

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 621.372.2

КАСКАДИРОВАНИЕ ТРЕХПРОВОДНЫХ МОДАЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ НА ОСНОВЕ АСИММЕТРИЧНЫХ КООКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР И МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ

© 2023 г. А. О. Белоусов*

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
просп. Ленина, 40, Томск, 634050 Российская Федерация*

**E-mail: ant1lafleur@gmail.com*

Поступила в редакцию 21.03.2022 г.

После доработки 08.12.2022 г.

Принята к публикации 12.12.2022 г.

Впервые исследована возможность улучшения защитных характеристик линий передачи за счет каскадного соединения (КС) многопроводных модальных фильтров (МФ) с различной геометрической конфигурацией. Рассмотрены трехпроводные МФ на основе асимметричной коаксиальной структуры и микрополосковой линии и четыре варианта КС из двух и трех отрезков таких МФ. Для них выполнено имитационное моделирование временного отклика на воздействие сверхкороткого импульса (СКИ) и параметрическая оптимизация. Достигнуто ослабление СКИ в 27.4 раза.

DOI: 10.31857/S0033849423050029, EDN: UHNZTU

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом проблема обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) все более обостряется в связи с увеличением разнообразия и числа радиоэлектронных средств (РЭС) [1]. Так, из-за значительного увеличения влияния электромагнитных помех (ЭМП) на функционирование РЭС ужесточаются требования к обеспечению ЭМС РЭС [2–4]. Особое внимание уделяется кондуктивным помехам, распространяющимся непосредственно по проводящим конструкциям. В качестве примера наиболее опасных источников ЭМП можно назвать сверхкороткие импульсы (СКИ). Традиционные устройства защиты от ЭМП (например, LC- и RC-фильтры, варисторы, разрядники, TVS-диоды) не способны обеспечить должную защиту от воздействия СКИ. К тому же эти устройства ухудшают массогабаритные характеристики защищаемых РЭС. Ввиду того, что основная энергия при генерации СКИ расходуется на увеличение его амплитуды, такие помехи способны нанести значительный вред, локализуясь в критичных узлах РЭС. Так, экспериментально подтвержден тот факт, что СКИ при проникновении внутрь РЭС способны выводить из строя их критичные цепи [5]. Поэтому актуальна защита критичных РЭС от угрозы преднамеренных СКИ [2, 3].

Как альтернатива или дополнение к традиционным защитным устройствам для защиты от мощного СКИ предложена технология модальной фильтрации. Основная ее идея – разложение воздей-

ствующего СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды за счет различия задержек мод. Данная технология реализована в устройствах, названных модальными фильтрами (МФ) [6]. Между тем традиционная реализация МФ подразумевает их исполнение в виде полосковых структур. В рамках данной работы рассматривается вариант исполнения МФ на основе асимметричной коаксиальной структуры (защитный кабель). Такое исполнение имеет несколько важных достоинств по сравнению с МФ на основе полосковых структур: гибкость конструкции, большая длина и возможность использования готовых кабелей. Однако такие структуры не лишены и недостатка: сильной электромагнитной связи между активным и некоторыми пассивными проводниками ввиду их симметричного расположения в типовых структурах многопроводных кабелей. Этот факт ухудшает характеристики модальной фильтрации. Однако эту проблему можно решить с помощью оптимизации. Так, в работе [7] рассматриваются конфигурации МФ на основе асимметричных коаксиальных структур, в которых посредством параметрической оптимизации получено полное разложение СКИ на выходе МФ.

Каскадное соединение (КС) МФ на основе асимметричных коаксиальных структур ранее не исследовалось, но это актуально. Между тем в данной работе предполагается рассмотреть возможность КС асимметричных коаксиальных структур как между собой, так и с полосковыми структура-

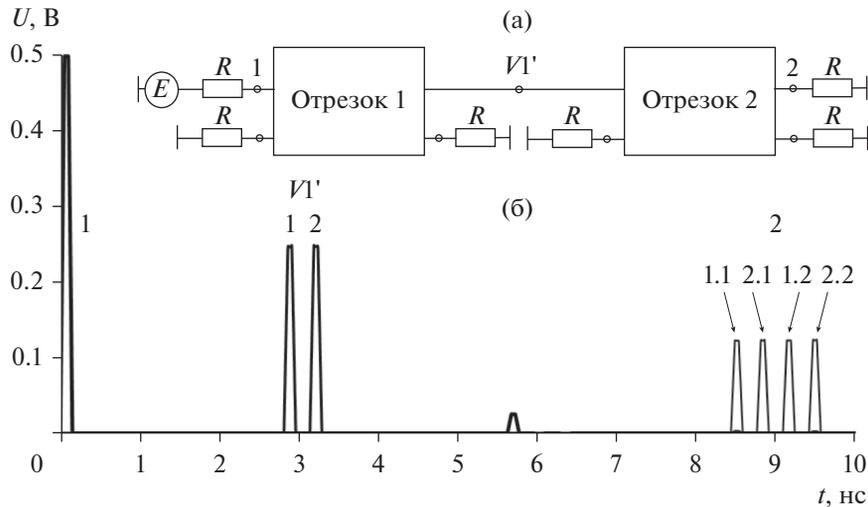


Рис. 1. Эквивалентная схема (а) и разложение импульса (б) в двух отрезках связанных линий (разность задержек мод у отрезка 2 вдвое больше, чем у отрезка 1) [8].

