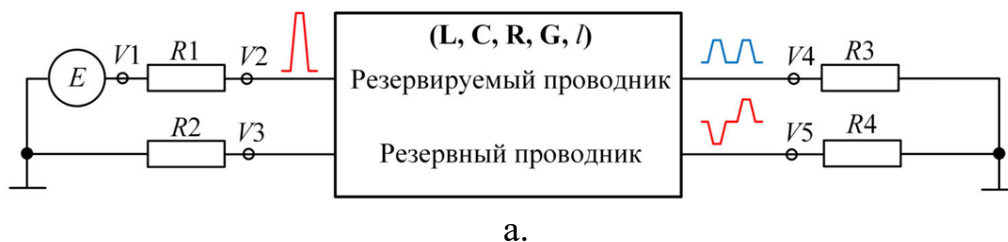
Рис. 1. Поперечное сечение структуры (а) и её принципиальная схема (б)

К достоинствам способа относится простота изготовления печатной платы (ПП): технология не требует сложных производственных процессов. Однако способ применим преимущественно для компонентов с резервной и резервируемой частями в одном корпусе и симметрично или попарно организованными выводами. Кроме того, он имеет ограниченные диапазоны ослабления сигнала и разности задержек мод: коэффициент ослабления обычно невелик – чуть более 2, а разность погонных задержек мод составляет 1–2 нс/м.

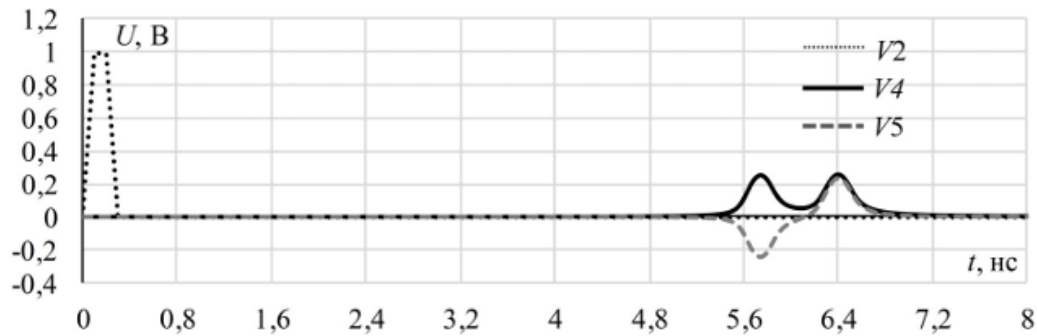
Эффективность способа исследована в работе [16]. Авторы на примере устройства с однократным МР выявляли и сравнивали критичность импульсов различной полярности, используя N -нормы. На вход подавался трапециевидный сверхкороткий импульс (СКИ) с временем нарастания, спада и плоской вершины по 100 пс и амплитудой 2 В. Параметры поперечного сечения из рис. 1 представлены в таблице 1, временные отклики (а также принципиальная схема) – на рис. 2, а значения N -нормы (а также отклонение, рассчитанное как частное значения нормы на узле $V4$ к узлу $V5$) – представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Параметры поперечного сечения

w , МКМ	s , МКМ	t , МКМ	h , МКМ	l , м	ϵ_r	$\text{tg}\delta$	$R1-R4$, Ом
850	200	35	500	1	4,5	0,025	50



а.



б.

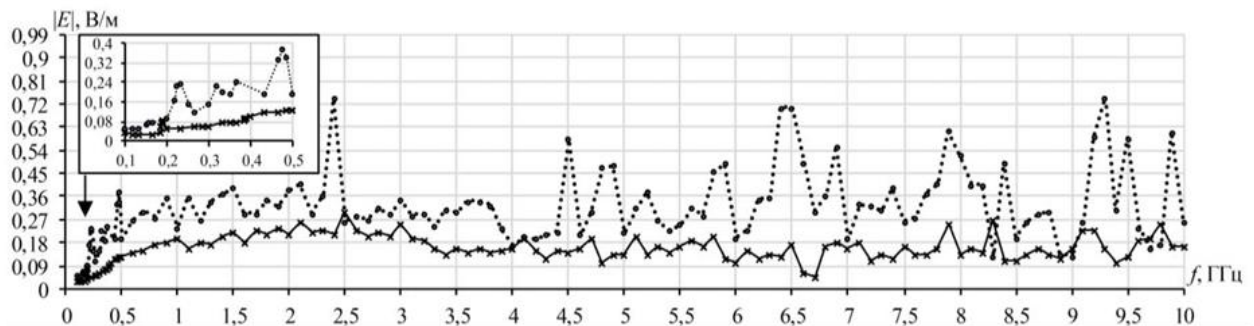
Рис. 2. Принципиальная схема (а) и результаты моделирования временного отклика (б) устройства с однократным МР

Таблица 2 – Параметры N -норм для временных откликов в узлах V4 и V5

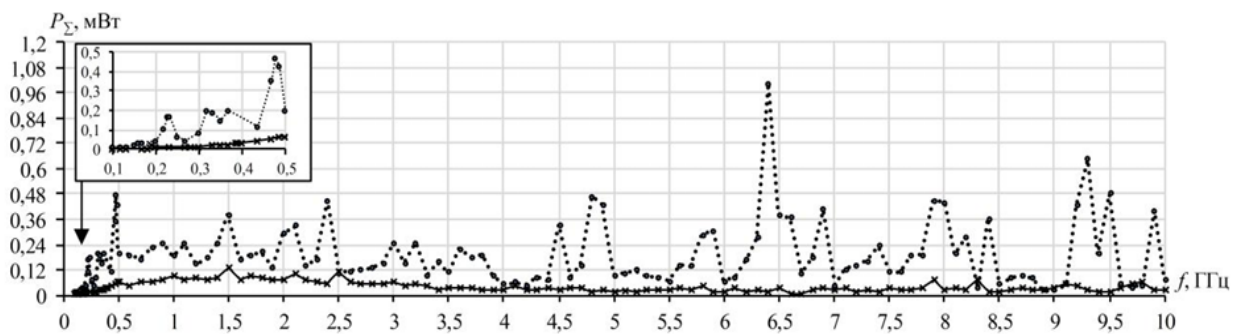
Норма	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5
V4	0,255	1,454e9	19,318e-11	2,053e-10	5,322e-6
V5	0,233	1,436e9	7,517e-11	1,523e-10	4,784e-6
Отклонение, разы	1,094	1,012	2,57	1,347	1,112

Таблица 3 – Значения параметров поперечного сечения из рис. 1 при оценке излучаемых эмиссий

w , мкм	s , мкм	t , мкм	h , мкм	d , мкм	ϵ_r	R , Ом
300	100	65	510	600	10	50



а.



б.

Рис. 3 Частотные зависимости $|E|$ (а) и P_Σ (б) для структур с однократным МР (—) и без него (⋯)

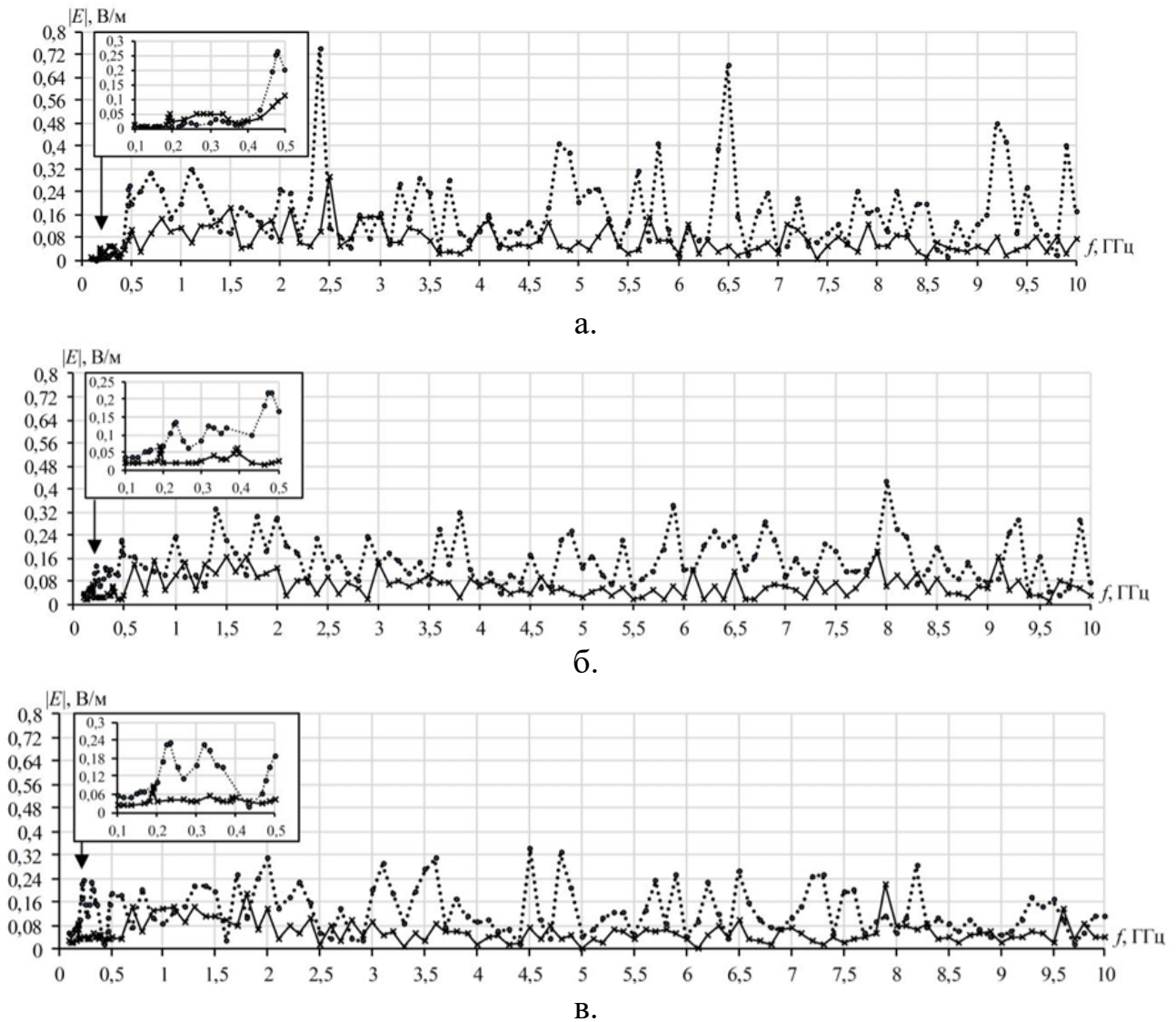


Рис. 4 Частотные зависимости $|E|$ для структур с однократным МР (—) и без него (···) при $\theta = 0$ (а), 45 (б), 90° (в)

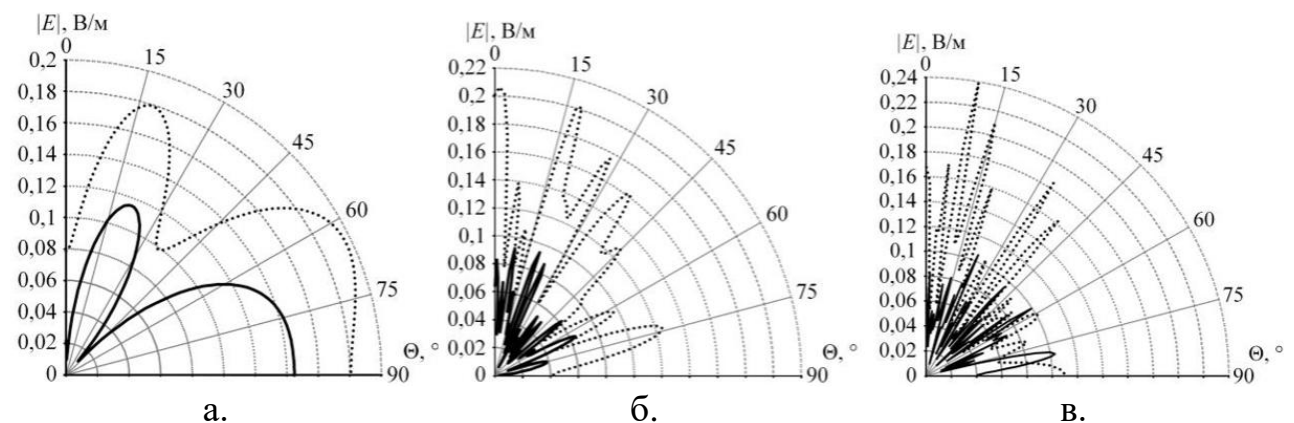


Рис. 5 Диаграммы направленности структур с однократным МР (—) и без него (···) на частотах $0,5$ (а), 5 (б) и 10 (в) ГГц

Из результатов видно, что $|E|$ для структуры с МР меньше, чем для структуры без него, практически во всем частотном диапазоне. Однако на некоторых частотах наблюдается противоположное: например, для $7,9$ ГГц $|E|$ при $\theta = 90^\circ$

для МР в 2 раза выше, чем без него. Таким образом, в статье показано, что однократное МР уменьшает излучаемые эмиссии резервируемой цепи в частотном диапазоне от 0,1 до 10 ГГц.

На основе этого способа предложено использование дополнительного диэлектрика между резервируемой и резервной трассами, относительная диэлектрическая проницаемость которого существенно больше, чем показатель подложки [18]. Это увеличивает погонную задержку нечётной моды относительно чётной, а разность задержек может менять знак. За счёт выбора диэлектрической проницаемости удаётся эффективно контролировать высокую разность погонных задержек мод в диапазоне 0,2–3,5 нс/м, что соответствует частоте первого нуля 0,14–2,7 ГГц. При этом коэффициент ослабления может превышать 2. Однако способ сохраняет некоторые ограничения предшествующего: он подходит только для компонентов с частями в одном корпусе и симметричными или парными выводами. К тому же, нанесение дополнительного покрытия усложняет технологию производства, что стало стимулом для поиска новых конструктивных решений. Поперечное сечение представлено на рис. 6.

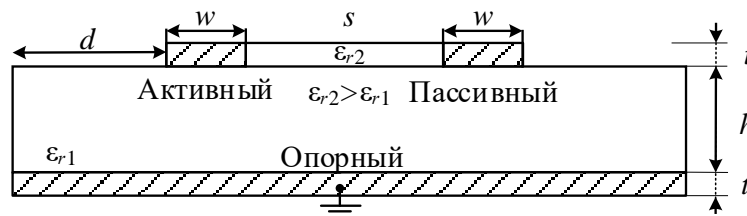


Рис. 6. Поперечное сечение структуры с дополнительным диэлектриком

Следующим по модернизации компоновки структур с однократным МР стал способ резервирования для ПП [19]. В этом случае резервируемая цепь размещается на верхнем слое подложки – проводники формируются за счёт зазоров в опорной пластине, а резервная – на нижнем слое зеркально верхнему. Проводники одноимённых цепей располагаются строго друг под другом, остальные электрически соединяются, а полигоны на проводящих слоях выполняют роль опорных слоёв (рис. 7).

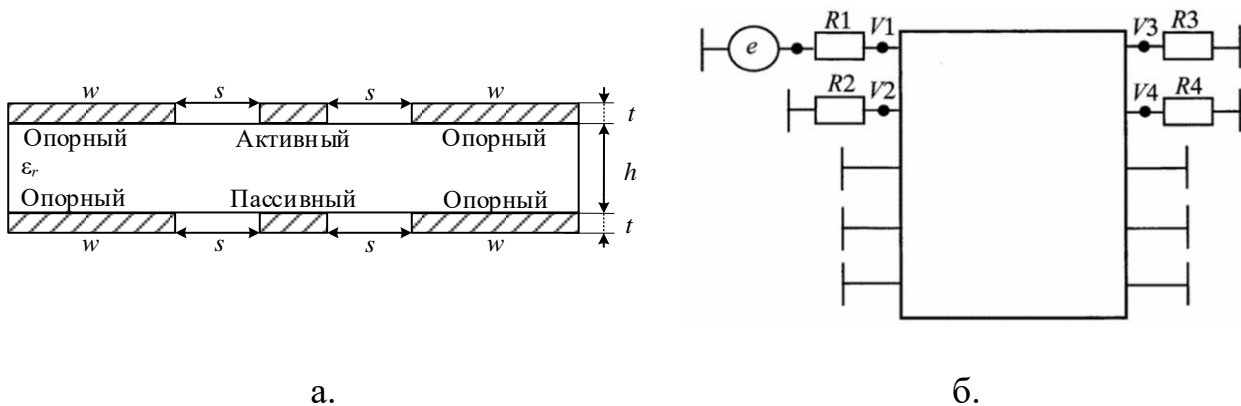


Рис. 7. Поперечное сечение структуры на двусторонней ПП (а) и принципиальная схема (б)

Благодаря лицевой связи способ позволяет достичь высоких значений ослабления и разности погонных задержек. Важное преимущество – достаточно использовать двухстороннюю ПП, что упрощает производство и снижает затраты. Вместе с тем, метод имеет недостатки: нарушается целостность опорного слоя, что может ухудшить характеристики платы; возникают сложности с плотной трассировкой, ограничивающие компактное размещение элементов; сужение проводников опорного слоя ведёт к росту сопротивления и ухудшению электрических параметров. Эти ограничения подтолкнули к созданию решений, позволяющих ещё эффективнее управлять параметрами фильтрации без существенного усложнения конструкции. Так появился способ резервирования плоских кабелей [20], предполагающий размещение проводников резервируемого кабеля на одном уровне, а резервного – на другом (рис. 8). При этом одноимённые проводники располагаются строго друг под другом в диэлектрическом слое, а опорные проводники выполнены в виде отдельных трасс.

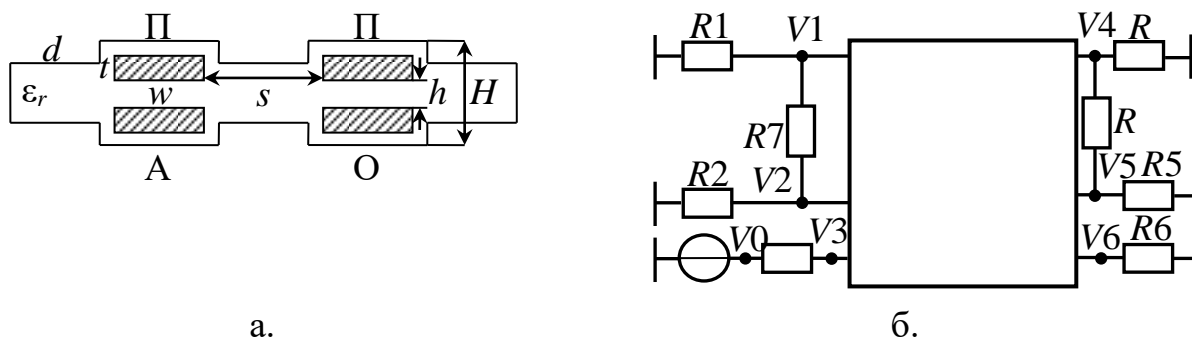


Рис. 8. Поперечное сечение плоского кабеля (а) и принципиальная схема (б)

Способ отличается максимальной разностью задержек мод – до 19 нс при длине кабеля до 10 м, а частота первого нуля снижается до 26 МГц. При длинных кабелях помеховый сигнал значительно ослабляется. Однако и здесь есть недостаток: необходимость перепроектирования соединителей увеличивает сроки и затраты, а также требует адаптации инфраструктуры под новые требования. Перспективность способа подтверждена в исследовании [21], где анализировался временной отклик плоского кабеля с МР при различном соединении опорных проводников при воздействии СКИ. На вход схемы подавался СКИ с ЭДС 2 В и длительностями фронта, плоской вершины и спада по 100 пс. Рассматривались 4 варианта номиналов резисторов $R3$ и $R4$: 0,001 и 0,001; 1000 и 1000; 0,001 и 1000; 1000 и 0,001 Ом. Параметры поперечного сечения представлены в таблице 4. Формы напряжения при рассмотренных вариантах соединения представлены на рис. 9.

