

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 621.372.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА НА ДВУХСТОРОННЕЙ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ

© 2023 г. М. А. Самойличенко^а, *, Е. С. Жечев^а, Т. Р. Газизов^а

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

*E-mail: 1993mary2011@mail.ru

Поступила в редакцию 23.12.2022 г.

После доработки 09.03.2023 г.

Принята к публикации 27.03.2023 г.

Экспериментально показана возможность разложения сверхкороткого импульса на последовательность импульсов меньшей амплитуды в модальном фильтре на двухсторонней печатной плате. Для подтверждения результатов экспериментального исследования выполнено квазистатическое моделирование. В ходе измерений ослабление составило 5.4 раза по отношению к половине ЭДС, а полоса пропускания 120 МГц. Изменение граничных условий на концах пассивного проводника на короткое замыкание (КЗ) и холостой ход (ХХ) позволило увеличить ослабление до 6.7 раза и полосу пропускания до 150 МГц. Показано появление дополнительных импульсов при КЗ-ХХ, представлены результаты анализа целостности полезного сигнала.

DOI: 10.31857/S0033849423070094, EDN: WPJULQ

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Параллельно с бурным развитием и внедрением в различные сферы деятельности различной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в последние годы ведутся активные работы по созданию новых источников мощного преднамеренного электромагнитного излучения [1–3]. Особо опасными являются сверхкороткие импульсы (СКИ), которые проявляются в виде отдельных импульсов или их последовательности [4]. Известны три эффекта, которые могут возникать в РЭА при воздействии СКИ: необратимые отказы некоторых элементов; переход активных элементов в режим насыщения; ошибки при передаче цифровых данных [5]. Первый эффект возникает при высоких уровнях воздействующего импульсного электромагнитного поля (более 100 кВ/м). Возникновение второго, как правило, происходит в тех случаях, когда частота повторения воздействующих импульсов составляет не менее нескольких сотен герц. Возможным следствием последнего является искажение битовой последовательности (искажение полезного сигнала). Этот способ воздействия на цифровые устройства демонстрирует высокую эффективность даже при относительно низких амплитудах воздействующих электромагнитных импульсов [6].

Современные цифровые и аналоговые микросхемы, как правило, имеют специальные защит-

ные цепи, обеспечивающие ослабление помех. Для защиты широко используются специализированные устройства — газовые разрядники, варисторы, TVS-диоды. Однако они имеют некоторые недостатки: у газовых разрядников это — высокое значение напряжения срабатывания (от десятков до сотен вольт) и напряжения дуги (из-за этого использование их для защиты низковольтных цепей затруднительно); зависимость напряжения срабатывания от скорости нарастания импульса; низкое быстродействие; длительный период восстановления; ограниченный срок службы (данные взяты из каталога <https://www.compel.ru/lib/66139>). В качестве основного недостатка варисторов можно отметить их большую собственную емкость, которая вносится в цепь. В зависимости от конструкции, типа и номинального напряжения эта емкость может составлять от 80 до 30000 пФ. Кроме того, недостатком элемента является низкочастотный шум, создаваемый им при работе. При длительном воздействии напряжений критической величины — рассеивание мощности прекращается, а сам полупроводниковый элемент перегревается и выходит из строя [7]. Стандартная технология TVS-диодов не позволяет делать их достаточно эффективными для напряжений ниже 5 В. Их емкостное сопротивление напрямую относится к области перехода и растет экспоненциально, в то время как рабочее напряжение снижается.

Влияние емкостной нагрузки, которую создает защитный диод высокочастотному сигналу, или передачи через длинную линию, приводят к отражению сигнала (<http://www.electrosad.ru/Electronics/zaschita.htm>).

Для повышения защищенности РЭА от кондуктивных помех предлагаются такие устройства защиты, как ограничители, фильтры и т.д. Так, например, известно устройство защиты “Электрическая розетка с защитой от помех” [8]. Недостатком устройства является сложность конструкции. Известно устройство для защиты РЭА от импульсных перенапряжений [9], а также для защиты средств связи от импульсных перенапряжений [10]. Недостатками устройств являются сложность конструкции и малый ресурс. В работе [11] приведен обзор активных ЕМИ-фильтров для снижения уровня кондуктивных помех в силовых электронных преобразователях. Однако у них есть недостатки: для большого количества цепей, требующих защиты, при стандартном подходе понадобится и большое количество фильтров, которые занимают большой объем; они включаются в разрыв контрольных и силовых кабелей, что при наличии большого количества цепей существенно затрудняет их установку и делает эту работу дорогой и сложной.

В последнее время все большее внимание уделяется устройствам на полосковых и микрополосковых линиях передачи (МПЛ). Они имеют малые габариты, простые конструкции, практически неограниченный срок службы, функционирование в широком диапазоне напряжений. Кроме того, они могут устанавливаться на печатных платах (ПП), что существенно экономит место в устройстве, так как не приходится выносить фильтры отдельным блоком. Производство таких фильтров существенно дешевле, а размещение их на плате не сложнее установки в блоке.

В работе [12] рассмотрены встречно-штыревые микрополосковые фильтры как устройства защиты от сверхширокополосных импульсов. Выявлено, что такие фильтры подходят для защиты электронных цепей от очень быстрых переходных процессов опасной амплитуды и легко интегрируются в электронные схемы. В работе [13] представлены результаты расчета и исследования фильтров нижних частот с распределенными параметрами с частотами среза 6 и 7 ГГц. Недостатком устройств является сложность интеграции в ПП.