ми. В данном случае представляет интерес оценка эффективности таких КС, когда возможно применить защитные кабели в качестве не только отдельных устройств, но и (ввиду их достоинств, описанных выше) дополнительного способа повышения характеристик (в части ослабления максимального значения напряжения СКИ) существующих полосковых МФ. С учетом того, что высокочастотные системы передачи или измерительные приборы с применением различных кабелей стали стандартным элементом почти в каждой лаборатории исследований и разработок, дополнительная защита, за счет их использования (в данном случае посредством КС с МФ на основе связанных полосковых линий), весьма актуальна.

Известно, что КС улучшает защитные характеристики МФ, поскольку возникает возможность раскладывать воздействующий СКИ на последовательность импульсов не только в первом отрезке МФ, но делать то же самое с каждым импульсом разложения в каждом последующем отрезке [8]. Однако сохранение защитных характеристик МФ при КС различных (в поперечном сечении) структур является непростой задачей. Выбор оптимальных значений геометрических и электрофизических параметров, а также граничных условий и длин линий передачи, соединяемых каскадно, играют важную роль. Между тем задача КС многопроводных МФ с различными конфигурациями поперечного сечения (в данном случае, КС кабеля и платы) прежде не ставилась, но это актуально. Таким образом, представляется возможной оценка возможности сохранения и улучшения защитных характеристик многопроводных МФ на основе асимметричных коаксиальных структур и микрополосковой линии при их КС. Цель работы – выполнить такое исследование.

1. КАСКАДНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

Известно [8], что при КС отрезков связанных линий происходит последовательное деление каждого импульса на два импульса меньшей амплитуды. Иначе говоря, подключение к отрезку линии еще одного отрезка приводит к тому, что импульс 1 разложится на импульсы 1.1 и 1.2, а импульс 2 – на импульсы 2.1 и 2.2 (рис. 1). Эти импульсы не будут совпадать друг с другом по времени, если разность задержек мод у второго отрезка, как минимум, вдвое больше, чем у первого. В результате получится последовательность импульсов 1.1, 2.1, 1.2, 2.2. Следовательно, каскадное соединение n отрезков приведет при определенных условиях к разложению на 2^n импульсов, что возможно при последовательном удвоении или укорочении длин отрезков связанных линий [8]. Для структуры из n таких отрезков при длине первого l длина k -го отрезка определяется как

$$l_k = l(2k - 1), \quad k = 1, \dots, n, \quad (1)$$

при общей длине структуры

$$L = l(2^n - 1). \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) связывают число и длины отрезков связанных линий для последовательного разложения импульса при их КС.

2. ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ

До сих пор приведенные выше условия рассматривались применительно к КС отрезков лишь пары связанных линий и лишь одного типа, тогда как для отличных (в поперечном сечении) структур они рассмотрены не были. Моделирование вы-