Таблица 4 – Параметры поперечного сечения плоского кабеля

w , мкм	s , мкм	t , мкм	H , мкм	h , мкм	d , мкм	ϵ_r	R , Ом
65	60	5	25	5	500	4	50

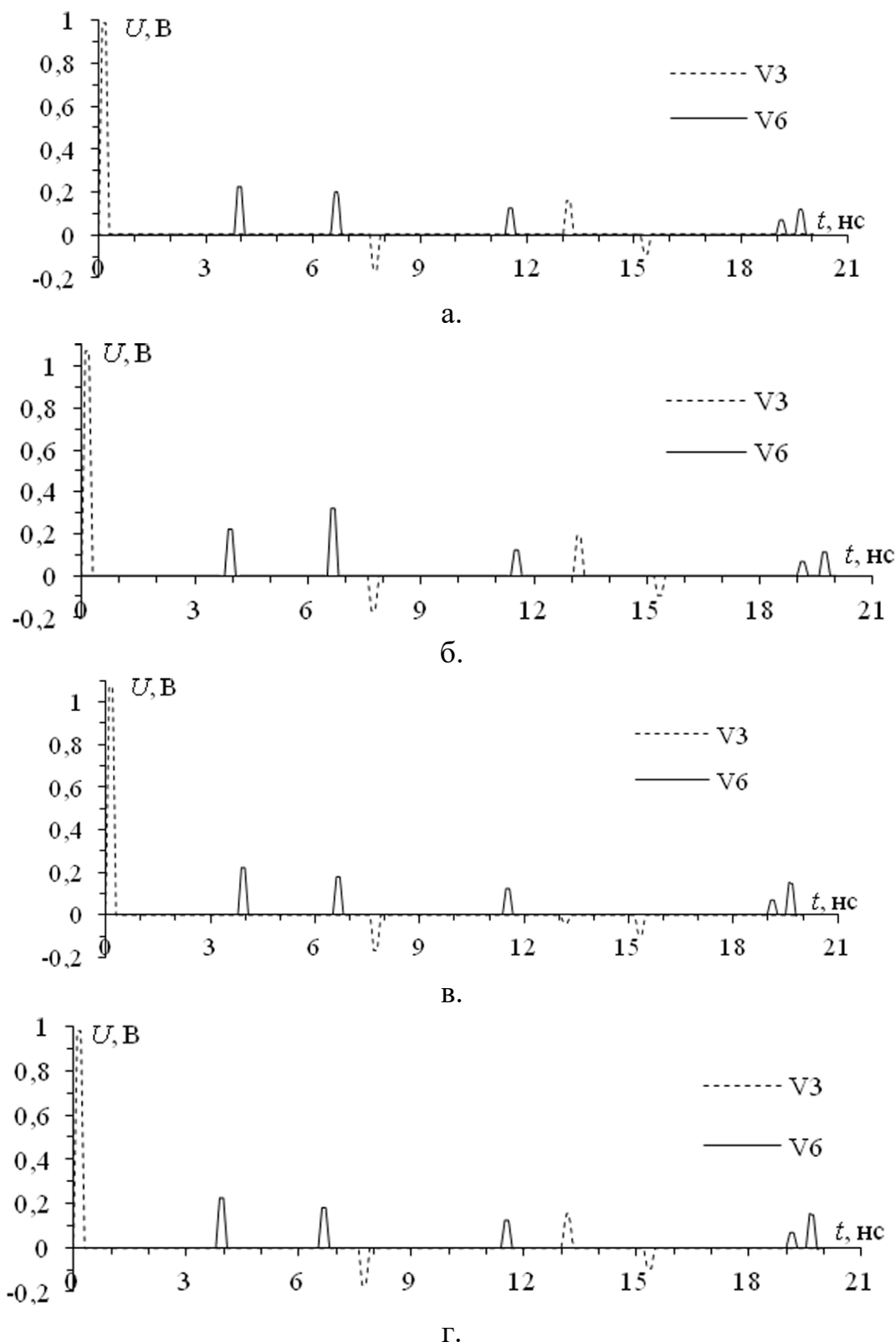


Рис. 9. Формы напряжения на ближнем ($V3$) и дальнем ($V6$) концах активного проводника в плоском кабеле с МР при вариантах соединения опорных проводников: 1 (а); 2 (б); 3 (в) и 4 (г)

Результаты моделирования показали, что амплитуда напряжения на выходе плоского кабеля с МР максимальна при несоединенных опорных проводниках между собой. При их соединении амплитуда примерно в 1,5 раза меньше.

Это подтвердило эффективность снижения амплитуды помех при определённых конфигурациях соединения.

Стремление совместить преимущества разных подходов привело к разработке способа компоновки ПП для цепей с резервированием [22]. В нём резервируемая и резервная платы склеиваются слоем диэлектрика с высокой ϵ_r (рис. 10). Трассы резервируемой и резервной цепей размещаются параллельно и строго друг под другом, а компоненты монтируются на противоположных склеиваемых сторонах плат. Преимущества метода включают отсутствие ограничений на элементную базу и улучшение электромагнитной совместимости за счёт того, что полигоны земли и питания выполняют функцию экранов для межсоединений на внутренних слоях. Кроме того, не требуется сложная перетрассировка. Однако изготовление усложняется из-за необходимости использовать многослойные платы, а монтаж компонентов на обе стороны платы удорожает производство и усложняет сборку.

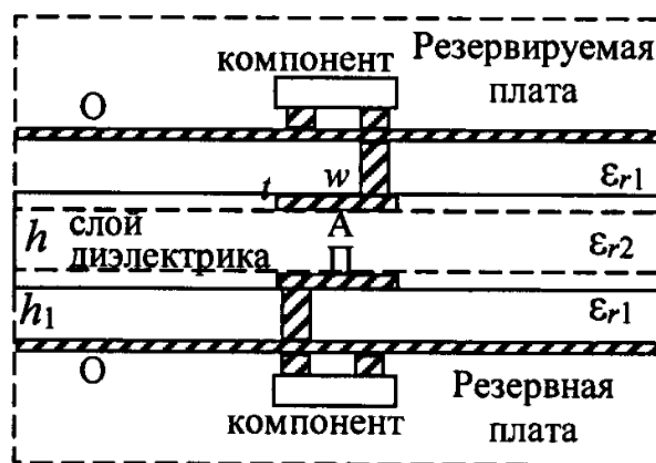


Рис. 10. Поперечное сечение многослойной ПП с МР

Наконец, способ внутренней компоновки ПП [23] стал ещё одним шагом в развитии МР. Он схож с предыдущим, но отличается тем, что компоненты монтируются непосредственно в слое склеивающего диэлектрика (рис. 11). Его принципиальная схема аналогична рис. 1. Это обеспечивает комплексное экранирование трасс и компонентов полигонами опорных слоёв. Однако способ допускает только бескорпусную элементную базу, что сужает выбор компонентов. Габариты компонентов задают нижнее ограничение на толщину диэлектрического слоя, ухудшая характеристики фильтрации. Кроме того, способ отличается высокой сложностью реализации и изготовления, трудоёмкостью и стоимостью производства.

Анализ способов компоновки структур с однократным МР за 2015–2018 г. демонстрирует эволюцию технологий – от простых решений к сложным высокопроизводительным системам. На начальном этапе преобладали способы трассировки печатных проводников, в том числе с дополнительным диэлектриком. Способы просты в реализации, но имеют ограниченную эффективность: ослабление около 2, а диапазон задержек мал. Способы с лицевой связью на ПП дали ослабления помех и разности задержек. Частично удалось снизить затраты

за счёт использования двухсторонних ПП, однако выявились и новые проблемы – нарушения целостности опорного слоя и сложности с плотностью трассировки. Способы на основе плоских кабелей показали разности погонных задержек до 1,9 нс/м и обеспечили эффективное ослабление помех. Вместе с тем для их внедрения надо перепроектировать соединители, что увеличит затраты и сроки разработки. Наиболее продвинуты многослойные структуры с внутренней компоновкой, дающей комплексное экранирование. Но они оказались дороже в производстве и требуют бескорпусных компонентов.

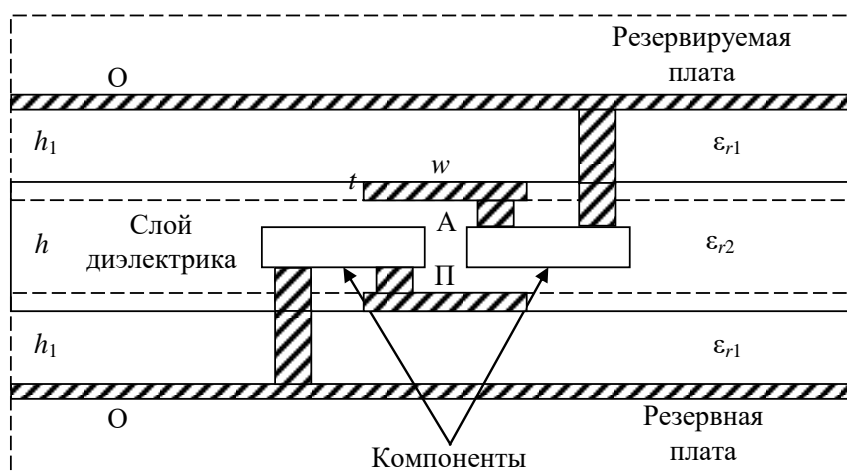


Рис. 11. Поперечное сечение ПП с представленным способом

В целом период 2015–2018 гг. характеризуется несколькими важными тенденциями. Конструкции постепенно усложнялись: от однослойных к многослойным и с интеграцией компонентов. Одновременно росла эффективность фильтрации: за счёт оптимизации геометрических и диэлектрических параметров и геометрии. Кроме того, заметно расширилось применение МР: сформировался набор способов: от бюджетных с базовыми характеристиками до высокопроизводительных с расширенными. Таким образом, за указанный период созданы и апробированы основные способы МР, изучены их преимущества и ограничения. Полученный опыт создал надёжную базу для совершенствования МР.

2. Обзор исследований за 2019–2022 годы

2.1 Способ однократного модалного резервирования межсоединений

В 2019 г. предложен способ однократного МР межсоединений [24]. Он основан на трассировке одноимённых резервируемой и резервной цепей: их проводники формируют 4-проводную линию передачи с различным погонными задержками, образующей пару витков меандровой линии (МЛ) (рис. 12, 13). Проводники могут соединяться тремя способами: на одном слое (1-2 и 1*-2*), на разных слоях (1-1* и 2-2*) или диагонально (1-2* и 2-1*). Благодаря симметрии поперечного сечения обеспечивается равномерная лицевая и торцевая связь между цепями – в зависимости от способа подключения. Ключевой результат

метода – увеличенное ослабление СКИ. В отличие от прототипа [15], где СКИ раскладывается на два импульса с амплитудой в два раза меньше половины ЭДС источника, в новом способе помеховый импульс разлагается на 4 импульса с амплитудой в 4 раза меньше половины ЭДС – за счёт различия задержек мод.

Эффективность способа подтверждена моделированием зеркально-симметричной МЛ. Параметры поперечного сечения представлены в таблице 5. Воздействующий СКИ имел трапецеидальную форму с ЭДС 5 В и длительностями фронта, спада и плоской вершины по 50 пс. Пары проводников, составляющие резервируемую и резервную цепи, соединены между собой на одном конце тремя способами. СКИ подавался между резервируемой трассой (проводник 1) и опорным проводником. Функцию резервной трассы выполняет второй виток МЛ (пассивный), в начале и конце которого подключены резисторы. Результаты квазистатического моделирования сигнала на выходе резервируемой цепи для трех вариантов соединения показаны на рис. 14.

Таблица 5 – Параметры поперечного сечения

w , МКМ	s , МКМ	t , МКМ	h , МКМ	ϵ_r	l , м	R , Ом
1600	510	18	500	4,5	1	50

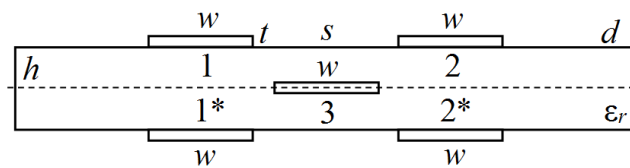


Рис. 12. Поперечное сечение зеркально-симметричной структуры

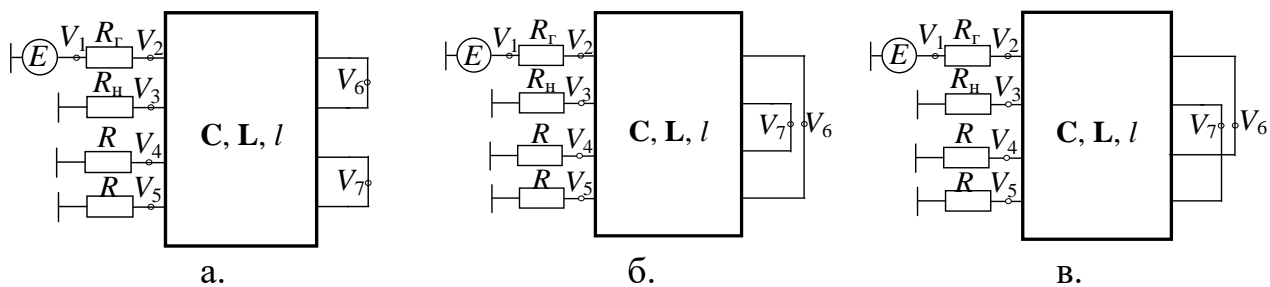


Рис. 13. Принципиальные схемы соединения полувитков на одном (а) и разных (б) слоях и диагонально (в)

Результаты моделирования показали, что СКИ раскладывается на импульс перекрёстной наводки с нулевой задержкой (V_1) и 4 основных импульса (V_2 – V_5) с максимальной амплитудой 0,63 В (около 25 % от половины ЭДС). Интервалы времени между импульсами разложения удвоены по сравнению с зеркально-симметричным модальным фильтром [25], что позволяет разлагать СКИ вдвое большей длительности. При указанных параметрах максимальная длительность полностью разлагаемого сигнала при длине линии 1 м составляет около 1 нс. В рамках отдельного исследования [26] выполнено квазистатическое моделирование зеркально-симметричной МЛ, реализующей однократное МР, целью подтвердить способность структуры ослаблять СКИ за счёт его раз-

ложения на импульсы меньшей амплитуды. Параметры поперечного сечения и характеристики воздействующего СКИ аналогичны параметрам у описываемого способа выше. Амплитуды импульсов, их задержки и временные интервалы между ними сведены в таблицу 6. Формы напряжений для трех вариантов представлены на рис. 15.

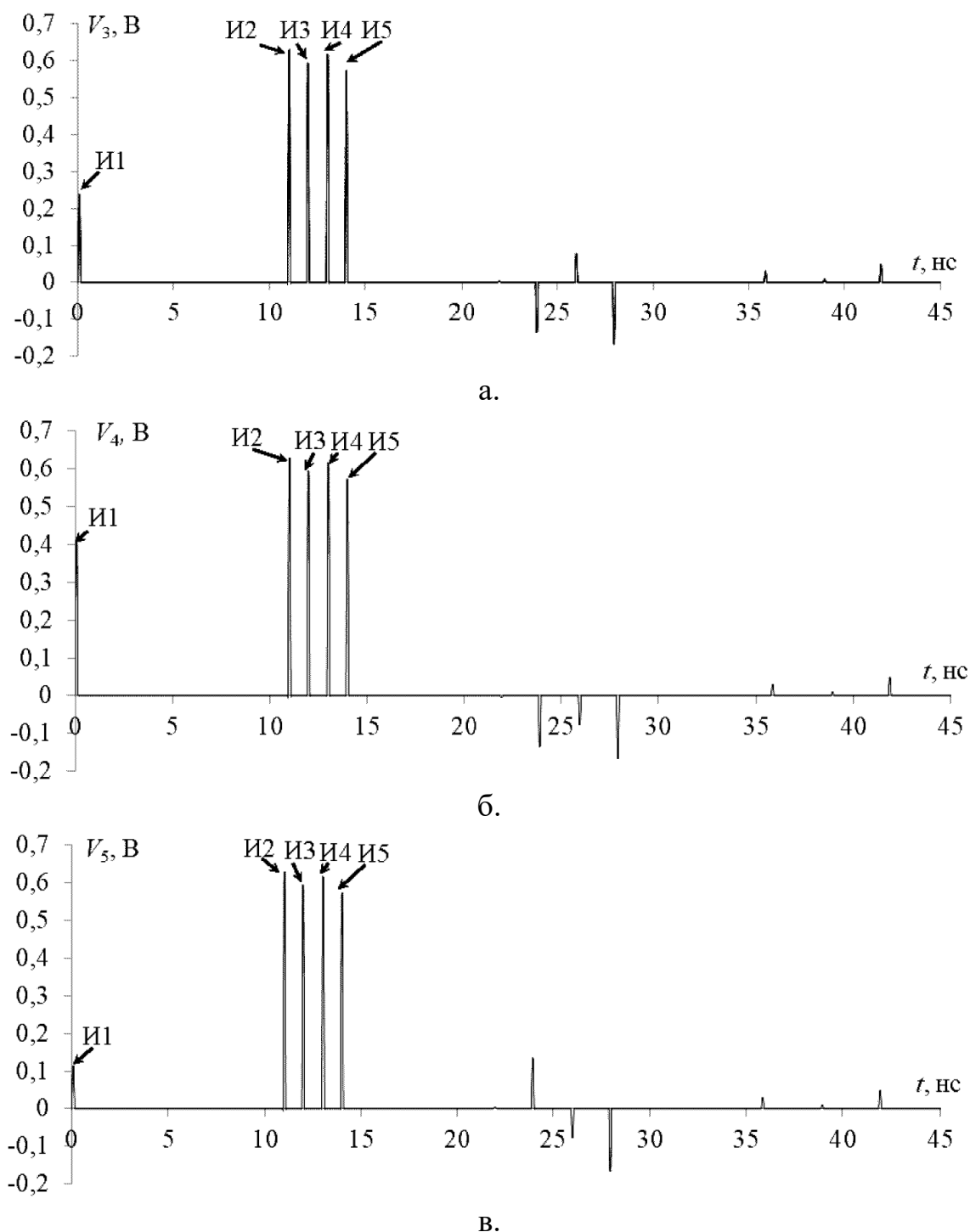
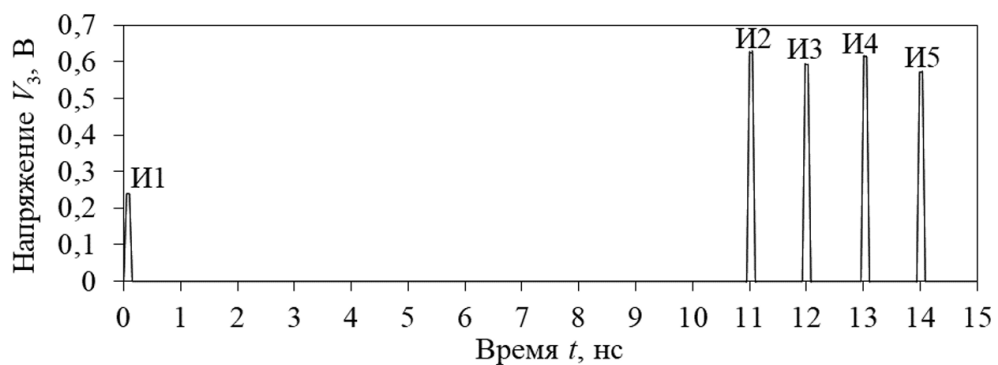
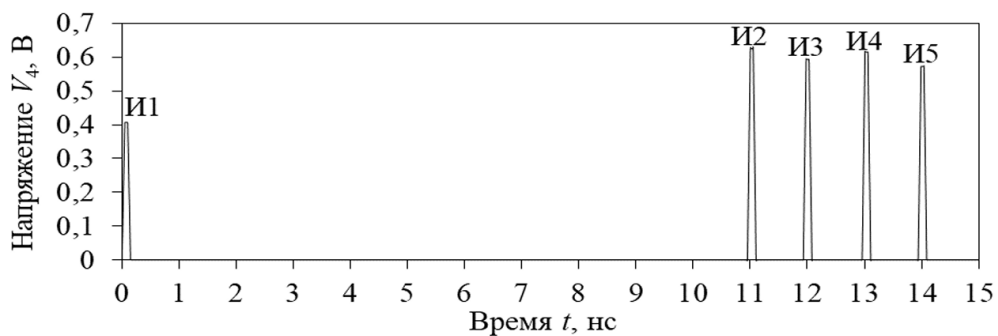


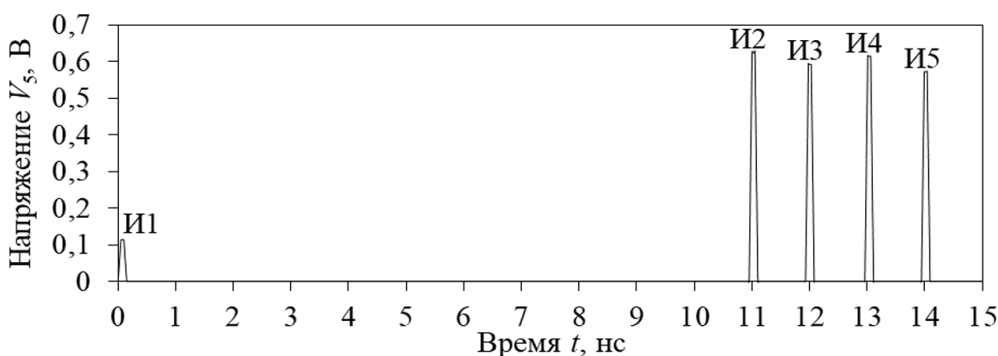
Рис. 14. Формы выходного напряжения при соединении полувитков на одном (а) и разных (б) слоях и диагонально (в)



а.



б.



в.

