

УДК 621.372

Разложение сверхкороткого импульса в меандровой микрополосковой линии из двух витков

Ким Г. Ю., Носов А. В.

Постановка задачи: с развитием радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) повышается ее быстродействие, уменьшаются рабочие напряжения и увеличивается плотность трассировки печатных плат, что увеличивает восприимчивость РЭА к различным электромагнитным воздействиям (ЭМВ). Известно, что ЭМВ могут представлять угрозу для современной РЭА. Так, генераторы мощных ЭМВ могут быть использованы злоумышленниками для дестабилизации или полного выведения из строя критичной инфраструктуры. Серьезную угрозу для РЭА представляет сверхкороткий импульс (СКИ). Известно множество традиционных способов защиты от СКИ, но они имеют недостатки: низкая мощность и быстродействие, ограниченный ресурс срабатываний, а также, низкая радиационная стойкость из-за полупроводниковых компонентов в их составе. Это неприемлемо, например, для космической отрасли, из-за необходимости повышения срока активного существования космических аппаратов до 15 лет. В этой связи, необходим поиск новых подходов к защите РЭА, лишенных таких недостатков. Одним из перспективных подходов к защите РЭА является подход, основанный на ослаблении СКИ в меандровой микрополосковой линии (МПЛ) из двух и более витков. Однако практическая реализация таких структур в современной РЭА затруднительна из-за больших длин структур и/или диэлектрической проницаемости подложки. Поэтому необходимо их совершенствование. Сначала целесообразно рассмотреть более простую структуру (из двух витков) с использованием радиопоглощающего материала (РПМ) и сворачиванием витков. **Цель работы:** совершенствование меандровой МПЛ из двух витков за счет их сворачивания и покрытия РПМ. **Используемые методы:** анализ, структурно-параметрическая оптимизация эвристическим поиском, а также вычислительный (на основе разных численных методов) и натурный эксперименты. **Новизна:** для дополнительного ослабления СКИ, возможности практической реализации и уменьшения габаритов устройства впервые применены сворачивание каждого витка линии в неосновные витки и РПМ в качестве покрывающего слоя. Кроме того, впервые сформулированы условия разложения СКИ в меандровой МПЛ из двух свернутых витков с РПМ. **Результат:** Выявлено, что последовательности прихода разложенных импульсов в структурах с и без РПМ отличаются. В этой связи, сформулированы новые условия разложения СКИ. Выявлено, что сворачивание каждого витка меандровой МПЛ в неосновные витки приводит к дополнительному ослаблению СКИ. Изготовлен макет меандровой МПЛ из двух витков уменьшенных размеров. Измеренное ослабление СКИ в ней составило 5,8 раз (15,3 дБ). Ширина и длина макета составили 46 и 57 мм соответственно, тогда как без РПМ и сворачивания каждого витка в неосновные витки они были 10 и 575 мм соответственно. Анализ N-норм структуры показал, что N1, N2, N3 и N5 уменьшились в 5,75, 13,16, 1,04 и 2,92 раза соответственно, а N4 увеличилась в 1,54 раза. **Практическая значимость:** решение может использоваться в критичной РЭА для защиты от СКИ, например, для передачи данных в различных низкоскоростных интерфейсах, а также в цепях питания с напряжением до 530 В и токами до 850 мА.

Ключевые слова: сверхкороткий импульс, меандровая линия, четная мода, нечетная мода, электромагнитная совместимость, помехозащита.

Библиографическая ссылка на статью:

Ким Г. Ю., Носов А. В. Разложение сверхкороткого импульса в меандровой микрополосковой линии из двух витков // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 1. С. 118-137. DOI: 10.24412/2410-9916-2024-1-118-137

Reference for citation:

Kim G. Y., Nosov A. V. Decomposition of the ultrashort pulse in a meander microstrip line of two turns. *Systems of Control, Communication and Security*, 2024, no. 1, pp. 118-137 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2024-1-118-137

Введение

С развитием радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) уменьшаются рабочие напряжения и увеличивается плотность трассировки печатных плат, что увеличивает восприимчивость РЭА к различным электромагнитным воздействиям (ЭМВ). Известно, что ЭМВ могут представлять угрозу для современной РЭА [1, 2]. Так, генераторы мощных ЭМВ могут быть использованы злоумышленниками для дестабилизации или полного выведения из строя критичной инфраструктуры [3-7]. Серьезную угрозу для РЭА представляет сверхкороткий импульс (СКИ) [8]. Известно множество традиционных способов защиты от СКИ, но они имеют недостатки: низкие мощность и быстродействие, а также ограниченный ресурс [9]. Поэтому актуален поиск новых подходов и устройств защиты, у которых отсутствуют указанные недостатки. Известны устройства на основе печатных структур для защиты от ЭМВ и фильтрации сигнала в полосе частот [10-12]. Одним из перспективных подходов к защите РЭА является подход, основанный на ослаблении СКИ в меандровой линии (МЛ) за счет модального разложения [13]. Он перспективен, поскольку реализация такой защиты может не требовать устройства защиты как такового: могут быть использованы уже имеющиеся на печатной плате МЛ. Подход заключается в разложении СКИ на последовательность импульсов (перекрестной наводки, нечетной и четной мод) меньшей амплитуды в меандровой микрополосковой линии (МПЛ) с выравниванием их амплитуд. Это дает ослабление амплитуды СКИ в 2,4 раза в самом простом случае [13]. Однако этого мало для защиты РЭА от мощных СКИ, и лучше использовать несколько витков, соединенных последовательно. Тогда СКИ раскладывается на последовательность импульсов меньшей амплитуды сначала в первом витке, а затем каждый из них – в следующем витке и т.д. Так, использование меандровой МПЛ из 2 витков позволило увеличить ослабление до 5,2 раза, из 3 – 8,1 раза, из 4 – 19,9 раза, а из 5 – 33,16 раза [14, 15]. Однако практическая реализация таких структур в современной РЭА затруднительна из-за больших длин структур и/или диэлектрической проницаемости подложки. Для преодоления этих трудностей возможно использование радиопоглощающего материала (РПМ) и дополнительного сворачивания каждого витка МЛ в неосновные витки. Первое увеличивает разность погонных задержек мод ($\Delta\tau$) при использовании доступных диэлектрических подложек [16], а второе уменьшает габариты конечного устройства и ослабляет СКИ [17]. Между тем, при наличии РПМ в структуре последовательность импульсов разложения на ее выходе изменится в сравнении с предшествующими результатами из [14, 15]. Это потребует формулировки новых условий разложения СКИ для использования при оптимизации. Однако применение этих подходов для структур из двух и более витков ранее не рассматривалось. Поэтому это актуально. Сначала целесообразно усовершенствовать более простую структуру за счет РПМ и сворачивания витков: меандровую МПЛ из двух витков.

Таким образом, цель данной работы – совершенствование меандровой МПЛ из двух витков за счет их сворачивания и покрытия РПМ. Для этого необходимо следующее:

- 1) детальный анализ полученных ранее результатов;

- 2) разработка новых условий разложения СКИ в меандровой МПЛ из двух витков с РПМ;
- 3) структурно-параметрическая оптимизация с учетом доступных технологических возможностей по критериям разложения СКИ и минимизации его амплитуды на выходе линии с РПМ, для последующего изготовления макета;
- 4) разработка и изготовление макета меандровой МПЛ из двух витков с РПМ и оптимальными параметрами и проведение натурального эксперимента;
- 5) сравнение результатов моделирования и эксперимента.

Исходные данные и анализ полученных ранее результатов

Схема соединений меандровой МПЛ из двух витков представлена на рис. 1а. Начало первого витка соединено с источником импульсных сигналов, представленным на схеме идеальным источником э.д.с. и внутренним сопротивлением $R1$. Выход первого витка соединен последовательно с началом второго, а выход второго – с приемным устройством, представленным сопротивлением $R2$. Для минимизации отражений от концов линии, внутреннее сопротивление источника э.д.с. принято равным среднему геометрическому волновых сопротивлений четной и нечетной мод первого витка, а нагрузки – второго. В качестве воздействия выбран импульс в виде трапеции, с э.д.с. 1 В, длительностью плоской вершины 100 пс, а фронта и спада – по 50 пс. Первый и второй витки имеют одинаковые поперечные сечения (рис. 1б).