В связи со сказанным актуален поиск новых устройств защиты. Так, исследуются новые защитные устройства на основе МПЛ, называемые модальными фильтрами (МФ), в основу работы которых положено использование модальных искажений [14–16]. Основная идея модальной фильтрации заключается в ослаблении влияния помехо-

вого импульса за счет разности задержек мод его поперечных волн в МПЛ. Особый интерес представляют МФ, полученные за счет модификации МПЛ и копланарной линии (КПЛ). Это достигается, например, за счет двух вырезов в опорной плоскости. Такие МФ просты в реализации, имеют меньшую длину и достаточно хорошее подавление СКИ, а также легко интегрируются в реальные ПП. Так, например, МФ можно реализовывать в ПП, используя уже имеющиеся печатные дорожки на ПП. Так, в работе [17] экспериментально показана возможность ослабления СКИ в МФ с пассивным проводником в вырезе опорной плоскости. Конфигурация такого МФ получается за счет двух вырезов в опорной плоскости обычной МПЛ. В работе [18] рассматривается влияние двух способов соединения опорных проводников (на концах МФ и вдоль всей длины) на разложение СКИ в МФ на двухсторонней печатной плате (ДПП). Конфигурация такого МФ получается за счет двух вырезов в опорной плоскости обычной КПЛ. Показано, что в случае соединения только на концах МФ к выходу приходят три импульса, а вдоль всей длины — два. В работе [19] приведено сравнение характеристик КПЛ и МФ. Для сравнения характеристик изготовлен макет КПЛ длиной 53 мм. Показано, что КПЛ не позволяет защитить от СКИ (ослабление составило 1.21 раза по отношению к половине электродвижущей силы (ЭДС). После измерения КПЛ в ее опорной плоскости были сделаны два выреза, что позволило образовать МФ. Добавление двух вырезов позволило ослабить СКИ (по результатам измерений ослабление составило 2.3 раза по отношению к половине ЭДС). Длина МФ 53 мм позволяет его легко интегрировать в ПП, используя в качестве защиты уже имеющиеся печатные дорожки и полигоны. На рис. 1а, на примере платы программируемого микроконтроллера, показана возможность использования такого МФ в сигнальных линиях и цепях питания. Возможная схема включения МФ в электрическую цепь приведена на рис. 1б.

Между тем исследования подобных МФ не завершены. Так, не исследовано экспериментально ослабление СКИ в МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными только на концах.

Цель данной работы — экспериментальное подтверждение ослабления СКИ в МФ на ДПП с опорными проводниками, соединенными только на концах, с демонстрацией возможности его использования для защиты сигнальных цепей от помех.

2. КОНСТРУКЦИЯ МФ, ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ

На рис. 2а приведено поперечное сечение МФ на ДПП. На рис. 2б приведена схема включения МФ, которая состоит из пяти параллельных проводников. Активный проводник линии на одном

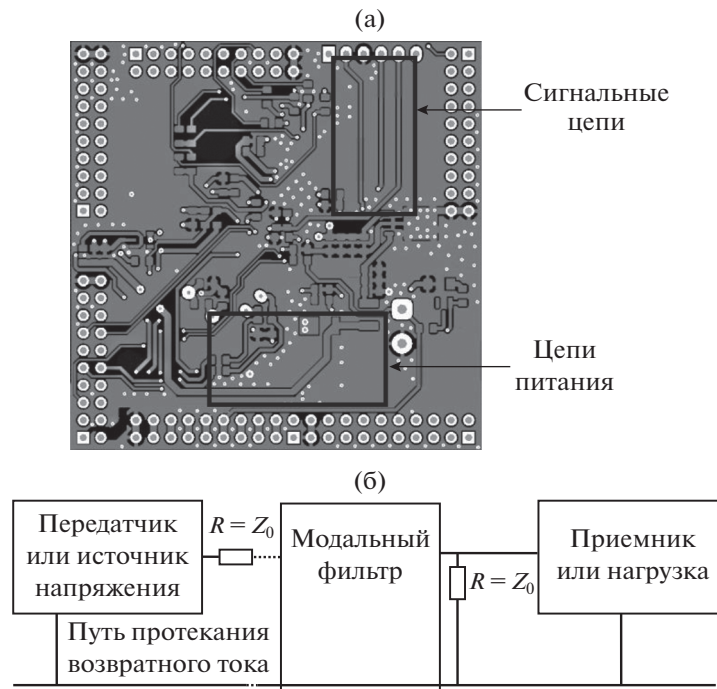


Рис. 1. Пример реализации (а) и включения в цепь (б) МФ на ДПП.

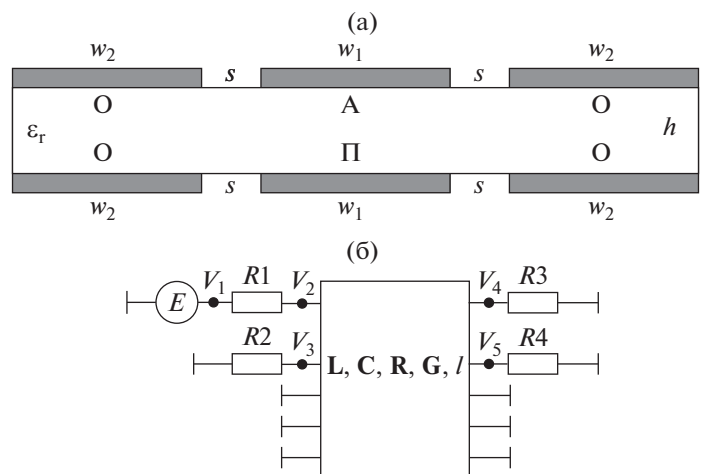


Рис. 2. Поперечное сечение (а) и схема включения (б) МФ на ДПП: s — разнос проводников, w_1 — ширина активного А и пассивного П проводников, w_2 — ширина опорных О проводников, h — толщина диэлектрика, t — толщина проводников, ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость.