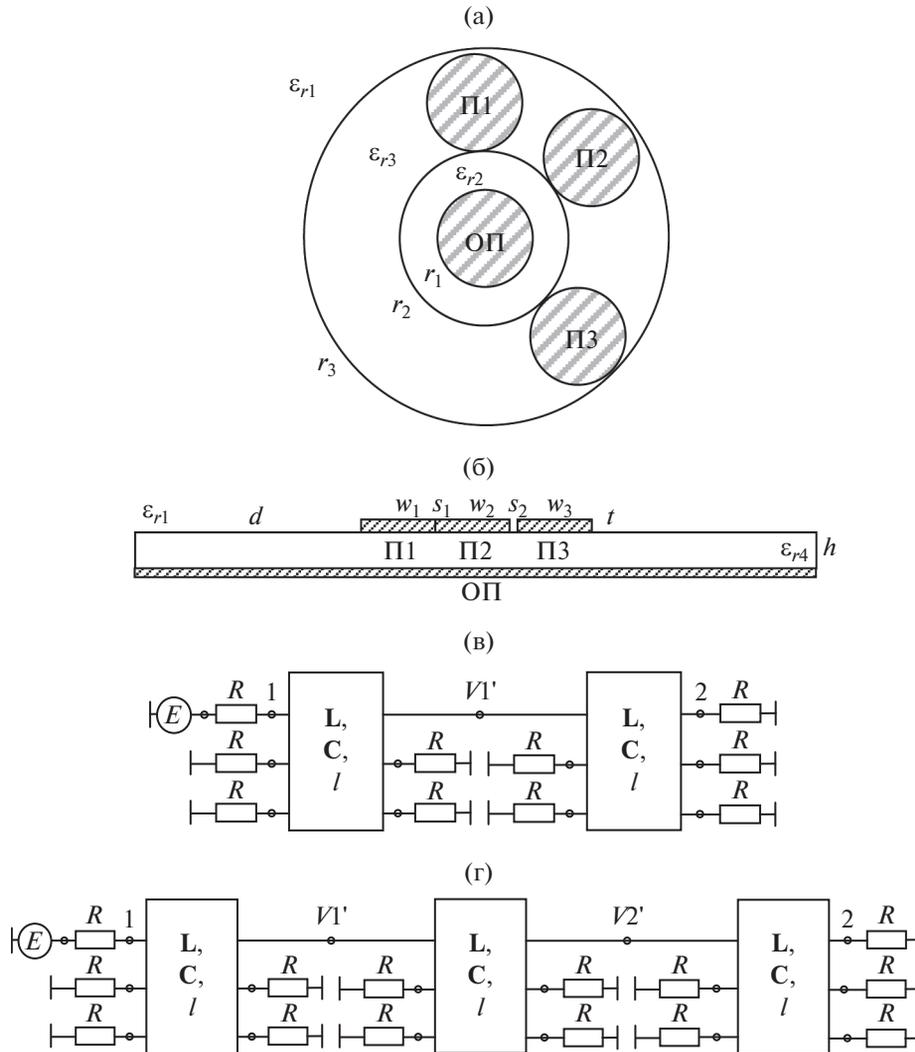


Рис. 2. Поперечные сечения МФ на основе асимметричной коаксиальной структуры (а) и МПЛ (б) при $N = 3$; эквивалентные схемы КС1, КС2 (в) и КС3, КС4 (г); ϵ_{r_i} – относительная диэлектрическая проницаемость среды, r_i – радиус элемента поперечного сечения, w – ширина проводников, d – расстояние от края МПЛ до ближайшего проводника, s – расстояние между проводниками, t – толщина проводников, h – толщина подложки; П1 – активный проводник, П2, П3 – пассивные проводники, ОП – опорный проводник.

полнено в системе квазистатического моделирования TALGAT [9]. При этом сначала построены геометрические модели поперечного сечения МФ, затем вычислены матрицы погонных коэффициентов электростатической (С) и электромагнитной (L) индукций. В рамках данного исследования потери в проводниках и диэлектриках не учитывались для исключения их влияния на основные волновые процессы в линиях. Далее составлены эквивалентные схемы для моделирования, а также заданы окончатая и воздействие. Наконец, был вычислен временной отклик на импульсное воздействие. Для подтверждения достоверности результатов также выполнен вычислительный эксперимент в системе электродинамического моделирования без учета потерь в проводниках и диэлектриках.

Для исследования выбраны трехпроводные МФ на основе асимметричной коаксиальной структуры и микрополосковой линии (МПЛ). Их поперечные сечения приведены на рис. 2а, 2б, где ϵ_{r_i} – относительная диэлектрическая проницаемость среды, r_i – радиус элемента поперечного сечения, w – ширина проводников, d – расстояние от края МПЛ до ближайшего проводника, s – расстояние между проводниками и h – толщина подложки. При моделировании источник импульсных сигналов представлен идеальным источником трапециевидного сигнала с электродвижущей силой (ЭДС), равной 1 В, и длительностями фронта, спада и плоской вершины по 50 пс, так что общая длительность составила 150 пс. На рис. 2в, 2г представлены эквивалент-

ные схемы исследуемых КС, а на рис. 3 – формы напряжений в начале и конце одноотрезочных МФ на основе асимметричной коаксиальной структуры и МПЛ.

Многопроводный МФ на основе асимметричной коаксиальной структуры, исследованный в работе [7], представляет собой центральный опорный проводник (ОП) в диэлектрическом заполнении, снаружи которого радиально расположены проводники, а вся структура покрыта диэлектриком. Такой МФ при $N = 3$ (N – количество проводников, не считая ОП) приведен на рис. 2а. Параметры структуры приняты следующими: для ОП и проводников 1 и 3 (далее, для удобства, нумерация проводников обозначена как P_i) $r_1 = 0.9$ мм; для P_2 $r_1 = 0.89$ мм; $r_2 = 1.6$ мм, $r_3 = 3.45$ мм; $\epsilon_{r1} = 1$; $\epsilon_{r2} = 5$; $\epsilon_{r3} = 19$. Ранее [7] была выполнена оптимизация данного МФ посредством эвристического поиска по амплитудному (для минимизации максимального напряжения на выходе), интервально-временному (для выравнивания интервалов времени между импульсами разложения) и диапазонно-временному (для увеличения максимальной длительности воздействующего СКИ, который будет полностью разлагаться) критериям. Достигнуты равные амплитуды импульсов разложения и получено ослабление выходного сигнала в 2.99 раза по сравнению с входным напряжением $U_{вх} = 0.44$ В (см. рис. 3а).

Полосковая линия рассмотрена в работе [10] и представляет собой трехпроводную МПЛ (см. рис. 2б). Параметры такой МПЛ после оптимизации выбраны следующими: w ($P_1...3$) = 1 мм; $t = 0.178$ мм; $h = 0.323$ мм; $s_1 = 0.011$ мм; $s_2 = 0.09$ мм; $\epsilon_{r1} = 1$; относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_{r4} = 4.5$. В результате получено ослабление выходного сигнала в 2.6 раза по сравнению с входным напряжением $U_{вх} = 0.42$ В (см. рис. 3б). При моделировании КС1...КС4 значения резисторов R выбраны исходя из условия согласования МФ с трактом (напряжение на входе МФ равно половине ЭДС источника).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Эквивалентная схема КС1, включающая в себя два отрезка МФ на основе асимметричной коаксиальной структуры из рис. 2а представлена на рис. 2в. Для полного разложения воздействующего импульса при моделировании КС1 для длин отрезков принято $l_1 = 0.1$ м, $l_2 = 0.3$ м. Значения резисторов здесь и далее выбраны по 25 Ом для согласования линии с трактом. На рис. 4а представлены формы напряжений, полученные при моделировании КС1, а на рис. 5а – частотные зависимости коэффициента передачи $|S_{21}|$. Из результатов квазистатического моделирования видно, что к выходу отрезка 1 (узел VI' на рис. 2в)