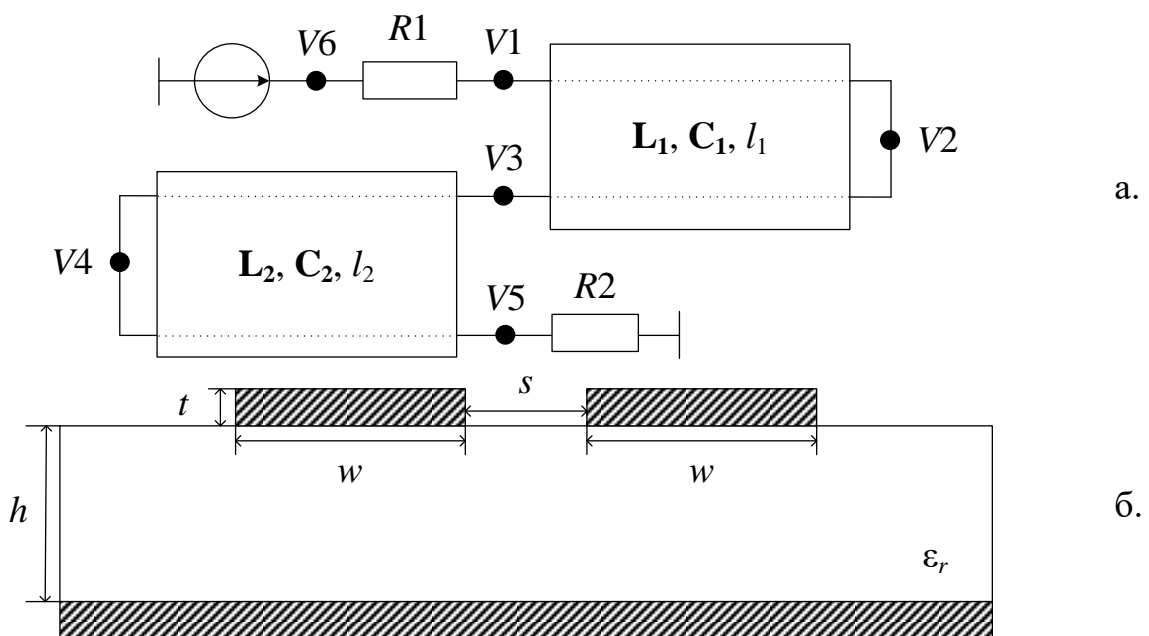


Рис. 1. Схема соединений (а) и поперечное сечение (б) витков

Известно, что в структуре из рис. 1 СКИ раскладывается на 9 импульсов [14] при обеспечении следующих условий:

$$2l_2\tau_{o2} \geq t_{\Sigma}, \quad (1)$$

$$2l_2|\tau_{e2} - \tau_{o2}| \geq t_{\Sigma}. \quad (2)$$

$$2l_1\tau_{o1}-2l_2\tau_{e2}\geq t_{\Sigma}, \quad (3)$$

$$2l_1(\tau_{e1}-\tau_{o1})-2l_2\tau_{e2}\geq t_{\Sigma}, \quad (4)$$

где, l_1 и l_2 – длины первого и второго витков (отрезков) соответственно, τ_e и τ_o – погонные задержки четной и нечетной мод витка соответственно (где индексы 1 и 2 обозначают соответствующий виток), а t_{Σ} – общая длительность воздействия.

Параметры поперечных сечений витков и их длины (где индексы 1 и 2 обозначают соответствующий виток), обеспечивающие выполнение (1)–(4): $w_1=100$ мкм, $w_2=400$ мкм, $t_1=160$ мкм, $t_2=600$ мкм, $h_1=200$ мкм, $h_2=200$ мкм, $s_1=19,78$ мкм, $s_2=20,26$ мкм, $\varepsilon_{r1}=480$, $\varepsilon_{r2}=120$, $l_1=45$ мм, $l_2=25$ мм. Вычислены погонные задержки четной и нечетной мод первого и второго витков [18]: $\tau_{e1}=47,88$ нс/м, $\tau_{e2}=27,88$ нс/м, $\tau_{o1}=23,94$ нс/м, $\tau_{o2}=9,29$ нс/м. При постановке известных переменных в условия (1)–(4) они выполняются с запасом.

Моделирование выполнено в системе TALGAT [18], в которой реализован расчет матриц погонных параметров линий передачи методом моментов, а также временного отклика методом узловых потенциалов [19]. Сравнения с другими системами показали удовлетворительное совпадение результатов и пригодность системы TALGAT для расчета матриц погонных параметров структур различной сложности [20]. Также существуют показательные и общедоступные примеры, сравнивающие результаты системы TALGAT и измерений [21, 22], а также электродинамического анализа [23].

На рис. 2 представлена вычисленная в системе TALGAT форма напряжения на выходе меандровой МПЛ из двух витков при выполнении условий (1)–(4).

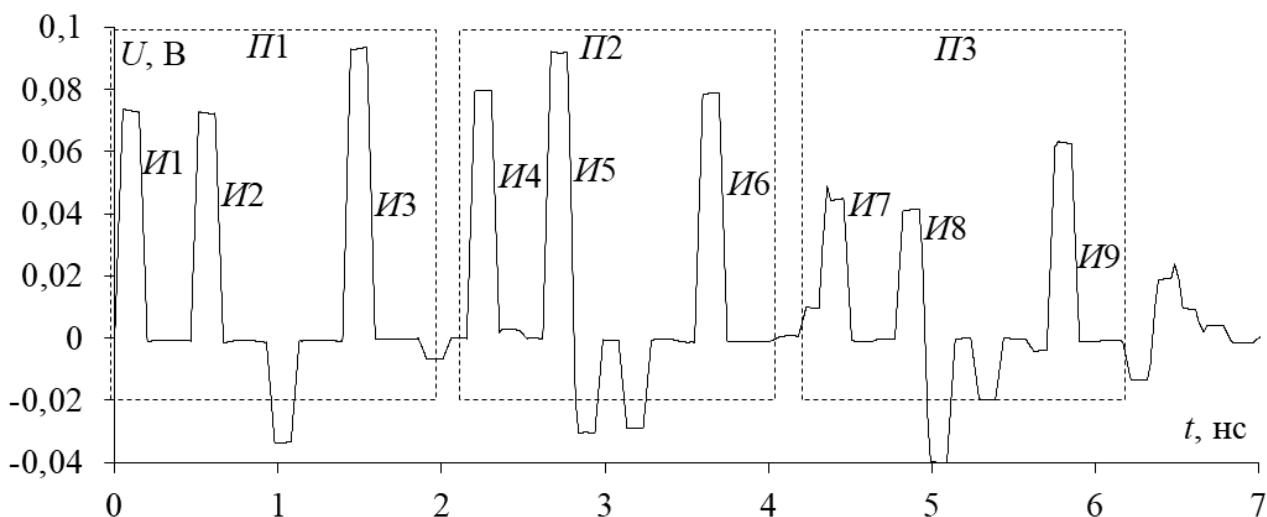


Рис. 2. Форма напряжения на выходе меандровой МПЛ из двух витков при выполнении условий (1)–(4)

Из рис. 2 видно, что СКИ на выходе меандровой МПЛ из двух витков представлен множеством импульсов меньшей амплитуды, не более 94 мВ. Первая последовательность импульсов ($I1$) является результатом разложения импульса перекрестной наводки во втором витке, наведенной из узла $V1$ в узел $V3$, вторая ($I2$) – импульса нечетной моды из первого витка, а третья ($I3$) – импульса четной моды из первого витка во втором витке. Так $I1$ является пере-

крестной наводкой на выходе линии (узел $V5$) от импульса перекрестной наводки, наведенного из узла $V1$ в узел $V3$ и затем в узел $V5$, а $I2$ и $I3$ являются импульсами нечетной и четной мод второго витка от импульса перекрестной наводки в узле $V3$. Импульс $I4$ является перекрестной наводкой в узле $V5$ от импульса нечетной моды из первого витка в узел $V3$, а $I5$ и $I6$ являются импульсами нечетной и четной мод от импульса нечетной моды первого витка. $I7$ является перекрестной наводкой в узле $V5$ от импульса четной моды, пришедшего из первого витка в узел $V3$, а $I8$ и $I9$ являются импульсами нечетной и четной мод от импульса четной моды первого витка. Из рис. 4 также видно, что на выходе линии присутствует множество импульсов меньшей амплитуды (по сравнению с основными импульсами трех последовательностей), вызванных отражениями. В результате ослабление СКИ на выходе меандровой МПЛ из двух витков составило 5,3 раза (относительно $E/2$).

Полученные результаты в [14] ценны для теории, однако с их применением в практической реализации таких устройств защиты возникают проблемы. Например, подложки с $\epsilon_r=480$ или 120, которые были использованы выше, не используются в РЭА. Практичнее использовать FR-4 или даже Arlon AD1000 в качестве подложки, но тогда для выполнения условий (1)–(4) необходимо значительно увеличивать длины витков. При этом габариты устройства защиты будут огромными, что затруднит его использование. В этой связи, примечательно использование двух подходов, упомянутых выше: использование РПМ и дополнительное сворачивание каждого витка МЛ в неосновные витки. В случае нанесения РПМ на каждый виток изменятся их поперечные сечения, а при сворачивании каждого витка в неосновные витки изменится схема соединений устройства. Поперечное сечение, одинаковое для двух несвернутых витков с РПМ, представлено на рис. 3, а схема соединений меандровой МПЛ из двух витков, свернутых в неосновные витки, будет представлена позже, по результатам оптимизации.