Рис. 15 Формы выходного напряжения при соединении полувитков на одном (а), разных (б) слоях и диагонально (в)

Таблица 6 – Параметры для трех схем зеркально-симметричной МЛ

Параметр	Схема 1	Схема 2	Схема 3
$U_0, В$	0,239	0,406	0,114
$U_1, В$	0,630	0,630	0,630
$U_2, В$	0,595	0,595	0,595
$U_3, В$	0,617	0,617	0,617
$U_4, В$	0,572	0,572	0,572
$2t\tau_1, нс$	10,951	10,951	10,951
$2t\tau_2, нс$	11,929	11,929	11,929
$2t\tau_3, нс$	12,959	12,959	12,959
$2t\tau_4, нс$	13,940	13,940	13,940
$\Delta t_1, нс$	0,977	0,977	0,977
$\Delta t_2, нс$	1,030	1,030	1,030
$\Delta t_3, нс$	0,981	0,981	0,981

Результаты моделирования показали, что СКИ раскладывается на импульс перекрёстной наводки, возникающий на ближнем конце линии и 4 основных импульса разложения с попарно равными амплитудами: V_1 и V_3 , V_2 и V_4 . Задержки импульсов 10,951, 11,929, 12,959 и 13,940 нс, а их разности (Δt_1 , Δt_2 , Δt_3) около 1 нс, это в два раза больше, чем в зеркально-симметричном модальном фильтре. Это позволяет разлагать СКИ вдвое большей длительности. При этих параметрах длительность разлагаемого СКИ 1 нс. Таким образом, данные из таблицы подтверждают результаты первоначального моделирования. По сравнению с традиционными средствами защиты (варисторами, разрядниками, TVS-диодами) способ обладает рядом преимуществ. Он демонстрирует стойкость к радиации, не имеет паразитных параметров, допускает многократное использование, сохраняет работоспособность при высоких напряжениях и отличается низкой стоимостью реализации. Кроме того, зеркально-симметричная МЛ из двух отдельных витков улучшает характеристики защиты по сравнению с аналогами. За счёт удвоения интервалов между импульсами разложения и использования лишь двух резисторов вместо 6 повышается надёжность системы и снижается стоимость решения. Вместе с тем, есть недостаток: сложность изготовления ПП. Это связано с необходимостью обеспечить точную геометрию МЛ. Кроме того, нужно реализовать один из трёх вариантов соединения проводников (на одном слое, на разных слоях или диагонально) с соблюдением симметрии поперечного сечения для попарного равенства амплитуд импульсов разложения. Наконец, нужна высокая точность воспроизведения многослойной структуры и взаимного расположения проводников, для баланса сохранения лицевой и боковой связи и равенства разностей погонных задержек мод. Тем не менее, дополнительные затраты на изготовление платы компенсируются рядом факторов: повышается общая надёжность системы и снижается вероятность отказов из-за воздействия СКИ; увеличивается срок службы оборудования благодаря отсутствию деградации защитных элементов (варисторов и TVS-диодов); способ можно применять в радиационно-опасных средах, где традиционные компоненты быстро выходят из строя; нет эксплуатационных затрат на периодическую замену защитных элементов.

Таким образом, проведённые исследования подтвердили эффективность однократного МР межсоединений. Разработанный метод обеспечивает значительное ослабление воздействия СКИ за счёт его разложения на 4 импульса меньшей амплитуды и удвоения временных интервалов между ними. Практическая ценность решения заключается в сочетании высокой помехозащищённости с улучшенными экономическими и эксплуатационными характеристиками.

2.2 Способ трассировки печатных проводников на двух сигнальных слоях печатной платы для цепей с резервированием

В 2020 г. заявлен способ трассировки печатных проводников на двух сигнальных слоях ПП для цепей с резервированием [27]. Его ключевая цель – снизить восприимчивость резервируемой цепи к внешним кондуктивным эмиссиям и уменьшить уровень таких эмиссий от самой цепи при реализации двухслой-

ной трассировки. Суть метода заключается в параллельной прокладке резервируемых и резервных проводников парами на одном слое с минимально допустимым зазором между ними. ПП состоит из двух слоёв диэлектрика: пары отрезков резервируемого и резервного проводников трассируются на внешней стороне одного из слоёв и между ними. Отрезки проводников на внешнем и внутреннем слоях образуют структуру связанной линии. Технический результат достигается за счёт модальных искажений помехового сигнала: если его длительность меньше разности задержек чётной и нечётной мод в структуре связанной линии, сигнал раскладывается на импульсы меньшей амплитуды. Это реализуется при трассировке на внешнем и внутреннем сигнальных слоях, проводники которых соединены переходными отверстиями. Часть, занимаемая отрезками резервируемого и резервного проводников, расположенных на внешнем слое двуслойной ПП, от общей длины структуры связанной линии определяется соотношением: $l_1/(l_1 + l_2)$, где l_1 – длина отрезка на внешнем слое, l_2 – длина отрезка во внутреннем слое.

Эффективность способа подтверждена моделированием. В эксперименте рассматривалось распространение трапециевидного импульса с ЭДС 2 В и длительностями фронта, спада и плоской вершины по 100 пс в структуре из двух отрезков связанных линий на двуслойной ПП общей длиной 1 м. Параметры поперечного сечения представлены в таблице 7. Номинал резисторов $R1$ и $R2$ выбран равным среднему геометрическому волновых сопротивлений четной и нечетной мод для рис. 16а, а $R3$ и $R4$ – рис. 16б. На рис. 16в представлена принципиальная схема для моделирования структур с МР. СКИ подавался между резервируемой трассой (активный проводник) и опорным проводником, а функцию резервной трассы выполнял пассивный проводник. На рис. 17 приведены формы напряжения в точках $V1$ (–) и $V3$ (–) активного проводника при $l_1 = 0,1$ м и $l_2 = 0,9$ м. На рис. 18 представлены зависимости разностей задержек ($\Delta\tau$) по отклику в точке $V3$ от $l_1 / (l_1 + l_2)$, показывающего часть, занимаемую отрезком 1 из рис. 16а от общей длины.

Таблица 7 – Значения параметров поперечного сечения

w , мкм	s , мкм	t , мкм	d , мкм	$h_1 = h_2$, мкм	ϵ_{r1}	ϵ_{r2}
200	200	70	600	200	3	4

Результаты показали амплитуды импульсов разложения в точке $V3$ 0,358 и 0,38 В, а задержки – 5,45 и 5,78 нс. Также выявлено, что разность задержек зависит от соотношения длин участков на разных слоях: чем меньше длина отрезка на внешнем слое и больше – на внутреннем, тем значительнее разность задержек.

В статье [28] исследована структура на основе данной компоновки. Её ключевая проблема – сложность оптимизации из-за разного влияния параметров на $|\Delta\tau|$ и средние геометрические импедансы (R) чётной и нечётной мод: изменение одного параметра может увеличивать $|\Delta\tau|$ для одной структуры и уменьшать для другой. Исследование включало несколько этапов. Сначала проведено моделирование в системе TALGAT (без потерь в проводниках и ди-

электриках) с исходными параметрами, представленными в таблице 8. Воздействовал трапецевидный СКИ с ЭДС 2 В и длительностями фронта, плоской вершины и спада по 10 пс. Поперечные сечения структуры при разном расположении проводников и стек слоев представлены на рис. 19, принципиальная схема соединения на одном слое – на рис. 20, а формы напряжений для структур с проводниками на обоих слоях – на рис. 21. Схема соединения проводников на обоих слоях платы соответствует рис. 16.

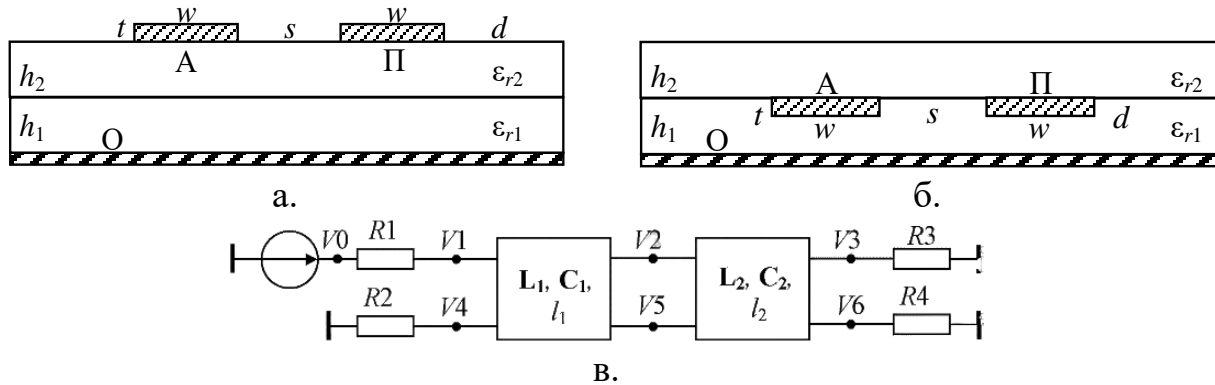


Рис. 16. Поперечные сечения структуры с проводниками на внешнем (а) и внутреннем (б) слоях, а также принципиальная схема соединения (в)

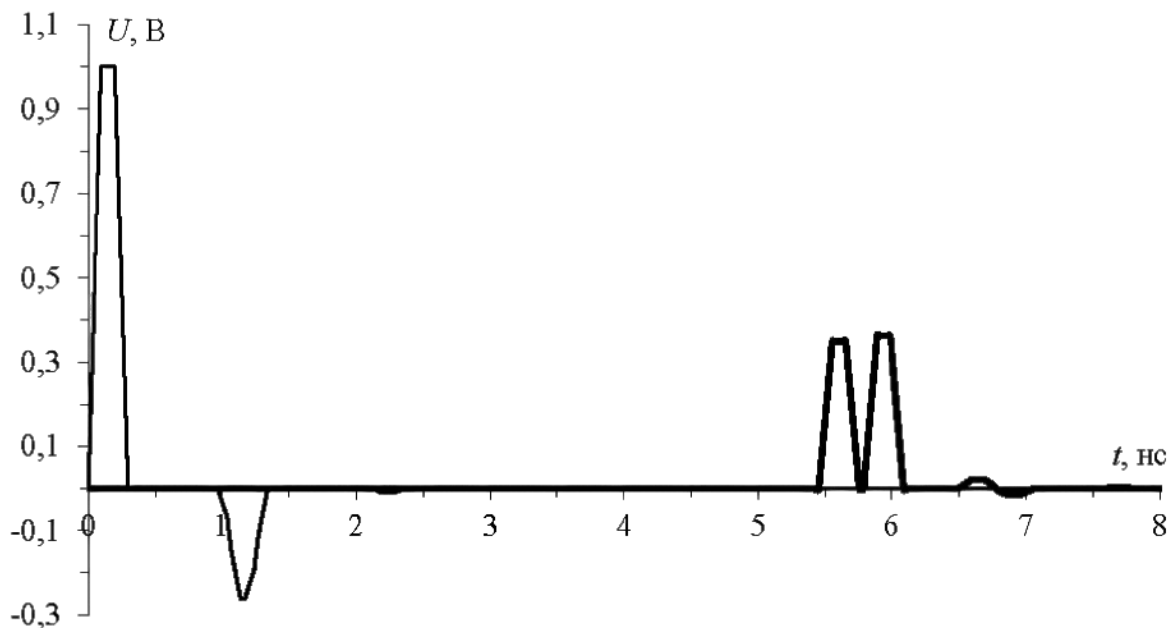


Рис. 17. Формы напряжения в узлах V1 (–) и V3 (–) активного проводника при $l_1=0,1$ м и $l_2=0,9$ м

Таблица 8 – Значения параметров поперечного сечения и длины

w , МКМ	s , МКМ	t , МКМ	$h_1=h_2$, МКМ	ϵ_{r1}	ϵ_{r2}	l , М
200	200	18	200	4	10,2	1

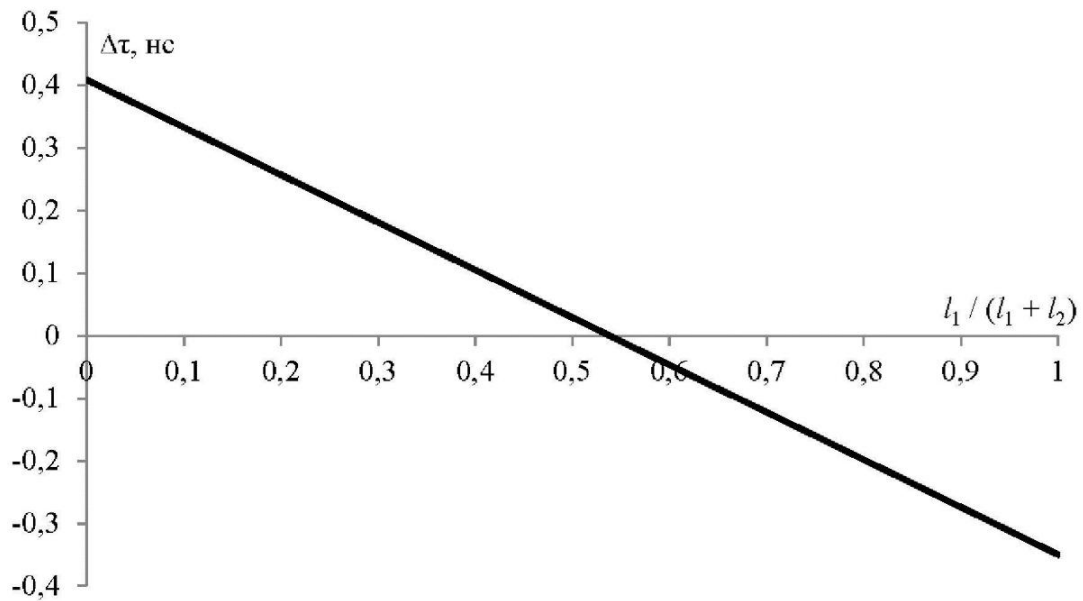


Рис. 18. Зависимость разности задержек ($\Delta\tau$) по отклику в узле V3 от $l_1 / (l_1 + l_2)$

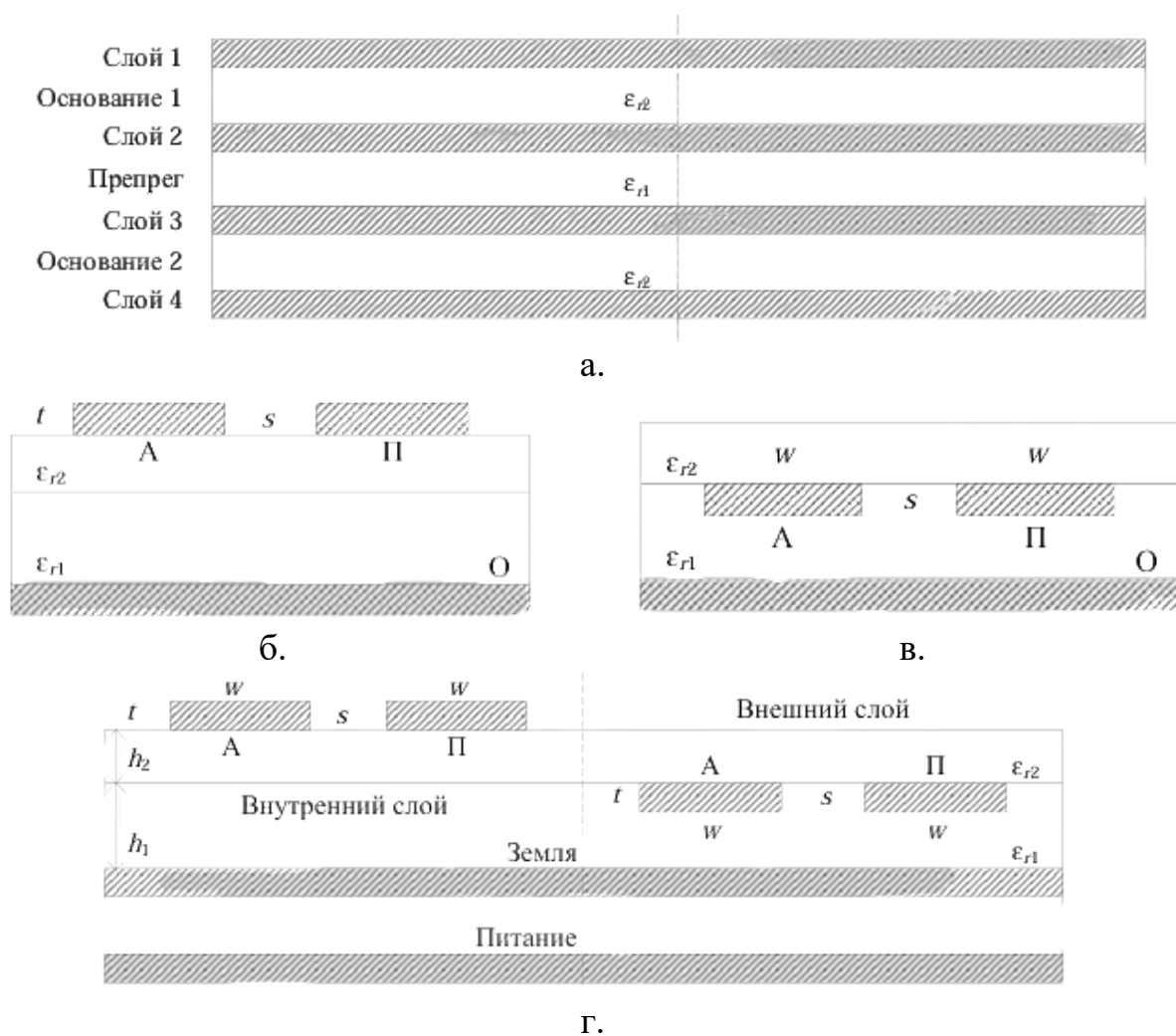


Рис. 19. Структура слоев ПП при предложенном способе (а), поперечные сечения структур при расположении проводников на внешнем (б), внутреннем (в) и обоих (г) слоях внутри одной ПП

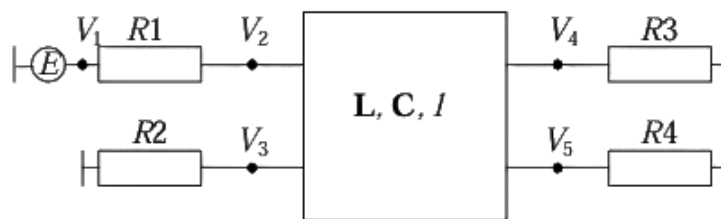


Рис. 20. Принципиальные схемы при расположении проводников на одном слое

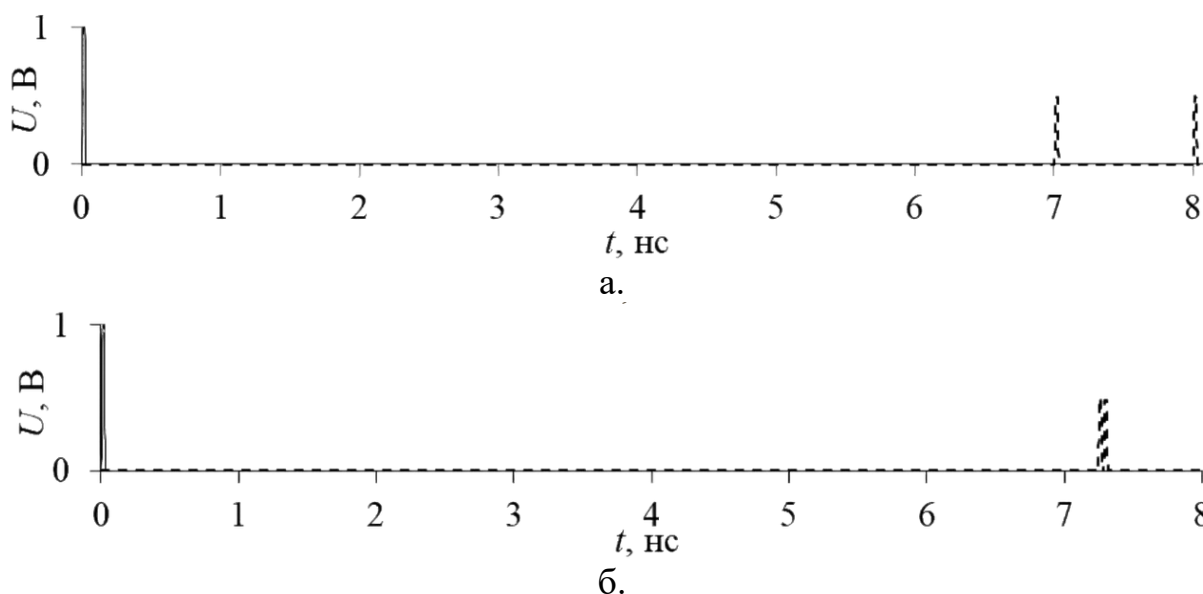


Рис. 21. Формы напряжения на ближнем (—) и дальнем (---) концах структуры с МР проводников на внутреннем (а) и внешнем (б) слоях

Одновариантный анализ показал, что на ближнем конце наблюдается импульс с амплитудой 1 В, а на дальнем – два импульса с максимальной амплитудой 0,5 В. При этом разности задержек составили 1 нс для внешнего слоя и 0,04 нс для внутреннего. Далее был проведен многовариантный анализ, который позволил установить, какие параметры оказывают наибольшее влияние на $|\Delta\tau|$ и R . Рассмотренные зависимости разностей задержек и импедансов представлены на рис. 22 и рис. 23 для структур с проводниками на внешнем и внутреннем слоях соответственно.

Из рисунков видно, что на $|\Delta\tau|$ существенно влияют h_1, h_2, t для внешнего слоя и w, s, h_1 для внутреннего слоя, а на R в обеих структурах – w и h_1 . Кроме того, на зависимостях есть точки экстремумов, обладающие нулевой чувствительностью к изменению параметра. На рис. 22а, показывающем зависимости $|\Delta\tau|$ от геометрических параметров, экстремумы достигаются при $w=s=h_2=300$ мкм и $h_1=200$ мкм. На рис. 22б, показывающем зависимости R от геометрических параметров, а также на рис. 22в и рис. 22г, экстремумов нет. У структуры с проводниками на внутреннем слое есть экстремум на рис. 23а при $h_2=300$ мкм.