конце соединен с источником СКИ, представленным на схеме идеальным источником ЭДС E и внутренним сопротивлением R_1 . На другом конце активный проводник линии соединен с нагрузкой, представленной сопротивлением R_3 . Начало сигнального проводника (пассивного) на нижнем слое подложки подключено к пластине (является опорным проводником) через резистор R_2 , а конец — через резистор R_4 . Три крайних проводника являются опорными и напрямую

подключены с обоих концов. Значения сопротивлений $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 50 \text{ Ом}$.

Для проведения экспериментального исследования во временной области, использовался цифровой стробоскопический осциллограф DSA8300 (рис. 3а). С помощью дискретного модуля (80E04) на вход МФ подавался сигнал с линейно нарастающим фронтом. Количество точек усреднения принято равным 30. Из производных от временных откликов на ступенчатое воздействие $U(t)$,

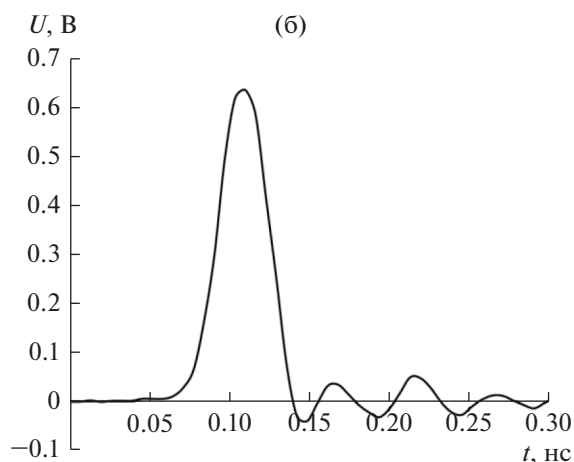
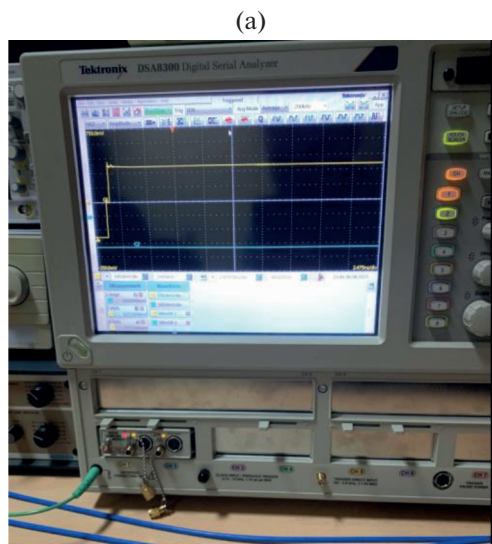


Рис. 3. Цифровой стробоскопический осциллограф DSA8300 (а) и форма воздействующей ЭДС (б).

получены временные отклики на воздействие вида $dU(t)/dt$. Так как исследуемое устройство линейно, то для простоты восприятия сигнал нормирован к 0.63 В по максимальной амплитуде. Данное воздействие использовалось в качестве ЭДС источника помехи с параметрами: амплитуда 0.634 В, время фронта 14.6 пс, спада 12 пс и плоской вершины 4.7 пс (по уровням 0.1...0.9), общая длительность (по уровню 0.5) 22 пс (рис. 3б).

Для проведения экспериментального исследования в частотной области был использован векторный анализатор электрических цепей “Панорама” Р4226 (рис. 4). Для повышения точности регистрации сигналов выполнена калибровка.

Предварительная оптимизация параметров поперечного сечения для изготовления лабораторного макета МФ, а также сравнение результатов измерения и моделирования выполняли с помощью квазистатического подхода в системе TALGAT. Матрицы $\mathbf{L}$ и $\mathbf{C}$ вычислены методом моментов. Потери в проводниках и диэлектриках определя-



Рис. 4. Векторный анализатор электрических цепей “Панорама” Р4226.

ются матрицами $\mathbf{R}$ и $\mathbf{G}$. Моделирование в TALGAT позволяет значительно сэкономить время и средства на разработку устройств. Результаты моделирования имеют приемлемую точность, что подтверждено результатами многочисленных верификаций [20].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Оптимизация

Для изготовления лабораторного макета выполнена оптимизация МФ на ДПП. Для этого взят двухсторонний фольгированный стеклотекстолит общей толщиной 250 мкм ($t = 35$ мкм и $h = 180$ мкм). Оптимизировались ширина активного и пассивного проводников (w_1) от 500 до 4000 мкм и разнос проводников s от 500 до 4000 мкм при $l = 12$ см. Ширина опорных проводников w_2 принята 800 мкм. Оптимизация выполнялась по критерию уменьшения амплитуды напряжения на выходе МФ за счет выравнивания амплитуд импульсов и максимизации разности погонных задержек мод. В качестве воздействующего импульса при оптимизации использовали сигнал стробоскопического осциллографа в форме ступеньки.