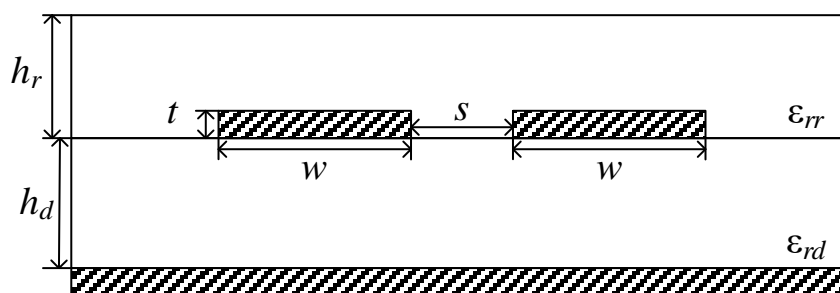


Рис. 3. Поперечное сечение витков меандровой МПЛ, покрытых слоем РПМ

Ширина проводников принята $w=1$ мм для упрощения дальнейшего изготовления и монтажа SMA соединителей. Толщины металлизированного слоя и подложки выбраны из стандартных значений, предоставляемых изготовителями печатных плат: $t=35$ мкм и $h_d=2$ мм соответственно. В качестве основы печатной платы выбран материал FR-4 с $\epsilon_{rd}=4,6$ и $tg\delta=0,017$. Для увеличения Δt ис-

пользован первый подход: в качестве покрывающего слоя выбран поглотитель СВЧ-энергии ЗИПСИЛ 410 РПМ-Л с $\epsilon_{rr}=20,1$, $tg\delta=0,06$ и $\mu_r=3,7$. Его толщина принята $h_r=1$ мм для обеспечения максимальной Δt согласно [16]. Выполнена эвристическая оптимизация параметра s по критерию согласования структуры с трактом 50 Ом. В результате оптимизации найдено значение $s=335$ мкм, при котором для каждого витка $(Z_e Z_o)^{0,5}=49,8$ Ом. Эти параметры далее будем называть исходными, а структуру на рисунке рис. 1а с поперечным сечением каждого витка из рис. 3 – структурой 1.

Результаты моделирования

Вычисленные матрицы **C** и **L** в системе TALGAT, одинаковые для каждого витка на рис. 3:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0,25 & -0,17 \\ -0,17 & 0,25 \end{bmatrix} \text{ нФ/м}, \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0,52 & 0,25 \\ 0,25 & 0,52 \end{bmatrix} \text{ мкГн/м}.$$

Вычисленные погонные задержки четной и нечетной мод, одинаковые для каждого витка: $\tau_e=8,01$ нс/м и $\tau_o=10,61$ нс/м. Отметим, что при отсутствии покрывающего слоя с РПМ в структуре 1 $\tau_o < \tau_e$, однако их разность мала, и поэтому необходимо использовать диэлектрический материал с большой ϵ_{rr} или большую длину отрезков. Как отмечалось ранее, последовательность прихода импульсов в структуре 1 изменится в сравнении с результатами из [14]. С учетом этого сформулированы новые условия полного разложения СКИ в такой структуре:

$$2l_1\tau_{e1} \geq t_{\Sigma}, \tag{5}$$

$$2l_1\tau_{o1} \geq 2l_1\tau_{e1} + t_{\Sigma}, \tag{6}$$

$$2l_2\tau_{e2} \geq 2l_1\tau_{o1} + t_{\Sigma}, \tag{7}$$

$$2l_2\tau_{o2} \geq 2l_2\tau_{e2} + t_{\Sigma}, \tag{8}$$

$$2l_2\tau_{e2} + 2l_1\tau_{e1} \geq 2l_2\tau_{o2} + t_{\Sigma}, \tag{9}$$

$$2l_2\tau_{o2} + 2l_1\tau_{e1} \geq 2l_2\tau_{e2} + 2l_1\tau_{o1} + t_{\Sigma}. \tag{10}$$

Найдены длины витков, при которых условия (5)–(9) выполняются, а (10) – неполностью: $l_1=150$ мм и $l_2=250$ мм. Вычислены задержки основных импульсов разложения на выходе исследуемой структуры по формуле из [24]: $I1=0$ нс, $I2=2,4$ нс, $I3=3,2$ нс, $I4=4$ нс, $I5=5,3$ нс, $I6=6,4$ нс, $I7=7,2$ нс, $I8=7,7$ нс, $I9=8,5$ нс. В этом случае каждый из импульсов будет приходить не раньше предыдущего, за исключением $I8$ вследствие неполного выполнения условия (10). Однако с учетом длительности СКИ он незначительно наложится на спад $I7$ и это не приведет к существенному увеличению результирующей амплитуды. В этой связи увеличивать l_2 или уменьшать l_1 для полного выполнения условий (5)–(10) не имеет смысла. Далее это подробно видно из формы напряжения на рис. 4.

На рис. 4 представлена форма напряжения на выходе структуры 1, вычисленная без учета и с учетом потерь в проводниках и диэлектрике, для наглядности разложения СКИ на 9 импульсов. В качестве воздействия выбран импульс в виде трапеции, с э.д.с. 1 В, длительностью плоской вершины, фронта и спада по 200 пс.

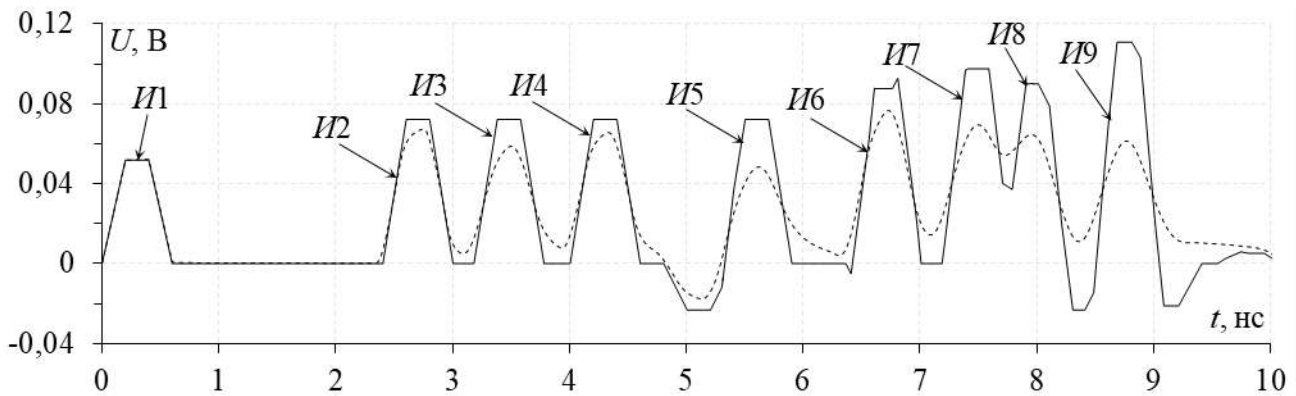


Рис. 3. Форма напряжения на выходе структуры 1, вычисленная с учетом потерь (---) и без него (—)

Из рис. 4 видно, что СКИ в структуре 1 раскладывается на 9 основных импульсов, как и в МПЛ без РПМ [14]. Однако в рассматриваемом случае $I1$ является перекрестной наводкой в узле $V5$ (P_{x2}) от импульса перекрестной наводки, наведенного из узла $V1$ в узел $V3$ (P_{x1}) и затем в узел $V5$, $I2 - P_{x2}$ от четной моды первого витка (P_{e1}), $I3 - P_{x2}$ от нечетной моды первого витка (P_{o1}), $I4 - P_{e2}$ от четной моды второго витка (P_{e2}) от P_{x1} , $I5 - P_{e2}$ от нечетной моды второго витка (P_{o2}) от P_{x1} , $I6 - P_{e2}$ от P_{e1} , $I7 - P_{e2}$ от P_{o1} , $I8 - P_{o2}$ от P_{e1} , $I9 - P_{o2}$ от P_{o1} . Задержки основных импульсов совпадают с рассчитанными выше. Из-за неполного выполнения условия (10) фронт $I8$ накладывается на спад $I7$, но это не приводит к росту амплитуды. Максимальное ослабление СКИ (относительно $E/2$) на выходе структуры 1 при учете потерь составило 6,53 раза (16,3 дБ), а без него – 4,5 раза (13,1 дБ).