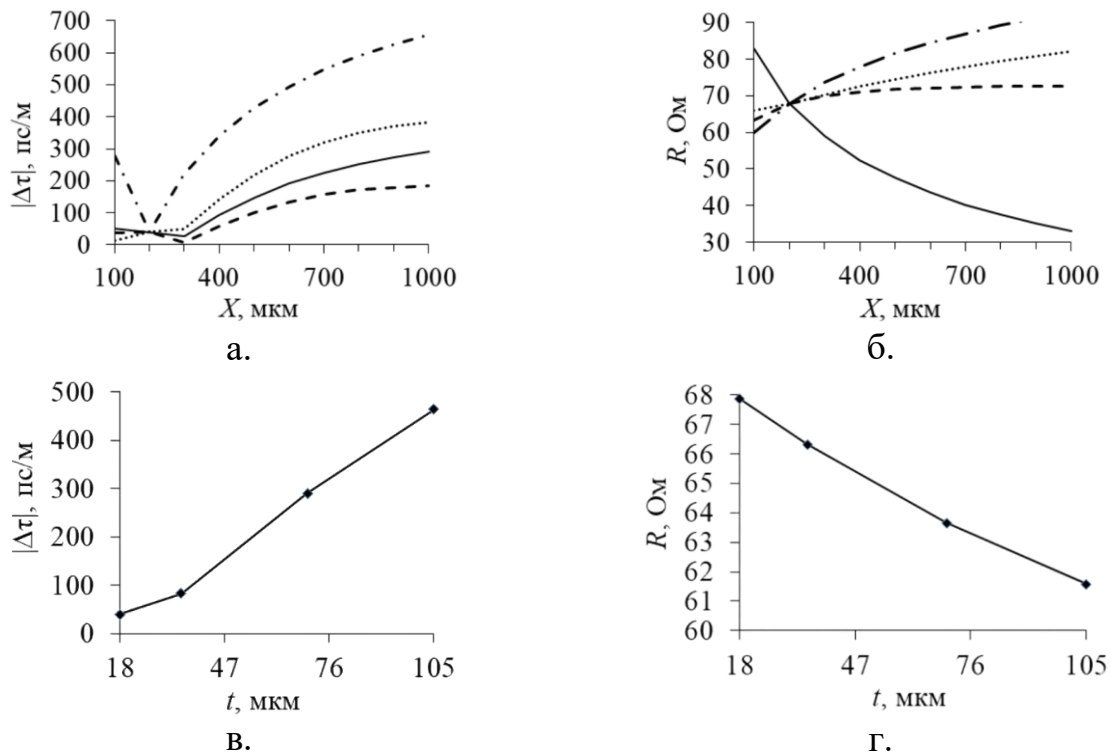


Рис. 22. Зависимости $|\Delta\tau|$ (а) и R (б) от X , где $X = w$ (—), s (---), h_1 (-·-·-), h_2 (...), а также $|\Delta\tau|$ (в) и R (г) от t для структуры с проводниками на внешнем слое

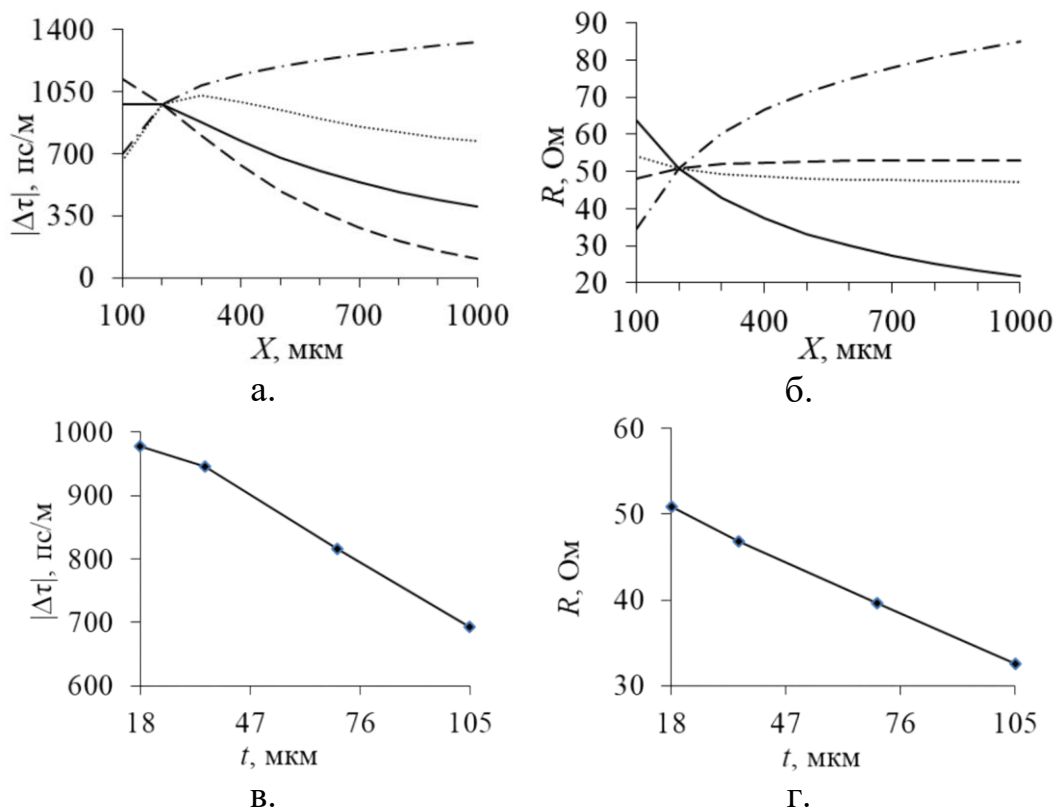


Рис. 23. Зависимости $|\Delta\tau|$ (а) и R (б) от X , где $X = w$ (—), s (---), h_1 (-·-·-), h_2 (...), а также $|\Delta\tau|$ (в) и R (г) от t для структуры с проводниками на внутреннем слое

Разработанный способ трассировки печатных проводников на двух сигнальных слоях представляет собой перспективное решение для повышения по-

мехозащищённости цепей с резервированием. Его ключевое преимущество заключается в обеспечении возможности двухслойной ортогональной трассировки резервируемых цепей, что даёт гибкость при разработке ПП. Благодаря модалым искажениям помехового сигнала метод позволяет эффективно ослаблять помехи: сигнал раскладывается на импульсы меньшей амплитуды, если его длительность меньше разности задержек чётной и нечётной мод. Надлежащий подбор параметров (ширины проводников, расстояний между ними, толщины диэлектрика и т.д.) и соотношения длин участков на разных слоях $l_1(l_1+l_2)$ снижает амплитуду помех: до 0,38 В при СКИ с ЭДС 2 В. Кроме того, способ снижает восприимчивость резервируемой цепи к внешним кондуктивным эмиссиям и одновременно уменьшает уровень эмиссий, генерируемых самой цепью, что в целом повышает надёжность системы без существенного усложнения топологии платы. Вместе с тем метод имеет недостаток, связанный с особенностями распространения сигналов в структурах с проводниками на внешнем и внутреннем слоях: из-за противоположных знаков разностей задержек чётной и нечётной мод итоговая разность задержек может уменьшаться вплоть до нуля, что приводит к снижению или даже полной потере подавления помех. Это осложняет оптимизацию структуры: изменение одного параметра способно улучшить показатели для одной конфигурации и ухудшить для другой. В результате для достижения оптимальных характеристик требуется проводить многовариантный анализ и вычислительно сложную оптимизацию (например, эвристическим поиском или генетическим алгоритмом), что увеличивает затраты времени на этапе проектирования. Таким образом, способ демонстрирует хороший баланс между гибкостью реализации и эффективностью защиты от кондуктивных помех. При тщательной настройке параметров и проведении необходимой оптимизации он может успешно применяться в ответственных системах, где критически важны высокая помехозащищённость и надёжность работы электронных устройств.

2.3 Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием на противоположных сторонах печатной платы

В работе [29] представлен способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием, размещаемых на противоположных сторонах ПП. Резервируемые и резервные элементы одноимённых цепей прокладываются параллельно друг другу на одном слое с минимально допустимым зазором. Посредством переходных отверстий эти проводники переходят на противоположную сторону платы. Для полноценной работы схемы дополнительно предусматриваются отдельные слои земли и питания. В результате воздействующий СКИ раскладывается на несколько импульсов с меньшей амплитудой – то есть помеха ослабляется. Этот процесс работает как при трассировке на одной стороне платы, так и на противоположных её сторонах, соединённых переходными отверстиями, что даёт возможность двухслойной трассировки резервируемых цепей и расширяет варианты компоновки на плате.

Эффективность предложенного подхода подтверждена результатами моделирования. В ходе эксперимента исследовалось распространение СКИ с ЭДС 2 В и трапецидальной формой: с длительностями фронта, плоской вершины и спада по 100 пс. Структура для моделирования включала два отрезка связанных линий длиной по 0,5 м каждый, размещённых на противоположных сторонах ПП. Параметры поперечного сечения представлены в таблице 9. Поперечное сечение структуры и формы напряжений представлены на рис. 24. Принципиальная схема соответствует рис. 16.

Таблица 9 – Параметры поперечного сечения

w , мкм	s , мкм	t , мкм	h , мкм	ϵ_r
200	100	65	510	10

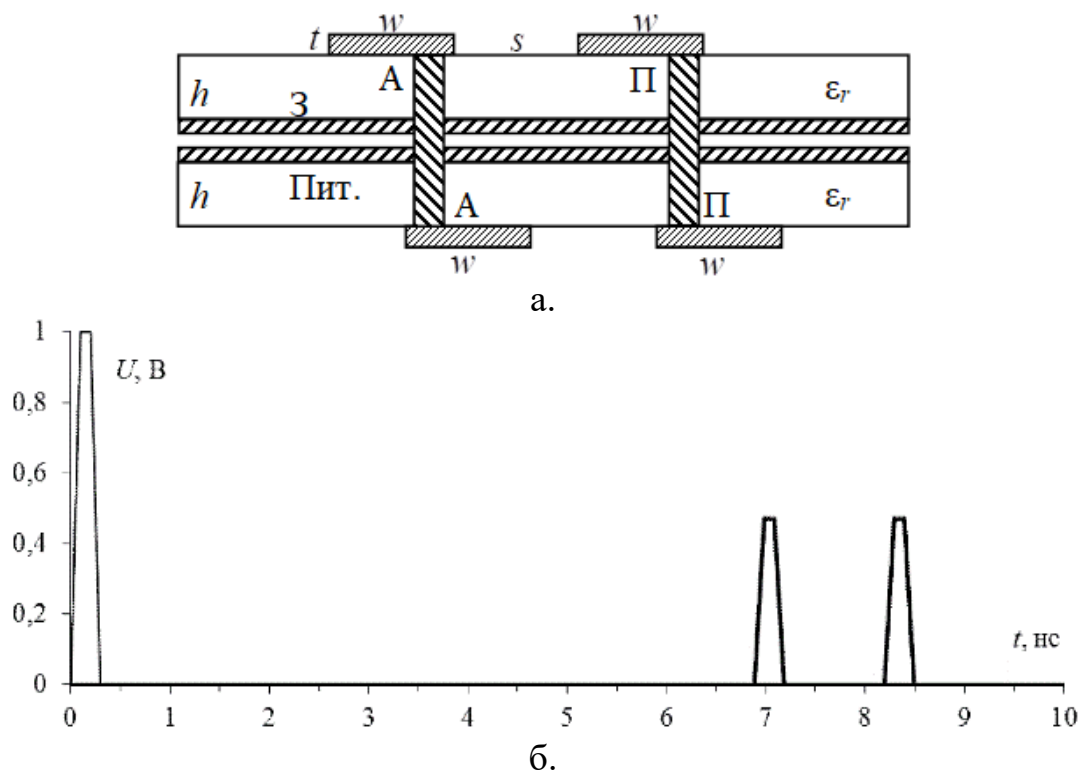


Рис. 24. Поперечное сечение структуры (а), принципиальная схема (б) и график форм напряжений (в)

Моделирование дало ослабление СКИ в 4 раза. В узле V3 амплитуды разложения импульсов составили 0,5 В, а задержки – 6,8 и 8,2 нс. Способ имеет ряд достоинств: он не только ослабляет СКИ за счёт разложения на составляющие с меньшей амплитудой, но и упрощает трассировку благодаря размещению проводников на противоположных сторонах платы с соединением через переходные отверстия. Метод рационально использует пространство за счёт двухстороннего размещения проводников, сохраняет возможность стандартной трассировки при внедрении резервирования и обеспечивает снижение как восприимчивости к помехам, так и уровня собственных эмиссий цепи. Вместе с тем у способа есть ограничения. Его реализация удобна только с компонентами, где резервная и резервируемая части выполнены в одном корпусе, а выводы

расположены симметрично либо попарно – это ограничивает спектр применимых компонентов и может усложнить подбор элементной базы. Контроль ослабления помехи и разности задержек мод можно осуществлять в относительно малом диапазоне параметров поперечного сечения, что снижает гибкость настройки характеристик подавления помех. Кроме того, существует необходимость в выделении отдельных слоёв для цепей питания и земли, что увеличивает сложность конструкции платы и может ограничивать возможности трассировки в компактных устройствах.

Таким образом, способ целесообразно применять в системах, где критически важна помехозащищённость цепей при ограниченном пространстве для трассировки, когда необходимо реализовать резервирование без значительного усложнения топологии платы и рационально использовать площадь ПП. При строгом соблюдении расчётных параметров поперечного сечения и корректном проектировании структуры связанных линий метод позволяет добиться значительного ослабления помех (в 4 раза и более) и повысить надёжность.

2.4 Способ компоновки многослойных печатных плат для цепей с резервированием

В работе [30] представлен способ компоновки многослойных ПП для цепей с резервированием, позволяющий упростить трассировку проводников при большом числе компонентов. Суть способа заключается в особом взаимном расположении резервируемой и резервной ПП: они склеиваются слоем диэлектрика, формируя единую многослойную структуру. Каждая из плат состоит из двух слоёв диэлектрика. На внешней стороне одного из слоёв и внутри него трассируются отрезки резервируемого и резервного проводников, образующие связанные линии. При склеивании плат отрезки проводников, расположенные на внешних и внутренних сторонах слоёв диэлектрика, выстраиваются параллельно и друг под другом в склеивающем слое. Слои опорного проводника размещаются на противоположных внешних сторонах резервируемой и резервной плат и формируют внешние стороны итоговой многослойной ПП. Реализация подхода возможна в структуре с двумя внешними и двумя внутренними сигнальными слоями. Проводники в такой многослойной плате соединяются переходными отверстиями, что обеспечивает необходимую связность и функциональность схемы. Поперечные сечения структуры представлены на рис. 25. Принципиальная схема соответствует рис. 16.

Эффективность способа подтверждена моделированием. Распространение трапецеидального СКИ с длительностями фронта, плоской вершины и спада по 100 пс и ЭДС 2 В. Структура для моделирования включала два отрезка связанных линий (длиной по 0,5 м каждый) на двуслойной ПП. Параметры поперечного сечения представлены в таблице 10, а график формы напряжения – на рис. 26.

В узле V3 амплитуды импульсов разложения составили 0,41 и 0,42 В, а задержки – 7,92 и 9,76 нс. Способ ослабляет помеховые импульсы, упрощает трассировку цепей при большом числе компонентов благодаря введению до-

полнительных внутренних сигнальных слоёв и обеспечивает надёжную защиту от кондуктивных эмиссий за счёт продуманной многослойной структуры. Вместе с тем реализация способа сопряжена с повышенной сложностью изготовления многослойных ПП. Тем не менее достигнутые результаты подтверждают перспективность подхода для применения в сложных электронных системах, где критически важны высокая плотность компоновки и эффективная защита от помех.

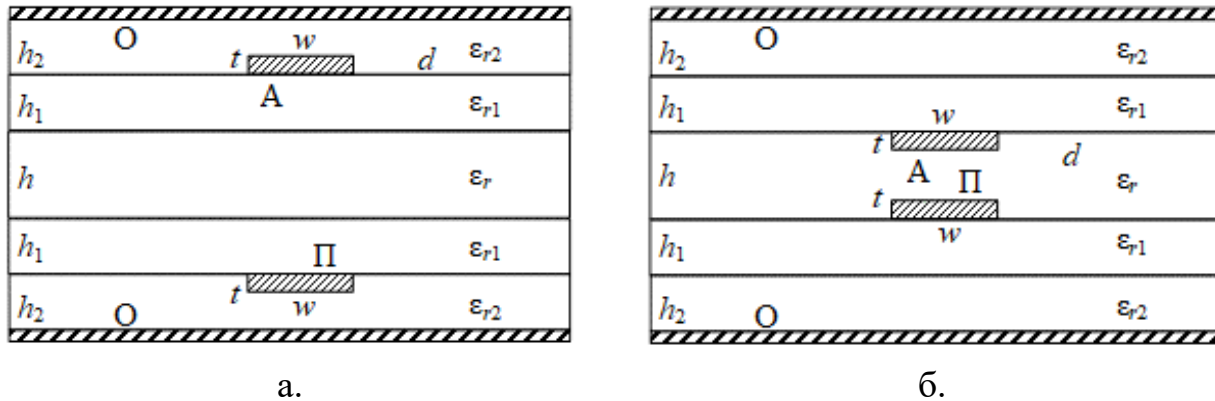


Рис. 25. Поперечные сечения структур с резервированием на внешних (а) и внутренних (б) сигнальных слоях многослойной ПП

Таблица 10 – Параметры поперечного сечения

w , МКМ	s , МКМ	t , МКМ	h , МКМ	h_1 , МКМ	h_2 , МКМ	d , МКМ	ϵ_{r1}	ϵ_{r2}
185	100	35	130	130	600	555	10,2	4,3

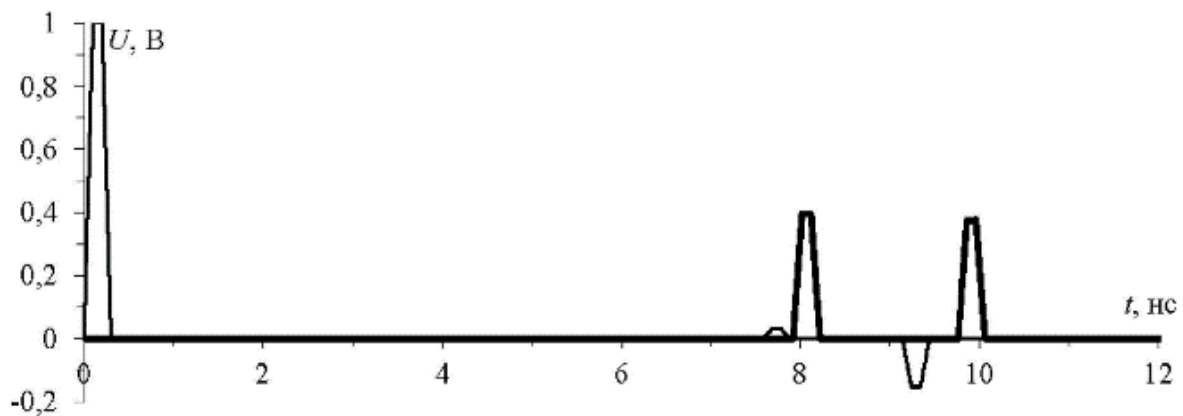


Рис. 26. Формы напряжения в узлах V1 (—) и V3 (---) при $l_1=l_2=0,5$ м

2.5 Способ трассировки двухсторонней печатной платы для цепей с модальным резервированием

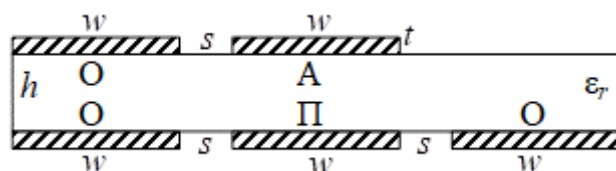
В работе [31] предложен способ трассировки двусторонней ПП для цепей с МР, позволяющий уменьшить массу платы без потери эффективности подавления СКИ. Суть способа заключается в особой компоновке и трассировке цепей на двух слоях подложки. На верхнем слое выполняется трассировка резервируемой цепи, при этом сигнальные проводники формируются за счёт зазоров

в опорной проводящей пластине. На нижнем слое, зеркально верхнему, располагается резервная цепь. Резервируемые и резервные сигнальные проводники одноимённых цепей размещаются друг под другом, а оставшиеся проводники электрически соединяются между собой. Ключевая особенность способа – отсутствие опорного проводника справа от активного на верхнем слое подложки. Это решение не только снижает массу ПП, но и благодаря лицевой связи позволяет достичь большего ослабления помех. При этом технология не требует сложных производственных процессов. Однако есть нюанс: если опорные проводники соединяются только на концах структуры, при некоторых параметрах на выходе могут наблюдаться три импульса. Это усложняет оптимизацию схемы. Технический результат – снижение массы ПП при сохранении эффективности подавления СКИ – достигается за счёт отсутствия одного опорного проводника и тщательного подбора параметров устройства.

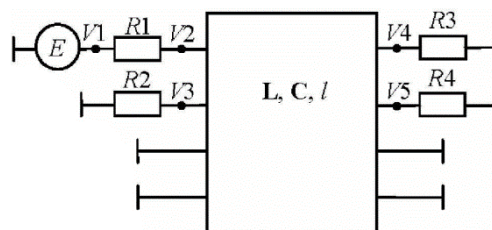
Эффективность метода подтверждена моделированием. Эквивалентной схемы из 4 параллельных проводников с $l=1$ м каждый. Первый проводник на одном конце соединён с идеальным источником ЭДС E с внутренним сопротивлением $R1$, а на другом – с нагрузкой сопротивлением $R3$. Начало сигнального проводника на нижнем слое подложки подключалось к пластине (схемной земле) через резистор $R2$, а конец – через резистор $R4$. Два крайних левых проводника выполняли роль опорных и напрямую подключались с обоих концов к схемной земле. Все сопротивления равны: $R1=R2=R3=R4=50$ Ом. Воздействующий СКИ имел трапецеидальную форму со следующими параметрами: амплитуда ЭДС – 2 В; нарастание, спад – 150 пс; плоская вершина – 200 пс. Параметры поперечного сечения представлены в таблице 11. На рис. 27 представлены поперечное сечение структуры и его принципиальная схема, а на рис. 28 – формы напряжения на активном и пассивном проводниках структуры.