Выравнивание амплитуд и минимизация до 0.060 В достигнуты при $w_1 = 700$ мкм и $s = 3450$ мкм. Результаты моделирования показаны на рис. 5. Как видно, амплитуда выходного напряжения равна 0.06 В, а разность погонных задержек импульсов составляет 0.384 нс.

3.2. Макет МФ

Для изготовления макетов выполнена трассировка макета ПП МФ. Длина макета МФ принята равной 12 см (из-за гибкости макета ввиду малой толщины диэлектрика). После изготовления МФ

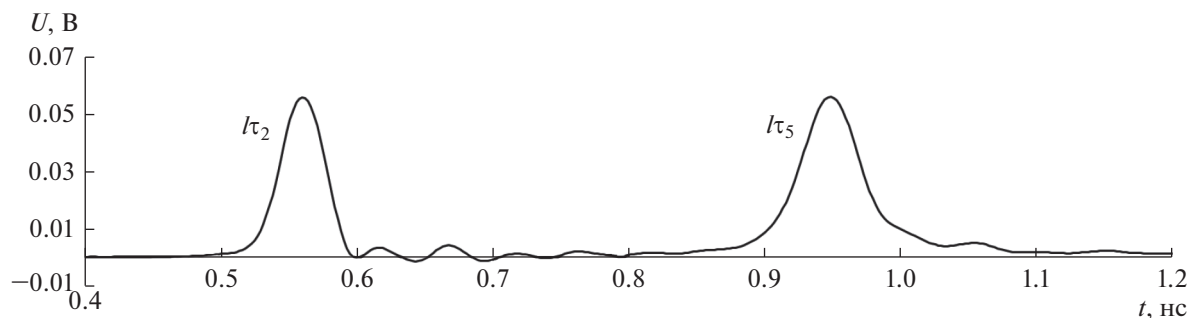


Рис. 5. Форма напряжения на выходе оптимизированного МФ.

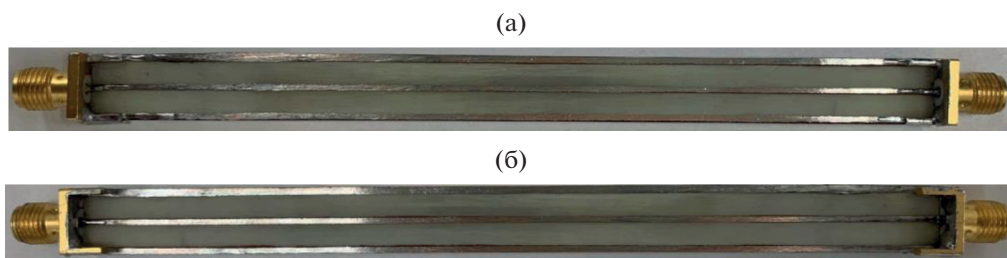


Рис. 6. Фото верхнего (а) и нижнего (б) слоев макета МФ.

проведен контроль геометрических параметров. С помощью увеличительного стекла с измерительной линейкой контролировали ширину печатных проводников и расстояние между ними. Получены реальные значения геометрических параметров, средние значения которых составили: $w_1 = 738$ мкм, $w_2 = 985$ мкм и $s = 3255$ мкм. На рис. 6 показан изготовленный макет МФ.

3.3. Результаты эксперимента

На рис. 7 представлены результаты эксперимента и моделирования во временной области. Видно, что СКИ раскладывается на два импульса с меньшими амплитудами с задержками $l\tau_2$ и $l\tau_5$. С изменением граничных условий на концах пассивного проводника на короткое замыкание (КЗ) и холостой ход (ХХ) амплитуда импульсов становится меньше. Экспериментально подтверждается появление дополнительных импульсов (см. рис. 7б, Д1 и Д2) при изменении граничных условий на концах пассивного проводника. Из рис. 7б видно, что при первом проходе сигнала по линии дополнительные импульсы отсутствуют, что объясняется отсутствием отражений от начала линии. Они появляются после третьего прохода, когда отраженный от конца линии сигнал (при первом проходе) вернулся в начало. Также видно, что амплитуда дополнительных импульсов меньше амплитуды основных импульсов мод. Следовательно, ослабление СКИ необходимо оценивать по значению $U_{\max}$ именно основных импульсов

мод. Так, при согласованном случае, по результатам эксперимента, достигнуто ослабление входного воздействия в 5.4 раза, а в случае КЗ-ХХ — 6.7 раза. Амплитуды напряжения первых двух импульсов и разность задержек мод, полученные при эксперименте и моделировании, приведены в табл. 1.

Для точного определения времени прихода дополнительных импульсов с помощью квазистатического моделирования вычислены погонные задержки и время прихода пяти основных мод (табл. 2). Получившиеся комбинации и время прихода дополнительных импульсов приведены в табл. 3, а напряжения дополнительных импульсов по результатам моделирования и эксперимента — в табл. 4.