Для уменьшения габаритов конечного устройства использован второй подход: сворачивание каждого витка в неосновные витки, как в [17]. Это уменьшает длину структуры за счет увеличения её ширины. Также, в зависимости от расстояния между неосновными витками, на выходе структуры появляются осцилляции, которые могут дополнительно увеличить ослабление СКИ. Выполнена эвристическая структурная оптимизация по габаритному критерию: каждый отрезок на рис. 1а свернут в 5 неосновных полувитков. Схема соединений такой структуры представлена на рис. 4 (где s – расстояние между основной парой свернутых проводников равное 335 мкм, а s_{nv} – расстояние между неосновными полувитками, если рассматривать схему, как вид сверху на структуру). Значение s_{nv} будет выбрано далее по результатам моделирования. Длины таких свернутых витков составили $l_1=30$ мм и $l_2=50$ мм. Далее для простоты структуру на рис. 4 будем называть структурой 2.

На рис. 5 представлены формы напряжений на выходе структуры 1 и структуры 2 при $s_{nv}=2,2, 7,7$ и $13,2$ мм для демонстрации влияния осцилляций на форму напряжения при увеличении связи между неосновными полувитками.

Из рис. 5 видно, что с увеличением s_{nv} структуры 2 улучшается количественное и качественное согласование с формой напряжения на выходе структуры 1. При уменьшении s_{nv} форма напряжения искажается, однако при этом уменьшается амплитуда напряжения. Это обусловлено наложением осцилляций

различной полярности, возникающих из-за связи между неосновными полувитками также, как в [17]. В таблицу 1 сведены амплитуда (U_{\max}) и ослабление СКИ (E_{at}) на выходе структуры 2 при $s_{\text{nv}}=2,2, 7,7$ и $13,2$ мм.

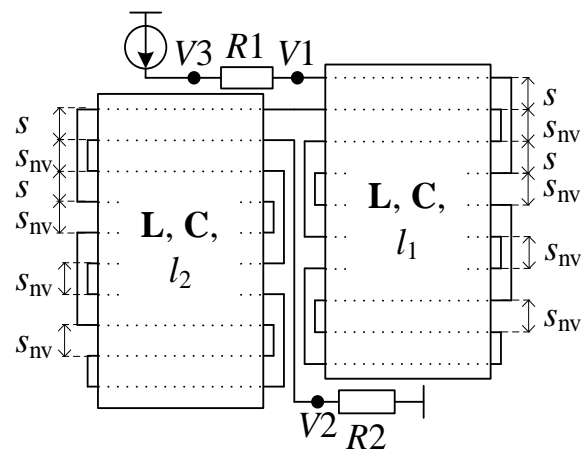


Рис. 4. Схема соединений свернутой меандровой МПЛ из двух витков

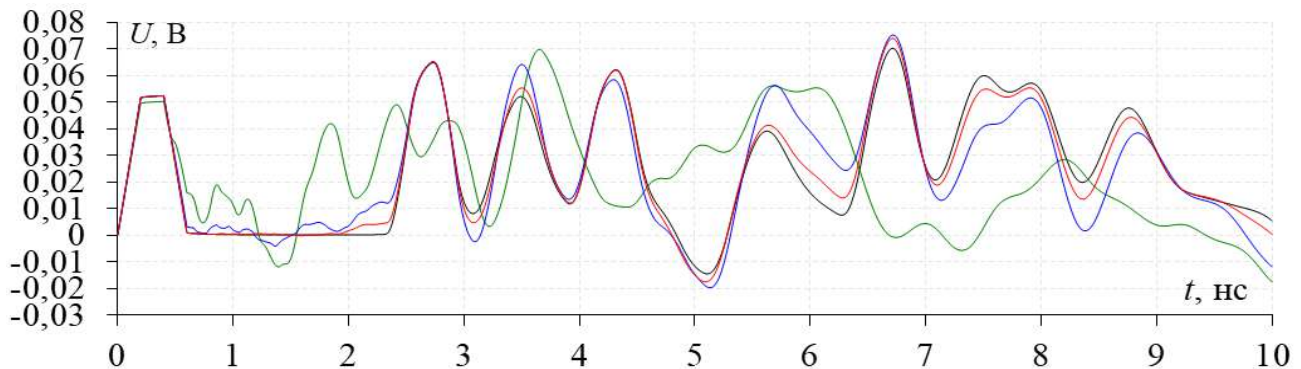


Рис. 5. Формы напряжения на выходе структуры 1 (—) и структуры 2 при $s_{\text{nv}}=2,2$ мм (---), $7,7$ мм (---), $13,2$ мм (---)

Таблица 1 – V_{\max} и E_{at} на выходе структуры 2

s_{nv} , мм	U_{\max} , мВ	E_{at} , дБ
2,2	70	17,1
7,7	75	16,5
13,2	74	16,6

Из таблицы 1 видно, что U_{\max} увеличивается на 7% с ростом s_{nv} от 2,2 до 7,7 мм, а с ростом s_{nv} от 7,7 до 13,2 мм уменьшается на 2%. Тогда для эксперимента оптимально $s_{\text{nv}}=2,2$ мм.

Экспериментальные исследования

Для эксперимента изготовлен макет структуры 2 с $s_{\text{nv}}=2,2$ мм. Для демонстрации печатных дорожек он представлен на рис. 6 без РПМ. Его геометрические параметры и материал подложки аналогичны исходным.

Ширина и длина печатной платы со структурой 2 на рис. 6 составили 46 и 57 мм соответственно. Длина первого отрезка меандровой МПЛ $l_1=21$ мм, а

второго – $l_2=36$ мм. Различие l_1 и l_2 в представленной ранее модели на рис. 4 и изготовленном макете на рис. 6 обусловлено наличием перемычек, длина которых не учитывалась при квазистатическом моделировании.

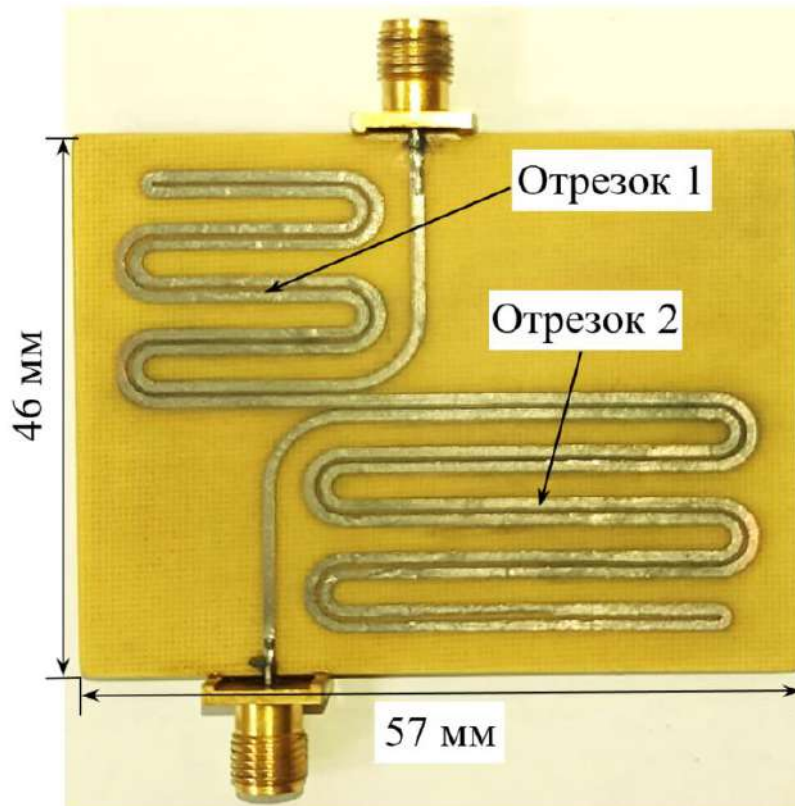


Рис. 6. Изготовленный макет структуры 2

Эксперимент исследования выполнен посредством измерения S -параметров макета (без РПМ и с ним) и их последующего использования для вычисления временного отклика на заданное воздействие. Для надежной фиксации твердого РПМ на макете и устранения воздушных зазоров между радиопоглощающим слоем и платой добавлен жидкий РПМ. Кроме того, для достоверности выполнено электродинамическое моделирование.

Измерение S -параметров выполнено с помощью векторного анализатора цепей Р4М-18 производства фирмы «Микран» с диапазоном рабочих частот от 10 МГц до 20 ГГц. Изготовленный макет подключался к его портам через SMA соединители с использованием высокочастотных кабелей. Измерительная установка для анализа частотных характеристик представлена на рис. 7.

На рис. 8 представлены измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ структуры 2 без и с РПМ для демонстрации полосы пропускания и ослабления помеховых импульсов в диапазоне до 10 ГГц.