Таблица 11 – Параметры поперечного сечения

w_1-w_4 , МКМ	s , МКМ	t , МКМ	h , МКМ	d , МКМ	ϵ_r
1000	300	105	500	555	4,5

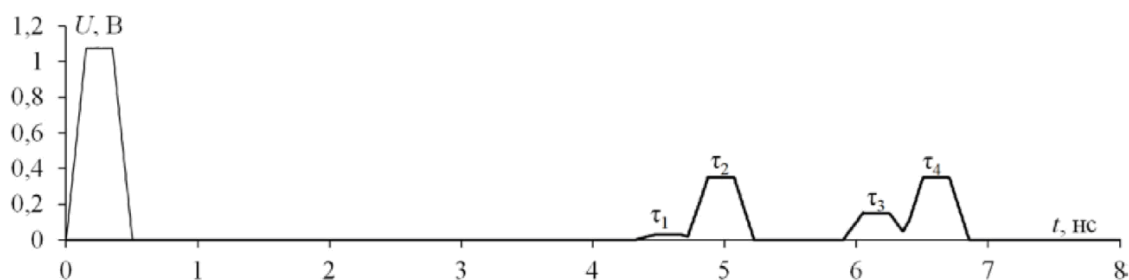


а.

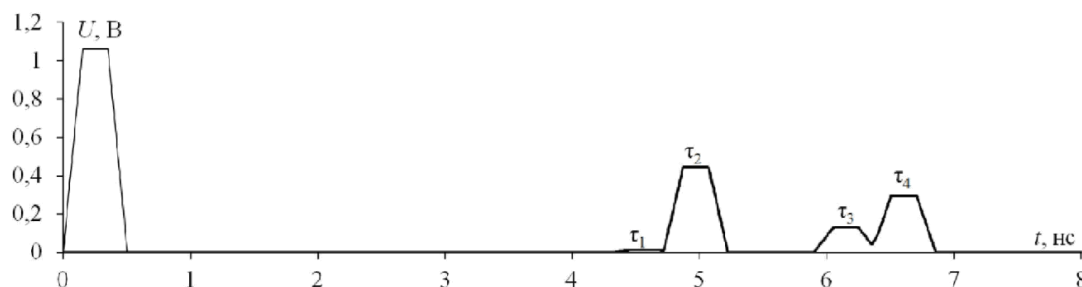


б.

Рис. 27. Поперечное сечение (а) и принципиальная схема (б) устройства



а.



б.

Рис. 28. Формы напряжения на входе (—) и выходе (---) структуры при подаче СКИ на активный (а) и пассивный (б) проводники структуры

Результаты моделирования показали, что на выходе структуры (узел V4) наблюдаются 4 импульса разложения с погонными задержками: 4,398, 4,750, 5,736, 6,359 нс/м. Максимальное напряжение на выходе составило 0,33 В, тогда как для прототипа этот показатель равен 0,5 В. Разложение СКИ на импульсы меньшей амплитуды обусловлено разностью погонных задержек мод в структуре, созданной по предложенному способу компоновки. Если подавать СКИ между пассивным проводником и любым опорным, максимальное напряжение на выходе достигает 0,45 В.

Дополнительно в работе [32] исследованы варианты конструкции с измененной конфигурацией опорных проводников. В статье промоделированы и исследованы формы напряжения на входе и выходе МФ для трёх вариантов конструкции с изменённой конфигурацией опорных проводников: в первом случае отсутствовал нижний левый опорный проводник, во втором — верхний левый, в третьем — верхний правый. Наилучший результат был у структуры, аналогичной по компоновке в описываемом выше способе (когда у структуры удален верхний правый опорный проводник), с амплитудами напряжения импульсов: 0,07, 0,334, 0,216 и 0,325 В. Разности погонных задержек мод при этом составили: 0,623, 1,236 и 0,352 нс/м. Поперечное сечение структуры и ее временной отклик представлены на рис. 29.

Таким образом, исключение верхнего правого опорного проводника позволяет одновременно снизить массу устройства и сохранить необходимые электрические характеристики. Предложенный способ трассировки демонстрирует удачное сочетание снижения массы ПП и сохранения высокой степени ослабления СКИ.

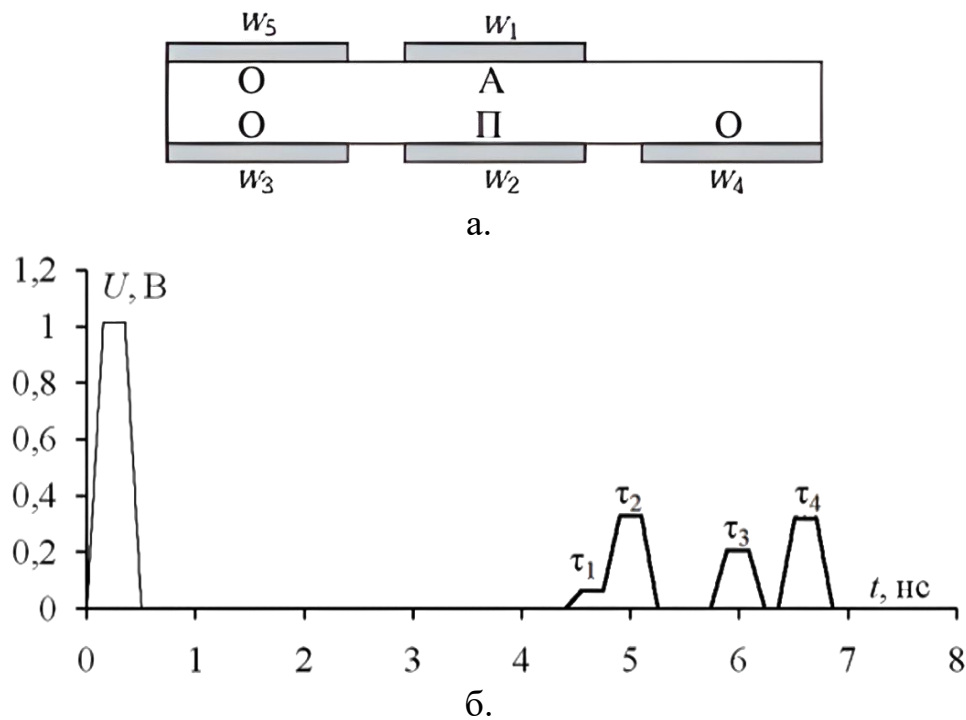


Рис. 29. Поперечное сечение структуры (а) и ее временной отклик (б)

2.6 Способ трассировки двухсторонней печатной платы с модальным резервированием при уменьшенном числе проводников

В работе [33] представлен способ трассировки двусторонней ПП с МР при уменьшенном числе проводников. Он отличается от ранее предложенного решения из [31] особой конфигурацией расположения опорных проводников: на верхнем слое подложки опорный проводник размещается слева от резервируемого, а нижнем – справа от резервного проводника. Такая схема позволяет сократить общее число проводников, а значит, уменьшить массу ПП без изменения ослабления СКИ. Вместе с тем, важно точно настраивать параметры структуры для достижения максимизации разности задержек и уровня ослабления. Поперечное сечение и принципиальная схема представлены на рис. 30.

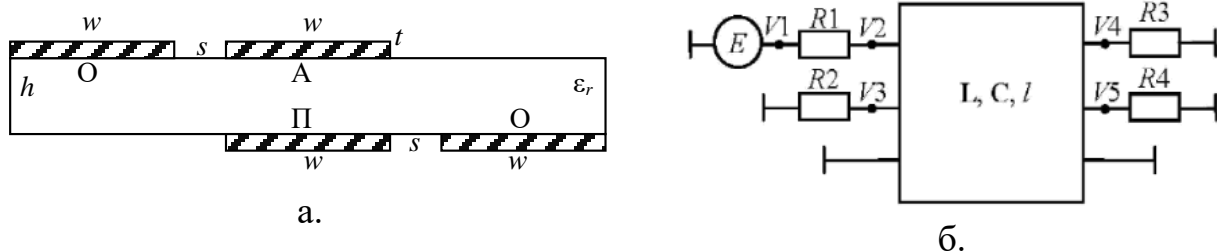


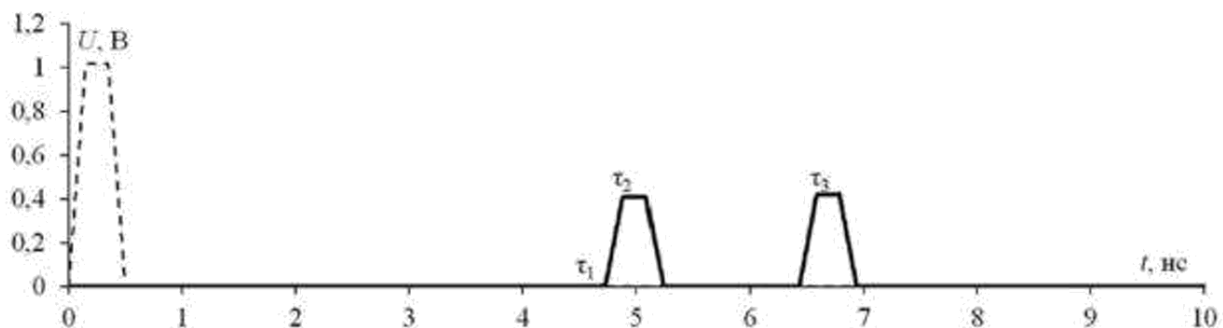
Рис. 30. Поперечное сечение (а) и принципиальная схема (б) структуры

Эффективность способа подтверждена моделированием. Схемы из трёх проводников с $l=1$ м каждый, причём четвёртый проводник (один из опорных) выполнял роль схемной земли. Первый (резервируемый) проводник на одном конце соединён с источником СКИ – идеальным источником ЭДС E с внутрен-

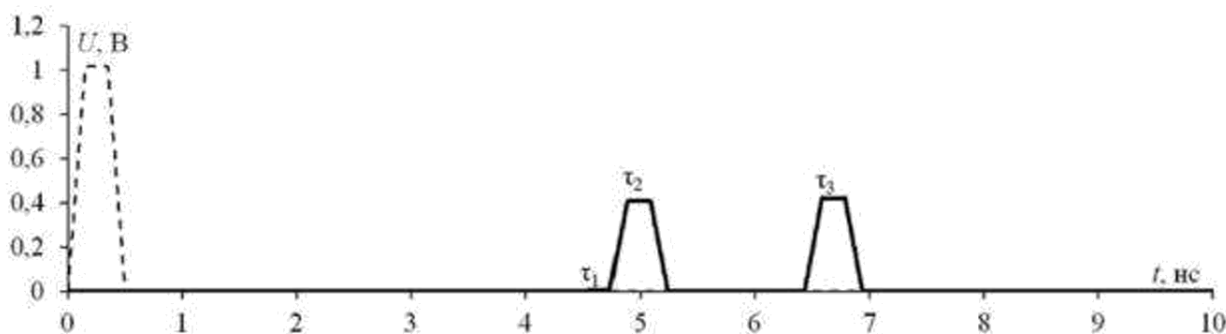
ним сопротивлением $R1$, а на другом – с нагрузкой сопротивлением $R3$. Начало второго (резервного) проводника подключалось к схемной земле через резистор $R2$, а конец – через резистор $R4$. Второй опорный проводник соединялся с обоих концов со схемной землёй. При этом $R1=R2=R3=R4=50$ Ом. Воздействующий СКИ имел трапецеидальную форму, амплитуду 2 В, длительность нарастания, спада – 150 пс, а плоской вершины – 200 пс. Параметры поперечного сечения представлены в таблице 12. СКИ подавался между резервируемым (активным) и опорным проводниками, а резервный оставался пассивным. На рис. 31 представлены временные отклики на концах активного и пассивного проводников.

Таблица 12 – Параметры поперечного сечения

w , МКМ	s , МКМ	t , МКМ	h , МКМ	ϵ_r
1500	500	35	500	4,5



а.



б.

Рис. 31. Временной отклик структуры на ближнем (- -) и дальнем (—) концах активного (а) и пассивного (б) сигнальных проводников

Результаты моделирования показали, что на выходе структуры (узел V4) наблюдаются три импульса. Два из них – основные импульсы разложения с погонными задержками 4,73 и 6,43 нс/м. Третий – импульс малой амплитуды с погонной задержкой 4,4 нс/м. Максимальное напряжение на выходе составило 0,42 В, что ниже показателя прототипа (0,5 В). Разложение СКИ на импульсы меньшей амплитуды обусловлено разностью погонных задержек мод. Недостаток, связанный с ограниченной эффективностью при неоптимальных параметрах, накладывает свои ограничения. Как показало моделирование структуры с аналогичными параметрами в [32], входной сигнал может раскладываться всего

на два импульса, при этом уровень ослабления около 1,25 раза. Для сравнения: в патенте при аналогичном разложении на два импульса достигалось ослабление около 2 раз. Это подчёркивает значимость тщательного подбора оптимальных параметров. На рис. 32 представлены формы напряжения на входе и выходе структуры, а амплитуды импульсов и погонные задержки – в таблице 13.

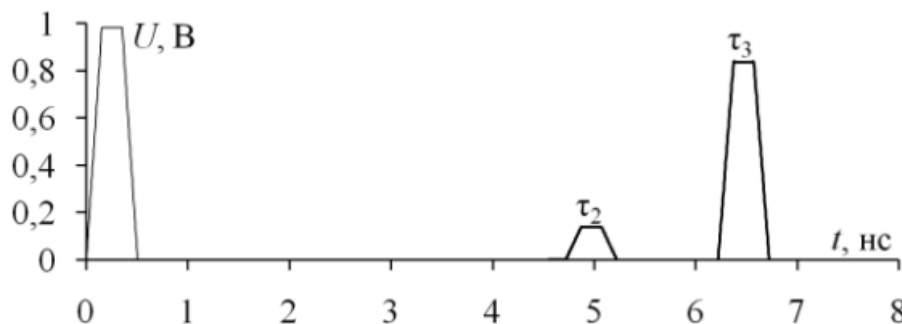


Рис. 32. Формы напряжения на входе (—) и выходе (---) структуры

Таблица 13 – Амплитуды (U_i , В) и погонные задержки мод (τ_i , нс/м) структуры

τ_1	τ_2	τ_3	U_1	U_2	U_3
4,524	4,80013	6,20316	–	0,160	0,817

Из полученных данных видно, что в отдельных диапазонах параметров эффективность ослабления может существенно снижаться – вплоть до практически полного отсутствия ослабления сигнала. Поэтому для достижения требуемых характеристик подавления помех в представленном способе критически важно точно настраивать параметры структуры с учётом целевых показателей разности задержек и уровня ослабления. Таким образом, метод демонстрирует хороший потенциал для современных компактных и мобильных устройств, но его успешное применение напрямую зависит от грамотного проектирования и точной настройки параметров под конкретные условия эксплуатации.

2.7 Способ симметричной трассировки сигнальных и опорных проводников цепей с модальным резервированием

В работе [34] предложен способ симметричной трассировки печатных проводников цепей с МР, который позволяет уменьшить массу ПП, снизить её изгиб и восприимчивость цепей к внешним кондуктивным эмиссиям. Суть способа заключается в особой компоновке резервируемых и резервных проводников с единым опорным. Резервируемые и резервные проводники одноимённых цепей прокладываются парами параллельно друг другу на одной стороне платы с минимально допустимым технологическим зазором между ними. Единый опорный проводник при этом размещается на другой стороне ПП: торцы каждого его участка располагаются под внешними торцами соответствующих резервируемого и резервного проводников. Преимущество решения – снижение массы платы за счёт того, что опорный проводник выполняется не в виде

сплошной плоскости, а шириной всего в пару проводников. На рис. 33 представлены поперечные сечения для прототипа и данного способа.

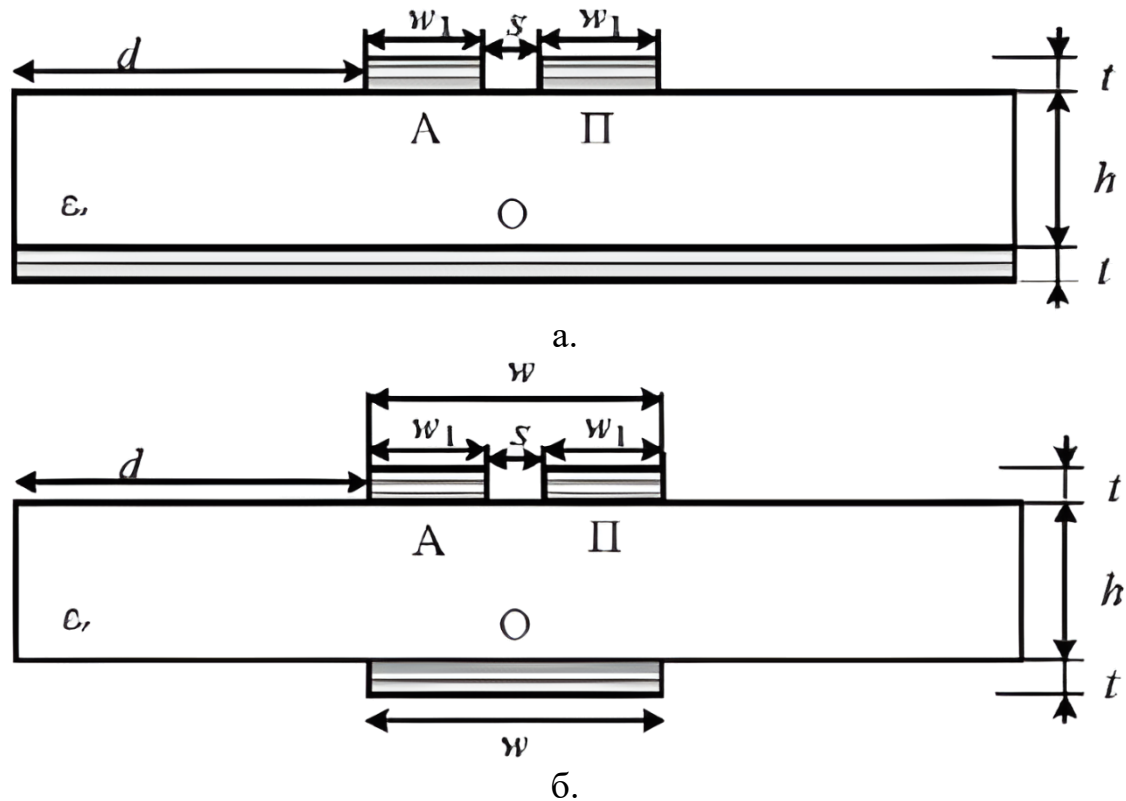


Рис. 33. Поперечные сечения прототипа (а) и предложенной структуры (б)

Эффективность способа подтверждена моделированием связанной линии с $l=1$ м из трёх проводников. Все сопротивления были равны: $R1=R2=R3=R4=72$ Ом. Воздействующий СКИ имел трапецеидальную форму, амплитуду 2 В, длительность нарастания, спада и плоской вершины – 100 пс. Принципиальная схема устройства представлена на рис. 34а, а её параметры – в таблице 14. На рис. 34б представлены формы напряжения на ближнем и дальнем концах активного проводника.

Таблица 14 – Параметры поперечного сечения структуры

w_1 , мкм	d , мкм	s , мкм	t , мкм	w , мкм	h , мкм	ϵ_r
300	300	100	65	700	510	10

Вычисленная разность погонных задержек чётной ($\tau_2=6,8$ нс/м) и нечётной ($\tau_1=5,7$ нс/м) мод составила около 1,1 нс/м. Результаты моделирования во временной области показали, что на выходе активного проводника структуры (узел V3) наблюдаются два импульса с разницей задержек около 1,1 нс. Амплитуда напряжения на выходе 0,42 В, в 2,38 раза меньше половины ЭДС (1 В) и примерно на 20% ниже, чем в прототипе [15], где уровень импульсной помехи уменьшился только в 2 раза. Вместе с тем способ сложен для реализации в многослойных ПП. Кроме того, возможны ограничения в платах с большим числом цепей. Предложенный способ симметричной трассировки демонстрирует ком-

плексное решение ряда конструктивных и функциональных задач. Он позволяет снизить массу ПП за счёт оптимизации конструкции опорного проводника, минимизировать изгиб платы благодаря сбалансированному распределению фольги с обеих сторон, а также существенно ослабить кондуктивные эмиссии.