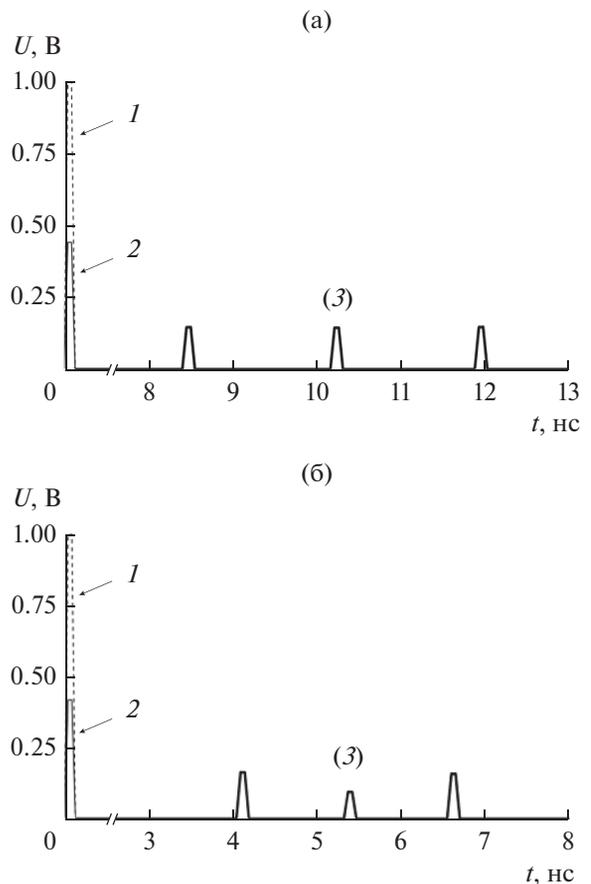


Рис. 3. Формы ЭДС (1) и напряжений на входе (2) и выходе (3) одноотрезочных МФ на основе асимметричной коаксиальной структуры (а) и МПЛ (б).

приходят три импульса с максимальной амплитудой 174 мВ и минимальной разницей задержек $\Delta t_{\min} = 0.02$ нс, а отрезка 2 (узел 2 на рис. 2в) – девять импульсов с максимальной амплитудой 57 мВ и $\Delta t_{\min} = 0.03$ нс, что в 8.9 раза меньше уровня входного напряжения $U_{вх} = 510$ мВ.

Из-за влияния потерь на излучение (которое не учитывается при квазистатическом моделировании), оценка точного времени распространения отдельных мод затруднительна. Тем не менее из результатов электродинамического моделирования видно, что к выходу отрезка 1 также приходят три импульса (максимальная амплитуда 170 мВ), а отрезка 2 – девять импульсов (максимальная амплитуда 57 мВ). При этом значение $U_{вх}$ составляет 510.4 мВ. Кроме того, формы импульсов разложения, полученных с помощью моделирования двумя разными видами анализа, достаточно близки, а основной причиной их различия (а также значений погонных задержек мод) является разный учет частотных зависимостей ϵ_r . Из результатов моделирования частотных зависимостей $|S_{21}|$ видно, что резонансные частоты (примерно до 2 ГГц) при