Из рис. 8 видно, что при нанесении РПМ на структуру 2 в диапазоне до 3,5 ГГц увеличивается ослабление (например, на частоте 1 ГГц до минус 44 дБ), а в диапазоне от 2 до 10 ГГц значительно меньше резонансов, чем без РПМ. Уменьшается и частота среза: 0,64 ГГц без РПМ и 0,07 ГГц с РПМ.

На рис. 9 представлены формы напряжения на выходе структуры 2 без и с РПМ, вычисленные по ее измеренным S -параметрам и электродинамическим

моделированием. Отметим, что жидкий РПМ отличается по свойствам от твердого. Поэтому это учтено при электродинамическом моделировании: ϵ_{rr} , $tg\delta$ и μ_r слоя с РПМ приняты равными 8, 0,1 и 3,7 соответственно.

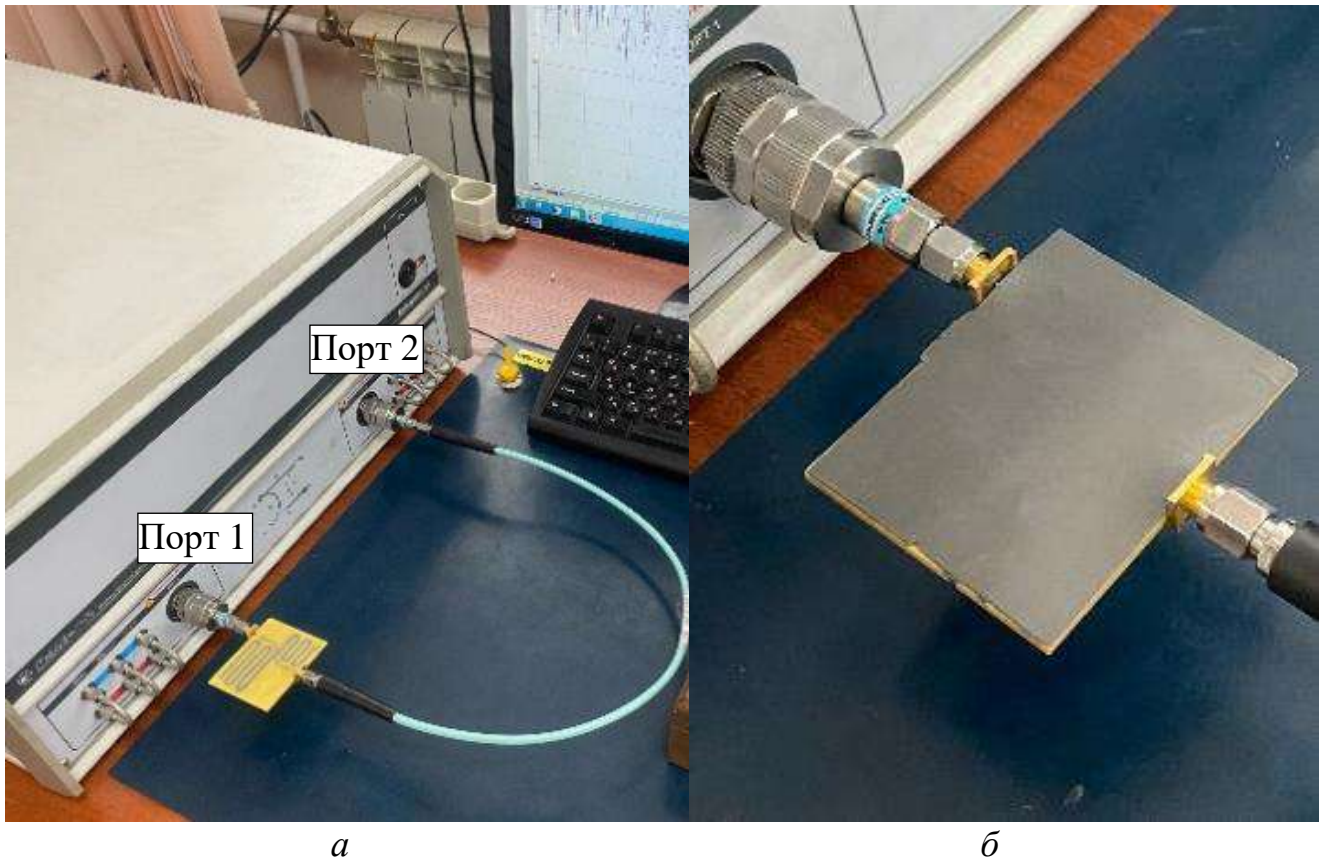


Рис. 7. Экспериментальная установка для измерений структуры 2 без (а) и с (б) РПМ

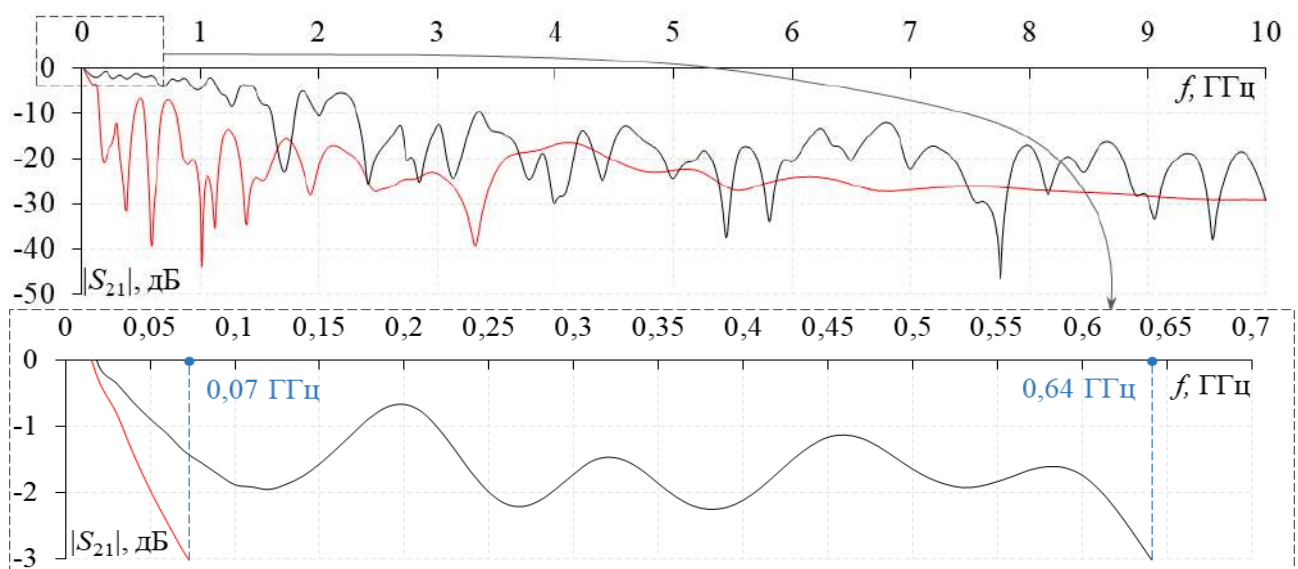


Рис. 8. Измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ структуры 2 без (—) и с (---) РПМ

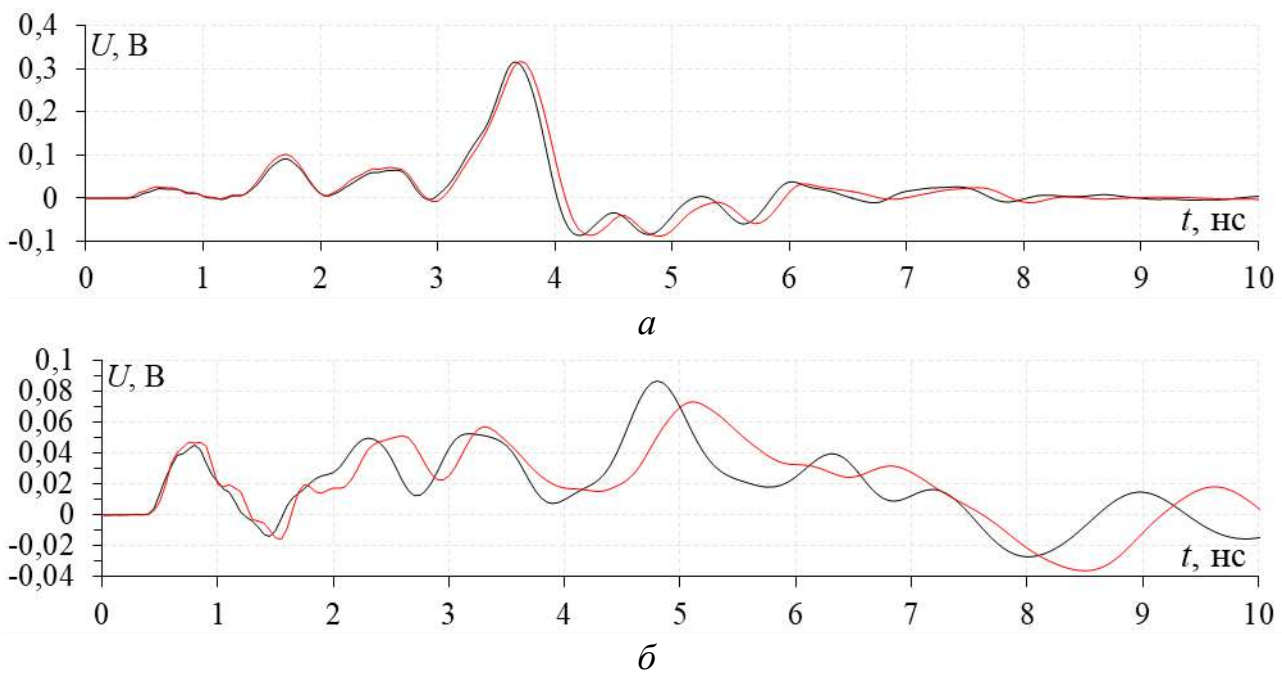


Рис. 9. Измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ структуры 2 без (—) и с (---) РПМ