Из рис. 7 видно, что результаты эксперимента и моделирования во временной области хорошо согласуются по форме и времени прихода импульсов, хотя в эксперименте меньше разность задержек мод. Отклонение результатов модели-

Таблица 1. Выходные характеристики исследуемого МФ

Параметр	Моделирование		Эксперимент	
	50-50	КЗ-ХХ	50-50	КЗ-ХХ
U_2 , В	0.055	0.041	0.059	0.047
U_5 , В	0.057	0.021	0.055	0.028
Δt , нс/м	3.7		3.1	

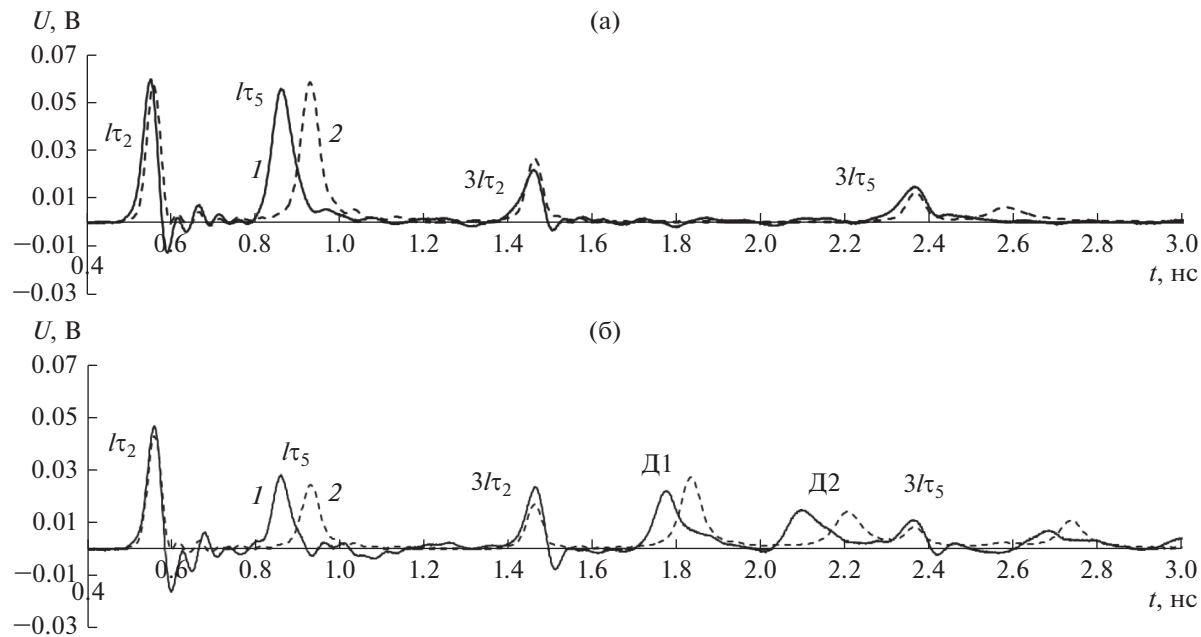


Рис. 7. Формы напряжения на выходе МФ, полученные при эксперименте (1) и моделировании (2): $R_2 = R_4 = 50 \text{ Ом}$ (а) и КЗ-ХХ (б).

рования и эксперимента, рассчитанное как $(|X_M - X_3|/|X_M + X_3|)100\%$, составляет 8.8%. Это обусловлено тем, что реальное значение ϵ_r меньше принятого в моделировании. Наблюдается некоторое отклонение результатов эксперимента и моделирования по амплитудам импульсов, что может быть вызвано неучтенным влиянием коаксиально-микрополосковых и коаксиальных переходов. Отклонения составляют: при согласованном случае для U_2 3.5%, U_5 1.8%, при КЗ-ХХ U_2 6.8%, U_5 14.3%.

На рис. 8 представлены результаты эксперимента и моделирования частотной зависимости $|S_{21}|$. Полосы пропускания f_c (по уровню -3 дБ) и резонансные частоты f_r приведены в табл. 5. По результатам эксперимента видно, что с изменением граничных условий полоса пропускания стала больше и составила 150 МГц, тогда как с на-

грузками — 120 МГц. В конфигурации КЗ-ХХ частоты первого и второго резонансов уменьшаются. Небольшие отличия результатов обусловлены различием значений электрофизических параметров реальных прототипов и их математических моделей. Так, могут отличаться значения ϵ_r и $\text{tg}\delta$, что сдвигает графики по частоте. Помимо этого, в моделировании не учитывалось влияние коаксиально-микрополосковых и коаксиальных переходов, которые вносят частотно-зависимые потери. Отклонение для полосы пропускания составляет для согласованного случая 3.9%, для КЗ-ХХ 1.3%.

Исследуемый МФ можно использовать в сигнальных цепях, поэтому важно оценить целостность полезного сигнала. Для анализа информа-

Таблица 2. Погонные задержки и время прихода импульсов мод

Погонные задержки, нс/м		Время прихода, нс			
τ_1	3.55	$l\tau_1$	0.43	$3l\tau_1$	1.28
τ_2	3.78	$l\tau_2$	0.45	$3l\tau_2$	1.36
τ_3	6.94	$l\tau_3$	0.83	$3l\tau_3$	2.49
τ_4	6.95	$l\tau_4$	0.83	$3l\tau_4$	2.50
τ_5	6.96	$l\tau_5$	0.83	$3l\tau_5$	2.50

Таблица 3. Параметры дополнительных импульсов при КЗ-ХХ

Импульс	Комбинация	Задержка, нс
1	$l(2\tau_2 + \tau_3)$	1.73
2	$l(\tau_2 + 2\tau_3)$	2.11

Таблица 4. Амплитуды (U_i) дополнительных импульсов на выходе МФ при КЗ-ХХ

Амплитуда	Моделирование	Эксперимент
$U_1, \text{ В}$	0.0269	0.0223
$U_2, \text{ В}$	0.0143	0.0141