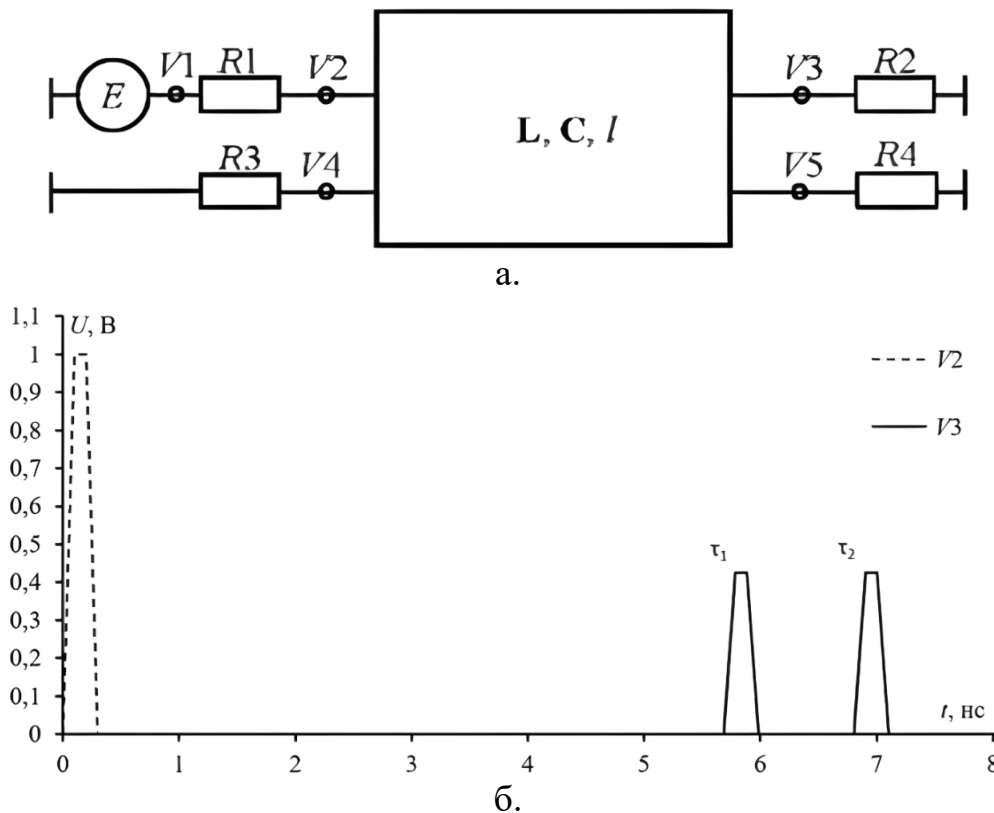


Рис. 34. Поперечное сечение (а) и формы напряжения (б) на ближнем (---) и дальнем (—) концах активного проводника структуры

2.8 Способ удаленной трассировки печатных проводников цепей с однократным модальным резервированием

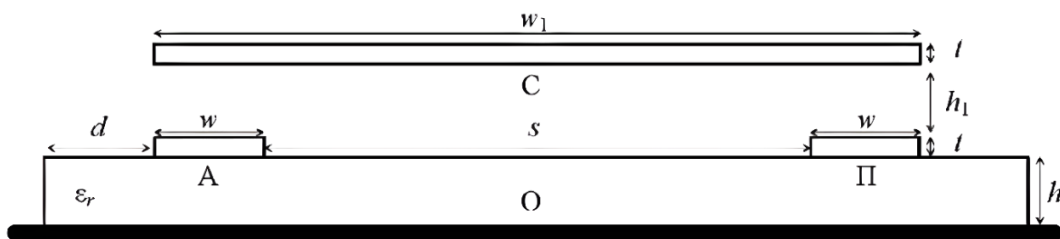
В работе [35] представлен способ удалённой трассировки печатных проводников цепей с однократным МР. Он решает проблему низкой надёжности традиционных модальных фильтров (МФ), которая возникает из-за близкого расположения сигнальных проводников. При опасном механическом воздействии могут одновременно повредиться и резервируемый, и резервный проводники. Если же просто удалять проводники друг от друга, эффект фильтрации, вызываемый модальными искажениями, пропадает. Предложенный способ сохраняет помехозащищённость и одновременно повышает надёжность конструкции. Его суть заключается в следующем: резервируемый и резервный проводники одноимённых цепей прокладываются парами, параллельно друг другу на одной стороне платы. Над ними располагается связывающий проводник – он имеет обеспечивающую модальное разложение электромагнитную связь с резервируемым и резервным проводниками и соединяется на концах с опорным проводником. Такое решение даёт два ключевых преимущества. Во-первых, связывающий проводник физически защищает резервируемый и ре-

зевный проводники от механических повреждений. Во-вторых, возможность удаления резервируемого и резервного проводников друг от друга снижает риск их одновременного повреждения при внешнем воздействии. При этом сохраняются характеристики работы: разность погонных задержек мод доходит до 1,5 нс/м, а ослабление до 2 раз.

Проведено моделирование временного отклика на СКИ прототипа, так и устройства с ЭДС 2 В и длительностью нарастания, спада и плоской вершины по 100 пс. Все резисторы имеют номинал 50 Ом. Параметры поперечного сечения структуры представлены в таблице 15. На рис. 35 представлены поперечное сечение и принципиальная схема исследуемой структуры. На том же рисунке представлены формы напряжений на входе и на выходе активного проводника структуры при $s=0,1; 10$ мм.

Таблица 15 – Параметры поперечного сечения структуры

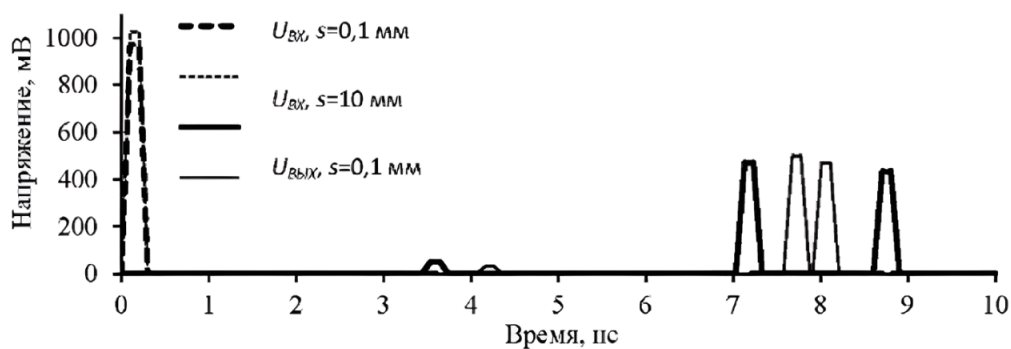
$w=d$, МКМ	t , МКМ	h , МКМ	ϵ_r
300	65	510	10



а.



б.



в.

Рис. 35. Поперечное сечение (а) и принципиальная схема (б) и формы напряжения (в) на входе $s=0,1$ (---), 10 мм (····) и выходе ($s=0,1$ (—), 10 мм (—)) структуры

Таблица 16 – Параметры устройства

$d=w_1$, МКМ	$h_1=h_2$, МКМ	t , МКМ	ϵ_r	l , м	w_2 , мм	R , Ом
300	510	65	10	1	10,6	50

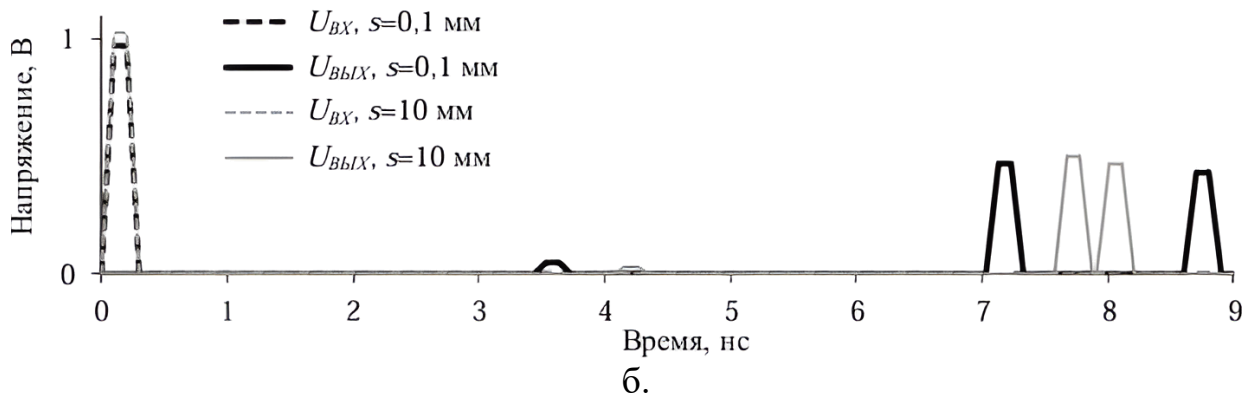
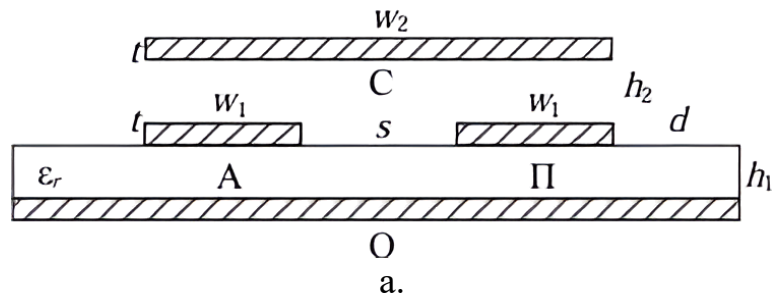


Рис. 36. Поперечное сечение (а) и формы напряжения (б) на входе ($s=0,1$ (---), 10 (···) мм) и выходе ($s=0,1$ (—), 10 (—) мм) активного проводника структуры

Результаты моделирования подтверждают эффективность способа. При $s=0,1$ мм на выходе наблюдаются три импульса разложения с задержками 3,42, 7,03 и 8,57 нс/м и амплитудами 50, 470 и 435 мВ соответственно. При $s=10$ мм задержки составляют 4,04, 7,57 и 7,89 нс/м, а амплитуды – 31, 500 и 465 мВ. Результаты подтверждают модальное разложение СКИ с уменьшением амплитуды примерно в 2 раза. Вместе с тем введение связывающего проводника усложняет конструкцию платы.

Таким образом, способ перспективен для применения в системах с повышенными требованиями к надёжности и помехозащищённости, работающих в условиях возможных механических воздействий: технике, промышленном оборудовании, транспортных системах, телекоммуникационных узлах и других ответственных приложениях. Он эффективно решает проблему уязвимости традиционных модальных фильтров, сохраняя необходимые фильтрующие свойства.

3. Обзор исследований за 2023-2026 годы

3.1 Способ компоновки дифференциальной пары для цепей с модальным резервированием на основе зеркально-симметричной полосковой структуры

Предложен способ компоновки дифференциальной пары для цепей с МР [37], основанный на использовании зеркально-симметричной полосковой структуры. Он нацелен на ослабление помехового сигнала в дифференциальном и синфазном режимах воздействия помехи. Технический результат достигается за счёт формирования 5-проводной связанной линии передачи, включающей опорные, резервные и резервируемые проводники в сочетании с диэлектрической средой (рис. 37а). Активные проводники резервируемой дифференциальной пары расположены друг под другом через диэлектрическую подложку. Опорные проводники размещены посередине структуры — на проводящих слоях 2 и 3. Резервная дифференциальная пара, состоящая из двух пассивных проводников, расположена зеркально-симметрично оси между опорных. Расположение проводников на 1 и 4 слоях создаёт лицевую связь, что увеличивает электромагнитную связь между проводниками. Поперечное сечение структуры не меняется по длине. Его параметры приведены в таблице 17, а принципиальная схема на рис. 37б. Источник СКИ представлен идеальным источником ЭДС $E_{Г}$ с внутренними сопротивлениями $R_{Г}$, подключённым к активным проводникам на ближнем конце. На дальнем конце к активным проводникам подсоединён нагрузочный резистор $R_{Н}$. Используется СКИ с длительностью фронта, спада и плоской вершины по 100 пс. Для реализации дифференциального воздействия амплитуда ЭДС источника $E_{Г}=1$ В. Выходное напряжение и частотная зависимость структуры представлены на рис. 38. На рис. 39 представлены синфазная составляющая сигнала на выходе и глазковая диаграмма.

Таблица 17 – Параметры поперечного сечения

s , МКМ	w , МКМ	t , МКМ	h , МКМ	H , МКМ	l , м	R , Ом	ϵ_{r1}	ϵ_{r2}
700	325	35	920	510	1	100	4,1	4,6

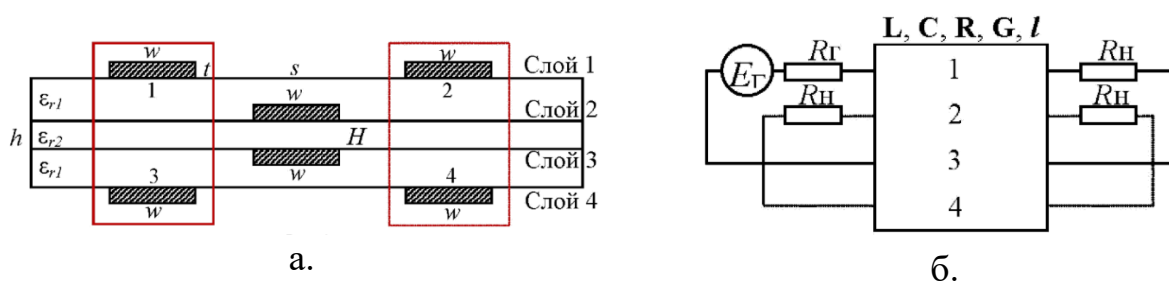


Рис. 37. Поперечное сечение (а) и принципиальная схема (б) структуры

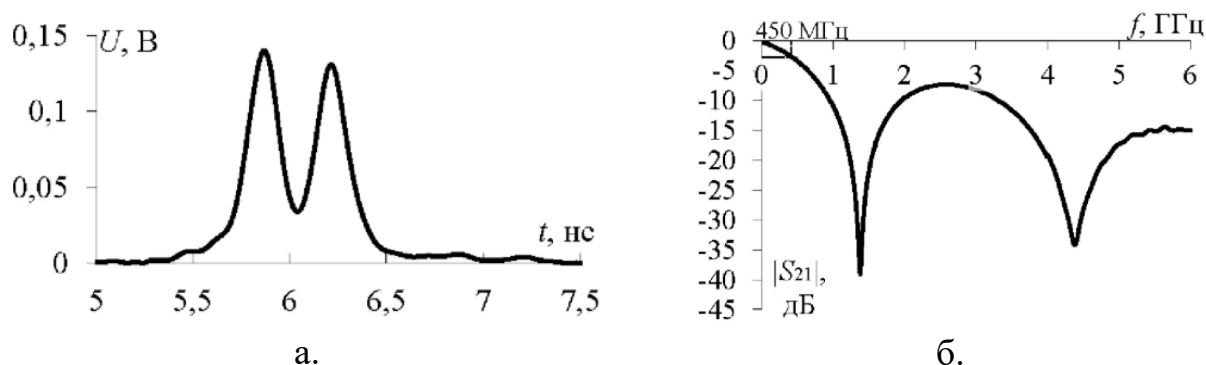


Рис. 38. Напряжение на выходе (а) и частотная зависимость (б) структуры

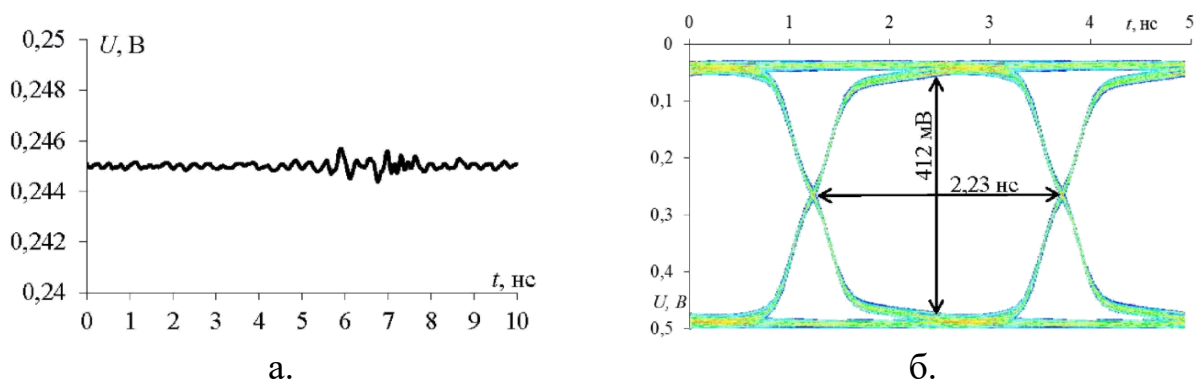


Рис. 39. Синфазная составляющая сигнала на выходе структуры (а) и глазковая диаграмма (б)

Моделирование показало, что помеховый импульсный сигнал малой длительности, подаваемый на вход между резервными проводниками, распространяется вдоль структуры и раскладывается на ряд импульсов с меньшей амплитудой за счёт модального разложения сигнала. Максимальное напряжение импульсов на выходе составило 140 мВ. Вносимые потери достигли 17,08 дБ (или 3,57 раза). Полоса пропускания по уровню минус 3 дБ составила 450 МГц. Максимальная амплитуда колебания синфазной составляющей сигнала на выходе – 1 мВ (практически отсутствует). При скорости передачи сигнала 440 МГц (в пределах полосы пропускания структуры) глазковая диаграмма демонстрирует полностью открытый «глаз» с шириной открытия 2,23 нс. Отношение сигнал/шум составило 29,28 дБ, а среднеквадратичное фазовое отклонение – 10,5 пс. Однако реализация способа усложняется из-за пятипроводной структуры и многослойности. Таким образом, способ перспективен для систем передачи дифференциальных сигналов, где критически важны высокая помехозащищённость и целостность информации. Он найдёт применение в высокоскоростных интерфейсах передачи данных, таких как USB 3.0, HDMI и DisplayPort, а также в телекоммуникационном оборудовании.

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

Предложена полосковая структура с лицевой связью для защиты от СКИ в синфазном и дифференциальном режимах [38]. Её ключевая особенность –

рост ослабления помеховых сигналов в обоих режимах воздействия. Его реализует полосковая структура, состоящая из опорного проводника и двух параллельных ему проводников, а также диэлектрической среды (рис. 40). Опорный и активный проводники расположены на одной стороне диэлектрической подложки, а пассивный – симметрично активному на другой. Пассивный проводник продлён до уровня внешнего края опорного проводника. Аналогичная структура размещена центрально-симметрично со стороны левого края поперечного сечения всей полосковой структуры. Увеличение уровней ослабления помеховых сигналов достигается за счёт усиления связей между активными и пассивными проводниками путём увеличения ширины пассивных проводников и их расположения на обеих сторонах диэлектрической подложки. Дополнительно применяется комбинация оконечных нагрузок на ближнем и дальнем концах пассивных проводников.

Поперечное сечение и принципиальная схема структуры представлены на рис. 40. Параметры поперечного сечения представлены в таблице 18. При этом g – защитный интервал между проводниками и краями структуры. Ширина пассивного проводника равна сумме ширин активного и опорного проводников и расстоянию между ними. Схема включает 6 проводников одинаковой длины $l=100$ мм. Два из них (опорные) обозначены как схемная земля. К активным проводникам на ближнем конце подключены источники импульсных сигналов – идеальные источники ЭДС $E_{Г1}$ и $E_{Г2}$ с внутренними сопротивлениями $R_{Г}$. На дальнем конце к активным проводникам подсоединены нагрузочные резисторы $R_{Н}$. Все резисторы имеют номинал 50 Ом. На ближнем конце пассивных проводников – холостой ход (ХХ), а дальнем – короткое замыкание (КЗ). Воздействует трапецевидный импульс с длительностью фронта, спада и плоской вершины по 100 пс. Амплитуда ЭДС источника меняется в зависимости от режима воздействия помехи: для синфазного $E_{Г1}=E_{Г2}=1$ В, а дифференциального – $E_{Г1}=0,5$ В и $E_{Г2}=-0,5$ В. Результаты моделирования при синфазном и дифференциальном режимах приведены на рис. 41.

Таблица 18 – Параметры поперечного сечения

w , мм	w_1 , мм	s , мм	t , мкм	h , мкм	R , Ом	ϵ_{r1}	ϵ_{r2}	g , мм
10	21	2	105	360	50	1	20	1

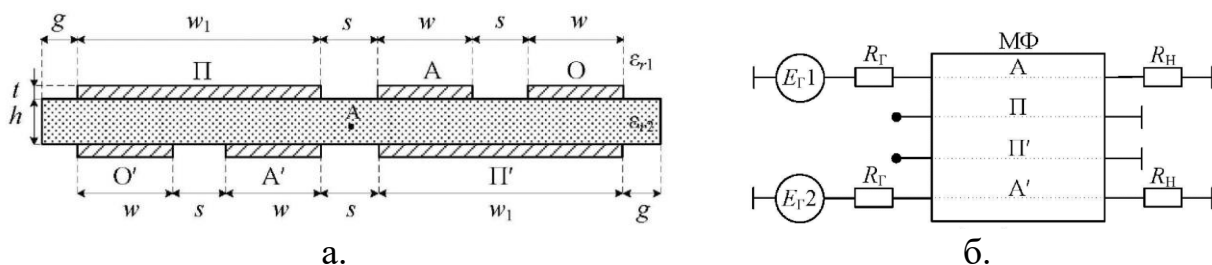


Рис. 40. Поперечное сечение (а) и принципиальная схема (б) структуры

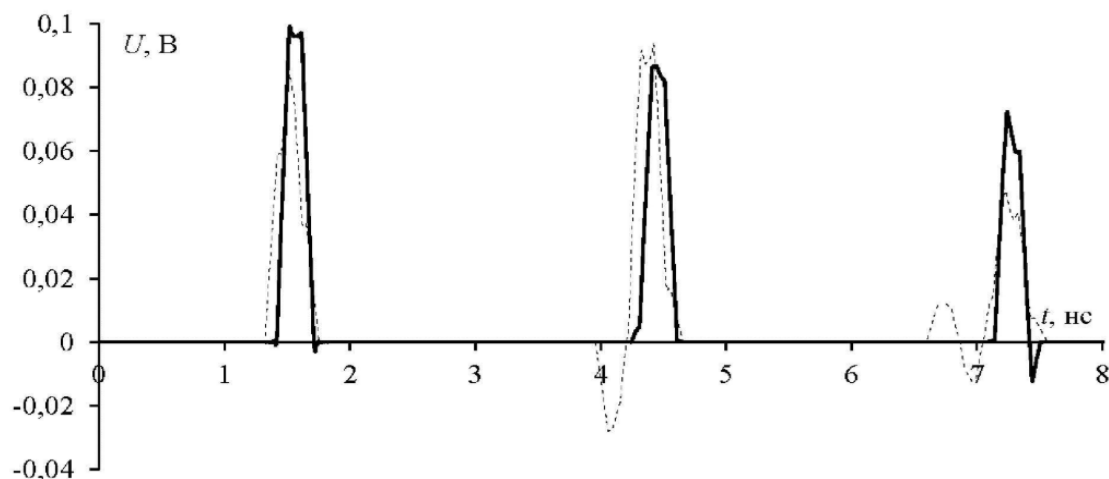


Рис. 41. Напряжение импульсов на выходе устройства в синфазном (—) и дифференциальном (---) режимах работы

Моделирование в синфазном и дифференциальном режимах показало ослабление СКИ. За счёт его разложения на импульсы меньшей амплитуды из-за различия погонных задержек мод, а также отражений от окончаний на концах проводников. На активные проводники относительно опорных подаются помеховые импульсы: в синфазном режиме – однополярные, а дифференциальном – разнополярные. В ходе эксперимента установлено, что максимальное напряжение импульсов на выходе составило 99 мВ для синфазного режима и 93 мВ для дифференциального. Ослабление сигнала составило примерно 5,05 раза для синфазного режима и 5,38 – для дифференциального. Таким образом, устройство эффективно ослабляет помеховый сигнал как в синфазном, так и дифференциальном режимах. Это делает его перспективным для систем, где требуется высокая помехозащищённость при передаче сигналов с воздействием СКИ.