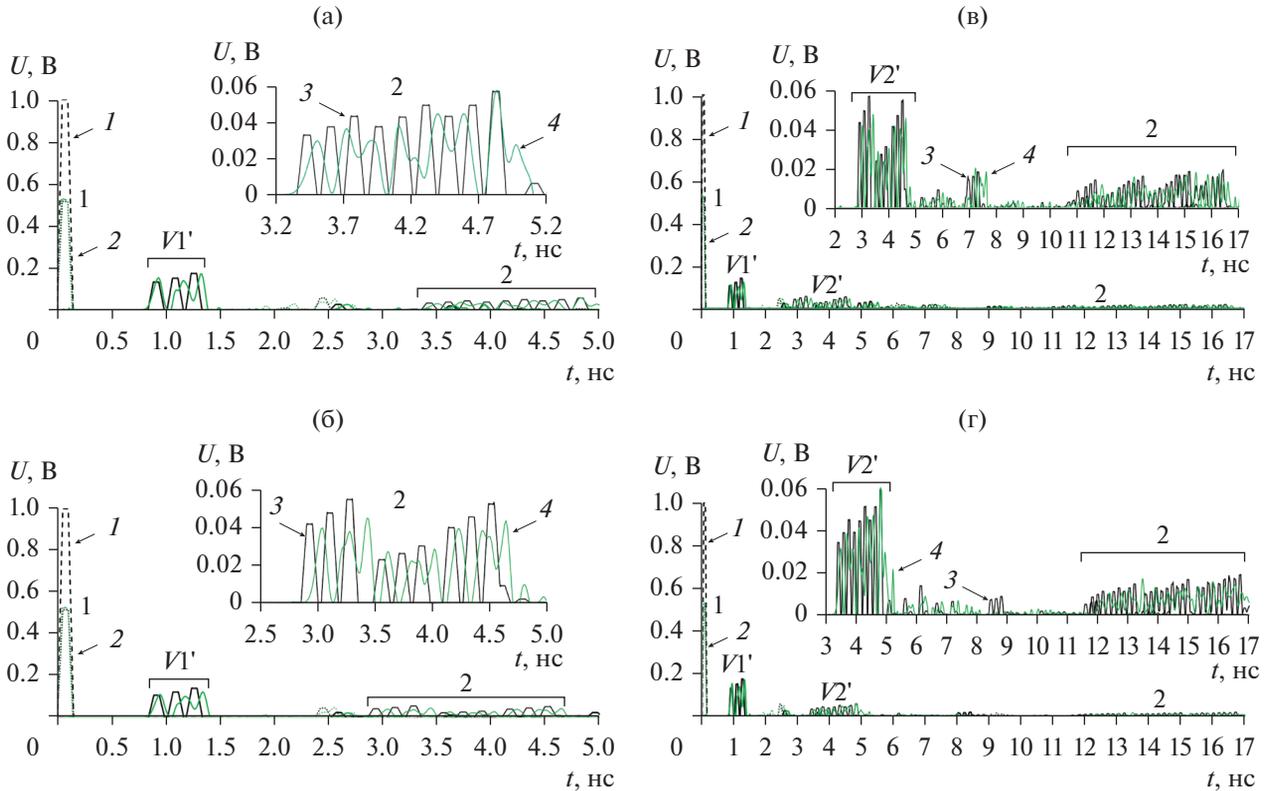


Рис. 4. Формы ЭДС (I) и напряжений на входе (2) и выходе в системах квазистатического (3) и электродинамического (4) моделирования для КС1...КС4 (а–г).

моделировании двумя разными видами анализа хорошо согласуются (частоты первого резонанса отличаются лишь на 2.5%). Наблюдается разный уровень сигнала на частотах резонансов: для частоты первого резонанса отклонение составляет 9.7 дБ. Частота среза, полученная в результате моделирования двумя видами анализа, составляет примерно 155 МГц.

Эквивалентная схема КС2 из отрезков МФ на основе асимметричной коаксиальной структуры и МПЛ та же, что на рис. 2в. При моделировании КС2 принято $l_1 = 0.1$ м и $l_2 = 0.5$ м. На рис. 4б представлены формы напряжений, полученные при моделировании КС2, а на рис. 5б — частотные зависимости $|S_{21}|$. Из результатов квазистатического моделирования видно, что к выходу отрезка 1 (узел $V1'$ на рис. 2в) приходят три импульса с максимальной амплитудой 141 мВ и $\Delta t_{\min} = 0.02$ нс, а к выходу отрезка 2 (узел 2 на рис. 2в) — девять импульсов с максимальной амплитудой 55 мВ и $\Delta t_{\min} = 0.055$ нс, что в 9.4 раза меньше уровня входного напряжения $U_{\text{вх}} = 510$ мВ. Из результатов электродинамического моделирования видно, что к выходу отрезка 1 также приходят три импульса (максимальная амплитуда 119 мВ), а отрезка 2 — девять импульсов (максимальная амплитуда 45 мВ). При этом значение $U_{\text{вх}}$ составляет 510.4 мВ.

Формы импульсов разложения, полученных с помощью моделирования двумя разными видами анализа, также достаточно близки. Из результатов моделирования частотных зависимостей $|S_{21}|$ видно, что резонансные частоты (примерно до 2 ГГц) при моделировании двумя разными видами анализа также хорошо согласуются (частоты первого резонанса отличаются меньше, чем на 1%). Отклонение уровня сигнала на частоте первого резонанса составляет всего 0.15 дБ. Частота среза, полученная в результате моделирования двумя видами анализа, составляет примерно 50 МГц.

Эквивалентная схема КС3, включающая в себя два МФ на основе асимметричной коаксиальной структуры, между которыми находится отрезок МПЛ, представлена на рис. 2г. При моделировании принято $l_1 = 0.1$ м, $l_2 = 0.5$ м, $l_3 = 1$ м. На рис. 4в представлены формы напряжений, полученные при моделировании КС3, а на рис. 5в — частотные зависимости $|S_{21}|$. Из результатов квазистатического моделирования видно, что к выходу отрезка 1 (узел $V1'$ на рис. 2г) приходят три импульса с максимальной амплитудой 122 мВ и $\Delta t_{\min} = 0.02$ нс, к выходу отрезка 2 (узел $V2'$ на рис. 2г) — девять импульсов с максимальной амплитудой 56 мВ и $\Delta t_{\min} = 0.05$ нс, а отрезка 3 (узел 2 на рис. 2г) — 27 импульсов с максимальной амплиту-