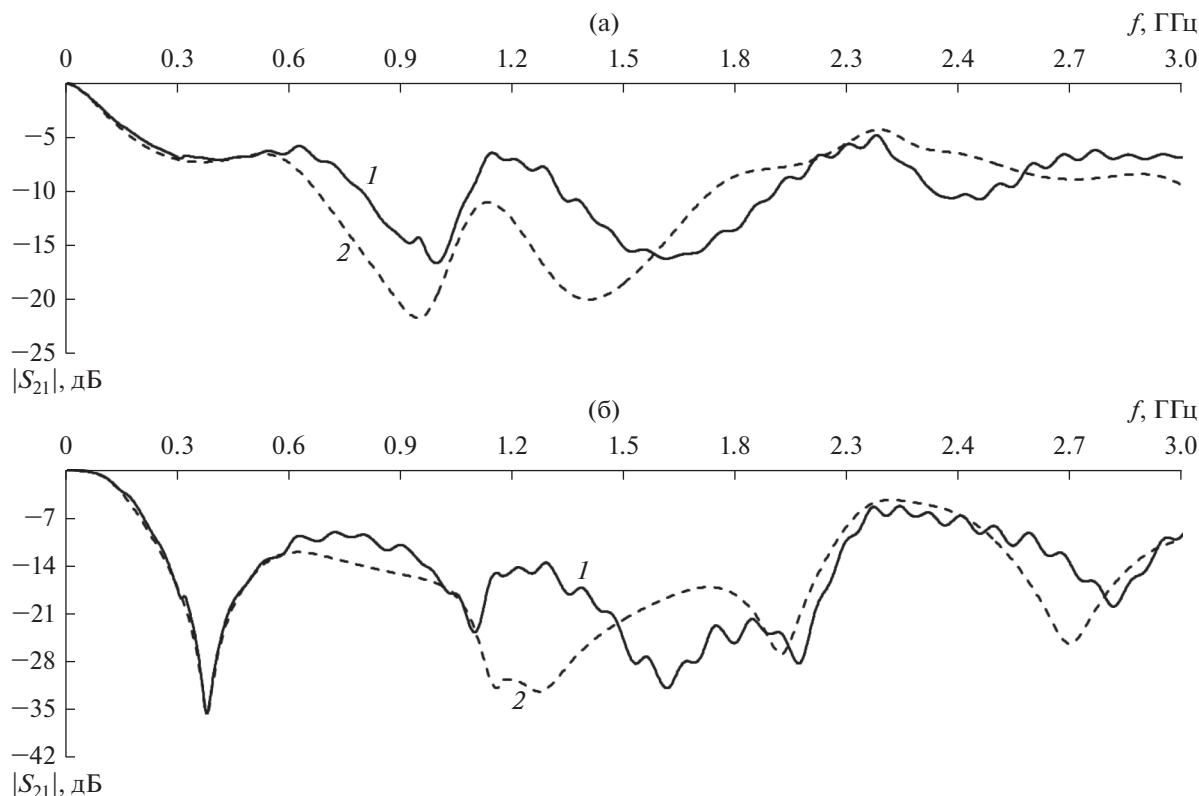


Рис. 8. Частотные зависимости $|S_{21}|$, полученные при эксперименте (1) и моделировании (2): $R_2 = R_4 = 50$ Ом (а) и КЗ-ХХ (б).

ционно-зависимых отклонений амплитуды и фазы полезного сигнала на вход МФ подавались псевдослучайные битовые последовательности (ПСБП) размерностью 10000 байт и амплитудой 1 В. Скорость передачи данных изменялась от 50 до 250 Мбит/с с шагом 50 Мбит/с, а длительность нарастания (и спада) — от 4000 до 800 пс. Глазковые диаграммы, полученные для ПСБП со скоростью передачи данных 50, 100 и 250 Мбит/с и временем нарастания/спада 4000, 2000 и 800 пс, при нагрузках на концах пассивного проводника по 50 Ом, представлены на рис. 9. При этом анализировались среднестатистическое фазовое отклонение (рис. 10а) и отношение сигнал/шум (ОСШ) (рис. 10б).

Видно, что в полосе пропускания МФ четко прослеживается переход между логическими уровнями. Следовательно, в полосе пропускания МФ вероятность возникновения битовых ошибок будет низкой. С увеличением скорости передачи данных ОСШ уменьшается, а фазовое отклонение (джиттер) — увеличивается. При 100 Мбит/с ОСШ составляет 46.194 раза, а фазовое отклонение — менее 1 пс от 50 до 100 Мбит/с.

Для наглядного представления эффективности МФ приведены результаты одновременного распространения полезного и помехового сигнала.

Кроме того, представлено сравнение глазковых диаграмм для линии без МФ и с ним. Так, на вход линии подавалась ПСБП со скоростью передачи данных 100 Мбит/с и помеховый сигнал с частотой повторения 10 МГц. Глазковые диаграммы, полученные для линии без МФ и с ним, приведены на рис. 11. Видно, что в линии без МФ из-за большой амплитуды импульса наблюдается перекрытие глаза. Линии напряжения будут пересекать наложенные стандартизированные маски, что приведет к ухудшению качества полезного сигнала. В случае использования МФ удастся уменьшить амплитуду помехового импульса, в результате чего будет меньше пересечений линий напряжения с маской (см. рис. 11б).