В работе [39] исследована структура с аналогичной конфигурацией для уменьшения массы при сравнении с экранированным вариантом (рис. 42). Схема включает 6 проводников одинаковой длины $l=100$ мм. Два из них – (О и О') соединены с корпусом (схемной землёй). К активным проводникам А и А' на ближнем конце подключены источники ЭДС $E_{Г1}$ и $E_{Г2}$ с внутренними сопротивлениями $R_{Г}=50$ Ом. На дальнем конце структуры установлены сопротивления $R_{Н}=50$ Ом. На ближних концах пассивных линий П и П' используются сопротивления 1 МОм (режим холостого хода), а на дальних – 1 мкОм (режим короткого замыкания). Воздействует трапециевидный импульс с длительностями фронта, спада и плоской вершины по 100 пс. Амплитуда ЭДС составляет $E_{Г1}=E_{Г2}=1$ В для синфазного режима и $E_{Г1}=0,5$ В, $E_{Г2}=-0,5$ В – для дифференциального.

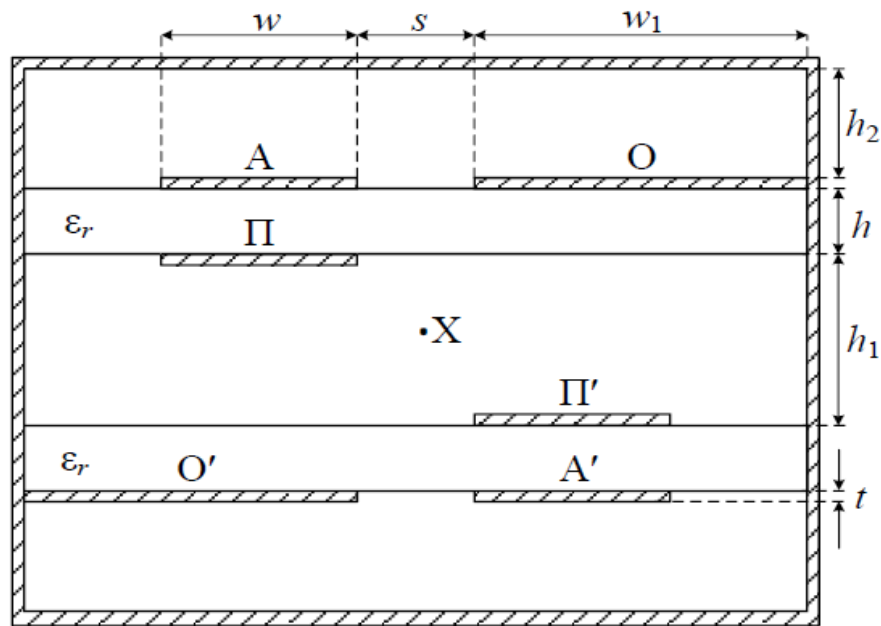


Рис. 42. Поперечное сечение экранированного МФ с лицевой связью

Поперечное сечение структуры предлагаемого модифицированного МФ идентично рис. 40б. Значения параметров поперечного сечения предложенной структуры аналогичны таблице 18. Они выбраны с учётом допустимой токовой нагрузки, доступности материалов и уменьшения амплитуды импульсов на выходе МФ и массогабаритных характеристик. МФ состоит из двух центрально-симметричных относительно точки X частей. Каждая включает опорный (заземлённый) проводник и два параллельных ему проводника, а также диэлектрическое окружение – подложку и воздух. На одной стороне подложки располагаются опорный и активный проводники, а другой – пассивный, продлённый до внешнего края опорного проводника. Конструкция МФ упрощается при сохранении коэффициента ослабления в обоих режимах. Временные отклики на выходе МФ в синфазном и дифференциальном режимах представлены на рис. 43.

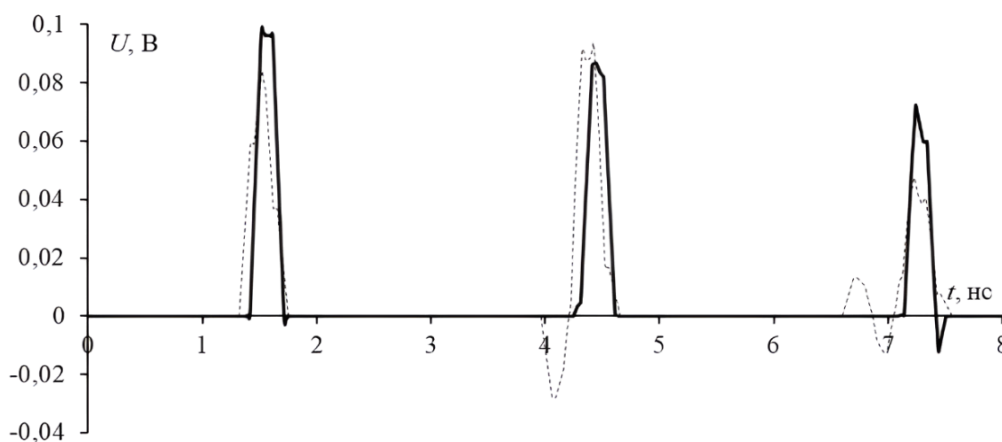


Рис. 43. Напряжение импульсов на выходе устройства в синфазном (—) и дифференциальном (---) режимах работы

Показатели экранированного МФ (не представлены на графике) оказались следующими: напряжение на выходе – 101 мВ в синфазном режиме и 107 мВ в дифференциальном, ослабление – 4,95 раза в синфазном и 4,67 раза в дифференциальном режиме, вносимые потери – 13,4 дБ в синфазном и 13,9 дБ в дифференциальном. В то же время, у предложенной структуры напряжения на выходе – 99 мВ для синфазного и 93 мВ – для дифференциальных режимов (с ослаблениями 5 и 5,37 раз соответственно). Вносимые потери составили 14 дБ и 14,6 дБ соответственно.

3.3 Способ трассировки проводников модального фильтра на основе кабельной структуры

Предложен способ трассировки проводников МФ на основе кабельной структуры [40]. В нем одновременно достигаются три технических результата: увеличение ослабления СКИ, согласование с трактом 50 Ом; упрощение реализации устройства при сохранении разложения помехового импульса на последовательность импульсов меньшей амплитуды. В предложенном способе активный и пассивный проводники модального фильтра помещены в круглые диэлектрические слои, при этом пассивный проводник выполнен сплошным, а вся структура заключена во внешний круглый диэлектрический слой. Рост ослабления СКИ достигается за счёт разделения диэлектрических сред: вокруг активного и пассивного проводников внутри структуры добавлены круглые диэлектрические слои, а снаружи – внешний слой. При этом ϵ_r этих слоёв отличаются от ϵ_r внутреннего заполнения. Согласование с трактом 50 Ом обеспечивается исполнением пассивного проводника сплошным. Упрощение реализации также связано с такой конструкцией: форма проводников с круглыми диэлектрическими слоями вокруг них соответствует стандартному виду промышленных проводов, что облегчает практическое воплощение решения.

Технический результат подтверждён моделированием распространения подаваемого между активным (А) и опорным (О) проводниками СКИ с ЭДС 1 В, длительности фронта, спада и плоской вершины по 100 пс. Длина кабельной структуры – 0,5 м. Геометрические и электрофизические параметры: радиус проводников $r_1=1,4$ мм, радиус диэлектрических слоёв вокруг проводников $r_2=2,2$ мм, радиус внутреннего диэлектрического заполнения $r_3=10$ мм и радиус внешнего диэлектрического слоя $r_4=12$ мм. Для относительной диэлектрической проницаемости воздуха принято $\epsilon_{r1}=1$, диэлектрических слоёв вокруг проводников – $\epsilon_{r2}=4,2$, внутреннего заполнения на основе радиопоглощающего материала – $\epsilon_{r3}=17$, внешнего диэлектрического слоя – $\epsilon_{r4}=2$. Эти значения соответствуют материалам, используемым в производстве проводов и кабелей. Радиусы r_1 и r_2 соответствуют размерам медного провода ПВ-1, r_3 – кабеля ВБШвнг(А)-Ls, r_4 – кабеля РК 75-24-17. Значения ϵ_r соответствуют реальным материалам: ПВХ-пластикату (ϵ_{r2}), радиопоглощающему материалу ЗИПСИЛ 410 РПМ-Л (ϵ_{r3}) и тефлону (ϵ_{r4}). Активный и пассивный проводники расположены симметрично друг другу на разных сторонах диэлектрического слоя опорного проводника. Эквивалентная схема структуры состоит из двух провод-

ников (не считая опорного) длиной $l=500$ мм. Активный проводник соединён на одном конце с источником сигналов – идеальным источником ЭДС $E=1$ В с внутренним сопротивлением $R_{Г}$, а на другом – с защищаемой цепью, представленной сопротивлением $R_{Н}$. Резисторы R подсоединены в начале и конце пассивного проводника. Принято $R_{Г}=R_{Н}=R=50$ Ом. Поперечное сечение и эквивалентная схема структуры представлены на рис. 44. Формы ЭДС и напряжений на входе и выходе представлены на рис. 45.

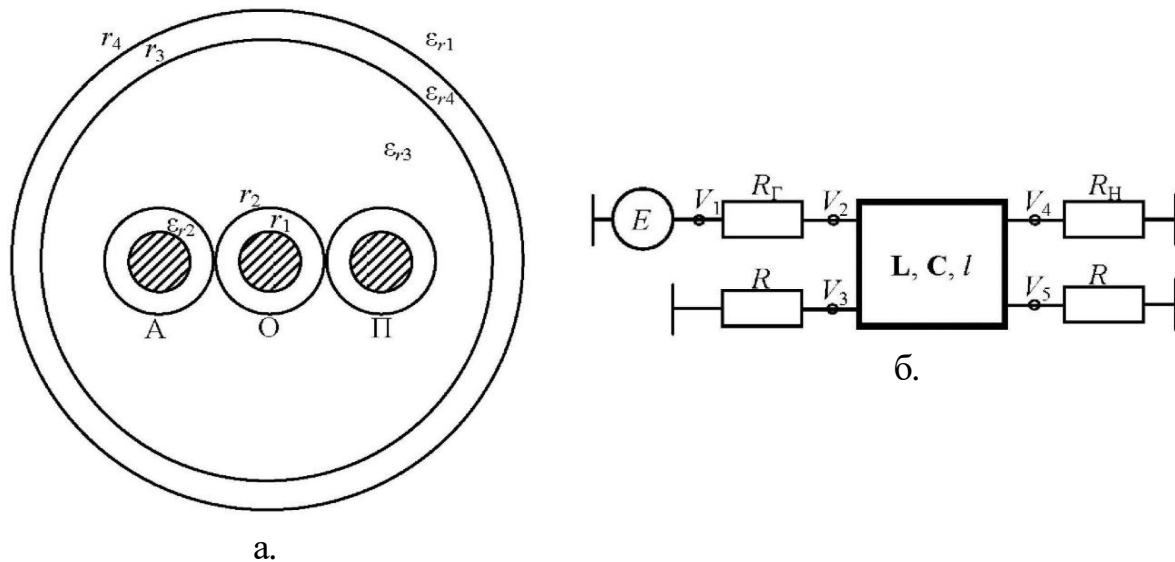


Рис. 44. Поперечное сечение (а) и эквивалентная схема (б) структуры

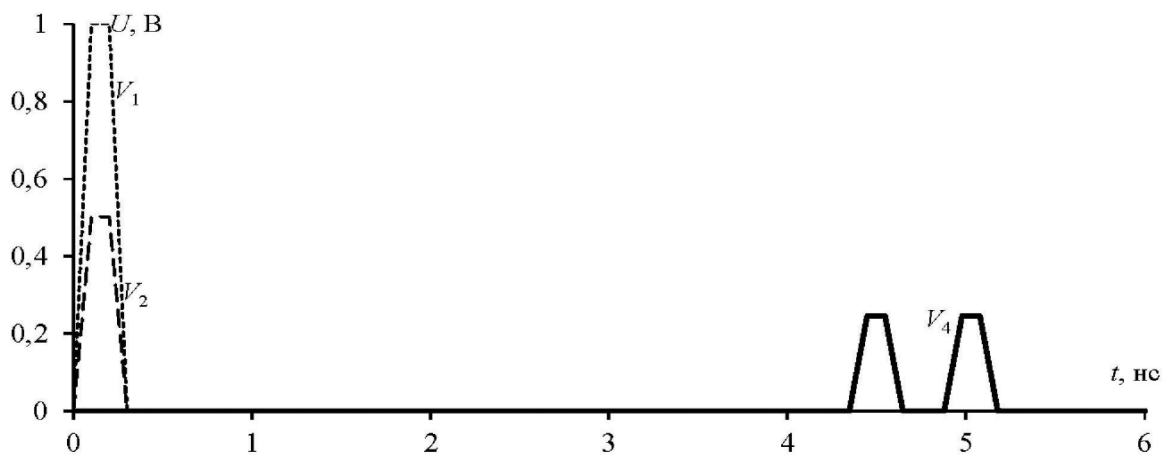


Рис. 45. Формы ЭДС (V_1) и напряжений на входе (V_2) и выходе (V_4) структуры

При прохождении СКИ по структуре он раскладывается на два импульса. Максимальное напряжение на входе составляет 0,5 В (при согласовании с трактом 50 Ом), а выходе – 0,246 В, что не более 49,2% от половины ЭДС. Способ трассировки проводников на основе кабельной структуры обеспечивает ослабление помехового импульса, согласование с трактом 50 Ом и простую реализацию за счёт приближения к стандартным промышленным решениям.

3.4 Устройство защиты от сверхкоротких импульсов с проводниками в одной плоскости на диэлектрической подложке

Для МР можно использовать устройство защиты от СКИ [41], разлагающего его на два импульса с равными и меньшими амплитудами, а также со значительным временным интервалом между ними. Устройство представляет собой копланарную линию передачи, содержащую средний сигнальный проводник и два крайних опорных (рис. 47а). Все они расположены в одной плоскости на однослойной диэлектрической подложке. В конструкцию введён второй сигнальный проводник параллельно первому. Оба они размещены симметрично между опорными на равном расстоянии от них. Один конец первого соединён с источником СКИ, а другой – с защищаемой цепью. Между концами второго и опорным установлены резисторы, сопротивления которых выбраны равными среднему геометрическому значению волновых сопротивлений чётной и нечётной мод.

Параметры поперечного сечения устройства включают: ширину токонесущих проводников w , ширину опорных проводников w_1 , расстояние между сигнальными проводниками s , расстояние между сигнальными и опорными проводниками d , толщину проводников t , толщину диэлектрика h и относительную диэлектрическую проницаемость подложки ϵ_r . Длина проводников составляет $l=1$ м. Воздействующий СКИ имеет форму трапеции с ЭДС 5 В и длительностями фронта, спада и плоской вершины по 50 пс. На схеме V1 обозначает узел, в котором вычисляется форма ЭДС, V2 – форму входного напряжения, V3 – форму выходного напряжения.

Моделировался временной отклик на схемы из рис. 46б с помощью квазистатического подхода. Параметры поперечного сечения приведены в таблице 19. Результаты моделирования временных откликов показаны на рис. 47.

Таблица 19 – Параметры поперечного сечения

w , МКМ	w_1 , ММ	s , МКМ	d , ММ	h , МКМ	t , МКМ	ϵ_r
1000	6	200	10	500	18	4,5

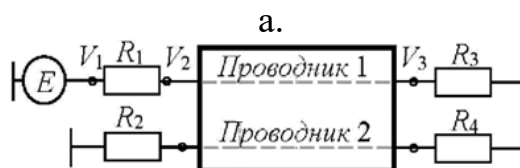
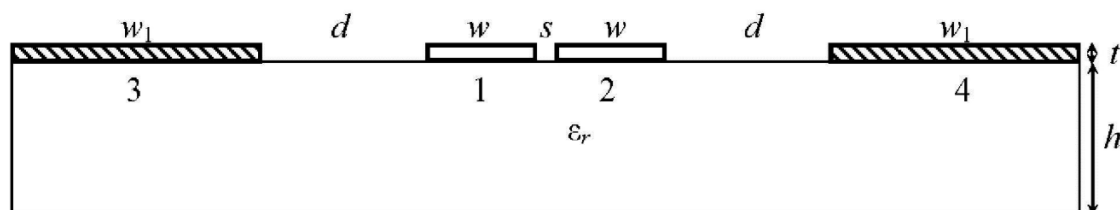


Рис. 46. Поперечное сечение (а) и эквивалентная схема (б) структуры

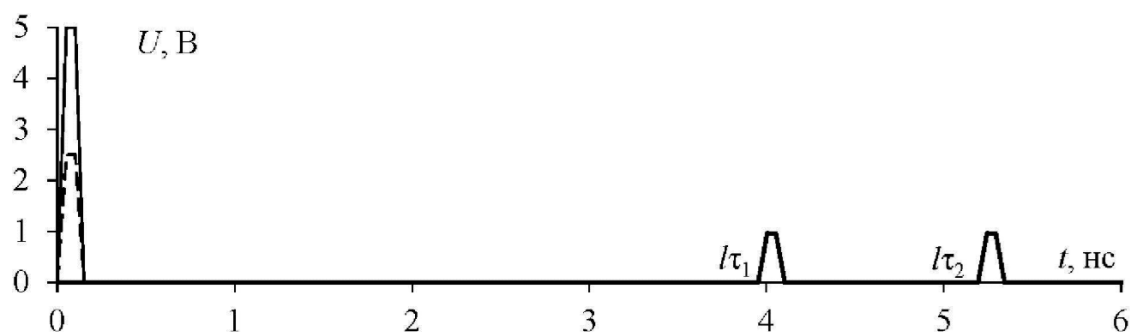


Рис. 47. Формы ЭДС (—) и напряжения на входе (---) и выходе (—) устройства

На выходе устройства наблюдаются два импульса чётной и нечётной мод с погонными задержками 3,95 и 5,19 нс/м с разностью 1,23 нс/м. Амплитуда каждого импульса равна 0,96 В, что в 2,63 раза меньше половины амплитуды ЭДС. Таким образом, устройство дает защиту от СКИ путём его разложения на два импульса с меньшими амплитудами. Конструкция отличается простотой реализации на односторонней ПП.

Заключение

Проанализированные способы однократного МР демонстрируют эволюцию подходов к защите от СКИ с 2015 по 2026 год. Их развитие шло по нескольким направлениям. Прежде всего, создавались все более комплексные устройства: в 2015–2018 гг. закладывались основы МР, а в 2023–2026 гг. появились гибридные устройства, объединяющие кабельные и полосковые элементы. Параллельно трансформировалась структура разрабатываемых устройств: от простых структур, использующих всего лишь два сигнальных проводника к оптимизированным топологиям с уменьшенным числом опорных проводников и далее – к специализированным полосковым структурам. Последние обеспечивали точное управление параметрами разложения импульса, повышая эффективность подавления помех без существенного увеличения габаритов устройства. Существенное влияние на эффективность защиты оказал числа слоев диэлектрического материала, которые также имеют различные значения диэлектрической проницаемости. Этот подход дал рост разности погонных задержек мод и уменьшение амплитуды напряжения выходных импульсов. Одновременно расширялись структурные уровни применения решений. От локальных вариантов на уровне ПП (2015–2018 гг.) произошел переход к кабельным структурам (2024 г.), а затем – к универсальным, интегрируемым на уровнях компонента, платы и кабеля (2023–2026 гг.). Такая эволюция обеспечила гибкость адаптации под разные задачи и условия эксплуатации.

Представленный анализ впервые системно демонстрирует эволюцию методов защиты от СКИ за 2015–2026 гг., объединяя ранее разрозненные подходы в единую концепцию развития. Это открывает возможности для системного проектирования устройств с одновременным повышением надёжности и обеспечением ЭМС РЭА.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2026-0007.