дой 19.3 мВ и $\Delta t_{\min} = 0.01$ нс, что в 26.7 раза меньше уровня входного напряжения $U_{\text{вх}} = 515$ мВ. Из результатов электродинамического моделирования видно, что к выходу отрезка 1 также приходят три импульса (максимальная амплитуда 113 мВ), отрезка 2 — девять импульсов (максимальная амплитуда 47 мВ), а отрезка 3 — 27 импульсов (максимальная амплитуда 17 мВ). При этом значение $U_{\text{вх}}$ составляет 515.5 мВ. Формы импульсов разложения, полученных с помощью моделирования двумя разными видами анализа, хорошо согласуются. Из результатов моделирования частотных зависимостей $|S_{21}|$ видно, что резонансные частоты (примерно до 2 ГГц) при моделировании двумя разными видами анализа также хорошо согласуются (частоты первого резонанса отличаются меньше, чем на 2%). Наблюдается разный уровень сигнала на частотах резонансов: для частоты первого резонанса отклонение составляет 10.8 дБ. Частота среза, полученная в результате моделирования двумя видами анализа, составляет примерно 45 МГц.

Эквивалентная схема КС4 из трех отрезков МФ на основе асимметричной коаксиальной структуры та же, что на рис. 2г. При моделировании принято $l_1 = 0.1$ м, $l_2 = 0.3$ м, $l_3 = 1$ м. На рис. 4г представлены формы напряжений, полученные при моделировании КС4, а на рис. 5г — частотные зависимости $|S_{21}|$. Из результатов квазистатического моделирования видно, что к выходу отрезка 1 (узел $V1'$ на рис. 2г) приходят три импульса с максимальной амплитудой 171 мВ и $\Delta t_{\min} = 0.02$ нс, отрезка 2 (узел $V2'$ на рис. 2г) — девять импульсов с максимальной амплитудой 58 мВ и $\Delta t_{\min} = 0.05$ нс, а отрезка 3 (узел 2 на рис. 2г) — 27 импульсов с максимальной амплитудой 18.8 мВ и $\Delta t_{\min} = 0.01$ нс, что в 27.4 раза меньше уровня входного напряжения $U_{\text{вх}} = 515$ мВ. Из результатов электродинамического моделирования видно, что к выходу отрезка 1 также приходят три импульса (максимальная амплитуда 171 мВ), отрезка 2 — девять импульсов (максимальная амплитуда 60 мВ), а отрезка 3 — 27 импульсов (максимальная амплитуда 16.4 мВ). При этом значение $U_{\text{вх}}$ составляет 515.5 мВ. Формы импульсов разложения, полученных с помощью моделирования двумя разными видами анализа, хорошо согласуются. Из результатов моделирования частотных зависимостей $|S_{21}|$ видно, что резонансные частоты (примерно до 2 ГГц) при моделировании двумя разными видами анализа также хорошо согласуются (частоты первого резонанса отличаются меньше, чем на 2%). Наблюдается разный уровень сигнала на частотах резонансов: для частоты первого резонанса отклонение составляет 11 дБ. Частота среза, найденная по результатам моделирования двумя видами анализа, составляет примерно 55 МГц.

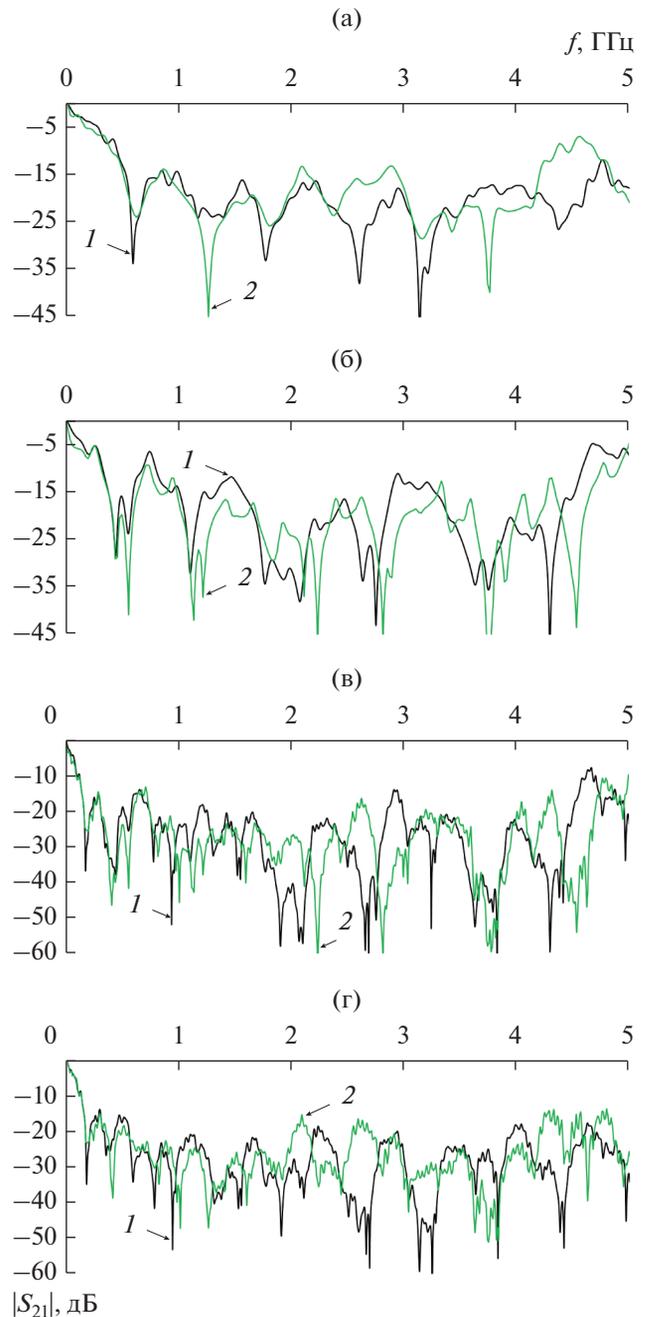


Рис. 5. Частотные зависимости $|S_{21}|$ в системах квазистатического (1) и электродинамического (2) моделирования для КС1...КС4 (а–г).