Таблица 5. Полосы пропускания f_c и резонансные частоты МФ f_i (МГц)

Метод	f_c		f_1		f_2	
	50-50	КЗ-ХХ	50-50	КЗ-ХХ	50-50	КЗ-ХХ
Моделирование	111	146	931	378	1386	1146
Эксперимент	120	150	1010	378	1590	1090

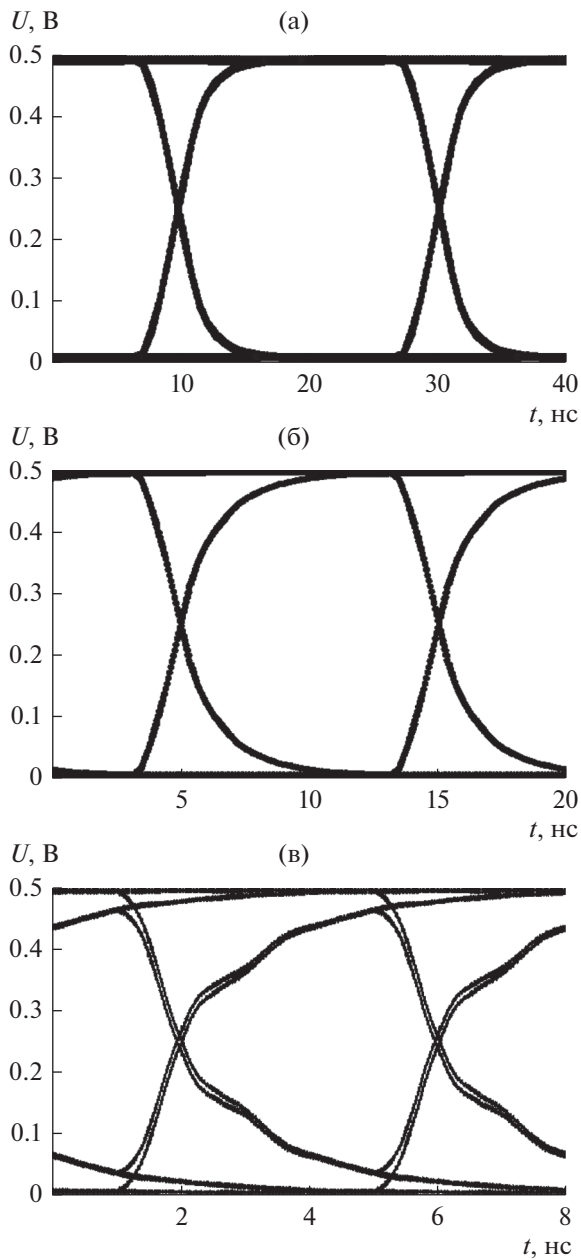


Рис. 9. Глазковые диаграммы при $R_2 = R_4 = 50$ Ом и скорости передачи данных 50 (а), 100 (б) и 250 Мбит/с (в).

Из результатов видно, что МФ может быть использован для передачи цифровых данных в полосе пропускания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотрена защита РЭА от воздействия кондуктивных помех малой длительности за счет применения технологии модальной фильтрации. Проведено экспериментальное исследование во временной и частотной областях. Для подтверждения полученных результатов вы-

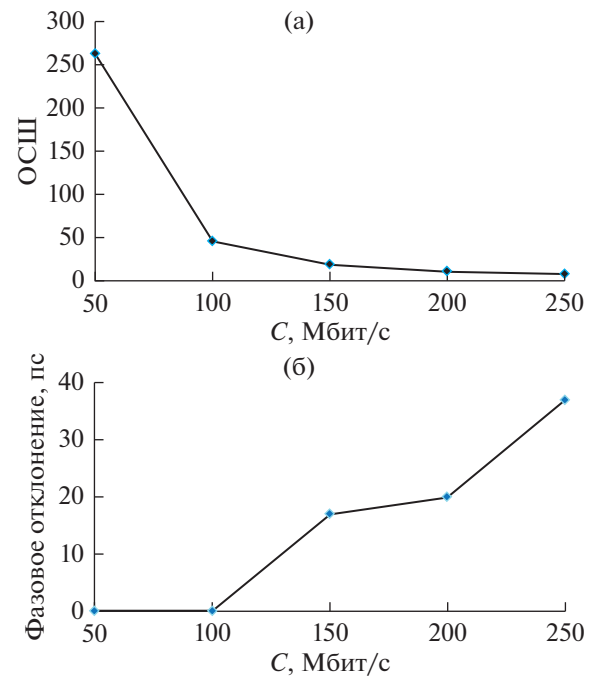


Рис. 10. Зависимость ОСШ (а) и фазового отклонения (б) от скорости передачи данных при $R_2 = R_4 = 50$ Ом.