Из рис. 9 видно, что результаты моделирования и эксперимента хорошо согласуются между собой качественно и количественно. В таблицу 2 сведены U_{\max} и $E_{\text{ат}}$ на выходе структуры 2 для всех случаев из рис. 9.

Таблица 2 – V_{\max} и $E_{\text{ат}}$ на выходе структуры 2 для случаев из рис. 9

Случай	Без РПМ		С РПМ	
	U_{\max} , мВ	$E_{\text{ат}}$, дБ	U_{\max} , мВ	$E_{\text{ат}}$, дБ
Электродинамическое моделирование	318	3,94	70	16,7
Эксперимент	316	3,98	90	15,2

Известно, что СКИ опасен для РЭА [8]. Например, его большая амплитуда может привести к электрическому пробоя, быстрое время нарастания – к искрообразованию, среднедействующее значение напряжения – к выгоранию компонентов и т.д. Поэтому для оценки вероятности возникновения этих факторов при использовании структуры 2 для защиты вычислены N -нормы [25]. В таблице 3 приведены названия, формулы и описания каждой нормы [26, 27].

N -нормы, вычисленные в тракте 50 Ом без линии и в структуре 2 с РПМ и без него, приведены в таблице 4.

Из таблицы 4 видно, что в структуре 2 с РПМ $N1$, $N2$, $N3$ и $N5$ уменьшились в 5,75, 13,16, 1,04 и 2,92 раза соответственно, а $N4$ увеличилась в 1,54 раза. Таким образом, уменьшены вероятности электрического пробоя, дугового разряда, диэлектрического пробоя и выгорания компонентов. Однако, наряду с этим, увеличена вероятность повреждения оборудования за счет выпрямленного общего импульса. В структуре 2 без РПМ результаты получились несколько хуже: $N1$, $N2$, $N3$ и $N5$ уменьшились в 1,58, 1,94, 1,01 и 1,32 раза соответствен-

но, а $N4$ увеличилась в 1,97 раза. Таким образом, для защиты использование структуры 2 с РПМ эффективнее, чем без РПМ.

Таблица 3 – Описание N -норм и их применение

Норма	Название	Формула	Применение
$N1$	Пиковое значение (абсолютное)	$ U(t) _{\max}$	Сбой схемы / электрический пробой / дуговые эффекты
$N2$	Пиковая (абсолютная) производная	$\left \frac{\partial U(t)}{\partial t} \right _{\max}$	Искрение компонента / сбой схемы
$N3$	Пиковый (абсолютный) импульс	$\left \int_0^t U(t) dt \right _{\max}$	Диэлектрический пробой (если U обозначает поле E)
$N4$	Выпрямленный общий импульс	$\int_0^{\infty} U(t) dt$	Повреждение оборудования
$N5$	Квадратный корень интеграла действия	$\left\{ \int_0^{\infty} U(t) ^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}$	Выгорание компонентов

Таблица 4 – Вычисленные N -нормы без структуры 2 и с ней

Норма	$N1 \cdot 10^3$	$N2 \cdot 10^{-9}$	$N3 \cdot 10^{10}$	$N4 \cdot 10^{10}$	$N5 \cdot 10^6$
Без линии	500	2,5	2	2	9,13
На выходе линии с РПМ	87	0,19	1,92	3,09	3,13
На выходе линии без РПМ	316	1,29	1,98	3,94	6,89

Наконец, рассмотрена возможность использования исследуемой линии в сигнальных проводниках. Поскольку важным аспектом является анализ скорости передачи данных по линиям передачи, то необходимо учитывать искажения полезного сигнала в исследуемой структуре. Выбор скорости передачи данных должен соответствовать полосе пропускания структуры – 70 МГц. Этого недостаточно для передачи полезного сигнала на высокой скорости. Тогда для анализа использован источник псевдослучайной двоичной последовательности (PRBS) из 10000 бит с битрейтом интерфейса USB 2.0 «Full-speed» 12 Мбит/с [28]. В таблице 5 представлены значения основных параметров целостности полезного сигнала в структуре 2.

Для наглядности на рисунке 10 представлена глазковая диаграмма исследуемой структуры на которую добавлен контур маски, показывающий требования к форме передаваемого сигнала для USB 2.0 «Full-speed» (с накидным кабелем). Глаз автоматически центрируется и отображается на $2T$ по горизонтальной оси. Цвет указывает на количество пересечений сегмента в плоскости вре-

мя-напряжение. В данном случае глаз остается открытым, поэтому вероятность битовых ошибок низка.

Таблица 5 – Значения основных параметров целостности полезного сигнала

Параметр	Значение
Джиттер, пс	<1
Ширина глаза, нс	83
Высота глаза, В	0,6
Амплитудный шум, мВ	790
Отношение сигнал-шум	10,6

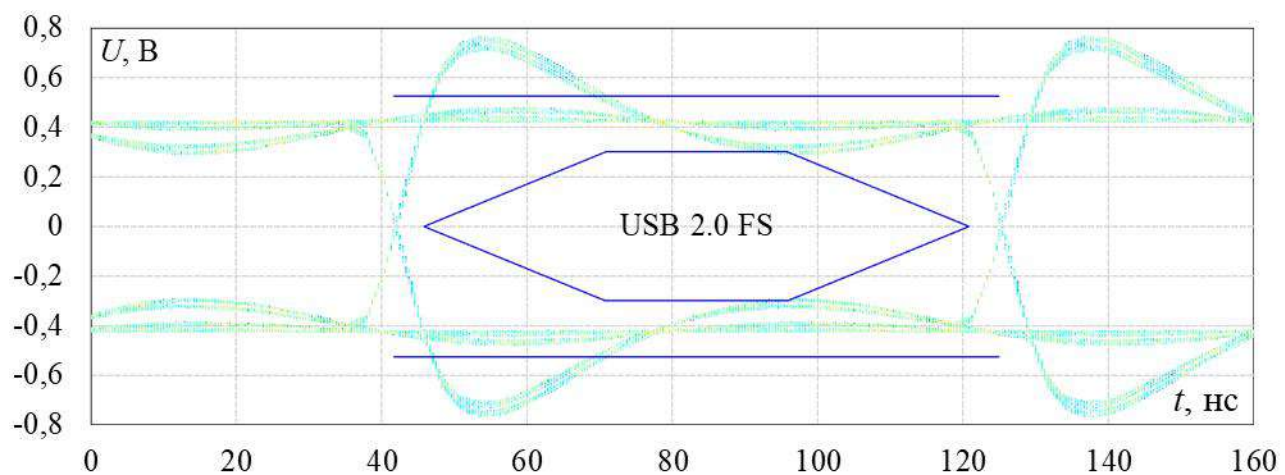


Рис. 10. Глазковая диаграмма структуры 2 с РПМ, полученная при битрейте 12 Мбит/с

На основании полученных результатов определена потенциальная область применения исследуемой структуры. Видно, что наложенная маска не имеет пересечений с глазом. Однако из-за очень близкого расположения маски к краям глаза рассмотрение более высокоскоростных режимов и интерфейсов нецелесообразно. Поэтому рассмотренная структура может использоваться для передачи данных в различных низкоскоростных интерфейсах, например совместно с USB 2.0 «Low-speed» и «Full-speed». Либо исследуемая структура может использоваться в цепях постоянного питания, где фазовые искажения допустимы. Например, согласно стандарту IEC-2221A [28], исследуемая линия может использоваться в цепях с напряжениями до 530 В и токами до 850 мА. Она может использоваться и при более высоких напряжениях, однако для этого необходима дополнительная оптимизация ее параметров (увеличение минимальных зазоров и площади проводников).