Литература

1. IEC 61508-1:2010. Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems. Part 1: General requirements. Edition 2.0 2010-04. Geneva: International Electrotechnical Commission (IEC), 2010. 127 p.
2. Patel M. R. Spacecraft Power Systems. – CRC Press, Boca Raton FL, 2005. – 736 p. doi: 10.1201/9781420038217.
3. Денисенко В. В. Аппаратное резервирование в промышленной автоматизации. Ч. 1 // Современные технологии автоматизации. 2008. № 2. С. 90-99.
4. ГОСТ IEC/TR 61000-1-5 Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 1–5: Воздействия электромагнитные большой мощности (ЭМБМ) на системы гражданского назначения. М.: Стандартинформ, 2020. 36 с.
5. Здухов Л. Н., Парфёнов Ю. В., Тарасов О. А., Чепелев В. М. Три возможных механизма возникновения отказов электронных устройств в результате электромагнитного воздействия // Технологии ЭМС. 2018. № 2 (65). С. 22-34.
6. Газизов Т. Р., Орлов П. Е., Заболоцкий А. М., Буичкин Е. Н. Новый способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием // Доклады Томского государственного университета радиоэлектроники. 2015. № 3. С. 129-131.
7. Gazizov T. R., Orlov P. E., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P. New concept of critical infrastructure strengthening // AIP Conf. Proc. 2016. Vol. 1738. Iss. 1. no. 440007. 3 p. doi: 10.1063/1.4952225
8. Заболоцкий А. М., Газизов Т. Р. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2013. – 151 с.
9. Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. New approach to EMC protection. IEEE, Munich. 2007. pp. 273-276.
10. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. UWB pulse decomposition in simple printed structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2016. Vol. 58. № 4. pp. 1136-1142.
11. Шарафутдинов В. Р., Газизов Т. Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 117-144. doi: 10.24411/2410 9916-2019-10307.
12. Алхадж Х. А., Газизов Т. Р. Обзор исследований по модальному резервированию // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2022. Т. 25. № 4. С. 54-67. doi: 10.21293/1818-0442-2022-25-4-54-67.
13. Зима Е., Газизов Р. Р. Модальное резервирование: современное состояние // Доклады Томского государственного университета систем

управления и радиоэлектроники. 2024. Т. 27. № 3. С. 55-69. doi: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-55-69.

14. Alhaj H. A., Gazizov T. R. Ensuring the Reliability and EMC by Modal Reservation: A Brief History and Recent Advances // *Symmetry*. 2022. Vol. 14. Iss. 11. no. 2466. 27 p. doi: 10.3390/sym14112466.

15. Газизов Т. Р., Орлов П. Е., Шарафутдинов В. Р., Кузнецова-Таджибаева О. М., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П., Буичкин Е. Н. Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием // Патент на изобретение № 2603850, опубл. 10.12.2016, бюл. № 34.

16. Жечева А. В., Жечев Е. С. Использование N -норм для анализа устройства с однократным модальным резервированием // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2020. – Т. 7. – С. 41-43.

17. Алхадж Х. А., Жечев Е. С., Газизов Т. Р. Оценка излучаемых эмиссий структуры с однократным модальным резервированием // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – Томск, 2020. – № 1-1. – С. 250-253.

18. Газизов Т. Р., Орлов П. Е., Шарафутдинов В. Р., Кузнецова-Таджибаева О. М., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П., Буичкин Е. Н. Способ трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком для цепей с резервированием // Патент на изобретение № 2603851, опубл. 10.12.2016, бюл. № 34.

19. Газизов Т. Р., Орлов П. Е., Шарафутдинов В. Р., Кузнецова-Таджибаева О. М., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П., Буичкин Е. Н. Способ резервирования для печатных плат // Патент на изобретение № 2603843, опубл. 10.12.2016, бюл. № 34.

20. Газизов Т. Р., Орлов П. Е., Шарафутдинов В. Р., Кузнецова-Таджибаева О. М., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П., Буичкин Е. Н. Способ резервирования плоских кабелей // Патент на изобретение № 2603848, опубл. 10.12.2016, бюл. № 34.

21. Медведев А. В. Анализ временного отклика плоского кабеля с модальным резервированием при различном соединении опорных проводников // Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2020». – Томск, 2020. – Ч. 1. – С. 228-231.

22. Газизов Т. Р., Орлов П. Е., Шарафутдинов В. Р., Кузнецова-Таджибаева О. М., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П., Буичкин Е. Н. Способ компоновки печатных плат для цепей с резервированием // Патент на изобретение № 2614156, опубл. 23.03.2017, бюл. № 9.

23. Газизов Т. Р., Орлов П. Е., Шарафутдинов В. Р., Кузнецова-Таджибаева О. М., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П., Буичкин Е. Н. Способ внутренней компоновки печатных плат для цепей с резервированием // Патент на изобретение № 2624637, опубл. 05.07.2017, бюл. № 19.

24. Белоусов А. О., Газизов Т. Р., Черникова Е. Б. Способ однократного модального резервирования межсоединений // Патент на изобретение № 2732607, опубл. 25.09.2020, бюл. № 27.

25. Самойличенко М. А., Газизов Т. Р. Зеркально-симметричный модальный фильтр на двухсторонней печатной плате, защищающий от сверхкоротких импульсов // Патент на изобретение № 2784040, опубл. 23.11.2022, бюл. № 33.

26. Черникова Е. Б. Зеркально-симметричная меандровая линия, защищающая от сверхкоротких импульсов // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 280-293. doi: 10.24411/2410-9916-2020-10209.

27. Медведев А. В., Алхадж Х. А., Кузнецова-Таджибаева О. М., Газизов Т. Р. Способ трассировки печатных проводников на двуслойной печатной плате для цепей с резервированием // Патент на изобретение № 2752233, опубл. 23.07.2021, бюл. 21.

28. Морозов С. Р., Медведев А. В. Квазистатический анализ и оптимизация многослойной печатной платы с модальным резервированием и двусторонней трассировкой // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 3. С. 91-106. doi: 10.24412/2410-9916-2023-3-91-106.

29. Медведев А. В., Алхадж Х. А., Кузнецова-Таджибаева О. М., Газизов Т. Р. Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием на противоположных сторонах печатной платы // Патент на изобретение № 2754077, опубл. 26.08.2021, бюл. 24.

30. Медведев А. В., Кузнецова-Таджибаева О. М., Газизов Т. Р. Способ компоновки многослойных печатных плат для цепей с резервированием // Патент на изобретение № 2754078, опубл. 26.08.2021, бюл. 24.

31. Самойличенко М. А., Газизов Т. Р. Способ трассировки двухсторонней печатной платы для цепей с модальным резервированием // Патент на изобретение № 2762336, опубл. 20.12.2021, бюл. 35.

32. Самойличенко М. А., Газизов Т. Р. Уменьшение массы модального фильтра на двухсторонней печатной плате // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – Томск, 2020. – № 1-1. – С. 275-278.

33. Самойличенко М. А., Газизов Т. Р. Способ трассировки двухсторонней печатной платы с модальным резервированием и уменьшенным количеством проводников // Патент на изобретение № 2784710, опубл. 29.11.2022, бюл. 34.

34. Алхадж Х. А., Газизов Т. Р. Способ симметричной трассировки сигнальных и опорных проводников цепей с модальным резервированием // Патент на изобретение № 2794739, опубл. 24.04.2023, бюл. 12.

35. Газизов Т. Р., Иванцов И. А. Способ удаленной трассировки печатных проводников цепей с однократным модальным резервированием // Патент на изобретение № 2801688, опубл. 14.08.2023, бюл. 23.

36. Иванцов И. А. Модальное разложение помехи в связанной микрополосковой линии при удалении сигнальных проводников друг от друга // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 3. С. 124-133. doi: 10.24412/2410-9916-2023-3-124-133.

37. Заболоцкий А. М., Власов С. В., Жечев Е. С. Способ компоновки дифференциальной пары для цепей с модальным резервированием на основе зеркально-симметричной полосковой структуры // Патент на изобретение № 2817634, опублик. 17.04.2024, бюл. 11.

38. 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 № 2823269, опублик. 22.07.2024, бюл. 21.

39. 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.

40. Белоусов А. О., Гордеева В. О. Способ трассировки проводников модального фильтра на основе кабельной структуры // Патент на изобретение № 2828831, опублик. 21.10.2024, бюл. 30.

41. Черникова Е. Б., Газизов Т. Р. Устройство защиты от сверхкоротких импульсов с проводниками в одной плоскости на диэлектрической подложке // Патент на изобретение № 2850908, опублик. 17.11.2025, бюл. 32.

References

1. IEC 61508-1:2010. Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems. Part 1: General requirements. Edition 2.0 2010-04. Geneva: International Electrotechnical Commission (IEC), 2010. 127 p.

2. Patel M. R. *Spacecraft Power Systems*. CRC Press, Boca Raton FL, 2005. 736 p. doi: 10.1201/9781420038217.

3. Denisenko V. V. Hardware redundancy in industrial automation. Part 1. *Modern automation technologies*, 2008, no. 2, pp. 90-99 (in Russian).

4. State standard IEC/TR 61000-1-5 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 1–5: High Power Electromagnetic (HPEM) Effects on Civil Systems. Moscow, Standartinform, 2020. 36 p. (in Russian).

5. Zdukhov L. N., Parfenov Yu. V., Tarasov O. A., Chepelev V. M. Three possible mechanisms of electronic device failures as a result of electromagnetic exposure. *EMC Technologies*, 2018, no. 2(65), pp. 22-34 (in Russian).

6. Gazizov T. R., Orlov P. E., Zabolotsky A. M., Buichkin E. N. A new way to trace redundant printed circuit conductors. *Reports of Tomsk State University of Radio Electronics*, 2015, no. 3, pp. 129-131 (in Russian).

7. Gazizov T. R., Orlov P. E., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P. New concept of critical infrastructure strengthening. *AIP Conf. Proc.*, 2016, vol. 1738, Iss. 1, no. 440007, 3 p.

8. Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. *Modalniye filtri dlya zachiti bortovoy radioelektronnoy apparaturi* [Modal filters for protection of on-board electronic equipment of the spacecraft]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 2013. 151 p. (in Russian).

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

10. 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.

11. Sharafutdinov V. R., Gazizov T. R. Analysis of redundancy methods based on modal filtering. *Management, communication and security systems*, 2019, no. 3, pp. 117-144 (in Russian).

12. Alkhadj H. A., Gazizov T. R. Review of research on modal reservation. *Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics*, 2022, Vol. 25, no. 4, pp. 54-67 (in Russian).

13. Zima E., Gazizov R. R. Modal reservation: current status. *Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics*, 2024, Vol. 27, no. 3, pp. 55-69 (in Russian).

14. Alhaj H. A., Gazizov T. R. Ensuring the Reliability and EMC by Modal Reservation: A Brief History and Recent Advances. *Symmetry*, 2022, vol. 14, iss. 11, no. 2466, 27 p.

15. Gazizov T. R., Orlov P. E., Sharafudinov V. R., Kuznetzova-Tadjibaeva O. M., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P., Buichkin E. N. A method for tracing printed circuit conductors with redundancy. Patent Russia, no. RU 2603850, Publish. 10.12.2016, bul. no. 34 (in Russian).

16. Zhecheva A. V., Zhechev E. S. Ispolzovanie N -norm dla analiza ustroystva s odnokratnim modalnim rezervirovaniem [Using N -norms to analyze a device with single modal redundancy]. *Perspektivi razvitiya fundamentalnich nauk: sbornik nauchnich trudov XVII Megdunarodnoy konferencii studentov, aspirantov i molodich uchenich* [Prospects for the development of fundamental sciences: collection of scientific papers of the XVII International Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. Tomsk, 2020. Vol. 7. pp. 41-43 (in Russian).

17. Alkhadj H. A., Zhechev E. S., Gazizov T. R. Ocenka izluchaemich emissiy s odnokratnim modalnim rezervirovaniem [Estimation of radiated emissions of a structure with single modal reservation]. *Electronnie sredstva i sistemi upravleniya. Materiali dokladov Megdunarodnoy nauchno-practicheskoy konferencii* [Electronic tools and control systems. Materials of the reports of the International Scientific and Practical Conference]. Tomsk, 2020. no. 1-1. pp. 250-253 (in Russian).

18. Gazizov T. R., Orlov P. E., Sharafudinov V. R., Kuznetzova-Tadjibaeva O. M., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P., Buichkin E. N. A method for tracing printed conductors with an additional dielectric for redundant circuits. Patent Russia, no. RU 2603851. Publish. 10.12.2016, bul. no. 34 (in Russian).

19. Gazizov T. R., Orlov P. E., Sharafudinov V. R., Kuznetzova-Tadjibaeva O. M., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P., Buichkin E. N. Redundancy method for printed circuit boards. Patent Russia, no. RU 2603843. Publish. 10.12.2016, bul. no. 34 (in Russian).

20. Gazizov T. R., Orlov P. E., Sharafudinov V. R., Kuznetzova-Tadjibaeva O. M., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P., Buichkin E. N. The redundancy method for flat cables. Patent Russia, no. RU 2603848. Publish. 10.12.2016, bul. no. 34 (in Russian).

21. Medvedev A. V. Analiz vremennogo otklika ploskogo kabela s modalnim rezervirovaniem pri razlicnom soedinenii opornich provodnikov [Analysis of the time

response of a flat cable with modal redundancy for different connection of the support conductors]. *Materiali megdunarodnoy nauchno-technicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodich uchenich «Nauchnaya sessiya TUSUR–2020»* [Materials of the international scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists "Scientific session TUSUR–2020"]. Tomsk, 2020. Vol. 1. pp. 228-231 (in Russian).

22. Gazizov T. R., Orlov P. E., Sharafudinov V. R., Kuznetzova-Tadjibaeva O. M., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P., Buichkin E. N. The layout method of printed circuit boards for redundant circuits. Patent Russia, no. RU 2614156. Publish. 23.03.2017, bul. no. 9 (in Russian).

23. Gazizov T. R., Orlov P. E., Sharafudinov V. R., Kuznetzova-Tadjibaeva O. M., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P., Buichkin E. N. A method of internal layout of printed circuit boards for redundant circuits. Patent Russia, no. RU 2624637. Publish. 05.07.2017, bul. no. 19 (in Russian).

24. Belousov A. O., Gazizov T. R., Chernikova E. B. A method for single modal redundancy of interconnects. Patent Russia, no. RU 2732607. Publish. 25.09.2020, bul. no. 27 (in Russian).

25. Samoilichenko M. A., Gazizov T. R. Mirror-symmetrical modal filter on a double-sided printed circuit board that protects against ultrashort pulses. Patent Russia, no. RU 2784040. Publish. 23.11.2022, bul. no. 33 (in Russian).

26. Chernikova E. B. Mirror-symmetrical meander line that protects against ultrashort pulses. *Management, communication and security systems*, 2020, no. 2, pp. 280-293 (in Russian).

27. Medvedev A. V., Alkhadj H. A., Kuznetsova-Tadjibayeva O. M., Gazizov T. R. A method for tracing printed conductors on a two-layer printed circuit board for redundant circuits. Patent Russia, no. RU 2752233. Publish. 23.07.2021, bul. no. 21 (in Russian).

28. Morozov S. R., Medvedev A. V. Quasi-static analysis and optimization of a multilayer PCB with modal reservation and two-way tracing *Management, communication and security systems*, 2023, no. 3, pp. 91-106 (in Russian).

29. Medvedev A. V., Alkhadj H. A., Kuznetsova-Tadjibayeva O. M., Gazizov T. R. A method for tracing redundant circuit printed conductors on opposite sides of a printed circuit board. Patent Russia, no. RU 2754077. Publish. 26.08.2021, bul. no. 24 (in Russian).

30. Medvedev A. V., Kuznetsova-Tadjibayeva O. M., Gazizov T. R. A method for assembling multilayer printed circuit boards for redundant circuits. Patent Russia, no. RU 2754078. Publish. 26.08.2021, bul. no. 24 (in Russian).

31. Samoilichenko M. A., Gazizov T. R. A method of tracing a double-sided printed circuit board for circuits with modal reservation. Patent Russia, no. RU 2762336. Publish. 20.12.2021, bul. no. 35 (in Russian).

32. Samoilichenko M. A., Gazizov T. R. Umenscheniye massi modalnogo filtra na dvustoroney pechatnoy plate [Reducing the mass of the modal filter on a double-sided PCB]. *Electroniye sredstva i sistemi upravleniya. Materiali dokladov Megdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii* [Electronic tools and control systems. Materials of the reports of the International Scientific and Practical Conference]. Tomsk, 2020. no. 1-1. pp. 275-278.

33. Samoilichenko M. A., Gazizov T. R. A method for tracing a double-sided printed circuit board with modal reservation and a reduced number of conductors. Patent Russia, no. RU 2784710. Publish. 29.11.2022, bul. no. 34 (in Russian).

34. Alkhadj H. A., Gazizov T. R. A method for symmetrical tracing of signal and reference conductors of circuits with modal reservation. Patent Russia, no. RU 2794739. Publish. 24.04.2023, bul. no. 12 (in Russian).

35. Gazizov T. R., Ivantsov I. A. A method for remote tracing of printed circuit conductors with single modal reservation. Patent Russia, no. RU 2801688. Publish. 14.08.2023, bul. no. 23 (in Russian).

36. Ivantsov I. A. Modal decomposition of interference in a connected microstrip line when signal conductors are removed from each other. *Management, communication and security systems*, 2023, no. 3, pp. 124-133.

37. Zabolotsky A. M., Vlasov S. V., Zhechev E. S. A method of arranging a differential pair for circuits with modal reservation based on a mirror-symmetrical strip structure. Patent Russia, no. RU 2817634. Publish. 17.04.2024, bul. no. 11 (in Russian).

38. Kosteletsky V. P., Lakoza A. M., Zabolotsky A. M., Nesterenko A. K. A face-connected strip structure that protects against ultrashort pulses in common-mode and differential modes. Patent Russia, no. RU 2823269. Publish. 17.04.2024, bul. no. 11 (in Russian).

39. Kosteletsky V. P., Lakoza A. M., Chernikova E. B. A face-connected strip structure that protects against ultrashort pulses in common-mode and differential modes. *Management, communication and security systems*, 2025, no. 3, pp. 159-169.

40. Belousov A. O., Gordeeva V. O. A method for tracing modal filter conductors based on a cable structure. Patent Russia, no. RU 2828831. Publish. 21.10.2024, bul. no. 30 (in Russian).

41. Chernikova E. B., Gazizov T. R. Ultrashort pulse protection device with conductors in the same plane on a dielectric substrate. Patent Russia, no. RU 2850908, Publish. 17.11.2025, bul. no. 32 (in Russian).

Статья поступила 13 апреля 2026 г.

Информация об авторах

Морозов Сергей Романович – аспирант кафедры телевидения и управления. Инженер научно-исследовательской лаборатории «Фундаментальные исследования по электромагнитной совместимости». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: Электромагнитная совместимость, устройства защиты, модальное резервирование. E-mail: pred11072@yandex.ru

Газизов Тальгат Рашитович – доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой телевидения и управления, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: Электро-

МАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ, УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ, КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.
E-mail: talgat.r.gazizov@tusur.ru

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

Single modal reservation: state-of-the-art

S. R. Morozov, T. R. Gazizov

Purpose. Current trends in reducing the size of radioelectronic equipment (REE) and increasing the density of components make it more difficult to ensure electromagnetic compatibility (EMC). One of the most dangerous types of interference in providing EMC is conductive ultra-broadband interference (UWB). To combat it, a method called modal reservation (MR) has been proposed. Due to modal distortion, incoming interference is weakened by decomposing it into several pulses with lower amplitudes and delays in arrival times. Since the development of the first MR device, many methods for implementing and designing it have been developed. Despite a large amount of research being consistently reflected in reviews, there are no data on recent advancements in MR, and analysis of individual implementations is fragmented. At the same time, the functionality and operational characteristics of various schemes have not been sufficiently systematized, and clear areas of optimal application for each method of MR have not been defined. Therefore, a systematic review of ways to implement MR is relevant. Since a comprehensive description of all variants of single-, double-, and triple MR would lead to an excessive increase in the volume of material, this work focuses only on methods based on single MR. This solution makes it possible to examine in depth the basic principles of system construction, analyze in detail the implementation features, and objectively evaluate the advantages and limitations of the methods. Thus, this review aims to fill gaps in the existing systematization of knowledge about MR. **Methods.** To analyze the evolution of methods, lines of development of technical systems are used based on the theory of inventive problem solving. **Novelty.** For the first time, both previously developed single MR methods and new ones are comprehensively covered in a single work. **Results.** The result of the work is a systematic view of the current state of the unified MR. **Practical relevance.** The practical relevance of the work lies in providing the basis for the successful implementation of projects on MR.

Key words: electromagnetic compatibility, protection devices, printed circuit board, modal reservation

Information about Authors

Sergey Romanovich Morozov – The postgraduate student of Television and control department. Engineer of the scientific research laboratory “Fundamental research on electromagnetic compatibility”. Tomsk State University of Controls System and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility; protection devices, modal reservation. E-mail: pred11072@yandex.ru

Talgat Rashitovich Gazizov – Dr. habil. of Engineering Sciences, Professor. Head of the Department of television and control, Head of the scientific research laboratory “Safety and electromagnetic compatibility of radioelectronic aids”. Tomsk State University of Controls System and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility; protection devices, computer simulation. E-mail: talgat.r.gazizov@tusur.ru

Address: 634050, Russia, Tomsk, Lenin Ave., 40.