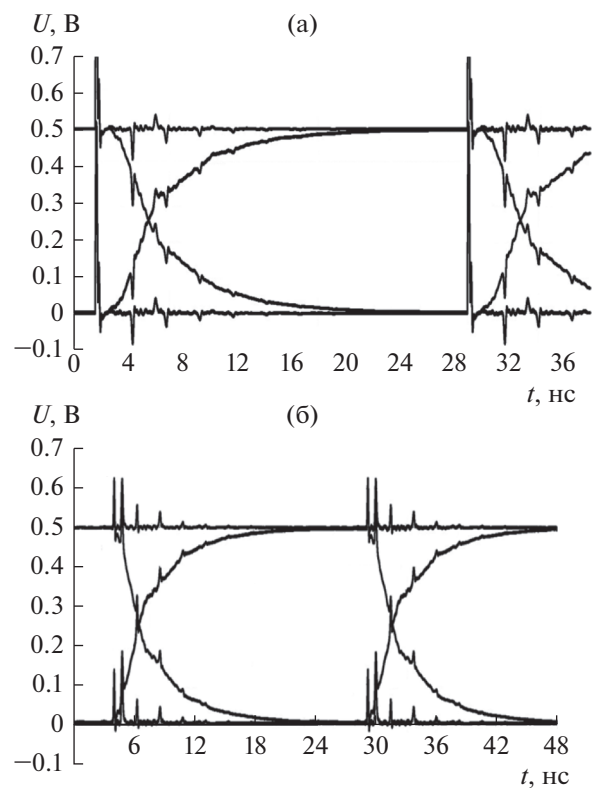


Рис. 11. Глазковые диаграммы одновременного распространения полезного и помехового сигналов в линии без МФ (а) и с МФ (б).

полнено квазистатическое моделирование, при котором учтены измеренные параметры поперечного сечения МФ и выполнено сравнение результатов моделирования и эксперимента.

Экспериментально доказана возможность разложения СКИ в МФ на ДПП. Показано, что СКИ с общей длительностью 22 пс раскладывается при $l = 12$ см. Изменение граничных условий позволяет увеличить ослабление и полосу пропускания МФ. Так, по результатам эксперимента ослабление СКИ составило 6.7 раза, а полоса пропускания – 150 МГц. Экспериментально показано появление дополнительных импульсов при изменении граничных условий на концах пассивного проводника. Результаты эксперимента и моделирования во временной и частотной областях хорошо согласуются. Показано, что МФ может быть использован для передачи цифровых данных в полосе пропускания.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00424) и Министерства образования и науки Российской Федерации (проект FEWM-2020-0039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Prather W.D., Baum C.E., Torres R.J. et al. // IEEE Trans. 2004. V. EC-46. № 3. P. 335. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2004.831826>
2. Иммогеев И.Я. // РЭ. 2009. Т. 54. № 1. С. 5.
3. Слюсар В. // Электроника: наука, технология, бизнес. 2002. № 5. С. 60.
4. Хоанг Л.Ч., Киричек Р.В. // Информ. тех. и телекоммуникации. 2017. Т. 5. № 1. С. 114.
5. Здухов Л.Н., Парфёнов Ю.В., Тарасов О.А., Чепелев В.М. // Технологии электромагн. совместимости. 2018. № 2. С. 22.
6. Баталов Л.А., Жуковский М.И., Киричек Р.В., Лазарев Б.Н. // Научно-техн. вестн. информ. технологий, механики и оптики. 2012. № 2. С. 103.
7. Гуревич В. // Силовая электроника. 2018. Т. 4. № 73. С. 9.
8. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М. // Электрическая розетка с защитой от помех. Пат. РФ на полезную модель № 119945. Оpubл. офиц. бюл. “Изобретения. Полезные модели” № 24 от 28.08.2012.
9. Гришук В.И., Черноусов В.В. // Устройство для защиты радиотехнической аппаратуры от импульсных перенапряжения. А. с. № 1840225. Оpubл. офиц. бюл. “Изобретения. Полезные модели” № 23 от 20.08.2006.
10. Гришук В.И., Черноусов В.В., Грибанов С.Н. // Устройство для защиты средств связи от импульсных перенапряжения. А. с. СССР № 1840216. Оpubл. офиц. бюл. “Изобретения. Полезные модели” № 20 от 20.07.2006.
11. Narayanasamy B., Luo F. // IEEE Trans. 2019. V. EC-61. № 6. P. 2040.
12. Krzikalla R., Weber T., Ter Haseborg J.L. // 2003 IEEE Int. Symp. Electromagnetic Compatibility (EMC'03). Istanbul. 11–16 May. N.Y.: IEEE, 2003. V. 2. P. 1313.
13. Ламанов Ю.А., Кудрявцева Т.О., Дроботун Н.Б. // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. 2021. V. 24. № 2. P. 7.
14. Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. // IEEE Trans. 2016. V. EC-58. № 4. P. 1136. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2016.2548783>
15. Жечев Е.С., Черникова Е.Б., Белоусов А.О., Газизов Т.Р. // Сист. управ., связи и безопасности. 2019. № 2. С. 162. <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10208>
16. Хажобеков Р.Р. // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. 2019. № 2. С. 31. <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2019-22-2-31-36>
17. Samoylichenko M.A., Zhechev Y.S., Kosteletskii V.P., Gazizov T.R. // IEEE Trans. 2021. V. EC-63. № 2. P. 435. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2020.3011407>
18. Самойличенко М.А., Газизов Т.Р. // Журн. радиоэлектроники. 2021. № 12. <http://jre.cplire.ru/jre/dec21/10/text.pdf>. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.12.10>
19. Samoylichenko M.A., Zhechev Y.S., Gazizov T.R. // 2022 IEEE 23rd Int. Conf. Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). Altai. 30 Jun.–05 Jul. N.Y.: IEEE, 2022. Paper 9855190. <https://doi.org/10.1109/EDM55285.2022.9855190>
20. Gazizov T.R., Sagiyeva I.Y., Kuksenko S.P. // Complexity. 2019. V. 2019. Article ID 6301326. <https://doi.org/10.1155/2019/6301326>