В табл. 1–6 приведены основные характеристики КС 1...КС4, полученные по результатам квазистатического моделирования (ввиду согласованности результатов квазистатического и электродинамического моделирования для точной оценки времени распространения отдельных мод вдоль КС1...КС4). Представлены значения напряжений импульсов разложения (U_i) и их задер-

Таблица 1. Значения напряжений (U_i) и задержек (t_i) импульсов вдоль активного проводника КС1 при квазистатическом моделировании для узлов $V1'$ и 2

Характеристика	i											
	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$V1'$			2								
U_i , мВ	132	151	174	33	38	43	38	43	49	43	50	57
t_i , нс	0.09	0.11	0.13	1.02	1.08	1.11	1.17	1.23	1.29	1.35	1.38	1.44

Таблица 2. Значения напряжений (U_i) и задержек (t_i) импульсов вдоль активного проводника КС2 при квазистатическом моделировании для узлов $V1'$ и 2

Характеристика	i											
	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$V1'$			2								
U_i , мВ	107	122	141	42	48	55	23	26	31	40	46	53
t_i , нс	0.09	0.11	0.13	1.45	1.55	1.65	1.79	1.85	1.95	2.1	2.18	1.26

Таблица 3. Значения напряжений (U_i) и задержек (t_i) импульсов вдоль активного проводника КС3 при квазистатическом моделировании для узлов $V1'$ и $V2'$

Характеристика	i											
	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$V1'$			$V2'$								
U_i , мВ	107	122	141	43	49	56	24	27	31	41	47	53
t_i , нс	0.09	0.11	0.13	1.45	1.55	1.65	1.75	1.85	1.9	2.05	2.17	1.26

жек (t_i) на концах отрезков 1 (узел $V1'$) и 2 (узел 2) для КС1, КС2 и отрезков 1 (узел $V1'$), 2 (узел $V2'$) и 3 (узел 2) для КС3, КС4.

Из табл. 1–6 видно совпадение значений U_i и t_i на концах отрезка 1 попарно в КС1 и КС4, а также

в КС2 и КС3. Это связано с одинаковой последовательностью отрезков 1 и 2. Так, отрезки 1 и 2 в КС1 и КС4 – это МФ на основе асимметричной коаксиальной структуры, а в КС2 и КС3 – МФ на основе асимметричной коаксиальной структуры и МПЛ. Кроме того, видно, что в отдельно ука-

Таблица 4. Значения напряжений (U_i) и задержек (t_i) импульсов вдоль активного проводника КС3 при квазистатическом моделировании для узла 2

i	U_i , мВ	t_i , нс	i	U_i , мВ	t_i , нс	i	U_i , мВ	t_i , нс
1	11	13.4	10	12.4	15.5	19	14.9	17.6
2	12.3	13.6	11	13.8	15.7	20	20.3	17.8
3	14	13.8	12	17.3	15.8	21	22.3	18
4	6.1	14.1	13	6.6	16.2	22	10.6	18.3
5	6.7	14.3	14	9	16.4	23	10.4	18.5
6	7.7	14.5	15	11.3	16.5	24	13.1	18.7
7	10.7	14.7	16	11.5	16.9	25	14.2	19
8	11.9	14.9	17	14.7	17.1	26	17	192
9	13.5	15.1	18	15.3	17.3	27	18.3	19.4

Таблица 5. Значения напряжений (U_i) и задержек (t_i) импульсов вдоль активного проводника КС4 при квазистатическом моделировании для узлов $V1'$ и $V2'$

Характеристика	i											
	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$V1'$			$V2'$								
U_i , мВ	132	151	175	34	39	44	39	44	51	45	51	58
t_i , нс	0.09	0.11	0.13	1.03	1.08	1.13	1.19	1.24	1.29	1.34	1.4	1.45

Таблица 6. Значения напряжений (U_i) и задержек (t_i) импульсов вдоль активного проводника КС4 при квазистатическом моделировании для узла 2

i	U_i , мВ	t_i , нс	i	U_i , мВ	t_i , нс	i	U_i , мВ	t_i , нс
1	8.5	16.2	10	9.7	18.7	19	11	21.1
2	9.6	16.4	11	11	19	20	14.8	21.4
3	11.1	16.6	12	12.6	19.2	21	14.9	21.6
4	9.7	16.8	13	12.7	19.4	22	12.5	22
5	11	17	14	12.6	19.6	23	18.1	22.1
6	12.6	17.3	15	14.6	19.8	24	18.9	22.2
7	11	17.5	16	12.7	19.9	25	16.4	22.4
8	12.7	17.6	17	14.8	20.2	26	20.2	22.7
9	14.6	17.9	18	16.6	20.4	27	19.6	22.9