Заключение

Выполнена практическая реализация меандровой МПЛ из двух витков уменьшенных размеров. Для этого применены два подхода: использование РПМ и дополнительное сворачивание каждого витка МЛ в неосновные витки. Выявлено, что последовательности разложенных импульсов в структуре с и без

РПМ отличаются. В этой связи, сформулированы новые условия разложения СКИ. Выявлено, что сворачивание каждого витка меандровой МПЛ в неосновные витки приводит к дополнительному ослаблению СКИ. В результате моделирования ослабление СКИ составило 6,53 раза (16,3 дБ). По результатам экспериментальных исследований ослабление СКИ в такой структуре составило 5,8 раза (15,3 дБ). Ширина и длина изготовленного макета составили 46 и 57 мм соответственно, тогда как без РПМ и сворачивания каждого витка в неосновные витки они составляют 10 и 575 мм соответственно. Кроме того, в такой несвернутой структуре без РПМ ослабление СКИ составляет всего 1,6 раза (4,08 дБ). Анализ N -норм структуры показал, что $N1$, $N2$, $N3$ и $N5$ уменьшились в 5,75, 13,16, 1,04 и 2,92 раза соответственно, а $N4$ увеличилась в 1,54 раза. Таким образом, при использовании изготовленного макета для защиты от СКИ могут быть уменьшены вероятности электрического пробоя, дугового разряда, диэлектрического пробоя и выгорания компонентов, но увеличивается вероятность повреждения оборудования. Поэтому необходимо учитывать это при ее использовании в РЭА, где $N5$ критична. Также рассмотрена возможность использования исследуемой линии в сигнальных проводниках. Полоса пропускания устройства составила 70 МГц. На основании полученных результатов рассмотренная структура может использоваться для передачи данных в различных низкоскоростных интерфейсах, например совместно с USB 2.0 «Low-speed» и «Full-speed». Также исследуемая структура может использоваться в цепях питания с напряжениями до 530 В и токами до 850 мА.

В дальнейшем видится перспективным аналогичное исследование меандровой МПЛ, состоящей из трех и более витков, поскольку ослабление СКИ в таких структурах может быть гораздо больше. Кроме того, целесообразно рассмотреть и другие типы линий передачи. В частности, асимметричные структуры позволяют увеличить число импульсов разложения в одном отрезке с трех до четырех, увеличив ослабление.

Создание моделей выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда 22-79-00103, моделирование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2024-0005.

Литература

1. Sabath F. A systematic approach for electromagnetic interference risk management // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. 2017. Vol. 6. No. 4. P. 99–106.
2. Parra N. M. Contribution to the study of the vulnerability of critical systems to intentional electromagnetic interference (IEMI). Ph.D dissertation, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2016.
3. Radasky W. A. Fear of frying electromagnetic weapons threaten our data networks. Here's how to stop them // IEEE Spectrum. 2014. Vol. 51. No. 9. P. 46-51.
4. Nateghi A., Schaarschmidt M., Fisahn S., Garbe H. Susceptibility of power line communication (PLC) channel to ds, am and jamming intentional

electromagnetic interferences // 2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). – Nusa Dua - Bali, Indonesia, 2021. P. 1–4.

5. Devaraj L., Ruddle A. R., Duffy A. P. Electromagnetic risk analysis for EMI impact on functional safety with probabilistic graphical models and fuzzy logic // IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications. 2020. Vol. 2. No. 4. P. 96–100.

6. Oakes B. D., Mattsson L.-G., Näsman P., Glazunov A. A. A systems-based risk assessment framework for intentional electromagnetic interference (IEMI) on critical infrastructures // Risk Analysis. 2018. Vol. 38. No. 6. P. 1279–1305.

7. Белоусов А.О. Подходы к обеспечению электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в составе комплекса функционального поражения беспилотных летательных аппаратов мощным электромагнитным излучением // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 3. С. 134-196.

8. Tsyankenka D., Mordachev V., Sinkevich E., Galenko A., Ma X., Guo W.-Q. UWB EMP susceptibility testing of general-purpose electronic, radio communication, and industrial equipment // 2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). – Nusa Dua - Bali, Indonesia, 2021. P. 1–4.

9. Gizatullin Z. M., Gizatullin R. M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference // Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. Vol. 61. No. 5. P. 546–550.

10. Packiaraj D., Vinoy K. J., Ramesh M., Kalghatgi A. T. Analysis of multi-conductor coupled microstrip lines with an aperture in the ground plane for the design of a broadband filter // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 2013. Vol. 27. No. 7. P. 856–867.

11. He Y., Silva Z., Bergstedt Z., Faia J., Van Hoosier J., Goo Kang S., Shaffer G., Wheeler E., Cracraft M. Common-mode filtering in multilayer printed circuit boards // 2017 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Washington, DC, 2017. P. 288–292.

12. Liu Q., Xu S., Pommerenke D. PCB structures for common mode suppression on differential microstrip lines // 2014 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC). – Raleigh, NC, USA, 2014. P. 533–537.

13. Surovtsev R. S., Nosov A. V., Zabolotsky A.M. Simple method of protection against UWB pulses based on a turn of meander microstrip line // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Erlagol, Russia, 2015. P. 175–177.

14. Nosov A. V., Surovtsev R. S., Gazizov T. R. Propagation of UWB pulse in two turns of meander microstrip line connected in cascade // 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – Tomsk, Russia, 2019. P. 0288–0292.

15. Kim G. Y., Nosov A. V., Surovtsev R. S., Gazizov T. T., Maximov A. E., Conditions for ultrashort pulse decomposition in multi-cascade protection devices

based on meander microstrip lines // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1679. No. 2. P. 022059.

16. Zhechev Y. S., Adnan A. H., Malygin K. P. New technique for improving modal filter performance by using an electromagnetic absorber // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 86663–86670.

17. Malygin K. P., Nosov A. V. Experimental confirmation of ultrashort pulse decomposition in folded meander microstrip lines // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2023. P. 1–7. doi: 10.1109/TEMC.2023.3328551.

18. Газизов Т. Р., Заболотский А. М., Куксенко С. П., Комнатнов М. Е., Суровцев Р. С. Моделирование элементов критичной радиоэлектронной аппаратуры: новые подходы, модели и алгоритмы, их реализация и применение // *Наноиндустрия*. 2020. № 4s. Т. 13. С 366–369.

19. Griffith J. R., Nakhla M. S. Time-domain analysis of lossy coupled transmission lines // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1990. Vol. 38. No. 10. P. 1480–1487.

20. Gazizov T. R., Sagiyeva I. Ye., Kuksenko S. P. Solving the complexity problem in the electronics production process by reducing the sensitivity of transmission line characteristics to their parameter variations // *Complexity*. 2019. Vol. 2019. P. 1–11.

21. Surovtsev R. S., Nosov A. V., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. Possibility of protection against UWB pulses based on a turn of a meander microstrip line // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2017. Vol. 59. No. 6. P. 1864–1871.

22. Gazizov A. T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. Measurement and simulation of time response of printed modal filters with broad-side coupling // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2018. Vol. 63. No. 3. P. 270–276.

23. Orlov P. E., Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. Short pulse propagation along microstrip meander delay lines with design constraints: Comparative analysis of the quasi-static and electromagnetic approaches // *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*. 2016. Vol. 31. No. 3. P. 238–243.

24. Ким Г. Ю., Носов А. В., Суровцев Р. С. Совершенствование анализа распространения импульсных сигналов в структурах из N каскадов связанных линий // *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)*. 2022. Выпуск 3. С. 82–88.

25. Baum C. E. Norms and eigenvector norms // *Mathematics notes* 63. – 1979. P. 1–42.

26. Giri D. High-power electromagnetic radiators: nonlethal weapons and other applications. – 2004, Cambridge, MA: Harvard University Press.

27. IEC 61000-4-33. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-33: Testing and measurement techniques – Measurement methods for high-power transient parameters. 2005. – 69 p.

28. IPC-2221A Generic Standard on Printed Board Design. 2003. – 124 p.

References

1. Sabath F. A systematic approach for electromagnetic interference risk management. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2017, vol. 6, no. 4, pp. 99–106.
2. Parra N. M. Contribution to the study of the vulnerability of critical systems to intentional electromagnetic interference (IEMI). Ph.D dissertation, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2016.
3. Radasky W. A. Fear of frying electromagnetic weapons threaten our data networks. Here's how to stop them. *IEEE Spectrum*. 2014, vol. 51, no. 9, pp. 46-51.
4. Nateghi A., Schaarschmidt M., Fisahn S., Garbe H. Susceptibility of power line communication (PLC) channel to ds, am and jamming intentional electromagnetic interferences. *2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*, Nusa Dua - Bali, Indonesia, 2021. pp. 1–4.
5. Devaraj L., Ruddle A. R., Duffy A. P. Electromagnetic risk analysis for EMI impact on functional safety with probabilistic graphical models and fuzzy logic. *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*, 2020, vol. 2, no. 4, pp. 96–100.
6. Oakes B. D., Mattsson L.-G., Näsman P., Glazunov A. A. A systems-based risk assessment framework for intentional electromagnetic interference (IEMI) on critical infrastructures. *Risk Analysis*, 2018, vol. 38, no. 6, pp. 1279–1305.
7. Belousov A. O. Approaches to ensuring electromagnetic compatibility of radioelectronic equipment as part of the EMI-based functional destruction means for unmanned aerial vehicles. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 3, pp. 134-196 (in Russian).
8. Tsyankenka D., Mordachev V., Sinkevich E., Galenko A., Ma X., Guo W.-Q. UWB EMP susceptibility testing of general-purpose electronic, radio communication, and industrial equipment. *2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*, Nusa Dua - Bali, Indonesia, 2021. pp. 1–4.
9. Gizatullin Z. M., Gizatullin R. M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2016, vol. 61, no. 5, pp. 546–550.
10. Packiaraj D., Vinoy K. J., Ramesh M., Kalghatgi A. T. Analysis of multi-conductor coupled microstrip lines with an aperture in the ground plane for the design of a broadband filter, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2013, vol. 27, no. 7, pp. 856–867.
11. He Y., Silva Z., Bergstedt Z., Faia J., Van Hoosier J., Goo Kang S., Shaffer G., Wheeler E., Cracraft M. Common-mode filtering in multilayer printed circuit boards,” *2017 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Washington, DC, 2017, pp. 288–292.
12. Liu Q., Xu S., Pommerenke D. PCB structures for common mode suppression on differential microstrip lines. *2014 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, Raleigh, NC, USA, 2014. pp. 533–537.

13. Surovtsev R. S., Nosov A. V., Zabolotsky A.M. Simple method of protection against UWB pulses based on a turn of meander microstrip line. *16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, Erlagol, Russia, 2015. pp. 175–177.

14. Nosov A. V., Surovtsev R. S., Gazizov T. R. Propagation of UWB pulse in two turns of meander microstrip line connected in cascade. *2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*, Tomsk, Russia, 2019. pp. 0288–0292.

15. Kim G. Y., Nosov A. V., Surovtsev R. S., Gazizov T. T., Maximov A. E., Conditions for ultrashort pulse decomposition in multi-cascade protection devices based on meander microstrip lines. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1679, no. 2, pp. 1–6.

16. Zhechev Y. S., Adnan A. H., Malygin K. P. New technique for improving modal filter performance by using an electromagnetic absorber. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 86663–86670.

17. Malygin K. P., Nosov A. V. Experimental confirmation of ultrashort pulse decomposition in folded meander microstrip lines. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2023, pp. 1–7. doi: 10.1109/TEMPC.2023.3328551.

18. Gazizov T. R., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P., Komnatnov M. E., Surovtsev R. S. *Modelirovanie elementov kritichnoy radioelektronnoy apparatury: novye podhody, modeli i algoritmy, ih realizaciya i primenenie* [Simulation of radioelectronic equipment elements: new approaches, models and algorithms, their implementation and application]. *Nanoindustriya*, 2020, vol 4s, no 13, pp. 366–369 (in Russian).

19. Griffith J. R., Nakhla M. S. Time-domain analysis of lossy coupled transmission lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1990, vol. 38, no. 10, pp. 1480–1487.

20. Gazizov T. R., Sagiyeva I. Ye., Kuksenko S. P. Solving the complexity problem in the electronics production process by reducing the sensitivity of transmission line characteristics to their parameter variations. *Complexity*, 2019, vol. 2019, pp. 1–11.

21. Surovtsev R. S., Nosov A. V., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. Possibility of protection against UWB pulses based on a turn of a meander microstrip line. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, vol. 59, no. 6, pp. 1864–1871.

22. Gazizov A. T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. Measurement and simulation of time response of printed modal filters with broad-side coupling. *Journal of Communications Technology and Electronic*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 270–276.

23. Orlov P. E., Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. Short pulse propagation along microstrip meander delay lines with design constraints: Comparative analysis of the quasi-static and electromagnetic approaches. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 2016, vol. 31, no. 3, pp. 238–243.

24. Kim G. Y., Nosov A. V., Surovtsev R. S. *Sovershenstvovanie analiza rasprostraneniya impul'snyh signalov v strukturah iz N kaskadov svyazannyh linij*

[Improving the analysis of pulse signal propagation in structures of N cascades of coupled lines]. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES)*, 2022, vol. 3, pp. 82–88 (in Russian).

25. Baum C. E. Norms and eigenvector norms. *Mathematics notes* 63, 1979. P. 1–42.

26. Giri D. High-power electromagnetic radiators: nonlethal weapons and other applications. 2004, Cambridge, MA: Harvard University Press.

27. IEC 61000–4–33. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4–33: Testing and measurement techniques – Measurement methods for high-power transient parameters. 2005, 69 p.

28. IPC-2221A Generic Standard on Printed Board Design. 2003, 124 p.

Статья поступила 02 марта 2024 г.

Информация об авторах

Ким Георгий Юрьевич – аспирант кафедры телевидения и управления. Младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость. E-mail: kimgeoju@gmail.com

Носов Александр Вячеславович – кандидат технических наук. Докторант. Старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость. E-mail: alexns2094@gmail.com

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

Decomposition of the ultrashort pulse in a meander microstrip line of two turns

G. Y. Kim, A. V. Nosov

Problem statement: with the development of electronic equipment (REE), its performance increases, operating voltages decrease and the routing density of printed circuit boards increases, which increases the susceptibility of REE to various electromagnetic influences. It is known that electromagnetic waves can pose a threat to modern electronic equipment. Thus, generators of powerful electromagnetic waves can be used by attackers to destabilize or completely disable critical infrastructure. An ultrashort pulse (USP) poses a serious threat to REE. There are many traditional methods of protection against USP, but they have disadvantages: low power and speed, limited response life, and also low radiation resistance due to the semiconductor components in their composition. This is unacceptable, for example, for the space industry, due to the need to increase the active life of spacecraft to 15 years. In this regard, it is necessary to search for new approaches to the protection of REE that are free of such shortcomings. One of the promising approaches to protecting REE is an approach based on the attenuation of USP in a meander microstrip line (MSL) of two or more turns. However, the practical implementation of such structures in modern REE is difficult due to

the large lengths of the structures and/or the dielectric permittivity of the substrate. Therefore, their improvement is necessary. First, it is advisable to consider a simpler structure (of two turns) using a radio-absorbing material (RAM) and folding the turns. **Purpose:** improvement of meander MPL of two turns due to their folding and coating with RPM. **Methods:** analysis, structural-parametric optimization by heuristic search, as well as computational (based on various numerical methods) and natural experiments. **Novelty:** to further weaken the USP, enable practical implementation, and reduce the dimensions of the device, the rolling of each turn of the line into minor turns and a radio-absorbing material (RAM) as a covering layer were used for the first time. In addition, for the first time, the conditions for the decomposition of the USP in a meander MSL consisting of two folded turns coated RPM have been formulated. **Results:** it was revealed that the arrival sequences of decomposed pulses in structures with and without RPM are different. In this regard, new conditions for the decomposition of the USP are formulated. It was revealed that the folding of each turn of the meander MSL into non-core turns leads to an additional attenuation of the USP. A prototype of a meander MSL was made from two turns of reduced dimensions. The measured attenuation of the USP in it was 5.8 times (15.3 dB). The width and length of the layout were 46 and 57 mm, respectively, while without RPM and folding each turn into non-main turns they were 10 and 575 mm, respectively. Analysis of N -norms of the structure showed that N_1 , N_2 , N_3 and N_5 decreased by 5.75, 13.16, 1.04 and 2.92 times, respectively, and N_4 increased by 1.54 times. **Practical relevance:** the solution can be used in critical REE for protection against USP, for example, for data transmission in various low-speed interfaces, as well as in power circuits with voltages up to 530 V and currents up to 850 mA.

Key words: ultrashort pulse, meander line, even mode, odd mode, electromagnetic compatibility, protection.

Information about Authors

Georgy Yuryevich Kim – graduate student of the Department of Television and Control. Assistant professor at the research laboratory «Fundamental Research on Electromagnetic Compatibility». Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility. E-mail: kimgioju@gmail.com

Alexander Vyacheslavovich Nosov – Ph.D. of Engineering Sciences. Doctoral candidate. Senior research officer at the Department of Television and Control. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility. E-mail: alexns2094@gmail.com

Address: Russia, 634045, Tomsk, Lenina prospekt, 40.