занных КС импульсы на выходе отрезка 2 имеют близкие значения U_i и t_i . Примечательно, что ввиду частичного рассогласования мод при КС отрезков линий передачи наблюдается последовательный рост амплитуд отдельных импульсов в отдельных узлах. Например, на выходе отрезка 2 КС1 видно увеличение амплитуды импульсов от 33 мВ для импульса 1 до 57 мВ для импульса 9. Явление рассогласования отдельных импульсов мод, ведущее к отличным друг от друга значениям напряжений импульсов в отдельных узлах, особенно явно наблюдается для КС2 и КС3, где соединяются два различных в геометрии защитных устройства. Из минимальных разностей погонных задержек мод Δt_{\min} видно, что на концах отрезка 1 во всех КС это значение составляет 0.02 нс, отрезка 2 – 0.03 нс, а отрезка 3 – 0.01 нс. Это свидетельствует о частичном наложении импульсов на выходе, что ведет к увеличению максимального уровня выходного напряжения на конце отрезка 3 при моделировании КС3 (см. рис. 4в при квазистатическом моделировании). При электродинамическом моделировании подобная ситуация наблюдается и в других узлах при распространении импульсов мод вдоль КС1...КС4. Тем не менее полученные результаты подтверждают возможность улучшения защитных характеристик МФ, функционирующих отдельно, за счет каскадирова-

ния с другими МФ, причем с различной геометрической конфигурацией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые выполнено исследование возможности КС трехпроводных МФ на основе асимметричных коаксиальных структур и микрополосковой линии. Рассмотрены четыре варианта КС, состоящих из двух и трех отрезков линий передачи. Выполнены имитационное моделирование (в системах квазистатического и электродинамического моделирования) и параметрическая оптимизация данных КС. Выбраны отдельные отрезки КС с оптимальными параметрами (согласно амплитудным и временным критериям). Получены оптимальные длины отдельных отрезков линий передачи, позволяющие разложение воздействующего импульса на 9 импульсов (в КС1, КС2) и 27 (в КС3, КС4).

Выявлено, что при КС двух структур наибольшее ослабление достигается при соединении МФ на основе асимметричной коаксиальной структуры и МПЛ (максимальное ослабление в 9.4 раза по сравнению с входным напряжением по результатам квазистатического моделирования и 11.3 раза по результатам электродинамического моделирования). При КС трех структур наиболее предпочтительным вариантом является КС трех отрезков МФ на основе асимметричной коакси-

альной структуры (максимальное ослабление в 27.4 раза по сравнению с входным напряжением по результатам квазистатического моделирования и 31.4 раза по результатам электродинамического моделирования).

Что касается областей применения рассматриваемых МФ, как по отдельности, так и за счет КС, то наиболее перспективными для их использования являются медицинская, авиакосмическая, топливно-энергетическая, военная, атомная, индустриальная и др. В данных областях защита РЭС является крайне важной, поскольку ее выход из строя может повлечь за собой огромные финансовые потери и даже человеческие жизни. Зачастую в данных областях помимо общих требований (надёжность, ЭМС и т.п.) предъявляется ряд специфических: малая масса, компактность, низкое потребление электроэнергии, безотказность в условиях повышенных температур, вибраций и перегрузок, нечувствительность к проникающим излучениям и др. Предлагаемые МФ, так или иначе, удовлетворяют этим требованиям. С учетом гибкости, присущей МФ на основе асимметричной коаксиальной структуры, существует возможность увеличения длины и их компактного расположения при подключении к защищаемому оборудованию. Так, диапазон возможных областей использования чрезвычайно широк и ограничивается лишь специфическими пожеланиями заказчика, а также техническим процессом изготовления.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор благодарен Е.С. Жечеву и Н.О. Власовой за оказанную помощь при получении результатов работы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (грант МК-900.2022.4, результаты оптимизации), а также Министерства образования и науки РФ (грант FEWM-2022-0001, моделирование).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М.* // РЭ. 2016. Т. 61. № 5. С. 424.
2. *Li E.-P., Wei X.-C., Cangellaris A.C. et al.* // IEEE Trans. 2010. V. EMC-52. № 2. P. 248. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2010.2048755.2>
3. *Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Кузнецова-Таджибаева О.М.* // Электромагнитные волны и электрон. системы. 2004. Т. 11. № 11. С. 18.
4. *Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р.* Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата. Томск: Томск. Гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники. 2003. С. 151.
5. *Жечев Е.С., Черникова Е.Б., Белоусов А.О., Газизов Т.Р.* // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 2. С. 162.
6. *Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М.* // Технологии ЭМС. 2006. № 4(19). P. 40.
7. *Belousov A.O., Vlasova N.O.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 1862. Article No. 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1862/1/012004>
8. *Газизов Т.Р.* Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры. Томск: ТМЛ-Пресс, 2007.
9. *Kuksenko S.P.* // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2019. V. 560. Article No. 012110. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/560/1/012110>
10. *Belousov A.O., Gazizov T.R.* // Complexity. 2018. № 2018. P. 1.